

**ESCUELA POLITÉCNICA DE LA
UNIVERSIDAD CARLOS III DE
MADRID**



PROYECTO FIN DE CARRERA

*“Grabación de una base de datos de instrumentos
musicales de la familia de la cuerda frotada y
estudio de su directividad”*

Autor: Diego José Pérez González

Tutor: Luis Antonio Azpicueta Ruiz

1. Introducción.....	5
2. Estado del arte y justificación de la necesidad del estudio	7
1. <i>Acerca de la investigación sobre acústica de instrumentos musicales.....</i>	<i>7</i>
2. <i>Investigación acústica desigual en la familia de la cuerda frotada</i>	<i>9</i>
3. <i>Estudios previos acerca de la directividad de la familia</i>	<i>11</i>
3. Planteamiento del problema: objetivos y preguntas que guiaron la realización del proyecto	15
4. Metodología general: estrategia de indagación y método de recolección de datos	16
5. Instrumentos de cuerda frotada:	19
1. <i>Influencia de la rigidez de las cuerdas.....</i>	<i>24</i>
2. <i>Parciales, armónicos y sobretonos</i>	<i>24</i>
3. <i>Pérdidas por amortiguamiento</i>	<i>25</i>
4. <i>Vibraciones transversales de una cuerda</i>	<i>31</i>
5. <i>Reflexión en los extremos fijos o libres.....</i>	<i>33</i>
6. <i>Soluciones armónicas simples de la ecuación de la onda</i>	<i>35</i>
7. <i>Ondas estacionarias.....</i>	<i>35</i>
8. <i>Pizzicato: Análisis en los dominios temporal y frecuencial.....</i>	<i>38</i>
9. <i>Vibraciones longitudinales de una cuerda.....</i>	<i>42</i>
10. <i>Breve evolución histórica de los instrumentos de la familia de la cuerda frotada.....</i>	<i>43</i>
11. <i>Construcción de los instrumentos de cuerda frotada.....</i>	<i>45</i>
<i>La barra armónica y el alma.....</i>	<i>47</i>
<i>El puente y el uso de la sordina</i>	<i>49</i>

12.	<i>Análisis acústico de los recursos y modos de producción del sonido en instrumentos de cuerda frotada.....</i>	54
	<i>Vibrato.....</i>	54
	<i>Velocidad del arco y fuerza en el arco.....</i>	55
	<i>Influencia de la cantidad de cerdas usadas en la producción del sonido....</i>	57
	<i>El papel acústico de la resina</i>	58
13.	<i>Cuidado de los instrumentos desde el punto de vista acústico</i>	59
6.	Estudio de la Directividad	62
1.	<i>Directividad.....</i>	62
	<i>Algunas consideraciones sobre radiación esférica y el entorno de medición</i>	63
2.	<i>Elección de equipos y esquema de conexiones</i>	66
	<i>Esquema de conexiones.....</i>	71
3.	<i>Cálculo</i>	74
	<i>Análisis FFT y CPB.....</i>	75
4.	<i>Dependencia frecuencial de la directividad.....</i>	77
7.	Descripción del método de grabación de la base de datos y del estudio de la directividad.....	79
1.	<i>Normativas técnicas</i>	79
2.	<i>Configuración de los analizadores y funciones de medición.....</i>	80
3.	<i>Método de grabación y registro de medidas</i>	82
	<i>Control de afinación.....</i>	82
	<i>Grabación de la BBDD: ¿Qué debe tocar el músico? ¿Cómo lo toca?</i>	83
	<i>Recursos humanos y organización de las sesiones:.....</i>	85
4.	<i>Colocación del músico y el micrófono</i>	89
	<i>Medida de la directividad</i>	89

5.	<i>Estimación del error y colocación de los micrófonos para la medida de directividad.....</i>	<i>92</i>
	<i>¿Qué tocan los músicos?.....</i>	<i>98</i>
	<i>Ubicación del micrófono para la grabación de la base de datos.....</i>	<i>99</i>
6.	<i>Análisis de resultados sobre la medida de la directividad.....</i>	<i>99</i>
	<i>Análisis de curvas polares.....</i>	<i>105</i>
8.	Conclusiones y líneas futuras	112
	Anexo 1: Escalas musicales y temperamento	116
1.	<i>La escala de la Afinación Justa.....</i>	<i>117</i>
2.	<i>La escala Pitagórica</i>	<i>120</i>
3.	<i>Temperamento.....</i>	<i>123</i>
	<i>El temperamento igual.....</i>	<i>126</i>
4.	<i>Entonación</i>	<i>128</i>
	Anexo 2: Especificaciones técnicas de los equipos	130
	Anexo 3: Ficha identificación	146
	Anexo 4: Gráficas de estimación del error al posicionar el micrófono.....	150
	Anexo 5: Diagramas polares	151
	Anexo 6: Presupuesto del proyecto	152
	Bibliografía.....	154

1. Introducción

Este Proyecto Final de Carrera surge en paralelo al proyecto denominado “*Grabación de una base de datos de instrumentos musicales en cámara anecoica*” realizado por Adrián Fuentes Utrilla (Fuentes, 2008), con el propósito de generar una base de datos de instrumentos musicales en cámara anecoica. En ese proyecto se realizó la toma de datos de registros sonoros de instrumentos de la familia de viento madera y viento metal. El presente trabajo, por una parte completa esa base de datos al obtener registros de los instrumentos de la familia de la cuerda frotada, y por otra, amplía sus objetivos al centrarse en un análisis de la directividad de los instrumentos de esta familia.

Las condiciones técnicas que ofrece el laboratorio de audio y electroacústica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid permite que hayamos llevado a cabo este proyecto, que de otra forma habría sido muy costoso realizar tanto en fondos como en recursos humanos. Sin embargo, los medios con que hemos contado han condicionado la realización del proyecto, tanto en su fase teórica como en la propia toma de medidas. En este sentido, además, al no existir una norma o estándar técnico que fije unos procedimientos sistemáticos para llevar a cabo este tipo de medidas, hemos optado por desarrollar una posible configuración teniendo en cuenta las recomendaciones existentes para otros tipos de fuentes acústicas y los recursos de los que disponemos en el laboratorio.

Las aplicaciones de una base de datos de estas características fueron ampliamente detalladas por Adrián Fuentes, destacando la ayuda en el diseño acústico de espacios, el modelado físico de instrumentos, auralización y ecualización de la señal musical, entre otras. Además, el estudio de la directividad resulta importante por lo siguiente:

- 1) Conocer mejor el comportamiento acústico de estos instrumentos.
- 2) Diseñar estrategias de captación de sonido que optimicen la calidad de la toma de sonido en sistemas de grabación multicanal y los recursos materiales disponibles para llevarla a cabo, minimizando la influencia de ruidos indeseables, reverberación y permitiendo separar distintas fuentes.

- 3) Evaluar los diseños de los instrumentos en función de sus características directivas.
- 4) Identificar las frecuencias en las que cambian esos patrones de directividad y en qué medida lo hacen.
- 5) Poder recrear, mediante sistemas de altavoces, las condiciones variables de directividad que afectan a la reproducción de sonidos previamente grabados de estos instrumentos, con el objetivo de lograr la mayor fidelidad posible a las señales originales.
- 6) Contribuir a procesos de auralización en los que el sonido pueda ser manipulado para generar posibles aplicaciones donde adopte las características de espacios determinados, optimizando las representaciones espaciales en auralización de espacios.
- 7) Servir como base para futuros diseños de sistemas de realidad virtual y síntesis sonora mediante computación.
- 8) Desarrollar la técnica sonora y expresiva de estos instrumentos, mediante el conocimiento por parte de los músicos de las características de emisión del sonido que pueden lograr en determinados rangos frecuenciales.
- 9) Diseñar agrupaciones sonoras atendiendo a la directividad de cada instrumento, de manera que el conjunto sea más o menos directivo según sea su orientación y colocación al tocar.

En lo que sigue, intentaremos ofrecer una visión completa acerca de por qué llevar a cabo este estudio, qué trabajos hemos tomado como referentes, cómo hemos solucionado diversos problemas técnicos y llevado a cabo el proceso de toma de medidas. Para ello previamente será necesario realizar una revisión de diversas cuestiones acústicas sobre los instrumentos de la familia de la cuerda frotada y conocer sus características constructivas y las patologías sonoras que aparecen en estos instrumentos, puesto que todo ello influirá en el resultado finalmente registrado.

Finalmente, ofreceremos un análisis de los resultados obtenidos y reflexionaremos sobre las consecuencias prácticas que puede tener todo ello para músicos, técnicos de sonido e ingenieros de sonido.

2. Estado del arte y justificación de la necesidad del estudio

1. Acerca de la investigación sobre acústica de instrumentos musicales

El interés por las características sonoras de los instrumentos musicales no es un tema nuevo. Al tiempo que los seres humanos desarrollaban sus capacidades técnicas y expresivas, surgió la necesidad de comunicarse a través de los sonidos y con ello la utilización de determinados artefactos con los que producirlos. Evidentemente esa utilización conllevaba una reflexión acerca de la forma y modo de empleo de esos instrumentos, aunque tal conocimiento no fuese estructurado sistemáticamente ni se aplicase el razonamiento científico para analizarlo.

Según Carleen Hutchins (Hutchins, 1983) las investigaciones sobre los orígenes acústicos de la familia de la cuerda frotada actual parten del siglo VI a.C. con los trabajos de Pitágoras. Continuadores de esa investigación acústica son, en lo relativo al comportamiento de las cuerdas vibrantes, Galileo Galilei (1564-1642) y Marin Mersenne (1588-1648). Mersenne discute en su obra “*Harmonie Universelle*” sobre la acústica de los instrumentos de cuerda y apostilla que él es capaz de oír al menos cuatro sobretonos al escuchar una cuerda vibrar. La acción de tirar y empujar la cuerda con el arco es abordada por primera vez por Jean-Marie Duhamel (1797-1872).

En la primera mitad del siglo XIX se llevan a cabo diversos estudios sobre la física del violín por parte de Felix Savart (1791-1841) y es el primero en incorporar a estos trabajos la perspectiva de los luthiers, artesanos constructores de estos instrumentos. Jean Baptiste Vuillaume (1798-1875) colabora con él no solo intercambiando ideas sino llevando a la práctica las construcciones experimentales que propone Savart. Así construye el octobajo de doce pies, un instrumento de proporciones gigantescas que precisaba de un complejo sistema de pedales y palancas para poder modificar la longitud de sus tres únicas cuerdas.



Figura 1: Octobajo

Savart estudió también las vibraciones de las tapas frontal y trasera en violines Stradivarius y Guarnerius ayudado por Villaume, deduciendo como resultado de esos experimentos cuál era exactamente la labor del alma.

Herman von Helmholtz (1821-1894) contribuye al estudio de los instrumentos de cuerda mediante la realización de experimentos físicos y psicoacústicos. Escuchando a través de resonadores esféricos de distintos tamaños (resonadores de Helmholtz) identificó distintos parciales (entendiendo como tales tanto al sonido fundamental como a los sobretonos) en los sonidos emitidos por un violín, entre otros instrumentos. Usando el microscopio de vibraciones propuesto por Lissajous (1822-1880), Helmholtz observó el movimiento resultante de la acción de “pegar y deslizar” el arco sobre la cuerda, de donde dedujo la forma de onda en diente de sierra en el desplazamiento de la cuerda, comúnmente descrito como movimiento de Helmholtz.

Krigar-Menzel y A. Raps (1891) observaron distintos tipos de movimientos de Helmholtz usando un ingenioso método de grabación óptica y, posteriormente, se abordó el estudio teórico del movimiento de una cuerda frotada con un arco por Raman (1888-1970). Raman usó una máquina que permitía simular el efecto que tenía frotar una cuerda con un arco, mostrando cómo la mínima fuerza necesaria para desplazar el

arco sobre la cuerda con un movimiento estable varía de forma directa con la velocidad del arco e inversamente con el cuadrado de la distancia al puente.

Durante la década de 1930 a 1940 la investigación acústica sobre los instrumentos de cuerda frotada continúa en Alemania de la mano de Erwin Meyer, Hermann Backhaus y Hermann Meinel. Después de la II Guerra Mundial, retoman estos trabajos Werner Lottermoser, Frieder Eggers y Jürgen Meyer. Particularmente significativo ha sido el trabajo de Lothar Cremer (1905-1990), así como el de sus estudiantes y compañeros como J. Beldie, H. Lazarus, F. Lehringer, H. Müller, W. Reinecke y E. Völker. Su obra fundamental está titulada “La física del violín”, referencia en la materia.

En la investigación de la acústica de los instrumentos de cuerda frotada en EEUU destaca Frederick Saunders (1875-1963), quien, como Raman, es más conocido por sus trabajos en espectroscopía óptica. Saunders realizó comparaciones acústicas de varios violines, antiguos y modernos, y desarrolló un nuevo artilugio mecánico para simular la acción del arco sobre una cuerda. Junto con Carleen Hutchins, John Schelleng y Robert Fryxel fundó la Catgut Acoustical Society, una organización que aún promueve la investigación sobre la acústica del violín y a la que se debe la aparición en 1967 de una nueva familia de ocho instrumentos escalados que recogen esas investigaciones.

2. Investigación acústica desigual en la familia de la cuerda frotada

Las investigaciones sobre instrumentos de cuerda frotada se han centrado históricamente en el violín, de manera que tan sólo un 1 o 2% de toda la literatura existente está dedicada a los otros miembros de la familia: viola, violonchelo y contrabajo. La mayoría de los autores justifican esa escasez de investigaciones debido a que es posible aplicar, hasta cierto punto, un principio de escalabilidad entre los miembros de la familia, extendiendo por tanto los resultados del violín al resto de instrumentos. Sin embargo, este principio tiene numerosas limitaciones y puntos críticos, por lo que en un trabajo como éste debemos reconsiderar, instrumento por instrumento, todos aquellos factores que afectan a esas analogías entre miembros de la familia.

La viola está afinada una quinta por debajo del violín (DO₃, SOL₃, RE₄, LA₄). Sin embargo, sus dimensiones son sólo un 15% mayores que las del violín y las resonancias

principales tienen lugar entre un 20 y un 40 % por debajo de las del violín. La resonancia debida al aire contenido por la caja y la principal resonancia del cuerpo del instrumento tienden a situarse entre las frecuencias de las cuerdas al aire, en lugar de sobre ellas, como ocurre en el violín, argumento suficiente para considerarlo un instrumento no escalado, sino distinto acústicamente.

El violonchelo también parte en su diseño general de un escalado del violín (aproximadamente el doble de todas sus dimensiones) y se afina una octava por debajo de la viola, es decir, DO₂, SOL₂, RE₃, LA₃. Sin embargo, la altura de los aros no guarda esa proporción, ya que ésta es unas cuatro veces mayor. La menor de sus resonancias (debidas al aire que alberga en su caja de resonancia) está cerca de la frecuencia de la segunda cuerda al aire, como en el violín. En cuanto a sus modos de vibración, éstos se asemejan al primer modo de la tapa y tercer modo del cuerpo del violín, situados cerca de la tercera y cuarta cuerda (Bynum & Rossing, 1997). Si exceptuamos el modo (0,0) de la cavidad de aire de la caja de resonancia, también llamado modo de Helmholtz, que se sitúa en 104 Hz, las frecuencias del resto de modos son similares en un 45% a aquellas obtenidas del análisis por holografía del violín, lo que no nos puede sorprender ya que sus dimensiones, como hemos dicho, son aproximadamente el doble.

Por otro lado, el contrabajo es el miembro de la familia más alejado en tamaño y diseño del violín y, por ende, el que adolece de un mejor conocimiento acústico, pues los resultados de las investigaciones realizadas sobre el violín no son tan fácilmente extrapolables a él. De la familia anterior de la viola de gamba conserva los hombros caídos, la tapa trasera plana (en algunos instrumentos) y la afinación por cuartas en lugar de por quintas (MI₁, LA₁, RE₂, SOL₂ en la afinación de orquesta y un tono más alto, FA#₁, SI₁, MI₂, LA₂, en afinación de solista). En contrabajos de orquesta, es habitual encontrar también cinco cuerdas, en lugar de cuatro, de forma que se añade una tercera por debajo de la cuerda más grave, esto es un DO₁. Además otra reminiscencia que queda de la viola de gamba es el modo de coger el arco alemán, con la mano por debajo de la nuez. Tanto la resonancia del aire que alberga la caja de resonancia, que ronda los 60 Hz, como la resonancia del cuerpo del contrabajo, unos 98 Hz, se identifican fácilmente. Entre los 120 y 400 Hz se dan una serie de resonancias del cuerpo del contrabajo y la resonancia principal debida al puente se ubica en los 400 Hz. La máxima respuesta en frecuencia tiene lugar alrededor de los 600 Hz, atenuándose muy rápidamente tras su emisión. Otro aspecto a considerar es que la nota más grave de

un contrabajo de cuatro cuerdas con afinación de orquesta, el MI_1 , tiene una frecuencia de 41 Hz y en ese rango de frecuencias hay dos o más parciales en cada banda crítica, lo que hace que la afinación sea percibida con dificultades por oídos poco entrenados y le confiera a nivel subjetivo cierta aspereza al sonido. Esa aspereza inicial puede eliminarse si por la construcción del instrumento aparecen una serie de picos entre los 120 y 220 Hz que hacen que actúe como un filtro combinado que atenúa esos parciales, lo que contribuye a lograr un sonido de mejor calidad y hace que hablemos de instrumentos de mayor calidad (Askenfelt, 1982).

3. Estudios previos acerca de la directividad de la familia

Dentro del terreno del estudio de la directividad de instrumentos, destacan los trabajos de Fletcher y Rossing (Fletcher & Rossing, 1998), quienes reproducen las medidas sobre el violín y el violonchelo realizadas por Meyer (Meyer, 1972). En estos estudios, se pone de manifiesto el incremento de la direccionalidad del sonido producido al incrementar la frecuencia y la dificultad de su estudio, derivada de la forma de tocar de los músicos quienes combinan un uso frecuente del vibrato (que se traduce en una rápida variación de la frecuencia) con movimientos expresivos que realizan con todo su cuerpo, y que en la práctica provocan que el violín no quede siempre en la misma posición.

Más recientemente Weinreich y Arnold (G. Weinreich & Arnold, 1982) y Weinreich (G. Weinreich, 1985) en solitario, han realizado estudios experimentales y teóricos sobre la radiación en baja frecuencia (por debajo de 1 kHz) en un violín suspendido. Para ello, hicieron uso del principio de reciprocidad acústica, basado en el hecho de que la amplitud de la vibración en la parte superior del puente producido por las ondas sonoras provenientes de la vibración de las cuerdas, está directamente relacionada con el sonido radiado al aplicar una fuerza al violín en el mismo punto. De esta forma, el sonido de un violín grabado es emitido por un array de altavoces que simulan las condiciones esféricas del campo sonoro y la velocidad inducida en el puente.

Bissinger y Gregorian (Bissinger & Gregorian, 2003) llevaron a cabo una amplia investigación acerca de la radiación de violines suspendidos en el aire y sostenidos por violinistas, incluyendo medidas por encima de 1 kHz. Estos autores correlacionaron el sonido radiado por un gran número de puntos en una esfera rodeando el violín, con

medidas de la admitancia (recíproca de la impedancia) de entrada en el puente y la vibración generada en la superficie del violín. La principal conclusión de este trabajo fue que, a pesar de que el comportamiento como resonador de Helmholtz de baja frecuencia contribuye en gran medida al sonido radiado, es poco significativo frente a la alta movilidad de las tapas del instrumento o la admitancia medida en el puente. Además no se pudo encontrar una correlación significativa entre las frecuencias y los valores de la Q^1 en las frecuencias excitadas (por debajo de 1 kHz) y la calidad percibida de los instrumentos investigados. Por encima de 1kHz, los modos de vibración se solapaban fuertemente, por lo que se concluyó que resulta más apropiado comparar la frecuencia promedio de las características globales. Las medidas muestran que la fracción de energía radiada por estos modos se incrementa monótonamente desde cerca de 0 en baja frecuencia al 100% en torno a 4 kHz y por encima de esta frecuencia, donde casi toda la energía se pierde a través de la vibración, en lugar de en la amortiguación interna. Por último, este estudio apunta a que existe una alta correlación entre las características acústicas medidas con los resultados obtenidos a partir de un análisis basado en el método de elementos finitos. Esto significa en la práctica que, si se produce suficiente información sobre las características sonoras de un instrumento (es decir, si podemos oír un número significativo de muestras sonoras producidas con un instrumento), se puede hacer una valoración subjetiva de las propiedades sonoras del instrumento analizado que coincidirá en gran medida con las conclusiones empíricas derivadas de un estudio físico-acústico de ese instrumento.

Por otro lado, a pesar de que la potencia acústica radiada promediada en un rango de frecuencias dadas es una importante característica del sonido de un instrumento, la intensidad en una determinada frecuencia por encima de 1 kHz, puede variar enormemente de una nota a otra. Esto es ilustrado por Weinreich (G. Weinreich, 1997), al comparar las intensidades de sonido producidos en el interior de una cámara anecoica, siguiendo como referencia la dirección marcada por el mástil del instrumento y la perpendicular a la tapa frontal. Este estudio lo realiza para cuatro violines de diferentes calidades, donde 0 dB representa una respuesta isótropa:

¹ También llamado factor de directividad Q, DRF o índice de directividad, expresa la energía entregada en una determinada dirección frente al promedio en todo el espacio.

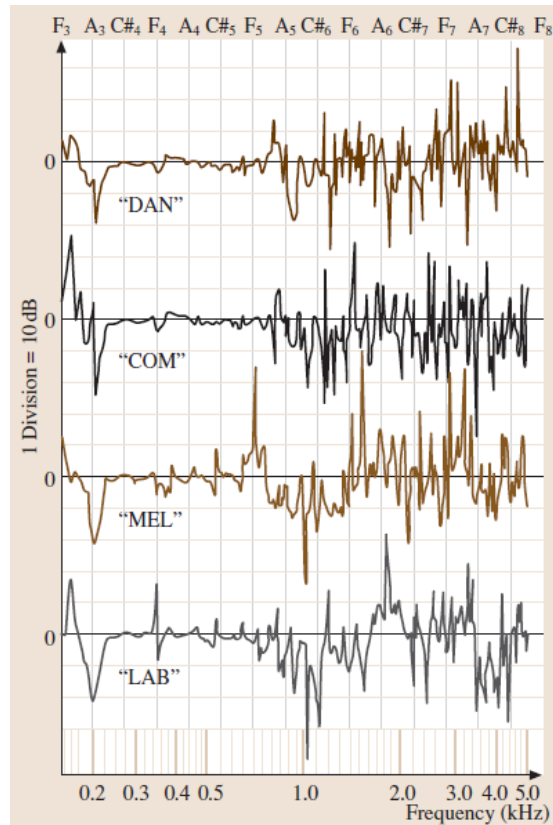


Figura 2: Comparativa entre cuatro violines en una cámara anecoica (G. Weinreich, 1997), donde DAN es un instrumento moderno profesional, COM un violín fabricado con material sintético laminado, MEL un instrumento de estudiante de alta calidad y LAB un violín de estudiante ordinario

Por encima de 1 kHz, las longitudes de onda de las ondas derivadas de la flexión de las tapas del instrumento, comienzan a ser comparables a la longitud de onda del sonido radiado. Esto conduce a un fuerte efecto de difracción en el sonido radiado, que fluctúa de manera muy importante con la dirección en función de los modos excitados. Así pues, en un punto determinado de escucha, el contenido espectral de un violín tocado con un arco varía según toque una nota u otra, de forma parecida a como sucede con una sola nota tocada con vibrato y la modulación en frecuencia derivada de ello. El contenido espectral también va a variar de un punto a otro alrededor del violín, especialmente si el músico se mueve mientras toca. Weinreich ha subrayado la importancia de tales efectos en la producción de una sensación mayor de “presencia” y “vibración” en el sonido percibido de un violín real, frente a su reproducción a través de fuentes isótropas, como un solo altavoz. A este autor se debe el término “color direccional tonal” (en inglés, *directional tone colour*), que pretende describir tales efectos. A modo de curiosidad, complementariamente ha diseñado también un sistema

de altavoces basado en estos principios, capaz de reproducir con un alto grado de realismo el sonido producido por un violín.

Asociado a esta directividad característica de los instrumentos de la familia, aparece un estudio de las consecuencias derivadas de las múltiples reflexiones de estos sonidos con las paredes circundantes. El aumento de la complejidad de este sistema fue destacado por Meyer (Meyer, 1992), ya que no sólo se debe tener en cuenta estas reflexiones, sino también el efecto combinado con el vibrato. Esto se traduce en una interferencia entre las diferentes frecuencias producidas por el sistema, que evidentemente son percibidas por el oyente (o el micrófono de medida), y los sonidos generados por las reflexiones con las superficies que lo rodean. En este sentido, diversos autores como Gough (Gough, 2005), Fletcher y Sanders (Fletcher & Sanders, 1967) y Matthews and Kohut (Matthews & Kohut, 1973), señalan que la complejidad adicional es en gran parte un efecto dinámico asociado a la interferencia causada por el retardo de tiempo entre las señales de diferentes frecuencias, en lugar de ser causado por la modulación de amplitud de los parciales individuales propios de la respuesta del violín (visto como un sistema con múltiples resonancias).

Finalmente en el ámbito europeo, proyectos financiados por la Comisión Europea como DOREMI (Commission, 2005), Directionally Optimised Representation of Musical Instruments, con un coste de 100.000 euros y publicado por CORDIS (Community Research and Development Information Service), han contribuido recientemente a través de estudios experimentales, a conocer las características directivas de los instrumentos musicales en el contexto de su ejecución en distintos tipos de espacios, a fin de desarrollar y optimizar un sistema de grabación que permita una mejor reproducción de los sonidos que producen bajo determinadas circunstancias y entornos físicos, lo que de facto supone un progreso en los diseños de auralización y en el campo del diseño de sistemas de realidad virtual. Concretamente, la metodología de grabación y toma de medidas expuesta por Otondo y Rindel (Otondo & Rindel, 2005) y en otras publicaciones de los mismos autores (Otondo, Rindel, Caussé, Misdariis, & De la Cuadra, 2002), resultó inspiradora en los comienzos de este proyecto, sirviendo como base del diseño inicial en el proceso de medición dentro de la cámara anecoica.

3. Planteamiento del problema: objetivos y preguntas que guiaron la realización del proyecto

Al iniciar este proyecto creímos conveniente establecer una serie de objetivos a conseguir durante la elaboración del mismo. Por un lado pretendíamos obtener un registro sonoro de cada instrumento analizado, de manera que pudiésemos **completar una base de datos de sonidos de estos instrumentos** lo suficientemente exhaustiva como para contar con grabaciones de la mayor parte de los sonidos que pueden producirse con ellos. Por otro lado, el reto de trabajar con instrumentistas en un entorno como el que nos ofrecían los laboratorios de audio y electroacústica de la Universidad, nos llevó a pensar en la posibilidad de ir más allá y **realizar un estudio riguroso sobre las características directivas de estos instrumentos**. Evidentemente, esta segunda cuestión requería de un estudio previo y una planificación muy minuciosa, una gran inversión en tiempo y recursos, y un mayor trabajo de interpretación y análisis de los resultados. Además, unido a lo anterior, nos fijamos como meta realizar una investigación en profundidad sobre la acústica de los cuatro miembros de la familia de la cuerda frotada, para **conocer en profundidad la física de los mismos y entender su naturaleza acústica**.

Estos objetivos eran lo suficientemente ambiciosos como para no intentar abarcarlos como una unidad, por lo que pronto nos dimos cuenta de la necesidad de distinguir pequeños hitos que nos orientasen hacia una consecución global. Así pues, una vez realizada una labor de investigación sobre trabajos previos relacionados con la acústica de estos instrumentos y detectadas algunas lagunas teóricas a completar en cuanto a su funcionamiento físico, elaboramos una breve clasificación de cuestiones a resolver, atendiendo a la esencia de cada tarea (grabación o medición) a realizar.

La siguiente clasificación resume, de alguna manera, esas preguntas que han guiado la elaboración del proyecto:

Cuestiones ligadas a la grabación de la base de datos:

- a) ¿Con qué equipos podemos contar y cuáles sirven mejor a nuestros propósitos?
- b) ¿Qué, cómo y de qué manera grabamos?

- c) ¿Qué nos interesa registrar? ¿Qué tocan los músicos? ¿Cómo lo tocan?
- d) ¿De qué manera influyen en los músicos las circunstancias del entorno?
- e) ¿Cómo almacenamos esos registros?
- f) ¿Cómo organizamos esa información y en qué formato?

Cuestiones ligadas a la medida de la directividad:

- a) ¿Con qué equipos podemos contar y cuáles sirven mejor a nuestros propósitos?
- b) ¿Qué, cómo y de qué manera medimos la directividad?
- c) ¿Cómo estimamos el error cometido en el posicionamiento de los micrófonos?
- d) ¿Cómo organizamos el proceso de toma de medidas para asegurar su exactitud?
- e) ¿Qué limitaciones encontramos y cuáles son las fronteras de nuestro diseño?
- f) ¿Cómo gestionamos los datos recogidos y trabajamos con ellos en Matlab?
- g) ¿Qué conclusiones podemos extraer del análisis de las mediciones realizadas?

En definitiva, el hecho de plantearnos todas estas cuestiones contribuyó a dotar al proyecto de una forma consistente, donde las preguntas encontraban respuesta a medida que avanzábamos en la toma de decisiones y podíamos detectar y tratar dinámicamente aquellos interrogantes que surgían durante la propia investigación.

4. Metodología general: estrategia de indagación y método de recolección de datos

Desde el punto de vista metodológico, optamos por realizar un diseño previo que nos permitiera acercarnos a un mundo, como es el artístico, alejado a menudo de los procedimientos y el método científico. Para ello, consideramos adecuado trazar una hoja de ruta que nos acercase progresivamente a las cuestiones más estrechamente relacionadas con la ingeniería acústica, pero partiendo desde un enfoque cualitativo

similar al que manejan los músicos. Es decir, para familiarizarnos con algunas de las cuestiones que íbamos a observar en la cámara anecoica era necesario revisar cómo producen los sonidos estos instrumentistas, cómo son esos instrumentos, qué los caracteriza y cuáles son los límites interpretativos que podemos esperar en la ejecución por parte de músicos profesionales y no profesionales.

Al mismo tiempo, estimamos necesario abordar algunas cuestiones de carácter histórico relacionadas con los sistemas desarrollados para clasificar los sonidos (fundamentalmente en lo relativo a las escalas), la importancia central de la familia de la cuerda en la música sinfónica y la evolución organológica de los propios instrumentos de cuerda. De muchas de estas cuestiones, que a priori podríamos considerar ajenas a un proyecto de ingeniería, dependen sin embargo los sistemas de ejecución, el vocabulario específicamente musical preciso para poder dar las instrucciones a los músicos y entender algunos de los sonidos (asociados a patologías del instrumento o a carencias técnicas del músico) que registramos en las grabaciones.

Este planteamiento nos conducía, en la mayor parte de las ocasiones a un punto en el que era preciso aportar una explicación acústica que justificase los porqués de ciertos fenómenos o las consecuencias de determinadas acciones interpretativas. Actualmente, la ingeniería acústica ofrece respuestas a buena parte de esas preguntas, pero en ocasiones la metodología empleada para alcanzar ciertas conclusiones ofrece argumentos poco sólidos o aproximaciones teóricas muy lejanas a la realidad del hecho explorado. Así pues, con el ánimo de adentrarnos en el estudio de las características directivas de esta familia de instrumentos, realizamos una reflexión sobre cuáles podían ser los métodos de grabación y medida que nos ofrecieran una mayor información sobre los instrumentos a analizar.

En cuanto al proceso de recolección de datos debemos señalar que hemos realizado tres tipos de mediciones, atendiendo al propósito de las mismas:

- a) Medidas para estimar el error: Estas medidas se llevan a cabo para valorar el error atribuible a una deficiente colocación del micrófono en las posiciones previstas, consecuencia del uso de los recursos disponibles y no ideales. Para estimarlo, como veremos más adelante, optamos por realizar un alto número de medidas (no menos de 100 por posición analizada) sobre una fuente que radiaba

ruido rosa, ya que nos interesaba su análisis con medidores de tercios de octava, situada en la misma posición central donde se ubicaría posteriormente el músico.

- b) Medidas (valor RMS) de las señales producidas por un instrumento: En este caso, las mediciones se encaminaban a lograr una medida precisa de los niveles sonoros registrados en un instante determinado en una posición concreta de las previstas.
- c) Medidas de evaluación y prueba de procedimientos: A través de estas medidas se han evaluado las capacidades que nos ofrecía el sistema y se ha llevado a cabo un proceso de entrenamiento en el manejo de la herramienta PULSE (sistema de adquisición de datos acústicos capaz de realizar análisis de ruido en tiempo real y multianálisis complejos).

Complementariamente hemos realizado una grabación de diversos registros para la creación de una Base de Datos de sonidos producidos por instrumentos de cuerda frotada. En este caso, ha sido necesario también realizar un diseño metodológico previo para garantizar el que las medidas cumplieran unos requisitos mínimos, como nivel suficiente y ausencia de clips en grabación, ausencia de errores en su interpretación por parte de los músicos y posicionamiento adecuado.

Por último, el proyecto ha contado con la supervisión constante del profesor Luis Antonio Azpicueta Ruíz y con las aportaciones realizadas por algunos profesores del departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, lo que me ha permitido realizar una triangulación sobre diversas cuestiones metodológicas y procedimentales.

5. Instrumentos de cuerda frotada:

Sachs (Sachs, 1965) considera al grupo de los instrumentos de arco (también llamados de cuerda frotada por ser instrumentos en los que las cuerdas son frotadas con un arco) como herederos directos de la familia de los laúdes. El arco, procedente de Oriente, pasa por Bizancio hasta llegar a Occidente, donde su existencia se halla iconográficamente demostrada desde el siglo X. El procedimiento de frotamiento de las cuerdas de los instrumentos de la familia del laúd, originalmente punteados (es decir, tocados con las yemas de los dedos) produjo, junto con los cambiantes gustos sonoros, modificaciones en la construcción de los instrumentos. La cuerda punteada no requiere una tensión elevada, por lo que es posible engancharla en un travesañó fijado sobre la tapa frontal. Por el contrario, la cuerda frotada está sometida a fuertes tensiones y su amplitud de vibración es mayor, lo que obligó a elevarlas sobre un puente y fijarlas a través del cordal al botón o pica.

Desde una perspectiva pedagógica y siendo conscientes de que no afectará directamente al análisis de los datos obtenidos en el proyecto, creemos necesario incluir a continuación una mínima información teórica sobre el funcionamiento físico de estos instrumentos. A pesar de su aridez, ello contribuirá a entender la complejidad de los procesos medidos en la cámara y dotar de una mayor consistencia a la información presentada.

Analicemos en primer lugar los aspectos referidos a la cinemática de la cuerda, es decir, lo relativo a la descripción de su movimiento. Al pasar el arco sobre una cuerda, ésta parece vibrar suavemente hacia delante y hacia atrás entre dos curvas límite, de manera similar a cómo vibra una cuerda en su modo fundamental. Sin embargo, esta aparente simplicidad es engañosa. Hace más de cien años, Helmholtz (1877) demostró que el movimiento de la cuerda estaba más cerca de poder descomponerse en dos segmentos rectos cuya intersección se desplaza describiendo una envolvente curva. Así, al aumentar la longitud de un segmento en detrimento del otro, la intersección recorre todo el camino curvo que vemos, haciendo un viaje de ida y vuelta en cada período de vibración:

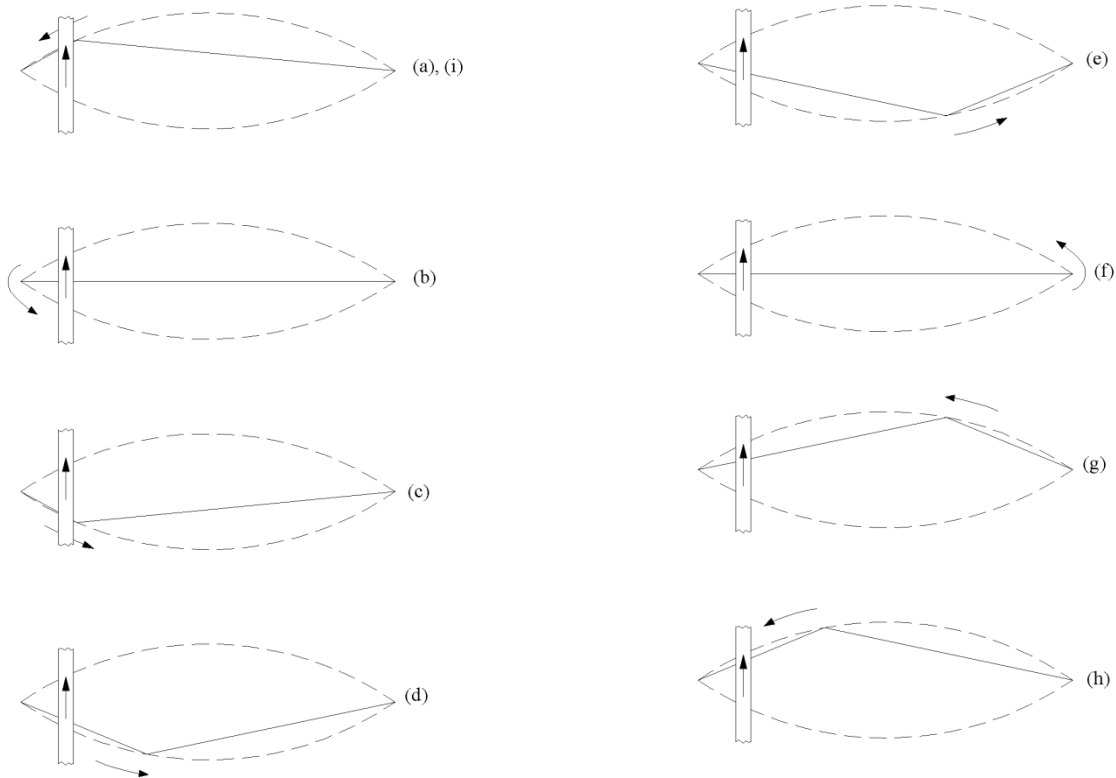


Figura 3: Análisis en el tiempo del movimiento, mostrando la posición de la cuerda en ocho instantes sucesivos (a-i) durante el ciclo.

En la siguiente figura se ve cómo la velocidad de la forma de onda en cada punto oscila entre dos valores:

Desplazamiento $y(t)$			
Velocidad $v(t)$			
Posición	$x= L/4$	Centro $x=L/2$	$x=3L/4$

Figura 4: Desplazamiento y velocidad de una cuerda frotada con un arco en función del tiempo en tres posiciones del arco (siendo L la longitud del arco).

Para observar el movimiento de la cuerda, Helmholtz construyó un microscopio de vibraciones que consistía en una lente anexa a un diapasón. El diapasón se mueve en un movimiento sinusoidal paralelo a la cuerda y la lente se enfoca hacia las distintas

marcas de color realizadas en la cuerda. Cuando Helmholtz frotó la cuerda observó el patrón descrito por Jules Antoine Lissajous en lo que se denomina figuras de Lissajous (estas figuras describen gráficamente la forma en que vibra un objeto gracias a su seguimiento a través de una representación en el sistema formado por los ejes X-Y).

Analizando los resultados, Helmholtz observó que la figura era estacionaria cuando la frecuencia de vibración del diapasón era una fracción entera de la frecuencia de la cuerda. En cuanto al desplazamiento de la cuerda, ésta seguía un patrón triangular en cada punto observado, mientras que la velocidad de la forma de onda en cada punto oscilaba entre dos valores extremos.

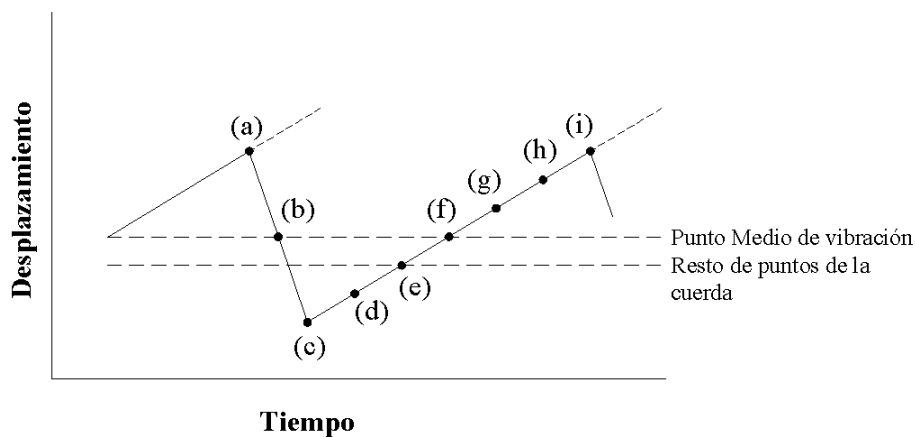


Figura 5: Desplazamiento del arco y la cuerda en el punto de contacto del arco en instantes sucesivos. Estos instantes (letras de a-i) se representan en la figura 3.

La acción del arco sobre la cuerda ha sido descrita en ocasiones como la acción de “pegar y deslizar” el arco sobre la cuerda. El arco arrastra la cuerda siguiendo esas curvas anteriormente representadas, de forma que la cuerda se mueve con la misma velocidad del arco (la velocidad de propagación de las ondas transversales en la cuerda viene dada por la expresión $c = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ donde T (N) representa la tensión de la cuerda, y μ (kg/m) su densidad lineal).

La envolvente que provocan las sucesivas curvas (la línea punteada de la figura 3) está compuesta por dos parábolas con una amplitud máxima que es proporcional, dentro de sus límites a la velocidad del arco y que aumenta al frotar la cuerda cerca de un extremo (típicamente a la altura del puente).

Una vez considerados los aspectos cinemáticos nos ocuparemos de la energía y la fuerza implicadas en este proceso, es decir, abordaremos el comportamiento dinámico de la cuerda.

En primer lugar debemos preguntarnos sobre cómo y por qué vibra una cuerda al ser frotada con un arco. Claramente el rozamiento entre el arco (moviéndose perpendicularmente a la propia cuerda) debe transferir la suficiente energía a la cuerda para vencer las pérdidas debidas a la disipación interna, las causadas por la viscosidad del aire y la pérdida que supone que los extremos en rozamiento no sean rígidos. La energía transferida a la cuerda en cada ciclo de movimiento es justo la fuerza de rozamiento multiplicada por el desplazamiento, e integrada en ese ciclo; de modo que, una vez que la cuerda regresa a su posición inicial en cada ciclo, la energía transferida es cero a no ser que la fuerza de rozamiento varíe con la velocidad.

Como sabemos de la física elemental, existe sin embargo una diferencia entre la fuerza de fricción estática (resistencia que se debe superar mediante una fuerza tangencial a ambas superficies para poner movimiento un cuerpo con respecto a otro que se encuentra en contacto y cuya velocidad relativa es cero) y la dinámica (resistencia que se debe superar mediante una fuerza tangencial a ambas superficies cuando una de esas superficies se está deslizando sobre la otra). La fricción dinámica es en general menor que la estática, de modo que en un plano inclinado, por ejemplo, aquel cuerpo que comienza a deslizarse continúa haciéndolo. La curva que representa la fricción frente a la velocidad de la cuerda tiene la forma:

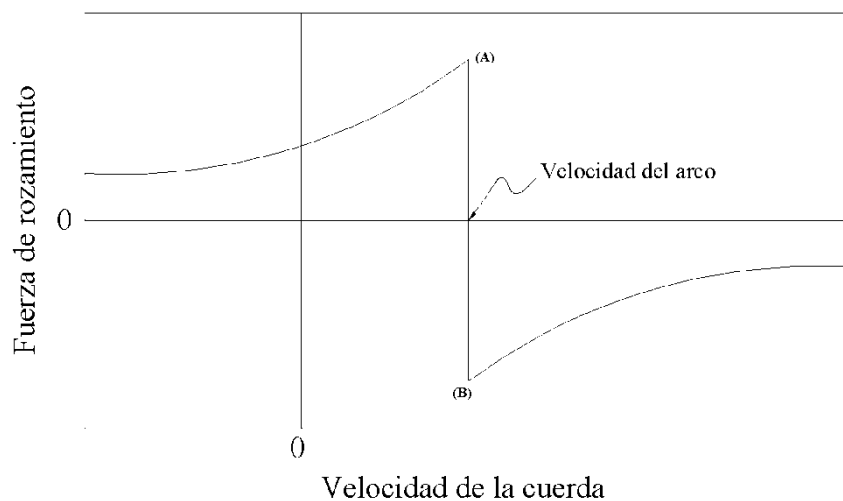


Figura 6: Dependencia de la fuerza de rozamiento de la velocidad relativa de la cuerda para un arco que actúa sobre una cuerda.

El rozamiento dinámico es una función no lineal de la velocidad relativa y la fricción estática (indeterminada tanto en signo como en magnitud) es un máximo absoluto que depende de la naturaleza de las superficies en contacto.

Si el comportamiento del rozamiento es como el que aparece en la figura anterior, podemos observar el origen de la transferencia de energía. Supongamos que un arco con cierto movimiento actúa sobre una cuerda que ya está vibrando con una pequeña amplitud. Cuando la cuerda se mueve en la misma dirección del arco la energía es transferida a él, mientras que cuando el movimiento es contrario al del arco la fuerza de rozamiento disipa energía de la cuerda. En el primer caso, sin embargo, la velocidad de la cuerda debida al arco es menor que en el segundo caso ya que la fricción es mayor y la energía transferida a la cuerda supera en este medio ciclo a la que pierde la cuerda en el siguiente medio ciclo. La amplitud de la vibración va por tanto a incrementarse.

Pese a lo anterior, existe un límite en el incremento de la amplitud de la vibración de la cuerda. Con esa amplitud crítica la velocidad de la cuerda en la siguiente dirección será exactamente igual a la propia velocidad del arco. Cualquier incremento en amplitud más allá de este punto provocará que la fuerza de rozamiento pase del punto (A) al punto (B) tomando energía de la cuerda y recortando la forma de onda de la vibración (véase Figura 6). Desde este punto (B) en adelante, la cuerda se mueve solidariamente con el arco durante una parte del ciclo y se completa el movimiento descrito por Helmholtz.

Esta es, sin embargo, una de las formas en las que un instrumentista de cuerda frotada puede comenzar una nota. A menudo el intérprete apoya el arco (inmóvil) sobre la cuerda y comienza repentinamente a moverlo a velocidad constante. Debido a la gran magnitud de fricción estática, la cuerda es desplazada hacia un lado por el arco hasta que la fuerza de restauración (llamaremos así a la fuerza debida a la tensión de la cuerda que hace que esta retorne a su posición de reposo inicial) excede el máximo de fricción estática. La cuerda entonces resbala y el movimiento descrito por Helmholtz comienza.

Esta discusión, evidentemente, simplifica el estudio enormemente. En el primer caso, se produce una transición gradual desde el movimiento sinusoidal hacia el movimiento de Helmholtz; mientras que en el segundo caso el movimiento inicial se asemeja al de una cuerda pulsada, con dos ondas de Helmholtz avanzando en sentidos contrarios. Las fuerzas de fricción amortiguan rápidamente una de esas ondas y el movimiento normal

se establece. La necesidad de amortiguar ese movimiento contrario es una de las razones por las que los instrumentos de cuerda son fabricados con cuerdas que favorecen el amortiguamiento.

1. Influencia de la rigidez de las cuerdas

Las cuerdas reales tienen asociada una rigidez que provoca que el vértice del movimiento de Helmholtz no sea tan abrupto como cabría esperar en un sistema ideal. Los efectos de ese vértice redondeado son al menos dos:

- a) Un leve descenso en el tono al aumentar la fuerza del arco.
- b) La aparición de un tipo de ruido llamado “jitter” causado por las variaciones aleatorias en el periodo de vibración de la cuerda (es posible encontrar variaciones por encima de los 30 cents). La cantidad de jitter es aproximadamente proporcional a cómo es de intenso ese redondeo (Mc Intyre & Woodhouse, 1978).

Cuando el arco pasa sobre un vértice redondeado de Helmholtz, la fricción no lineal hace que ese vértice recobre una forma más abrupta, dependiendo de la fuerza del arco en cualquier caso. Es decir, el movimiento de la cuerda representa un equilibrio entre el vértice redondeado por la influencia de la propia cuerda y de sus extremos y un vértice más afilado por la acción del arco. En todo caso, este vértice no es igual de abrupto en los dos ciclos, siendo mayor en la transición de deslizamiento a arrastre.

Otra consecuencia del vértice abrupto que favorece el arco es la generación de rizados. Cuando la forma de onda cambia debido a la acción del arco se generan una serie de reflexiones de dicha onda, que viajan hasta disiparse entre los dos ciclos.

2. Parciales, armónicos y sobretonos

Llegados a este punto es importante clarificar la nomenclatura a fin de evitar posibles confusiones. Usaremos el término armónico para referirnos a los modos de vibración de un sistema que tiene un número entero de múltiplos del modo fundamental, así como a

los sonidos generados por él (en general se realizará como aproximación la asunción de múltiples “casi enteros” de la fundamental, como por ejemplo 2.005, como si lo fuesen realmente, es decir en lugar de 2). En el caso ideal de las cuerdas vibrantes podremos decir pues que los modos de esa cuerda son armónicos de la fundamental, y puesto que los modos de una cuerda real están muy cerca de ser múltiplos enteros, hablaremos también de ellos como armónicos (evidentemente el primero de los armónicos se refiere a la fundamental).

Sin embargo, algunos sistemas vibrantes no tienen modos múltiplos de la frecuencia fundamental y el término sobretono se usa entonces para referirse a esos modos superiores de vibración. Los armónicos son descritos, pues, como sobretonos cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Al mismo tiempo surge otra pequeña confusión en el uso de estos términos derivada del hecho de que los términos armónicos incluyen la fundamental, mientras que el término sobretono no. Así el segundo armónico es el primer sobretono, el tercer armónico es el segundo sobretono, etc.

Otro término que se suele usar para referirse a los modos de vibración de un sistema vibratorio o a los componentes del sonido es el término “parcial”, que incluye a todos los modos o componentes, es decir, la fundamental más todos los sobretonos, tanto si son armónicos como si no. Sin embargo, si hablamos de parciales superiores excluimos a la fundamental, por lo que de facto es un sinónimo de sobretono.

Como sabemos, el movimiento de una cuerda vibrante es una combinación de varios modos de vibración. La forma en que esos modos o parciales (con determinadas amplitudes relativas) se combinan determinan un característico espectro de vibración.

3. Pérdidas por amortiguamiento

El amortiguamiento en las cuerdas vibrantes se debe principalmente a tres mecanismos distintos: (1) amortiguamiento en el aire, (2) amortiguamiento interno y (3) transferencias de energía a otros sistemas vibrantes. El amortiguamiento debido a estos mecanismos variará con la frecuencia y su magnitud será comparable en distintos sistemas.

1. Amortiguamiento en el aire:

Una cuerda vibrante no es un buen radiador del sonido por sí sola. La razón de esto es que la cuerda actúa como una fuente dipolo, produciendo una compresión y una expansión a través de su movimiento, cuyo radio es tan pequeño que favorece el que esa perturbación sea fácilmente anulada por sí misma (la interferencia de ambos ciclos provoca esa cancelación mutua).

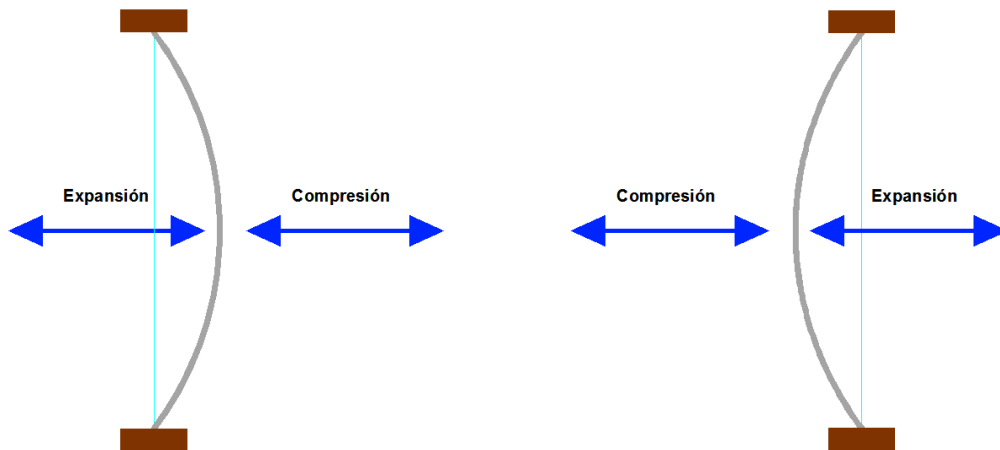


Figura 7: Comportamiento de una cuerda como un dipolo

Esto no significa, sin embargo, que la cuerda no tenga interacción con el aire. El flujo viscoso de aire alrededor del movimiento de la cuerda puede ser la mayor causa de amortiguamiento de las vibraciones bajo ciertas condiciones.

El complejo problema de la fricción viscosa en una cuerda vibrante fue resuelto hace tiempo por Stokes, quien describió matemáticamente la fuerza de fricción experimentada por objetos esféricos moviéndose en el seno de un fluido viscoso bajo ciertas condiciones y demostró que la fuerza en una cuerda tiene dos componentes: una que produce una carga adicional que disminuye la frecuencia muy levemente y otra que provoca un decaimiento exponencial de la amplitud.

Sobre un rango de los diámetros de las cuerdas de metal y de las frecuencias encontrados en instrumentos musicales, la fuerza de retardo F_r experimentada por un cilindro de longitud L y radio r que se mueve con una velocidad v y donde la frecuencia es f es:

$$F_r = 2\pi^2 \rho_a f v r^2 L \left(\frac{\sqrt{2}}{M} + \frac{1}{2M^2} \right) \quad (\text{Expresión 1})$$

Donde $M = (r/2)\sqrt{2\pi f / \eta_a}$, $\rho_a (\cong 1.2 \text{kg/m}^3)$ es la densidad del aire y $\eta_a (\cong 1.5 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s})$ es la viscosidad cinemática. Para un clavicordio, por ejemplo, M está en el rango de 0.3 a 1.0.

Dado que $F_r \propto v$, la tasa de pérdida varía como v^2 , que es proporcional a la energía cinética. Así pues, para la oscilación en una única frecuencia, la amplitud debe decaer exponencialmente con un tiempo de decaimiento constante c.

$$\tau_1 = \frac{\rho}{2\pi\rho_a f} \left(\frac{2M^2}{2\sqrt{2M+1}} \right) \quad (\text{Expresión 2})$$

El tiempo de decaimiento τ_1 es proporcional a la densidad de la cuerda de metal, pero depende de una forma más compleja del radio de la cuerda y de la frecuencia: $\tau_1 \propto \rho r^2$ en baja frecuencia y $\tau_1 \propto \frac{\rho r}{\sqrt{f}}$ en alta frecuencia.

2. Amortiguamiento interno

El material de la cuerda ha sido caracterizado hasta ahora por su radio, densidad y módulo de Young, pero podemos añadir más sobre ello. Todos los materiales muestran en realidad un comportamiento elástico gracias al cual, cuando se aplica una fuerza, ocurre una deformación instantánea y entonces, durante un tiempo característico τ , la deformación se incrementa levemente. Esta segunda elongación puede ser moderadamente larga o extremadamente pequeña, al igual que el tiempo τ puede ir desde menos de un milisegundo a varios segundos.

El comportamiento puede ser representado haciendo el módulo de Young, E , para el material complejo:

$$E = E_1 + jE_2 \quad (\text{Expresión 3})$$

De acuerdo con la fórmula de relajación atribuible a Debye, E_2 tiene un pico en la frecuencia de relajación $\omega = 1/\tau$. La **Expresión 3** puede, sin embargo, ser usada en el caso más general donde algunos tiempos de relajación contribuyen, incluyendo E_1 y E_2 , variando con la frecuencia. Este comportamiento es fácilmente entendible puesto que E_1 recibe la contribución de las distorsiones normales elásticas del enlace y E_2 de los

procesos de relajación tales como el movimiento de dislocación o el movimiento de torsiones en las cadenas del polímero. Típicamente E_1/E_2 puede ser menor de 10^{-4} en cristales duros, un poco mayor en metales y probablemente del orden de 10^{-1} en algunos materiales poliméricos, aunque en todos los casos ello depende de la temperatura. Una constante elástica es realmente inadecuada para describir cualquier tipo de material isótropo, pero obviaremos este aspecto en el presente análisis.

Considerando lo anterior, el tiempo de decaimiento para este amortiguamiento interno resulta ser:

$$\tau_2 = \frac{1}{\pi f} \frac{E_1}{E_2} \quad (\text{Expresión 4})$$

Claramente vemos como en el material con este tipo de amortiguamiento interno sus propiedades son independientes del radio de la cuerda, longitud o tensión. Esto es generalmente insignificante para las cuerdas fabricadas con metales sólidos (las que típicamente se usan en las configuraciones modernas de los instrumentos de cuerda objeto de nuestro análisis) pero es la primera causa de amortiguamiento para las cuerdas de tripa o nylon. El tiempo de decaimiento debido a este mecanismo es claramente menor en las altas frecuencias dado el caso de que E_1 sea en gran medida independiente de la frecuencia.

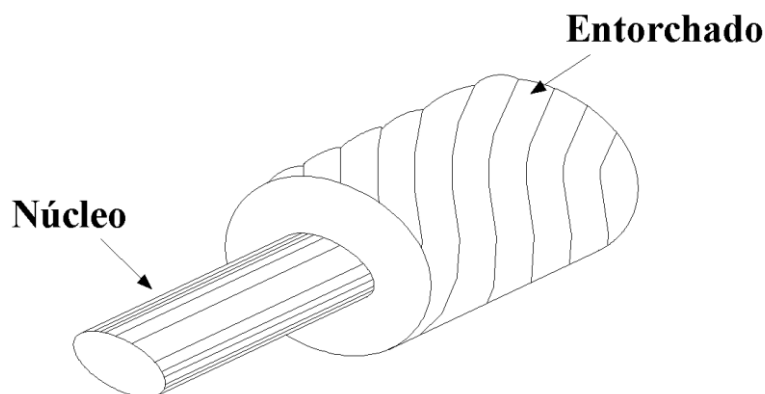


Figura 8: Corte transversal de una cuerda entorchada

Este, no obstante, no es el único mecanismo de amortiguamiento interno. En las cuerdas metálicas existe también un amortiguamiento debido a la conductividad termal y los movimientos de dislocación que se dan cuando las cuerdas están compuestas por fibras

entorchadas o en cuerdas con revestimiento metálico, donde existirá una fricción interna derivada del movimiento relativo de esos componentes.

3. Transferencias de energía a otros sistemas vibrantes:

Si consideramos las transferencias de energía a otros sistemas vibrantes, debemos observar cómo la mayor de esas pérdidas energéticas tiene lugar a través de los soportes. Para ello consideraremos preferiblemente medidas de admitancia antes que de impedancia. La admitancia mecánica es el cociente de la velocidad entre la fuerza, y a su parte real, G , la llamamos conductancia.

Para un modo de vibración n de una cuerda dada, la velocidad transferida al soporte puede ser descrita como:

$$v_n = \alpha G F_n \quad (\text{Expresión 5})$$

donde F_n es la componente vertical de la fuerza y α es una constante. Un análisis de los procesos de pérdida de energía frente al decaimiento exponencial de la energía con una constante de tiempo es dado por (Fletcher, 1977):

$$\tau_3 = (8\mu L f^2 G)^{-1} \quad (\text{Expresión 6})$$

Cuando los tres mecanismos comentados contribuyen al amortiguamiento, el tiempo de decaimiento obtenido τ se puede obtener sumando los recíprocos:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3} \quad (\text{Expresión 7})$$

Gráficamente, y asumiendo que G y E_2 son independientes de la frecuencia y que estamos tratando una única cuerda cuya frecuencia aumenta al reducir su longitud, esta relación puede ser representada como sigue:

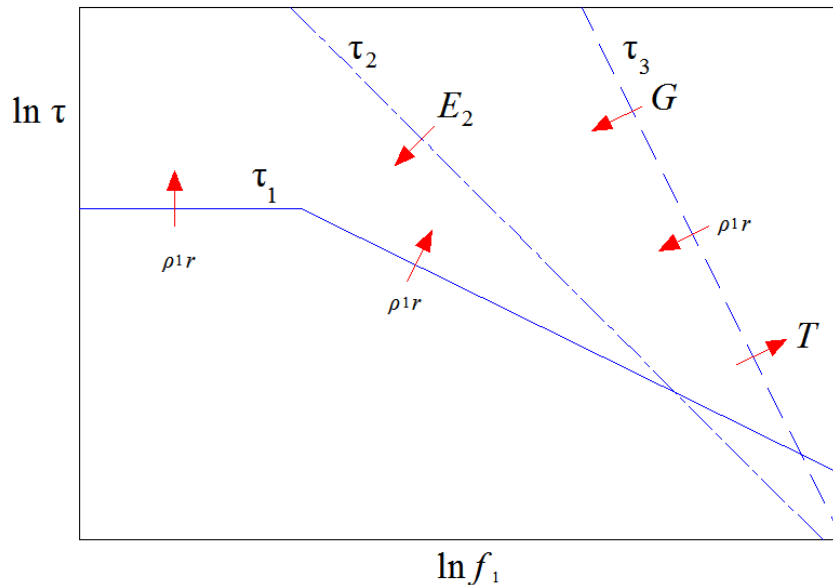


Figura 9: Esquema del comportamiento del tiempo de decaimiento τ_1 causado por varios mecanismos como funciones de la frecuencia fundamental f_1 de la cuerda, asumiendo que solo varía la longitud de la cuerda. τ_1 viene determinado por la humedad del aire, τ_2 por la humedad interna y τ_3 por las pérdidas debidas al soporte. Las flechas indican las direcciones en las cuales las curvas son desviadas por un incremento en el radio de la cuerda r , la densidad de tensión T , la parte imaginaria del módulo de Young E_2 y la conductividad mecánica G del puente (Fletcher, 1976).

Las curvas muestran las distintas contribuciones al tiempo de decaimiento en función de la frecuencia. También se indican las direcciones en las cuales las distintas curvas se moverán como respuesta, al incrementar distintos parámetros de la cuerda. La curva que representa el tiempo de decaimiento resultante es la envolvente suavizada de las curvas de los tiempos de decaimiento individuales.

En la mayoría de los instrumentos musicales, la proporción en que la energía se transfiere de la cuerda al puente y a la cejilla es bastante pequeña. Para cuerdas de metal finas, el tiempo de decaimiento se determina fundamentalmente por la viscosidad del aire (el tiempo de decaimiento para los parciales superiores varía como $1/\sqrt{f}$). Para instrumentos con cuerdas de tripa o nylon, el amortiguamiento interno es el que predomina sobre los otros tipos y el tiempo de decaimiento para los parciales superiores varía como $1/f$. La consecuencia, por tanto, es que estas cuerdas tienen un sonido mucho menos brillante que las fabricadas con metal. Por otro lado, si la cuerda es presionada por la mano izquierda con los dedos contra el diapason, o si el puente es tan ligero que predominan las pérdidas por los soportes, el tiempo de decaimiento para los parciales superiores variará como $1/f^2$.

4. Vibraciones transversales de una cuerda

El estudio de las vibraciones en cuerdas tiene una larga historia. Pitágoras ya observó cómo la división de una cuerda estirada en dos segmentos daba lugar a sonidos agradables cuando el cociente de las longitudes de ambos segmentos era simple (2:1, 3:1, 3:2,...). Aquellos eran ejemplos de armónicos o modos normales (también llamados frecuencias naturales o frecuencias resonantes, en las cuales la cuerda oscilará al ser perturbada) de una cuerda fija en sus dos extremos, si bien un examen más riguroso del movimiento de la cuerda revela que los modos normales dependen de la masa de la cuerda, de su longitud, de la tensión aplicada y de las condiciones de los extremos.

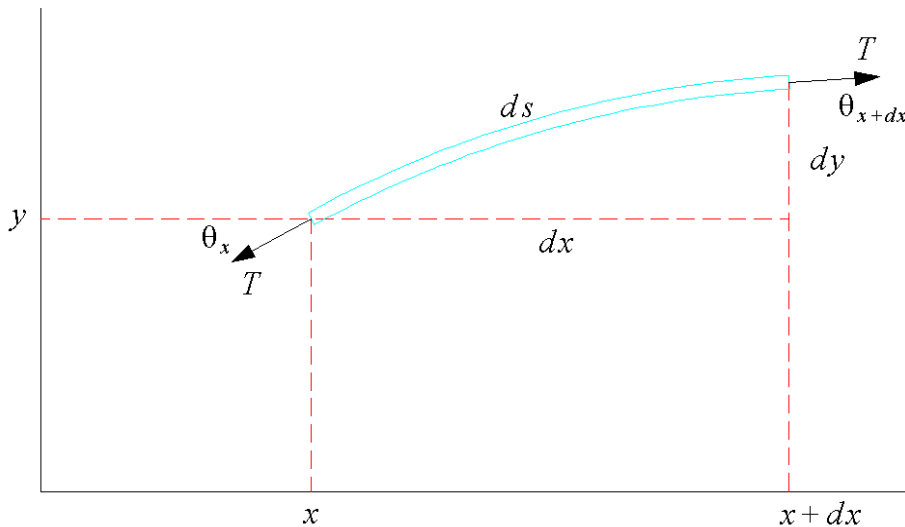


Figura 10: Segmento de una cuerda con tensión T

Consideremos una cuerda uniforme con densidad lineal μ (kg/m) y estirada con una tensión T (N). La fuerza neta dF , que permite volver a los segmentos ds a sus posiciones de equilibrio, es la diferencia entre las componentes “y” de la tensión en los dos extremos del segmento:

$$dF_y = (T \sin \theta)_{x+dx} - (T \sin \theta)_x \quad \text{(Expresión 8)}$$

Aplicando la expansión en serie de Taylor:

$$f(x + dx) = f(x) + \frac{\partial f(x)}{\partial x} dx + \dots \quad \text{(Expresión 9)}$$

a $T \sin \theta$ y tomando los términos de primer orden tenemos que:

$$dF_y \cong \left[(T \sin \theta)_x + \frac{\partial(T \sin \theta)}{\partial x} dx \right] - (T \sin \theta)_x = \frac{\partial(T \sin \theta)}{\partial x} dx \quad (\text{Expresión 10})$$

Para un pequeño desplazamiento de y , $\sin \theta$ puede ser sustituido por $\tan \theta$, que a su vez es igual a $\partial y / \partial x$:

$$dF_y = \frac{\partial(T \partial y / \partial x)}{\partial x} dx = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx \quad (\text{Expresión 11})$$

La masa del segmento ds es μds , de modo que la segunda Ley de Newton del movimiento es:

$$T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx = (\mu ds) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (\text{Expresión 12})$$

Puesto que dy es pequeña, podemos decir que $ds \cong dx$. También podemos escribir $c^2 = T / \mu$ y obtener la expresión más habitual para las ondas transversales en una cuerda vibrante:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\mu} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (\text{Expresión 13})$$

La solución general de la ecuación de la **Expresión 13** puede ser escrita de la forma propuesta por d'Alembert (1717-1783):

$$y = f_1(ct - x) + f_2(ct + x) \quad (\text{Expresión 14})$$

De esta forma definimos una onda progresiva, dada por la función $f_1(ct - x)$ que representa a una onda viajando hacia la derecha con una velocidad c ; mientras que, del mismo modo, podemos hablar de una onda regresiva $f_2(ct + x)$ que representa a una onda viajando hacia la izquierda con la misma velocidad. La naturaleza de las funciones f_1 y f_2 es arbitraria, pudiendo ser sinusoides o bien pudiendo describir ondas impulsivas, por ejemplo. De hecho las dos funciones independientes f_1 y f_2 pueden ser elegidas de forma que su suma represente cualquier desplazamiento inicial deseado $y(x,0)$ y velocidad $\partial y / \partial t = y(x,0)$.

Derivando la **Expresión 14** sobre x y t lleva a:

$$\begin{aligned}\frac{\partial y}{\partial x} &= -f_1' + f_2', \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= c(f_1' + f_2')\end{aligned}\quad (\text{Expresión 15})$$

donde f_1' y f_2' son las derivadas de las dos funciones con respecto a sus argumentos.

5. Reflexión en los extremos fijos o libres

Para entender las reflexiones de las ondas en los extremos de una cuerda debemos considerar en primer lugar qué sucede con un pulso único que viaja por la cuerda y llega a su extremo. En caso de que el extremo esté fijo es inmediato imaginar el comportamiento de una cuerda sujeta firmemente en su extremo, pero en caso de que el extremo esté libre debemos pensar en cómo es necesario mantener una tensión en la dirección x a la vez que esperamos que la cuerda se mueva libremente en la dirección y . Evidentemente es fácil pensar que una cuerda, en un instrumento de cuerda frotada, está fijo en su extremo superior, es decir, en la cejilla. Sin embargo, el otro extremo, tiene en parte un comportamiento similar a un extremo libre, puesto que el puente cede debido a las vibraciones de la caja de resonancia y a su propia vibración, por lo que no puede considerarse un extremo fijo. Visualmente este caso puede describirse si pensamos en una cuerda en cuyo extremo hay una argolla (sin masa) que se desliza sin fricción sobre una guía recta (eje y) que permite un movimiento vertical del propio extremo siguiendo la guía.

- 1) Comportamiento en el extremo fijo, $y=0$. Si asumimos que la cuerda está fija en $x=0$, la solución de la ecuación general (**Expresión 14**) resulta ser:

$$y = 0 = f_1(ct - 0) + f_2(ct + 0), \quad (\text{Expresión 16})$$

de donde :

$$f_1(ct) = -f_2(ct) \quad (\text{Expresión 17})$$

de forma que un pulso hacia arriba se refleja convirtiéndose en uno hacia abajo.

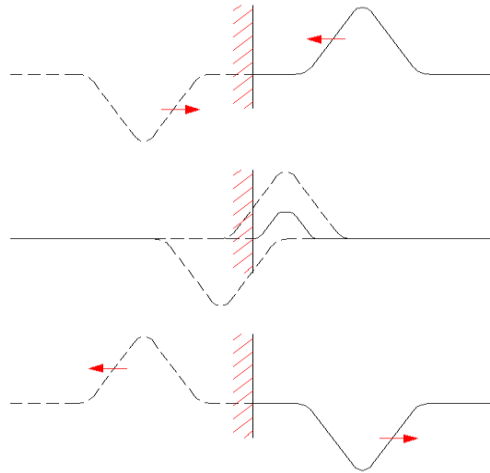


Figura 11: Reflexión de un pulso con un extremo fijo

- 2) En el extremo libre, $\partial y / \partial x = 0$, ya que no puede aparecer una fuerza transversal. Como se ha comentado, éste sería un caso similar al del punto de fijación de la cuerda sobre el puente. Así, de la **Expresión 15**:

$$f_1'(ct) = f_2'(ct) \quad \text{(Expresión 18)}$$

De forma que si integramos:

$$f_1(ct) = f_2(ct) \quad \text{(Expresión 19)}$$

un pulso hacia arriba se refleja ahora como otro pulso hacia arriba:

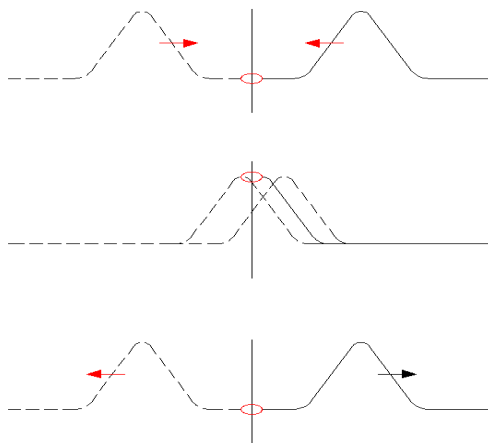


Figura 12: Reflexión de un pulso con un extremo libre

6. Soluciones armónicas simples de la ecuación de la onda

Para observar cómo se propagan sucesivos movimientos armónicos simples a través de la cuerda, expresamos las funciones f_1 y f_2 como términos de senos y cosenos:

$$y(x, t) = A \sin(\omega t - kx) + B \cos(\omega t - kx) + C \sin(\omega t + kx) + D \cos(\omega t + kx) \quad (\text{Expresión 20})$$

donde llamamos $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ al número de onda.

Alternativamente podríamos haber utilizado notación compleja:

$$\tilde{y}(x, t) = \tilde{A}e^{j(\omega t - kx)} + \tilde{B}e^{j(\omega t + kx)} \quad (\text{Expresión 21})$$

donde \tilde{y} , \tilde{A} y \tilde{B} son números complejos. En este caso, $y(x, t) = \text{Re}\{\tilde{y}(x, t)\}$.

7. Ondas estacionarias

Para analizar la formación de ondas estacionarias en los instrumentos de cuerda partiremos de una simplificación del modelo, considerando una cuerda de longitud L fija en sus dos extremos, $x=0$ y $x=L$, en lugar de partir de un extremo libre. La primera condición $y(0, t) = 0$ requiere que $A = -C$ y $B = -D$ en la **Expresión 20**), de manera que:

$$y = A[\sin(\omega t - kx) - \sin(\omega t + kx)] + B[\cos(\omega t - kx) - \cos(\omega t + kx)] \quad (\text{Expresión 22})$$

Si usamos las relaciones:

$$\begin{aligned} \sin(x \pm y) &= \sin x \cos y \pm \cos x \sin y \\ \cos(x \pm y) &= \cos x \cos y \mp \sin x \sin y \end{aligned} \quad (\text{Expresión 23})$$

Tenemos que:

$$y = 2A \sin kx \cos \omega t - 2B \sin kx \sin \omega t = 2[A \cos \omega t - B \sin \omega t] \sin kx$$

(Expresión 24)

La segunda condición $y(L,t) = 0$ requiere que $\sin kL = 0$ ó que $\omega L/c = n\pi$. Esto restringe a ω a los valores $\omega_n = \frac{n\pi c}{L}$ o $f_n = n \left(\frac{c}{2L}\right)$, siendo los modos normales de vibración de la cuerda:

$$y_n(x,t) = (A_n \sin \omega_n t + B_n \cos \omega_n t) \sin \frac{\omega_n x}{c} \quad \text{(Expresión 25)}$$

Estos modos son armónicos ya que cada f_n es n veces $f_1 = c/2L$.

La solución general de una cuerda que vibra teniendo fijos sus extremos puede escribirse como la suma de los modos normales:

$$y = \sum_n (A_n \sin \omega_n t + B_n \cos \omega_n t) \sin k_n x \quad \text{(Expresión 26)}$$

siendo la amplitud del modo n el resultado de $C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$.

Alternativamente, la solución general puede escribirse como:

$$y = \sum_n C_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \sin k_n x \quad \text{(Expresión 27)}$$

donde C_n es la amplitud del modo n y ϕ_n su fase $\phi_n = \tan^{-1} \frac{B_n}{A_n}$.

Ahora bien, consideremos qué sucede cuando uno de esos extremos no es completamente rígido. Generalmente podemos describir los extremos de una cuerda a través de su impedancia compleja. Si la parte imaginaria de esa impedancia tiene una cierta masa (rígida), las resonancias de la cuerda aumentarán ligeramente respecto a las dadas por la expresión 25, mientras que si se puede asimilar a un muelle (extremo no rígido), las frecuencias de resonancia disminuirán. La parte real de la impedancia compleja es indicativa de la proporción de energía transferida por parte del muelle al soporte (el puente y la barra armónica, en el caso de los instrumentos de cuerda).

Consideremos ahora una cuerda fija en sus dos extremos ($x=0$ y $x=L$), cuyo soporte puede ser caracterizado por una masa m . La fuerza transversal ejercida sobre la masa por parte de la cuerda es $-T(\partial \tilde{y} / \partial x)_{x=L}$. Aplicando la segunda ley de Newton,

$$-T(\partial \tilde{y} / \partial x)_L = m(\partial^2 \tilde{y} / \partial t^2)_L \quad \text{(Expresión 28)}$$

Si ahora aplicamos la condición de contorno en $x=0$ a la **Expresión 22** tenemos:

$$0 = \tilde{A}e^{j\omega t} + \tilde{B}e^{j\omega t} \quad (\text{Expresión 29})$$

Por consiguiente, $\tilde{A} = -\tilde{B}$ y la solución armónica resulta:

$$\tilde{y}(x, t) = \tilde{A}(-e^{-kx} + e^{kx})e^{j\omega t} = \tilde{A} \sin kx e^{j\omega t} \quad (\text{Expresión 30})$$

Sustituyendo esta expresión en la **Expresión 28**:

$$-kT\tilde{A} \cos kLe^{j\omega t} = -\omega^2 m\tilde{A} \sin kLe^{j\omega t} \quad (\text{Expresión 31})$$

De forma que:

$$\cot kL = \frac{\omega^2 m}{kT} = \frac{ky^2 m km}{T \mu} = \frac{m}{M} kL \quad (\text{Expresión 32})$$

donde $M = \mu L$ es la masa total de la cuerda. Esta ecuación trascendente (cuya solución no puede obtenerse empleando sólo las herramientas propias del álgebra), puede ser resuelta gráficamente para dos valores de m/M :

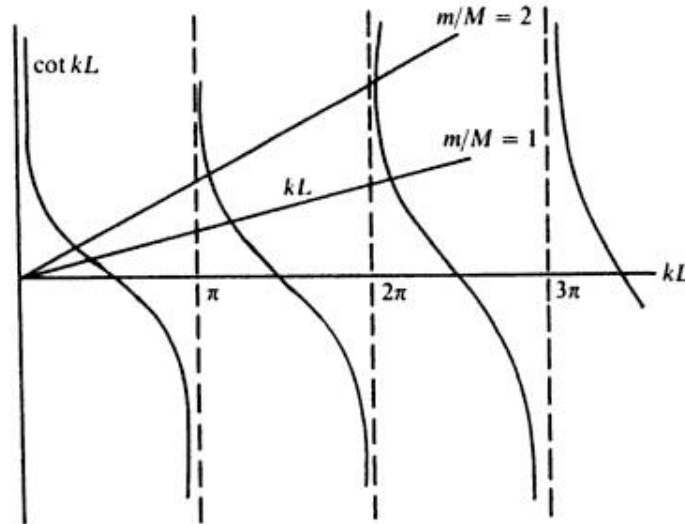


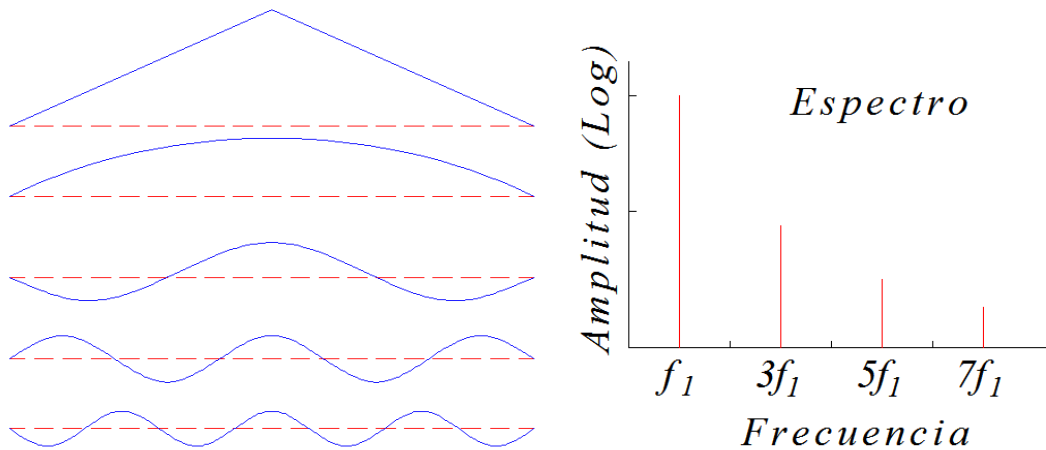
Figura 13: Solución gráfica de la Expresión 32.

Cuando $m \gg M$ (es decir, cuando la masa del soporte es mucho mayor que la de la cuerda), las soluciones se acercan a los valores $k = n\pi$ característicos de una cuerda fija tanto en $x=L$ como en $x=0$. Esto nos permite comprobar que existe una estrecha relación entre la rigidez de los extremos y el comportamiento físico de la cuerda vibrante y supone, además, que las frecuencias de los modos normales de vibración obtenidos se

compriman ligeramente por la relación armónica, de forma que la frecuencia del modo más bajo aumenta ligeramente más que el segundo.

8. Pizzicato: Análisis en los dominios temporal y frecuencial

Cuando una cuerda es excitada con un arco, percutida o pulsada la vibración resultante puede considerarse como la combinación de muchos modos de vibración. En los instrumentos de cuerda frotada, cuando esa excitación en lugar de producirla con el arco se produce con los dedos pulsando o pellizcando la cuerda, nos referimos a ella como pizzicato. Si analizamos el comportamiento físico de estos instrumentos cuando utilizamos la técnica del pizzicato podemos asemejarlo al de otros instrumentos de cuerda pulsada, como la guitarra. Así, al tener, por ejemplo, una cuerda pulsada en el medio (siendo L la longitud de la cuerda pulsamos en $L/2$), la vibración resultante consistirá en la fundamental más una serie de armónicos. En este caso serán sólo los armónicos impares, ya que todos los modos de vibración múltiplos del segundo (es decir 2, 4, 6...) poseen un nodo en $L/2$ y no serán excitados, puesto que los patrones de onda estacionaria poseen un nodo en el lugar donde se ha realizado la pulsación.



Armónico	Amplitud relativa	Fase
1	1	+
2	0	
3	1/9	-
4	0	
5	1/25	+
6	0	
7	1/49	-

Figura 14: Análisis en frecuencia de una cuerda pulsada en su centro

En esta figura vemos como los modos asociados a los armónicos impares contribuyen (cada uno en su proporción) a la forma que toma la cuerda tras ser pulsada en el medio en el instante inicial. Los modos 3, 7, 11, etc., son opuestos en fase a los modos 1, 5 y 9 lo que contribuye al máximo desplazamiento en el centro.

Por otro lado, como todos los modos tienen diferentes frecuencias de vibración se desfazan rápidamente, y consecuentemente la forma de la cuerda cambia inmediatamente después de ser pulsada. Al igual que en la situación anterior, la forma de la cuerda (esto es válido para cualquier instante) puede deducirse sumando los modos normales en dicho instante de tiempo, si bien ahora será mucho más complejo ya que los modos aparecerán en distintos puntos de su ciclo.

La consecuencia de este movimiento en la cuerda es la aparición de dos pulsos que se propagan en direcciones opuestas a lo largo de ella, cuya evolución temporal es:

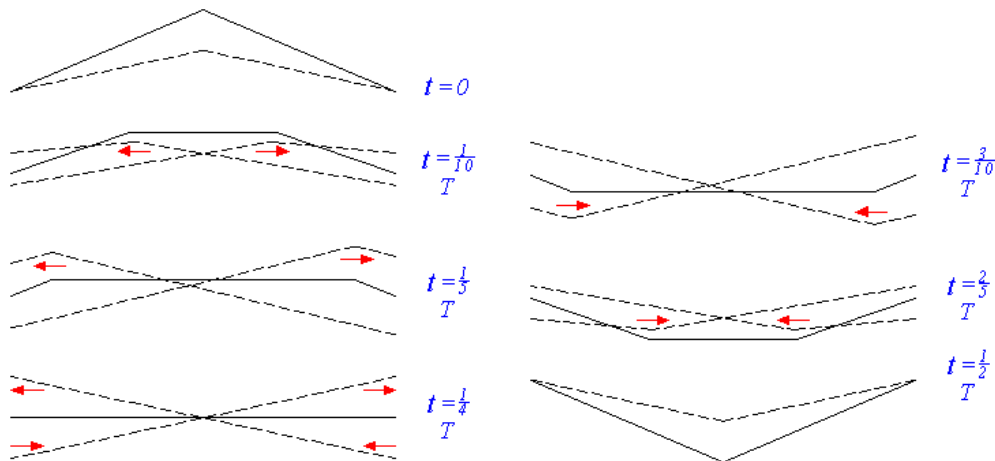


Figura 15: *Análisis en el tiempo del movimiento de una cuerda pulsada en su punto medio a través de medio ciclo. El movimiento puede entenderse como el debido a dos pulsos que viajan en direcciones opuestas.*

Si la cuerda es pulsada en un punto distinto de su centro (lo que sucederá en la gran mayoría de las ocasiones en la realidad) el espectro será diferente, evidentemente. Por ejemplo, si la cuerda es pulsada a $1/5$ de la distancia desde un extremo, obtendremos el siguiente espectro, en el que el quinto armónico (y sus múltiplos, como hemos visto) se pierde:

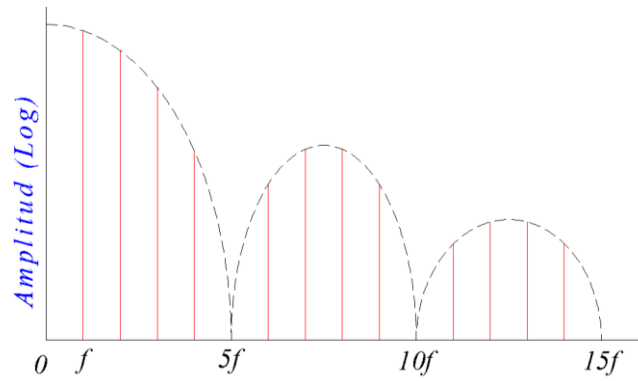


Figura 16: Espectro de una cuerda pulsada a un quinto de la distancia del extremo

De la misma forma, si pulsamos la cuerda a $\frac{1}{4}$ de la distancia desde un extremo, se suprime el cuarto armónico (y sus múltiplos). Si realizamos un análisis en el tiempo en el caso de que pulsemos a $\frac{1}{5}$ del extremo, podemos observar cómo aparece una curva que avanza y retrocede dentro de los límites que define un paralelogramo (esto es el resultado de esos dos pulsos [línea de puntos] viajando en direcciones contrarias). Cada uno de estos pulsos puede describirse por un término en la solución de Alembert (*Expresión 14*).

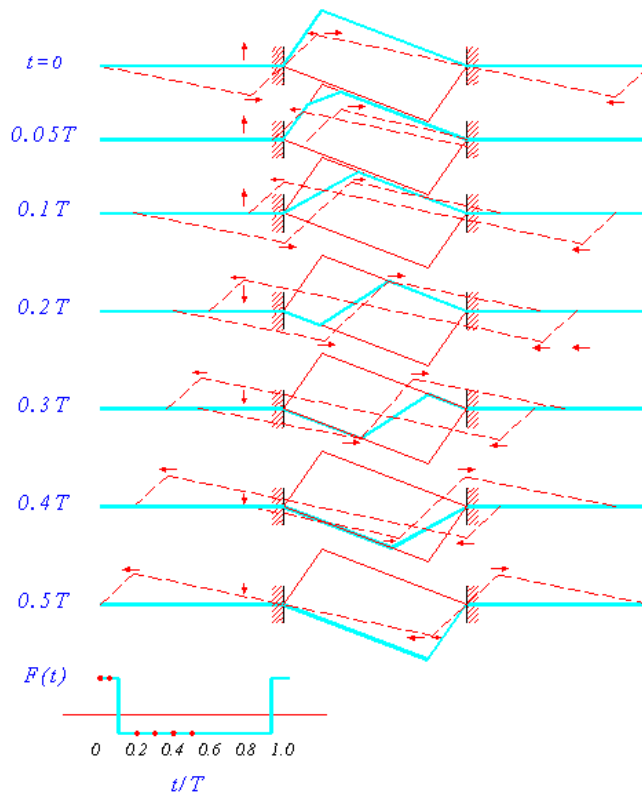


Figura 17: Análisis en el tiempo a través de medio ciclo de movimiento de una cuerda pulsada a un quinto de la distancia desde un extremo. El movimiento puede describirse como debido a dos pulsos que se mueven en direcciones opuestas (línea punteada). El movimiento resultante consiste en dos curvas, una moviéndose a favor de las agujas del reloj y otra en contra, alrededor del paralelogramo. La fuerza normal en el final del soporte se muestra abajo, en función del tiempo

Por otro lado, cada modo normal descrito en la **Expresión 25** tiene dos coeficientes A_n y B_n cuyos valores dependen de la excitación inicial de la cuerda y que pueden ser calculados mediante el *análisis de Fourier*. Multiplicando cada lado de la **Expresión 26** y su derivada en el tiempo, $\dot{y}(x, 0)$, por $\sin \frac{n\pi x}{L}$ e integrando desde 0 a L, obtenemos la siguiente expresión de los coeficientes de Fourier:

$$A_n = \frac{2}{\omega_n} \int_0^L \dot{y}(x, 0) \sin \frac{n\pi x}{L} dx \quad (\text{Expresión 33})$$

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L y(x, 0) \sin \frac{n\pi x}{L} dx \quad (\text{Expresión 34})$$

Usando esta fórmula podemos calcular los coeficientes de Fourier para una cuerda de longitud L pulsada con una amplitud h a 1/5 de su extremo, como muestra la **Figura 17**. Las condiciones iniciales son:

$$\begin{aligned} \dot{y}(x, 0) &= 0, \\ y(x, 0) &= \frac{5h}{L} x, \text{ con } 0 \leq x \leq \frac{L}{5}, \\ &= \frac{5h}{4} \left(1 - \frac{x}{L}\right), \text{ con } \frac{L}{5} \leq x \leq L \end{aligned} \quad (\text{Expresión 35})$$

Usando la primera condición de la **Expresión 33** resulta que $A_n=0$, y usando la segunda condición (**Expresión 34**) tenemos:

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^{L/5} \frac{5h}{L} x \sin \frac{n\pi x}{L} dx + \frac{2}{L} \int_{L/5}^L \frac{5h}{4} \left(1 - \frac{x}{L}\right) \sin \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{25h}{2n^2\pi^2} \sin \frac{n\pi}{5} \quad (\text{Expresión 36})$$

Dando valores a n tenemos: $B_1 = 0.7444h$, $B_2 = 0.3011h$, $B_3 = 0.1338h$, $B_4 = 0.0465h$, $B_5 = 0$, $B_6 = -0.0207h$, etc. La **Figura 16** muestra $20 \log|B_n|$ para n desde $n=0$ a $n=15$ y, como podemos apreciar, $B_n = 0$ para $n=5, 10, 15$, etc., lo que caracteriza a una cuerda pulsada a 1/5 de su extremo.

9. Vibraciones longitudinales de una cuerda

Las ondas longitudinales en una cuerda son mucho menos comunes que las transversales. Sin embargo, ocurren, y pueden incrementar la aparición de ondas estacionarias o de modos longitudinales de vibración. Al contrario que las ondas transversales, su velocidad (y por lo tanto su frecuencia) no cambia con la tensión (excepto en el caso de que se den cambios en las propiedades físicas de la cuerda). Por otro lado, desde el punto de vista físico, las ondas longitudinales en una barra muy delgada viajan a la misma velocidad a la que lo hacen las ondas longitudinales en una del mismo material.

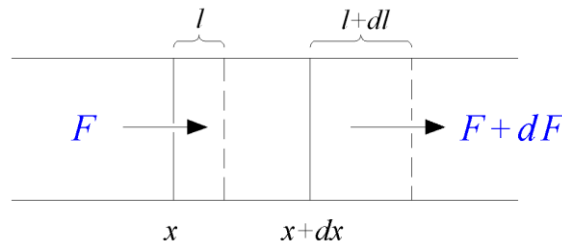


Figura 18: Fuerzas y estiramientos en un segmento corto de cuerda (o barra)

Así pues, consideraremos un segmento corto de longitud dx de una cuerda, con sección de área S , como vemos en la **Figura 18**, sobre la que actúa una fuerza $F(x)$. El plano en x se mueve una distancia l hacia la derecha cuando el plano en $x + dx$ se mueve una distancia $l + dl$. La tensión viene dada por F/S y la deformación debida a esa tensión (cambio de longitud por unidad de la longitud original) por $\partial l/\partial x$. Llamando E al módulo de Young, la ley de Hooke puede escribirse como:

$$\frac{F}{S} = E \frac{\partial l}{\partial x} \quad (\text{Expresión 37})$$

Si ahora expandimos $F+dF$ siguiendo el desarrollo en serie de Taylor y derivamos la **Expresión 37** se tiene:

$$dF = F(x + dx) - F(x) = \frac{\partial F}{\partial x} dx = SE \frac{\partial^2 l}{\partial x^2} dx \quad (\text{Expresión 38})$$

La masa del segmento bajo observación es $\rho S dx$, y por lo tanto, la ecuación del movimiento queda así:

$$\rho S dx \frac{\partial^2 l}{\partial t^2} = SE \frac{\partial^2 l}{\partial x^2} dx,$$

$$\frac{\partial^2 l}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 l}{\partial x^2} = c_L^2 \frac{\partial^2 l}{\partial x^2} \quad (\text{Expresión 39})$$

Esta es la ecuación de una onda unidimensional con velocidad $c_L = \sqrt{E/\rho}$.

La solución general de la **Expresión 39** tiene la misma forma que la ecuación de la **Expresión 14** de ondas transversales en una cuerda:

$$l = y_1(c_L t - x) + y_2(c_L t + x), \quad (\text{Expresión 40})$$

Donde la función $y(x,t)$ especifica la forma de la perturbación de la onda. Los modos normales de vibración dependen de las condiciones de los extremos. Si ambos extremos son fijos (o si ambos están libres) los modos de frecuencia vienen dados por:

$$f_n = n \frac{c_L}{2L}, \text{ con } n=1,2,3,\dots \quad (\text{Expresión 41})$$

Y en una cuerda fija solo en uno de sus extremos (aunque este caso no es de nuestro interés) por:

$$f_m = m \frac{c_L}{4L}, \text{ con } m=1,3,5,\dots \quad (\text{Expresión 42})$$

La influencia de las vibraciones longitudinales puede ser fácilmente percibida por cualquier oyente. El ejemplo más habitual aparece cuando un músico de cuerda emplea una fuerza excesiva con el arco y modifica el ángulo de ataque del arco respecto a la cuerda (cuanto más se aleje este ángulo de la perpendicular respecto a la cuerda será más evidente). Aparecen entonces sonidos cuyas frecuencias suelen estar entorno a los 1 a 5 kHz y que vibran de forma no armónica respecto al sonido debido al movimiento transversal del arco. De forma experimental, Lee y Rafferty (Lee & Rafferty, 1983) observaron modos longitudinales de frecuencia 1350 Hz y 2700 Hz en las cuerdas SOL y RE de un violín. Schumacher (Schumacher, 1975), apunta que el movimiento longitudinal de las cerdas sobre la cuerda en el punto de contacto puede diferir de la velocidad nominal del arco alrededor de un 12%.

10. Breve evolución histórica de los instrumentos de la familia de la cuerda frotada

La familia del violín aparece por primera vez claramente diferenciada en el norte de Italia en la primera mitad del siglo XVI. A partir de la segunda mitad de ese siglo los cambios que presenta a nivel morfológico son mínimos por lo que los instrumentos de esa época son en cuanto a sus características organológicas muy similares a los actuales.

El siglo comprendido entre los años 1650 y 1750 constituye la edad de oro de la construcción de los violines. De la mano de Nicolo Amati (1596–1684), el último y más

prestigioso de la saga de lutieres de la familia, se produce el apogeo en la construcción de violines y de esa tradición son directamente herederos lutieres como Antonio Stradivari (1644–1737), Andrea Guarneri (ca. 1626–1698), o su nieto Bartolomeo Giuseppe Guarneri (1698–1744).

Antonio Stradivari y Giuseppe Guarneri se alejaron significativamente de los diseños anteriores que presentaban unas tapas frontal y trasera muy abombadas construyendo violines de cuerpos más planos con lo que les permitió lograr una tensión mayor de las cuerdas y un sonido mucho más contundente para grandes salas de concierto. Los violines Stradivari son conocidos por su sonido brillante mientras que los de Guarneri se caracterizan por su volumen y carácter más oscuro.

Con la muerte de Stradivari en 1737 y Guarneri en 1744, la escuela de constructores de Cremona sufre un abrupto final. Desde entonces sus violines han sido frecuentemente imitados y copiados, si bien su sonido ha evolucionado de una forma única e inimitable.

En cuanto al miembro más grave de la familia, el contrabajo, debemos señalar que es fruto de la convergencia de la familia del violín y de la familia de la viola de gamba. Hacia 1575, en esta familia de las violas se pueden distinguir unos atributos característicos, como son la espalda o fondo plano, la panza o tapa frontal arqueada, escotaduras curvadas para el paso del arco, un mástil ancho, hombros caídos, clavijas laterales y clavijero inclinado hacia atrás. Es en 1618, cuando el segundo volumen de la obra *Sintagma Musicum* de M. Praetorius se especifica por primera vez en un tratado organológico las características propias de un instrumento al que se le da el nombre de Violone, antecedente directo del actual contrabajo. En 1636, Marín Mersenne en su obra *Armonía Universale* presenta un instrumento de cuerda de registro grave con afinación por cuartas (en lugar de por quintas, como sucedía en la familia del violín) y en varios grabados muestra como, además, este instrumento usa una pica para apoyarse en el suelo. Respecto al origen etimológico de la palabra contrabajo, debemos atribuir su uso asociado a la graduación en tamaño y afinación de los instrumentos en las familias de instrumentos musicales. Así el término de contrabajo acompañaba habitualmente al instrumento más grave y de mayores dimensiones dentro de la familia en cuestión, de manera que se encontraban nombres “Gros Contrabajo Geige” dentro de la familia del violín (geige, en su etimología alemana) o “Viola contra-basso” dentro de las violas. No obstante, es preciso señalar que el contrabajo es el único miembro de la actual familia

del violín que aún no ha estabilizado ni sus dimensiones ni su forma, por lo que es frecuente encontrar contrabajos muy diferentes entre sí.

11. Construcción de los instrumentos de cuerda frotada

Utilizaremos como ejemplo de toda la familia la estructura de un violín:

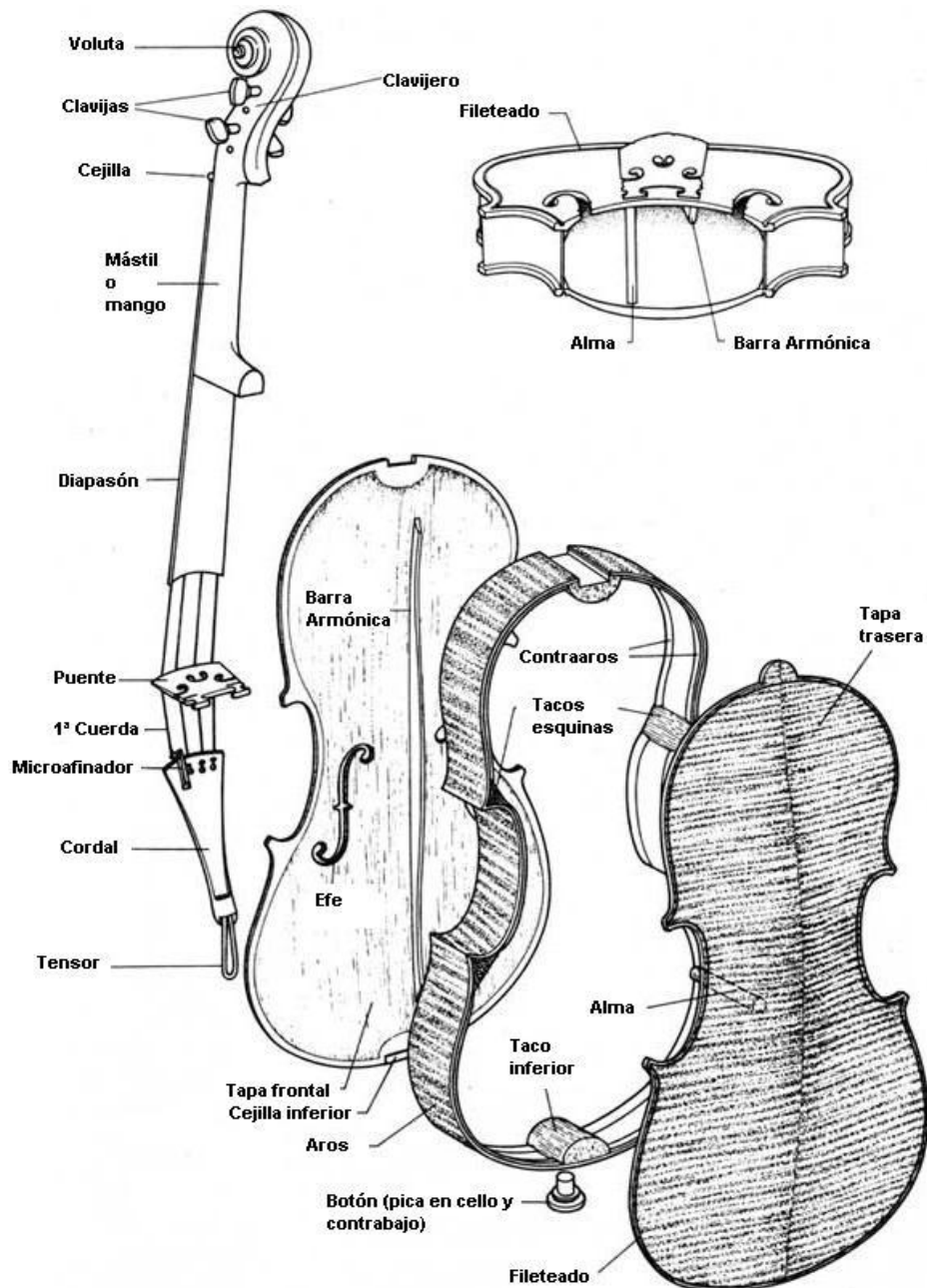


Figura 19: Estructura de un violín, como representante de la familia

A nivel constructivo el violín está compuesto por más de 70 piezas de madera que, excepto en los instrumentos procedentes de cadenas de montaje industriales, son talladas y montadas a mano.

Lo que a primera vista podrían parecer adornos, tienen con frecuencia un importante papel a nivel acústico y/o estructural. Así el cuerpo abovedado que delimitan las tapas frontal y trasera son esenciales para la potencia y amplificación del sonido. El fileteado (línea negra que aparece incrustada en el borde las tapas) no es sólo un elemento decorativo, ya que protege el cuerpo contra la aparición de grietas actuando como una junta de dilatación, pero también cambia la dinámica de la vibración considerablemente. Si eliminásemos ese surco en el cual se embute el fileteado podríamos experimentar cómo las distintas partes que confluyen en los bordes (tapas y aros) vibrarían como si fuesen bisagras en lugar de permanecer firmemente unidas.

El proceso de construcción de un violín comienza con la selección de materiales, lo que por sí solo es un arte, ya que se deben seleccionar maderas fuertes, pero flexibles y tan secas como sea posible. Suelen cortarse durante los meses fríos, cuando la cantidad de savia en ella está en niveles mínimos, y se seca varios años bajo estrictas condiciones de humedad y temperatura. La madera usada en los mejores instrumentos se seca por encima de los diez años, llegando a veces a cincuenta años.

Igualmente importante es el proceso de selección, corte y talla de las tapas frontal y trasera. La tapa frontal se suele hacer con una madera blanda, típicamente abeto (*Picea abies* o *Picea excelsis*), mientras que la trasera es normalmente arce (*Acer platanoides*).

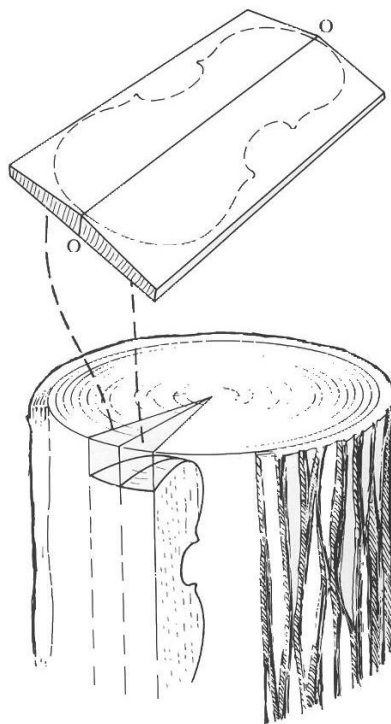


Figura 20: Corte de las tapas

Por otro lado, la madera del diapasón, cejillas (superior e inferior) y cordal (así como la nuez del arco) suele ser de ébano y la madera de la vara del arco de pernambuco (*Caesalpinia echinata*).

Por su parte, la estructura abovedada proporciona la resistencia necesaria a la fina tapa superior para soportar la fuerza que sobre ella ejercen las cuerdas tensas y altera sutilmente los modos en los cuales vibran ambas tapas. La tensión total en las cuatro cuerdas de un violín ronda típicamente los 220 N, lo que en el puente supone una presión de aproximadamente 90 N.

La presión a la que queda sujeto el instrumento al transmitirse la presión de las cuerdas a la tapa hace necesario que tanto la barra armónica como el alma soporten parte de ella, a ambos lados del puente, a fin de evitar el hundimiento de las tapas. El lutier equilibra ambas tapas valiéndose de medidas visuales pero también de los característicos tonos de la tapa que aparecen al golpear estas ligeramente con los nudillos. El tono de los diversos armónicos resultantes se ajusta tallando las tapas tanto como sea necesario. Templar las tapas es probablemente la fase más crítica y exigente de la construcción de un violín y en ella interviene decisivamente la experiencia del lutier. En esta labor, sin embargo, ha influido más reciente el trabajo de Carleen Hutchins (Hutchins, 1975) que propone un método alternativo para la construcción teniendo en cuenta los patrones de Chladni quien, para observar los modos de resonancia (modos propios de vibración) de una placa circular o cuadrada, sujeta por su centro, la hacía vibrar frotándola con el arco de un violín, después de haber espolvoreado arena fina sobre ella y dibujaba las líneas y patrones que formaba la arena sobre la placa.

En lo referente a dimensiones de un violín, éstas varían de un constructor a otro, pero se acepta como habitual los 35 cm de largo y de 16 a 20 cm para los ejes de los vientres superior e inferior. Los aros suelen oscilar entre los 30 y los 32 mm. El espesor de las tapas varía entre los 2.0 a 3.5 mm para la superior y entre 2.0 a 6.0 mm, mientras que la altura de la bóveda en ambas tapas ronda los 15 mm.

La barra armónica y el alma

Aunque aparentemente a simple vista los instrumentos de cuerda frotada parecen simétricos, las vibraciones que emiten son asimétricas debido al diseño de la barra

armónica y el alma en su estructura, algo que ya fue observado por el físico francés Félix Savart y después por otros investigadores. Las cuerdas se frotan fundamentalmente en un plano paralelo a la tapa frontal, lo que induce un movimiento oscilante en el puente. Por debajo de la primera resonancia mecánica (en el caso de los violines, 2500 Hz) las fuerzas ejercidas hacia la caja del instrumento por las patas del puente son iguales en cuanto a magnitud y contrarias en cuanto a su fase. Si los instrumentos fueran simétricos, estas fuerzas iguales pero de signos contrarios excitarían principalmente los modos asimétricos de la tapa frontal, quedando débilmente excitados los modos simétricos de ambas tapas.

Por otro lado, músicos y lutieres saben que al mover el alma, aunque sea un desplazamiento pequeño, se puede ocasionar un cambio en el comportamiento sonoro del instrumento. Saldner (Saldner, Molin, & Jansson, 1996) comparó algunos modos de un violín, con el alma en su posición óptima, con ese mismo violín pero desplazando el alma 10 mm hacia el eje mayor del violín. Con el alma más cerca del centro, la frecuencia del primer modo de vibración de la tapa frontal aumentó un 9% y el nivel de movilidad del puente (admitancia de entrada) se incrementó unos 15 dB en la frecuencia del tercer modo de vibración del cuerpo del instrumento (su frecuencia en este caso no cambió).

En general, los lutieres consideran parámetros de percepción subjetiva (“apertura del sonido”, “búsqueda de más timbre”...) poco precisos para llevar a cabo el desplazamiento del alma. Partiendo de la siguiente posición teórica, los desplazamientos siguiendo estas cuatro direcciones básicas permiten conseguir esos parámetros:

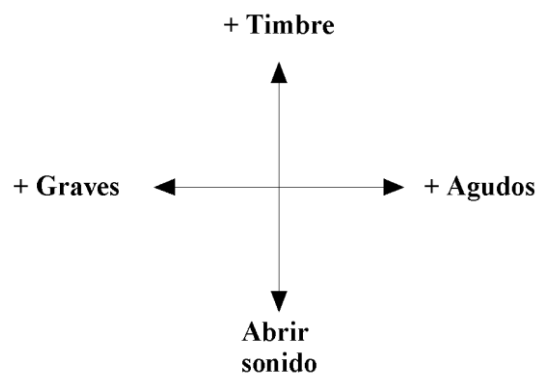


Figura 21: Direcciones de desplazamiento del alma y efectos que persiguen conseguir con ello los lutieres

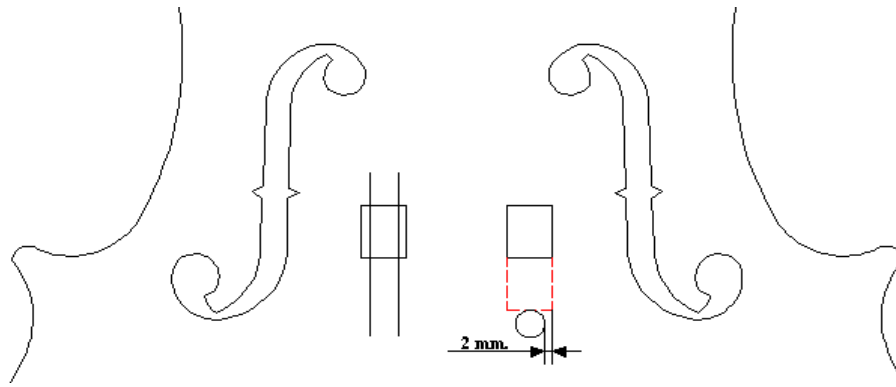


Figura 22: Esquema de la colocación ideal del alma

Algunos estudios como los de Marshall (Marshall, 1985) analizan las vibraciones longitudinales del alma y su oscilación. Los resultados de su análisis modal muestran modos en los cuales los dos extremos del alma se mueven en direcciones contrarias, aunque las frecuencias estén lejos del primer modo de vibración longitudinal del propio alma. Fang y Rodgers (Fang & Rodgers, 1992) han observado cómo se produce una fuerte oscilación en el alma de un violín a los 8 kHz.

La función principal de la barra armónica es dotar de una mayor robustez a la tapa frontal a nivel estático pero también dinámico. La barra armónica contribuye a distribuir la fuerza que realiza hacia el centro físico del instrumento el puente debido a la tensión de las cuerdas, a la vez que ayuda a incrementar la frecuencia de los modos de vibración de la tapa frontal. En la mayoría de los violines anteriores a 1800 ha tenido que sustituirse la barra armónica original por una más dura que permita soportar la mayor tensión que imprime sobre la tapa las cuerdas modernas. Estudios como los realizados por Schleske (Scheleske, 1996) muestran cómo los modos de la tapa frontal cambian muy poco con la incorporación de la barra armónica.

El puente y el uso de la sordina

La principal misión del puente es transformar el movimiento vibratorio de las cuerdas en fuerzas periódicas de carácter impulsivo a través de sus dos patas en contacto con la tapa frontal del instrumento. Sin embargo, sucesivas generaciones de lutieres han descubierto también que es posible alterar la curva de respuesta en frecuencia del instrumento al modelar la estructura del puente.

Savart, al que anteriormente hacíamos referencia, se refirió a ello como: “*si tomamos una pieza de madera cortada y la colocamos en el lugar del puente en un violín, el*

instrumento carecerá de sonido. El sonido comenzará a aparecer si tallamos dos patas en ese trozo de madera; si hacemos a continuación dos ranuras laterales, la calidad del sonido se incrementará notablemente, y mejorará hasta acercarnos completamente a la forma habitual del puente. Es asombroso cómo siguiendo nuestra propia intuición habremos llegado a la forma usada habitualmente, que parece ser la mejor de todas de las que podrían haber sido adoptadas”.

Los experimentos llevados a cabo por Minnaert y Vlam (Minnaert & Vlam, 1937) confirman las primeras observaciones realizadas por Raman y otros investigadores acerca de que el puente tiene un gran número de modos de vibración y que esas vibraciones no quedan confinadas en el propio plano del puente. Colocando espejos alrededor del puente y observando la desviación de la luz de un haz de rayos al tocar con el arco, fueron capaces de identificar y separar las vibraciones longitudinales, y las debidas a movimientos de flexión y torsión del propio puente.

Bladier (Bladier, 1960) y Steinkopf (Steinkopf, 1963) estudiaron la función de respuesta en frecuencia de los puentes de violonchelos. Bladier concluyó que el puente actúa como un elevador acústico o amplificador, con una ganancia de 2 (es decir, 6 dB) entre los 66 y los 660 Hz o de 1 (o menos) por encima de los 660 Hz. Steinkopf modeló el puente del violonchelo como un dispositivo de tres puertos: uno de entrada (las cuerdas vibrantes) y dos de salida (las patas). También observó una resonancia mayor en los 1000-1500 Hz en distintos puentes y cómo por debajo de esa resonancia el puente actúa como un muelle rígido con una reactancia que varía como $1/f$.

Otro experimento significativo es el realizado por Reinecke (1973), quien adhirió sensores de fuerza piezoeléctricos en los surcos de las cuerdas sobre el puente y bajo ambas patas. Con ello midió la velocidad en el borde superior del puente con un sensor capacitivo, de manera que pudo determinar tanto la impedancia de entrada como la función de transferencia de fuerza. Así observó resonancias en torno a los 1000 y 2000 Hz en los puentes de violonchelo y en torno a 3000 y 6000 Hz en violines suspendidos en un soporte rígido y que en esas resonancias, la impedancia alcanza un mínimo y la función de transferencia de la fuerza, por el contrario, un máximo. Gracias a una

interferometría holográfica² estos modos de vibración de un puente pueden ser fácilmente determinados. Como vemos en la siguiente figura:

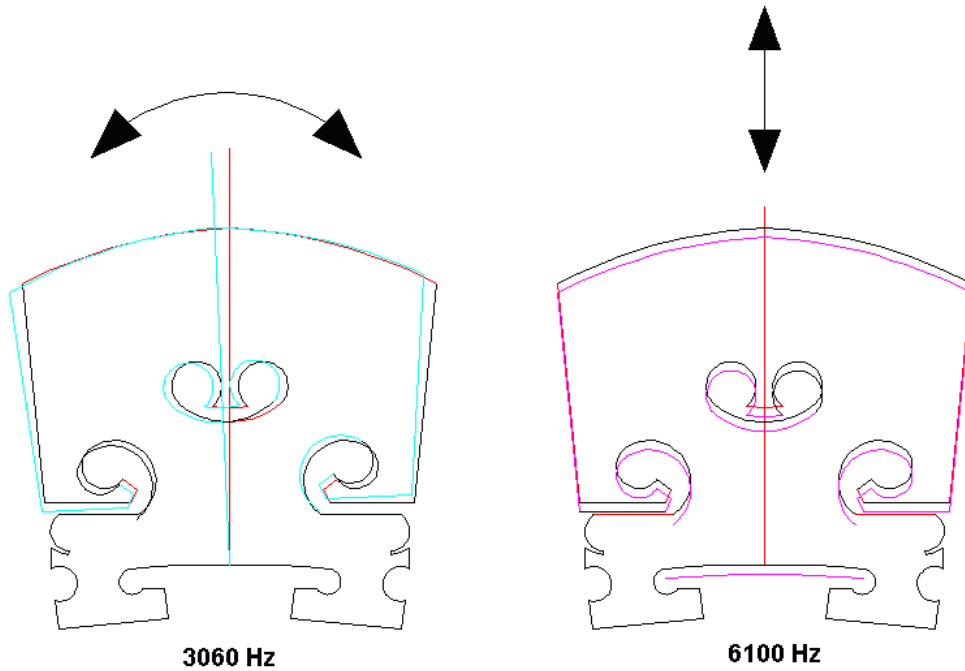


Figura 23: Primeros dos modos de vibración en un puente de violín

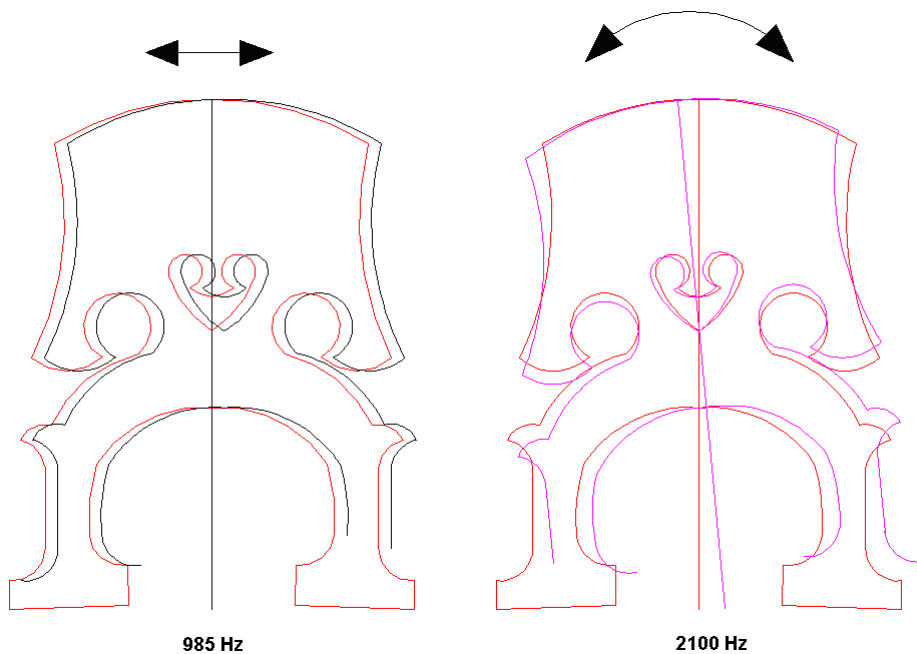


Figura 24: Primeros dos modos de vibración en un puente de violonchelo

² Técnica de inspección de superficies en la que se disponen los hologramas (un holograma de un objeto reproduce el frente de onda que dispersa cuando es iluminado por un haz coherente) de un objeto correspondientes a los estados de éste antes y después de una transformación, y se observa la interferencia resultante, donde se pueden visualizar franjas de interferencia que den información sobre dicha transformación.

Los movimientos que se producen en los dos primeros modos de vibración de un puente de violín y de otro de violonchelo pueden tener comportamientos claramente distintos. Así en la primera resonancia del de violín el movimiento es rotacional, frente a la primera del violonchelo donde es fundamentalmente elástico. En el segundo modo aparece una fuerza vertical en el violín, mientras que en el violonchelo es ahora rotacional.

La sordina, por otro lado, permite al intérprete lograr un sonido más oscuro y apagado. Desde el punto de vista acústico esto se debe a que la sordina, al añadir una masa considerable al puente, desplaza las frecuencias de resonancia del puente a las bajas frecuencias. Inversamente, las frecuencias de resonancia pueden elevarse debido a la elasticidad adicional que puede obtenerse de los surcos donde encaja la cuerda.

En cuanto a su construcción, los puentes suelen ser tallados, tras un periodo de secado de al menos 5 años, de forma casi simétrica y presentan un ángulo recto hacia el lado del cordal. En el lado contrario se apreciará también una mayor concentración de pequeñas manchas oscuras (la malla) que son las vetas de la madera. La anchura de las patas varía para cada miembro de la familia y de un instrumento a otro (aproximadamente unos 4 mm en los violines, 4-6 en violas, 11 en el violonchelo y 17 para el contrabajo) y se cepillan por su base hasta lograr un ajuste perfecto con la tapa (ello es clave para un óptimo acoplamiento de impedancia). La altura está tabulada, pero depende del gusto del músico, de la tensión de las cuerdas y de las peculiaridades morfológicas de cada instrumento. De forma práctica los lutieres han desarrollado también un mecanismo de tallado del puente que afectan a la dinámica vibratoria de todo el instrumento. Así, hacen depender la curva de tallado del puente del abombamiento de la tapa superior. De esta manera, si el abombamiento es grande el instrumento poseerá un timbre atractivo pero experimentará una pérdida de volumen sonoro lo que se compensa con un puente fino. Si al contrario, la tapa está poco abombada, se optará por un puente grueso, con mucha tripa, que frene la dinámica amplia y aporte calidad al sonido.

Sin embargo, autores como Hacklinger (M. Hacklinger, 1978) cuestionan esa simetría general y sugieren que hacia el lado de los agudos debería ser más denso y robusto que en el lado de los graves, debido a la mayor tensión en las cuerdas superiores y al hecho de que la fuerza estática es aproximadamente el doble en la pata del alma que en la pata

de la barra armónica. Otro hecho en el que los defensores de esta tendencia respaldan sus argumentos es que el eje mayor de la vibración de la primera cuerda se encuentra paralelo a la tapa frontal, lo que no sucede con la última, que vibra con una inclinación de unos 50° aproximadamente.

Hacklinger (M. Hacklinger, 1979) recomienda también una inclinación del puente, de forma que los ángulos α y β a ambos lados sean iguales, con lo que consigue también que la tensión en ambos segmentos de la cuerda sea la misma.

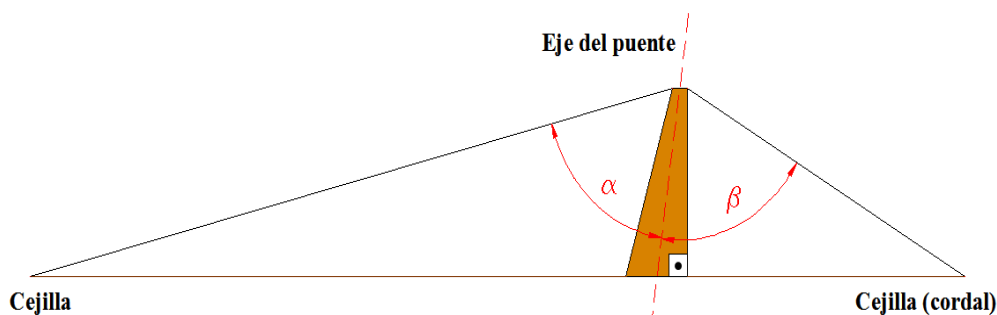


Figura 25: Inclinación del puente de forma que $\alpha = \beta$ de forma que ambos segmentos tengan igual tensión (notar que el eje del puente no está perpendicular a la tapa frontal, sino que se desplaza ligeramente hacia el cordal, a efectos de compensar dichas tensiones)

A nivel de mantenimiento del instrumento es importante tener en cuenta cómo repercuten ciertas acciones cotidianas en la conservación del puente:

- a) Si en instrumentos que disponen de microafinadores en el cordal sólo afinamos con ellos (sin modificar la tensión de las cuerdas con las clavijas) el puente puede deformarse e inclinarse hacia el cordal.
- b) Si sólo afinamos con las clavijas y no compensamos al tensar las cuerdas esa fuerza en el puente (especialmente habitual en violonchelos y contrabajos), el puente puede deformarse e inclinarse hacia el diapasón.
- c) Si, de nuevo en el caso de instrumentos con microafinadores en el cordal, se tienen una o dos cuerdas con esos microafinadores (y el resto sin ellos) y se actúa principalmente sobre ellos en lugar de sobre las clavijas puede producirse una deformación lateral del puente.

12. Análisis acústico de los recursos y modos de producción del sonido en instrumentos de cuerda frotada

Vibrato

El vibrato se produce en los instrumentos de cuerda mediante un movimiento periódico de balanceo del dedo sobre la cuerda que provoca una modulación en frecuencia.

La definición recomendada por la American National Standards Institute (ANSI) es: *“el vibrato es una familia de efectos tonales en música que depende de variaciones periódicas de una o más características de la onda sonora. Cuando esas características son conocidas, el término vibrato suele ser acompañado de un término que establece una tipología, como vibrato de frecuencia, vibrato de amplitud, vibrato de fase...”*. Siguiendo esta recomendación, estableceremos una diferencia entre el vibrato de frecuencia, que hará referencia a la modulación en frecuencia (FM) y el vibrato de amplitud, que se referirá a la modulación de amplitud (AM). De forma práctica es imposible obtener un vibrato puro de frecuencia, ya que al originarse una serie de resonancias del instrumento y resonancias en el espacio donde se toque, se generará el vibrato de amplitud. El caso contrario (vibrato de amplitud sin vibrato de frecuencia) es posible en un vibráfono con resonadores que se abran y cierren periódicamente, pero tampoco sucederá en instrumentos de cuerda.

La frecuencia del vibrato oscila generalmente entre 5 y 8 Hz, variación similar a la que realizan los cantantes con el vibrato vocal (Small, 1937). La desviación en frecuencia ronda los 25 cents, aunque puede sobrepasar en ocasiones los 35 cents (Meyer, 1992). Debido a las resonancias del cuerpo de los instrumentos de cuerda, esa desviación en frecuencia genera una modulación de amplitud en cada parcial, que puede tener la frecuencia de movimiento del dedo o el doble de esta frecuencia, dependiendo de la frecuencia de resonancia del tono tocado. Esta modulación de amplitud provocará cambios en el nivel de sonido de 3 a 15 dB.

El vibrato a nivel cualitativo se valora como una herramienta que aporta calidez sonora a la emisión de notas pisadas en instrumentos de cuerda. Además, a nivel de conjunto, el que los intérpretes sincronicen la frecuencia de sus vibratos favorece el empaste de la agrupación de forma que, gracias a la interferencia constructiva que se produce al estar

esos vibratos en fase, el oyente puede experimentar un aumento en la intensidad percibida.

Velocidad del arco y fuerza en el arco

Por parte de los músicos de cuerda es conocido que es posible tocar más fuerte pasando el arco más rápido y cerca del puente. Cremer (Cremer, 1984) señala que bajo condiciones normales de ejecución, el desplazamiento máximo de la cuerda y_m y el pico de fuerza transversal en el puente F_m son proporcionales al cociente v_b/x_b basándose en los datos experimentales de H. Müller y E. Völker. Las relaciones pueden ser escritas:

$$y_m = \frac{1}{8f} \frac{v_b}{x_b} \text{ y } F_m = \mu c \frac{v_b}{x_b} \quad (\text{Expresión 43})$$

En estas expresiones v_b es la velocidad del arco, x_b la distancia desde el puente al punto de contacto del arco, f la frecuencia, μ la masa por unidad de longitud, c la velocidad de la onda y el producto μc la impedancia característica de la cuerda.

Para cada posición del arco existe una fuerza máxima y mínima a realizar con el arco (lo que solemos llamar como presión del arco) que supone los límites del comienzo y fin del deslizamiento del arco sobre la cuerda. Cuanto más cerca del puente (sul ponticello) se pasa el arco, menor es el margen entre la fuerza máxima y mínima, y por tanto más difícil de lograr ese equilibrio en la aplicación de la fuerza. Según Cremer y Lazarus (Cremer & Lazarus, 1968), la fuerza mínima del arco es proporcional a v_b/x_b si bien, posteriormente Cremer precisa que más bien esta relación es v_b/x_b^2 .

Askenfelt (Askenfelt, 1986) usa un arco equipado con medidores de resistencia y de tensión para determinar la velocidad y fuerza empleadas en el movimiento por dos violinistas profesionales en multitud de situaciones interpretativas. El resultado en lo que a fuerza se refiere oscilaba entre 0.5 y 1.5 N, siendo la mínima fuerza capaz de producir un sonido 0.1 N. La velocidad del arco variaba entre 0.1 y 1m/s, siendo la mínima velocidad capaz de producir un sonido 0.04 m/s. Por otra parte, obtuvo que un rango de 38 dB en la velocidad del arco produce un cambio en el nivel de vibración de la tapa superior de unos 30 dB, lo que sugiere que la distancia entre el punto de contacto del arco y el puente cambió entre los valores máximo y mínimo de fuerza del arco.

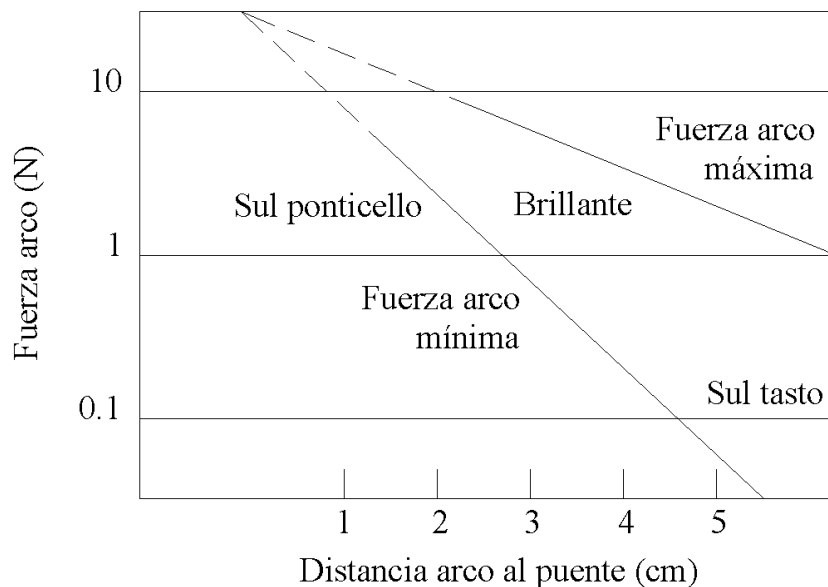


Figura 26: Rango de fuerza en el arco para diferentes distancias del puente al arco, en un violonchelo tocado con un arco a 20 cm/s. La región “sul ponticello” es aquella adyacente al puente, mientras que la región “sul tasto” es la que denota las inmediaciones del comienzo del diapasón o tastera.

Aunque la mayoría de los estudios acerca de la velocidad del arco y la fuerza de éste han considerado una situación de comportamiento estacionario, Pickering (Pickering, 1986) estudió el efecto de estos parámetros en distintos tonos. El arco se aceleraba según sus resultados hasta alcanzar una velocidad constante, momento en que las amplitudes de la fundamental y el segundo armónico se observaban como funciones de tiempo. Con una fuerza del arco relativamente pequeña, 0.2 N (unos 20 gramos de peso), el segundo armónico aparecía más rápidamente que la fundamental. La respuesta óptima ocurría cuando la fuerza del arco se incrementaba a 0.6 N. Con una fuerza de 0.8 N, la ruptura periódica del movimiento de Helmholtz hacía que el resultado sonoro fuese similar a un graznido. Pickering encontró también que al pasar el arco más lejos el puente se tenía una mayor tolerancia a los cambios de fuerza en el arco.

Por otro lado, el resultado de aplicar una gran fuerza con el arco sobre la cuerda es la aparición de un sonido ronco que el intérprete normalmente evita. Sin embargo, si realizamos un cuidadoso control del arco, es posible aprovechar esto para producir sonidos periódicos con un tono definido mucho menor que el que obtendríamos con una fuerza normal. Estos tonos corresponden a la tercera, séptima, octava, novena y duodécima por debajo de la frecuencia fundamental de vibración de la cuerda (Hanson, Schneider, & Halgedahl, 1994). En el modelo de Helmholtz, los rizados producidos por

las ondas reflejadas, que tienen el mismo periodo que la cuerda vibrando libremente, sirven como una señal de sincronización para asegurar que el periodo para el proceso de “pegar y deslizar” es el mismo que el de vibración natural de la cuerda. Si, sin embargo, la fuerza del arco es mucho mayor, la fuerza de rozamiento transversal máxima ejercida por el arco sobre la cuerda es suficiente para prevenir el rizado, produciendo el relajamiento de la cuerda desde las cerdas y continuando el arco en la parte del ciclo correspondiente al arrastre.

Por tanto, si se ejercita un cuidadoso control del arco es posible que ocurra este movimiento periódico con un período más largo que el normal, como resultado de excitar regularmente la misma parte de la forma de onda en cada ciclo. Según Hanson (1994) y Guettler (Guettler, 1994) esto es el resultado de la combinación de las reflexiones producidas en las ondas transversales y las reflexiones de ondas surgidas fruto de la torsión de la cuerda (un fenómeno poco significativo dado el escaso impacto de las oscilaciones torsionales en el resultado sonoro final).

Influencia de la cantidad de cerdas usadas en la producción del sonido

La importancia de la cantidad de cerdas usadas a la hora de producir un sonido es otro aspecto a tener en cuenta ya que experimentalmente los músicos saben que los resultados de la aplicación de más o menos cerdas sobre la cuerda varían enormemente. El modelo físico de cuerda frotada propuesto por Pitteroff (Pitteroff, 1993), tiene en cuenta la anchura de la superficie de cerdas usada, el movimiento angular de la cuerda, la elasticidad de las cerdas y la rigidez de las cuerdas. Uno de los resultados de ese análisis revela que la fuerza de rozamiento para el borde del arco que queda orientado hacia la cejilla es menor que la del borde que queda más cerca del puente.

Pitteroff y Woodhouse (Pitteroff & Woodhouse, 1998) consideran que la elasticidad del arco es otro parámetro crítico, pero depende en gran medida de las propiedades físicas de cada variedad de crines y aún en las extraídas de un mismo animal, del ritmo de crecimiento de las crines, ya que las crines tienen propiedades distintas al ser más vigorosas en la base del pelo y más viejas y endebles en el extremo.

Debido a estos fenómenos los músicos de cuerda varían constantemente el número y el ángulo de inclinación de las cerdas sobre la cuerda. Así, para facilitar el ataque de una

nota puede comenzarse con pocas cerdas y con un alto grado de inclinación de las mismas con respecto a la cuerda para, una vez iniciada la vibración aumentar el número de ellas y reducir el ángulo de ataque. Por otro lado, un alto grado de inclinación está asociado con una pequeña fuerza a nivel de arco, así como una gran fuerza suele conllevar el empleo de la totalidad de las cerdas.

El papel acústico de la resina

Las crines de caballo, como todo pelo, presentan pequeñas escamas en su superficie que hacen que la fricción sea diferente en las dos direcciones de movimiento y casi nula en un pelo limpio. La acción del arco depende pues tanto del montaje de las cerdas en el arco como de la cantidad de resina y de sus propiedades adherentes.

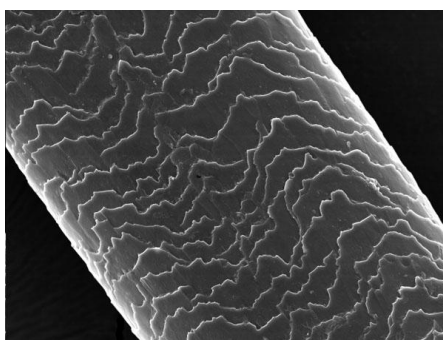


Figura 27: Escamas en la superficie del pelo

Habitualmente la resina que se emplea para los arcos es una goma obtenida de las coníferas por exudación de los árboles en crecimiento o extracción de los tocones, más concretamente residuo de la destilación de la trementina. Es la fracción no arrastrable por vapor de la oleoresina y está constituida de una mezcla de ácidos resínicos, mayoritariamente el ácido abiético. La resina en condiciones normales de temperatura es sólida y seca, pero se vuelve pegajosa al ser frotada fruto del calor del rozamiento. Gracias a ese rozamiento partículas de diversos tamaños se adhieren a la superficie de las cerdas. A medida que se va usando el arco como elemento de fricción sobre las cuerdas, las partículas de resina más grandes se van desprendiendo o fundiendo fruto del calor del rozamiento, hasta que finalmente se consumen o quedan entre las distintas cerdas.

Otra de las propiedades más significativas de la resina es que al calentarse fruto del rozamiento aumenta rápidamente su coeficiente de rozamiento, actuando como

lubricante durante el ciclo de agarre descrito por Helmholtz. Autores como Pickering (1991) han recurrido a un análisis con fotografías infrarrojas en el que se demuestra cómo la temperatura de la cuerda puede incrementarse entre 25 y 30° en el momento que actúa sobre ella el arco, produciéndose dicho incremento en centésimas de segundo (Pickering, 1991).

13. Cuidado de los instrumentos desde el punto de vista acústico

Es posible realizar revisiones a los instrumentos basándose en un examen de los ruidos y sonidos parásitos que presentan. Las patologías principales que sufren los instrumentos de cuerda frotada pueden detectarse pues gracias a una audición cuidadosa de los mismos y llevarnos a plantearnos una posible reparación o tratamiento. En este sentido, la realización de un proceso de grabación como el que planteamos, puede revelar la existencia de algunas de estas patologías. Además, el estudio de estas grabaciones y la aplicación de diversas técnicas de análisis acústico sobre ellas pueden servir para identificar y caracterizar estos fenómenos.

Como norma general hay que tener en cuenta que el ruido se nota más al tocar cuerdas graves (sonidos graves) debido a que el ruido es de más alta frecuencia, mientras que al tocar cuerdas más agudas (sonidos más agudos) se enmascara, quedando oculto al oído.

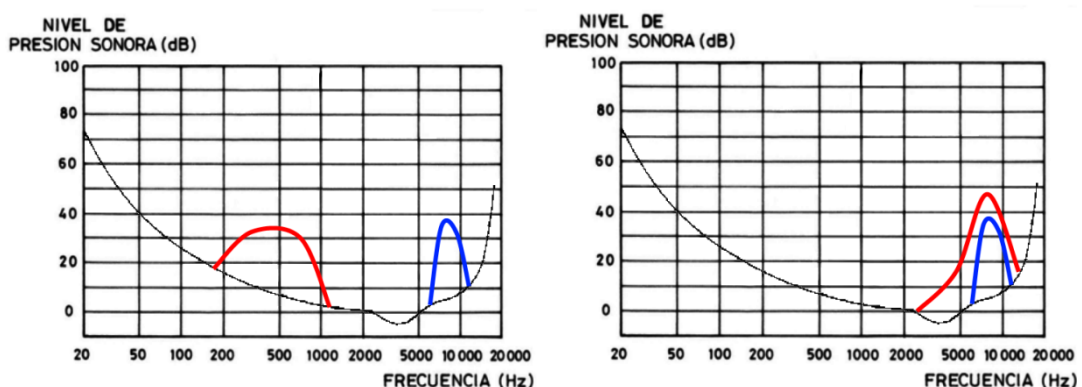


Figura 28: Enmascaramiento de ruidos parásitos. En la primera figura vemos cómo la máscara (representada por la línea roja) producida por un sonido grave (por ejemplo una cuerda grave al aire, sin presión de los dedos de la mano izquierda) está lo suficientemente alejada en frecuencia de un ruido parásito (línea azul), de forma que éste último puede ser escuchado (al no existir enmascaramiento frecuencial). Sin embargo, en la segunda figura, se observa cómo si la frecuencia del sonido excitado es aguda puede enmascarar al ruido, dificultando su audición y, por tanto, el diagnóstico.

Esto es debido a que los sonidos producidos por las cuerdas actúan como máscaras de los ruidos parásitos. Al ser estos ruidos de alta frecuencia, la máscara que supondrían los sonidos más graves (producidos por las cuerdas más graves) queda lo suficientemente alejada en frecuencia como para no enmascarar el ruido (de forma que éste es apreciado por el oyente). En el caso de los sonidos más agudos (producidos en general por las cuerdas más agudas) al ser muy cercanos en frecuencia (y de mayor nivel) al ruido parásito, pueden actuar como máscara de dicho ruido.

- a) Barra armónica despegada: Esta patología se manifiesta acústicamente como un corte súbito en la producción del sonido, que suele aparecer acompañado de una vibración descontrolada del cuerpo del instrumento (se excitan los modos de vibración del cuerpo de forma no armónica) y se percibe como si se diera un golpe dentro de la tapa, coincidiendo con esa interrupción. Si se insiste, el efecto sonoro es comparable al ruido de las aspas de un helicóptero, al sucederse este fenómeno de sonido e interrupción rápidamente.
- b) Fileteado despegado: Si debido a las vibraciones que recorren ambas tapas, se despegan los laterales del fileteado dentro de su mordaza aparece un sonido de alta frecuencia que al verse amplificado por la caja de resonancia se asemeja al ruido que producen las abejas al volar.

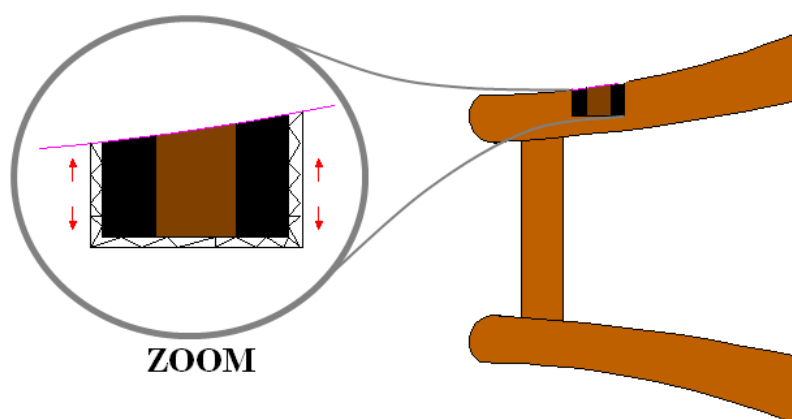


Figura 29: Detalle del fileteado y del movimiento que tiene lugar al despegarse

- c) Bordes despegados: Se caracteriza por tres indicativos acústicos: una bajada en el rendimiento sonoro general, la emisión de un ruido de alta frecuencia constante (vuelo de abeja) y una vibración no armónica que aparece y

desaparece. Para encontrar dónde se localiza la zona despegada se sostiene el instrumento (en el caso de violín, viola y violonchelo) suspendido en el aire con una mano mientras con la otra se golpea con los nudillos las tapas. Se excitan así los modos de vibración de esa tapa y se puede apreciar donde aparece una vibración anómala, delatora de la patología.

- d) Cierre de las efes: se da en violines y violas y se manifiesta como un ruido muy potente, causado por la acumulación de resina en la parte superior o inferior de la efe.

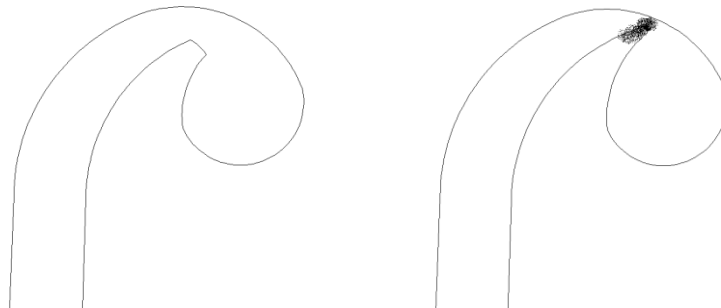


Figura 30: Efe antes y después de sufrir una acumulación de resina

- e) Desgaste de la cejilla: Aparece un ruido parásito, que deteriora la emisión normal del sonido. Este ruido es el resultado de un largo proceso de desgaste del surco de la cuerda en la cejilla. Al afinar, la cuerda va y viene actuando como una sierra muy fina (se previene pintando la hendidura con grafito), al igual que cuando se pisa la cuerda se desgasta la entalla en la entrada, dejando un espacio de vibración bajo el punto de anclaje de la cuerda.

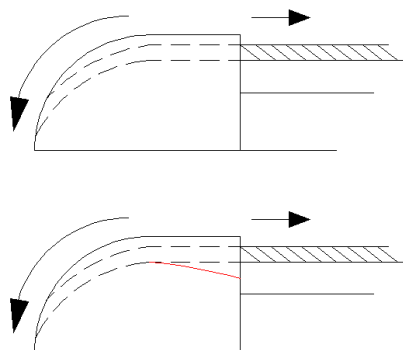


Figura 31: Desgaste de la cejilla. El gráfico superior muestra la cejilla al comienzo del proceso, mientras que la inferior muestra cómo ha actuado ese desgaste sobre la pieza de la cejilla

- f) Redondeo del alma: Como hemos visto (epígrafe “La barra armónica y el alma”), el alma sufre vibraciones longitudinales que conducen al desgaste de los

extremos en contacto con las tapas superior e inferior, produciéndose un redondeo del borde del alma que se manifiesta por un descenso de las prestaciones sonoras del instrumento.

- g) Ruido en el clavijero: Suele aparecer debido a un mal montaje de las cuerdas, que favorece que el extremo de las mismas vibre por simpatía al excitar ciertas frecuencias y choque contra otros elementos del clavijero como madera o cuerdas. En los contrabajos aparece un ruido similar al de un sonajero (ruido de alta frecuencia) cuando el sistema de tornillo sin fin que permite regular la tensión de las cuerdas presenta cierta holgura, o bien cuando alguno de los tornillos que fijan las placas metálicas del clavijero a la cabeza se afloja, vibrando dentro de su agujero y actuando éste como un resonador que amplifica el ruido de la pequeña vibración que sucede en él.

6. Estudio de la Directividad

1. Directividad

Para un emisor, la especificación de directividad indica cómo el emisor distribuye espacialmente en el ambiente la presión que radia.

Matemáticamente la directividad $D(\theta, \phi)$ de un emisor se expresa como el cociente entre la presión radiada en una dirección determinada por la posición angular θ y ϕ , y la presión máxima radiada, que suele aparecer en el eje del emisor. Ambas presiones se miden a la misma distancia del emisor.

$$D(f, \theta, \phi) = \frac{A(f, \theta, \phi)}{A(f, \varphi_{m\acute{a}x})} \quad (\text{Expresión 44})$$

donde $A(f, \theta, \phi)$ es la presión radiada en la dirección de posición angular θ y ϕ , y $A(f, \varphi_{m\acute{a}x})$ la presión máxima radiada, que suele aparecer en el eje del emisor.

La directividad se suele representar en un diagrama polar, calibrado en decibelios, mediante una curva que indica la atenuación por directividad que sufre la presión radiada al alejarse del eje del emisor.

Algunas consideraciones sobre radiación esférica y el entorno de medición

El tipo más sencillo de fuente para generar ondas acústicas esféricas, de forma teórica, es una esfera pulsante o monopolo. Según este modelo teórico, el radio de la onda emitida varía sinusoidalmente con el tiempo, de forma que radia ondas esféricas armónicas en el medio que le rodea (homogéneo e isótropo).

Pese a que este constructo teórico no es realizable en la realidad, conocer algunas de sus propiedades nos permite aproximarnos a emisores acústicos más complejos, que se pueden considerar como esferas pulsantes, si sus dimensiones son pequeñas comparadas con la longitud de onda de la señal radiada.

Así pues, en una fuente de este tipo, en la que el sonido se radia igualmente en todas las direcciones, en un punto específico a una distancia r , la intensidad acústica será inversamente proporcional a r^2 .

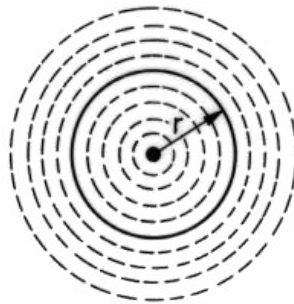


Figura 32: Fuente puntual, esfera pulsante o monopolo

Para un monopolo radiando ondas esféricas armónicas el nivel de presión sonora es:

$$L_p = L_W - 20 \log r - 10 \log(4\pi) = L_W - 20 \log r - 11 \text{ (dB)} \quad \text{(Expresión 45)}$$

donde L_W representa el nivel de potencia acústica emitida, que viene dado por la expresión $L_W = 10 \log(W/W_0)$, siendo $W_0 = 10^{-12}$ w.

Por tanto, para radiación esférica el nivel de presión acústica disminuye $20 \lg 2 = 6$ dB, cada vez que la distancia a la fuente se duplica, conociéndose este resultado como *ley de la inversa de la distancia*.

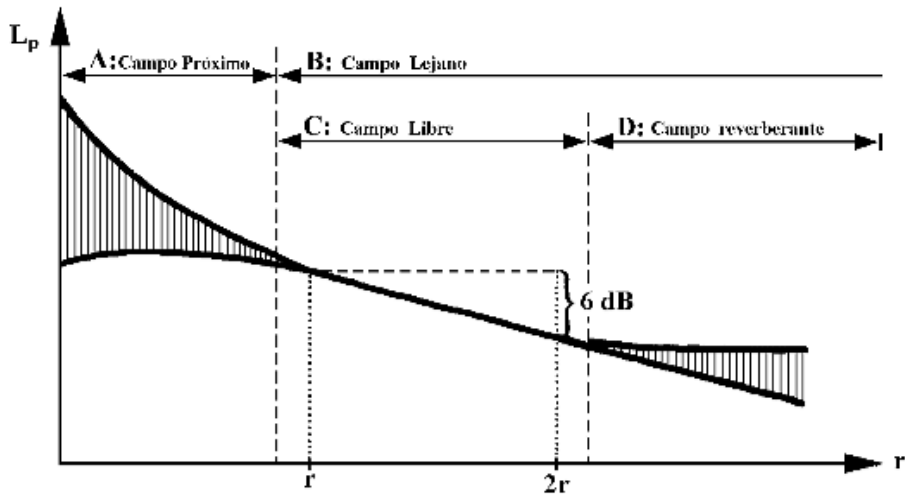


Figura 33: Campos sonoros

El concepto de fuente puntual es una idealización y las características descritas anteriormente dependen de la fuente y del aire libre sin fronteras físicas, ya que si existiesen dichas fronteras se podría modificar el patrón o diagrama de radiación de las ondas esféricas concéntricas. Estas condiciones se denominan generalmente como *campo libre*. Bajo estas condiciones, y con una fuente puntual ideal, es suficiente una simple medida para determinar todas las características del campo acústico.

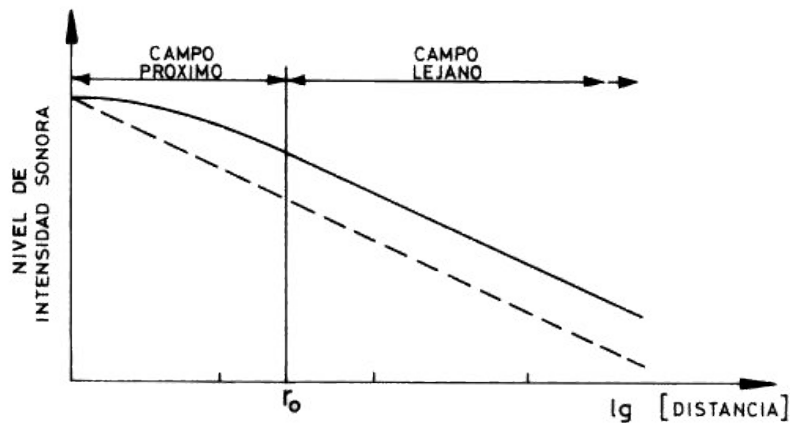


Figura 34: Variación de la intensidad acústica con la distancia en campo próximo y en campo lejano

En la práctica las fuentes no son puntuales, aunque pueden aproximarse a este caso ideal. Las fuentes tendrán una determinada forma y, suponiendo por sencillez que la señal se propaga más o menos uniformemente desde esta fuente, entonces encontraremos que a partir de una distancia inicial r_0 la intensidad acústica disminuye de acuerdo con la ley de la inversa del cuadrado de la distancia. Esta característica de fuente no puntual da lugar a los conceptos de *campo próximo*, en el cual la propagación

no sigue la ley de la inversa del cuadrado de la distancia (o sea la radiación no es esférica) y de *campo lejano*, aquel en el que se cumple la ley de la inversa del cuadrado de la distancia (es decir las ondas son esféricas). Por tanto, las condiciones de campo libre aplicadas a una medida simple en el campo lejano definen satisfactoriamente el campo en esa región, puesto que el comportamiento es independiente de la forma y tamaño de la fuente. Sin embargo, en el campo próximo el patrón de propagación depende del tamaño y forma de la fuente.

Nuestras medidas las tomamos, como veremos más adelante, en ese campo lejano, a cuya consecución contribuye la cámara anecoica. Esto es así gracias a que la cámara, dado que es un entorno en el que se pretende conseguir el menor número de reflexiones posible y en el que las paredes son muy absorbentes, permite simular las condiciones acústicas características del campo libre (en el que es estrictamente cierta la *ley de la inversa del cuadrado de la distancia*), minimizando la influencia del campo reverberante (contenido en el campo lejano), donde la energía sonora se refleja en grado tal que los niveles de presión son independientes de la dirección y distancia a la fuente.

Como ya fue justificado por Fuentes (2008), el recinto de la cámara anecoica en la que hemos realizado las mediciones para este proyecto se ajusta a lo dispuesto por la norma internacional ISO 3745 (AENOR, 2010) en el rango de frecuencias desde 125 Hz a 10000 Hz al cumplirse las condiciones de la ley de divergencia esférica dentro de las tolerancias especificadas en dicha norma. Del mismo modo, en este trabajo se valoró el grado de cumplimiento de las mediciones realizadas en esta cámara de la Norma ISO 3745 referente a la determinación de niveles de potencia de fuentes de ruido. Como afirma Fuentes, puesto que normalmente las cámaras anecoicas se utilizan para medir potencia acústica en un contexto industrial, el ambiente acústico debe cumplir algunas condiciones muy restrictivas y no siempre extrapolables a la medición de instrumentos musicales. En este sentido el factor de cálculo que demanda una mayor atención por nuestra parte es la frecuencia de corte. Ésta nos indica la frecuencia en la cual la cámara tiene un comportamiento acústico correcto en lo que a anecoicidad se refiere. En Fuentes (2008), se dedica una amplia atención a este aspecto, determinando que los dos criterios para conocer la frecuencia de corte de la cámara dependen de la frecuencia de corte debida al tamaño de las cuñas (constante e igual en este caso a 143 Hz, según sus cálculos, ya que es función única y exclusivamente de la profundidad de las cuñas) y la frecuencia de corte geométrica de la propia cámara (según los mismos cálculos se puede

medir fuentes sonoras de ruido con unas dimensiones máximas de 394 mm de lado mayor, debido a la dimensión más restrictiva, la altura de la cámara, de tan solo 3,850 m de pared a pared). Como ya se señala en ese trabajo, para fuentes de ruido de mayor tamaño, la frecuencia de corte se incrementará, lo cual no significa que la cámara deje de ser anecoica, sino que los requisitos de anecoicidad son más laxos.

2. Elección de equipos y esquema de conexiones

De cara a la elección de equipos para llevar a cabo el proceso de grabación optamos por ser continuistas con el trabajo iniciado por Fuentes (2008). Dado que las limitaciones de recursos persisten, el análisis planteado en dicho trabajo es perfectamente aplicable a éste que nos ocupa, por lo que se evitará ser redundante en este aspecto. No obstante, la particularidad que supone el que en este proyecto se realice no sólo una grabación de los sonidos producidos por los instrumentos, sino también una serie de mediciones (simultáneamente o no) supone que tengamos que acotar el uso que se hace de cada equipo (grabación o medida) y bajo qué circunstancias.

Los equipos con los que contaremos de cara a la grabación serán pues:

- ✓ Mesa de mezclas digital Yamaha 02R96.
- ✓ Sistema de grabación en disco duro: Multipistas ADAT HD24 de Alesis.
- ✓ Micrófono: 40AF G.R.A.S.
- ✓ Fuente de alimentación: 12AK (G.R.A.S).

Como ya se discutió en Fuentes (2008), el modelo 40AF de G.R.A.S. es un micrófono electrostático de presión, con respuesta plana en frecuencia para el rango de 5 Hz a 10 kHz (con un margen de ± 1 dB) y para el de 3.15 Hz a 20 kHz (con un margen de ± 2 dB), requisito indispensable para nuestro objetivo de grabar la señal modificada lo menos posible por el transductor. La sensibilidad es de 50 mV/Pa y el margen dinámico es de 148 dB, lo que mejora sus prestaciones. Este modelo necesita de una fuente externa para polarizar la cápsula y el preamplificador, que proporciona una tensión de +200 V, necesaria para linealizar la respuesta del micrófono.

Otra cuestión que heredamos del trabajo de Fuentes es el encaminamiento de la señal anecoica hacia el grabador en disco duro ADAT HD24, pasando previamente por la mesa de mezclas digital Yamaha 02R96. Enviar la señal directamente al grabador en disco duro ADAT HD24, supondría no poder ajustar el nivel de la señal de entrada, por lo que podrían llegar niveles de señal muy bajos, dificultando así la grabación y empeorando la relación señal a ruido. Así pues, la señal es enviada a la mesa de mezclas Yamaha 02R96 y de ésta, encaminamos las diferentes pistas al sistema de grabación en disco duro ADAT HD24. Con esta configuración resolvemos el problema que teníamos con la anterior ya que la mesa de mezclas sí que nos permite ajustar el nivel de la señal de entrada. Además, dado el conexionado de los equipos en el laboratorio, limitamos las conversiones analógico-digitales a una, puesto que la mesa dispone de cuatro ranuras YGDAI, que permiten cada una de ellas ocho canales ADAT ópticos. Esto supone que la señal no sufre ninguna perturbación entre la mesa de mezclas y el sistema ADAT HD24 ya que toda la información que se transmite entre ellos es digital.

Respecto a las prestaciones de la mesa, además de la importante funcionalidad de los previos que utilizamos para maximizar la relación señal a ruido, ésta nos ofrece un procesamiento de audio digital de 24 bits a 96 kHz, por lo que una vez digitalizada la señal, la enviaremos al sistema de grabación en disco duro. Además la mesa nos permite múltiples opciones de direccionamiento interno de las señales de entrada, por lo que, entre otras cosas, podremos replicar la señal de entrada y devolverla al músico con una reverberación determinada a fin de que se sienta a gusto en un entorno al que no está acostumbrado. Yendo aún más allá, gracias a estas opciones implementamos en la práctica el envío de una señal (a modo de claqueta) al músico, de manera que mientras reproducíamos ese sonido éramos capaces de almacenar en otra pista el resultado en directo de su interpretación. Esta señal fue grabada en la propia cámara y almacenada en una de las pistas del grabador, que posteriormente fue sobrescrita con las pistas de audio de interés.

Examinando otras características del grabador ADAT HD24, vemos que nos permite dos posibilidades: 24 pistas simultáneamente a 44.1/48 kHz o 12 pistas a 96kHz. En principio con 48kHz de frecuencia de muestreo, tendríamos información más que suficiente, sin embargo, dado que tenemos la posibilidad de trabajar con una frecuencia de muestreo mayor, esto ofrece ventajas. Trabajar con una frecuencia de 48 kHz, supondría diezmar la información que proviene de la mesa de mezclas ya que ésta

trabaja con una frecuencia de muestreo de 96 kHz. La principal ventaja de utilizar una mayor frecuencia de muestreo es la reducción del ruido de cuantificación y puesto que nuestro objetivo reside en obtener la señal lo más fiel posible, trataremos de que este valor sea el menor posible.



Figura 35: Grabador ADAT HD24 de Alesis

Finalmente, esta configuración nos resulta particularmente útil también en el caso de la medición de la directividad, ya que nos permite mantener abiertos unos canales de comunicación con los músicos en el interior de la cámara que la configuración de medida no posee intrínsecamente. De este modo, el micrófono GRAS servirá no sólo para registrar el audio de todo lo que sucede en la cámara anecoica durante el proceso de medida de la directividad, sino también para enviar al laboratorio de acústica una señal de monitorización (ver apartado de *Esquema de conexiones* en el punto 6.2) que usamos para saber si el músico ha finalizado la interpretación, cómo está transcurriendo la misma, o cualquier necesidad del exterior (haciendo uso de las funciones de Talkback de la mesa).

Por otro lado, de cara a la medición de la directividad, además de los anteriores, usaremos los siguientes equipos:

- ✓ Dos micrófonos de medida B&K 4188-A-021
- ✓ Hardware PULSE Type 3560-C de B&K: Unidad portátil de adquisición de datos integrada por:
 - Módulo de control Type 7536
 - Módulo de entrada/salida Type 3109
- ✓ PC con software PULSE LabShop versión 10.1

El modelo de B&K 4188-A-021 se trata de un micrófono de presión (y por tanto, directividad omnidireccional) en lo que se refiere al transductor acústico mecánico, y electrostático de condensador en lo que se refiere al transductor mecánico eléctrico. A parte de la cápsula microfónica 4188, incluye el preamplificador Type 2671 lo que permite hacer medidas acústicas con un módulo de entrada CCLD (nombre dado por B&K a los productos que funcionan con corriente continua pero que ofrecen señales de salida con tensión continua modulada a través de la propia línea de alimentación, lo que en la práctica supone la posibilidad de usar cables coaxiales BNC). Este micrófono contiene además un dispositivo interno denominado TEDS (Transducer Electronic Data Sheet) que almacena información acerca del número de serie, tipo y sensibilidad del micrófono, lo que resulta particularmente útil en el uso combinado con soluciones hardware como PULSE, ya que permite que desde el analizador frontal (front-end analyzer) se detecten los parámetros que caracterizan al conjunto micrófono más preamplificador, sin necesidad de introducir estos datos manualmente, facilitando el calibrado del sistema y reduciendo la posibilidad de errores humanos.

Por otro lado, la respuesta en frecuencia es plana en el rango de 8 Hz a 12.5 kHz con un margen de ± 2 dB. Puesto que el rango de frecuencias audible por el ser humano comprende desde 20 Hz a 20 kHz, parecería que este modelo no nos ofrece una fidelidad óptima. Sin embargo, dado que el rango de la totalidad de nuestros instrumentos es de 45 Hz a 2.5 kHz este modelo nos ofrece buenas prestaciones para sonidos fundamentales, si bien habrá que tener en cuenta que se distorsionará ligeramente la respuesta en frecuencia para armónicos a partir de 12.5 kHz. En referencia a los datos de sensibilidad (31,6 mV/Pa) y de rango dinámico (de 15.8 a 146 dB), éstos son suficientemente altos como para que nuestra señal no se vea afectada. En lo referente a la tensión de polarización (ya que se trata de un micrófono electrostático), podemos observar que este modelo no necesita de ésta ya que está prepolarizado.

Por encima de la importancia que podamos otorgar al tipo concreto de micrófono de medida usado, quizás el instrumento clave para la realización de este proyecto sea el poder contar con un sistema de adquisición de datos acústicos PULSE, que es la plataforma de Brüel & Kjaer para el análisis de ruido y vibraciones. Concretamente, el modelo 3560-C es una unidad portátil de adquisición de datos que, conectada a un PC mediante una conexión LAN, permite convertir al ordenador en un analizador muy potente capaz de realizar simultáneamente análisis en tiempo real y multianálisis como

CPB o FFT, con el añadido de poder almacenar los datos generados en formatos compatibles con procesadores numéricos como Excel. El módulo de entrada/salida Type 3109 cuenta con cuatro canales de entrada y dos salidas, con un rango de frecuencia de 0 Hz a 25,6 kHz, conectores BNC y LEMO, así como con un convertor analógico-digital de 24 bits.



Figura 36: Unidad portátil de adquisición de datos 3560-C PULSE de Brüel & Kjaer

En nuestro caso, la versión usada del software de control de la unidad es el PULSE LabShop 10.1, que permite gestionar la actividad del hardware PULSE mediante la interfaz que supone de facto el PC.

Esquema de conexiones

A continuación detallaremos las conexiones a realizar para grabar la Base de Datos y tomar las medidas de Directividad.

1. Conexiones para Grabación:

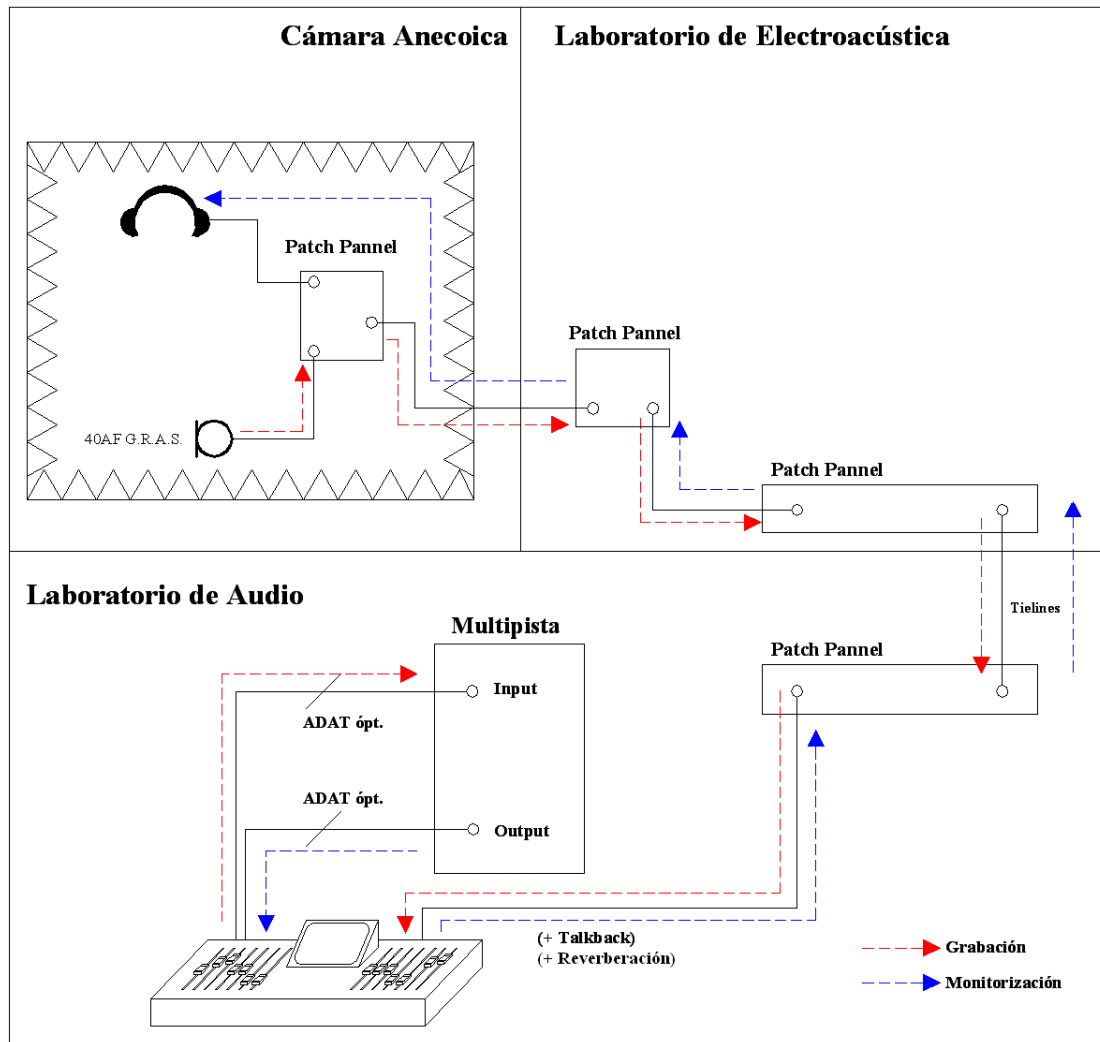


Figura 37: Esquema de conexiones para grabación

Para crear la Base de Datos con los distintos registros sonoros usaremos el esquema anterior. De esta forma se dispondrá un micrófono (GRAS 40AF) dentro de la cámara (junto con la fuente de alimentación externa). La señal que ofrece este micrófono la llevaremos a través del Patch Panel de la Cámara Anecoica al Patch Panel del laboratorio de Electroacústica y de ahí al del laboratorio de Audio. De este Patch Panel sacaremos mediante un cable Bantam la señal, que pasaremos a través del propio Patch Panel a la mesa y de ésta al sistema de grabación en disco duro (multipistas).

Para la monitorización que ofreceremos al músico usaremos unos auriculares que conectaremos al Patch de la Cámara Anecoica y a través de los cuales le proporcionaremos su propia señal más una cantidad de reverberación artificial (elegida por él al realizar la prueba acústica) para eliminar la posible desorientación y extrañeza que puede ocasionar tocar en un recinto con una acústica tan particular. Complementariamente por esa conexión de auriculares enviaremos al músico instrucciones haciendo uso del Talkback, desde la mesa de mezclas.



Figura 38: Posición de control en el laboratorio de acústica. A través de los auriculares o escuchas se recibe la monitorización del músico, con el que es posible comunicarse apretando el botón de Talkback de la mesa.

2. Conexiones para Directividad:

Para medir la directividad de los distintos instrumentos usaremos dos micrófonos: uno fijo en la posición 0 que servirá como referencia y otro que será el que moveremos. Para medir la directividad será necesario utilizar PULSE, tal y como se muestra en el diagrama de conexiones:

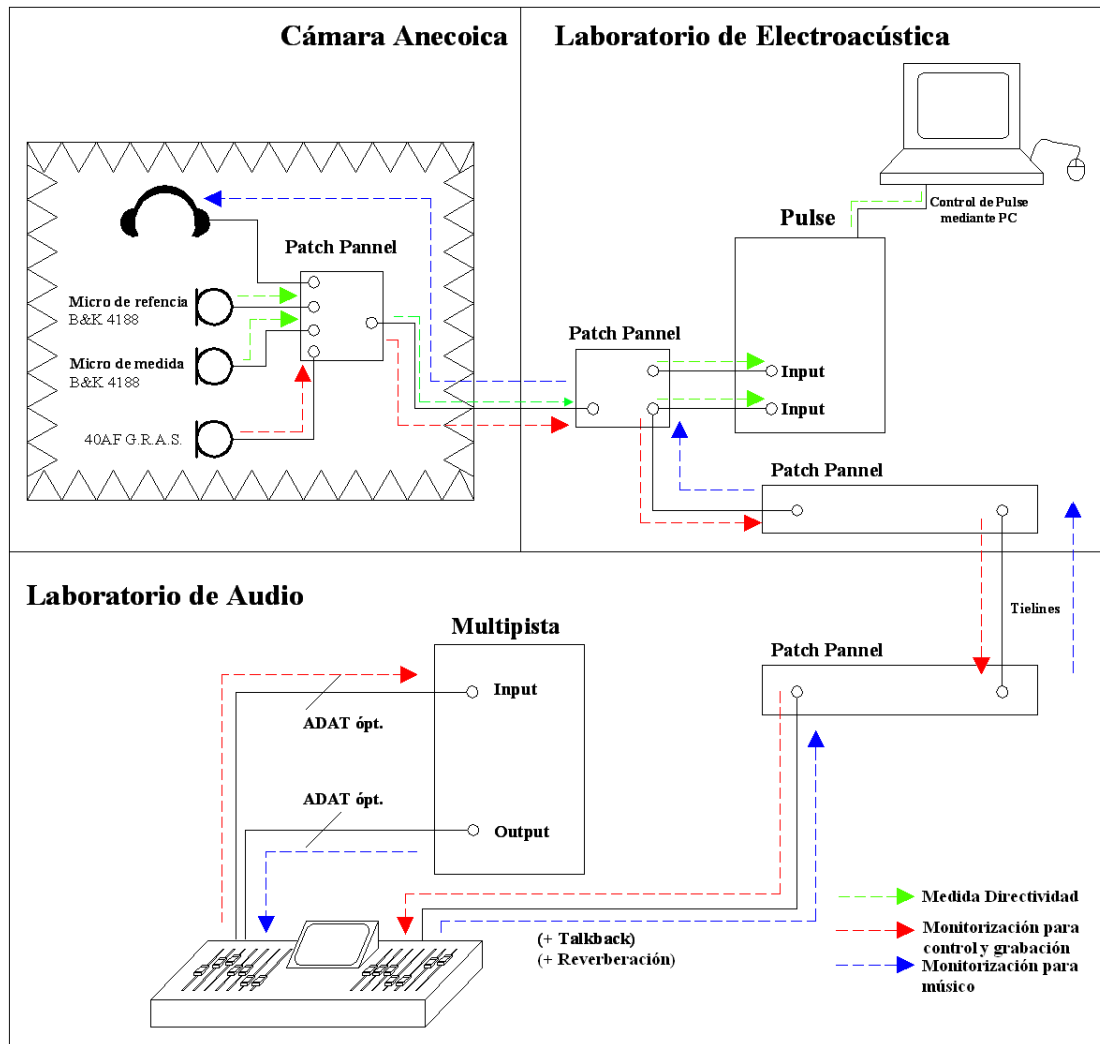


Figura 39: Esquema de conexiones para medir directividad

Para llevar la señal al propio PULSE, conectaremos los micrófonos al Patch Panel de la cámara anecoica. Este Patch Panel nos permitirá llevar la señal al Patch Panel del laboratorio de electroacústica y, de éste, llevarla a las entradas de PULSE.

A la unidad portátil de PULSE (el PC controla la actividad de PULSE) llegarán dos señales: la procedente del micrófono de referencia y la del micrófono móvil.

Como veremos en el apartado 6.5 sobre *Estimación del error y colocación de los micrófonos para la medida de directividad*, de cara a la estimación del error, se usó además una conexión de salida de PULSE que conectada al Patch Panel del laboratorio de Electroacústica nos permitió llevar a la cámara una señal de ruido (creado mediante

un generador controlado por PULSE) que reproducimos a través de un sistema de altavoces.

Para mantener una monitorización acústica de este proceso se mantendrá en la cámara el montaje usado para la grabación de la Base de Datos. Así pues ese micrófono nos permitirá proporcionar al músico una monitorización y mantener contacto con él, así como para, de forma adicional, grabar la señal y conservar un registro sonoro de lo sucedido en las sesiones de medición de la directividad.

- Monitorización:

La monitorización para el músico partirá de una salida de la mesa de mezclas y modificaremos digitalmente la reverberación de la señal para proporcionarle un sonido que le resulte lo más cercano posible al sonido que percibiría de su instrumento en un entorno reverberante. Para modificar el valor de esa reverberación utilizaremos las funciones y valores de la propia mesa. Además, nos serviremos de esta conexión para comunicarnos desde el laboratorio de audio con el músico, haciendo uso del Talkback de la mesa (evidentemente, su voz nos llegará a través del micrófono GRAS colocado en la posición 0, por lo que no será preciso disponer de un canal de comunicación independiente).

3. Cálculo

El proceso de medida y cálculo de la directividad, se realizará para cada tercio de octava como:

$$D(f, \theta, \phi) = \frac{A(f, \theta, \phi)}{A(f, 0)} \quad (\text{Expresión 46})$$

siendo $A(f, \theta, \phi)$ los datos de *Autospectrum*³ en valores RMS (Root Mean Square, es decir, el valor cuadrático medio), resultado de los datos almacenados en PULSE para la banda de un tercio de octava centrada en la frecuencia f y la pareja de ángulos θ°, ϕ° .

³ Para medidas de FFT, la Transformada de Fourier de una señal de tiempo es compleja, ya que tiene magnitud y fase. El autoespectro es el promedio de la magnitud al cuadrado. Para las mediciones de CPB de tercio de octava, es el cuadrado medio de la salida del filtro.

Si bien lo ideal sería contar con un sistema microfónico de array en forma esférica para poder llevar a cabo este proceso de medición de forma absolutamente precisa y poder generar modelos tridimensionales, en la literatura de referencia encontramos distintas alternativas que, en todo caso, parten de la premisa de unos presupuestos ajustados. Trabajos como el de Otondo (Otondo et al., 2002) muestran cómo es posible llevar a cabo una simplificación del modelo, quedándose únicamente con dos planos X e Y (array microfónico de dos planos ortogonales), ya que es de suponer la existencia de una simetría en la radiación tomando como eje de dicha simetría el eje longitudinal de los instrumentos de cuerda. Evidentemente, esta forma de medir acarrea el riesgo intrínseco de tener que interpolar ciertos datos entre los puntos donde colocamos los micrófonos, y de forma especial, en los puntos fuera de esos planos, donde no tenemos registros directos.

Así pues, ante las evidencias de la existencia de una simetría esférica y un supuesto y medios limitados, optamos por realizar una simplificación del modelo tridimensional en la que llevamos a cabo medidas en los planos ortogonales X e Y. De esta forma, tanto en el plano horizontal como en el vertical, el ángulo θ° es el resultado de tomar muestras cada 10 grados. El denominador de esta expresión es el resultado de esta medida en el ángulo 0° , correspondiente al ángulo de referencia en éste análisis, en el que orientaremos el micrófono de referencia horizontalmente hacia el intérprete, que a su vez estará colocado en la posición central de la cámara.

Por otro lado, al usar una configuración con dos micrófonos de medida, obtendremos los valores tanto en el eje (micrófono de referencia) como fuera de él (micrófono de medida). Esta obtención de valores evidentemente no es inmediata, ya que al medir con PULSE, lo que obtenemos son vectores que almacenan este valor RMS para cada banda de tercio de octava, por lo que ha sido necesario ordenar los datos (pasándolos del software asociado a PULSE a Excel) y procesarlos (a través del software de modelado matemático Matlab) para obtener los resultados de esta investigación.

Análisis FFT y CPB

Un analizador de ancho de banda porcentual constante o CPB (Constant Percentage Bandwidth) es un analizador en tiempo real, RTA o Real Time Analyzer, cuyo análisis es muy relevante desde un punto de vista psicoacústico al permitir un filtrado en fracciones de octava semejante al mecanismo humano de audición. Cuanto mayor es la

frecuencia central del filtro, mayor es el ancho de banda. Un tipo de señal muy utilizado con este tipo de analizador es el ruido rosa, que es un ruido caracterizado por tener la misma distribución de energía en todas las bandas de frecuencia de ancho porcentual, mostrando un espectro plano si se mide en este tipo de analizador.

Por otro lado, un analizador de FFT (Fast Fourier Transform) utiliza el algoritmo de FFT para calcular un espectro de una señal en el dominio del tiempo, usando una resolución de ancho de banda constante.

En la siguiente tabla se puede apreciar la distribución de frecuencias en bandas de octava normalizadas según la Norma UNE-EN 61672-2:2005 (AENOR, 2005):

Frec. octava	Banda de octava	Frec. 1/3 octava	Banda de 1/3 octava
16	11.3 - 22.6	16	14.3 - 18.0
		20	17.8 - 22.4
		25	22.3 - 28.1
31.5	22.3 - 44.5	31.5	28.1 - 35.4
		40	35.6 - 44.9
		50	44.5 - 56.1
63	44.5 - 89.1	63	56.1 - 70.7
		80	71.3 - 89.8
		100	89.1 - 112.2
125	88.4 - 176.8	125	111.4 - 140.3
		160	142.5 - 180.0
		200	178.2 - 224.5
250	176.8 - 353.6	250	222.7 - 280.6
		315	280.6 - 353.6
		400	356.4 - 449.0
500	353.6 - 707.1	500	445.4 - 561.2
		630	561.3 - 707.2
		800	712.7 - 898.0
1 000	707.1 - 1 414.2	1 000	890.9 - 1 122.5
		1 250	1 113.6 - 1 403.1
		1 600	1 425.4 - 1 795.9
2 000	1 412.2 - 2 828.4	2 000	1 781.8 - 2 244.9
		2 500	2 227.2 - 2 806.2
		3 150	2 806.3 - 3 535.8
4 000	2 828.4 - 5 656.9	4 000	3 563.6 - 4 489.8
		5 000	4 454.5 - 5 612.3
		6 300	5 612.7 - 7 071.5
8 000	5 656.9 - 11 313.7	8 000	7 127.2 - 8 979.7
		10 000	8 909.0 - 11 224.6
		12 500	11 136.2 - 14 030.8
16 000	11 313.7 - 22 627.4	16 000	14 254.4 - 17 959.4
		20 000	17 818.0 - 22 449.2

Dada la potencia de cálculo que nos permite PULSE, configuramos dos analizadores (uno CPB y otro FFT) para monitorizar todos los procesos simultáneamente, si bien de cara a la medida de directividad únicamente usaremos los datos del CPB, quedando los de FFT almacenados para posteriores trabajos.

4. Dependencia frecuencial de la directividad

Los patrones de radiación de directividad observados por Meyer (Meyer, 1972) para el violonchelo (en los planos vertical y horizontal) y para el violín (plano horizontal) muestran las direcciones en las cuales el sonido radiado está dentro de un rango de 3dB del máximo valor promediado en frecuencia:

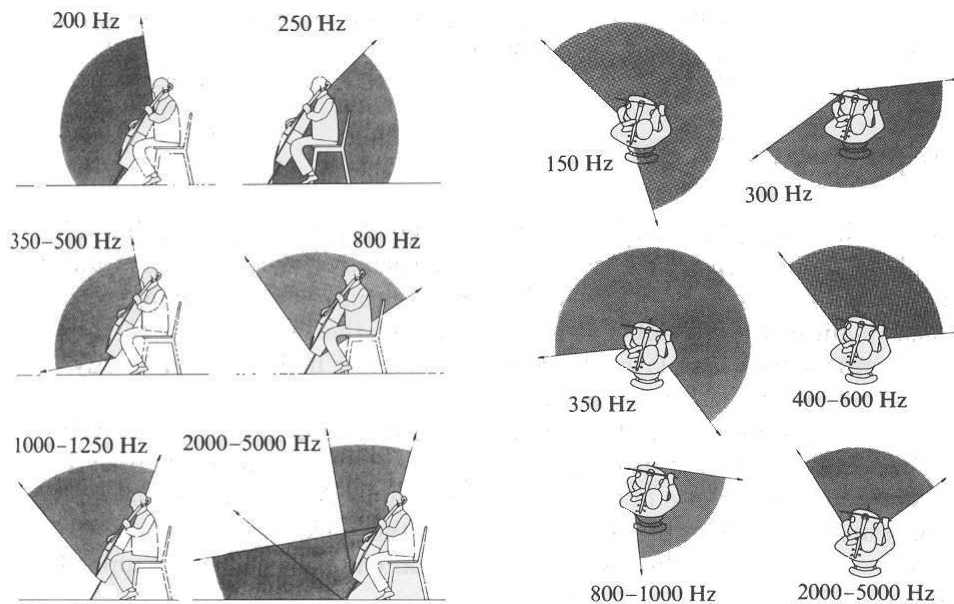


Figura 40: Direcciones principales de radiación de un violonchelo (plano vertical y horizontal). El límite del área sombreada representa la caída en 3 dB del valor medido.

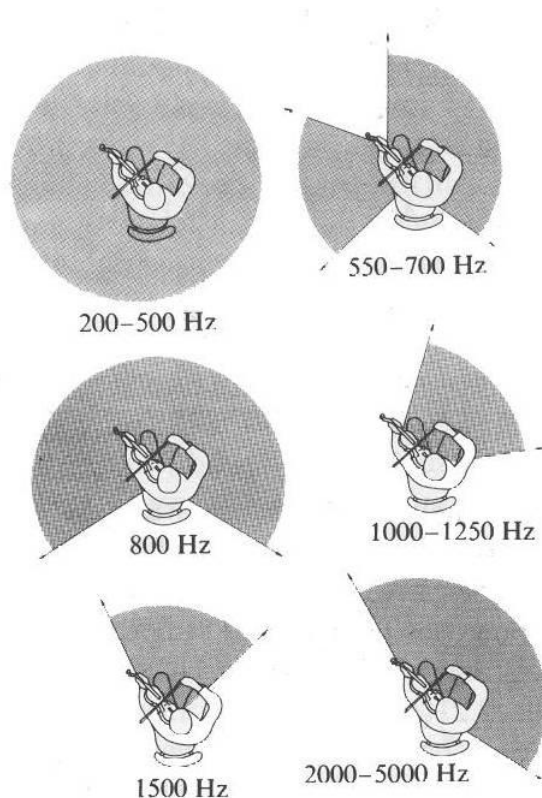


Figura 41: Direcciones principales de radiación de un violín (plano horizontal). El límite del área sombreada representa la caída en 3 dB del valor medido.

Hay pues ciertas evidencias tanto para el violonchelo (a una frecuencia de 2000 Hz) y para el violín (en torno a los 4500 Hz) de la existencia de un efecto de frecuencia crítica, es decir, una frecuencia a la cual los patrones de radiación cambian súbitamente.

La rápida variación del patrón de radiación angular con la frecuencia es pues una importante característica de los miembros de la familia de la cuerda frotada, y usualmente nos referiremos a ella como “color direccional del tono”. Esta variación provoca en el oyente la ilusión de que cada nota proviene de una dirección distinta (en función de su frecuencia se emite principalmente en una dirección determinada), lo que combinado con el vibrato (y los cambios de frecuencia que ocasiona, como hemos visto en el epígrafe anterior) aumenta esa sensación. Este efecto es el responsable de que no se pueda reproducir con fidelidad el sonido de un instrumento de la familia con un sistema de altavoces que no reproduzca esas variaciones (G. Weinreich, 1993).

Como veremos en el apartado 7.6 donde abordamos el *Análisis de resultados sobre la medida de la directividad*, este fenómeno es claramente identificable en nuestros resultados no sólo en el caso del violonchelo y el violín, sino también en viola y contrabajo.

7. Descripción del método de grabación de la base de datos y del estudio de la directividad

1. Normativas técnicas

La norma UNE-EN ISO 3745 (AENOR, 2010), describe una serie de procedimientos para la determinación de los niveles de potencia acústica y energía de fuentes de ruido a partir de la presión acústica y propone varios métodos de laboratorio para cámaras anecoicas y semi-anecoicas. Teniendo en cuenta esto, utilizaremos algunas de sus guías para la medida de directividad en cámara anecoica.

Ya que la cámara anecoica de la que disponemos en la Universidad cumple los requisitos del recinto de ensayo fijados en esta norma, nos pareció interesante seguir la norma siempre que fuera posible, teniendo en cuenta que la naturaleza de la fuente sonora (en este caso instrumentos musicales) dista bastante del ámbito industrial para el que fue pensada. Principalmente las diferencias parten del hecho de que no existe un código de ensayo para instrumentos musicales y, por tanto, es preciso atender a la recomendación de la norma donde dice *“si no existen dichas especificaciones, pero sí existe una condición principal o típica de soporte o montaje, entonces se deberá utilizar ésta para el ensayo. [...] Se deben seguir los pasos necesarios para reducir cualquier radiación acústica de la estructura en la que se pueda montar la fuente sometida a ensayo”*. También esa ausencia de código se traduce en que el funcionamiento de la fuente sometida a ensayo no es determinable de manera precisa y única. Es decir, no podemos decir que mediremos la fuente funcionando a un 30% de carga, ni siquiera que la fuente trabajará con cierto régimen durante un determinado ciclo de trabajo. Sin embargo, la norma especifica que durante las mediciones se puede hacer que las *“condiciones de funcionamiento sean las correspondientes a la máxima generación acústica representativas de uso normal”*, lo que estará fuertemente relacionado con las preguntas sobre qué tocan los músicos y cómo lo tocan, que veremos más adelante.

En cuanto a la superficie de medición, tendremos en cuenta que “para las mediciones en una cámara anecoica, la superficie esférica en la que se mide el nivel de presión acústica se debería centrar preferiblemente en el centro acústico de la fuente acústica. Dado que a menudo se desconoce la información del centro acústico, se deberá indicar claramente

en el informe de ensayo el supuesto centro acústico”. En otras palabras, veremos que la determinación de un punto de referencia (centro geométrico) no es una cuestión trivial y en los instrumentos de cuerda conlleva ciertas complicaciones por la morfología de los propios instrumentos. Además, teniendo en cuenta las limitaciones de equipamiento del que podíamos hacer uso, valoramos distintas alternativas que ofrecía la norma sobre las posiciones de micrófono, decidiéndonos por *“utilizar un conjunto de posiciones de micrófono fijas, estando las posiciones distribuidas sobre la superficie de la esfera de ensayo. [...] se puede mover un único micrófono desde una posición a la siguiente secuencialmente”*.

Con respecto al número de posiciones de micrófono, se decidió tomar un número alto que permitiera un muestreo apropiado del diagrama de directividad. Concretamente optamos por realizar las medidas necesarias para asegurar una resolución angular de 10° en los planos de interés y siempre que fuera físicamente posible.

Finalmente, este documento nos sirvió de marco conceptual de cara a la confección de unos documentos de trabajo en los que registrar información relevante sobre las grabaciones y medidas. Concretamente consideramos el esquema propuesto en el punto 11 de la norma, en lo relativo a *“información a registrar”*, resultando diversos registros con información sobre la *“fuente acústica sometida a ensayo”*, *“entorno acústico”*, *“instrumentación”* y *“datos acústicos”*.

2. Configuración de los analizadores y funciones de medición

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente acerca de los posibles analizadores a implementar gracias a PULSE, optamos por llevar a cabo las siguientes configuraciones:

a) Analizador CPB (ancho de banda porcentual constante):

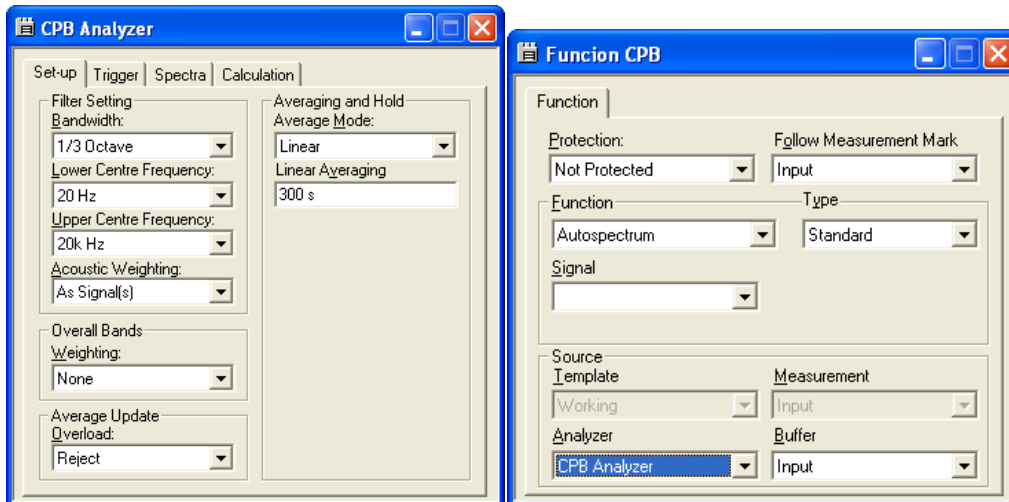


Figura 42: configuración del analizador CPB

Como podemos apreciar en la figura anterior, configuramos un filtrado con anchos de banda de tercios de octava, centrando la frecuencia más baja en la banda de 20 Hz y la frecuencia más alta en la banda de 20 kHz, por ser éstos los extremos del rango audible. Rechazamos también cualquier medida en la que pueda haberse producido una saturación de la señal y usamos un promediado lineal en el que al fijar una media tan alta aseguramos que en nuestro análisis se recogen los datos correspondientes a un máximo de 5 minutos de interpretación, suficiente para que el músico toque aquello que es de interés (ver sección *¿Qué tocan los músicos?* en el epígrafe 7.5 de *Estimación del error y colocación de los micrófonos para la medida de directividad*).

b) Analizador FFT (transformada rápida de Fourier):

Como ya se ha comentado, el analizador FFT se configurará únicamente con el propósito de almacenar un repertorio de datos complementario, ya que los datos que proporciona este analizador no se utilizarán en el cálculo de la directividad.

De esta manera se seleccionan los siguientes parámetros:

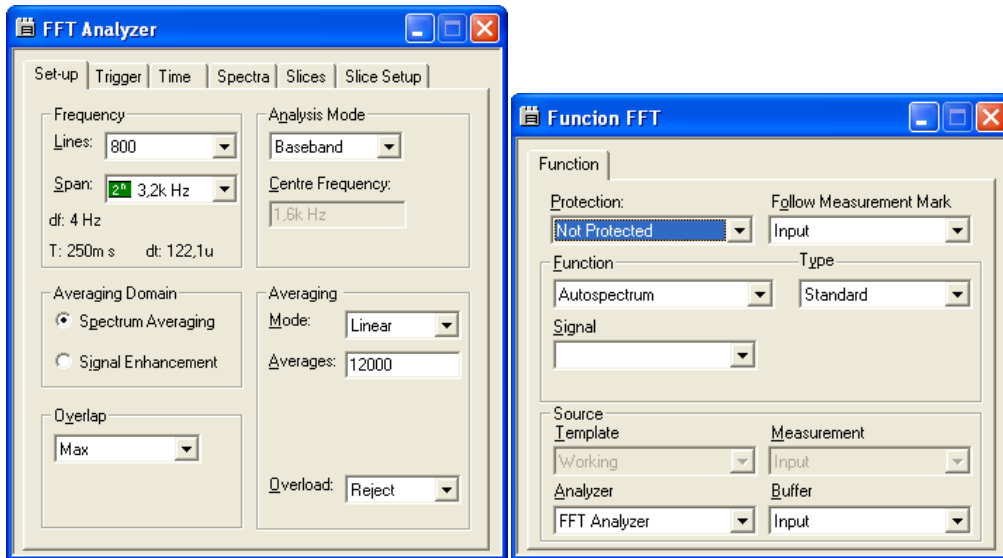


Figura 43: configuración del analizador FFT

En este caso, se elige un número de 800 líneas (muestras en el tiempo de grabación, T) que proporciona una buena resolución en frecuencia (Δf), supone un compromiso con el porcentaje de solapamiento y limita el valor máximo de $span$, lo que determina a su vez la resolución en frecuencia ($\Delta f = f_{span}/N_{lineas}$). Por otro lado el tiempo de muestreo queda definido por la expresión:

$$dt = 1/2.56 * f_{span} \quad (\text{Expresión 47})$$

Como en el análisis CPB, otro elemento importante es el tipo de promediado, lineal de nuevo, ya que éste garantiza un énfasis igual en todo el espectro y momento, lo que unido a un número de promedios elevado permite evaluar medidas durante un cierto periodo de tiempo lo suficientemente amplio.

3. Método de grabación y registro de medidas

Control de afinación

Para asegurar la grabación del sonido buscado era necesario disponer de un sistema que nos permitiese conseguir el mayor grado de afinación posible. Por ello optamos por incorporar el uso de un afinador electrónico que permitiera al músico ajustar la altura

del sonido hasta conseguir la afinación deseada, mediante el control visual que proporciona el afinador.

En este punto es importante hacer una referencia al sistema de afinación empleado, ya que en el caso de la familia de la cuerda frotada, aunque fijemos la altura (frecuencia) de los sonidos fundamentales de las cuatro cuerdas, los sonidos producidos a partir de la presión con la mano izquierda (su frecuencia) pueden no ajustarse estrictamente al previsto por el sistema de temperamento igual (ver Anexo I) para el nombre o etiqueta lingüística de ese sonido.

Ejemplo: La etiqueta lingüística correspondiente a la frecuencia 392.00 Hz es Sol (en la cuarta octava), sin embargo, por una presión incorrecta en la mano izquierda el sonido que el músico etiqueta como Sol puede tener la frecuencia 385 Hz, pasando totalmente desapercibido aun para un oído experto si las notas adyacentes fueron desafinadas de forma proporcional. Esto es debido a que la mayor parte de las personas tienen un oído diferencial, no absoluto, y construyen los intervalos a partir de los sonidos inmediatamente anteriores.

Gracias al uso de este dispositivo electrónico, la afinación de los sonidos producidos se ajustará a la que marca el temperamento igual, fijando como referencia la frecuencia del LA a 440 Hz y corrigiendo dinámicamente la afinación al producir cada sonido.

Grabación de la BBDD: ¿Qué debe tocar el músico? ¿Cómo lo toca?

El músico producirá sonidos con su instrumento con un matiz mezzoforte *mf*, pasando la cantidad de arco necesaria para lograr un sonido estable y de calidad. En este caso, hablar de un matiz *mf* implica que el músico recibe una instrucción verbal de que debe tocar a un volumen normal, ni excesivamente débil ni tampoco fuerte, lo que según la norma UNE-EN ISO 3745 sería el equivalente a la “producción sonora de un régimen normal de funcionamiento”. Para grabar los sonidos necesarios para crear la base de datos solicitamos al músico que realizase lo siguiente:

1. Una subida cromática (avance por semitonos) desde la nota más grave que pueda tocarse con su instrumento hasta la más aguda (sin recurrir a armónicos por el momento). Estos sonidos serán largos y mantenidos en el tiempo (dos pulsos por

sonido) siguiendo una claqueta previamente grabada a un ritmo de 50 batidos por minuto (excepto en la grabación de sonidos con *pizzicato* donde el tiempo vendrá dado por la pérdida del propio sonido). Como ya se ha señalado, esa claqueta se almacena en otra pista en el grabador (pista 6) y se le pasa al intérprete por los auriculares. Así, se realiza una primera vuelta (que almacenamos en la pista 1) donde se graban los sonidos producidos con el arco y en una segunda (pista 2) se graban los producidos con *pizzicato*. Para apreciar claramente el tiempo de decaimiento en el entorno anecoico los músicos reciben la instrucción de dejar otros dos pulsos de silencio entre cada nota (en algún caso se registró además la escala cromática sin silencios).

2. Grabación de armónicos (pista 3): el problema es abordar una "grabación sistemática" de los armónicos, ya que es complicado establecer una jerarquía dentro de los armónicos a grabar. Esto se debe a que en un instrumento de cuerda, a diferencia de los de viento, podemos lograr el mismo sonido (en cuanto a su frecuencia y timbre) en varias posiciones de la cuerda a medida que aumentamos el orden del armónico y además muchos de ellos pueden realizarse de forma "artificial" (lo que se consigue fijando dos puntos de la cuerda con la mano izquierda sin apretar los dedos al máximo, simplemente con el peso de los dedos sobre la cuerda en los puntos donde encontraríamos armónicos naturales).

Ejemplo: Si en una cuerda cuya afinación es Sol (ese es su sonido fundamental) al aire (fija en sus dos extremos y sin pisar con los dedos de la mano izquierda) pretendemos excitar el primer armónico (mitad de la cuerda) solo tenemos un sitio donde producir ese sonido (con esa frecuencia determinada) que es justamente la mitad de la cuerda. Sin embargo, para el siguiente armónico tenemos dos lugares donde excitarlo: en la mitad superior de la cuerda y en la inferior.

A esto debemos unir el hecho de que nos encontramos con la dificultad añadida de que la mayoría de los músicos no realiza nunca en la formación teórico-práctica de su instrumento un estudio sistemático de dónde se encuentra cada armónico, por lo que difícilmente podemos obtener una serie de registros que podamos clasificar siguiendo un esquema lógico desde un punto de vista estrictamente musical.

Teniendo en cuenta todos estos factores optamos por realizar una grabación de armónicos naturales en la que el músico tocara todos los armónicos posibles comenzando por las posiciones (desde el punto de vista de la técnica instrumental) más bajas y avanzase hacia las superiores. Si la cualificación del intérprete lo permitía, esa clasificación fue exhaustiva (pasando por todas las notas en las que pueda excitarse el armónico) atendiendo a la posición física que los armónicos naturales ocupan en la cuerda.

3. Grabación de efectos sonoros (pista 4): El propósito de este apartado es registrar diversos efectos técnicos que se pueden realizar con los instrumentos de la familia de la cuerda frotada. Así, solicitamos a los músicos que tocasen diversos sonidos aislados o fragmentos usando una técnica determinada, tales como sonidos "col legno" (producidos al golpear la cuerda con la madera del arco), vibrato (se graba sobre una escala que abarque toda la tesitura del instrumento), glissando (abarcando un intervalo entre la nota de inicio y final de la longitud que el intérprete estime conveniente), staccato...
4. Grabación de fragmento de una pieza elegida por el intérprete (pista 5)
5. Otros registros sonoros / pista de reserva (pista 6): La utilizamos para grabar otros fragmentos o efectos no registrados previamente. En todos los casos, inicialmente albergó la claqueta pregrabada, si bien posteriormente se utilizó para volver sobre algunos aspectos de la interpretación que no habían quedado claros o para grabar efectos que los intérpretes consideraron de interés.

Recursos humanos y organización de las sesiones:

Para la realización de las grabaciones de este proyecto contamos con la colaboración de músicos profesionales y estudiantes, que de forma generosa (sin recibir remuneración alguna) aportaron sus experiencias y trabajo para la consecución de los objetivos del proyecto. En este sentido la grabación planteó retos técnicos importantes desde el punto de vista estrictamente musical, ya que el entorno en el que realizamos la observación es un medio absolutamente extraño para los músicos, que hasta ahora habían tocado siempre en espacios más o menos reverberantes, y por las dificultades que genera en la producción del sonido al "oírse de manera distinta" a la habitual. Para mitigar este efecto, intrínseco a la grabación en cámara anecoica, proporcionamos al músico una

monitorización (a través de unos auriculares conectados al Patch Panel instalado dentro de la cámara anecoica) en la que escuchaba la señal producida en ese instante más una reverberación, que se ajustó al comienzo de la sesión, de forma que siguiese teniendo la sensación de tocar en un entorno mínimamente reverberante.

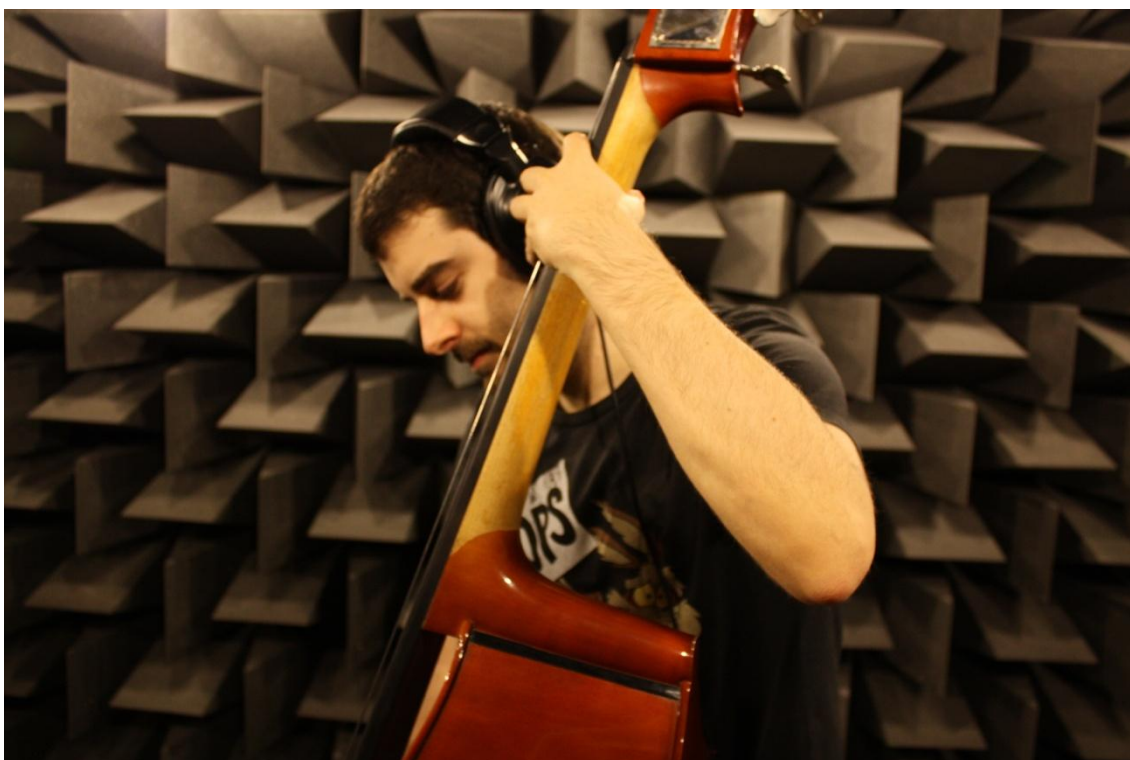


Figura 44: Uso de los auriculares dentro de la cámara anecoica

Por otro lado, si bien las muestras que tomamos no entrañan una gran complejidad (desde el punto de vista de la técnica instrumental) estamos sujetos en todo caso a un porcentaje de falibilidad en lo relativo a afinación, estabilidad del sonido y calidad artística de los efectos producidos por el propio músico derivados de su experiencia, conocimientos y demás circunstancias no ponderables.

Grabación de una base de datos de instrumentos musicales de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad





Figura 45: Fotografías tomadas durante las sesiones de grabación

Para las distintas sesiones, los músicos aportaron sus propios instrumentos y al inicio de cada sesión se procedió a afinar todas las cuerdas del instrumento utilizando para ello un afinador electrónico calibrado con el LA a 440 Hz. El afinador, como ya se ha señalado, fue usado recurrentemente durante su estancia en la cámara para asegurar la correcta afinación del instrumento (debido a las condiciones ambientales de la cámara existe una tendencia a que los instrumentos de cuerda se desafinen a la baja, debido al calor que irradian las bombillas en la cámara y el aislamiento térmico que suponen las paredes de la propia cámara).

Por último, cada vez que se procedía a grabar a un nuevo músico o a iniciar una nueva sesión de grabación, se registraron en una ficha los datos que lo identificaban y las características del instrumento (ver ficha **Anexo 3**).

4. Colocación del músico y el micrófono

Medida de la directividad

Como ya se ha discutido, optamos por medir en dos planos ortogonales (horizontal y vertical), por lo que para la medida de directividad mantendremos en todo momento la alineación (plano horizontal) entre el centro acústico del instrumento (y el centro geométrico de la cámara anecoica) y la posición inicial del micrófono de referencia. Para tomar las distintas medidas rotamos respecto a ese centro la posición del otro micrófono (micrófono de medida) manteniendo la orientación del eje del micrófono hacia el centro acústico del instrumento. El ángulo en cada giro será de 10° hasta cubrir los 360° del plano horizontal y el ángulo máximo en el que podamos tomar medidas en el vertical.

Respecto a la ubicación de los micrófonos en la cámara, tras barajar distintas opciones, decidimos que los músicos permanecerían sentados (excepto el contrabajista) en una silla convenientemente revestida de material absorbente de forma que el centro acústico del instrumento coincidiese con el centro geométrico de la cámara anecoica. Este procedimiento por un lado nos permite tener un mayor control sobre la posición del músico, minimizando las variaciones debidas a movimientos indeseados, y por otro, podemos llevar a cabo mediciones del conjunto músico más instrumento muy realistas, ya que en el uso sinfónico y camerístico de estos instrumentos el intérprete suele estar sentado.

Sin embargo, esta configuración supone la aparición de un ángulo límite por debajo del conjunto músico más instrumento ya que, dependiendo del instrumento y de la altura del músico sentado, resulta imposible posicionar el micrófono en posiciones muy cercanas a la rejilla del suelo de la cámara o por debajo de ésta, así como en posiciones donde obstaculizamos la práctica del instrumento.

No obstante, a la hora de realizar el ajuste vertical de la altura de la silla (y de la pica, en el caso del contrabajo) se intentó lograr una altura tal que permitiese poder disponer del mayor número de medidas posible sin afectar a la comodidad del músico en el desarrollo normal de su interpretación, lo que en la práctica suponía aproximar el centro acústico del instrumento a la mitad geométrica de la altura de la sala (1,25 metros aproximadamente) alejándonos del suelo lo suficiente como para perder solo las

medidas que impedía tomar el propio cuerpo del músico o de la silla por la parte inferior.

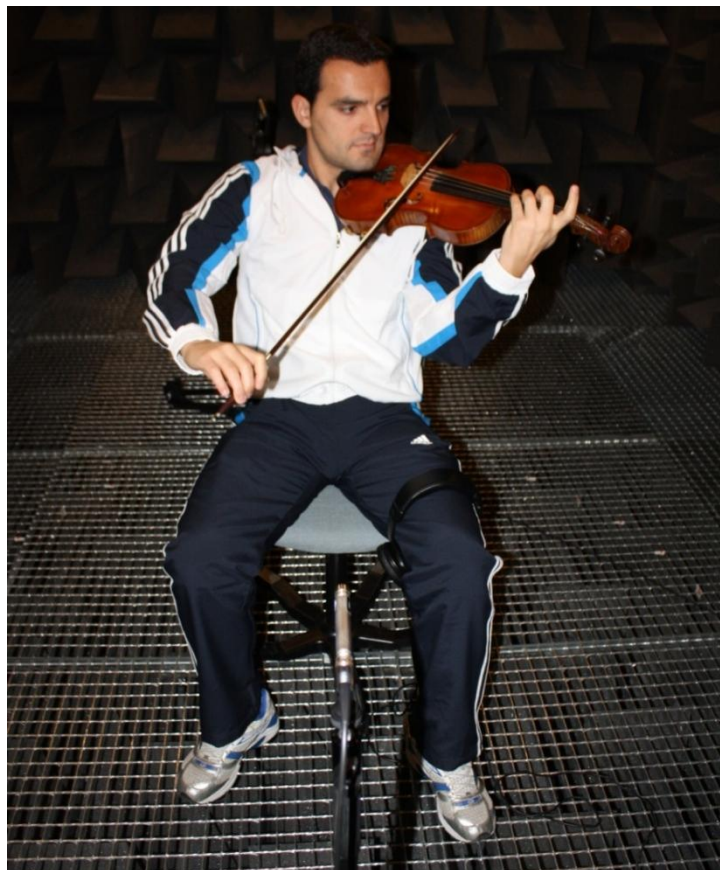


Figura 46: Detalle de la posición del violinista sentado frente al micrófono de referencia

Del mismo modo, desechamos otras alternativas basadas en una referenciación respecto a los planos que surgen de la propia morfología de los instrumentos, ya que a pesar de que en todos los casos quedaban definidos dos planos principales (uno dado por la caja de resonancia y otro ortogonal a este, tomando como referencia el puente) surgían numerosas dificultades a la hora de estandarizar un proceso de medición, puesto que cada instrumentista inclina de forma particular el instrumento y los medios disponibles no nos permitían ser precisos en la localización de los puntos de medición.

Así pues el esquema de las posiciones a medir puede concretarse gráficamente así:

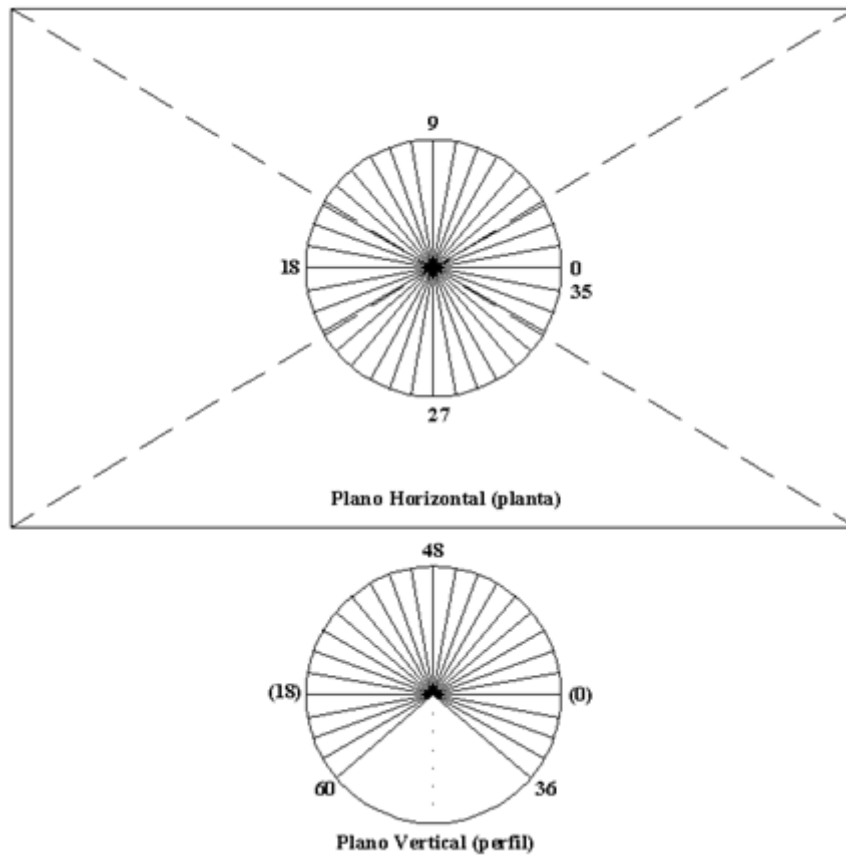


Figura 47: Vista en planta y perfil de los dos planos de medida. En el plano vertical (imagen inferior) el número de medidas realizables no será igual para todos los instrumentos (depende de su volumen y la altura del músico sentado) por lo que este número de medidas (60) es orientativo y se incrementará de ser posible.

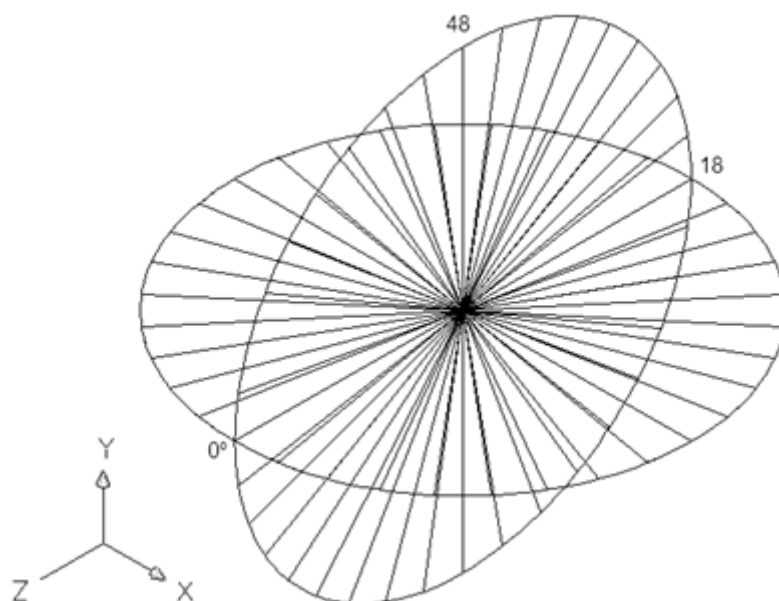


Figura 48: Vista Isométrica de la intersección de los dos planos de medida. Como se ha comentado, en el plano vertical las medidas del extremo inferior no serán siempre realizables.

5. Estimación del error y colocación de los micrófonos para la medida de directividad

De cara a la obtención de medidas precisas, en las que la dependencia de la forma en que se colocaban los micrófonos no afectase a la naturaleza de las propias medidas, optamos por diseñar una estrategia de captación en la que pudiésemos prever cuál sería el error estimado fruto de esa colocación.

Ante la imposibilidad, como ya se ha apuntado, de contar con un array microfónico o una gran plataforma giratoria que permitiese rotar al músico y asegurar la precisión del posicionamiento de los micrófonos de medida, nos decantamos por evaluar cuál sería el error derivado de la colocación manual de dos micrófonos, iguales en características y calibrados automáticamente para cada posición mediante PULSE.

Las principales dificultades de este proceso derivaban del hecho de que los pies de micrófono con los que contábamos están diseñados para un uso en actuaciones en directo o estudio, sin ningún mecanismo tipo regla graduada o cremallera de precisión, de manera que resultaba muy complicado ajustarlos para una posición determinada de manera rápida.



Figura 49: Pie de micrófono con jirafa incorporada y detalle de “araña” para amortiguar ruidos de impacto y mejorar la estabilidad sobre el suelo de rejilla

Asumido que los medios materiales eran éstos y no existía la posibilidad de mejorarlos, optamos por independizar las posiciones de interés de la colocación individual de los

micrófonos. Para ello realizamos una conversión de coordenadas esféricas a cartesianas, con el objetivo de asegurar la precisión en la colocación del micrófono. Este proceso en sí mismo no supone ningún progreso, pero sí facilita la medida en la práctica, ya que con los medios que contábamos resultaba mucho más sencillo determinar cuánto nos alejábamos del centro de referencia, en qué dirección lo hacíamos y a qué altura quedaba el punto de interés.

Una vez conocidos los puntos en este sistema de coordenadas, el siguiente paso consistió en la elaboración de unas tablas en las que, según las dimensiones de los pies de micrófono, recogimos cómo había que ajustar cada pieza del pie para lograr que la cápsula microfónica quedase exactamente en la posición XYZ prevista.

Igualmente, durante el proceso de ensayo, nos dimos cuenta de la dificultad que suponía “movernos angularmente” entorno al centro previsto, ya que dentro de la cámara no existen puntos de referencia ni durante el proceso de toma de medidas podíamos invertir el tiempo que habría supuesto el medir los ángulos en cada punto. Así pues, tras valorar distintas posibilidades como introducir una silla giratoria y rotar la misma, utilizar una plantilla para llevar a cabo los movimientos de micrófono en el plano horizontal, o utilizar una cuerda de fijación anclada en el centro de medidas, nos decidimos por marcar en la rejilla metálica que hace las veces de suelo, los puntos de interés cada 10 grados, usando para ello una cinta adhesiva, transparente acústicamente de cara a preservar la anecoicidad de la cámara.

A nivel práctico marcamos sobre la rejilla acústica del suelo de la cámara los siguientes puntos:

- a) centro geométrico de la sala
- b) posiciones de micrófono a 1 metro del centro (campo lejano) cada 10° hasta cubrir los 360°

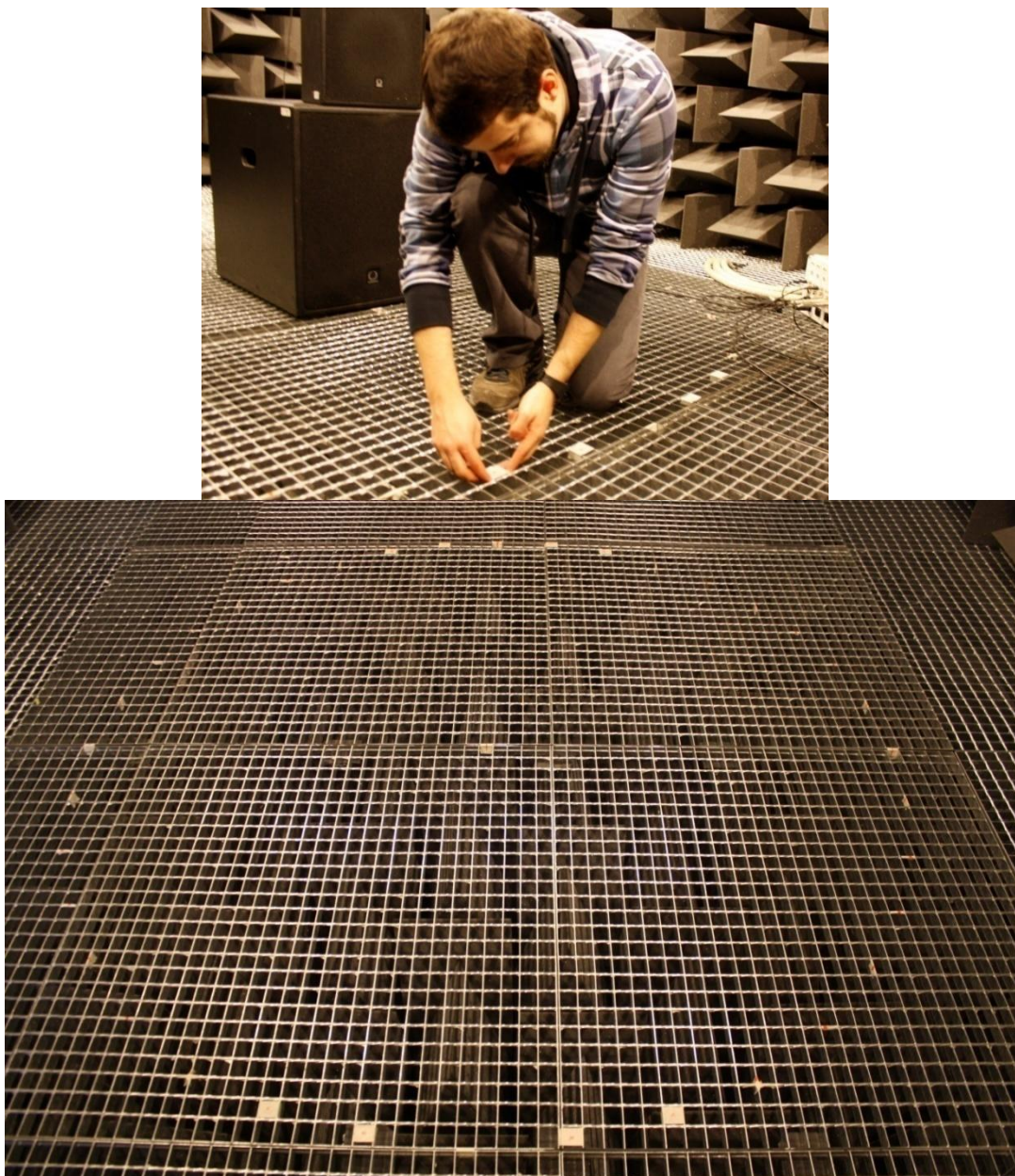


Figura 50: marcado de las posiciones de micrófono sobre la rejilla acústica en el suelo de la cámara anecoica

A partir de aquí, combinando esos puntos fijos con las tablas de cómo colocar el pie en cuanto a altura, rotación del brazo y longitud de la jirafa, y aplicando esas medidas en cada posicionamiento que hacíamos del micrófono, conseguimos establecer un rudimentario, aunque efectivo, código de ensayo para el manejo y movimiento de los micrófonos en el interior de la cámara anecoica. No obstante, esto no resuelve por completo el problema, sólo nos acerca a una mayor precisión y rapidez a la hora de colocar los micrófonos ya que el verdadero reto era estimar cuánto influía ese posicionamiento (más o menos certero) en las propias medidas.

A fin de poder caracterizar ese error, usamos una señal de ruido rosa que reproducimos a través de un sistema de altavoces multivía (agudos, medios y graves-subgraves) controlado por un amplificador general y colocado en la posición de referencia donde posteriormente se ubicarían los instrumentistas. La elección de esta señal, en lugar de otras que pudiese producir un músico u otra señal pregrabada, se debe a que de esta manera excitamos el sistema de forma estacionaria con todas las frecuencias que hipotéticamente pueden darse, independientemente de qué instrumento analicemos y de lo que toque, con un nivel adecuado que podemos regular desde el exterior de la cámara. Además, esto nos permitió llevar a cabo un proceso muy exhaustivo, con 100 medidas por posición, que de no haber contado con una señal artificial habría resultado tedioso para los músicos e inestable en sus resultados.

Para introducir esa excitación en la cámara se hizo uso del sistema de patch panel que permiten comunicar el interior de la cámara con el laboratorio contiguo de acústica. Así, haciendo uso de las funcionalidades de PULSE, se configuró en el propio software PULSE una señal de ruido con las características señaladas que pasamos al amplificador y de ahí a los altavoces previo paso por los correspondientes patch panel a la entrada de la cámara y dentro de la propia cámara y el cableado necesario para la interconexión de los altavoces. Respecto a la medición se usó el montaje previsto para la medida de la directividad (ver sección 7.4 acerca de *Colocación del músico y el micrófono*).

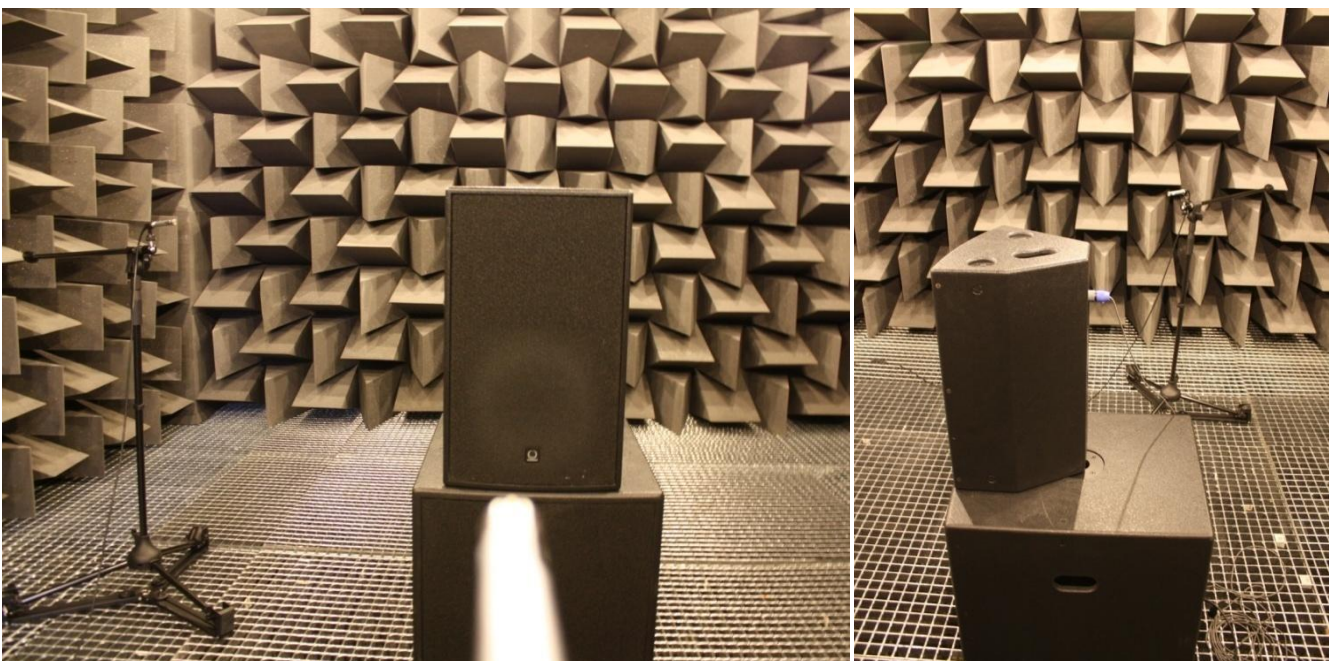


Figura 51: Proceso de estimación del error en la medida. En las imágenes podemos apreciar cómo se usó un sistema multivía a través del cual se reprodujo ruido rosa.

A partir de estas medidas, en cuatro posiciones representativas, obtuvimos para cada banda cuál era la distribución de ese error, típicamente gaussiano, con sus características estadísticas asociadas (media y desviación típica), de manera que todos los datos contenidos en este proyecto pueden tomarse por válidos con ese margen estimado de error (ver gráficas de estimación del error en **Anexo 4**).

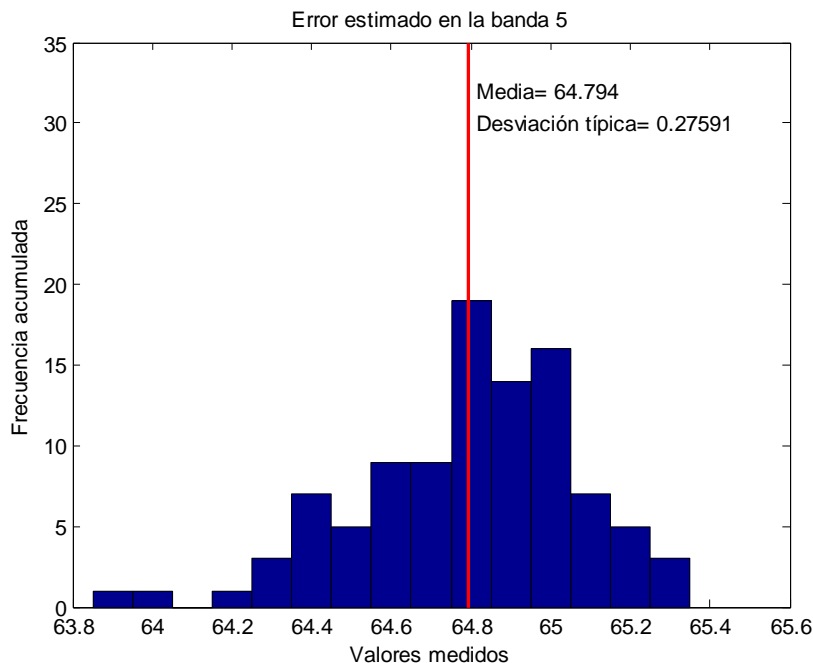


Figura 52: Ejemplo de error estimado. Concretamente vemos como en la banda 5 (correspondiente a la banda de tercio de octava centrada en la frecuencia de 50 Hz) la distribución toma una forma claramente gaussiana, con una reducida desviación típica y baja dispersión de los datos, lo que avala la efectividad del código de ensayo para posicionar los micrófonos

Como podemos ver en la figura anterior, estos resultados permiten aseverar que ante un proceso de toma de medidas como el que planteamos, para cada banda de tercio de octava analizada, tendremos una distribución gaussiana centrada en torno al valor más frecuente medido con una certidumbre bastante elevada, ya que los valores que toma la desviación típica son reducidos y la dispersión, por tanto, es baja.

La elección de las posiciones en las que hacer esas medidas no fue en absoluto azarosa, sino que se intentó caracterizar los puntos más significativos en nuestro diseño, de manera que medimos en la posición de referencia 0, en la posición correspondiente a 90° en el plano horizontal, en 120° por ser una medida comprendida entre los ejes y por

tanto más difícil referenciarla, y 10° de elevación en el plano vertical, lo que es representativo de la dificultad de medir en altura fuera del plano horizontal.

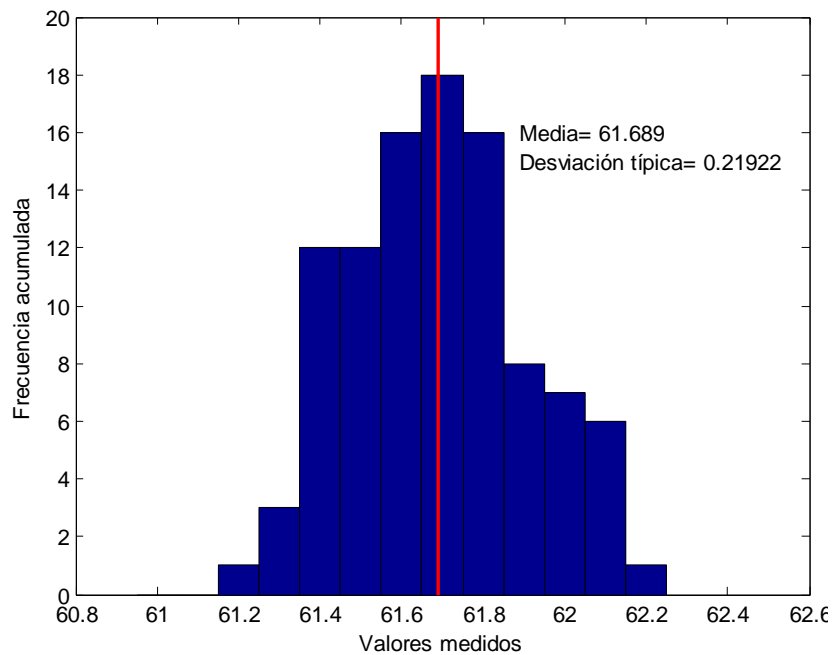


Figura 53: Ejemplo de error estimado en la posición de 10° de elevación en el plano vertical. En esta distribución gaussiana en la banda 6 (correspondiente a la banda de tercio de octava centrada en la frecuencia de 63 Hz) vemos como la media (representada mediante una línea vertical roja) está contenida dentro de la barra que representa el valor más frecuente medido en esa posición.

Más allá de que las gráficas obtenidas se ajusten en mayor o menor medida a la forma de campana típicamente gaussiana, lo más significativo es cómo para cada banda de tercio de octava los valores obtenidos presentan una dispersión baja (típicamente por debajo de 1 dB y nunca superior a 3 dB). Ello supone que a la hora de leer los datos de directividad de los diagramas polares presentados, siempre podremos señalar con qué grado de error son ciertos nuestros resultados, lo que nos viene dado por la gráfica asociada a esa frecuencia en la posición de interés.

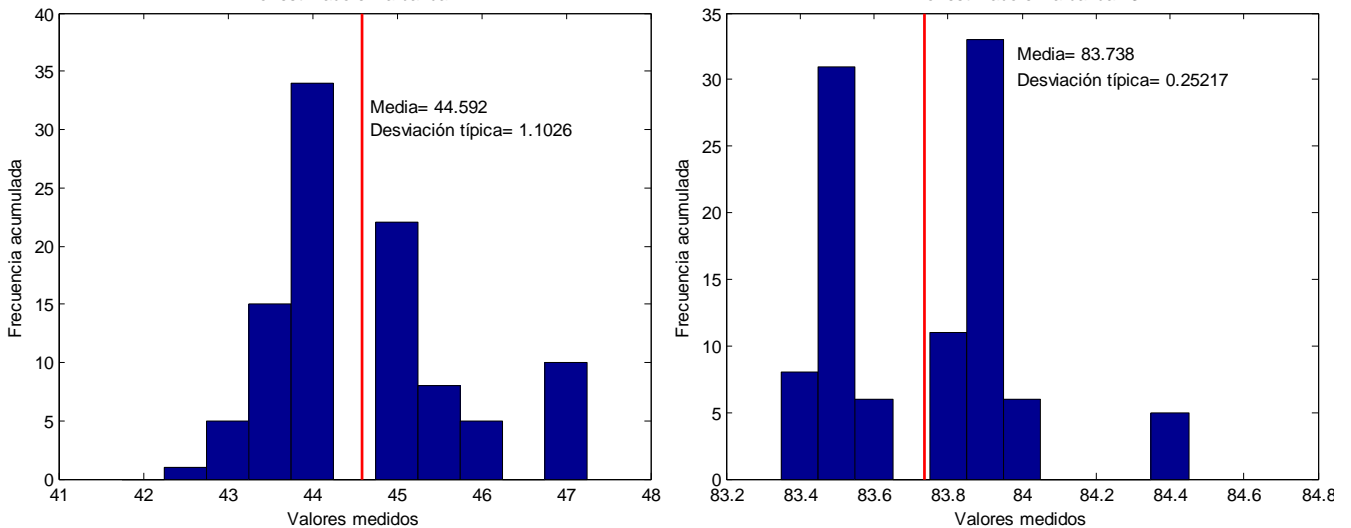


Figura 54: Ejemplo de error estimado en la posición de 120° en el plano horizontal y 0°, respectivamente. Algunas distribuciones, como estas correspondientes a las bandas de tercio de octava centradas en la frecuencias de 2500 Hz y 3150 Hz, no adoptan una forma de campana tan evidente (en función de la resolución gráfica empleada) o bien la media no está contenida en ninguna barra. Sin embargo, si observamos los valores de dispersión son bajos, por lo que su caracterización es coherente con el análisis propuesto.

¿Qué tocan los músicos?

A la hora de plantear qué iban a tocar los músicos para poder realizar unas medidas de la directividad lo más completas y rigurosas posibles, optamos por fijar una estrategia de captación que nos resultase valiosa desde el punto de vista frecuencial. El principal foco de preocupación en este sentido era, ante la sabida falta de un código de ensayo para este tipo de fuentes sonoras, diseñar un protocolo de qué sonidos resultaban más representativos de cada fuente y cómo obtenerlos de un modo sistemático. Así pues, tras valorar numerosas alternativas, optamos por plantear la posibilidad de que tocasen un arpeggio (con subida y bajada) desde la nota de la cuerda más grave con tantas octavas de extensión como fuera posible, una escala diatónica (con el mismo criterio de selección, es decir, que abarcase el máximo ámbito posible) y un fragmento de una obra a elegir por el intérprete que ilustrase el modo normal de funcionamiento del instrumento en el repertorio clásico. Esto nos da un abanico de notas lo suficientemente amplio durante un periodo de tiempo significativo (casi cuatro minutos de media en cada posición de medida) como para que podamos tener registros de todas las bandas de frecuencia y al mismo tiempo no resultase tedioso para los músicos el repetirlo para todas las posiciones de medida. Recordemos en este punto que las medidas tomadas exigieron de

los intérpretes alrededor de 63 repeticiones y que el hecho de no excitar directamente ciertas frecuencias (como por ejemplo las procedentes de armónicos) no significa que no tengamos registros de las mismas, puesto que cada sonido excitado alberga múltiples armónicos.

Ubicación del micrófono para la grabación de la base de datos

Para la grabación de la BBDD será suficiente con utilizar la posición dada por la alineación inicial entre el micrófono (ubicado en la posición 0) y el eje del músico. A pesar de que el estudio de la directividad arroja unas conclusiones que nos conducen a una mejora en el posicionamiento de los micrófonos en la toma sonido, éstas no fueron tomadas en cuenta en esta fase del proyecto, ya que la medida de directividad y la grabación de la base de datos se realizaron durante las mismas sesiones. En todo caso, si que podemos valorar auditivamente las diferencias de nivel fruto de la directividad, especialmente en las grabaciones de escalas, que se recogen en la propia base de datos.

6. Análisis de resultados sobre la medida de la directividad

Los diagramas polares que representamos gracias a la función creada en Matlab muestran los resultados obtenidos de una forma gráfica. Estos diagramas no son sino la representación de la directividad en forma polar, por lo que a veces en la literatura nos referimos a ellos como curvas polares.

A la hora de plantear cómo íbamos a gestionar los datos recogidos por medio de PULSE, creímos que sería interesante plantear dos análisis paralelos: uno en el que trabajaríamos directamente con unidades naturales y otro en el que operaríamos con decibelios. Ambos esquemas, que resumimos a continuación, nos permiten obtener el mismo resultado una vez que graficamos, verificando pues la corrección de los cálculos realizados:

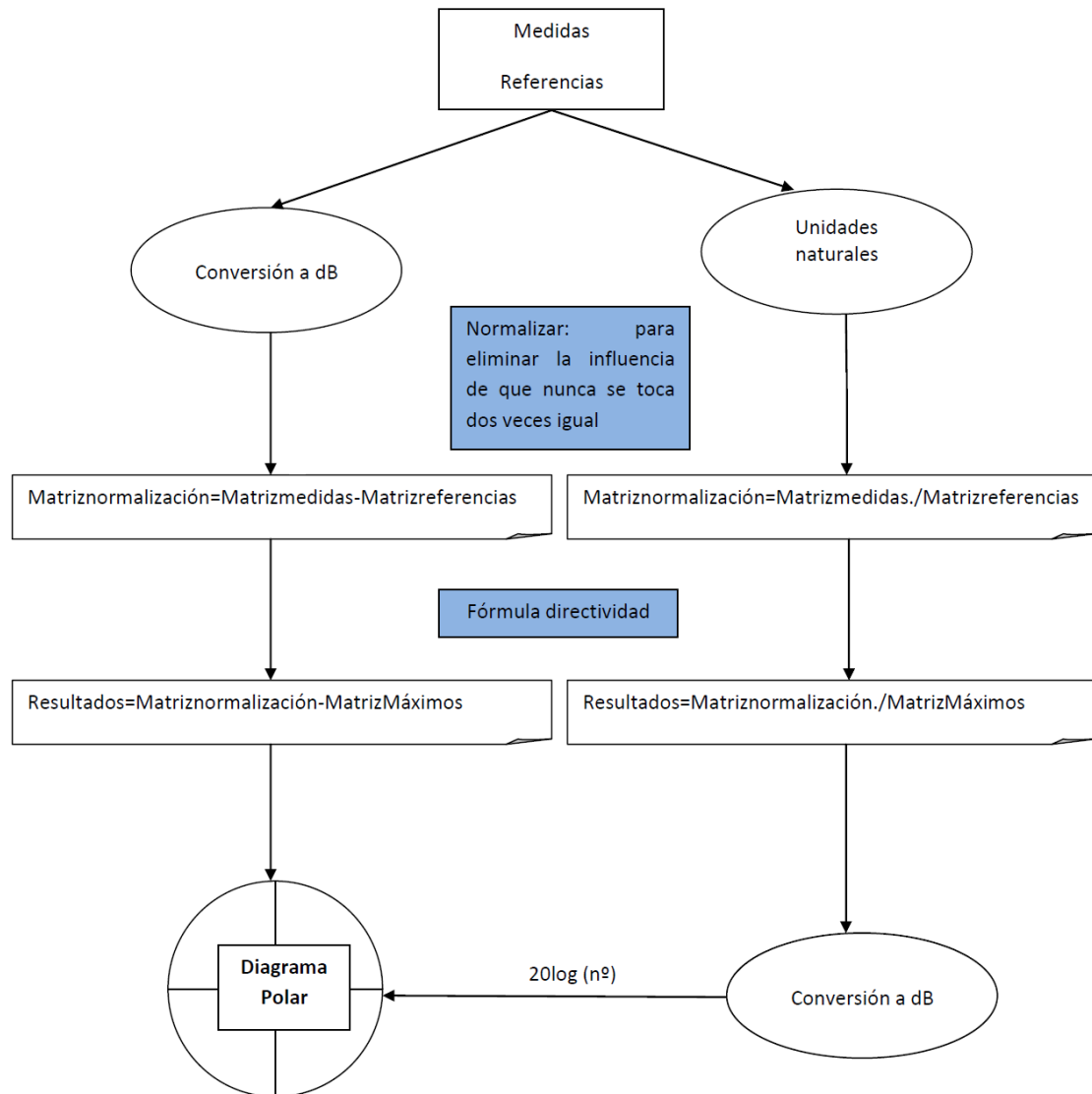


Figura 55: Itinerarios de cálculo para la representación polar de la directividad

Otro elemento que podemos ver en este análisis es que mientras efectuamos las medidas los músicos nunca tocan exactamente igual en dos posiciones distintas (al menos en lo que a intensidad y carácter se refiere), por lo que introducimos en la forma de operar una normalización que pasa por realizar un cociente entre los datos captados por el micrófono de medidas entre los captados por el de referencia (cuando operamos con unidades naturales) o una resta (en el caso de operar en decibelios).

Respecto a la forma de pintar los datos haciendo uso de MATLAB implementamos una serie de funciones que nos permitiesen obtener la representación, tanto en el plano horizontal como en el vertical, de diagramas polares en los que mostramos una curva fruto de realizar la medida de directividad. Así, como puede verse en el código adjunto al texto del proyecto (disponible en el CD adjunto o en la dirección

<https://dl.dropbox.com/u/45621120/PFC-DiegoJPerez.rar>), las distintas funciones creadas proporcionan a la función Dirplot una serie de datos que dicha función es capaz de representar en un diagrama polar. También dedicamos buena parte de nuestros esfuerzos a lograr representar los datos de una forma coherente con la física del problema, de manera que, como puede verse en los diagramas del plano vertical, en aquellos puntos donde no se recogieron datos optamos por no pintar la curva de directividad. Por otro lado, a pesar de que podríamos haber optado por realizar un giro en los ejes de representación a fin de que visualmente los resultados fueran más fácilmente interpretables, nos decantamos por utilizar la orientación habitual de los mismos en trabajos de acústica, esto es, comenzando el ángulo 0 en la parte superior del diagrama.

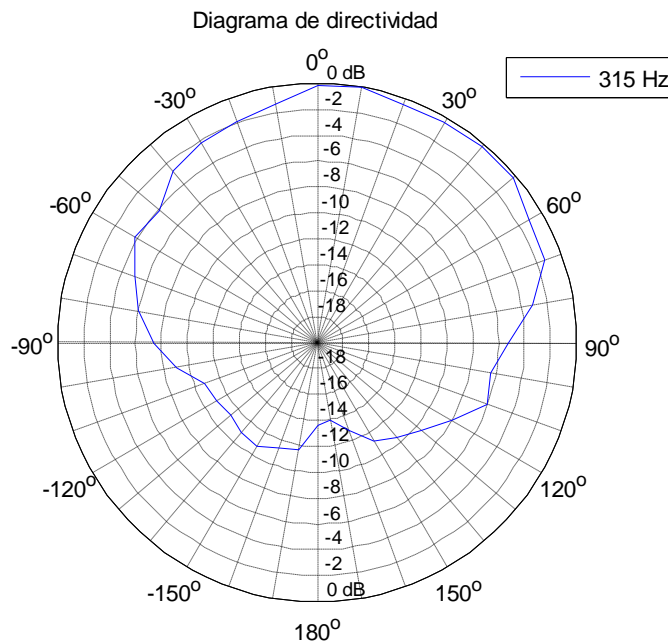


Figura 56: Ejemplo de diagrama polar de directividad

En cuanto a la forma en la que nos relacionamos con los datos es importante que entendamos que inicialmente, en la fase de medición in situ, la herramienta PULSE simplemente nos permitía ver de forma dinámica mientras el músico tocaba, una gráfica de barras (representación acumulada de barras centradas en las frecuencias centrales de cada tercio de octava) como la siguiente, correspondiente a una medición con un violín:

*Grabación de una base de datos de instrumentos musicales
de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad*

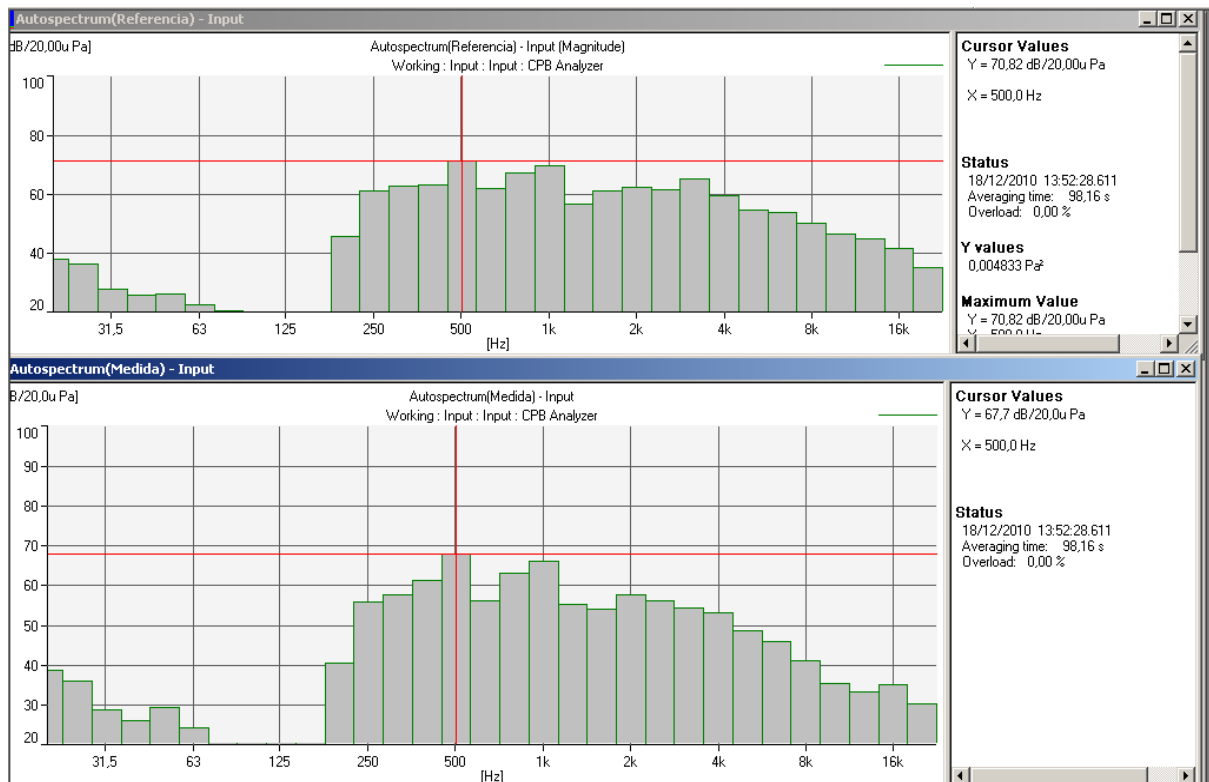


Figura 57: Apariencia de las medidas sobre un violín a través del software de PULSE. Las barras significativas son aquellas que se acumulan a partir de los 196 Hz, frecuencia fundamental de la cuerda más grave del violín, el Sol₃.

Como podemos ver, claramente podemos distinguir dos zonas independientes en esta gráfica. En primer lugar, tenemos un área que no excede la barra centrada en torno a los 63Hz, en la que tenemos un ruido de fondo captado por los micrófonos y que procede fundamentalmente del ruido eléctrico de baja frecuencia de las bombillas de bajo consumo que permiten iluminar la cámara anecoica y de la fuente de alimentación del micrófono GRAS. Este ruido, que podemos identificar visualmente en estas mediciones a través de PULSE, ha sido descrito estadísticamente en la sección de estimación del error y afecta a todas las mediciones realizadas en el seno de la cámara anecoica, por lo que puede ser desestimado en este proceso de análisis. Además, como se ha discutido en la sección 6.2 sobre “Elección de equipos y esquema de conexiones”, las características en cuanto a respuesta en frecuencia de los micrófonos B&K 4188-A-021 por debajo de 40 Hz no ofrecen una fidelidad óptima.

La segunda zona, viene definida por un área a la derecha de la gráfica en el que verdaderamente están los datos de interés. Estas barras acumulan para cada tercio de octava la excitación producida en el interior de la cámara de esas frecuencias.

Grabación de una base de datos de instrumentos musicales de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad

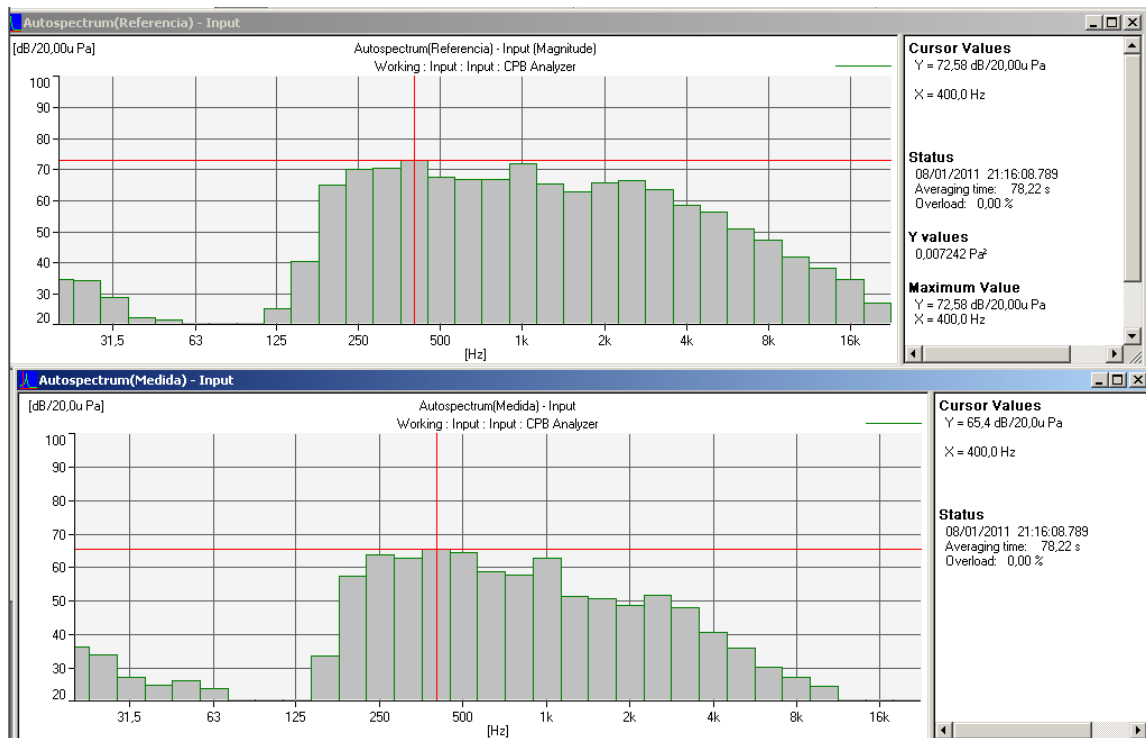


Figura 58: Medidas sobre una viola. El límite inferior de la zona derecha depende directamente de la frecuencia más grave que puede producir el instrumento, en este caso un Do_3 (unos 130 Hz)

En función del tipo de instrumento que analicemos las barras adoptarán una distribución característica, donde la frecuencia fundamental del sonido más grave tocado supondrá el límite inferior de las medidas que consideramos de interés.

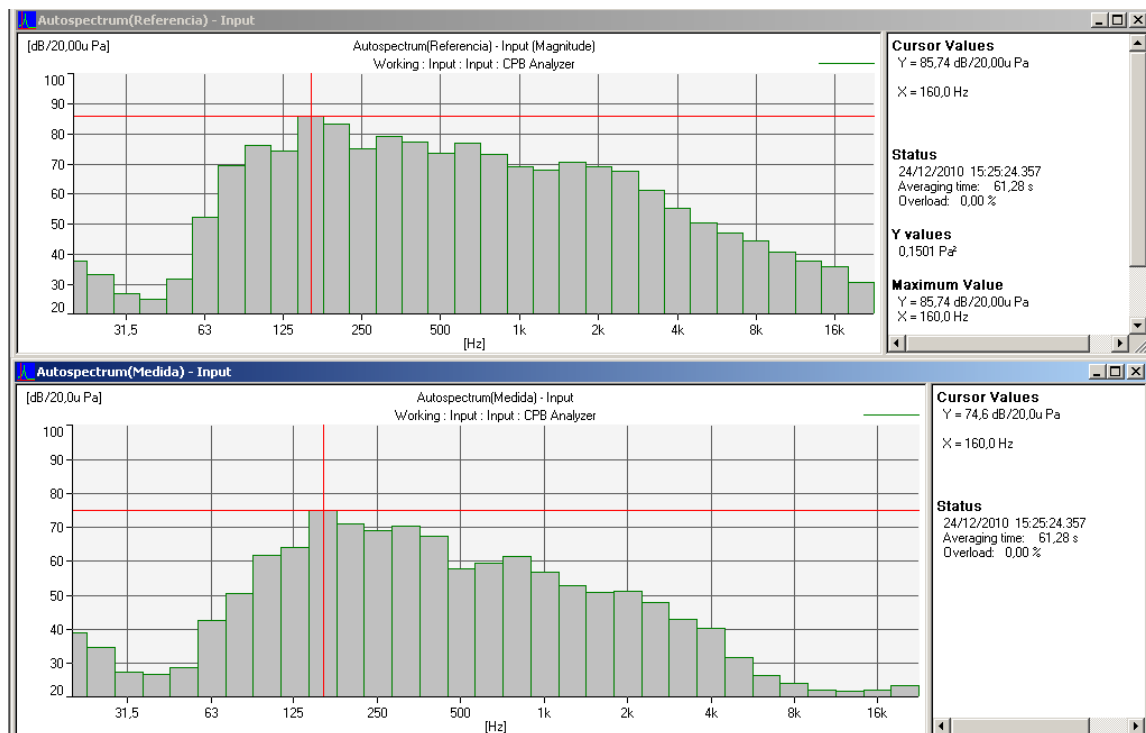


Figura 59: Medidas sobre un violonchelo. En este caso, la frecuencia más grave que puede producir el instrumento es un Do_2 (unos 62 Hz)

El límite superior sólo vendrá limitado por los límites del umbral de la audición humana, típicamente 20kHz, ya que aunque no se exciten sonidos extremadamente agudos, los armónicos contenidos en el resto de sonidos harán que las barras más altas aumenten de valor incluso en el más grave de los miembros de la familia, el contrabajo.

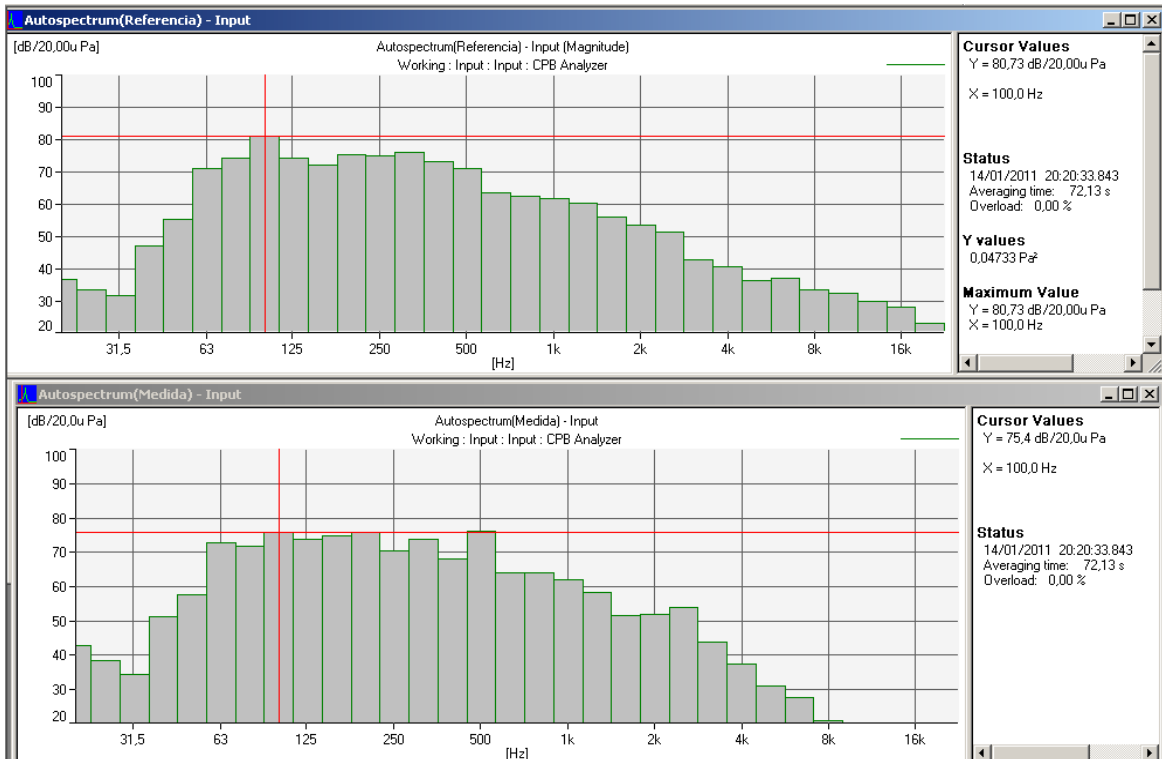


Figura 60: Medidas sobre un contrabajo. En este caso, podemos apreciar además cómo el micrófono de referencia capta armónicos de orden elevado que, sin embargo, no son captados por el micrófono de medida debido al alto carácter directivo de las altas frecuencias. Por otro lado, al ser la nota más grave del contrabajo un Mi_1 (unos 41 Hz) la zona de interés queda solapada con la de ruido, del que conocemos sus características estadísticas y su distribución frecuencial (ver **Figura 61**).

Grabación de una base de datos de instrumentos musicales de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad

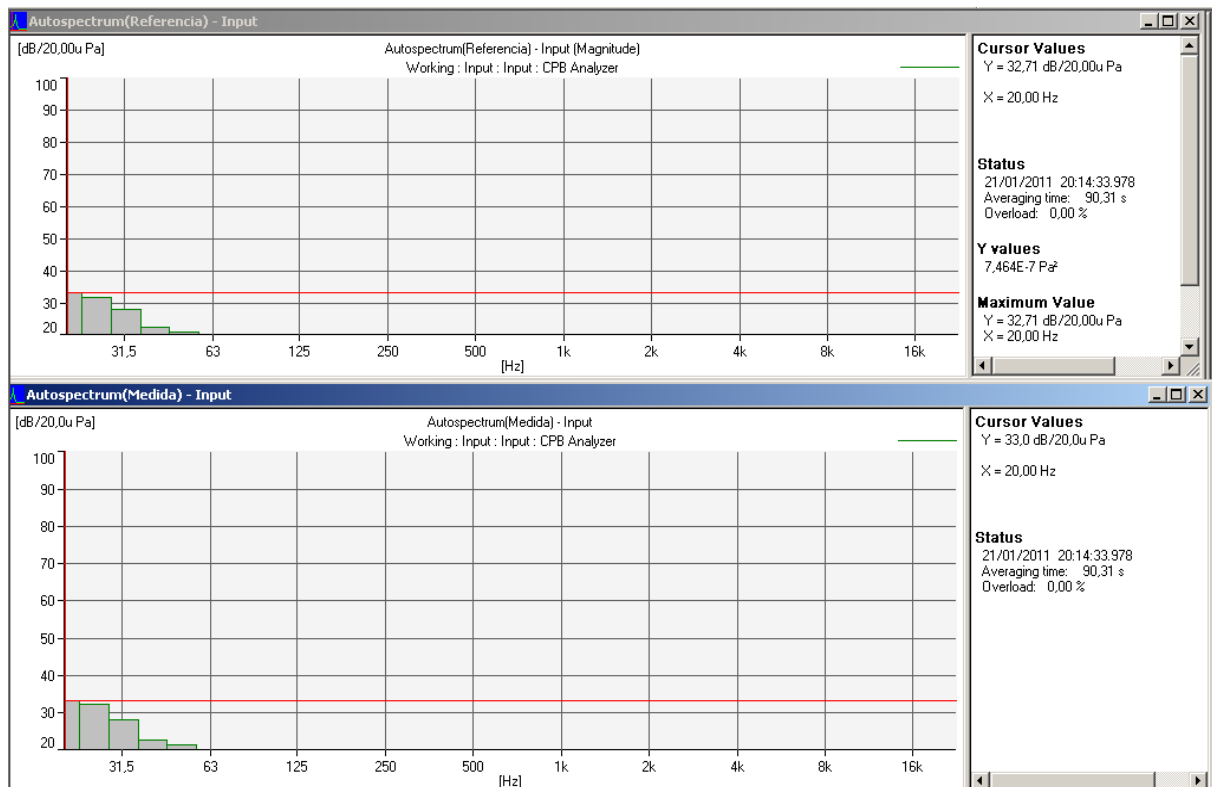


Figura 61: Medida del ruido de fondo. El ruido de fondo se acumula en las bandas por debajo de 50 Hz, con unos niveles constantes y poco influyentes en las medidas.

Como también vemos en el panel a la derecha de la gráfica, PULSE nos ofrece una serie de estadísticas de la medida concreta, como el tiempo de duración de la misma, si se ha producido algún pico de señal que suponga una saturación (lo que nos habría llevado a repetir la medición), valores instantáneos de mayor valor (particularmente interesante para conocer en qué banda, para esa posición concreta, se están acumulando muestras con un valor de intensidad mayor) y otros datos de menor interés para nuestro propósito. En todo caso, todo lo referente a los datos mostrados en este panel puede ser recuperado a partir de los archivos que exportamos a Excel, por lo que no almacenamos estas gráficas como imagen, sino que salvamos su caracterización estadística.

Análisis de curvas polares

De los datos obtenidos, y ya centrando nuestro análisis en los resultados de las medidas de directividad, podemos realizar asimismo una serie de consideraciones relevantes, fundamentalmente relacionadas con cómo en ciertas posiciones los resultados permiten identificar características acústicas de los instrumentos analizados.

En el caso del violín, el sonido más grave que podemos producir es un Sol₃ (196 Hz). Si comparamos los diagramas a partir del correspondiente al tercio de octava que alberga dicha frecuencia (en este caso la banda centrada en 200 Hz), podemos ver cómo varía el ángulo para el que alcanzamos el máximo de radiación en cada frecuencia. Una primera lectura de esto nos lleva a comprobar que la máxima radiación de un violín no sucede siempre en el eje (entendiendo como tal la descripción incluida en el apartado 7.4 acerca de *Colocación del músico y el micrófono*) para todas las frecuencias, ni tampoco exclusivamente en un punto único, sino que varía en gran medida en función de la frecuencia de análisis y pueden encontrarse máximos de radiación iguales en distintos puntos de un mismo plano. Así mientras que en la banda de 200 Hz este máximo sí se alcanza en el eje (tanto en el plano horizontal como en el vertical), no sucede lo mismo con otras frecuencias como en 500 Hz, donde encontramos máximos entre los ángulos 90° y 120° en el plano horizontal y 40° por debajo del corte de los planos vertical y horizontal en el caso del plano vertical.

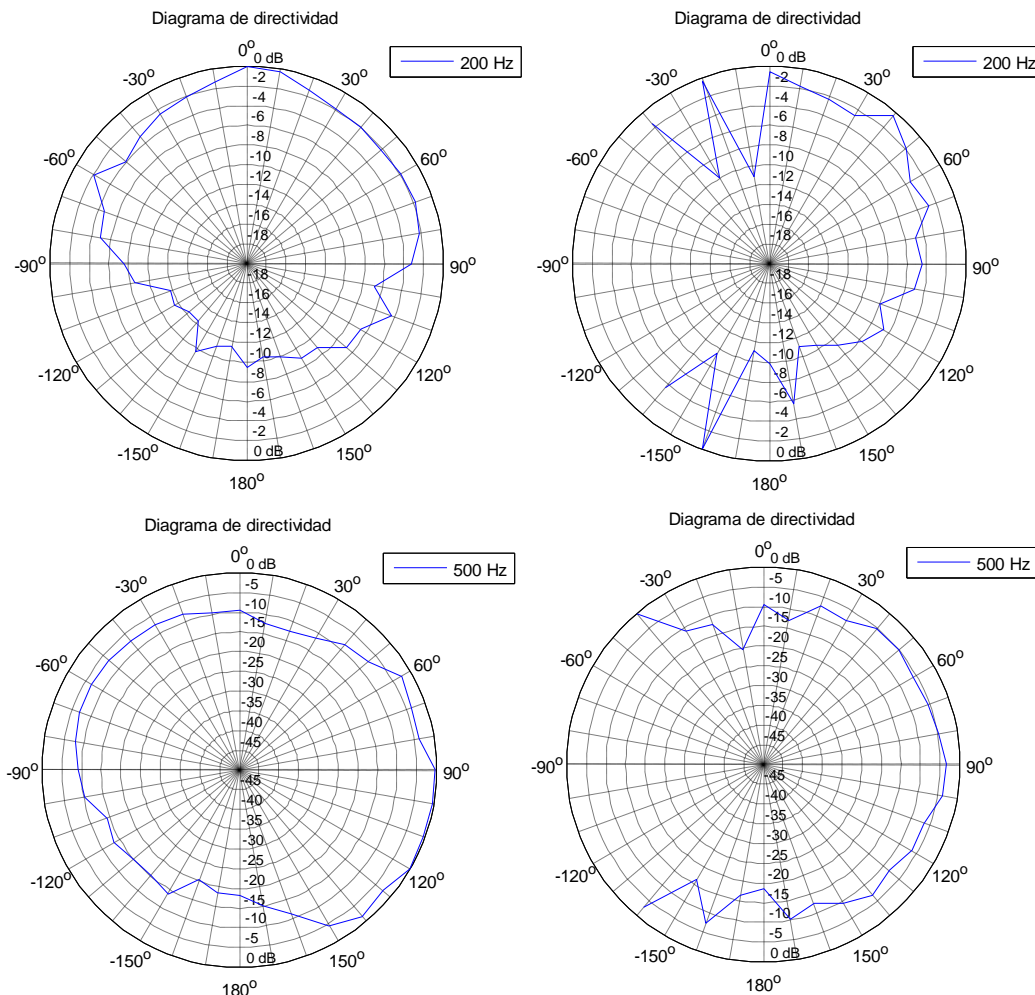


Figura 62: Comparación de diferentes máximos. A la izquierda se presentan los resultados del plano horizontal y la derecha los del vertical, para la misma frecuencia.

La consecuencia práctica de esto, desde el punto de vista de la toma de sonido de estos instrumentos es que, a diferencia de lo que ocurre con un altavoz donde el máximo de presión normalmente se alcanza en el eje, el máximo se alcanzará para distintas posiciones en función de la frecuencia emitida por la fuente. Dicho de otro modo, lo que se manifiesta en estos resultados es el fenómeno de dependencia frecuencial de la directividad, analizado anteriormente en su dimensión teórica. Recordemos que en la literatura inspeccionada este fenómeno había sido descrito fundamentalmente para violín y cello, por lo que resulta muy valioso comprobar su existencia en todos los miembros de la familia.

También es interesante cómo en ciertas posiciones se produce una caída muy significativa de la directividad, como por ejemplo en las medidas tomadas en torno a 170° en el plano vertical tanto en el caso del violín como de la viola a partir de 1000Hz:

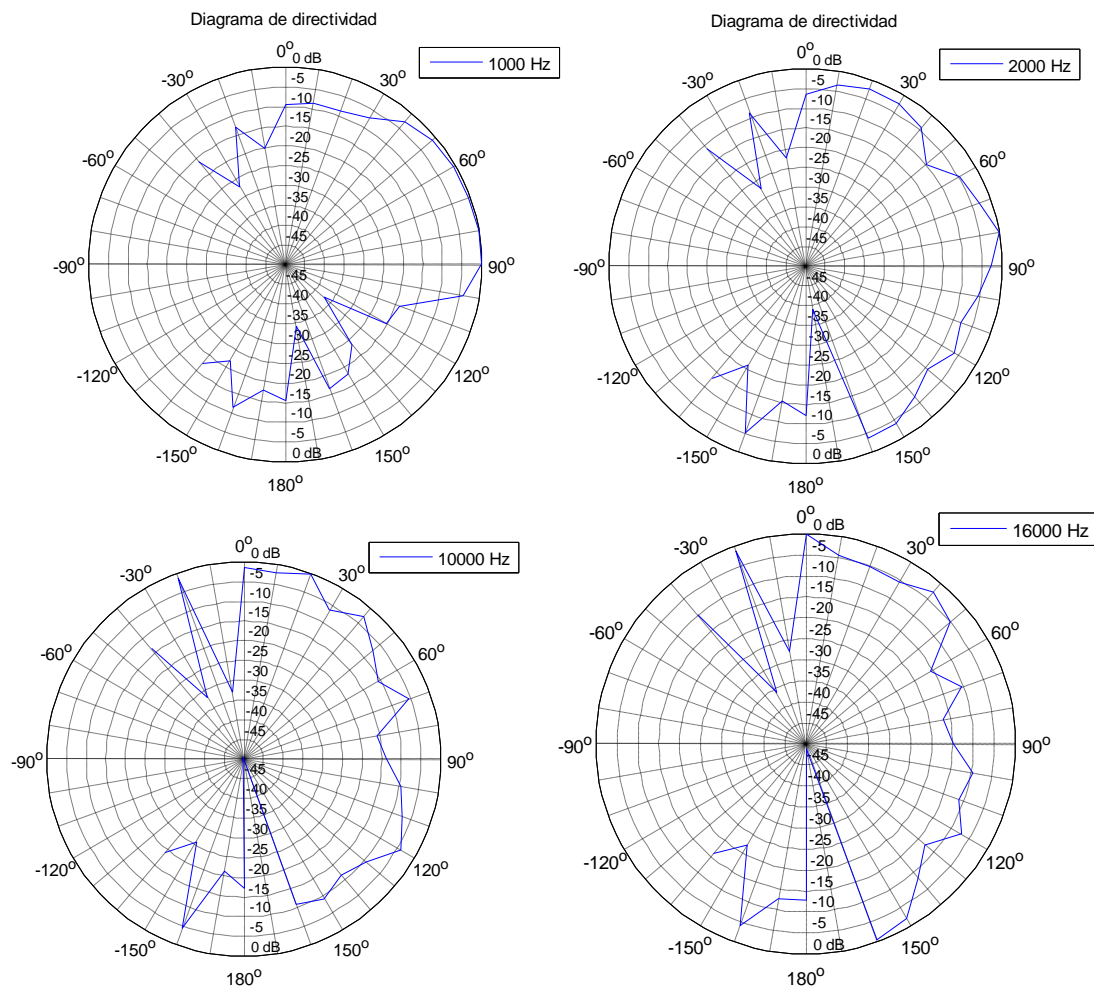


Figura 63: Caída de la directividad causada por la sombra acústica del músico en el caso del violín

El hecho de identifiquemos esta depresión a partir de 1000 Hz, nos hace pensar que la causa podría encontrarse en la sombra acústica que produce el cuerpo y la cabeza del músico al tocar, puesto que para frecuencias inferiores dicha caída no es tan significativa gracias a la longitud de onda de los sonidos producidos, capaz de rebasar obstáculos de tamaño inferior a la misma por difracción.

De forma análoga, para la viola observamos el mismo fenómeno, con ligeras variaciones en cuanto a la frecuencia en la que se hace más evidente:

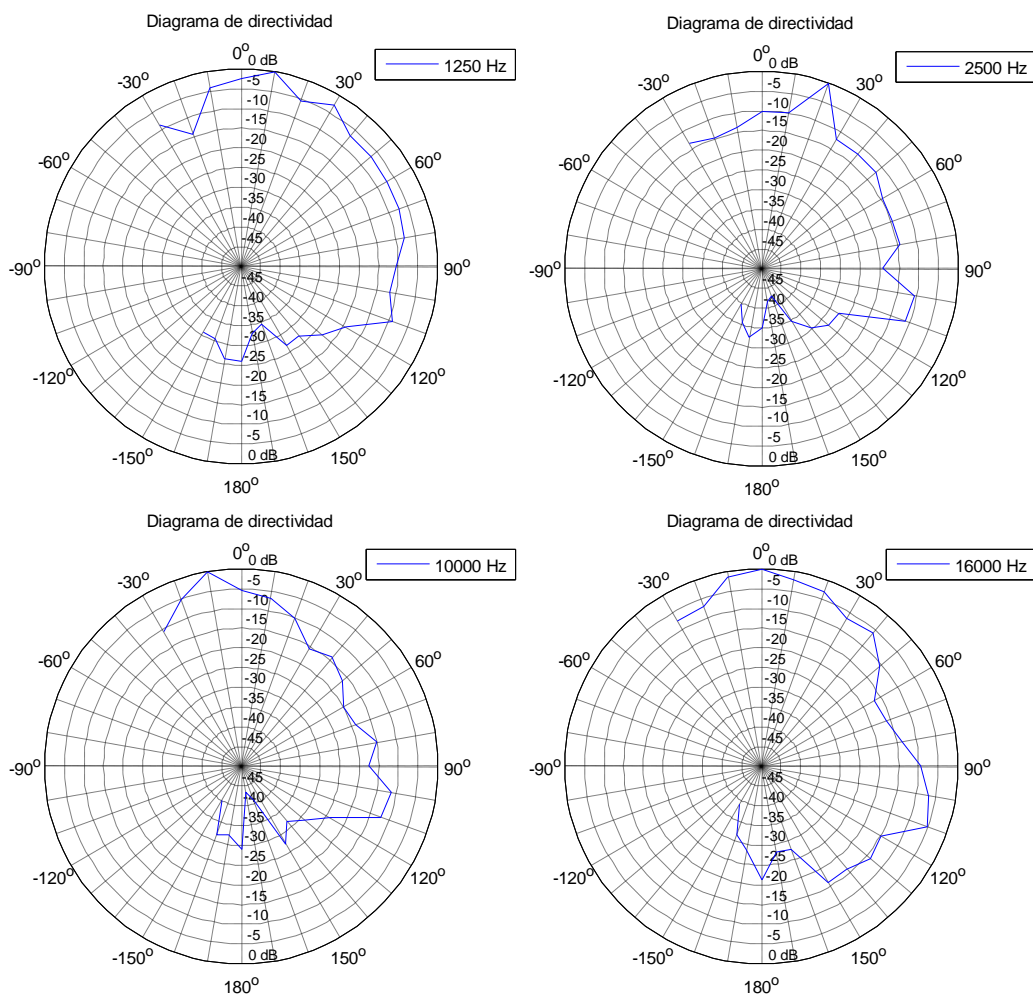


Figura 64: Fenómeno de sombra acústica en el caso de la viola

En el caso del violonchelo, donde el músico toca con el instrumento orientado de manera diferente a los anteriores, la zona de sombra acústica no es tan abrupta, sino que puede ser identificada a partir de los 110° a partir de 1000Hz como una caída generalizada en todas las posiciones de medida traseras:

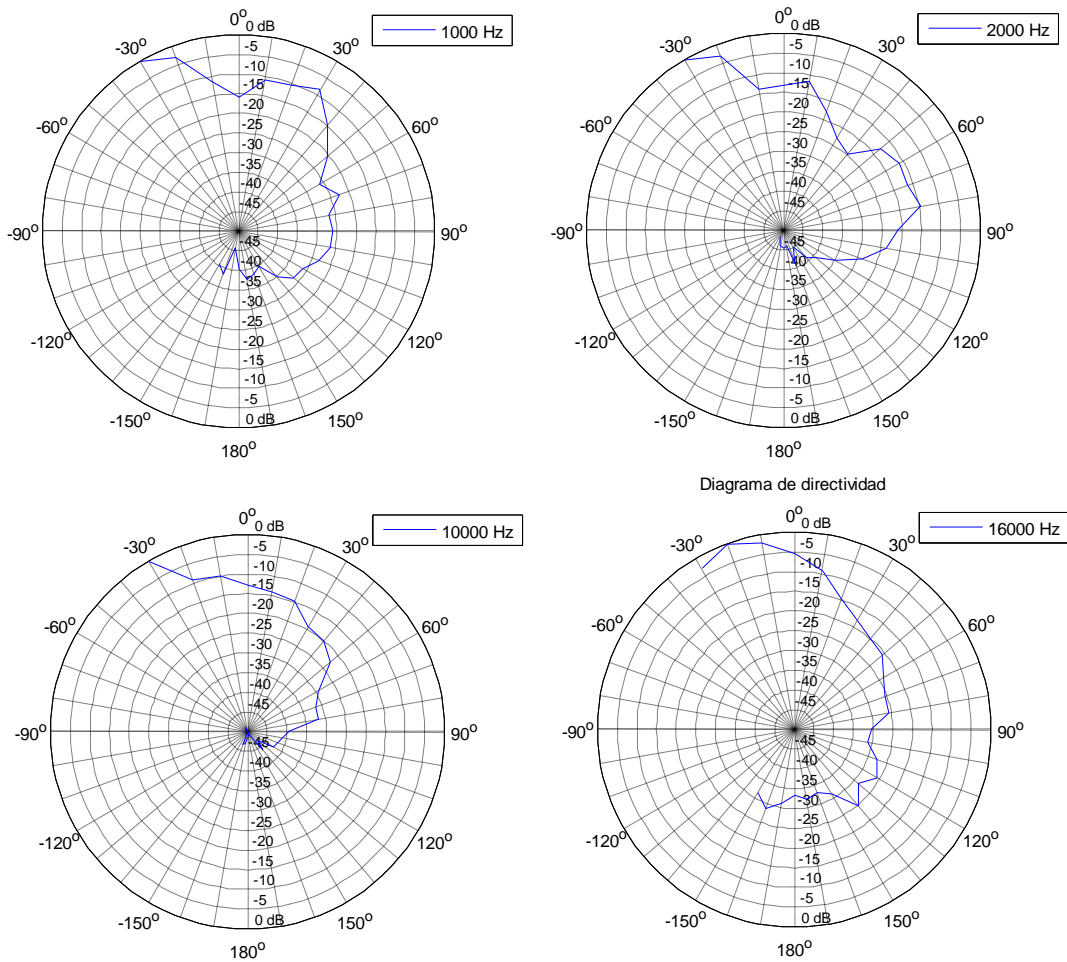


Figura 65: Fenómeno de sombra acústica en el caso del violonchelo

En el caso del contrabajo esta identificación es aún más difusa, ya que al sostenerse de pie y quedar libre la tapa trasera para vibrar hacia atrás, el efecto de sombra es menos evidente:

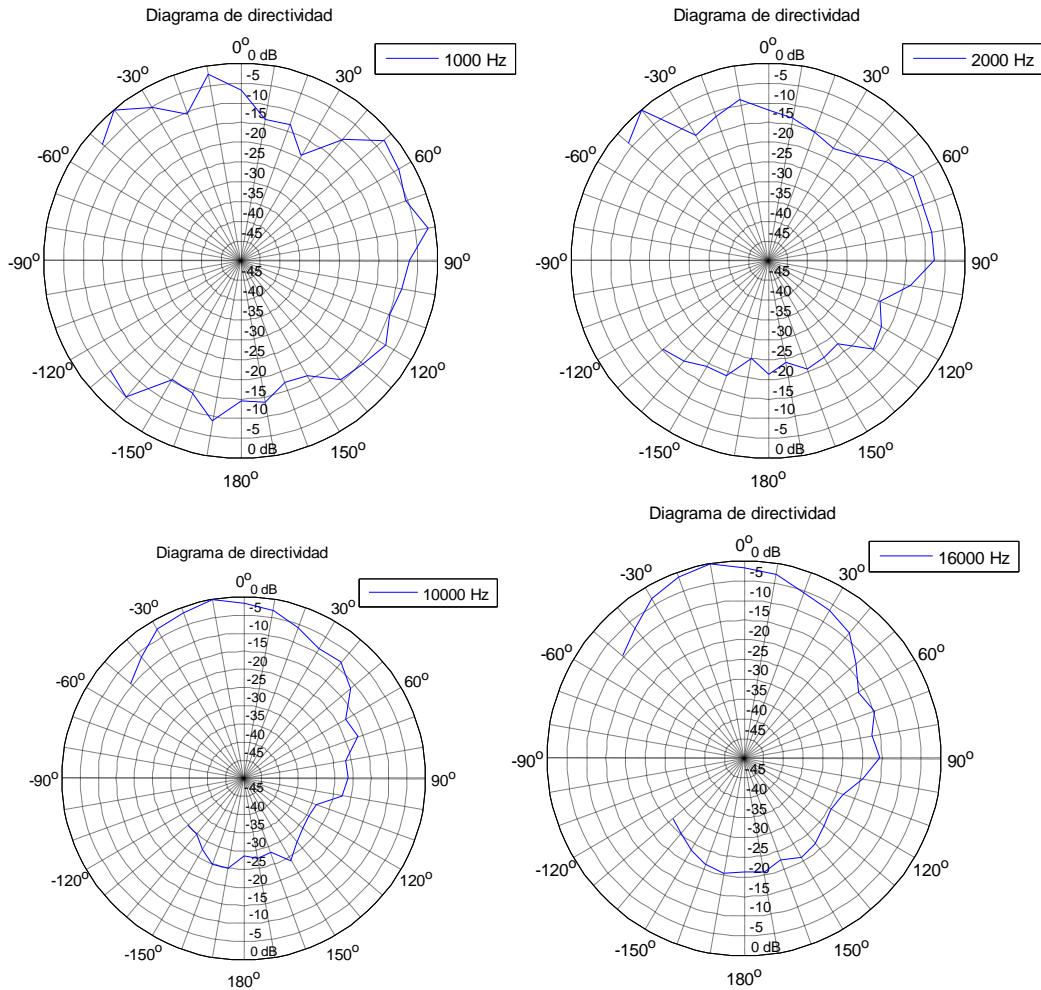


Figura 66: Fenómeno de sombra acústica en el caso del contrabajo

También, si ahora nos centramos únicamente en el plano horizontal y comparamos el patrón polar, podemos percatarnos de que al aumentar la frecuencia aumenta el orden de los patrones directivos identificables, con mayores variaciones entre los máximos y mínimos de radiación dentro de una misma curva polar:

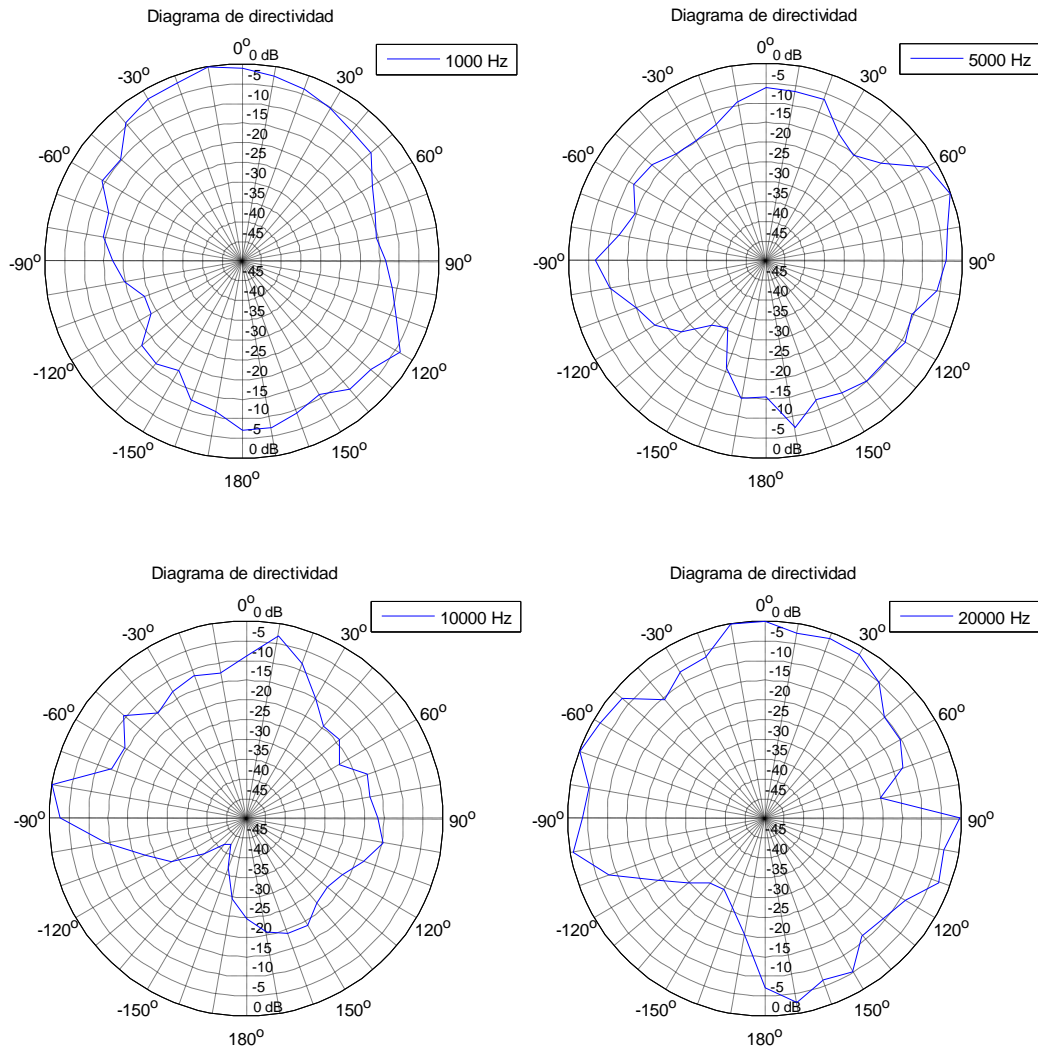


Figura 67: Comparación de curvas polares del violín a diferentes frecuencias

Por otro lado, si comparamos los patrones de radiación de los cuatro miembros de la familia se ratifica lo que cabe esperar de las frecuencias graves (en las que los patrones deberían adoptar un carácter más omnidireccional) y en frecuencias altas (donde se espera un comportamiento directivo, de forma que deberíamos ser capaces de identificar una serie de direcciones donde la radiación sonora fuese más intensa que en el resto, encontrando formas polares de tipo bidireccional y cardioide):

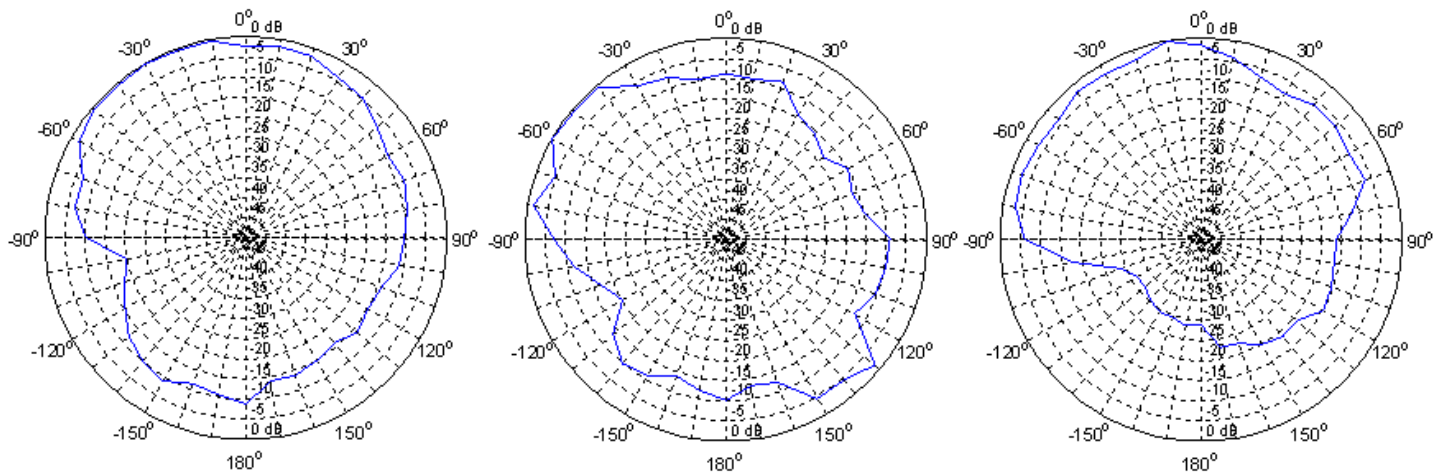


Figura 68: Patrones omnidireccional, bidireccional y cardioide resultado de analizar las bandas de 50, 800 y 10000 Hz en el contrabajo

Por último, a la luz de los resultados queda claro que no es posible establecer un criterio único de escalabilidad entre los miembros de la familia, tal y como a menudo se hace al referirse a estos instrumentos como sección orquestal. Así, ni siquiera en el caso del violín y la viola, los más semejantes en cuanto a la forma de tocarse, podemos afirmar que los puntos donde se alcanzan máximos de directividad sean los mismos para frecuencias similares ni, más allá de la analogía vista en lo relativo a la sombra acústica que produce el propio músico, puedan compararse niveles de radiación sonora en el resto de curvas polares.

8. Conclusiones y líneas futuras

El presente trabajo ha supuesto un reto de cara a la consecución de múltiples objetivos. En primer lugar se ha intentado ofrecer un análisis desde el punto de vista teórico de la física de los instrumentos de la familia de la cuerda frotada, algo que se nos antojaba inevitable para conocer las posibles causas de fenómenos acústicos de los que posteriormente íbamos a ser testigos en el trabajo de campo en la cámara anecoica. Esa caracterización de cada miembro de la familia así como de diversas técnicas musicales y procedimientos de producción sonora que emplean los instrumentistas, nos llevó a

profundizar en una serie de conceptos que no se han visto en conjunto hasta ahora, como es la identificación de diversas patologías que sufren los instrumentos y que dejan su huella sonora en el resultado acústico de los mismos, o como la forma de establecer una serie de procedimientos razonables desde el punto de vista musical que sirviesen a un propósito concreto en el ámbito de la ingeniería de sonido.

Probablemente de ahí, de la comunicación de dos mundos, el musical y el de la ingeniería acústica, que en muchas ocasiones se nos presentan separados, han surgido las mayores contribuciones de este trabajo al conocimiento de la física de estos instrumentos musicales. Concretamente el desarrollo de un código de ensayo para efectuar medidas en cámara anecoica sobre instrumentos musicales, supuso inicialmente una revisión de la normativa existente para la medición acústica sobre otro tipo de fuentes sonoras y un replanteamiento de algunos procedimientos teniendo en cuenta que nos enfrentaríamos no a productos industriales, sino a productos elaborados por artesanos lutieres que serían manejados por artistas sobre los que nuestra única forma de manipular era a través de instrucciones verbales precisas, ajustadas a un plan riguroso y sensato. Los resultados presentados también son interesantes para conocer mejor las características directivas de los miembros menos estudiados de la familia, empezando por el contrabajo (sin duda del que menos estudios existen, como se ha visto en la revisión bibliográfica), pasando por el violonchelo y terminando por la viola. En este sentido, se han obtenido curvas polares de todos ellos y se han analizado las consecuencias prácticas que ello comporta de cara a la toma de sonido, al tiempo que se ha comprobado que no es posible escalar los resultados de un miembro más pequeño de la familia a otro mayor y viceversa.

Evidentemente, una primera consecuencia de este mayor conocimiento acerca de las características directivas de estos instrumentos, puede redundar en una mejora de las técnicas de captación sonora y, por ende, a un aumento de la fidelidad en la reproducción de grabaciones de los mismos.

Por otro lado, la elaboración de una base de datos con registros de sonidos anecoicos producidos por instrumentos de cuerda frotada permite a la institución universitaria y a futuros alumnos disponer de una materia prima fundamental de cara a la elaboración de futuros trabajos en el campo de la auralización y de la síntesis musical. Durante la grabación de la misma, además, se ha tratado de obtener una riqueza de registros hasta

ahora no disponibles con estas características, como son distintos efectos producidos por los instrumentos, sin olvidarnos de que se ha establecido un criterio exhaustivo en cuanto a qué tocaban los músicos, que nos permiten disponer de muestras semitono a semitono de todo el registro de cada instrumento.

Precisamente, en cuanto a futuros trabajos y líneas de investigación que se abren a partir del presente proyecto fin de carrera, podemos identificar dos itinerarios diferentes: por un lado lo que tiene que ver con el uso de la base de datos creada y, por otro, lo tocante a exploración exhaustiva de características acústicas concretas de estos instrumentos. En el primer grupo encontraríamos pues una puerta hacia el desarrollo de nuevos bancos de sonido capaces de adaptarse a espacios arquitectónicos diversos por medio de procesos de auralización, como se ha señalado antes, pero también a futuros diseños de sistemas de realidad virtual y síntesis sonora mediante computación, campo éste en fuerte desarrollo en la actualidad. En el segundo grupo, las posibilidades son también diversas, puesto que son numerosos los interrogantes a desvelar y no existe un estudio como el que hemos planteado sobre cuestiones acústicas concretas como las notas lobo (sonido característico, similar al aullido de un lobo, que en algunos instrumentos de cuerda se genera cuando se excita una fuerte frecuencia de resonancia de la caja del instrumento, de manera que la impedancia del puente disminuye súbitamente, provocando que la reflexión sea demasiado débil como para mantener la oscilación de la cuerda), la influencia de los distintos tipos de cerdas, arcos y resinas en el rendimiento de los instrumentos o cuáles son las características constructivas de un instrumento de cuerda frotada que inequívocamente hacen de él un instrumento de alta calidad, entre otros. En todos estos casos, lo que parece evidente es que se hace imprescindible un estudio cuantitativo de esas características, comparando un volumen importante de instrumentos, algo que no era factible en nuestro caso. Igualmente, consideramos una apuesta de futuro los trabajos orientados a caracterizar patologías de los instrumentos a través de la identificación acústica de sus características, pues ello resultaría de gran interés para los músicos, quienes en la actualidad deben confiar en que los lutieres, gracias a su correcto juicio profesional basado en la experiencia, sepan identificar qué males aquejan a sus instrumentos, lo que supone un acto de fe en un siglo donde pocos elementos técnicos escapan a la razón y el pensamiento científico.

Sin embargo, por encima de las conclusiones a nivel teórico, quizás lo más valioso para el autor de este trabajo ha sido la adquisición de una serie de destrezas y competencias

mediante la elaboración del mismo que completan mi formación como ingeniero técnico de telecomunicaciones en la especialidad de imagen y sonido. En primer lugar, realizar como proyecto fin de carrera este trabajo me obligó a familiarizarme con el manejo de una mesa de mezclas digital, algo que hasta entonces no había tenido oportunidad de hacer durante la carrera. La mecánica de funcionamiento con la misma requirió una gran dedicación en tiempo, puesto que la casuística de problemas que podían suceder durante una sesión de grabación era tan grande que fue preciso entrenar cuáles debían de ser las medidas a tomar, pensando más como técnico de sonido que como ingeniero. Igualmente tuve que enfrentarme a un entorno de trabajo real, donde debía tomar decisiones fundamentales relativas a la interconexión de equipos, que influían en cada proceso subsiguiente y determinar qué elementos de hardware eran útiles para los propósitos que perseguíamos.

Por otro lado, también fue necesario desarrollar un manejo de herramientas asociadas al hardware, como ha sido el uso del software de análisis electroacústico PULSE. De nuevo, para conseguir los objetivos que nos habíamos marcado al inicio de este proyecto, se hizo necesario entender el manejo de esta herramienta, nueva también para mí, y trazar una hoja de ruta en cuanto a lograr un dominio de la misma tal que permitiera ajustar el sistema a los requisitos teóricos que diseñamos.

Unido a lo anterior, puesto que PULSE no es sino una pasarela entre el ámbito puramente físico y el software de modelado de los datos, tuve que profundizar en mis conocimientos sobre Matlab, para lograr procesar las estructuras de datos que obtenía del primer programa (previo paso por Excel). Personalmente, esta fase del proyecto ha sido la más complicada, pues carecía de una base sólida en el manejo de Matlab y los objetivos eran lo suficientemente precisos como para tener claro que el éxito del trabajo pasaba por procesar los datos correctamente y enfrentar esas dificultades con resolución.

En definitiva todo lo anterior ha contribuido a un desarrollo personal de la autonomía en la toma de decisiones durante las diversas fases de la realización del proyecto y a una familiarización con equipos que todo ingeniero de sonido debe conocer y usar aplicando criterios de eficiencia en la gestión de los recursos.

Anexo 1: Escalas musicales y temperamento

La palabra “escala” se deriva de la palabra latina “scala” y ésta de la griega “σκάλα”. Una escala musical es una sucesión de notas ordenadas ascendente o descendentemente. La mayor parte de las composiciones musicales están basadas en escalas, siendo algunas de las más habituales las de 7 notas (Mayor y menor diatónica, modo dórico, lidio...), las de 12 notas (escala cromática) o la de 5 (pentatónica).

La música occidental divide la octava en 12 partes llamadas semitonos. Todos los semitonos en una octava constituyen la escala cromática (12 notas). Sin embargo, la mayor parte de la música en Occidente se organiza en torno a escalas de 7 notas (divididas en escalas mayores y menores según la relación interválica entre las sucesivas notas y tomando como nombre el de la nota por la que empiezan).

Ejemplo: Si empieza por Do llamaremos a la escala Do (Modo), siendo modo aquel que se desprenda de la colocación de los semitonos en el orden de la escala.

Otras culturas musicales usan escalas diferentes. La escala pentatónica (5 tonos), por ejemplo, es en la que se basa la música tradicional china, si bien también aparece en la música Celta o en la música nativa americana. Las escalas en la música India habitualmente suelen dejarse aparte por la abundancia de intervalos menores al semitono (microtonos). Sin embargo, como apuntó Benade (1976) esta música se basa en líneas generales en una escala de 7 tonos similar a la escala mayor (pudiendo considerar los ornamentos microtonales como un efecto o un tipo de adorno propio del estilo).

Por otro lado, llamamos intervalo a la distancia (diferencia de altura o frecuencia) que separa una nota de otra. Estos intervalos se clasifican en función de los semitonos que contienen, resultando lo siguiente:

Nombre del intervalo	Valor en tonos y semitonos
Unísono / Primera justa	0
Primera aumentada / Semitono cromático	1 semitono
Segunda disminuida	1 semitono
Segunda menor	1 semitono
Segunda mayor	1 tono
Segunda aumentada	1 1/2 tono
Tercera disminuida	1 tono

Tercera menor	1 1/2 tono
Tercera mayor	2 tonos
Tercera aumentada	2 1/2 tono
Cuarta disminuida	2 tonos
Cuarta justa	2 1/2 tonos
Cuarta aumentada (llamada <i>tritono</i>)	3 tonos
Quinta disminuida (llamada <i>falsa quinta</i>)	3 tonos
Quinta justa	3 1/2 tonos
Quinta aumentada	4 tonos
Sexta disminuida	3 1/2 tonos
Sexta menor	4 tonos
Sexta mayor	4 1/2 tonos
Sexta aumentada	5 tonos
Séptima disminuida	4 1/2 tonos
Séptima menor	5 tonos
Séptima mayor	5 1/2 tonos
Séptima aumentada	6 tonos
Octava justa	6 tonos

En cualquier caso hay numerosas formas de construir escalas musicales y ello ha resultado ser un nexo de unión entre matemáticos y músicos desde la Grecia Antigua. A continuación se discutirá la conveniencia de usar para la creación de la Base de Datos el “temperamento igual” frente a la “entonación justa”, a la “escala Pitagórica” y al “temperamento mesotónico”.

1. La escala de la Afinación Justa

La escala de la Afinación Justa (o escala diatónica justa) se basa en la triada mayor, un grupo de tres notas que suenan al oído de forma bastante armónica (por ejemplo DO:MI:SOL). Las notas de esa triada mayor se dividen en dos intervalos: una tercera mayor (DO-MI) y una tercera menor (MI-SOL), de forma que podemos expresar sus respectivas frecuencias como la relación 4:5:6, siendo la relación 4:5 la perteneciente a la tercera mayor y la 5:6 la relativa a la tercera menor.

Ejemplo: Si tenemos cierto sonido con frecuencia x su octava superior tendrá frecuencia $2x$. Con este sistema podemos establecer relaciones aritméticas directas entre la frecuencia de un sonido y su intervalo con otro sonido. Así, si tenemos un $La=440\text{Hz}$, su tercera mayor sería el $DO\#_5$ que siguiendo la relación 4:5 con respecto

al LA_4 tendría 550Hz (resultado de la operación $\frac{440}{4} \cdot 5$) y de la misma forma la tercera menor sobre el $DO\#_5$ tendría 660Hz.

Los intervalos consonantes quedan pues como:

2:1	Octava
3:2	Quinta Perfecta
4:3	Cuarta Perfecta
5:3	Sexta Mayor
5:4	Tercera Mayor
8:5	Sexta menor
6:5	Tercera menor

Estos intervalos son consonantes porque la disonancia surgida de las combinaciones entre los armónicos de ambos tonos es mínima, especialmente en el caso de los también llamados intervalos perfectos (Octava, quinta y cuarta).

Las triadas mayores en una escala mayor aparecen en los acordes de tónica, subdominante y dominante (también llamados acordes I, IV y V, al realizarse sobre la primera, cuarta y quinta notas de la escala). Las frecuencias de las siete notas en la escala diatónica justa pueden ser calculadas una vez conocida la frecuencia de una de ellas y su relación interválica con el resto. Como ejemplo de ello pensemos que si las notas que constituyen la triada mayor (DO-MI-SOL) cumplen la relación 4:5:6, si determinamos que DO=1 (y una octava más hace que DO=2), MI sería igual a $\frac{5}{4}$ y SOL= $\frac{6}{4}=\frac{3}{2}$. Por tanto, si aplicamos esto mismo a la triada sobre la dominante, o V grado sobre la escala de DO, es decir sobre el SOL (SOL-SI-RE) tendremos que SI= $\frac{5}{4} \cdot \frac{3}{2} = \frac{15}{8}$ y RE= $\frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} = \frac{9}{4}$. Desplazando este Re a la misma octava que el DO inicial tendremos que RE= $\frac{9}{4} \cdot \frac{1}{2} = \frac{9}{8}$. Si procedemos de igual forma con la triada sobre la

subdominante (FA-LA-DO) obtenemos que FA= $\frac{2}{1} \cdot \frac{2}{3} = \frac{4}{3}$ y LA= $\frac{2}{1} \cdot \frac{5}{6} = \frac{10}{6} = \frac{5}{3}$. Si

ponemos todo junto obtenemos la relación entre las distintas frecuencias en DO Mayor:

DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI	DO
1	$9/8$	$5/4$	$4/3$	$3/2$	$5/3$	$15/8$	2

Figura 69: Relación de frecuencias en afinación justa

Como vemos, Mi es una tercera mayor sobre DO, FA es una cuarta perfecta sobre DO y Sol una quinta perfecta sobre DO. Si consideramos los intervalos entre las sucesivas notas podemos calcular que de RE a Mi (es tanto como restar a una tercera mayor un tono) = $5/4 / 9/8 = 10/9$ (Tono pequeño), de MI a FA = $4/3 / 5/4 = 16/15$ (semitono) y de FA a SOL = $3/2 / 4/3 = 9/8$ (Tono grande).

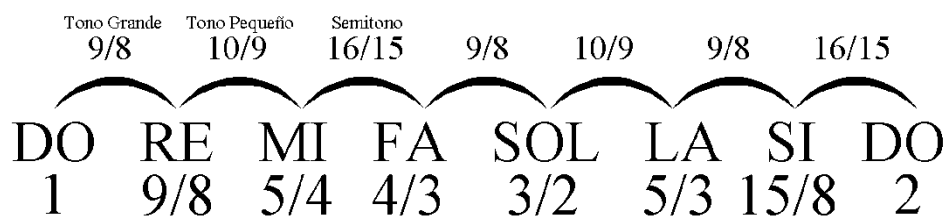


Figura 70: Distribución de tonos grandes, tonos pequeños y semitonos

Además de las tres triadas mayores, la escala justa tiene dos triadas menores (MI-SOL-SI y LA-DO-MI) cuya relación no es 4:5:6 sino 10:12:15. Al igual que las mayores estas triadas están constituidas por una tercera mayor y una menor, pero cambiadas de orden de forma que el intervalo inferior es una tercera menor ($12/10 = 6/5$) mientras que el intervalo superior es una tercera mayor ($15/12 = 5/4$).

Hasta este momento todo está en la “justa entonación”. Sin embargo, se producen pequeños errores en el modelo:

- a) Si examinamos las quintas en la escala Justa, cinco son perfectas, pero RE-LA es imperfecta (no cumple la relación 3:2)
- b) Lo mismo ocurre con las cuartas: cinco son perfectas, pero LA-RE no lo es.
- c) Además aparecen algunas dificultades cuando incorporamos sostenidos y bemoles: para que MI-SOL# sea una tercera mayor necesitamos que SOL# sea $5/4 \times 5/4 = 25/16$, pero si también queremos que de LAb a DO sea otra tercera mayor necesitaríamos que LAb fuese $2: 5/4 = 8/5$. Es decir, resulta que LAb debe ser un poco más agudo que SOL# para seguir siendo justos en ambos intervalos.

La Escala Justa no se ha podido implementar por estos problemas y por la imposibilidad de reafinar los instrumentos al cambiar de tonalidad.

2. La escala Pitagórica

La escala Pitagórica (citada en el *Timeo*, uno de los diálogos de Platón) permite obtener el mayor número posible de cuartas y quintas perfectas. Para lograrlo, los otros intervalos (como terceras mayores y menores y sextas) deben variar su afinación respecto a la justa entonación.

Para construir el modelo de escala hay que considerar dos factores:

- a) Una octava es una cuarta más una quinta, luego si a partir de cierta nota subimos una cuarta o bajamos una quinta obtenemos la misma nota (en distinta octava) y viceversa.

Ejemplo: Si partimos de DO y subimos una cuarta obtenemos la nota FA. Si descendemos una quinta desde el mismo DO obtenemos de nuevo el FA (aunque en la octava inferior).

- b) Todas las notas de la escala (bemoles y sostenidos incluidos) pueden encontrarse si subimos o bajamos 12 quintas o 12 cuartas sucesivamente. Esto puede representarse a través del “círculo de quintas” que muestra la relación entre las notas de la escala por el número de quintas que las separan, pero sin tener en cuenta la altura real de estas notas (cuántas octavas las separan).

Para determinar las notas de la escala de Do Mayor debemos bajar una quinta (o subir una cuarta) para hallar FA a través de la relación de cuarta perfecta (4:3) y después subir 5 quintas para hallar en cada paso las otras 5 notas. Así SOL= $3/2$, RE= $3/2 \times 3/2=9/4$, LA= $(3/2)^3=27/8$, MI= $81/16$ y SI= $243/32$. Ordenándolo tenemos:

DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI	DO
1	$9/8$	$81/64$	$4/3$	$3/2$	$27/16$	$243/128$	2

Figura 72: Relación de frecuencias en la escala Pitagórica

Nota: Si omitimos las dos últimas quintas el MI y el SI no aparecerían y obtendríamos la escala pentatónica DO RE FA SOL LA

Si comprobamos ahora los intervalos entre las sucesivas notas vemos que en realidad solo aparecen 2 distancias distintas: tono (que coincide con el tono grande de la escala justa, $9/8$) y semitono (un 20% menor que el de la escala justa, llamado semitono diatónico, y un 10% menor que la mitad de un tono pitagórico).

	<small>Tono Pitagórico</small> $9/8$		$9/8$		<small>Semitono diatónico</small> $256/243$		$9/8$		$9/8$		$9/8$		$256/243$
DO		RE		MI		FA		SOL		LA		SI	DO
1		$9/8$		$81/64$		$4/3$		$3/2$		$27/16$		$243/128$	2

Figura 73: Distribución de intervalos en la escala Pitagórica

La gran ventaja de la escala Pitagórica es el énfasis en quintas y cuartas perfectas. Su gran desventaja, sin embargo, la pobre afinación de las terceras ya que las terceras mayores superan la afinación justa en 1.0125 (la comma sintónica, intervalo de razón $81/80$ que es la diferencia entre el ditono pitagórico y la tercera mayor pura del sistema justo) y las menores son justamente esa relación más pequeñas que las de la afinación justa. A nivel práctico se ha comprobado que algunos músicos prefieren auditivamente y priorizan en sus interpretaciones esas quintas y cuartas perfectas frente a las terceras.

Nota: Para comparar tonos es preferible usar, frente a las relaciones interválicas, una medida absoluta de su altura, que nos aporte información más significativa y facilite la comparación entre distintas escalas. Para ello usamos los cents. Un cent es 1/100 de un

semitono en el temperamento igual (que veremos más adelante) de forma que una octava tiene 1200 cents y una quinta temperada 700 cents. Expresado en términos de su relación interválica un cent sería igual a $2^{1/1200} = 1.000578$. De esta forma, al usar los cents, la comparación entre distintas escalas resulta más entendible.

	Intervalos justos		Afinación pitagórica	
	Razón	Cents	Razón	Cents
Octava	2/1	1200	2/1	1200
Quinta	3/2	702	3/2	702
Cuarta	4/3	498	4/3	498
Tercera Mayor	5/4	386	81/64	408
Tercera menor	6/5	316	32/27	294
Semitono Diatónico	16/15	112	256/243	90
Semitono Cromático	25/24	70	2187/2048	114
Comma	81/80	22	531441/524288	24

3. Temperamento

Como en la escala pitagórica las terceras están “desafinadas” se hizo necesario introducir numerosas modificaciones en su planteamiento original con el fin de llevarla a la práctica. Surgen así distintos intentos de aproximarse a un modelo de afinación que como hemos visto presentaba ciertas características que lo hacían complejo. En adelante no hablaremos de afinación, sino de temperamento, ya que los sucesivos sistemas que se desarrollan asumen la imposibilidad de lograr un sistema que en la práctica se acerque a los intervalos que proporciona la serie natural de los armónicos y proponen distribuir los errores (comas) entre distintas notas para solucionarlo. En este sentido podemos clasificar estos temperamentos en regulares (todas las quintas, excepto quizás una, del mismo tamaño) e irregulares (dos o más quintas de diferente tamaño a las demás).

- a) El temperamento de Ramos de Pareja (irregular): En el Renacimiento, Bartolomé Ramos de Pareja hizo el primer intento teórico de alcanzar una afinación justa (aquella que intenta conseguir quintas, terceras mayores y menores justas), algo inalcanzable de modo completo. Partiendo de una nota, DO por ejemplo, afina el SOL por una quinta justa ascendente y FA por una descendente. A continuación se afinan las terceras mayores justas FA-LA, DO-

MI y SOL-SI. Desde LA, bajando una quinta justa se llega a RE, con lo que tenemos todas las notas. Para conseguir la escala cromática el procedimiento sería el mismo pero partiendo del SI obtendríamos los sostenidos y partiendo del FA los bemoles. De esta forma una de las quintas se reduce en la coma sintónica (22 cents, que son la diferencia entre una tercera pitagórica, con 408 cents, y una tercera justa, con 386 cents) y consecuentemente la quinta del lobo se modifica (24 cents- 22 cents= 2 cents) recibiendo ahora el nombre de Schisma.

- b) Temperamentos mesotónicos: En el temperamento mesotónico los tonos son iguales, así que la tercera mayor (diferente en cada caso) se divide en dos tonos iguales. En todos los temperamentos mesotónicos los semitonos diatónicos son más grandes que el cromático (es decir, por ejemplo MIB es más agudo que RE#).

Como veremos a continuación, existen distintos sistemas que siguen esta filosofía: Zarlino describe los temperamentos de 2/7 de coma sintónica (1558), Pietro Aaron el de 1/4 de coma sintónica, Salinas el de 1/3 de coma sintónica, Sauveur el de 1/5... Ramos de Pareja, en su libro *Música practica* indicaba que el temperamento era habitual entre los constructores de instrumentos, sin especificar qué tipo de temperamento en concreto. El más utilizado en el Renacimiento probablemente es el de 1/4 de coma sintónica, llamado así porque la diferencia entre la quinta justa y la templada (modificada por el procedimiento descrito anteriormente) es de 1/4 de coma con el objetivo de obtener más terceras mayores justas. Dado que en el círculo de quintas cuatro de ellas dan la 3ª mayor pitagórica (81/64), que es mayor que la justa (5/4) en una coma sintónica (81/80), el procedimiento para construir este sistema pasa por la reducción de cada quinta en 1/4 de coma. Esta misma reducción se realiza con las demás quintas, excepto la del lobo, que será del tamaño necesario para que, junto con las 11 quintas templadas, se completen las 7 octavas.

Por otro lado ya en el Barroco surgen nuevos temperamentos cuyo objetivo es eliminar la quinta del lobo (y hacer con ello que por tanto SOL# sea igual a LAB) para facilitar la modulación a todas las tonalidades. En Alemania Werckmeister propone repartir la coma pitagórica entre cuatro quintas, mientras que Valotti reduce una coma pitagórica entre 6 quintas. Otros autores

Grabación de una base de datos de instrumentos musicales de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad

como Lehmann o Kirnberger proponen sistemas similares, pero en cualquier caso el objetivo es el mismo.

	Factor de corrección	Quinta	Tercera Mayor	Tercera menor
Aarón	1/4 c.s.	-1/4 c.s	0	-1/4 c.s.
Salinas	1/3 c.s.	-1/3 c.s.	-1/3 c.s.	0
Zarlino	2/7 c.s.	-2/7 c.s.	-1/7 c.s.	-1/7 c.s.
Sauveur	1/5 c.s.	-1/5 c.s.	+1/5 c.s.	-2/5 c.s.
Corte francesa	1/6 c.s	-1/6 c.s.	+2/6 c.s.	-3/6 c.s.
Temperamento igual	1/11 c.s.	<i>Error distribuido uniformemente</i>		
Afinación pitagórica	1/∞ = 0			

Factor de corrección (fracción de comma sintónica) de cada temperamento, así como intervalo sobre el que se aplica

Si comparamos en cents los distintos sistemas tenemos:

Nota	Pitagórica	Ramos	1/4 de comma	1/6 de comma	Igual	Valotti ⁴
DO	0	0	0	0	0	0
DO#	114	92	76	89	100	94
RE	204	182	193	197	200	196
MI ^b	294	294	310	305	300	298
MI	408	386	386	393	400	392
FA	498	498	503	502	500	502
FA#	612	590	579	590	600	592
SOL	702	702	697	698	700	698
SOL#	816	792 (LAb)	773	787	800	796
LA	906	884	890	895	900	894
SI ^b	996	996	1007	1003	1000	1000
SI	1110	1088	1083	1092	1100	1090
DO	1200	1200	1200	1200	1200	1200

Comparación en cents de los distintos modelos. Gracias a los cents podemos comparar de una forma absoluta su altura.

⁴ El sistema de Valotti (s.XVIII), se encuadra dentro de los temperamentos irregulares, se caracterizan por ser circulares y tener las 3^a mayores entre notas naturales temperadas levemente. En el caso del de Valotti, se consigue afinando por quintas justas SI-FA#-DO#-SOL#-MI^b-SI^b-FA, tomando a continuación el RE de modo que las terceras SI^b-RE y RE-FA# sean iguales y templando las restantes quintas escogiendo DO, SOL, LA y MI de modo que las quintas FA-DO-SOL-RE-LA-MI-SI sean todas del mismo tamaño.

El temperamento igual

El temperamento más conveniente de todos es el temperamento igual, que iguala el tamaño de todos los semitonos. Como hemos visto, una serie de 12 quintas excede a 7 octavas en una comma pitagórica. Si hacemos más pequeñas todas las quintas en un doceavo de comma (2 cents) se produce el unísono, es decir, se cierra el círculo de quintas y al ser todas ellas iguales podemos hablar de temperamento igual. La escala del temperamento igual (también llamada escala temperada) consiste en 5 tonos y 2 semitonos, siendo los tonos el doble de grandes que los semitonos. De esta forma, la octava está formada de 12 semitonos.

Para determinar la relación de este semitono en la escala basta con conocer que el semitono representa la doceava parte de una octava. Para saber el valor de un semitono en el temperamento igual basta con calcular $2^{1/12} = 1.05946$. Un tono sería por tanto $(1.05946)^2 = 1.12246$, una quinta sería 1.498 (muy cercano a los 1.500 de la quinta perfecta) y una cuarta 1.335 (también muy similar a los 1.333 de la cuarta perfecta). En el caso de las terceras, la mayor sería 1.260 y la menor 1.189, lejos de los 1.250 y 1.200 que respectivamente tienen las terceras mayor y menor perfectas, pero no tanto como lo estaban en la escala pitagórica.

Todos los problemas que tenía la afinación justa desaparecen al dividirse la octava exactamente en 3 terceras mayores o en cuatro menores. Esto supone que son terceras muy temperadas: 14 cents más que la justa en el caso de la tercera mayor y 16 cents menos que la justa la tercera menor.

Este procedimiento se empleó durante el siglo XVI en los instrumentos de trastes y fue Francisco de Salinas el primero que lo explicó claramente en 1577. Curiosamente J. S. Bach es considerado por muchos como el padre de este temperamento, gracias a la popularidad de su obra “El clave bien temperado”, si bien los indicios apuntan a que pudo ser escrita para un temperamento circular que no necesariamente fuera el igual. La revolución que suponía este sistema que hacía que todas las tonalidades fueran equivalentes chocó frontalmente con los sistemas establecidos hasta el momento, donde cada tonalidad tenía asociadas unas características subjetivas según su impacto sonoro (se hablaba de tonalidades con color melancólico, oscuro, claro...) y ese rechazo supuso de facto que este sistema conviviera con otros hasta mediados del siglo XIX.

*Grabación de una base de datos de instrumentos musicales
de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad*

Intervalo	Temperada		Justa		Pitagórica	
	Razón	Cents	Razón	Cents	Razón	Cents
Octava	2.000	1200	2/1=2.000	1200	2.000	1200
Quinta	1.498	700	3/2=1.500	702	1.500	702
Cuarta	1.335	500	4/3=1.333	498	1.333	498
Tercera Mayor	1.260	400	5/4=1.250	386	1.265	408
Tercera Menor	1.189	300	6/5=1.200	316	1.184	294
Sexta Mayor	1.682	900	5/3=1.667	884	1.687	906
Sexta Menor	1.587	800	8/5=1.600	814	1.580	792

Comparación de los intervalos principales (Rossing, 1990)

DO ₀	16.352
DO# ₀ / REb ₀	17.324
RE ₀	18.354
RE# ₀ / MIb ₀	19.445
MI ₀	20.602
FA ₀	21.827
FA# ₀ / SOLb ₀	23.125
SOL ₀	24.500
SOL# ₀ / LAb ₀	25.957
LA ₀	27.500
LA# ₀ / Sib ₀	29.135
SI ₀	30.868

DO ₁	32.703
DO# ₁ / REb ₁	14.648
RE ₁	36.708
RE# ₁ / MIb ₁	38.891
MI ₁	41.203
FA ₁	43.654
FA# ₁ / SOLb ₁	46.249
SOL ₁	48.999
SOL# ₁ / LAb ₁	51.913
LA ₁	55.000
LA# ₁ / Sib ₁	58.270
SI ₁	61.735

DO ₂	62.406
DO# ₂ / REb ₂	69.296
RE ₂	73.416
RE# ₂ / MIb ₂	77.782
MI ₂	82.407
FA ₂	87.307
FA# ₂ / SOLb ₂	92.499
SOL ₂	97.999
SOL# ₂ / LAb ₂	103.83
LA ₂	110.00
LA# ₂ / Sib ₂	116.54
SI ₂	123.47

DO ₃	130.81
DO# ₃ / REb ₃	138.59
RE ₃	146.83
RE# ₃ / MIb ₃	155.56
MI ₃	164.81
FA ₃	174.61
FA# ₃ / SOLb ₃	185.00
SOL ₃	196.00
SOL# ₃ / LAb ₃	207.65
LA ₃	220.00
LA# ₃ / Sib ₃	233.08
SI ₃	246.94

DO ₄	261.63
DO# ₄ / REb ₄	277.18
RE ₄	293.66
RE# ₄ / MIb ₄	311.13
MI ₄	329.63
FA ₄	349.23
FA# ₄ / SOLb ₄	369.99
SOL ₄	392.00
SOL# ₄ / LAb ₄	415.30
LA ₄	440.00
LA# ₄ / Sib ₄	466.16
SI ₄	493.88

DO ₅	523.25
DO# ₅ / REb ₅	554.37
RE ₅	587.33
RE# ₅ / MIb ₅	622.25
MI ₅	659.26
FA ₅	698.46
FA# ₅ / SOLb ₅	739.99
SOL ₅	783.99
SOL# ₅ / LAb ₅	830.61
LA ₅	880.00
LA# ₅ / Sib ₅	932.33
SI ₅	987.77

DO ₆	1046.5
DO# ₆ / REb ₆	1108.7
RE ₆	1174.7
RE# ₆ / MIb ₆	1244.5
MI ₆	1318.5
FA ₆	1396.9
FA# ₆ / SOLb ₆	1480.0
SOL ₆	1568.0
SOL# ₆ / LAb ₆	1661.2
LA ₆	1760.0
LA# ₆ / Sib ₆	1864.7
SI ₆	1975.5

DO ₇	2093.0
DO# ₇ / REb ₇	2217.5
RE ₇	2349.3
RE# ₇ / MIb ₇	2489.0
MI ₇	2637.0
FA ₇	2793.8
FA# ₇ / SOLb ₇	2960.0
SOL ₇	3136.0
SOL# ₇ / LAb ₇	3322.4
LA ₇	3520.0
LA# ₇ / Sib ₇	3729.3
SI ₇	3951.1

DO ₈	4186.0
DO# ₈ / REb ₈	4434.9
RE ₈	4698.6
RE# ₈ / MIb ₈	4978.0
MI ₈	5274.0
FA ₈	5587.7
FA# ₈ / SOLb ₈	5919.9
SOL ₈	6271.9
SOL# ₈ / LAb ₈	6644.9
LA ₈	7040.0
LA# ₈ / Sib ₈	7458.6
SI ₈	7902.1

Frecuencias de las notas de nueve octavas en el temperamento igual (escala temperada), tomando como referencia el LA4 = 440 Hz.

Nota	Temperada	Justa		Pitagórica	
	Cents	Razón	Cents	Razón	Cents
DO	0	1.000	0	1.000	0
DO#	100	1.042	71	1.068	114
REb	100	1.067	112	1.054	90
RE	200	1.125	204	1.125	204
RE#	300	1.172	275	1.201	318
MIb	300	1.200	316	1.185	294
MI	400	1.250	386	1.266	408
FAb	400	1.280	427	1.249	384
MI#	500	1.302	457	1.352	522
FA	500	1.333	498	1.333	498
FA#	600	1.406	590	1.424	612
SOLb	600	1.440	631	1.405	588
SOL	700	1.500	702	1.500	702
SOL#	800	1.563	773	1.602	816
LAB	800	1.600	814	1.580	792
LA	900	1.667	884	1.688	903
LA#	1000	1.758	977	1.802	1020
SIb	1000	1.800	1012	1.778	996
SI	1100	1.875	1088	1.898	1110
DOb	1100	1.920	1129	1.873	1086
SI#	1200	1.953	1159	2.027	1224
DO	1200	2.000	1200	2.000	1200

***Comparación de la afinación de una octava (tomando como referencia el DO inicial)
con los temperamentos y afinaciones presentadas***

La afinación de la mayoría de instrumentos está basada en el temperamento igual. La afinación exacta de los instrumentos de tecla depende sin embargo de lo cerca que están en ellos los sobretonos armónicos. Los órganos, que tienen sobretonos armónicos, deben afinarse siguiendo el temperamento igual. Para afinar los pianos debe tenerse en cuenta el comportamiento no armónico de las cuerdas, es decir, considerando los sobretonos no armónicos (múltiplos no enteros de la frecuencia fundamental).

4. Entonación

Más allá de la teoría sobre los distintos sistemas de afinación hay que señalar que en la puesta en práctica de estos sistemas existe un factor de error difícilmente cuantificable, según el cual los instrumentistas tienden a modificar la frecuencia de las notas dinámicamente atendiendo a multitud de factores. Entre estos factores destacan cuestiones psicoacústicas, pero también mecánicas: en los instrumentos de viento la

disposición de los orificios y de las llaves está dispuesta siguiendo la serie de armónicos naturales, por lo que las desviaciones asociadas a cada temperamento se producen con recursos técnicos como aumentar la velocidad del flujo de aire, la presión sobre la embocadura, entre otros; en los de cuerda frotada la variación depende de la colocación del dedo sobre la cuerda, de la presión y ángulo del dedo sobre la misma, pero también de la presión ejercida con el arco. Aunque no son fruto de nuestro estudio, instrumentos como el piano, no se ven afectados por este fenómeno como hemos visto, ya que cada cuerda puede afinarse individualmente y existe por tanto (gracias a sus características organológicas y mecánicas) una afinación precisa que permite asegurar la fidelidad en la puesta en práctica del sistema convenido, sin que éste dependa del error que aporta el oído del músico.

Salvando pues esta excepción de los instrumentos de afinación única y estable, si se realiza una observación directa sobre los intervalos tocados por un músico durante distintas interpretaciones (incluso de la misma obra) podemos apreciar varias variaciones sustanciales en cuanto a su entonación. Es decir, al producir los sonidos con los instrumentos se producirán desviaciones locales en cada nota que en ocasiones supondrán la adición de algunos cents y en otros casos su sustracción. Curiosamente, estas variaciones suelen ser mayores que las diferencias motivadas por el uso de las distintas escalas. Según Ward (1970), el estudio de distintas interpretaciones muestra que las desviaciones que se producen sobre el temperamento igual tienden a producirse en la dirección de los intervalos de la escala Pitagórica.

Anexo 2: Especificaciones técnicas de los equipos

Nota: La información completa sobre las especificaciones técnicas de los equipos utilizados está disponible tanto en el CD que acompaña a este texto como en la dirección

Product Data

The Falcon™ Range 1/2" Microphones — Types 4188 to 4193

USES:

- For sound level meters
- In noise measurement systems satisfying IEC and ANSI standards
- Transport-noise measurements
- Architectural acoustics
- Electro-acoustics

FEATURES:

- Choice of free or pressure-field frequency response

- Choice of pre- or external polarization
- Wide dynamic ranges typically from 14.2 dB(A) to 146 dB and 20 dB(A) to 162 dB (3% distortion limit)
- Very wide operating temperature range and low ambient-temperature coefficient
- Individual calibration charts
- Individual data disks for Types 4189 to 4193 for use with Microsoft® Windows™
- Withstand IEC 68-2-32 1 m drop test (<0.1 dB sensitivity change) and industrial environments
- Falcon™ Range product with a three-year guarantee

The Falcon™ Range microphones are six new high-quality, 1/2" diameter precision condenser microphones. They cover requirements for free-, random- and pressure-field measurements. They are the latest in Brüel & Kjær's range of precision microphones for accurate and reliable electro-acoustic, IEC or ANSI sound measurements. Their corrosion resistance has been improved and their temperature range has been extended. They are the result of a new and robust design which ensures greater reliability and accuracy.

Introduction

The six 1/2" condenser microphones of Brüel & Kjær's Falcon™ Range cover, between them, a very wide range of needs and applications.

They are the culmination of 40 years of leadership in top quality condenser microphones for precision acoustic measurements. These Falcon™ Range microphones will meet your demands whether they be in complying with ANSI or IEC standards or in acoustic research.

Robust and Stable

They are robust and suffer less than a ±0.1 dB change in sensitivity when

Microsoft is a registered trademark and Windows is a trademark of Microsoft Corporation



subjected to an IEC 68-2-32 1 m drop test onto a hard wooden block. They are made of carefully selected materials and alloys to ensure excellent stability and are virtually unaffected by industrial and similarly hostile environments. Furthermore, each Falcon™ Range microphone comes with an extended guarantee period of three years.

During manufacture, each microphone is artificially aged at a high temperature to ensure good long-term stability.

No ecologically damaging materials are used in the manufacture and packaging of these microphones. The

Types 4189 to 4193 are packaged as shown above.

Selecting a Microphone for Your Needs

To make sure you select the right microphone to match your needs, you will probably have to consider one or more of the following:

- Standards (IEC or ANSI)
- Free- or pressure-field response
- Frequency range
- Polarization (0V or 200V)

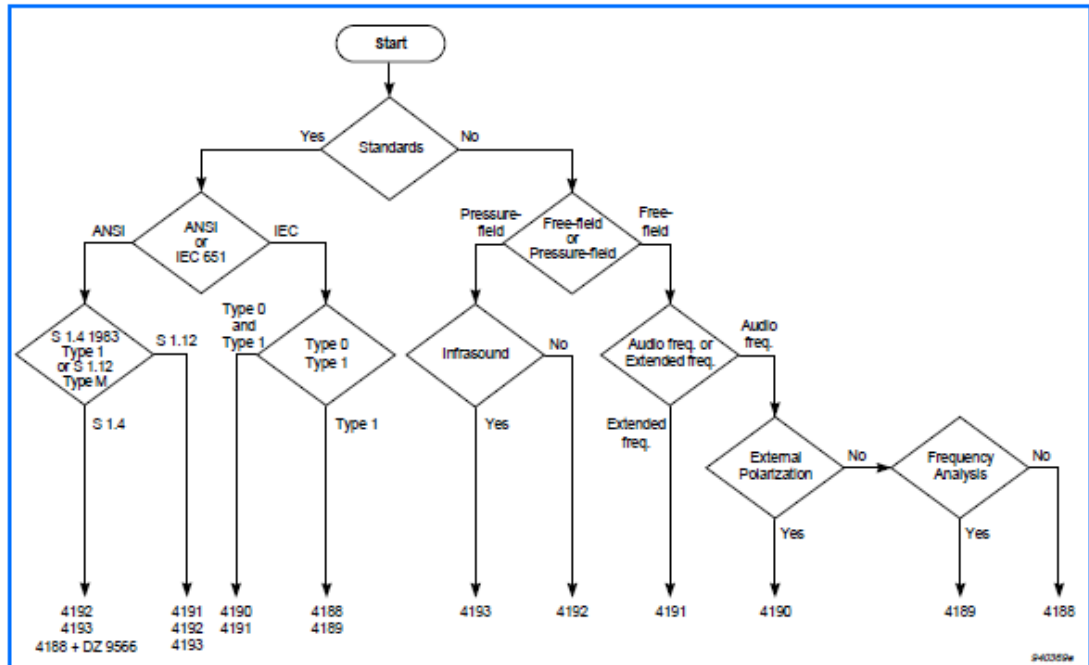


Fig. 1 Flow chart to help you choose the right microphone from the Falcon™ Range for your needs

These factors, together with the flow chart shown in Fig. 1, will help you to make the right decision.

Measurement Standards

You can use these microphones in noise measurement systems satisfying either ANSI or IEC standards (or their local equivalents). The microphones use 50% to 70% of the tolerances allowed by these standards.

Frequency Ranges

All six microphones cover the audio frequency range. If, however, you want to measure at frequencies down to 0.05 Hz (for infrasound measurements), choose the Type 4193, or at frequencies up to 40 kHz (for harmonic distortion measurements on loudspeakers) choose the Type 4191.

Polarization/Preamplifier

Prepolarized microphones are required on certain portable sound level meters (which do not provide external polarization) and are a good choice in tough and humid environments. Externally polarized microphones are more stable even at high temperatures. All six can be used with the 1/2" Microphone Preamplifier Type 2669. The two prepolarized microphones can also be used with the Preamplifier Type 2671.

Free-field Response or Pressure-field Response

The four free-field response microphones (Types 4188 to 4191) cover specific IEC requirements and should be used in sound fields where reflections are negligible. The two pressure-field response microphones (Types 4192 and 4193) should be used for measurements in acoustic couplers. They also cover specific ANSI requirements and can be used in diffuse sound fields.

As Replacements for Earlier Brüel & Kjær Microphones

Table 1 shows what earlier Brüel & Kjær microphones can be replaced (type approval permitting) by Falcon™ Range microphones.

Earlier Microphones	Falcon™ Range Mics.
4155	4189
4165	4190
4133/4149	4191
4134	4192
4147	4193
4166	(4188/4190/4192)*
4176	(4188/4189)*

Table 1 Replacement check for earlier Brüel & Kjær microphones. The * means these are not direct replacements

Prepolarized Free-field 1/2" Microphones Types 4188 and 4189

These are prepolarized, free-field microphones which differ mainly in frequency range and sensitivity. Both can be used for measurements in accordance with IEC 651 Type 1. The Type 4188 is also suited to ANSI S 1.4-1983 Type 1 measurements when fitted with the Random-incidence Corrector DZ 9566 supplied. If your measurements require only frequency weighting (A or C), the Type 4188 is the more economic choice, and is also more robust. The Type 4189 has a greater sensitivity and frequency range and is well suited to general sound measurements requiring frequency analysis.

They offer some significant advantages when used with portable, low-power instruments not designed to produce a polarization voltage. Another advantage is greater reliability of the associated preamplifier under humid and polluted conditions. These factors make these prepolarized condenser microphones particularly suitable for field measurements, both outdoors and in industrial environments.

2

Microphone	Response	Sensitivity	Frequency Range	Polarization	Main Standards
Type 4188	Free- and diffuse-fields	31.6 mV/Pa	8 Hz to 12.5 kHz	0V (prepolarized)	IEC 651 Type 1, ANSI S1.4 1983
Microphone	Thermal Noise	LLF (-3 dB)	3% Distortion Limit	Temperature Coeff.	Max. Operating Temp.
Type 4188	14.2 dB (A), 14.5 dB (Lin)	1 Hz to 5 Hz	146 dB	+0.005 dB/°C	125 °C (257 °F) (70 °C (158 °F) with corrector)

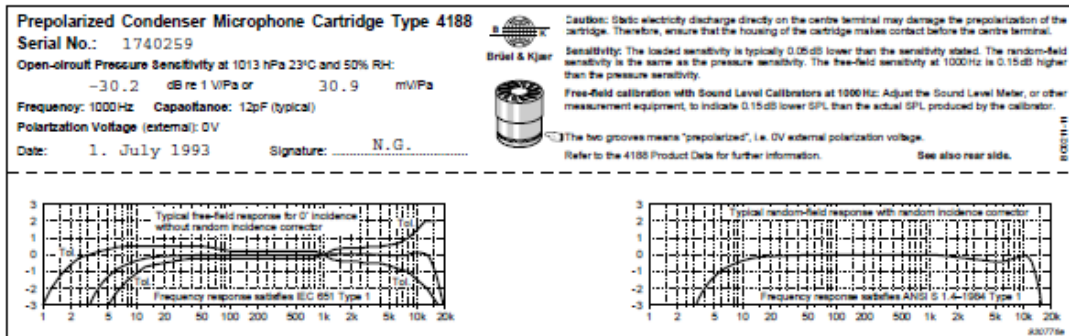


Fig.2 An example of a Calibration Chart (front and rear sides) supplied with a Prepolarized Condenser Microphone Type 4188

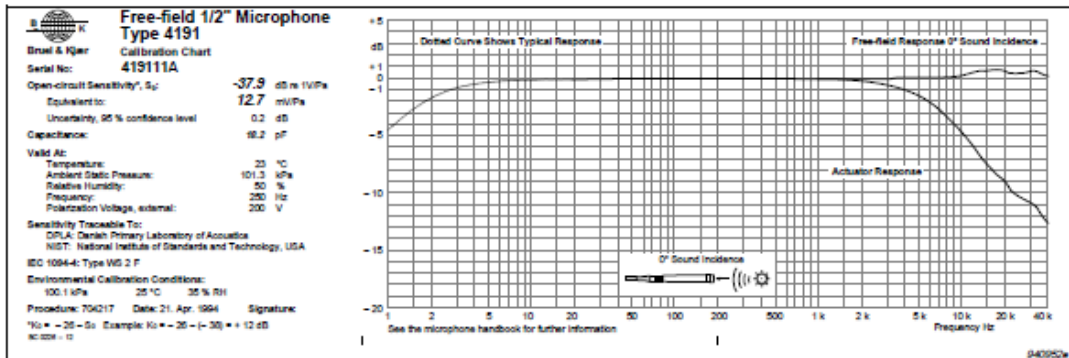


Fig.3 An example of a Calibration Chart supplied with a Free-field 1/2" Microphone Type 4191

Microphone Specifications

The design and construction of each microphone results in a reliable transducer of high sensitivity and low temperature dependence. All data given for each microphone in this data sheet are for open-circuit conditions, which means that the microphone looks into an infinitely high impedance. Table 3 summarises the most important specifications for the Falcon™ Range microphones. In practice, however, a microphone is used with a preamplifier which slightly influences the given responses. When you use a Brüel & Kjær preamplifier (for example the Type 2669), the input impedance is very high (high resistance, low capacitance), and the loading on the microphone cartridge is generally insignificant.

More information on these microphones and other Falcon™ Range products is given in the optionally available Microphone Handbook BA 5105.

Individual Calibration Chart

The calibration chart delivered with each microphone contains all the in-

dividual parameters required for correct use of the microphone.

Typical frequency response curves are given for the Type 4188 as shown in Fig.2. Individual frequency response curves are given for the other microphones. See the example shown in Fig.3 for a Type 4191.

For free-field microphones, the 0° incidence free-field response is obtained by adding the 0° incidence free-field correction to the electrostatic actuator response. If required, you can use an electrostatic actuator to recalibrate the frequency response of all these microphones.

For general routine calibration you can check the sensitivity at 1 kHz with the Sound Level Calibrator Type 4231, or at 250 Hz with the Pistonphone Type 4228. For a thorough calibration the Multifunction Acoustic Calibrator Type 4226 allows you to measure both sensitivity and frequency response. Separate data sheets are available for all three of these products.

Charge-injection Calibration

This is a patented feature of Brüel & Kjær's 1/2" Microphone

Preamplifier Type 2669. It allows you to verify the condition of the microphone as well as the preamplifier and cable. This means remote calibration as well as fault detection in the entire measurement set up including the microphone.

Microphone-data Disk

Apart from Type 4188, each microphone is supplied with a 3 1/2" microphone-data disk. This disk carries all individual calibration data as well as free-field, random-incidence and pressure-field corrections in comma-separated ASCII text files.

The disk can be fully exploited if you have a suitable drive on a PC loaded with Microsoft® Windows™.

Frequency responses (or corrections) are displayed in both graphical and tabular form. The tabular data can be printed out and stored in new files for further use. They can also be accessed by a suitable spreadsheet for further processing.

Help in the form of hypertext is included throughout to guide you.

Specifications 4188

OPEN-CIRCUIT SENSITIVITY (1000 Hz):
-30 dB +2 dB re 1 V/Pa, 31.6 mV/Pa*

POLARIZATION VOLTAGE (external): 0 V

FREQUENCY RESPONSE:
0° Incidence free-field response:
±1 dB, 12.5 Hz to 8 kHz
±2 dB, 8 Hz to 12.5 kHz

In accordance with IEC 651, Type 1 and ANSI S1.4 - 1983

LOWER LIMITING FREQUENCY (-3 dB):
1 Hz to 5 Hz (vent exposed to sound)

PRESSURE EQUALIZATION VENT:
Rear vented

DIAPHRAGM RESONANCE FREQUENCY:
9 kHz (90° phase shift)

CAPACITANCE (POLARIZED, 1000 Hz): 12 pF

EQUIVALENT AIR VOLUME (101.3 kPa):
65 mm³

CALIBRATOR LOAD VOLUME (250 Hz):
208 mm³

PISTONPHONE TYPE 4228 CORRECTION (with DP 0776): +0.02 dB

CARTRIDGE THERMAL NOISE:
14.2 dB (A), 14.5 dB (Lin.)

* Individually calibrated

UPPER LIMIT OF DYNAMIC RANGE (3% distortion): >146 dB SPL

MAXIMUM SOUND PRESSURE LEVEL:
157 dB (peak)

Environmental

OPERATING TEMPERATURE RANGE:
-30 to +125°C (-22 to +257°F)
Max. 70°C (158°F) when fitted with Random-Incidence Corrector DZ 9566

OPERATING HUMIDITY RANGE:
0 to 100% RH (without condensation)

STORAGE TEMPERATURE:
-30 to +70°C (-22 to +158°F)

Data Disk: 5 to 50°C (41 to +122°F)

TEMPERATURE COEFFICIENT (250 Hz):
+0.005 dB/°C (for the range -10 to +50°C (14 to +122°F))

PRESSURE COEFFICIENT (250 Hz):
-0.021 dB/kPa

INFLUENCE OF HUMIDITY: <0.1 dB/100%RH

VIBRATION SENSITIVITY (<1000 Hz):
63.5 dB equivalent SPL for 1 m/s² axial acceleration

MAGNETIC FIELD SENSITIVITY:
7 dB SPL for 80 A/m, 50 Hz field

ESTIMATED LONG-TERM STABILITY:
>1000 years/dB (dry air at 20°C (68°F))
>10 hours/dB (dry air at 125°C (257°F))
>40 years/dB (air at 20°C (68°F), 90% RH)
>6 months/dB (air at 50°C (122°F), 90% RH)

Dimensions

Diameter: 13.2 mm (0.52") (with grid)
12.7 mm (0.50") (cartridge housing)
14.35 mm (0.56") (with DZ 9566)

Height: 14.9 mm (0.59") (with grid)
14.0 mm (0.55") (without grid)
16.7 mm (0.66") (with DZ 9566)

Thread for preamplifier mounting:
11.7 mm - 60 UNS

Note: All values are typical at 23°C (73.4°F) 101.3 kPa and 50% RH, unless measurement uncertainty or tolerance field is specified. All uncertainty values are specified at 2σ (i.e. expanded uncertainty using a coverage factor of 2)



O2R 96

DIGITAL MIXING CONSOLE

Manual de Instrucciones



*Grabación de una base de datos de instrumentos musicales
de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad*

Número de memorias de escena		99
Frecuencia de muestreo	Interna	44.1 kHz, 48 kHz, 88.2 kHz, 96 kHz
	Externa	Frecuencia normal: 44.1 kHz-10% a 48 kHz+6% Frecuencia doble: 88.2 kHz-10% a 96 kHz+6%
Delay de señal		Menos de 2,0 ms CH INPUT a STEREO OUT (fs=48 kHz) Menos de 1,1 ms CH INPUT a STEREO OUT (fs=96 kHz)
Deslizador		100 mm motorizado con sensibilidad al tacto x 25
Resolución del deslizador		Deslizadores de entrada de +10 a -96, -∞ dB (256 pasos/100 mm) Deslizadores maestros de 0 a -130, -∞ dB (256 pasos/100 mm), deslizador estéreo
Distorsión armónica total¹ (CH INPUT a STEREO OUT) (Gain de entrada=Mín.)	fs=48 kHz	Menos de 0,05% de 20 Hz a 20 kHz @ +14 dB en 600 Ω Menos de 0,01% 1 kHz @ +18 dB en 600 Ω
	fs=96 kHz	Menos de 0,05% de 20 Hz a 40 kHz @ +14 dB en 600 Ω Menos de 0,01% 1 kHz @ +18 dB en 600 Ω
Respuesta de frecuencia (CH INPUT a STEREO OUT)		20 Hz-20 kHz, 0.5, -1.5 dB @ +4 dB en 600 Ω (fs=48 kHz) 20 Hz-40 kHz, 0.5, -1.5 dB @ +4 dB en 600 Ω (fs=96 kHz)
Gama dinámica (nivel máximo a nivel de ruido)		110 dB tipo. Convertidor de DA (STEREO OUT) 105 dB tipo. AD+DA (en STEREO OUT) @ fs=48 kHz 105 dB tipo. AD+DA (en STEREO OUT) @ fs=96 kHz
Murmulo y ruido² (20 Hz-20 kHz) Rs=150 Ω Gain de entrada=Máx. Pad de entrada=0 dB		-128 Ruido de entrada equivalente en dB -92 Ruido de salida residual dB. STEREO OUT (STEREO OUT desactivado) -92 dB (96 dB S/N) STEREO OUT (deslizador STEREO a nivel nominal y todos los deslizadores CH INPUT a nivel mínimo) -64 dB (68 dB S/N) STEREO OUTPUT (deslizador STEREO a nivel nominal y un deslizador CH INPUT a nivel nominal)
Gain de voltaje máximo		74 dB CH INPUT (CH1-24) a STEREO OUT/OMNI (BUS) OUT 74 dB CH INPUT (CH1-24) a OMNI (AUX) OUT (mediante el deslizador de pre entrada) 74 dB CH INPUT (CH1-24) a CONTROL ROOM MONITOR OUT (mediante el bus STEREO)
Interferencias (@ 1 kHz) Gain de entrada=Mín.		-80 dB canales de entrada adyacentes (CH1-24) -80 dB de entrada a salida
Entrada de AD (1-16: A/B)	Conmutador virtual	+48 V DC se suministra a la entrada A (XLR tipo-3-31)
	Conmutador de pad	0/26 dB atenuación
	Control de gain	44 dB (de -60 a -16), detentado
	Indicador Peak	LED (rojo) se activa cuando el nivel post HA alcanza los 3 dB por debajo del corte
	Indicador Signal	LED (verde) se activa cuando el nivel post HA alcanza los 20 dB por debajo del nominal
	Insert	I/O (convertidor pre AD)
	Conmutador de Insert	on/off
Entrada de AD (17-24)	Convertidor de AD	24 bits lineal, 128 tiempos de sobremuestreo (fs=48 kHz)
	Control de gain	44 dB (de -34 a +10), detentado
	Indicador Peak	LED (rojo) se activa cuando el nivel post HA alcanza los 3 dB por debajo del corte
	Indicador Signal	LED (verde) se activa cuando el nivel post HA alcanza los 20 dB por debajo del nominal
	Convertidor de AD	24 bits lineal, 128 tiempos de sobremuestreo (fs=48 kHz)

Grabación de una base de datos de instrumentos musicales de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad

Entrada analógica (ZTR IN ANALOG 1, 2)	Convertidor de AD	24 bits lineal, 128 tiempos de sobremuestreo (fs=48 kHz)
Entrada de opción (SLOT 1-4)	Tarjetas disponibles	Tarjetas de Interface digital opcionales (serie MY8, MY4)
Entrada digital (ZTR IN DIGITAL 1-3)	SRC	On/off (1:3 y 3:1 máxima proporción de Intervalo de muestreo de entrada a salida)
Canal de entrada CH1-56	Patch de entrada	—
	Fase	Normal/Inversa
	Tipo de compuerta ³	On/Off Key In: Grupo de 12 c(1-12, 13-24, 25-36, 37-48, 49-56)/AUX1-8
	Tipo de compresor ⁴	On/Off Key In: self /Stereo Link Pre EQ /pre fader/post fader
	Attenuator	De -96,0 a +12,0 dB (0.1 dB paso)
	EQ	PEQ de 4 bandas ⁵ On/Off
	Delay	0-43400 muestras
	On/Off	—
	Destilizador	100 mm motorizado (INPUT/AUX1-8)
	Aux send	On/Off AUX1-8; pre fader/post fader
	Solo	On/Off Pre fader/after pan
	Panoramización	127 posiciones (Izquierda= 1-63, Central, Derecha= 1-63)
	Panoramización Surround	127 x 127 posiciones
	Nivel LFE	-∞, -96 dB a +10 dB (paso de 256)
	Direccionamiento	STEREO, BUS1-8, DIRECT OUT
	Direct Out	Pre EQ /pre fader/post fader
	Medir	Visualizado en LCD Activa/desactiva el peak hold
TALKBACK	Control de nivel	Potenciómetro giratorio analógico
	Convertidor de AD	24 bits lineal, 128 tiempos de sobremuestreo
	Seleccionar Talkback	Microfono Integrado/AD IN 1-16
	On/Off	—
OSCILLATOR	Level	De 0 a -96 dB (1 dB paso)
	On/off	—
	Waveform	Sine 100 Hz, sine 1 kHz, sine 10 kHz, Interferencia pink, Interferencia burst
	Direccionamiento	BUS1-8, AUX1-8, STEREO L, R
STEREO OUT	Convertidor de DA	24 bits lineal, 128 tiempos de sobremuestreo
OMNI OUT 1-8	Patch de salida	SURROUND MONITOR, STEREO, BUS1-8, AUX1-8, DIRECT OUT 1-56, INSERT OUT (CH1-56, BUS1-8, AUX1-8, STEREO)
	Convertidor de DA	24 bits lineal, 128 tiempos de sobremuestreo
CONTROL ROOM MONITOR OUT	Selección de monitor	STEREO, ZTR IN DIGITAL 1, ZTR IN DIGITAL 2, ZTR IN DIGITAL 3, ZTR IN ANALOG 1, ZTR IN ANALOG 2, ASSIGN 1, 2 (BUS 1-8/AUX 1-8)
	Mono	On/Off
	Dimmer	On/Off
	Convertidor de DA	24 bits lineal, 128 tiempos de sobremuestreo
	Control de nivel	Potenciómetro giratorio analógico
	Nivel de auriculares	Potenciómetro giratorio analógico

*Grabación de una base de datos de instrumentos musicales
de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad*

STUDIO MONITOR OUT	Selección de monitor	CONTROL ROOM, STEREO, AUX 7, AUX 8, TALKBACK
	Convertidor de DA	24 bits lineal, 128 tiempos de sobremuestreo
	Control de nivel	Potenciómetro giratorio analógico
ZTR OUT DIGITAL 1-3	Dither	On/Off Longitud de palabra 16, 20, 24 bits
	Patch de salida	STEREO, BUS1-8, AUX 1-8, DIRECT OUT 1-56, INSERT OUT, CONTROL ROOM
Salida de opción (SLOT 1-4)	Tarjeta disponible	Tarjeta de Interface digital opcional (serie MY8, MY4)
	Patch de salida	SURROUND MONITOR, STEREO, BUS1-8, AUX1-8, DIRECT OUT 1-56, INSERT OUT (CH1-56, BUS1-8, AUX1-8, STEREO)
	Dither	On/Off Longitud de palabra 16, 20, 24 bits
STEREO	Tipo de compresor ⁴	On/Off Pre EQ /pre fader/post fader
	Attenuator	De -96,0 a +12,0 dB (0.1 dB paso)
	EQ	PEQ de 4 bandas ⁵ On/Off
	On/Off	—
	Fader	100 mm motorizado
	Balance	127 posiciones (Izquierdo-1-63, Central, Derecho-1-63)
	Delay	0-43400 muestras
	Medir	Visualizado en LCD Activa/desactiva el peak hold
	BUS1-8	Tipo de compresor ⁴
Attenuator		De -96,0 a +12,0 dB (0.1 dB paso)
EQ		PEQ de 4 bandas ⁵ On/Off
On/Off		—
Fader		100 mm motorizado
Delay		0-43400 muestras
Bus to stereo		Level (-∞, de -130 dB a 0 dB) On/Off Pan 127 posiciones (Izquierdo-1-63, Central, Derecho-1-63)
Medir		Visualizado en LCD Activa/desactiva el peak hold
AUX1-8		Tipo de compresor ⁴
	Attenuator	De -96,0 a +12,0 dB (0.1 dB paso)
	EQ	PEQ de 4 bandas ⁵ On/Off
	On/Off	—
	Deslizador	100 mm motorizado
	Delay	0-43400 muestras
	Metering	Visualizado en LCD Activa/desactiva el peak hold

Grabación de una base de datos de instrumentos musicales de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad

SURROUND MONITOR	Enmudecer	On/Off
	Solo	On/Off
	Fuente	BUS1-8, SLOT 1-4
	Monitor en C-R	On/Off
	Oscilador	Interferencia plink /500-2 kHz/1 kHz/50 Hz
	Matriz de monitor	5.1→5.1, 5.1→3-1, 5.1→ST, 3.1→3.1, 3.1→ST
	Bass management	5 predefinidos
	Alineación de monitor	ATT (de -12.0 dB a 12 dB 0,1 dB paso), Delay (0-30,0 msec 0,02 msec paso)
INTERNAL EFFECTS (EFFECT 1-4)	By-pass	On/Off
	In/out	8-In, 8-out (EFFECT 1): depende del tipo de efecto 2-In, 2-out (EFFECT 2-4): depende del tipo de efecto
	Effect-In desde	AUX1-8/INSERT OUT/effect-out
	Effect-out hasta	Patch de entrada/effect-In
Necesidades de alimentación	EE.UU./Canadá	120 V, 50/60 Hz 200 W
	Otros	220-240 V, 50/60 Hz 200 W
Dimensiones	(Anchura x Altura x Profundidad)	239 x 697 x 667 mm
Peso neto		34 kg
Intervalo de temperatura del aire libre de funcionamiento		10-35°C (50-95°F)
Intervalo de temperatura de almacenamiento		De -20 a 60°C*
Accesorios Incluidos		Cable de CA CD-ROM (Studio Manager)
Opciones		Tarjeta de Interface digital opcional (serie MY8, MY4) PEAK METER BRIDGE: MB02R96 SIDE PANEL: SP02R96



adat HD24

**REFERENCE
MANUAL**

ALESIS

Specifications

AUDIO INPUT

Input Connectors:	24 Balanced 1/4" TRS jacks
Nominal Input Level:	+4 dBu (1.23 V _{RMS}) = -15 dBFS
Maximum Input Level:	+19 dBu (6.9 V _{RMS}) = -0 dBFS
Input impedance:	10 k Ω

AUDIO OUTPUT

Output Connectors:	24 Pseudo-Balanced 1/4" TRS jacks
Nominal Output Level:	+4 dBu (1.23 V _{RMS}) = -15 dBFS
Maximum Output Level:	+19 dBu (6.9 V _{RMS}) = -0 dBFS
Output impedance:	220 Ω

AUDIO PERFORMANCE

Signal to Noise Ratio:	103 dB A-Weighted, Analog In to Analog Out
THD+N:	< 0.003%, Analog In to Analog Out
Frequency Response:	22-22 kHz \pm 0.50 dB, Analog In to Analog Out
Power consumption:	60 Watts Max (100-240 V _{AC} / 50-60 Hz) 20 Watts Max in Stand-By Mode

MECHANICAL

Size:	5.24" H x 19.0" W x 13.5" D 133mm H x 483mm W x 342mm D
Rack spaces:	3 spaces
Weight:	21 lbs (9.6 kg)

All measurements done over a 22 Hz - 22 kHz range with 1 kHz sine wave at 18dBu (-1dBFS) input. Impedances are measured at 1 kHz.



SYSTEM DATA

IDA^e Hardware Configurations for PULSE — Types 3560-B, 3560-C, 3560-D and 3560-E

PULSE™ is a versatile, task-oriented sound and vibration analysis system. It provides the platform for a range of PC-based measurement solutions from Brüel & Kjær. A PULSE system consists of a PC with LAN interface, PULSE software, Microsoft® Windows® operating system, Microsoft® Office, and data acquisition front-end hardware. Up to 10 front-ends can be combined into one measurement system with more than 300 input channels.

This System Data describes the hardware available for Data Acquisition Front-ends Types 3560-B, C, D and E.

PULSE Software as well as PULSE Pocket Analyzer Type 3560-L and the PULSE Lite software are described separately.



USES AND FEATURES

USES

- Multiframe systems comprising up to 10 front-ends with synchronous sampling between front-ends for real-time measurements on more than 300 channels:
 - Type 3560-B: 5 input and 1 output channel
 - Type 3560-C: 2 modules. Up to 17 input and/or 3 generator output channels
 - Type 3560-D: 7 modules. Up to 65 input and/or 10 generator output channels
 - Type 3560-E: 10 modules. Up to 96 input and/or 16 generator output channels)
- Signal and system analysis using all PULSE application packages for, or example:
 - Time data acquisition
 - General noise and vibration measurements
 - Basic and advanced acoustics
 - Structural Analysis
 - Machine Diagnostics
 - Electroacoustic testing

FEATURES

- Dyn-X input modules with single, 160 dB input range
- Automatic detection of front-end hardware and transducers – supports IEEE 1451.4-capable transducers with TEDS (Transducer Electronic Data Sheet)
- Fully conditioned input and output channels for microphones and accelerometers, charge transducers, CCLD transducers and other transducers acting as voltage sources
- Full overload detection including out-of-band overload and indication of incorrect conditioning
- LAN interface allows the front-end to be placed close to the test object and reduces transducer cable length
- Rugged design for industrial use
- Battery (3560-B, C only)/external DC operated acquisition unit for field use
- Low-noise operation

*Grabación de una base de datos de instrumentos musicales
de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad*

PULSE Type 3560-C – Portable Data Acquisition Unit, up to 17 Input Channels

FEATURES

- Houses one input/output module and one controller module
- Robust casing for industrial and hard everyday use
- Rain cover for front panel allows passage of cables
- Battery operated or DC powered (10 – 32 V)
- Cooling fans can be turned off for silent operation (will automatically restart if too hot)
- Synchronous sampling with other PULSE front-ends

Type 3560-C is a portable data acquisition system with a battery/DC powered Type 2827 power supply unit. It can hold any combination of 1 Controller Module and 1 Input/Output Module (see Fig. 1 and Table 1). The controller module handles communication with the PC while the input/output module handles measurement input and provides a sample clock. As an example, a Type 3560-C fitted with a 5/1-ch. Input/Output Controller Module Type 7537 and a 12-ch. Input Module Type 3038 can measure up to 17 input channels.



Environmental

To survive the harsh electrical environment found in, for example, cars, Type 3560-C has specifications that exceed the European EMC immunity requirements. ISO 7637-1 and 7637-2 “Road Vehicles – Electrical disturbance by conduction and coupling” requirements are met. Mechanical robustness is equally high, meeting MIL-STD-810C and IEC 60068-2-6.

Since all portable PULSE systems are built for outdoor use, they meet strict requirements for temperature and humidity. The operating temperature range extends from -10 to +50°C (+14 to 122°F). Type 3560-C will withstand rain if kept with the front panel facing upwards and the protection cover in place.

Specifications – Portable PULSE Type 3560-C

POWER SUPPLY/FRAME
Type 2827

AVAILABLE MODULES
See “Ordering Information – PULSE Systems 3560-B, 3560-C, 3560-D, 3560-E” on page 23

POWER REQUIREMENTS
Fulfills the requirements of ISO 7637-1 and 7637-2 with batteries
Voltage: 10 – 32 V DC

Power Consumption:
Without DC output and when fitted with:
1 × 7536 Controller Module
1 × 3109 4/2-ch. or 3110 2/1-ch. Input/Output Module
Nominal: 30 W
Max.: 42 W (while charging battery)

Ext. Power Connector: LEMO coax., FFA.00.113, ground on shield

BATTERIES
Optional Accessories: 2 × DR35 NiMH or NI 1030, 10.8 V (nominal)
Working Time (Continuous): 2½ hours
Charging Time: 5 hours/battery

ACOUSTIC NOISE EMISSION (at 1 m)

	dB SPL, A-weighted at 1 m	dB Lw, A-weighted
Fan Off	<17	<25
Normal (22°C)	32	40
Max.	33	41

DC OUTPUT
+5 V ± 0.5 V; max. 0.4 A (1 A fused)
+12 V ± 1.0 V; max. 0.4 A (1 A fused)
Connector: LEMO FGG.00.302

DIMENSIONS (WITHOUT PROTECTIVE COVER)
Height: 105 mm (4.1")
Width: 376 mm (14.8")
Depth: 300 mm (11.8")
Weight: 5 kg (11 lb.) with Controller Module and Input/Output Module.
When fitted with batteries, 6 kg (13 lb.)

Grabación de una base de datos de instrumentos musicales de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad

Table 1 Types and modules comprising PULSE front-ends

Type	Product Name	Frequency Range	Aux. Channels	Simultaneous Channels	Connectors	Input Type	C	D	E
Types 3560-C, D, E									
3109	Generator, 4/2-ch. Input/Output Module	0Hz to 25.6kHz	-	4 Input 2 Generator Output	BNC and LEMO	Direct/CCLD ^a /Mic. Preamp. 1 Tacho Conditioning ^d	1 of these modules Up to 17 input channels	Up to 5 of these modules Up to 65 input channels	Up to 8 of these modules Up to 96 input channels
3110	Generator, 2/1-ch. Input/Output Module	0Hz to 204.8kHz		2 Input 1 Generator Output ^e					
3038	12-ch. Input Module	0Hz to 25.6kHz		12 Input	BNC	Direct/CCLD ^a 2 Tacho Conditioning ^d			
3040					2 x Sub-D	Direct/CCLD ^a /Mic. Preamp. ^b			
3038-B									
3040-B									
3039	6-ch. Input Module	0Hz to 25.6kHz		6 Input	BNC and LEMO	Direct/CCLD ^a /Mic. Preamp. 1 Tacho Conditioning ^d			
3041					Sub-D	Direct/CCLD ^a /Mic. Preamp. ^b			
3039-B									
3041-B									
3035	6-ch. Charge & CCLD Input Module	0Hz to 25.6kHz	-	6 Input	BNT/BNC and TNC	Charge/Direct/CCLD ^a Tacho Conditioning on BNT Connector			
UA-1365	Blank Module								
7536	Controller Module	-							
7537	5/1-ch. Input/Output Controller Module	0Hz to 25.6kHz	16 Aux. Input ^d (10 samples/s) 2 Digital Output	5 Input 1 Sine Output	LEMO	Direct/CCLD ^{a, b} /Mic. Preamp. 1 Tacho Conditioning ^c	1 of these modules	1 of these modules	1 of these modules
7538				5 Input 1 Generator Output					
7539				5 Input 1 Sine Output	BNC	Direct/CCLD ^a 1 Tacho Conditioning ^c			
7540									
7537-A									
7538-A				5 Input 1 Generator Output					
7539-A									
7540-A									

- a. Constant Current Line Drive for DeltaTron[®] and ICP[®] Accelerometers or Microphone Preamplifier
 b. Using adaptor cables
 c. All input channels can be used for tachometer operation

- d. Only 12-channel currently supported in PULSE software
 e. Upper frequency @ 102.4kHz
Dyn-X modules – See "Dyn-X Modules – Types 7538/38-A, 7540/40-A, 3035, 3040/40-B, 3041/41-B, 3560-B-110/120/130/140" on page 6.

Output Channels

Available Generator Modules

	Standard	Dyn-X
Input/Output Modules		
Generator, 4/2-ch. Input/Output Module	3109	-
Generator, 2/1-ch. Input/Output Module	3110	-
Input/Output Controller Modules		
5/1-ch. Input/Output Controller Modules	7537, 7537-A (3560-B-010/020)	7538, 7538-A (3560-B-110/120)
5/1-ch. Input/Output Controller Modules with Generator	7539, 7539-A (3560-B-030/040)	7540, 7540-A (3560-B-130/140)



USES

- Generator output channels for system excitation for acoustic and vibration measurements

FEATURES

- Type 3109: 2 output channels: Full generator functionality to 25.6kHz
- Type 3110: 1 output channel: Full generator functionality to 102.4kHz
- Types 7539, 7539-A (3560-B-030/040), 7540, 7540-A (3560-B-130/140): 1 output channel: Full generator functionality to 25.6kHz
- Waveforms determined by PULSE software (see BU 0229)
- Types 7537, 7537-A (3560-B-010/020), 7538, 7538-A (3560-B-110/120): 1 output channel: Sine waveforms up to 25.6kHz; sine wave only

Type 3109

The two output channels on Type 3109 can be used as signal generators with a frequency range from 0 to 25.6kHz and can supply all the signals necessary for performing system analysis.

Type 3109 is designed around a powerful digital signal processor and a 24-bit D/A converter, and has exceptional flexibility, stability and accuracy. Output levels are adjustable in hardware, with maximum output ranging from 5 mV to 5 V RMS. Lower levels are possible by scaling the signal to the D/A converter. The signal is provided by a BNC connector and can be referred to ground or floating. It is possible to add a DC offset, but any unwanted DC offset is automatically removed.

½-inch Free-field Microphone Type 40AF

Product Data and Specifications

Typical applications

- Precision acoustic measurements
- Type 0 and 1 SPL measurements
- Free-field measurements
- General purpose measurements

The G.R.A.S. Microphone Type 40AF is a ½-inch precision condenser microphone for general purpose measurements in open acoustic fields. It is an externally polarized free-field microphone with a large dynamic range and a wide frequency response.

As a free-field microphone, the Type 40AF is for measuring the sound pressure which existed before it was placed in the sound field pointing towards the sound source.

The disturbing effects of its presence in the sound field are minimal at low frequencies (large wavelengths compared with microphone size). At higher frequencies, the effects of reflections and diffractions generally lead to an increase in the measured sound pressure levels.

Fig. 3 shows what these are in a free-field for various angles of incidence. The Type 40AF compensates for this to provide a flat frequency response at an angle of 0° incidence in a free-field (see Fig. 2).

Specifications

Frequency response:		Upper limit (3% distortion):	
3.15 Hz - 20 kHz	±2.0 dB		148 dB re. 20 µ Pa
5 Hz - 10 kHz	±1.0 dB	Microphone thermal noise:	14.5 dBA re. 20 µ Pa
Nominal sensitivity:	50 mV/Pa	Capacitance:	17 pF
Polarization voltage:	200 V	Temperature range:	-40 °C to +150 °C
			...continued overleaf

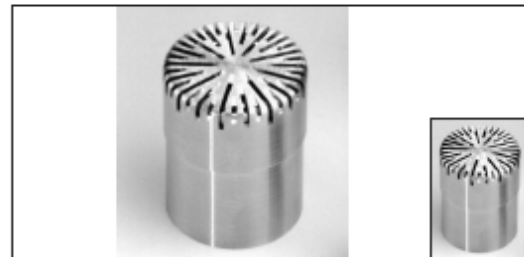


Fig. 1 ½-inch Free-field Microphone Type 40AF (inset shows true size)

G.R.A.S. ½-inch preamplifiers (see data sheets for Types 26AG, 26AH, 26AJ, 26AK and 26AM) are also available for use with the Type 40AF. The mounting thread (11.7 mm - 60 UNS-2) is compatible with other available makes of similar microphone preamplifiers.

All G.R.A.S. microphones comply with the specifications of IEC 1094: *Measurement Microphones, Part 4: Specifications for working standard microphones.*

Non-corrosive, stainless materials are used in manufacturing these microphones to enable them to withstand rough handling and corrosive environments.

All G.R.A.S. microphones are guaranteed for 5 years and are individually checked and calibrated before leaving the factory. An individual calibration chart is supplied with each microphone.

½-inch Free-field Microphone Type 40AF

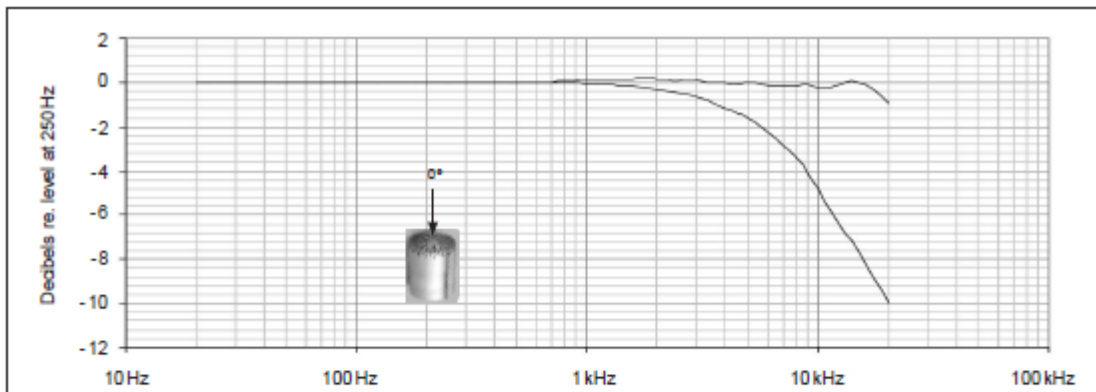


Fig. 2 Typical frequency response of Type 40AF. Upper curve shows free-field response for 0°, lower curve shows pressure response

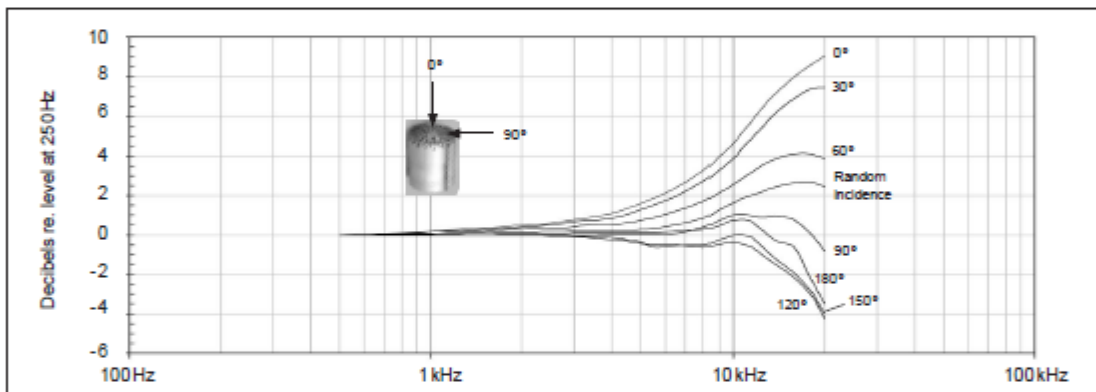


Fig. 3 Free-field corrections for various angles of incidence

Specifications (continued)

Temperature coefficient (250 Hz):	-0.007 dB / °C	Dimensions (with protection grid):	
Static-pressure coefficient:	-0.01 dB / k Pa	Length:	16.2 mm
Humidity range:	0 - 100 % (non-condensing)	Diameter:	13.2 mm
Influence of humidity (250 Hz):	<0.1 dB (0 - 100% RH)	(without protection grid):	
Influence of axial vibration, 1 m/s ² :	63 dB re. 20 μ Pa	Length:	15.3 mm
Venting:	Rear vented	Diameter:	12.7 mm
IEC 1094-4 designation:	WS2F	Diameter (diaphragm ring):	12.1 mm
		Threads:	
		Protection Grid:	12.7 mm - 60 UNS
		Preamplifier Mounting:	11.7 mm - 60 UNS
		Weight:	7 gm

Power Module Type 12AK

Product Data and Specifications

Typical applications

- General-purpose measurements
- Precision measurements
- Acoustic monitoring
- Microphone calibration

The G.R.A.S. Power Module Type 12AK is a single-channel power supply for preamplifiers used with condenser microphones. It is for general use in acoustic measurements; both in the laboratory and in the field. It has the following signal-conditioning settings:

- linear-response
- A-weighting
- high-pass filtering

The Type 12AK can be powered either by internal standard batteries or an external DC supply (12V - 18V), e.g. a mains/line adapter. It is built into a sturdy anodized aluminium cabinet.

The polarization voltage for the microphone fitted to the preamplifier can be set to:

- 0V — for prepolarized microphones, or
- 200V — for externally polarized microphones

The voltage supply for the preamplifier can be set to:

- 120V — for maximum dynamic range, or
- 28V — for minimum power consumption

The Type 12AK will run for approximately 11 hours on fresh standard alkaline batteries. A **Low Batt** LED indicates the condition of the batteries.

The input is a 7-pin LEMO socket on the front panel which is wired up (see Fig. 2) for G.R.A.S. microphone preamplifiers, e.g. Types 26AB, 26AC, 26AJ



Fig. 1 Power Module Type 12AK

and 26AK, but is also compatible with other available makes of similar microphone preamplifiers.

The output is a standard BNC connector also on the front panel.

There are two overload indicators; one instantaneous, and one latched which can be reset. The gain can be set from 0 dB to +50 dB in steps of 10 dB.

The standard A-weighting filter complies with IEC Standard 60651: *Sound level meters Type 0*. The high-pass filter is a 3-pole Butterworth filter with a -1 dB cut-off at a frequency of 20 Hz. This filter is for reducing unwanted low-frequency signals, e.g. caused by wind-induced noise on the microphone.

The preamplifier signal can be coupled directly to the output of the Type 12AK by selecting direct

Power Module Type 12AK

output. This makes the output of the preamplifier available free of any signal conditioning.

A built-in precision 1 kHz oscillator enables a complete check of the measuring channel when used with G.R.A.S. preamplifiers Types 26AJ, 26AH or 26AL. The oscillator can be activated directly via a push-button on the rear panel or remotely via a mini-jack connector also placed on the rear panel. The output level of the oscillator can be adjusted using a small screw driver on a potentiometer accessible via a hole in the front panel.

The cabinet of the Type 12AK is $\frac{1}{12}$ of a standard 19-inch rack; meaning that up to 12 of these Power Modules can be mounted in a standard 19-inch rack using the AK0040 Rack-mounting System.

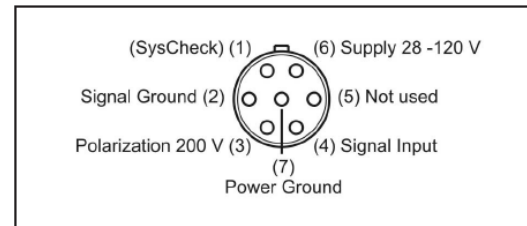


Fig. 2 7-pin LEMO female socket 1B (external view)

Specifications

Input/Output sockets:		Output impedance:	30 Ω
Input:	7-pin LEMO 1B female	Power supply:	10 x LR6 (AA) standard alkaline cells, or DC mains/line adapter supply: 12V - 18V
Output:	BNC coaxial	Power consumption:	With a G.R.A.S preamplifier using:- 120V: 210mA 28V: 180mA
Gain:	0 to +50 dB in 10 dB steps, and direct coupling	Fuse:	250 mA (Slow), 250V
Output-voltages:	Preamplifier supply: 28 V or 120 V Polarization voltage: 0 V or 200 V	Battery life (valid for 23°C and alkaline cells) for:-	120 V supply: \approx 9 hours 28 V supply: \approx 11 hours
Gain error:	<0.2 dB	Operating temperature range:	-10 °C to +50 °C
Frequency response (Lin setting):	20 Hz - 20 kHz: \pm 0.2 dB 2 Hz - 200 kHz (gain \leq +40 dB): \pm 1.0 dB 2 Hz - 100 kHz (gain = +50 dB): \pm 1.0 dB	Dimensions:	($\frac{1}{12}$ of a standard 19-inch rack) Height: 132.6 mm (5¼ in) Width: 34.6 mm (1.3 in) Depth: 196.0 mm (7.7 in)
Inherent noise:	(20 Hz - 20 kHz with input grounded) A-weighted: <2.8 μ V Lin: <4 μ V (20 Hz - 20 kHz with G.R.A.S. preamplifier and 20 pF dummy microphone) A-weighted: <4 μ V Lin: <5.6 μ V	Weight:	770 gm (1.69 lbs)
A-weighting filters:	Compliant with IEC 60651 Type 0	Accessories available:	19-inch Rack-mounting System: AK0040
High-pass filter:	3-pole Butterworth, -1 dB at 20 Hz		

Anexo 3: Ficha identificación

Datos personales del intérprete	
Nombre	Alberto Juárez Becerril
Instrumento	Violín
Fecha de nacimiento	10/04/1982
Nivel de los estudios musicales alcanzados	Título de profesor de violín (Grado Medio Plan 66)
Datos técnicos del instrumento utilizado	
Descripción arco	Sello a fuego Paesold, madera de Pernambuco, 62 gr, año 1994
Descripción instrumento	Violín 4/4, escuela francesa Medidas caja armónica: <ul style="list-style-type: none"> – Longitud: 361 – Ancho superior: 167 – Ancho entre ces: 111 – Ancho inferior: 207 Fondo de arce de rizo medio, color anaranjado oscuro
Año	c. 1900
Inscripción etiqueta	Husson y Buthod, Lutheria Lorraine
Datos organizativos	
Fecha grabación	16/09/2010 – 4/12/2010 – 5/01/2011
Duración de la sesión	3 horas / 5 horas / 5 horas
Id sesión	Violin01-Violin02-Violin03
Incidencias / Sugerencias de mejora	<ul style="list-style-type: none"> – En la primera sesión se detecta excesivo calor en la cámara, lo que perjudica al mantenimiento de la afinación y afecta al bienestar del músico, por lo que se realizan paradas de 10 minutos cada hora para ventilar el recinto. – También se aprecia que el proceso de toma de medida lleva más tiempo del esperado, ya que la recolocación entre toma y toma exige dedicar al menos 2 minutos. – Durante la 2ª y 3ª sesión las mejoras introducidas son recibidas con satisfacción por parte del músico y se constata una mayor eficiencia en los procesos de toma de medidas.

*Grabación de una base de datos de instrumentos musicales
de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad*

Datos personales del intérprete	
Nombre	Rocío Fausor de Castro
Instrumento	Viola
Fecha de nacimiento	17/10/1988
Nivel de los estudios musicales alcanzados	Título de Grado Medio de Música en la especialidad de Viola
Datos técnicos del instrumento utilizado	
Descripción arco	Arco Pernambuco 3/4
Descripción instrumento	Viola francesa de finales del s. XIX Madera de arce, copia de Stradivari
Año	1898
Inscripción etiqueta	1898 – París
Datos organizativos	
Fecha grabación	7/01/2011 – 8/01/2011
Duración de la sesión	5 horas / 4 horas
Id sesión	Viola01 – Viola 02
Incidencias / Sugerencias de mejora	<ul style="list-style-type: none"> – Durante la primera sesión se aprecian algunas dificultades de cara a la realización de efectos con el instrumento. – La intérprete manifiesta que contar con la monitorización le parece importante, ya que la sensación de estar aislada en la cámara le resulta claustrofóbica. – Se decide revisar la afinación más frecuentemente, debido a los cambios de temperatura experimentados en el interior de la cámara. – Se decide realizar el proceso de medida en la segunda sesión, para que la interrupción de la sesión no afecte a la medida. – Se realizan varias tomas en las posiciones de micrófono de acceso más complicado.

*Grabación de una base de datos de instrumentos musicales
de la familia de la cuerda frotada y estudio de su directividad*

Datos personales del intérprete	
Nombre	Víctor Barbero Romero
Instrumento	Violonchelo
Fecha de nacimiento	25/02/1983
Nivel de los estudios musicales alcanzados	Título Superior de Música en la especialidad de Violonchelo
Datos técnicos del instrumento utilizado	
Descripción arco	Arco Francisco González, Madrid, 2000
Descripción instrumento	Violonchelo francés
Año	2003
Inscripción etiqueta	Jean Seyral, Bayona (2003)
Datos organizativos	
Fecha grabación	23/12/2010 – 24/12/2010
Duración de la sesión	5 horas / 5 horas
Id sesión	Cello01 – Cello02
Incidencias / Sugerencias de mejora	<ul style="list-style-type: none"> – El cellista indica que es imprescindible utilizar una correa para estabilizar la pica en el suelo de rejilla de la cámara, pero se opta por sustituirla por una lámina de cartón para evitar las vibraciones indeseadas que produce la argolla metálica que la correa tiene en el extremo en contacto con la malla metálica del suelo. – La temperatura en el interior de la cámara de nuevo hace imprescindible parar y ventilar la cámara cada hora. – El músico señala que las condiciones de aislamiento sensorial que produce la cámara afectan a su capacidad de concentración y le provocan cierta sensación de fatiga.

Datos personales del intérprete	
Nombre	Diego José Pérez González
Instrumento	Contrabajo
Fecha de nacimiento	12/09/1984
Nivel de los estudios musicales alcanzados	Título Superior de Música en la especialidad de Contrabajo. Profesor de Contrabajo en el Conservatorio Superior de Música de Alicante.
Datos técnicos del instrumento utilizado	
Descripción instrumento	Contrabajo Günter Klaus $\frac{3}{4}$ con puente de alta calidad, cuerdas Pirastro Flexocord afinación de orquesta y pica metálica extraíble con punta de roscada de acero.
Descripción arco	Arco francés 3/4: Ary France
Año	2000
Inscripción etiqueta	Günter K. 2000.
Datos organizativos	
Fecha grabación	24/09/2010 – 4/01/2011 – 14/01/2011
Duración de la sesión	6 horas – 6 horas – 7 horas
Id sesión	Cbajo01 – Cbajo02 – Cbajo03
Incidencias / Sugerencias de mejora	<ul style="list-style-type: none"> – La dificultad de ser el autor del proyecto y participante en el mismo requiere la ayuda de un tercero para controlar los procesos que suceden fuera de la cámara. Para ello se dedica tiempo en formar al ayudante para que realice dichos procesos. – Durante las sesiones donde se mide la directividad algunos movimientos de micrófono son realizados por mí mismo, sin necesidad de salir de la cámara (para ello se dan las instrucciones al ayudante externo mediante el circuito de monitorización). – Las dimensiones del contrabajo y la posición al tocarlo permiten obtener un gran número de medidas también en el eje vertical.

Anexo 4: Gráficas de estimación del error al posicionar el micrófono

Nota: Este anexo está disponible tanto en el CD que acompaña a este texto como en la dirección <https://dl.dropbox.com/u/45621120/PFC-DiegoJPerez.rar>

Anexo 5: Diagramas polares

Nota: Este anexo está disponible tanto en el CD que acompaña a este texto como en la dirección <https://dl.dropbox.com/u/45621120/PFC-DiegoJPerez.rar>

Anexo 6: Presupuesto del proyecto

Presupuestaremos a continuación los costes que habría supuesto la realización de este proyecto a precios de mercado en instalaciones ajenas a la Universidad y el alquiler de los diversos equipos.

Costes aproximados derivados de recursos humanos y sedes:

Tarifas unitarias (sin IVA ni IRPF):

- ✓ *Ingeniero técnico de telecomunicaciones: 60 €/hora*
- ✓ *Alquiler de cámara anecoica: 100 €/hora*
- ✓ *Músicos: 60 €/hora*

- Horas de grabación de los Músicos: Suma total de la duración de las distintas grabaciones: 51 horas (Número de Músicos: 4)
- Horas de alquiler de la cámara anecoica: Sesiones de 8 horas por cada grabación durante 7 días (las sesiones oscilan entre 3 y 7 horas de duración, pero se preverán sesiones combinadas de hasta dos músicos por día, contando un margen de tiempo adicional para montaje de equipos, calibración y pausas en la grabación). Además se precisa una sesión adicional para la medida de estimación del error (8 horas).
- Horas de contratación de Ingeniero técnico de sonido: teniendo en cuenta lo anterior, habría sido necesario contratar al ingeniero el mismo tiempo que alquilemos la cámara anecoica, 8 horas por sesión, durante 7 días, lo que además nos deja un margen de 5 horas para abordar los imprevistos propios de toda sesión de grabación. Por otro lado, ya que las grabaciones se realizan de forma continuada, es necesario contar con el ingeniero otras 10 horas más para que realice la labor de edición y selección de sonidos que conservamos en la base de datos.
- A parte de ello, las tareas relacionadas con la medida de directividad supondrían los siguientes costes añadidos imputables en la categoría del Ingeniero técnico:
 - Medida y estimación del error: 8 horas
 - Recopilación de datos de PULSE y ordenado en Excel: 10 horas
 - Diseño del código en Matlab, testeo y revisiones: 30 horas
 - Elaboración de memoria y análisis de datos: 100 horas

Nota: No se presupuestarán las horas que se han invertido en el entrenamiento en el manejo de los equipos.

Personal y Alquiler	€/hora	Nº de horas	Total (sin IVA ni IRPF)
Ingeniero técnico de telecomunicaciones	60	56 (grabación) 10 (edición) 140 (directividad)	12.360 €
Alquiler cámara anecoica	100	56 (grabación) 8 (estimación error)	5.600 €
Músicos	60	51	3.060 €
			21.020 €

Costes aproximados derivados de recursos materiales:

Tarifas unitarias (sin IVA):

- Alquiler de equipos (Precios sin IVA):
 - Consola digital de mezclas Yamaha 02R96: 157,50 €/día
 - Multipistas Alesis ADAT HD24: 82 €/día
 - Hardware PULSE Type 3560 de B&K: 185,70 €/día
 - 2 Monitores Autoamplificados: 2 x 21 €/día
 - Micrófono de medida (incluye fuente de alimentación): 3 x 70€/día
 - 2 Auriculares: 2 x 13 €/día
 - Pie de micrófono: 3 x 4 €/día
 - Licencia Matlab: 500€

Nota: No se presupuestará el coste de los ordenadores, monitores de campo cercano, software de edición Protools, ni de los instrumentos musicales, por ser éstos equipos en propiedad del autor.

Alquiler de equipos	Precio (IVA no incluido)	Nº de días de alquiler	Total (IVA no incluido)
Consola digital de mezclas Yamaha 02R96	157,50 €/día	8	1.260 €
Multipistas Alesis ADAT HD24	82 €/día	8	656 €
Hardware PULSE Type 3560 de B&K	185,70 €/día	8	1.485,6 €
2 Monitores Autoamplificados	2 x 21 €/día	8	336 €
Micrófono de medida	3 x 70€/día	8	1.680 €
Auriculares	2 x 13 €/día	8	208 €
Pie de micrófono	3 x 4 €/día	8	96 €
Licencia Matlab	500€	-	500 €
			6.221,6 €

En conjunto, los costes serían pues:

Concepto	Total (sin IVA ni IRPF)
Recursos humanos y sedes	21.020 €
Recursos materiales	6.221,6 €
	Coste Proyecto (sin IVA ni IRPF) = 27.241,6 €

Bibliografía

- AENOR. (2005). Electroacústica. Sonómetros. Parte 2: Ensayos de evaluación de modelo. (Vol. UNE-EN 61672-2:2005): AEN/CTN 209 - EQUIPOS ELECTRÓNICOS
- AENOR. (2010). Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido utilizando presión acústica. Métodos de laboratorio para cámaras anecoicas y semianecoicas. (Vol. UNE-EN ISO 3745:2010): AEN/CTN 74 - ACÚSTICA
- AFNOR. (1988). Détermination de la puissance acoustique émise par les sources de bruit. *Partie 5: méthodes de laboratoire en salle anéchoïque ou semi- anéchoïque*. (Vol. NF S 31-026). Paris-La Défense.
- Askenfelt, A. (1982). Eigenmodes and tone quality of the double bass. *Catgut Acoust. Soc. Newsletter*, 38, 34-39.
- Askenfelt, A. (1986). Measurement of bow motion and bow force in violin playing. *J. Acoust. Soc. Am.*, 80, 1007-1015.
- Bissing, G., & Gregorian, A. (2003). Relating normal mode properties of violins to overall quality signature modes. *Catgut Acoust. Soc. J.*
- Bladier, B. (1960). Sur le chevalet du violoncelle (R. B. Lindsay, Trans.). In C. Hutchins (Ed.), *Musical Acoustics*. New York: Halsted Press.
- Bynum, E., & Rossing, T. D. (1997). *Holographic Studies of cello vibrations*. Paper presented at the ISMA97, Edinburgh.
- Commission, E. (2005). DOREMI: Directionally Optimised Representation of Musical Instruments Consultado el 20-5-2012 en http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=PROJ_ICT&ACTION=D&CAT=PROJ&RCN=64578
- Cremer, L. (1984). *The physics of the violin*. Massachusetts: MIT Press.
- Cremer, L., & Lazarus, H. (1968). *Der Einfluss des Bogendruckes beim Anstreichen einer Saite*. Paper presented at the ICA, Tokio.
- Fang, N. J., & Rodgers, O. E. (1992). Violin soundpost elastic vibration. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2, 39-40.
- Fletcher, N. H. (1976). Plucked strings. *Catgut Acoust. Soc. Newsletter*, 26, 13-17.
- Fletcher, N. H. (1977). Analysis of the design and performance of harpsichords. *Acustica*, 37, 139-147.
- Fletcher, N. H., & Rossing, T. D. (1998). *The Physics of Musical Instruments* (2 ed.). New York: Springer.
- Fletcher, N. H., & Sanders, L. C. (1967). Quality of violin vibrato tones. *J. Acoust. Soc. Am.*, 41, 1534-1544.
- Fuentes, A. (2008). *Grabación de una base de datos de instrumentos musicales en cámara anecoica*. Madrid: UC3M.
- Gough, C. E. (2005). Measurement of the vibrato rate of ten singers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 96, 1979-1984.
- Guettler, K. (1994). Wave análisis of a string bowed to anomalous low frequencies. *Catgut Acoust. Soc. J.*, 2, 1-17.
- Hacklinger, M. (1978). Violin timbre and bridge frequency response. *Acustica*, 39, 323-330.
- Hacklinger, M. (1979). Violin adjustment: Strings and Bridges. *Catgut Acoust. Soc. Newsletter*, 31, 17-19.

- Hanson, R. J., Schneider, A. J., & Halgedahl, F. W. (1994). Anomalous low-pitched tones from a bowed violin string. *Catgut Acoust. Soc. J.*, 2, 1-17.
- Hutchins, C. (1975). *Musical Acoustics*. New York: Halsted Press
- Hutchins, C. (1983). A history of violin research. *J. Acoust. Soc. Am.*, 73(5), 1421-1440.
- Lee, A. R., & Rafferty, M. P. (1983). Longitudinal vibrations in violin strings. *J. Acoust. Soc. Am.*, 73, 1361-1365.
- Marshall, K. D. (1985). Modal analysis of a violin. *J. Acoust. Soc. Am.*, 77, 695-709.
- Matthews, M. V., & Kohut, K. (1973). Electronic simulation of violin resonances. *J. Acoust. Soc. Am.*, 53, 1620-1626.
- Mc Intyre, M. E., & Woodhouse, J. (1978). The acoustics of stringed musical instruments. *Interdisciplinary Science Reviews*, 3, 157-173.
- Meyer, J. (1972). Directivity of the bowed string instruments and its effect on orchestral sound in concert halls. *J. Acoust. Soc. Am.*
- Meyer, J. (1992). Zur klanglichen Wirkung des Streicher-Vibratos. *Acta Acustica united with Acustica*, 76(6), 283-291.
- Minnaert, M., & Vlam, C. C. (1937). The vibrations of the violin bridge. *Physica*, 4(5), 361-372.
- Otondo, F., & Rindel, J. H. (2005). A new method for the radiation representation of musical instruments in auralizations. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(5), 902-906.
- Otondo, F., Rindel, J. H., Caussé, R., Misdariis, O., & De la Cuadra, P. (2002). *Directivity of Musical Instruments in a Real Performance Situation*. Paper presented at the International Symposium on Musical Acoustics (ISMA), Mexico City.
- Pickering, N. C. (1986). Transient response of certain violin strings. *Catgut Acoust. Soc. J.*, 45, 24-26.
- Pickering, N. C. (1991). *The bowed string*. New York: Amereon.
- Pitteroff, R. (1993). *Modelling of the bowed string taking into account the width of the bow*. Paper presented at the SMAC, Stockholm.
- Pitteroff, R., & Woodhouse, J. (1998). Mechanics of the contact area between bow and string. *Acustica*, 84, 744-757.
- Rossing, T. D. (1990). *The Science of Sound*. United States of America: Addison-Wesley.
- Sachs, C. (1965). *Geist und Werden der Musikinstrumente*. Berlin: Hilversum.
- Saldner, H. O., Molin, N. E., & Jansson, E. V. (1996). Vibration modes of the violin torced via the bridge and action of the soundpost. *J. Acoust. Soc. Am.*, 100, 1168-1177.
- Scheleske, M. (1996). Eigenmodes of vibration in the working process of a violin. *Catgut Acoust. Soc. J.*, 2, 2-8.
- Schumacher, R. T. (1975). Some aspects of the bow. *Catgut Acoust. Soc. Newsletter*, 24, 5-8.
- Small, A. M. (1937). An objective análisis of violin performance. *Studies in the Psychology of Music*, 4, 172-231.
- Steinkopf, G. (1963). *Unpublished thesis*. Techn. Univ. Berlin.
- Weinreich, G. (1985). Sound hole sum rule and dipole moment of the violin. *J. Acoust. Soc. Am.*
- Weinreich, G. (1993). *Radiativity revisited: Theory and experiment ten years later*. Paper presented at the SMAC, Stockholm.
- Weinreich, G. (1997). Directional tone colour. *J. Acoust. Soc. Am.*
- Weinreich, G., & Arnold, E. B. (1982). Method for measuring acoustic fields. *J. Acoust. Soc. Am.*