

UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO
EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA



ACÚSTICA DEL ACORDEÓN

MEMORIA

Presentada para optar al grado de Doctor por

RICARDO LLANOS VÁZQUEZ
rurcurdu@gmail.com

2015

Dedicatoria

A Cristina, Federica, Izaskun, Ana, Charo y Aitor.

Agradecimientos

Mucha gente ha contribuido de un modo u otro, directa o indirectamente, a que yo haya llegado hasta aquí y a que esta tesis sea una realidad. A todos ellos, deseo manifestarles mi más profundo agradecimiento. Aún a riesgo de olvidarme de alguien, me gustaría destacar:

Principalmente, a las profesoras María Jesús Elejalde y Erica Macho, directoras de esta tesis, por su confianza al darme la oportunidad de llevar a cabo este trabajo y por su dedicación, disposición, ayuda y paciencia durante la realización del mismo. Debo agradecer a las dos todo lo que me han enseñado y toda la ayuda que me han prestado durante estos años, sin la cual la consecución de esta tesis no habría sido posible.

Una mención muy especial (in memoriam) al profesor Jesús Alonso Moral, del Conservatorio Superior de Música de Bilbao (Juan Crisóstomo de Arriaga), por darme mi primera oportunidad de trabajar en investigación y por tanto apoyo y motivación. Gracias.

A las personas del grupo de Acústica, muy especialmente a Asier Agos, y del Science Technology and Mathematics Education Research Group de la UPV/EHU, liderado por Jenaro Guisasola, con las que he tenido la suerte de trabajar, intercambiar experiencias y compartir despacho, laboratorio y conversación a lo largo de estos años, por su disposición a la hora de ayudarme a resolver cualquier problema y por haber creado un entorno agradable de trabajo.

De igual manera, a los profesores Joaquín Fernández y Agustín Sánchez-Lavega, directores, durante la realización de esta tesis, del Departamento de Física Aplicada I de la UPV/EHU, y a todas las personas del Departamento de Física Aplicada I, donde se ha obtenido la mayor parte del trabajo experimental presentado en esta tesis.

A los lutieres Kepa Baraiazarra, José María López y, muy especialmente, a Javier Alberdi. A los intérpretes y docentes David Gordo, Gorka Hermosa, Naiara De La Puente, Ixone De La Puente, y Patricia Fernández. A la traductora Saioa Gabicagogeascoa. Al compositor Francisco Ibáñez Iribarria, director del Conservatorio de Música "Jesús Guridi" de Vitoria-Gasteiz durante los años 1997-2006, por permitirme la utilización del laboratorio de Electroacústica del citado centro para realizar medidas.

En el ámbito económico, debo agradecer a UPV/EHU, por la ayuda, enmarcada en los proyectos de investigación "Caracterización y análisis de vibraciones musicales" (2002-04) y "Procedimiento integrado de modelización y mejora acústica de instrumentos musicales" (2004-06), gracias a la cual he podido desarrollar este trabajo. También, a la Eusko Ikaskuntza, por la ayuda enmarcada en el proyecto de investigación "Caracterización y optimización acústica de instrumentos de viento del folklore vasco" (2008-2011), para la realización de este trabajo. No puedo olvidar al Gobierno Vasco/Eusko Jaurlaritza, ya que la ayuda concedida al "Science Technology and Mathematics Education Research Group" de la UPV/EHU (Convocatoria para apoyar la actividad de los grupos de investigación del sistema universitario vasco 2010-15) ha sido clave para presentar los resultados de este trabajo en congresos y en revistas de investigación. Además, a la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) por permitirme utilizar sus instalaciones y equipamiento para el desarrollo de este trabajo.

con una masa en el extremo libre	68
2.1.3. Generación del sonido en los aerófonos de lengüeta libre	70
2.1.4. Clasificación de las lengüetas según Fletcher	71
2.2. Percepción de los sonidos musicales	73
2.2.1. Tono	74
2.2.2. Intensidad (volumen sonoro)	77
2.2.3. Timbre	85
2.2.3.1. Etapas de un sonido: Ataque, estado estacionario y decaimiento	85
2.2.3.1.1. Formas de onda del estado estacionario	87
2.2.3.1.2. La influencia de la reverberación del recinto	88
2.2.3.2. Dimensiones y medición del timbre	88
2.2.3.2.1. Tiempo de ataque	90
2.2.3.2.2. Centroide espectral	92
2.2.3.2.3. Estructura espectral fina	93
2.3. Objetivos general y específicos	93
2.3.1. Lengüetas cargadas	94
2.3.2. Ataques	94
2.3.3. Estado estacionario	94
2.3.4. Pitch bending	95
2.4. Hipótesis general y específicas	95
2.4.1. Lengüetas cargadas	96
2.4.2. Ataques	97
2.4.3. Estado estacionario	99
2.4.4. Pitch bending	100
3. METODOLOGÍA	105
3.1. Introducción	109
3.1.1. FFT. Estudio del sonido emitido por una fuente	110
3.1.2. Análisis modal. Estudio de vibraciones	112

3.2. Lengüetas de acordeón	113
3.2.1. Efecto de la carga en la frecuencia fundamental	115
3.2.2. Efecto de la carga en el timbre	115
3.3. Barras metálicas grandes	116
3.4. Ataques	118
3.5. Estado estacionario	121
3.6. Pitch bending	123
3.6.1. Descripción y tipos de pitch bending	124
3.6.2. Procedimiento experimental	125
3.6.2.1. Primer grupo de medidas	126
3.6.2.2. Segundo grupo de medidas	127
3.6.3. Tratamiento de los datos experimentales	127
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	131
4.1. Lengüetas de acordeón con y sin carga másica	135
4.1.1. Efecto del valor de la masa de carga en la frecuencia fundamental	135
4.1.2. Efecto del punto de colocación de la masa de carga en la frecuencia fundamental	137
4.1.3. Efecto de la carga en el timbre de una lengüeta	141
4.2. Barras metálicas grandes con y sin carga másica	143
4.2.1. Efecto del valor de la masa de carga en la frecuencia fundamental	143
4.2.2. Efecto de la carga másica sobre las formas de los modos normales de vibración y sobre los puntos nodales	145
4.2.3. Efecto de la carga másica sobre la anchura de banda del modo fundamental	148
4.3. Caracterización física y psicoacústica de los diferentes tipos de ataque	149
4.3.1. Ataques de dedo y ataques de fuelle	149
4.3.1.1. Tiempo de ataque	151

4.3.1.2.	Cambio de nivel de presión sonora	158
4.3.1.3.	Evolución temporal del centroide espectral	161
4.3.2.	Ataques de dedo con pulsación lenta	164
4.3.3.	Ataques realizados sobre lengüetas en <i>cassotto</i>	173
4.3.4.	Proceso de creación de los diferentes ataques	178
4.4.	Estado estacionario	181
4.4.1.	Control de la dinámica.	
	El fuelle y la profundidad de pulsación	183
4.4.2.	Frecuencia y nivel de presión sonora	184
4.4.3.	Timbre: centroide espectral	187
4.4.4.	Comparación de los espectros del registro de 8 pies de la mano izquierda para dos acordeones, uno sin “doble bajo” y otro con “doble bajo”	191
4.5.	Pitch bending	192
4.5.1.	Espectrograma y evolución temporal	192
4.5.2.	Influencia del sentido de movimiento del fuelle, el registro y la tesitura. Primer grupo de medidas	196
4.5.3.	Influencia del <i>cassotto</i>	200
4.5.4.	Variación de la frecuencia. Segundo grupo de medidas	201
4.5.5.	Cambio en el nivel de presión sonora. Segundo grupo de medidas	204
5.	CONCLUSIONES	211
5.1.	Lengüetas cargadas	216
5.2.	Ataques	218
5.3.	Estado estacionario	220
5.4.	Pitch bending	223
Apéndice 1: Modelos teóricos del funcionamiento de las lengüetas del acordeón		227
A1.1.	Modelo de Fletcher para las oscilaciones automantenedas de una lengüeta	229

A1.1.1.	Condiciones necesarias para el mantenimiento de oscilaciones automantenidas	229
A1.1.2.	Análisis de las condiciones de inicio de oscilaciones automantenidas para una lengüeta del tipo $(-, +)$	236
A1.1.3	La lengüeta libre en el modelo de Fletcher	239
A1.1.4.	Aplicaciones prácticas concretas del modelo de Fletcher	240
A1.2.	Modelo de Ricot-Caussé-Misdariis	241
A1.2.1.	Análisis de los mecanismos de generación de las oscilaciones automantenidas de una lengüeta libre	241
A1.2.2.	Descripción del flujo según la dinámica de fluidos	243
A1.2.3.	Cálculo de la fuerza aerodinámica sobre la lengüeta	244
A1.2.4.	Movimiento de la lengüeta y flujo recíproco	247
A1.2.5.	Producción de sonido en un flujo. Analogía de Lighthill	249
A1.2.6.	Experimentación y comparación con el modelo	251
A1.2.7.	Mejoras al modelo	252
A1.3.	Influencia de las cámaras de resonancia de las lengüetas	252
A1.3.1.	Estudio de Tonon	253
A1.3.2.	Estudio de Plitnik para las lengüetas de órgano	256
Apéndice 2: El conocimiento de algunos lutieres		259
A2.1.	Primera entrevista con un lutier (L1)	261
A2.2.	Segunda entrevista con un lutier (L2)	266
A2.3.	Tercera entrevista con un lutier (L3)	276
Apéndice 3: Los ataques sobre la melódica		285
A3.1.	Presentación de la melódica	287
A3.2.	Montaje experimental	288

A3.3.	Tiempo de ataque	289
A3.4.	Centroide espectral	295
A3.5.	Conclusiones	296
6. BIBLIOGRAFÍA		301
7. CONTRIBUCIONES		315

Resumen

A lo largo de la historia las técnicas de construcción de instrumentos musicales de viento han sido desarrolladas por el método de ensayo y error. Las formas modernas de los instrumentos musicales de viento son el resultado de modificaciones empíricas que han producido instrumentos con facilidad de interpretación y respuesta sonora aceptable.

En el caso del acordeón y otros instrumentos de viento de la familia de lengüeta libre, a pesar del avance tecnológico de nuestra era, todavía hay poca comprensión sobre lo que hace un instrumento de buena calidad, sobre cómo las características de las lengüetas afectan al sonido producido por el instrumento, sobre cómo caracterizar los diversos modos de producción del sonido y la percepción de éste, descrita mediante atributos psicoacústicos de tono, intensidad (volumen sonoro) y timbre.

Este trabajo intenta correlacionar los pequeños cambios en las lengüetas del acordeón y cómo los seres humanos perciben el tono, la intensidad y el timbre de los sonidos producidos, con el fin de ayudar, en última instancia, en la evaluación del diseño y la calidad de estos instrumentos musicales.

Se profundiza en el conocimiento del comportamiento vibratorio de las lengüetas libres cargadas, con vistas a su optimización sonora. Se ha analizado la variación de la frecuencia fundamental con el valor de la carga y con la posición de ésta sobre la lengüeta. Se estudia cómo se modifican con la carga los modos normales de vibración y las formas modales. Para su visualización se utilizan barras metálicas cargadas. Se comprueba también hasta qué punto es válida la expresión aproximada que para la variación de la frecuencia de la lengüeta con la carga de la misma da la teoría de barras delgadas de Euler-Bernoulli. Finalmente, se estudia el efecto que la carga produce en el timbre de la lengüeta.

Se relaciona la importancia perceptual de pequeños cambios en el sonido de un acordeón con diferentes formas de ataque del mismo, en el estado estacionario del sonido y cuando se realiza un efecto de deslizamiento o doblado de tono (pitch bending).

Se caracterizan los diversos modos de ataque en este instrumento. Para ello se realiza primeramente una descripción de cómo se produce cada ataque en el acordeón. Asimismo, se analiza el establecimiento, evolución y duración de los armónicos durante el ataque, se determina la influencia en cada tipo de ataque del sentido del movimiento del fuelle, de la altura, de la dinámica, del *cassotto*, de la sucesión temporal relativa de las acciones de los dedos y del fuelle, y de la velocidad de pulsación del botón.

Se lleva a cabo una caracterización básica y sistemática del estado estacionario de la emisión sonora del acordeón de concierto y el efecto de algunos de sus componentes en ese sonido, tales como el registro, el *cassotto*, el manual y de la presencia o no del registro de "doble bajo" en el manual de bajos libres que diferencia distintos acordeones.

Por último se caracterizan los dos tipos principales de pitch bending que se pueden llevar a cabo sobre el acordeón y la influencia del registro, la tesitura, el sentido de movimiento del fuelle y la presencia del *cassotto*. Se determinan cómo evolucionan tanto la frecuencia como el nivel de presión sonora de los primeros armónicos y se estudia la dependencia de estas variaciones con el sentido de movimiento del fuelle y la frecuencia de la nota emitida.

El trabajo se lleva a cabo mediante la grabación y análisis de los sonidos recogidos en el laboratorio. En el trabajo sobre la carga de barras metálicas cargadas se utiliza el análisis modal para obtener las frecuencias y las formas modales de los modos normales de vibración. Para la mayor parte de los trabajos, se hace uso del sonido emitido directamente por un acordeón de concierto de la casa Pignini, modelo Sirius.

En algunos experimentos concretos se mide el sonido emitido por una melódica Melodihorn Samick A-32, o por un bloque de lengüetas especialmente preparado. Los sonidos se graban con un micrófono pre-polarizado de campo libre 1/2" tipo 4189-A21 fabricado por Bruel&Kjaer, y los datos, tanto en dominio de frecuencias como en dominio temporal, han sido obtenidos por medio del software PULSE Bruel&Kjaer. Estos datos son posteriormente tratados por programas específicos programados en MatLab.





Capítulo 1

Introducción

1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN. ANTECEDENTES

El término acordeón es el nombre genérico apropiado para todos los miembros de una compleja familia de aerófonos de lengüeta libre. El acordeón consta de una serie de lengüetas libres excitadas por el aire movido por un fuelle y controladas por medio de unas botoneras o teclados. La historia del desarrollo de los instrumentos de la familia del acordeón muestra una continua evolución que va desde una construcción física simple a una compleja [Mirek 1992, Monichon 1971, Monichon 1985, Richter 1990, Hermosa 2013]. Varían en la fabricación, materiales, número de notas, espacios para las lengüetas, consumo de aire, rango dinámico, capacidad de manejo y control... Como instrumento de concierto ha llegado a una cierta estandarización, y, hoy en día, una gran parte de los Conservatorios Superiores de Europa ofrecen estudios de grado, e incluso de doctorado, en la especialidad de Acordeón [Lhermet 2014].

Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con otros instrumentos con más tradición académica u orquestal, no existen demasiados estudios que traten de las propiedades acústicas del acordeón y del sonido emitido por el instrumento en situación de práctica instrumental real.

En primer lugar, la literatura especializada en el instrumento [Macerollo 1980, Kymäläinen 1994, Lips 2000, Buchmann 2010] trata principalmente de los aspectos interpretativos. Temas como los diferentes tipos de ataque, de pitch bending, registración... son siempre abordados desde el punto de vista del intérprete, del pedagogo o como información para el compositor que se acerca por primera vez al acordeón y busca unos conocimientos técnicos sobre el uso del instrumento que no puede encontrar en los textos clásicos de orquestación. En ningún caso se dan caracterizaciones físicas precisas de los efectos o técnicas abordados.

Un segundo grupo de textos, y también dentro de la literatura acordeonística, lo constituyen aquellos que tratan de la acústica del acordeón o de la lengüeta libre en particular, aunque bien de modo superficial y sin referenciar a publicaciones en revistas especializadas los resultados expuestos [Richter 1990, Gervasoni 1986], o bien con un objetivo más pedagógico que científico, centrados en la fabricación y aspectos organológicos de los diferentes constituyentes del acordeón [Benetoux 2002, Benetoux 2005].

Por último, un tercer grupo de referencias las constituyen los artículos científicos especializados dedicados a la lengüeta libre. Millot y Baumann [Millot & Baumann 2007] exponen en su introducción una completa revisión de las investigaciones previas sobre la dinámica de la lengüeta libre: la mayoría de los trabajos revisados siguen el modelo de Fletcher [Fletcher 1993] para determinar, en el dominio de frecuencias, las condiciones mínimas que aseguran el mantenimiento de oscilaciones. Entre los trabajos que abordan la dinámica de la lengüeta libre en el dominio temporal, cabe destacar los artículos de [St Hilaire et al. 1971], [Ricot et al. 2005] y el propio trabajo de [Millot & Baumann 2007].

Además de los trabajos citados en el párrafo anterior, encaminados a elaborar un modelo físico para las vibraciones de la lengüeta libre, existe una cierta cantidad de estudios centrados en algunos aspectos particulares de los instrumentos de lengüeta libre. Es el caso del pitch bending llevado a cabo en la armónica [Johnston 1987, Bahnson et al 1998, Cottingham et al. 1999, Millot et al. 2001], del pitch bending sobre lengüetas libres de órgano americano [Cottingham 2005], de un diseño especial de las cámaras de resonancia de las lengüetas para lograr un pitch bending mediante la presión sobre los botones (o teclas) [Tonon 2005, Cottingham 2010], o del pitch bending sobre lengüetas de acordeón [Coyle et al. 2009], aunque no sobre lengüetas dentro del propio instrumento real. Es también el caso de investigaciones sobre los transitorios de ataque en los tubos de órgano de lengüeta libre [Braasch & Ahrens 2000].

Sin embargo, faltan investigaciones sobre ataques llevados a cabo en el propio acordeón, en los que se contemple la acción combinada de botones (o teclas) y fuelle para la creación del sonido y en los que se analice qué factores pueden influir en el establecimiento de los diferentes armónicos en cada tipo de ataque. También sobre los diferentes tipos de pitch bending llevados a cabo sobre lengüetas de acordeón dentro del propio instrumento.

En resumen, hay una carencia de estudios sobre el control que el acordeonista tiene de su instrumento, esto es, acerca de cuáles son los parámetros controlables por el intérprete que influyen en la creación y modelado del sonido. Y esta labor tiene un doble interés: ahondar en el conocimiento acústico del instrumento y mejorar la práctica instrumental. Para ello puede combinarse el trabajo de investigación acústica con la experiencia que aportan tanto constructores y lutieres como instrumentistas, docentes y estudiantes.

La interacción entre el trabajo de investigación acústica y el conocimiento de los fabricantes de instrumentos y lutieres permite mejorar el trabajo de investigación y orientarlo hacia el conocimiento y/o la mejora de los problemas reales que se producen al utilizar el instrumento concreto. La interacción entre el trabajo de investigación acústica y el conocimiento de intérpretes, docentes y estudiantes puede contribuir a proporcionarles un conocimiento preciso de lo que puede hacerse, y cómo, sobre el acordeón.

1.2. EL ACORDEÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA ORGANOLÓGICO

1.2.1. Descripción del Acordeón

La familia del acordeón se divide de forma general en dos ramas: acordeones "diatónicos", que emiten sonidos diferentes cuando el fuelle se

abre o cuando se cierra, y acordeones “cromáticos”, que producen el mismo sonido en ambas direcciones del fuelle.

Dadas sus mayores posibilidades técnicas y musicales, y a fin de no restar generalidad a la aplicación de los resultados de nuestro trabajo, vamos a trabajar con un acordeón cromático de concierto de botones en su manual derecho y con bajos libres (cada botón emite una sola nota, al igual que el manual derecho) más bajos standard (sistema tradicional de acordes prefabricados: hay botones que emiten acordes) en su manual izquierdo (ver Figura 1.1).

En concreto, utilizaremos un acordeón de concierto marca Pignini, modelo Sirius, que además de reunir todas las características generales de un acordeón de concierto es actualmente el más utilizado entre los concertistas de acordeón clásico. La aplicación a otros tipos de acordeón con más limitaciones será directa.

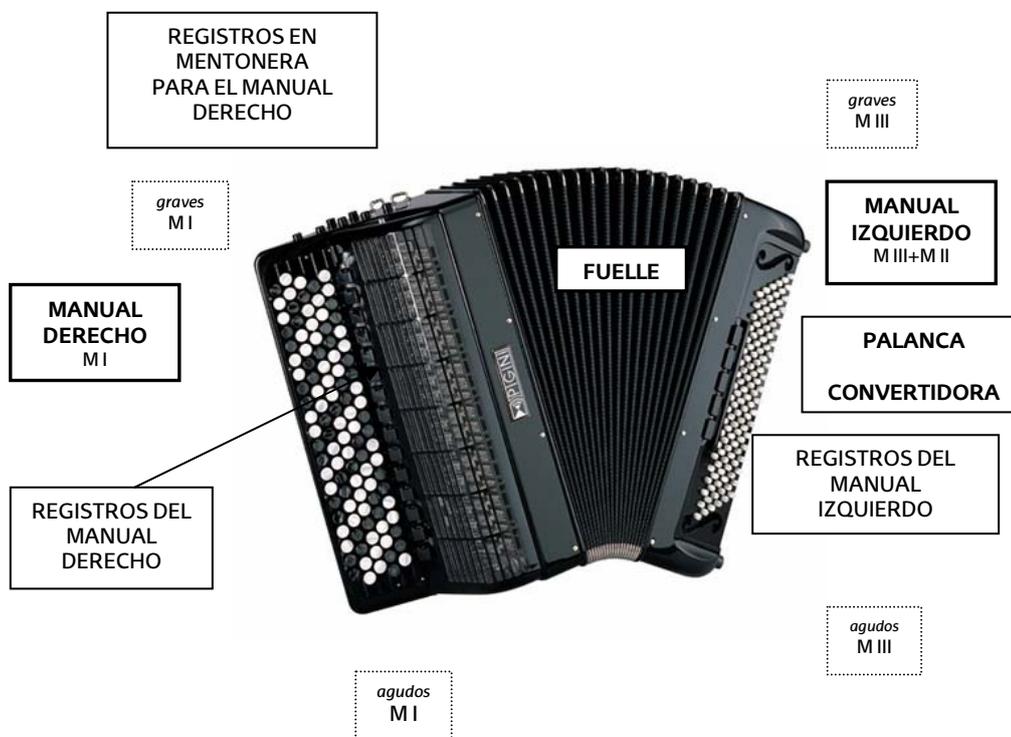


Figura 1.1: Descripción del acordeón de concierto.

Como puede observarse en la Figura 1.1, este acordeón de concierto consta de dos botoneras, una con botones grandes para la mano derecha (en los acordeones-piano esta botonera se ve sustituida por un teclado) y otra con botones pequeños para la mano izquierda. El intérprete tiene que mover con el brazo izquierdo un fuelle que une ambos manuales y que suministra aire a las lengüetas metálicas libres correspondientes a cada manual y que se hallan en el interior del acordeón.

1.2.1.1. Manual derecho (manual I, M I)

El manual derecho, denominado Manual I (abreviado M I), consta de 5 filas de botones ordenados cromáticamente en diagonal. En una misma fila, la relación interválica existente entre un botón y su contiguo inferior es de una tercera menor ascendente. La 4ª fila es la repetición de la primera; la 5ª fila la repetición de la segunda. Esta repetición de filas tiene como objeto facilitar las digitaciones. Existen diversas variantes a este sistema, variantes utilizadas en algunas zonas geográficas determinadas o también en algunas escuelas concretas. En el sistema italiano, utilizado principalmente en Europa Occidental, (C-griff) el Do está en la primera fila. Otros sistemas son el ruso (B-griff, Si en primera fila, además de orientación de notas graves y agudas en el manual III invertida con respecto a su manual I) y el finlandés (B-flat-griff, Sib en primera fila).

La extensión abarcada por este manual queda reflejada en la Figura 1.2.

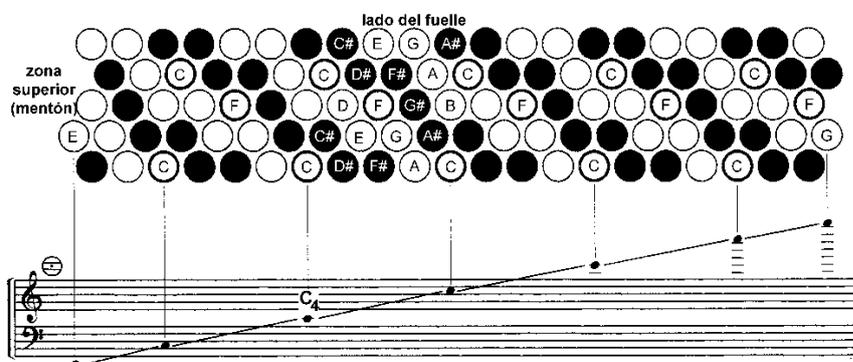


Figura 1.2: Extensión del registro de 8 pies del manual derecho, M I.

1.2.1.1.1. Registración del manual derecho

El acordeón tiene 4 “voces” en su manual derecho. Cada voz consiste en un juego completo e independiente de lengüetas (y por tanto, de sonidos) que si se desea se va a poder mezclar con cada uno de los otros tres juegos mediante un juego de registros, mecanismo cuya acción hace posible activar varias lengüetas correspondientes a la misma nota, en la misma o diferentes octavas, mediante la pulsación de un solo botón o tecla. Así, al pulsar un botón o tecla de la mano derecha se van a levantar realmente dos válvulas (o zapatas), las cuales podrán dejar sonar hasta un máximo de cuatro notas (dos por cada válvula): el número real de notas emitidas dependerá del registro que tengamos accionado.

Existen dos voces centrales (8’: “ocho pies”), una grave (16’: “dieciséis pies”) y una aguda (4’: “cuatro pies”), resultando un total de 15 combinaciones diferentes. La notación en “pies” se toma de la registración del órgano. En estos, ocho pies es la longitud del tubo abierto correspondiente a la nota más grave, Do₂, de un teclado normal de órgano moderno [Fernández de la Gándara & Llorente 1998, p. 135]: con un registro de ocho pies las notas suenan según la altura escrita, con uno de cuatro pies suenan a la octava alta, con uno de dieciséis pies una octava baja [Campbell & Greated 2001, p. 455].

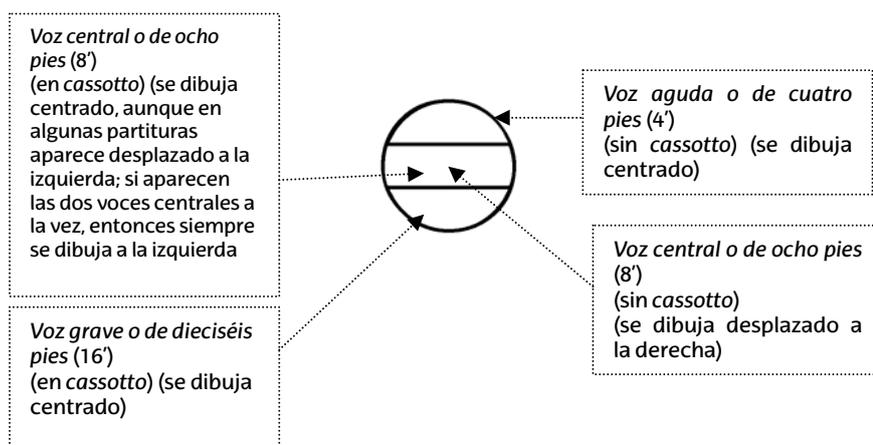


Figura 1.3: Símbolos registros manual derecho.

Los registros se simbolizan mediante un círculo dividido en tres alturas (ver Figura 1.3). En los espacios resultantes se dibujan unos puntos que hacen referencia a la cantidad y a la octava de los sonidos (voces) que suenan cuando se pulsa un botón en el registro seleccionado.

1.2.1.1.2. Registros en *cassotto*

El *cassotto* es una cámara de resonancia (Figura 1.4 y Figura 1.5) que, al funcionar como un filtro que atenúa los armónicos más agudos, hace que las voces dispuestas en su interior (la voz de 16' y una de las voces de 8') proyecten un sonido menos brillante que el de las situadas fuera de él (la otra voz de 8' y la voz de 4').



Figura 1.4: Detalle de la cámara de resonancia o cassotto.



Figura 1.5: Disposición de los bloques de lengüetas y dentro del acordeón (vista frontal).

Para diferenciar gráficamente las dos voces centrales, el punto correspondiente a la que se halla dentro de *cassotto* se dibuja centrado (o desplazado a la izquierda), mientras que el punto correspondiente a la que se halla fuera de *cassotto* se dibuja desplazado a la derecha (ver Figura 1.3).

1.2.1.2. Manual izquierdo: bajos libres, *bassetti* o *free bass* (manual III, M III)

El manual izquierdo de un acordeón de concierto consta de seis filas de pequeños botones y es en realidad un manual doble: una palanca convertidora (sistema *convertor*) cambia por completo la acción de los botones. En una de las posiciones de la palanca todos los botones emiten notas sueltas: se trata del manual de bajos libres (o *bassetti*, o *free bass*), llamado Manual III (abreviado M III o B.B). En la otra posición de la palanca convertidora cuatro filas de botones emitirán acordes fijos, prefabricados (mayores, menores, séptima dominante y séptima disminuida): es el manual

de bajos standard (o bajos Stradella), llamado Manual II (abreviado M II o S.B.).

Centrémonos primero en el manual de bajos libres: los botones de las 4 primeras filas están ordenados cromáticamente (misma disposición que en la mano derecha, de forma que se presenta simetría especular respecto al plano determinado por los pliegues del fuelle). Como en el manual derecho, también aquí la 4ª fila es repetición de la primera. Las filas 5ª y 6ª (conocidas a veces como bajos pedales) son diferentes. Emiten la octava más grave del instrumento, con la misma registración que esté accionada para este manual de bajos libres. De hecho, debido a cómo están ordenados, no se consideran como pertenecientes al Manual III, sino al Manual II, por lo que serán descritos más adelante.

La extensión abarcada por este manual queda reflejada en la Figura 1.6.

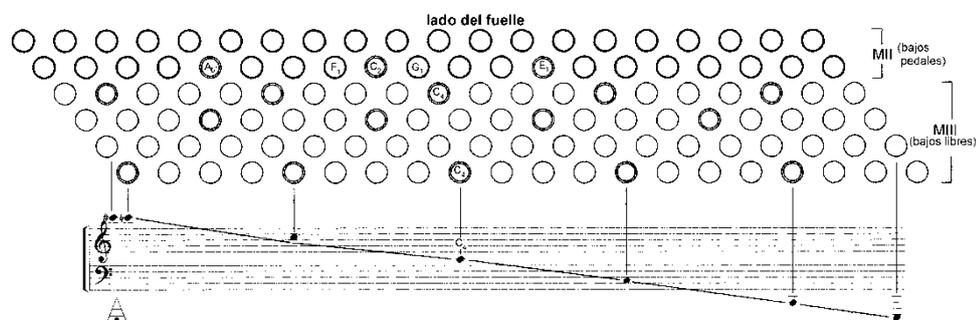


Figura 1.6: Extensión del registro de 8 pies del manual de bajos libres, M III.

1.2.1.2.1. Registración del manual de bajos libres, M III

El acordeón tiene 3 "voces" o juegos independientes de lengüetas en su manual de bajos libres. Los registros se simbolizan mediante un triángulo dividido en tres alturas (Figura 1.7). Al igual que ocurría en el manual

derecho, en los espacios resultantes se dibujan unos puntos que hacen referencia a la cantidad y a la octava de los sonidos (voces) que realmente suenan cuando se pulsa un botón. La diferencia principal es que el espacio inferior es ahora el que corresponde a sonidos en altura real (8'). (Esto se debe a que cuando los acordeones no tenían más que dos voces en su Manual III, se consideraba ya a la voz más grave como la que marcaba la octava real).

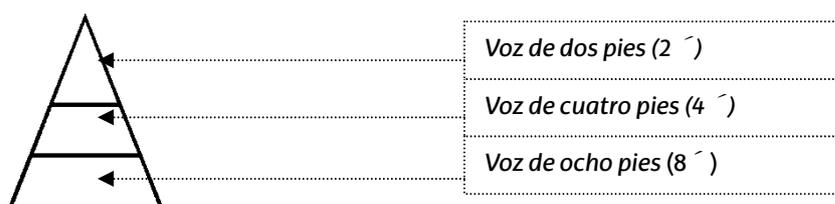


Figura 1.7: Escritura del símbolo de registración en el Manual III.

En el manual izquierdo no existe cámara de resonancia especial (*cassotto*) como en la derecha.

Existen dos tipos principales de acordeón de concierto según sea la disposición de las 3 voces en la mano izquierda.

1.2.1.2.1.1. Acordeones con “doble bajo”

Recordemos primero que en el manual de bajos libres (M III) se le llama “bajo” al registro (8'), a pesar de que emita sonidos en octava real. Dicho esto, los acordeones con “doble bajo” constan de dos voces de 8 pies y una de 2 pies, faltando la voz de 4 pies. El registro (8'+ 8') es el denominado de “doble bajo”. Tiene dos aplicaciones principales en la interpretación: reforzar la mano izquierda para buscar el equilibrio con la derecha y proporcionar el color tímbrico especial asociado a este registro.

El registro (2'), a menudo llamado *piccolo*, no está siempre disponible por separado en los acordeones de “doble bajo”, aunque en los últimos modelos está viniendo separado a partir del tercer Mi de la botonera (sonido

real Mi5 con dicho registro) y hasta el Do# más agudo de la tesitura (Do#8 con dicho registro).

En la octava más grave de la tesitura el “doble bajo” (8’+ 8’) no lo es tal, sino que se trata de un (8’+ 4’). Esta ausencia del “doble bajo” parece ser debida al gran tamaño de las lengüetas más graves del registro de 8´ [Alberdi & Orobengoa 2015].

1.2.1.2.1.2. Acordeones sin “doble bajo”

Estos acordeones tienen una voz de 8 pies, una de 4 pies y una tercera de 2 pies. Lo que se pierde en sonoridad (ausencia de “doble bajo”) se gana en posibilidades tímbricas por el mayor número de combinaciones (registros) de estas voces. El registro de 2 pies (piccolo) se puede separar en toda su tesitura.

Más adelante estudiaremos en detalle las diferencias entre estos dos tipos de manual de bajos libres.

1.2.1.2.2. Manual izquierdo: bajos standard o bajos Stradella (manual II, M II)

Este manual consta de las mismas 6 filas de botones pequeños que hemos visto para el manual de bajos libres. Del manual III (bajos libres) al manual II (bajos estándar), y a la inversa, se pasa mediante el accionamiento de la palanca convertidora.

Tal y como se aprecia en la Figura 1.8, las filas 5ª y 6ª (las más cercanas al fuelle y denominadas respectivamente de bajos fundamentales y de contrabajos, aunque globalmente denominadas “bajos”) son los mismos “bajos pedales” que hemos mencionado antes (cuando se toca sobre el manual de bajos libres se les denomina bajos pedales y cuando se interpreta sobre el manual de bajos standard se les llama bajos y contrabajos). Estos bajos pedales son notas sueltas según un círculo de quintas justas siempre contenidas dentro de una octava de tesitura: de un Mi a un Re#. Según la

contradictorias entre sí y que durante el siglo XIX existió tal variedad de acordeones que a menudo es difícil decidir si un instrumento podría llamarse acordeón o no. Así, por ejemplo, no existe consenso sobre si instrumentos del citado siglo, como pueden ser la *flutina* o la *armoniflauta*, fueron acordeones o no, mientras existen y existieron otros, tales como la *physarmonica*, el *orgue expressif*, el armonio, la concertina o el bandoneón, que organológicamente están más próximos a los acordeones actuales que los acordeones del siglo XIX. Para una discusión detallada de las fuentes, véase [Hermosa 2013].

Tradicionalmente [Monichon 1985, Ricot et al 2005] se ha convenido en que el antecesor de todos los instrumentos de lengüeta libre soplada es el tcheng chino. El tcheng es un órgano de boca: consta de una calabaza que recibe aire por una boquilla y unos tubos de bambú que actúan como resonadores y que llevan unas lengüetas metálicas libres que funcionan por aspiración o por compresión. Cada tubo tiene un agujero en un lateral y el intérprete tapa con los dedos el agujero de los tubos que le interesa que no suenen. Dependiendo de las fuentes consultadas, este instrumento aparece dentro de un intervalo de tiempo tan extenso como el comprendido entre los años 3000 y 1100 a.d.C. [Hermosa 2013].

Sin embargo, otros autores [Miller 1981] proponen una línea cronológica basada en la sencillez de los instrumentos. Así, parte de la guimbarda o arpa de boca como antecesor de todos los instrumentos de lengüeta libre metálica. Aunque su origen se pueda remontar al Paleolítico, no hay constancia documental de su presencia hasta el siglo IV a.C., en China. La primera referencia de la lengüeta libre conocida en Europa data en torno al año 0, en la Francia romana [Hermosa 2013]. Este instrumento consta de una lengüeta metálica fijada en una de sus extremidades a un soporte (metálico o de bambú). Dependiendo del tipo de arpa, el soporte se coloca entre los labios o los dientes del intérprete. El sonido se produce pulsando con un dedo la lengüeta y modulándolo después mediante la forma de toda la cavidad bucal. Posteriormente aparecerían las trompas de

lengüeta libre, las flautas de lengüeta libre y, por fin, las flautas de lengüeta libre con calabaza, entre ellos el tcheng. Tanto la guimbarda como el tcheng han perdurado hasta nuestros días.

La primera referencia confirmada conocida de la presencia en Europa de órganos de boca asiáticos data de 1636 [Hermosa 2013], cuando Marin Mersenne publicó en Francia el libro "Harmonie Universelle" en el que se describe un instrumento identificable como un khene de Laos [Mersenne 1636].

En 1770 [Mirek 1992, Monichon 1971, Macerollo 1980, Doktorsky 1998, Hermosa 2013] el danés Christian Gottlieb Kratzenstein aplica la lengüeta libre a su máquina de hablar, que podía articular musicalmente las cinco vocales. Comienza así la invención de una serie de instrumentos que buscan reunir las tres características siguientes: aplicación de la lengüeta metálica libre, capacidad expresiva (posibilidad de tocar con intensidad variable de sonido) y ser instrumentos portátiles con sonido mantenido.

En 1780 Kratzenstein construyó, en colaboración con el constructor de órganos Franz Kirsnik, el primer órgano de lengüeta libre. A partir de la invención de este órgano se patentaron diversos instrumentos similares que lo mejorarían, entre los que destacan el *organ-expressif* de Gabriel Joseph Grenié de 1810 y la *physarmonica*, que Anton Häckl patentó en Viena en 1818. Finalmente, Alexandre-François Debain inventaría el armonio en 1840, patentándolo en 1842. Y en 1828 Christian Friedrich Ludwig Buschmann patentó la armónica. [Hermosa 2013].

En mayo de 1829 [Monichon 1985, Doktorsky 1998], en Viena, Cyril Demian patenta el "accordion", un pequeño instrumento de medidas aproximadas de 22 cm x 9 cm x 6 cm con tres pliegues de cuero haciendo de fuelle y con cinco teclas en la mano derecha, cada una de las cuales daba un acorde diferente al abrir que al cerrar.

En Londres, en junio del mismo año de 1829 [Monichon 1985, Doktorsky 1998, Hermosa 2013], el físico inglés Charles Wheatstone patenta

la concertina, con dos manuales, derecho e izquierdo, emitiendo ambos notas sueltas en lugar de acordes. Como hemos dicho, este instrumento se parecía mucho más en cuanto a concepción al acordeón actual que el *accordion* de Demian.

Siguiendo a [Hermosa 2013] hay que decir que no se puede decir que Demian inventó el acordeón del mismo modo que decimos que Sax inventó el saxofón o que Wheatstone inventó la concertina. Demian patentó un juguete, un instrumento incompleto que necesitó unas grandes mejoras organológicas para poder ser un instrumento apto para hacer música. El primer instrumento de teclado de lengüeta libre cuyo fuelle era accionado por el brazo izquierdo del intérprete fue el órgano de Kirsnik-Kratzenstein de 1780, mucho más parecido al acordeón actual que el *accordion* de Demian de 1829. La concertina y el armonio, en cuanto a concepción melódica y polifónica, son también mucho más parecidos al acordeón actual que el *accordion* de Demian. Algunas fuentes citan como el primer acordeón la *Handaoline* patentada en 1822 por Christian Friedrich Ludwig Buschmann, un instrumento similar a la armónica, pero en el que el aire era insuflado mediante un fuelle.

En 1831 [Monichon 1971, Monichon 1985, Gervasoni 1986], en París, Mathieu François Isoard y Pichenot Jeune transforman el acordeón de Demian de forma que cada tecla emite un solo sonido en lugar de un acorde. Este sonido es diferente al abrir y al cerrar.

En 1840 [Monichon 1971, Monichon 1985] Léon Douce inventa un acordeón (acordeón armonioso) que, por primera vez y gracias a un fuelle doble, da el mismo sonido al abrir que al cerrar. En él introduce, también por vez primera, ocho teclas en el manual izquierdo. Este sistema unisonoro (misma nota al abrir que al cerrar) no tuvo éxito y no se impondría hasta final del siglo (mediante la fijación de sendas lengüetas iguales sobre cada una de las dos caras de una plaqueta metálica).

En 1846 [Monichon1971, Monichon1985, Macerollo1980] Jacob Alexandre, constructor ruso de órganos que trabaja en París, crea los primeros acordeones con registros.

En 1853 [Hermosa 2013] Auguste Alexandre Titeux y Auguste Théopile Rousseau patentaban el *accordéon-orgue*, el primer acordeón unisonoro con teclado tipo piano en su manual derecho.

En una fecha no bien determinada, debido a la disparidad de lo relatado en las fuentes, pero que estaría entre 1850 y 1891 [Maurer 1983, Mirek 1992, Monichon 1971, Monichon 1980, Doktorski 1998, Macerollo 1980], aparece el sistema actual de botones ordenados por semitonos para el manual derecho (disposición por semitonos y unisonoro).

Hacia finales del siglo XIX aparece el actual sistema de bajos standard para el manual izquierdo (MI). No obstante, no hay consenso en cuanto a la fecha y autor de la invención [Hermosa 2013].

No sólo hubo acordeones con bajos y acordes en el manual izquierdo, sino que hubo numerosos intentos de tener notas sueltas en ese manual. Tampoco en este caso hay consenso en decidir quién fue el pionero [Hermosa 2013]. Lo que está claro es que desde finales del s. XIX los acordeonistas tuvieron el deseo de poder tocar melodías en su manual izquierdo y diversos artesanos encontraron más o menos en los mismos años, diferentes soluciones a esa necesidad

En fechas comprendidas entre 1898 y 1910 [Monichon 1971, Macerollo 1980, Kymäläinen 1994, Hermosa 2013] aparecen los primeros acordeones de bajos libres añadidos. A la botonera izquierda de acordes prefabricados se le añaden unas filas de botones que dan notas sueltas (los bajos libres añadidos).

Por último, comienzan a aparecer mecanismos convertidores que transforman parte de los bajos standard del manual izquierdo en una botonera de notas sueltas (acordeón mixto de bajos convertibles,

“convertor”). Las diversas fuentes no se ponen de acuerdo en cuanto a la fecha y autoría de la invención: Bélgica en 1911 por un autor desconocido [Macerollo 1980], el ruso Piotr Sterligov en 1929 o el francés Julez Prez en 1929 en Bélgica [Hermosa 2013]. Han existido diversos sistemas de *convertor*, siendo el descrito en el apartado 1.2.1 el que finalmente se ha adoptado mayoritariamente (las filas de acordes de los bajos standard se convierten en cuatro filas de botones ordenados cromáticamente, siendo la cuarta fila repetición de la primera; las filas quinta y sexta emiten notas graves ordenadas por quintas, como en el manual de bajos standard).

1.4. LA LENGÜETA LIBRE. FABRICACIÓN Y MONTAJE DENTRO DEL ACORDEÓN

1.4.1. Descripción del montaje de las lengüetas libres dentro del acordeón

Los elementos activos del acordeón son las lengüetas libres estimuladas por el flujo de aire inducido por el fuelle. En la Figura 1.9 hemos esquematizado la versión más simple de una lengüeta libre de acordeón, para mostrar los elementos básicos constituyentes: una plaqueta metálica (también llamada portalengüetas o piastrino), la propia lengüeta y el remache. Uno de los extremos de la lengüeta está remachado a un lado de la plaqueta, mientras que el otro extremo queda libre para vibrar a un lado y otro de la abertura practicada en la plaqueta.

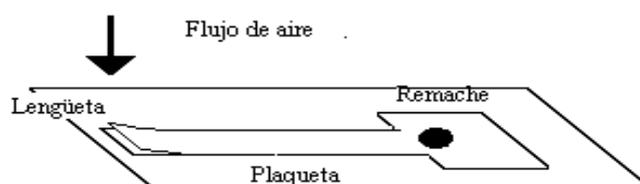
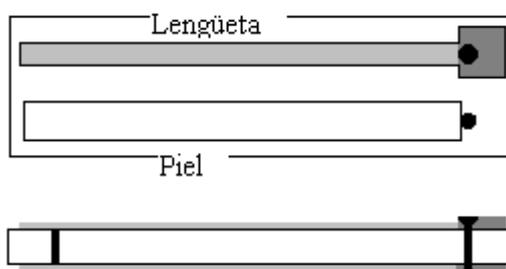


Figura 1.9: Una lengüeta libre sobre su plaqueta.

Para que la vibración de la lengüeta sea posible debe haber un buen ajuste entre la abertura de la plaqueta y la lengüeta. Además, la lengüeta sólo vibrará cuando el aire provenga del lado de la plaqueta sobre el que la lengüeta está fijada. Por el contrario, si el aire fluyera desde el otro lado de la plaqueta sobre el que la lengüeta está remachada, la lengüeta tan solo se doblaría hacia fuera de la plaqueta sin darse vibración ninguna. Es además una lengüeta llamada libre, puesto que en su movimiento de oscilación no choca contra el soporte sobre el que está sujeta. En el Capítulo 2 estudiaremos más en detalle la física de la lengüeta del acordeón en el contexto de las lengüetas como generadores de vibraciones automantenidoas.

En realidad, el conjunto lengüeta más plaqueta es un poco más complejo (Figura 1.10). Cada plaqueta lleva dos aberturas paralelas. Sobre cada una de estas aberturas se remacha una lengüeta: una lengüeta sobre una abertura en una cara, y la otra lengüeta sobre la otra abertura pero en el otro lado de la plaqueta. En el lado opuesto de la abertura donde se remacha cada lengüeta, cubriendo totalmente dicha abertura, se pega una tira de cuero (o de plástico). Esta actúa como una válvula que permite pasar el aire en un sentido pero no en el contrario. De este modo, una lengüeta funciona cuando el fuelle se cierra y la otra cuando el fuelle se abre. Cada botón (o tecla) se conecta a una válvula o zapata (ver apartado 1.2.1) que va a controlar las dos lengüetas sobre la misma plaqueta. Si las dos lengüetas son iguales, la nota emitida al abrir el fuelle y al cerrarlo es la misma. La acción se denomina doble. Si las lengüetas a cada lado de la plaqueta son diferentes, el sonido emitido es diferente al abrir y cerrar y la acción se dice simple. En un acordeón de concierto la acción es siempre doble.



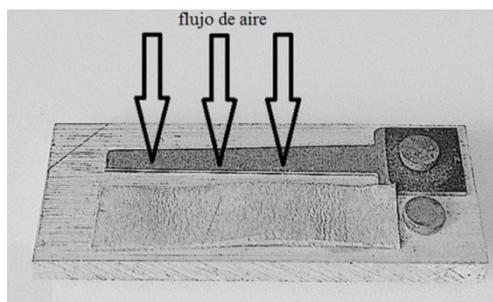


Figura 1.10: Dos lengüetas iguales dispuestas sobre los dos lados de una plaqueta.

1.4.2. Fabricación de las lengüetas libres

Examinemos ahora los pasos en la producción de una lengüeta. Para comenzar, consideraremos los materiales. Las plaquetas están hechas de duraluminio (una aleación de aluminio, cobre, magnesio y manganeso) y las lengüetas de acero templado [Alberdi et al. 2005-2007]. Esta elección no es casual. Por un lado, la misión de la plaqueta es soportar la lengüeta, de modo que hay un gran número de plaquetas dentro de cada acordeón. Como el aluminio tiene una densidad másica baja (2.7 kg/m^3), el peso del acordeón es menor usando aluminio que empleando otros metales. Cuanto más ligeros sean los materiales, más manejable será el acordeón y, de modo general, ello suele ir acompañado por el empleo de elementos constituyentes de mejor calidad. Por otro lado, el elemento que se mueve y produce el sonido es la lengüeta de acero. El acero templado tiene características especiales concernientes a rigidez y ductilidad, características que se refieren a propiedades elásticas del material para las que se han definido varios módulos, medibles experimentalmente y que definen su comportamiento vibracional. En concreto, una propiedad importante de los materiales es el llamado módulo de tensión elástica, o módulo de Young. Por ejemplo, los aceros de baja aleación tienen módulos de Young entre 200 y 207 GPa , los aceros inoxidable entre 190 y 200 GPa , y el aluminio unos 69 GPa . Este valor tiene una influencia importante en la vibración de la lengüeta. Los materiales con un valor alto del módulo de Young se consideran buenos. De acuerdo con ello, se prefiere el acero al

aluminio en la fabricación de lengüetas. Además, para mejorar el módulo de Young, el acero puede ser templado al calor.

La influencia de la lengüeta en la calidad sonora del acordeón es vital. Los fabricantes clasifican las lengüetas en cuatro grupos en orden creciente de calidad y de cantidad de trabajo manual: "comerciales" (*commercials*), "acabadas a mano" (*hand-finished*), "tipo a mano" (*hand-type*) y "hechas a mano" (*hand-made*) [Alberdi et al. 2005-2007, Benetoux 2002, Benetoux 2005].

1.4.3. Montaje y afinación de las lengüetas

Una vez que se han elegido los materiales, los fabricantes tienen que elegir la forma de las lengüetas. El material de las lengüetas, su grosor y su longitud rigen la velocidad de vibración, y por tanto la altura del sonido emitido.

En diferentes acordeones se pueden encontrar distintas formas de lengüeta, más rectangulares o más trapezoidales. Las lengüetas se cortan y se pulen usando una técnica especial que evita el recalentamiento del acero.

Simultáneamente, las plaquetas se cortan de una plancha de aluminio a la que se les realizan unos agujeros para las lengüetas y los remaches. Y entramos así en la siguiente etapa: el montaje de las lengüetas sobre las plaquetas.

La lengüeta se fija a la plaqueta de duraluminio por medio de un remache, utilizando un martillo y un yunque en el caso de las lengüetas 'tipo a mano' y 'hechas a mano' (en las de menor calidad se fijan a máquina). La lengüeta debe estar bien centrada y ajustada sobre la abertura de la plaqueta para asegurarse una buena respuesta y un buen sonido.

Cuanto menor sea el espacio (menor "luz") entre la lengüeta y el orificio de la plaqueta sobre la que se coloca aquella, más rápida será la respuesta de la lengüeta y mejores *pianissimi* se podrán lograr [Alberdi et al. 2005-2007].

Después del ensamblaje, la lengüeta se afina usando un fuelle que le proporciona aire. El sonido de la lengüeta es comparado con el de un sonido de referencia. Si la afinación no es satisfactoria es necesario quitar material de la lengüeta: de la punta para elevar el tono y del cuerpo de la lengüeta, sobre todo cerca del remache, para bajarlo.

A veces es preciso realizar una segunda afinación sobre grupos de lengüetas dispuestas para crear ciertos efectos de sonido característicos de algunos tipos de acordeón. Así, para lograr el efecto *musette*, caracterizado por un sonido tremolado, se disponen dos juegos de lengüetas iguales pero ligeramente desafinadas una respecto a la otra para cada nota.

Los batidos generados de este modo dan un efecto característico del acordeón popular (de hecho, en algunos tipos de acordeones destinados principalmente a música folclórica se disponen tres e incluso cuatro juegos de lengüetas ligeramente desafinadas respecto al unísono). Es un efecto que se evita en los acordeones de concierto.

A continuación, tal y como comentábamos antes, la abertura de la lengüeta es cubierta con una tira de piel o de plástico. Su función es moderar el flujo de aire y evitar la fuga de aire a través de la abertura de la lengüeta que no es excitada.

En el acordeón Pignini Sirius con el que hemos trabajado, todas las lengüetas, hasta las correspondientes a la nota Sol₄, llevan su correspondiente tira de piel. Desde la nota Sol_{#4} hasta la nota Do₆ tienen una tira de plástico en vez de piel. Desde esa nota hasta la nota más aguda, Do_{#8}, ya no hay ningún tipo de tira.

Después, y como se ve en la Figura 1.11, las plaquetas se montan con cera sobre los llamados somieres, peines o bloques de lengüetas, unos cofrecillos de madera que poseen el mismo número de aberturas (sobre las que se colocan las propias plaquetas) que de alvéolos (pequeñas cavidades abiertas practicadas en un lateral del somier y por las que el aire movido por

el fuelle llega o sale de las lengüetas). Normalmente los somieres están hechos de madera de álamo y otras maderas varias.



Figura 1.11: Lengüetas y plaquetas dispuestas sobre un somier.

En los acordeones de concierto de más calidad, las lengüetas correspondientes a las notas más graves de la mano izquierda (unas dos octavas) no se montan sobre plaquetas individuales, sino que todas las lengüetas se remachan directamente sobre una placa única para aprovechar así la resonancia de ésta (Figura 1.12 y Figura 1.13).



Figura 1.12: Detalle de lengüetas graves remachadas directamente sobre una placa metálica común, a su vez colocada sobre un bloque de madera común.

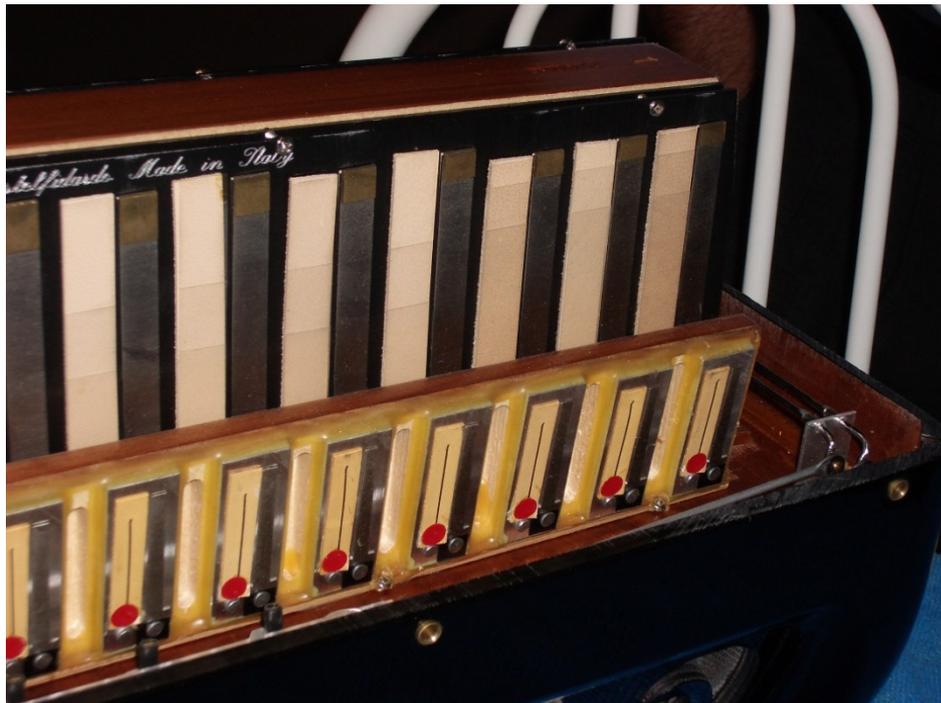


Figura 1.13: Una visión más amplia de dos bloques de lengüetas. Las más graves van remachadas sobre una placa común, mientras que las correspondientes a tesituras medias o agudas van montadas sobre plaquetas individuales que luego se colocan con cera sobre un bloque de madera común.

En algunos modelos este procedimiento de placa única se aplica a todas las lengüetas del acordeón (ver Figura 1.14).



Figura 1.14: Lengüetas de un acordeón ruso de la marca "Jupiter". Todas las lengüetas se remachan directamente sobre una placa metálica común.

Los alvéolos se hallan tapados por las válvulas o zapatas; cuando pulsamos un botón, la zapata correspondiente deja abierto el alvéolo asociado a dicha zapata, de modo que el aire movido por el fuelle puede pasar a través de las dos lengüetas colocadas a cada lado de la plaqueta correspondiente al alvéolo destapado. Una lengüeta (las interiores en la Figura 1.11) vibrará al abrir el fuelle y la otra (las externas en la Figura 1.11) al cerrar.

Cuando las lengüetas son dispuestas en los peines y colocadas dentro del acordeón, el instrumento estará ya completamente ensamblado y ambos manuales (derecho e izquierdo) serán afinados el uno con el otro para dar por finalizado el proceso. Así, para terminar este apartado, en la

Figura 1.15 se indica esquemáticamente cómo funciona el mecanismo botón (tecla)-producción de sonido por la lengüeta.

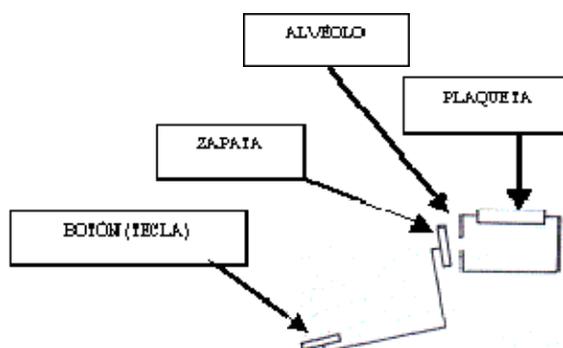


Figura 1.15: Esquema de la acción botón-lengüeta en la producción del sonido.

El mecanismo real es un tanto más complejo. Ya se explicó anteriormente cómo los acordeones de concierto tienen cuatro juegos independientes de voces en su manual derecho. Los bloques de lengüetas asociados a cada voz van emparejados dos a dos en el manual derecho. Dos para las dos voces en *cassotto* y otros dos para las dos voces fuera de *cassotto*.

De este modo, cuando se pulsa un botón o tecla, se van a elevar dos válvulas al mismo tiempo, una por cada grupo de bloques emparejados. El que suenen las dos lengüetas de ambas voces o solo una (y esto de manera independiente para cada una de las dos válvulas) va a depender de la registración elegida. Los registros hacen que unas láminas correderas bloqueen o liberen el paso del aire a través de cada uno de los cuatro alvéolos tapados por cada pareja de válvulas. En la Figura 1.16 podemos observar un detalle de bloque real en el que se aprecian dos filas de alvéolos, correspondientes a dos voces diferentes. Cada válvula bloquea o libera al mismo tiempo dos de estos alvéolos emparejados.

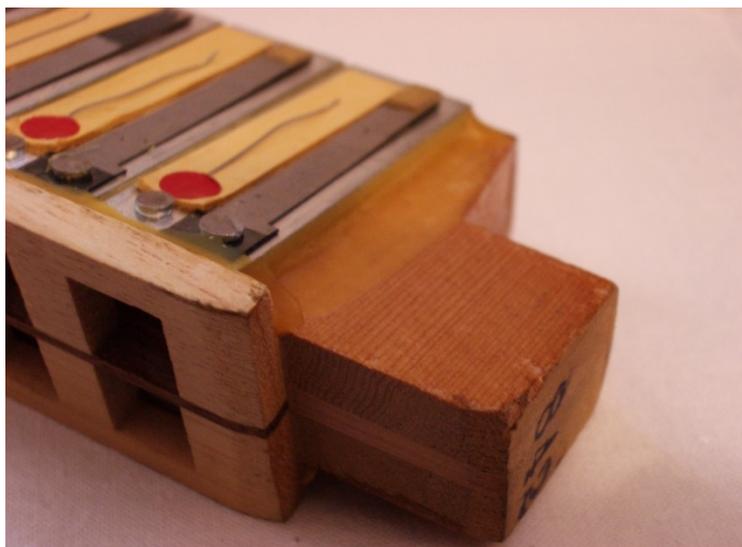


Figura 1.16: Detalle de un bloque de lengüetas. Cada bloque soporta dos juegos independientes de lengüetas. Las cámaras de la fila inferior y las cámaras de la fila superior están incomunicadas; corresponden a juegos independientes de lengüetas.

En los acordeones sin *cassotto* (o en el manual izquierdo de cualquier acordeón) todos los bloques de lengüetas se alinean de tal manera que cuando se pulsa una tecla o botón una sola válvula deja abiertos a la vez todos los alvéolos asociados a las voces que suenan. El sistema de registros será también aquí el que finalmente determine cuáles de esas voces suenan o no.





Capítulo 2

Fundamentos teóricos, Objetivos e Hipótesis

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS, OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. LA FÍSICA DE LA LENGÜETA LIBRE

A continuación se realiza una descripción de los tipos de lengüetas existentes en el interior de un acordeón y del mecanismo físico de producción sonora.

2.1.1. Generación del sonido en los aerófonos de lengüeta

En la mayoría de instrumentos de viento el sonido se crea haciendo incidir la corriente de aire bien contra algún tipo de abertura practicada en el cuerpo del instrumento (por ejemplo, la familia de las flautas, silbatos y tubos flautados del órgano), o bien mediante la circulación del aire a través de algún tipo de apertura que varía debido a la presencia de una lengüeta, que va a actuar como válvula de paso, dejando pasar el aire en una serie de pulsos que inyectan la energía precisa para iniciar y mantener las oscilaciones. Esta lengüeta puede ser la constituida por los propios labios del intérprete (como es el caso de los instrumentos de viento-metal) o una lengüeta material que al paso del aire puede chocar o no contra su propio soporte u otra parte de ella misma (por ejemplo, la familia del clarinete o del oboe en el primer caso y los instrumentos de lengüeta libre en el segundo).

En algunos de estos instrumentos va a ser necesaria la presencia de un tubo resonador para colaborar en el mantenimiento de las oscilaciones. En el tubo se forman ondas estacionarias y la función de la lengüeta consiste en permitir el paso del aire exterior justo en los momentos en que sea necesario para que dichas ondas estacionarias se mantengan. Se establece un régimen de cooperación entre tubo y lengüeta en el que el tubo domina a la lengüeta en mayor o menor medida, determinándose las frecuencias a las que suena el instrumento (instrumentos de viento madera y de viento metal).

Sin embargo, en otros instrumentos, el mecanismo de oscilación de la lengüeta y el sonido emitido no dependerá de la influencia acústica de los volúmenes a la entrada y salida de la válvula y será la lengüeta la que controle la frecuencia final de vibración. Este tipo de válvula oscilante se suele denominar lengüeta fuerte o dominante [Ricot et al. 2005]. Veremos más adelante cuál es el mecanismo físico que asegura el mantenimiento de las vibraciones.

Al estudiar la física de la vibración de la lengüeta libre del acordeón hay que distinguir dos casos, diferentes pero relacionados entre sí, ambos de interés en nuestro trabajo:

1. Lengüeta punteada: el extremo libre de la lengüeta, situada esta en el vacío o en el seno de un fluido en reposo, es desplazado inicialmente de su posición de equilibrio y liberado posteriormente para iniciar así las vibraciones en torno a dicha posición. Se supondrá que las lengüetas vibran sin pérdidas por amortiguamiento. Veremos que en este caso la lengüeta va a vibrar con una frecuencia fundamental de vibración acompañada por parciales no armónicos.

2. Lengüeta desplazada de su posición de equilibrio debido a una corriente continua de aire que pasa por el pequeño espacio dejado por la lengüeta y el soporte sobre el que va montada. Este es el modo real de producción de sonido en un aerófono de lengüeta libre. La lengüeta vibrará de manera mantenida con una frecuencia fundamental ligeramente inferior a la frecuencia fundamental del primer caso. Ahora bien, la función de válvula que la lengüeta ejerce sobre el paso del aire es un mecanismo no lineal, lo que va a tener como consecuencia la generación de toda una serie de parciales armónicos que podrán ser tan importantes (al menos los de orden más bajo) como el modo fundamental.

El interés del estudio del mecanismo de generación de las vibraciones automantenido en el caso de una lengüeta libre vibrando en el seno de una

corriente de aire es evidente, puesto que, como hemos dicho, es el mecanismo de generación de sonido en un aerófono de lengüeta libre.

El caso de la lengüeta punteada es de nuestro interés por un doble motivo. En primer lugar, hemos mencionado que las frecuencias fundamentales de vibración de ambas situaciones están relacionadas. La lengüeta libre haciendo de válvula de paso de la corriente de aire va a vibrar principalmente según el modo fundamental de vibración de la lengüeta punteada, con una frecuencia ligeramente inferior. Así pues, nos interesa calcular sus modos normales de vibración. Y en segundo lugar, en el Capítulo 4 estudiaremos cómo cambia la frecuencia fundamental, el timbre y los modos normales de vibración de una lengüeta libre cuando esta se carga en el extremo libre. Esto responde al hecho de que las lengüetas más graves utilizadas dentro de un acordeón llevan una carga en su punta, para lograr frecuencias más graves sin aumentar excesivamente su tamaño. Nos interesa, por tanto, describir el corpus teórico básico que nos permita abordar posteriormente dichos experimentos.

Millot y Baumann [Millot & Baumann 2007] han llevado a cabo una completa revisión de las investigaciones previas sobre la dinámica de la lengüeta libre: la mayor parte de los artículos que abordan el modelado de las lengüetas libres lo hacen desde la perspectiva del dominio de frecuencias y del umbral para la oscilación autónoma de la lengüeta [Fletcher 1993, Johnston 1987, Tarnopolsky et al. 2001, Millot et al. 2001, Dieckmann 2006]. El modelo básico seguido en estos trabajos es el establecido por Fletcher [Fletcher 1993]. Son menos los trabajos que tratan la dinámica de la lengüeta libre [Bahnson 1998, Cottingham, Lille & Reed 1999, Cottingham & Busha 1999, Debut & Millot 2001, Cottingham 2005]. El primer intento de construir un modelo de vibración de una lengüeta libre en el dominio temporal lo encontramos en [St Hilaire et al. 1971]. Un estudio posterior, para las lengüetas del órgano lo constituye el artículo [Miklos et al. 2003]. Más tarde, [Ricot et al. 2005] verifican el modelo de St Hilaire et al. para una lengüeta de acordeón y dan cuenta de un modelo teórico tanto para la

vibración de la lengüeta libre como para el sonido percibido a una cierta distancia (campo lejano). Por último, en el citado trabajo de [Millot & Baumann 2007] se construye un modelo de vibración prestando especial atención a los detalles geométricos de la lengüeta y su posición sobre la plaqueta metálica sobre la que va montada. Los dos últimos textos citados se centran en el caso particular del acordeón.

Consideremos primero las vibraciones de una barra fija-libre. Dejamos para el Apéndice 1 el análisis, con cierto nivel de detalle, de los modelos de Fletcher y de Ricot et al.

2.1.2. Vibraciones de una barra fija-libre

Una barra es un elemento estructural capaz de soportar cargas trabajando principalmente a flexión. Las barras se caracterizan por la forma de su sección transversal, su longitud y su material. Se clasifican también por la forma en que son soportadas: los puntos de soporte restringen los movimientos de flexión lateral o rotacional para satisfacer ciertas condiciones de estabilidad y limitar las deformaciones hasta un cierto punto. Una barra fija en un extremo y libre en el otro se denomina barra fija-libre.

Las barras son sistemas espacialmente continuos con infinitos grados de libertad. Una frecuencia natural, o resonancia, es aquella a la que el sistema muestra una gran amplitud de vibración al ser excitado por una pequeña fuerza. Un sistema con infinitos grados de libertad tiene un número infinito de frecuencias naturales y un modo de vibración, con su forma concreta, para cada una de estas frecuencias naturales.

La cantidad de amortiguamiento en una estructura afecta a la resonancia. Si no hubiera amortiguamiento, cabría esperar que pudiera obtenerse un movimiento infinito a partir de una fuerza muy pequeña. Según aumenta el amortiguamiento, el movimiento que se puede lograr a partir de una fuerza dada se va reduciendo. Además, la existencia de

amortiguamiento hace que las frecuencias naturales de vibración disminuyan en su valor.

Si una estructura tiene más de una frecuencia de resonancia, la más baja se denomina "fundamental". Esta frecuencia fundamental es un parámetro importante en el análisis dinámico de estructuras y en sus aplicaciones. La frecuencia fundamental de vibración de una barra depende de las condiciones de contorno y carga y, en algunos casos, puede calcularse mediante cálculo manual utilizando algunas fórmulas sencillas obtenidas mediante métodos bien analíticos o bien aproximados [Kinsler et al. 1995, Balachandran & Magrab 2009].

Históricamente, el primer modelo importante de barras fue el basado en la teoría de Euler-Bernoulli (teoría clásica de barras o de barras delgadas). Este modelo, establecido en 1744, incluye la energía de esfuerzo debida al doblado y la energía cinética causada por el desplazamiento lateral de la barra. En 1877, Lord Rayleigh mejoró este modelo al incluir el efecto de la inercia rotacional en las ecuaciones que describen las vibraciones longitudinales y de flexión de las barras, mostrando la importancia de esta corrección a altas frecuencias.

En los años 20 del pasado siglo, Timoshenko desarrolló un modelo matemáticamente riguroso para describir las vibraciones transversales de barras gruesas, incluyendo como novedad el efecto de la deformación por cizallamiento. Durante los últimos años, el establecimiento de modelos dinámicos cada vez más exactos para el campo de los manipuladores robóticos de uniones flexibles constituye un problema desafiante y todavía abierto [Loudini 2010].

La lengüeta libre del acordeón puede ser considerada en buena aproximación como una barra fija-libre dentro del modelo de Euler-Bernoulli. Comenzamos por tanto con un repaso de los aspectos básicos de la vibración libre de una barra fija-libre. Esta revisión incluye, en primer lugar, las frecuencias naturales y modos de vibración de una barra fija-libre de

sección constante y, en segundo lugar, las frecuencias naturales y los modos de vibración de una barra fija-libre de sección constante con masas cargadas en el extremo libre. Se supondrá que las barras vibran sin pérdidas por amortiguamiento.

2.1.2.1. Vibraciones transversales de una barra fija-libre

Consideremos una barra homogénea de longitud L , con una sección transversal S y con una masa m . La coordenada x va a medir las posiciones a lo largo de la barra, mientras que la coordenada y medirá los desplazamientos transversales de la barra desde su posición de equilibrio. Cuando la barra se dobla, la parte inferior se comprime y la parte superior se estira (o viceversa). En algún lugar entre la parte superior y la parte inferior de la barra existirá un eje neutro que no cambia de longitud.

Para las vibraciones transversales, la ecuación del movimiento es [Kinsler et al. 1995, pp. 105-106]:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\kappa^2 c^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad (2.1)$$

donde $c = \sqrt{E/\rho}$ es la velocidad de fase, E es el módulo de Young de la barra, ρ su densidad, y la constante κ (definida por $\kappa^2 = \frac{1}{S} \int r^2 dS$, siendo r la distancia de un filamento longitudinal de la barra al eje neutro) puede considerarse como el radio de giro del área de sección transversal S , por analogía con el radio de giro de un sólido. El valor de κ para una barra con sección rectangular y espesor h (medido en la dirección y) es $\kappa = h/\sqrt{12}$. La relación entre el radio de giro y el momento de inercia de la sección transversal de la barra es $I = S\kappa^2$.

La ecuación (2.1) es válida dentro de la teoría de barras de Euler-Bernoulli. Esta aproximación se utiliza porque es simple y ofrece unas aproximaciones aceptables para muchos problemas de ingeniería [Timoshenko 1953]. No obstante, hay que tener en cuenta que el modelo de

Euler-Bernoulli tiende a sobreestimar ligeramente los valores de las frecuencias naturales [Han et al. 1999]. Los resultados son solo válidos para barras delgadas, en concreto barras para las que se verifique la condición $\kappa/L < 0.1$. Cuando se sobrepasa este ratio, se debe utilizar la teoría de Timoshenko [Timoshenko 1921, Timoshenko 1922].

La solución a la ecuación (2.1) es:

$$y(x;t) = G(t)Y(x) = \cos(\omega t + \Phi) \left(A \cosh \frac{\omega x}{v} + B \sinh \frac{\omega x}{v} + C \cos \frac{\omega x}{v} + D \sin \frac{\omega x}{v} \right) \quad (2.2)$$

donde A , B , C , y D son constantes reales que deben ser evaluadas imponiendo condiciones de contorno, y $v = \sqrt{\omega \kappa}$.

Las condiciones de contorno en los extremos de la barra dependen de la naturaleza del soporte (fijo, articulado o bisagra, libre, o solo apoyado). Cuando la barra está sujeta rígidamente en $x=0$ y libre en $x=L$, las condiciones de contorno son [Balachandran & Magrab 2009, pp. 558-559]:

$$x=0 \quad y=0 \quad \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

$$x=L \quad \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = 0 \quad (2.4)$$

Aplicando estas condiciones a la solución general (2.2), se obtiene la siguiente ecuación característica [Balachandran & Magrab 2009, p. 575]:

$$\cos(\Omega_n) \cosh(\Omega_n) + 1 = 0 \quad (2.5)$$

donde Ω_n es el n-ésimo coeficiente de frecuencia natural:

$$\Omega_n = L \sqrt{\frac{\omega_n}{c\kappa}} \quad (2.6)$$

y las frecuencias naturales permitidas vienen dadas por:

$$f_n = \frac{c\kappa}{2\pi L^2} \Omega_n^2 \quad \Omega_n = 1.875; 4.694; 7.855; \dots \quad (2.7),$$

La aplicación de condiciones de contorno limita los modos naturales a un conjunto discreto de valores. Las frecuencias de los sobretonos no son armónicas de la frecuencia fundamental.

Nótese que la frecuencia fundamental puede ajustarse variando tanto el grosor de la barra como su longitud:

$$f_1 = \frac{c\kappa}{2\pi L^2} 1.875^2 = \frac{1.875^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{mL^3}} = 0.162 \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.8)$$

El modo n-ésimo viene descrito por la expresión [Balachandran & Magrab 2009, pp. 566, 570 y 575]:

$$Y_n\left(\frac{x}{L}\right) = -\frac{1}{2} \left[\sinh\left(\Omega_n \frac{x}{L}\right) - \sin\left(\Omega_n \frac{x}{L}\right) \right] \frac{[\sinh(\Omega_n) - \sin(\Omega_n)]}{[\cosh(\Omega_n) + \cos(\Omega_n)]} + \frac{1}{2} \left[\cosh\left(\Omega_n \frac{x}{L}\right) - \cos\left(\Omega_n \frac{x}{L}\right) \right] \quad (2.9)$$

Los puntos nodales, caracterizados por la condición $Y=0$, se distribuyen irregularmente a lo largo de la barra. Hay tres tipos diferentes de puntos nodales: el nodo donde se fija la barra (caracterizado por la condición adicional $\partial Y / \partial x = 0$); los conocidos como nodos verdaderos (separados aproximadamente $\lambda/2$ entre ellos y muy cercanos a los puntos de inflexión, donde $\partial^2 Y / \partial x^2 = 0$); y los nodos adyacentes al extremo libre de la barra (no hay punto de inflexión cercano a esta última posición nodal, sino que se ve desplazado hacia el extremo libre). Debe notarse también que las amplitudes de vibración de los diversos vientres o antinodos no son iguales entre sí [Kinsler et al. 1995, pp. 106-110].

El antinodo del extremo libre presenta la amplitud de movimiento más grande. En la Figura 2.1 se muestran los cuatro primeros modos normales de la barra fija-libre.

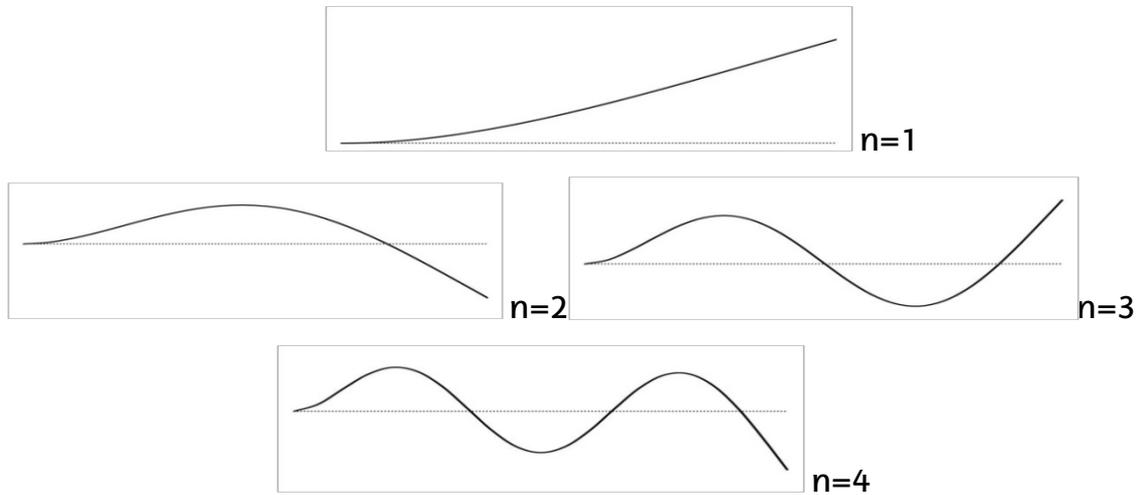


Figura 2.1: Modos 1, 2, 3 y 4 de vibración normal de una barra fija-libre.

Un procedimiento para encontrar aproximaciones a las frecuencias naturales de un sistema con parámetros distribuidos es reducirlo mediante la concentración de parámetros en cada pequeña región en forma de una masa equivalente y un elemento elástico. Así, una barra fija-libre real con inercia distribuida a lo largo de la misma puede ser transformada en una masa puntual localizada al final de una barra libre elástica sin masa, tal y como se muestra en la Figura 2.2.

Si solo se tiene en cuenta la rigidez de la barra, se verifica que una barra fija-libre, de masa m distribuida a lo largo de toda su longitud, puede transformarse en un sistema equivalente en el que toda la masa, m_e , está concentrada en el extremo libre [Balachandran & Magrab 2009, p. 34, Irvine 2012]:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{m_e L^3}} = \frac{1.875^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{mL^3}} \quad \rightarrow \quad m_e \approx 0.24m \quad (2.10)$$

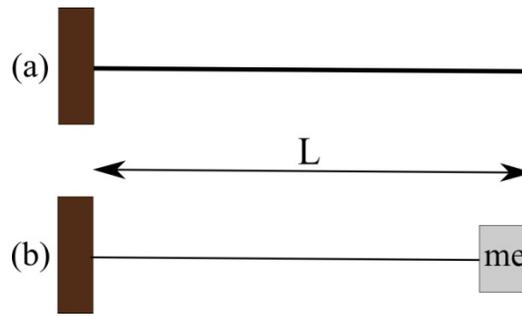


Figura 2.2: (a) Barra fija-libre con masa distribuida; (b) sistema equivalente con barra sin masa y masa equivalente en el extremo libre.

2.1.2.2. Vibraciones transversales de una barra fija-libre con una masa en el extremo libre

Consideremos una masa M colocada sobre el extremo libre de una barra homogénea de longitud L , con una sección transversal uniforme S , y con una masa m . El sistema consiste por tanto en una masa M soportada por un elemento flexible simple cuya masa m no es despreciable.

Las condiciones de contorno en los extremos de la barra son [Balachandran & Magrab 2009, pp. 558-559]:

$$x=0 \quad y=0 \quad \frac{\partial y}{\partial x}=0 \quad (2.11)$$

$$x=L \quad EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -J_M \frac{\partial^3 y}{\partial x \partial t^2} \quad EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = M \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

donde J_M es el momento de inercia de la masa M .

Aplicando estas condiciones a la solución general (22), se obtiene la siguiente ecuación característica [Balachandran & Magrab 2009, pp. 575]:

$$\Omega_n \frac{M}{m} [\cos(\Omega_n) \sinh(\Omega_n) - \sin(\Omega_n) \cosh(\Omega_n)] + \cos(\Omega_n) \cosh(\Omega_n) + 1 = 0 \quad (2.13)$$

resultando, para el n -ésimo modo [Balachandran & Magrab 2009, pp. 566, 570 y 575]:

$$Y_n\left(\frac{x}{L}\right) = -\frac{1}{2}\left[\sinh\left(\Omega_n \frac{x}{L}\right) - \sin\left(\Omega_n \frac{x}{L}\right)\right] \frac{\left[\sinh(\Omega_n) - \sin(\Omega_n)\right] + \frac{M}{m}\Omega_n [\cosh(\Omega_n) - \cos(\Omega_n)]}{\left[\cosh(\Omega_n) + \cos(\Omega_n)\right] + \frac{M}{m}\Omega_n [\sinh(\Omega_n) - \sin(\Omega_n)]} + \frac{1}{2}\left[\cosh\left(\Omega_n \frac{x}{L}\right) - \cos\left(\Omega_n \frac{x}{L}\right)\right] \quad (2.14)$$

Cuando M/m se hace muy pequeña, $M/m \rightarrow 0$, la ecuación característica (2.13) y la expresión (2.14) del n -ésimo modo se aproximan a las de una barra fija en un extremo y libre en el otro, (2.5) y (2.9), respectivamente. Cuando la ratio M/m es muy grande, $M/m \rightarrow \infty$, las ecuaciones se aproximan a las de una barra con un extremo fijo y el otro articulado (o bisagra) [Balachandran & Magrab 2009, pp. 575]:

$$\cos(\Omega_n) \sinh(\Omega_n) - \sin(\Omega_n) \cosh(\Omega_n) = 0 \quad (2.15)$$

$$Y_n\left(\frac{x}{L}\right) = -\frac{1}{2}\left[\sinh\left(\Omega_n \frac{x}{L}\right) - \sin\left(\Omega_n \frac{x}{L}\right)\right] \frac{\left[\cosh(\Omega_n) - \cos(\Omega_n)\right]}{\left[\sinh(\Omega_n) - \sin(\Omega_n)\right]} + \frac{1}{2}\left[\cosh\left(\Omega_n \frac{x}{L}\right) - \cos\left(\Omega_n \frac{x}{L}\right)\right] \quad (2.16)$$

El sistema puede tratarse como un elemento elástico con su masa equivalente m_e al que se carga con la masa rígida M , siguiendo el mismo procedimiento que condujo a la ecuación (2.10):

$$f_1' \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{(m_e + M)L^3}} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{(0.24m + M)L^3}} \approx \frac{f_1}{\sqrt{(1 + 4.1(M/m))}} \quad (2.17)$$

donde f_1 es la frecuencia fundamental de la barra fija-libre dada en la ecuación (2.8).

La ecuación (2.17) proporciona una fórmula aproximada para la frecuencia fundamental de una barra fija-libre con masa distribuida m y una masa concentrada M en el extremo libre. La ratio entre las frecuencias fundamentales de las barras cargadas (f_1') y sin cargar (f_1) viene dada por:

$$\left(\frac{f_1}{f'_1}\right)^2 \approx 1 + 4.1 \frac{M}{m} \quad (2.18)$$

2.1.3. Generación del sonido en los aerófonos de lengüeta libre

Pasemos ahora a estudiar el mecanismo generador de las oscilaciones automantenidoas de la lengüeta libre cuando pasa una corriente de aire a través del espacio que queda entre esta y el orificio practicado en el soporte sobre el que va remachada.

Con este tipo de excitación, el problema acústico cambia. La barra se ve sometida al campo de presiones generado por la corriente circulante, campo que se obtiene de la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes aplicadas al caso de una corriente de aire atravesando el hueco entre una lengüeta libre oscilante y su portalengüetas. La no linealidad de las ecuaciones implica la aparición de armónicos de la frecuencia fundamental de la lengüeta. Esta vibrará a una frecuencia ligeramente inferior a la frecuencia fundamental. Los parciales de la barra suelen ser mucho más débiles que los armónicos producidos por el flujo de aire y a menudo son imperceptibles.

Para describir el flujo de aire en cualquier instrumento de viento, sería necesario resolver la ecuación de Navier-Stokes [Kinsler 1995, p202, Morse & Ingard 1968, Barrero & Pérez-Saborid 2005] para flujos viscosos, en ausencia de fuerzas másicas y sin aportes volumétricos de calor:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v}(\nabla \cdot \vec{v}) \right] = -\nabla p + \left(\frac{4}{3} \mu + \zeta \right) \nabla(\nabla \cdot \vec{v}) - \mu \nabla \times (\nabla \times \vec{v}) \quad (2.19)$$

donde $\frac{Dv_i}{Dt} = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$ es la denominada derivada sustancial o material del

campo vectorial de velocidades \vec{v} siguiendo a una partícula que se mueve según la trayectoria \vec{x} , ρ es la densidad del fluido (en nuestro caso el aire),

p es la presión, ζ es la viscosidad de volumen (una medida de la energía mecánica que pierde un fluido sometido a compresión o dilatación pura) y μ es el coeficiente de viscosidad cortante (una medida de la pérdida de energía mecánica perdida por un fluido sometido a fuerzas cortantes).

Ahora bien, la principal dificultad de este tipo de acercamiento al problema reside en la no linealidad de dicha ecuación, con lo que en lugar de obtener una solución analítica debemos conformarnos con resolverla por métodos numéricos. Aunque tal solución aportaría los detalles de un flujo particular, pudiendo ser extendida al caso de un flujo variable en el tiempo, no revelaría grandes detalles acerca de los principios generales que subyacen bajo el mecanismo de la generación del sonido y su control. Es por ello más aconsejable comenzar utilizando modelos mucho más simples e incorporar los principios de dinámica de fluidos dentro de las suposiciones generales sobre el flujo del aire [Fletcher & Rossing 1998].

2.1.4. Clasificación de las lengüetas según Fletcher

Una lengüeta vibrante es, básicamente, una válvula controlada por presión: la lengüeta se abre o cierra dependiendo de cómo sea la presión relativa a uno y otro lado de la misma. De acuerdo con Fletcher [Fletcher 1993], estas válvulas pueden agruparse en tres clases diferentes, según el modo en que se desvían a causa de la presión estática aplicada a su entrada o salida. Esta entrada y salida de la lengüeta (también referidas como 'aguas arriba' y 'aguas abajo', respectivamente) se definen por la dirección del flujo de aire, independientemente de si dicho flujo es causado por una sobrepresión relativa en la entrada o por una baja presión relativa en el lado de la salida. Cada válvula se caracteriza por un doblete de símbolos (σ_1, σ_2): σ_1 es +1 si un exceso de presión p_0 aplicado a la entrada tiende a abrir la válvula, y -1 si tiende a cerrarla. Del mismo modo, σ_2 hace referencia al efecto de un exceso de presión p a la salida de la válvula: será +1 cuando un exceso de presión a la salida tienda a abrir la válvula, y -1 cuando tienda a cerrarla. Las lengüetas del tipo $(-,+)$ pueden denominarse también *inward-*

striking reeds (lengüetas batientes hacia dentro) y las del tipo $(+,-)$ *outward-striking reeds* [Helmholtz 1895]. Por analogía podríamos denominar *sideways-striking reeds* a las lengüetas de configuración $(+,+)$. Las válvulas con la configuración $(-,-)$ no parecen tener ninguna aplicación musical. Esta clasificación de las lengüetas viene representada en la Figura 2.3 [Fletcher & Rossing 1998 figura 3.4].

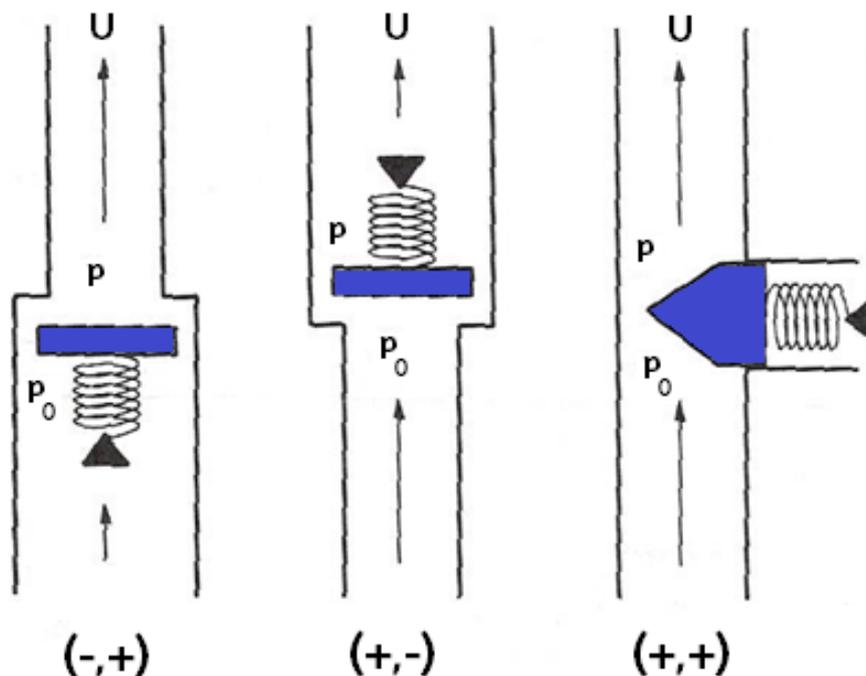


Figura 2.3: Clasificación de las lengüetas según Fletcher.

La configuración $(-,+)$ es la que nos encontramos en los instrumentos de viento madera, como clarinete, oboe y fagot. También las lengüetas libres del acordeón. Por su parte, en los instrumentos de viento metal, los labios del intérprete responderán básicamente a una configuración $(+,-)$ a bajas frecuencias y a una $(+,+)$ a altas frecuencias [Fletcher & Rossing 1998 p. 408, Richards 2003].

2.2. PERCEPCIÓN DE LOS SONIDOS MUSICALES

La música está constituida por notas (tonos o sonidos) que se caracterizan mediante tres cualidades o atributos distintos, que están especificados en cada etapa del sonido: *tono* (altura del sonido), *intensidad* (en el sentido de volumen o variaciones dinámicas) y el *timbre* (cualidad del sonido que corresponde a la posibilidad de diferenciar qué instrumento toca). Puede considerarse un cuarto atributo, la *duración* del sonido, cualidad que hace referencia al tiempo que persiste un sonido una vez que se ha iniciado y que se han desarrollado las distintas etapas temporales del mismo (ataque, estado cuasi-estacionario y decaimiento), como puede verse en el esquema simplificado de la Figura 2.4.

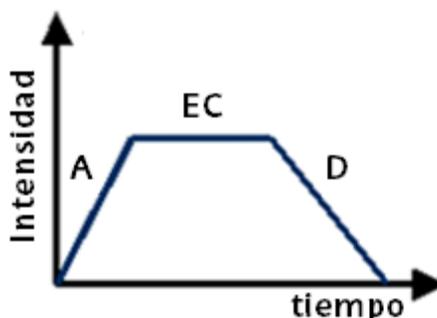


Figura 2.4: Fases de la variación de la intensidad sonora con el tiempo: ataque (A), estado cuasi-estacionario (EC) y decaimiento (D).

La forma en que los seres humanos perciben cada uno de los atributos del sonido depende principalmente de la anatomía del oído y de la salud auditiva del oyente en particular. La Psicoacústica estudia la relación de los estímulos acústicos con las sensaciones auditivas [Roederer 1995]. Para cualquier señal musical, podemos medir su espectro (frecuencia, amplitud y fase de sus parciales), y cómo estos atributos varían en el tiempo. La Psicoacústica vincula los estímulos acústicos con la percepción auditiva, cómo cada uno de los atributos subjetivos (tono, intensidad y timbre) están relacionados con los atributos físicos objetivos de una señal (espectro), permitiendo obtener una correlación física medible que nos dice cómo se perciben los sonidos.

La Psicoacústica estudia también el cambio detectable más pequeño en un estímulo (*just noticeable difference, JND*), denominado también diferencia limen o umbral diferencial (*difference limen or differential threshold*), que es una cantidad estadística [Moore 1997].

2.2.1. Tono

Un sonido producido por un instrumento de viento se genera habitualmente por la interacción no lineal entre el generador y un resonador y esa interacción no lineal da lugar a un sonido que es rico en armónicos. Dado que todos los componentes de este sonido complejo aparecen situados en estricta relación armónica, su forma de onda es periódica, excepto para el inicio y finalización del sonido (transitorios de ataque y decaimiento), y para pequeñas variaciones aleatorias, deliberadas o no, que el instrumentista introduce hacen que el instrumento suene bonito, tales como efectos de vibrato o *glissando* no temperado (pitch bending).

Para un sonido puro (monoarmónico), de acuerdo con la norma estándar ANSI de terminología acústica [ANSI S1.1-1994], el tono se define como:

Atributo de la sensación auditiva en términos del cual los sonidos pueden ser ordenados en una escala que se extiende desde bajo a alto.

Cuando escuchamos un sonido complejo, en realidad estamos escuchando muchos sonidos puros que están armónicamente relacionados. La membrana basilar detecta cada uno de estos como vibraciones separadas, siempre y cuando se separen en más de una banda crítica. Si bien los primeros cinco armónicos de un sonido están separados por más de una banda crítica, asignamos un solo tono a una serie de sonidos y, por otra parte, la fusión se produce únicamente si las frecuencias de los tonos están aproximada o totalmente relacionadas de forma armónica. En el caso de un sonido complejo el tono asignado al mismo está estrechamente relacionado con la frecuencia de la fundamental de la serie armónica.

Las notas o tonos musicales son denominados

Do, Re, Mi, Fa, Sol, La, Si (según el sistema latino de notación).

C, D, E, F, G, A, B (según el sistema inglés de notación).

Mediante un subíndice se indica la altura del sonido. El índice acústico internacional asigna el número 0 a la octava que comienza en la nota más grave de la pedalera del órgano, el Do₀ (de 16,3516 Hz). El índice cambia en una unidad ascendente o descendente al pasar a la octava superior o inferior, respectivamente.

En muchos casos, el efecto musical de un sonido complejo depende casi enteramente de las amplitudes de sus componentes de Fourier, y apenas de sus fases. Por esta razón, a menudo es suficiente describir un sonido complejo mediante el registro de amplitudes de sus componentes armónicos sucesivos, los cuales tienen frecuencias de 1, 2, 3... veces la frecuencia fundamental.

El analizador de frecuencias proporcionará una imagen del correspondiente espectro, etiquetado en el eje de abscisas por números armónicos crecientes de izquierda a derecha. Como muestra la Figura 2.5, la altura de cada barra es proporcional a la amplitud del armónico correspondiente.

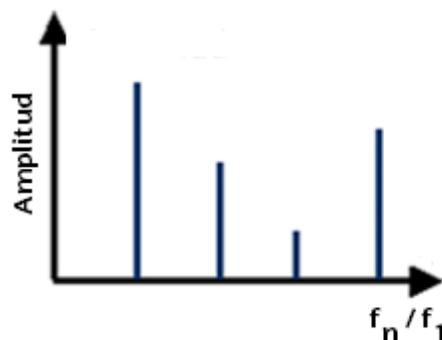


Figura 2.5: Espectro armónico de un sonido complejo.

La escala de percepción relativa de intervalos musicales considera intervalos de octavas, semitonos y cents. La octava corresponde a la

percepción de que la *misma* nota interpretada por una voz femenina y una masculina son semejantes y se diferencian en este intervalo musical, la voz masculina una octava más baja.

La escala de percepción relativa se transforma en una escala acústica absoluta anclándola en el tono estándar $La_4 = 440$ Hz. La octava corresponde al intervalo entre dos sonidos que tienen una relación de frecuencias igual a 2.

El temperamento igual de doce notas divide la octava en doce semitonos de 100 cents cada uno [Rossing et al. 2002]. En la escala temperada, las relaciones entre subdivisiones de tono son las de la Tabla 2.1:

1 octava	=	12 semitonos de la Escala temperada	=	1200 cents
		1 semitono de la Escala temperada	=	100 cents

Tabla 2. 1: Relaciones entre subdivisiones de tono en la escala temperada.

Por tanto, el número de cents contenidos en un intervalo que vaya de la frecuencia f_{or} a la frecuencia f_{fin} puede calcularse por medio de la siguiente expresión:

$$\text{número de cents} = 1200 \log_2 \left(\frac{f_{or}}{f_{fin}} \right) = 3986 \log_{10} \left(\frac{f_{or}}{f_{fin}} \right) \quad (2.20)$$

Puesto que esta expresión involucra un cociente de frecuencias, los cents así definidos no serán dependientes de la octava concreta a que pertenezcan los sonidos analizados.

La Figura 2.6 ilustra el uso de los cents para expresar intervalos musicales.

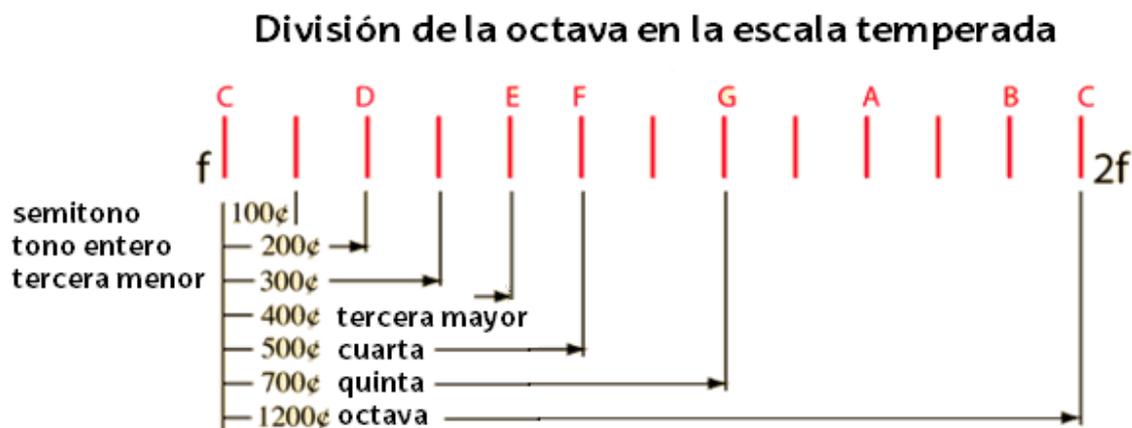


Figura 2.6: Intervalos musicales habituales y su expresión en cents.

El *pitch bending* (doblado de tono) es un efecto sonoro que se utiliza ampliamente como adorno musical. Consiste en un *glissando* no temperado (en plural, *glissandi*, proveniente del francés *glisser*, "resbalar, deslizar"). Es decir, el *pitch bending* una transición continua entre dos o más notas pasando rápidamente de un sonido hasta otro más agudo o más grave, haciendo que se escuchen todos los sonidos intermedios posibles dependiendo de las características del instrumento].

2.2.2. Intensidad (volumen sonoro)

Desde un punto de vista musical, la intensidad, en el sentido de volumen sonoro, es una magnitud subjetiva que se expresa mediante marcas dinámicas (*p*, *f*, *mf*, etc.). Pero desde el punto de vista físico, la intensidad es una magnitud objetiva, determinada por la amplitud de la presión sonora: la intensidad acústica es la cantidad de energía que fluye por unidad de tiempo a través de una unidad de área que es perpendicular a la dirección en la que las ondas sonoras están viajando. A diferencia de la sensación de intensidad o volumen sonoro, la intensidad acústica del sonido es una magnitud objetiva, independiente de la audición de un observador. Para un sonido senoidal puro de 1000 Hz, la relación aproximada entre

ambas magnitudes se encuentra en la Tabla 2.2 [Campbell & Greated 2001, p. 107]:

Niveles dinámicos musicales	Intensidad ($W m^{-2}$)	Nivel de Intensidad (dB), (referencia $10^{-12} W m^{-2}$)
<i>fff</i>	10^{-2}	100
<i>ff</i>	10^{-3}	90
<i>f</i>	10^{-4}	80
<i>mf</i>	10^{-5}	70
<i>mp</i>	10^{-6}	60
<i>p</i>	10^{-7}	50
<i>pp</i>	10^{-8}	40
<i>ppp</i>	10^{-9}	30

Tabla 2.2: Relación entre los niveles dinámicos musicales y la intensidad para un sonido puro aislado de 1000 Hz.

El oído humano puede acomodarse a un intervalo de intensidades sonoras bastante grande, desde $10^{-12} W m^{-2}$ aproximadamente (que normalmente se toma como umbral de audición), hasta $1 W m^{-2}$ aproximadamente, que produce sensación dolorosa en la mayoría de las personas. Debido a este gran intervalo y a que la sensación fisiológica de volumen sonoro no varía directamente con la intensidad, sino que cada escalón dinámico corresponde aproximadamente a multiplicar la intensidad por 10, se utiliza una escala logarítmica para describir el nivel de intensidad de una onda sonora.

El nivel de intensidad acústica, β (*intensity level, IL*), que se mide en la escala decibélica (dB), es equivalente a diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la intensidad de un sonido dado y la intensidad de un sonido de referencia:

$$\beta = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.21)$$

donde I es la intensidad del sonido e I_0 es un nivel de referencia cuyo valor es $10^{-12} \text{ W m}^{-2}$, que escogemos como el umbral de audición a 1 kHz . En esta escala el rango de niveles de intensidad sonora para el oído humano es 0 dB - 120 dB .

Si se define F_e como la amplitud efectiva de una cantidad periódica $f(t)$ de período T de la manera siguiente:

$$F_e = \sqrt{\left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T f^2(t) dt} \quad (2.22)$$

entonces, para una onda sonora uniforme que viaja en una dirección, o para las ondas esféricas radiadas por una fuente isotrópica, la intensidad y la presión están relacionadas por la expresión [Kinsler et al. 1995, pp. 157-159]:

$$I = \frac{P_e^2}{\rho_0 c} \quad (2.23)$$

donde P_e es la presión efectiva, ρ_0 la densidad del aire y c la velocidad del sonido a través del aire. A la temperatura de 20° C y una atmósfera de presión, la densidad del aire es $1,21 \text{ kg/m}^3$ y la velocidad del sonido es de 343 m/s , lo que da para el producto $\rho_0 c$, conocido como impedancia característica normal del aire, el valor de 415 rayls ($1 \text{ rayl} = 1 \text{ Pa s m}^{-1}$). Así pues, la relación entre intensidad y presión efectiva, para el aire a la temperatura de 20° C y una atmósfera de presión, viene dada por:

$$I = \frac{P_e^2}{415} \quad (2.24)$$

La mayoría de los micrófonos son sensibles a la presión en lugar de a la intensidad. Hablando estrictamente, las medidas realizadas con tales micrófonos han de ser consideradas como medidas del nivel de presión sonora (*sound pressure level SPL*) o nivel sonoro (*sound level Lp*). El nivel sonoro de un tono con presión efectiva P_e se define como:

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{P_e^2}{P_0^2} = 20 \log_{10} \frac{P_e}{P_0} \quad (2.25)$$

donde la presión de referencia es $P_0 = 20 \mu Pa$ y se mide en *dB*.

Si denotamos por $L_{p_{or}}$ el nivel de presión sonora de un sonido original, y por $L_{p_{fin}}$ el nivel de presión sonora de un sonido final, tras haberse llevado a cabo un pitch bending, definimos el cambio de nivel de presión sonora por la expresión siguiente, que nos interesará más adelante, al estudiar el pitch bending:

$$\Delta Lp = L_{p_{or}} - L_{p_{fin}} \quad (2.26)$$

La *sonoridad* es una caracterización subjetiva del sonido que representa la sensación sonora producida por el mismo a un oyente. Depende fundamentalmente de la intensidad (acústica) y frecuencia de sonido. Se dice que el *nivel de sonoridad* de un sonido o de un ruido es de *n fonios* cuando, a juicio de un oyente normal, la sonoridad, en escucha binaural, producida por el sonido o ruido es equivalente a la de un sonido puro de *1 kHz* continuo, que incide frente al oyente en forma de onda plana libre, progresiva y cuyo nivel de presión acústica es *n dB* superior a la presión de referencia P_0 .

A continuación, se representan las *curvas isofónicas*, de igual sonoridad, para tonos puros que constituyen la base para la elaboración de las curvas de ponderación. Las curvas isofónicas de la Figura 2.7 son curvas de igual sonoridad. Estas curvas calculan la relación existente entre la frecuencia y la intensidad (en decibelios) de dos sonidos para que éstos sean percibidos como igual de sonoros, con lo que todos los puntos sobre una misma curva isofónica tienen la misma sonoridad. El oído humano no es igualmente sensible a todas las frecuencias. El oído es más sensible en la banda de *2 kHz a 5 kHz*, y es menos sensible para frecuencias extremadamente altas o bajas. Este fenómeno es más notorio para bajos niveles de presión sonora que para altos. Por ejemplo, un tono de *100 Hz*

debe tener un nivel de 5 dB más alto, para dar la misma sonoridad o audibilidad subjetiva, que un tono de 1 kHz a un nivel de 80 dB (ver Figura 2.7). Otro ejemplo, si 0 fon corresponden a una sonoridad con una intensidad de 0 dB con una frecuencia de 1 kHz, también una sonoridad de 0 fon podría corresponder a una sonoridad con una intensidad de 60 dB con una frecuencia de 40 Hz.

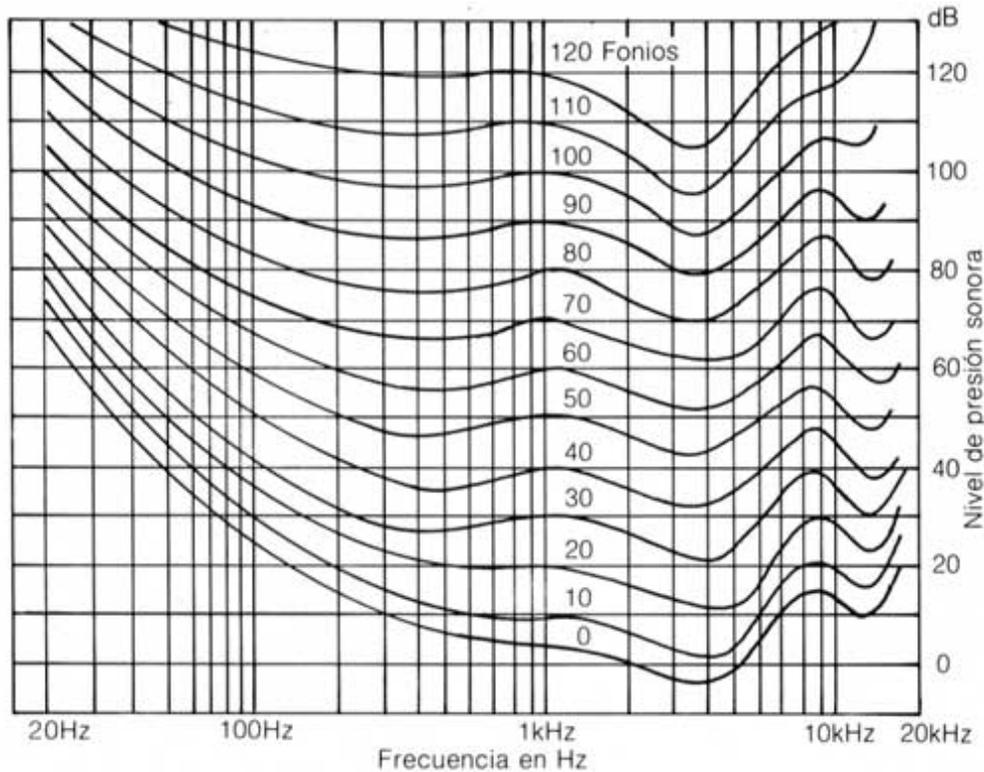


Figura 2.7: Curvas isofónicas.

Recalcar que la definición de fonio toma por referencia un sonido senoidal de 1 kHz. El fonio (o fon) está definido arbitrariamente como la sonoridad de un sonido senoidal de 1 kHz con un nivel de presión sonora de 0 dB_{SPL}. Así, 0 dB es igual a 0 fon y 120 dB es igual a 120 fon. Por tanto, la sonoridad en fonios, P , a 1 kHz, coincidirá en valor con la intensidad acústica expresada en decibelios por (2.21):

$$P = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \text{ (fonios) (a 1 kHz)} \quad (2.27)$$

Hemos visto que la escala de nivel de sonoridad concuerda aproximadamente con la escala de dinámicas musicales, de tal forma que un paso en la escala de dinámicas musicales corresponde aproximadamente a un cambio de *10 fonios* en la escala de sonoridad. Puesto que parece haber un consenso en que la sonoridad de un tono puro se duplica cuando el nivel de sonoridad aumenta en *10 fonios* [Campbell & Greated 2001, p. 115], es conveniente introducir otra escala subjetiva, la escala de *sonios* (o *sones*). El sonio está definido arbitrariamente como la sonoridad de un sonido senoidal de *1 kHz* con un nivel de presión sonora de *40 dB_{SPL}*. Una sonoridad de *2 sonios* es, por definición, es dos veces más sonora que una sonoridad de *1 sonio*. Es decir, que comparando las escalas de nivel de sonoridad (en fonios) y de sonoridad (en sonios), *40 fonios* coinciden con *1 sonio*, *50 fonios*, con *2 sonios*, etc, de forma que cada vez que el nivel de sonoridad aumenta *10 dB (10 fonios)*, se duplica la sonoridad, y viceversa.

Ya hemos visto que dos tonos puros de distinta frecuencia son de igual sonoridad si sus niveles de intensidad están sobre la misma curva isofónica. Su sonoridad viene dada por el nivel, en sonios, de dicha curva a *1kHz*. Con frecuencia se coloca la escala lineal de sonoridad (en *sonios*) junto a la escala logarítmica del nivel de sonoridad (en *fonios*), estando ambas relacionadas por:

$$S = 2^{\frac{P-40}{10}} \quad (2.28)$$

o bien,

$$P = 40 + \frac{100}{3} \log_{10} S \quad (2.29)$$

donde *S* es la sonoridad en sonios y *P* el nivel de sonoridad en fonios.

Existen circuitos electrónicos de sensibilidad variable con la frecuencia para modelar el comportamiento del oído humano. Estos han sido establecidos como patrones y clasificados como ponderaciones A, B, C

y D. El circuito A se aproxima a las curvas de igual audibilidad para bajos niveles de presión sonora (niveles de sonoridad de menos de 55 fonios). Los circuitos B y C son análogos al circuito A, pero para niveles de presión sonora medios (entre 55 y 80 fonios) y altos (más de 80 fonios), respectivamente. La curva de ponderación D fue establecida para mediciones de ruido en aeropuertos. Las curvas de ponderación son similares a las curvas isofónicas, invertidas. Sin embargo, solamente el circuito A es ampliamente utilizado en la práctica.

Los *decibelios ponderados A*, en forma abreviada *dba* o *dB(A)*, son una expresión de la intensidad relativa de los sonidos en el aire tal y como es percibida por el oído humano. En el sistema ponderado A, los valores de decibelios de sonidos en frecuencias bajas se reducen. Por ejemplo, para un nivel de presión sonora de 70 dB a 1 kHz, el oído humano percibe íntegramente 70 dba, mientras que si este nivel está en 50 Hz, el oído humano percibe un nivel de presión sonora de $(70-30,2) \text{ dba} = 39,8 \text{ dba}$, según muestra la atenuación de la Tabla 2.3.

Frecuencia (Hz)	Curva A dB(A)	Curva B dB(B)	Curva C dB(C)
10	-70,4	-38,2	-14,3
12,5	-63,4	-33,2	-11,2
16	-56,7	-28,5	-8,5
20	-50,5	-24,2	-6,2
25	-44,7	-20,4	-4,4
31,5	-39,4	-17,1	-3,0
40	-34,6	-14,2	-2,0
50	-30,2	-11,6	-1,3
63	-26,2	-9,3	-0,8
80	-22,5	-7,4	-0,5
100	-19,1	-5,6	-0,3
125	-16,1	-4,2	-0,2
160	-13,4	-3,0	-0,1
200	-10,9	-2,0	0,0
250	-8,9	-1,3	0,0
315	-6,6	-0,8	0,0
400	-4,8	-0,5	0,0
500	-3,2	-0,3	0,0
630	-1,9	-0,1	0,0
800	-0,8	0,0	0,0
1000	0,0	0,0	0,0
1250	0,6	0,0	0,0
1600	1,0	0,0	-0,1
2000	1,2	-0,1	-0,2
2500	1,3	-0,2	-0,3
3150	1,2	-0,4	-0,5
4000	1,0	-0,7	-0,8
5000	0,5	-1,2	-1,3
6300	-0,1	-1,9	-2,0
8000	-1,1	-2,9	-3,0
10000	-2,5	-4,3	-4,4
12500	-4,3	-6,1	-6,2
16000	-6,6	-8,4	-8,5
20000	-9,3	-11,1	-11,2

Tabla 2.3: Atenuación de la percepción auditiva A, B y C.

2.2.3. Timbre

El término timbre es a menudo usado con varios niveles de significado, tanto en el lenguaje musical como en consideraciones acústicas. La definición más restrictiva se refiere únicamente a sonidos continuos, en el estado estacionario, con tono e intensidad (volumen sonoro) constantes. En ese caso, el timbre de un sonido es definido como la propiedad que permite distinguirlo de otro sonido del mismo tono e intensidad proveniente de otra fuente sonora [Helmholtz 1863].

Sin embargo, muchos experimentos han demostrado que las características transitorias que ocurren cuando un sonido musical es iniciado juegan un rol crucial proporcionando al cerebro pistas que le ayudan en la identificación del instrumento [Grey 1977]. Desde el punto de vista musical, esto significa que la naturaleza del ataque es una característica importante del sonido característico de un instrumento. En lo que sigue, utilizaremos el término timbre en un sentido que incluye el estado estacionario y las características transitorias de un sonido particular. Llamaremos característica de un instrumento a la combinación de las variables acústicas que llevan al reconocimiento de un instrumento específico. Así, podemos decir que la característica de un acordeón incluye una variación progresiva del timbre con la intensidad.

2.2.3.1. Etapas de un sonido: Ataque, estado estacionario y decaimiento

La variación temporal de la intensidad de un sonido es un aspecto que participa en la conformación de su timbre. Por ejemplo, en los instrumentos de viento tipo flauta se presentan y refuerzan los armónicos que terminamos por escuchar después de muchas idas y venidas del sonido a lo largo de la columna de aire que existe en el interior del instrumento. Por esto, el sonido precursor puede ser bastante distinto al que finalmente llegará a establecerse.

Existe entonces un lapso de tiempo, que recibe el nombre de ataque, durante el cual las oscilaciones regulares terminan por establecerse.

El sonido emitido por un instrumento durante el ataque también incluye los ruidos anexos: por ejemplo, en el acordeón, el ruido causado por el flujo del aire, etc.

Observando la Figura 2.8, la etapa intermedia comprende el período en que el sonido suena establemente, es el período de sonido sostenido, o estado cuasi-estacionario. Esto no significa que durante esa etapa su intensidad no pueda variar, pues si el intérprete lo desea puede actuar para modificar la sonoridad del instrumento (siempre que el instrumento lo permita), como el acordeonista actuando sobre el fuelle.

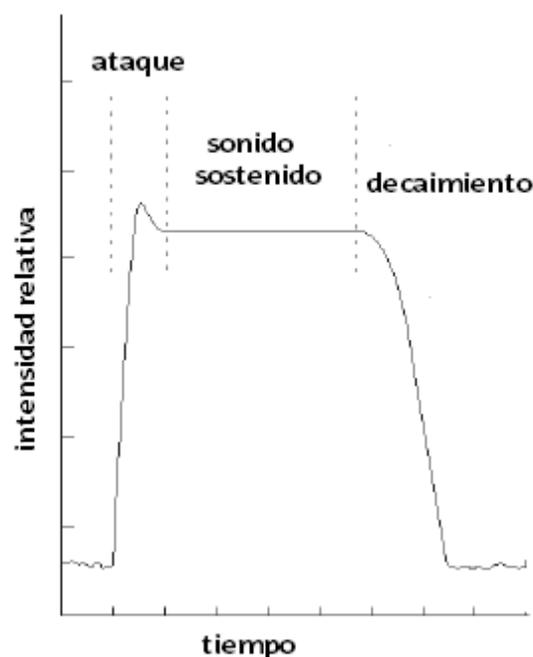


Figura 2.8: Evolución temporal de la intensidad de un sonido.

El decaimiento del sonido indica cómo se desvanece cuando se apaga su fuente primaria, como cuando el acordeonista suelta la tecla o botón, o cuando detiene el fuelle.

El ataque, el período de sonido sostenido y el decaimiento son características fundamentales que influyen en la percepción del timbre de

un sonido. Si con un sintetizador de sonidos se desea emular el sonido de algún instrumento musical es indispensable no sólo que se reproduzca la intensidad de los distintos armónicos, sino también la evolución temporal de su intensidad.

2.2.3.1.1. Formas de onda del estado estacionario

Una vibración de estado estacionario puede ser completamente descrita por su frecuencia de repetición, su amplitud y su forma de onda. El tono de un sonido está relacionado, ante todo, con su frecuencia, y con la amplitud y forma de onda desempeñando papeles casi insignificantes. En contraste, la intensidad (en el sentido de volumen sonoro) de un sonido depende, de una manera complicada, de los tres factores.

Como muestran los patrones de vibración del estado estacionario de sonidos de igual tono e intensidad (volumen sonoro), ejecutados por distintos instrumentos (desde el punto de vista musical, sonidos que difieren únicamente en el timbre), se pueden apreciar notables diferencias en las formas de onda.

Por otro lado, en el caso de un mismo sonido ejecutado repetidamente por el mismo instrumento, las formas de onda tienen el mismo carácter general, pero son bastante diferentes en detalle: los sonidos esencialmente del mismo timbre pueden tener formas de onda diferentes. La forma detallada de una forma de onda depende de las fases relativas de las componentes armónicas de un sonido complejo, así como de sus amplitudes. Sin embargo, los cambios en estas fases relativas crean únicamente pequeñas diferencias en el timbre, que son normalmente de poco significado musical [Plomp 1976. pp. 88-93]. Esta insensibilidad del oído humano a los cambios de fase explica, en parte, el hecho de que formas de onda diferentes pueden provocar la misma sensación tímbrica.

2.2.3.1.2. La influencia de la reverberación del recinto

Cuando los sonidos son recogidos en un recinto con una considerable cantidad de reverberación, el sonido que alcanza el micrófono es una mezcla de ondas directas y reflejadas. El sonido reflejado reduce la significatividad del patrón direccional de emisión de la fuente sonora.

Otro aspecto del sonido reflejado incrementa la variabilidad del espectro armónico. Entre el instrumento y el micrófono hay muchas trayectorias posibles para el sonido y cada trayectoria introducirá una diferencia de fase entre el sonido directo y el reflejado que dependerá de la longitud de la trayectoria y de la longitud de onda del armónico concernido. La amplitud de un armónico particular medido por el micrófono dependerá, por tanto, de cómo todas las ondas reflejadas se suman a la onda directa. Lo anterior es aplicable no únicamente al sonido recogido por un micrófono, sino también al que llega al oído de un oyente. Y, no únicamente eso, sino que también los espectros de los sonidos recibidos por los dos oídos son, en general, diferentes, puesto que se encuentran en diferentes posiciones de la sala [Benade 1990, pp. 197-201].

2.2.3.2. Dimensiones y medición del timbre

El tono y la intensidad (en el sentido de volumen sonoro) son ambos atributos mono-dimensionales del sonido, pues varían en una sola escala: en el caso del tono agudo-grave, o alto-bajo, y en el caso de la sonoridad fuerte-suave. Sin embargo, el timbre es un atributo multi-dimensional y los músicos utilizan una amplia gama de términos más o menos coloristas que describen estas diferencias. Bismark recogió 69 posibles parejas de términos que pueden ser utilizados para describir el timbre, como, por ejemplo [Bismarck 1974]: fino-grueso, reservado-prominente, oscuro-brillante, sordo-agudo, suave-duro, liso-rugoso, amplio-estrecho, amplio-apretado, limpio-sucio, sólido-hueco, compacto-disperso, abierto-cerrado.

Pollard y Jansson, [Pollard and Jansson 1982(a)], siguiendo una analogía con la técnica establecida para definir el color en la visión han

sugerido que las propiedades sobresalientes de una envolvente espectral del mismo modo se pueden reducir a tres números, que representa la sonoridad efectiva de tres regiones del espectro: la primera región contiene sólo la fundamental (primer armónico); la segunda contiene los armónicos 2, 3 y 4; la tercera región contiene todos los armónicos más altos.

Las proporciones de sonoridad en cada región son las tres fracciones siguientes:

$$f = \frac{N_F}{N}; m = \frac{N_M}{N} \text{ y } h = \frac{N_H}{N} \quad (2.30)$$

donde N_F es la sonoridad (en sonios) de la componente fundamental, N_M de las componentes de frecuencias medias y N_H de las componentes de frecuencias altas. N es la sonoridad total. La relación entre las tres proporciones es:

$$f + m + h = 1 \quad (2.31)$$

Si especificamos las fracciones que representan las sonoridades relativas de componentes de frecuencias medias y de frecuencias altas, en un diagrama tricromático, *diagrama tristimulus*, podemos visualizar el timbre de cualquier sonido como un punto, dado que la suma de las proporciones de sonoridad en cada región es uno.

La evolución temporal de notas individuales se representa en un gráfico triangular como el ejemplo de la Figura 2.9. Los trazos del gráfico indican la proporción de energía en: (1) el segundo, tercero y cuarto armónicos o componentes de frecuencias medias (eje m); (2) el quinto y superiores, o componentes de frecuencias altas (eje h); y (3) el fundamental o f_0 (donde m y h tienden hacia cero). Las esquinas del gráfico están marcadas: *Med*, *Alt* y f_0 para indicar lo anterior. La posición de estado estacionario aproximado de cada nota está representada por el círculo abierto, y el inicio de la nota está en el otro extremo de la línea.

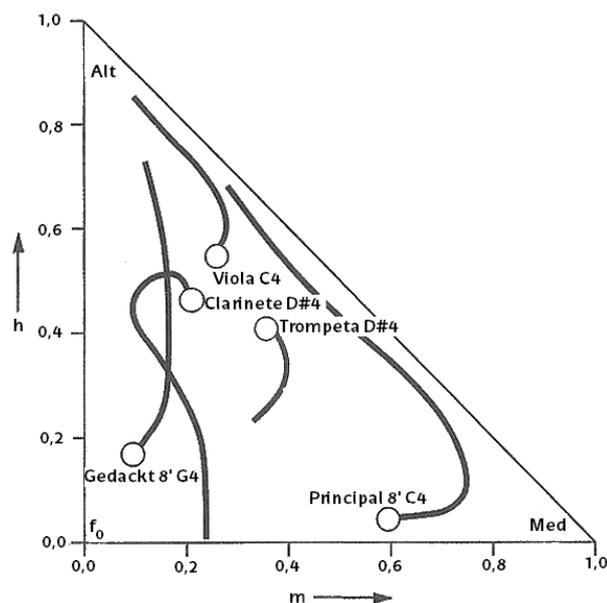


Figura 2.9: Representación aproximada del timbre por medio de un diagrama trístimulus para inicios (onsets) de la nota musical en varios instrumentos o registros de órgano. En cada caso, el ataque de la nota dibuja una línea abierta hacia el círculo que representa la posición aproximada estado estacionario. Med representa parciales fuertes de frecuencias medias, Alt representa parciales fuertes de frecuencias altas y f_0 representa un fundamental fuerte.

2.2.3.2.1. Tiempo de ataque

Un sonido musical no comienza en un punto exacto en el tiempo. Durante el ataque de una nota la envolvente de la amplitud aumenta. Se define el Tiempo de Comienzo de la Nota (NOT, "Note Onset Time") como el tiempo le lleva al instrumento en activarse para emitir un sonido, mientras que el Tiempo de Comienzo de la Percepción (POT, "Perceptual Onset Time") es el primer instante en que el oyente puede percibir el suceso acústico [Repp 1996].

El Tiempo de Percepción de Ataque (PAT, "Perceptual Attack Time") es el instante de tiempo relevante para la percepción de patrones rítmicos. Para hacernos una idea de la diferencia entre NOT, POT y PAT supongamos que queremos tocar una melodía en la que cada nota es asignada a un

instrumento diferente. Si las notas se espaciaron regularmente de acuerdo a su POT obtendríamos, posiblemente, un resultado un tanto inexacto desde el punto de vista rítmico; para conseguir un resultado rítmicamente correcto es necesario ejecutar cada nota de acuerdo a su PAT.

Gordon [Gordon 1987] estudió el Tiempo de Percepción de Ataque de varios instrumentos orquestales, llegando a la conclusión de que tanto el tiempo de crecimiento como la velocidad de crecimiento eran datos importantes para el Tiempo de Percepción de Ataque. Para un tono cuyo crecimiento es rápido, el Tiempo de Percepción de Ataque está determinado principalmente por la información sobre la amplitud. Si el crecimiento del sonido se produce durante un intervalo relativamente largo de tiempo, su Tiempo de Percepción de Ataque se ve más influenciado por la información relacionada con su espectro. En el estudio de los ataques en el acordeón, teniendo en cuenta los diferentes patrones de crecimiento de los armónicos en función del tipo de ataque (de fuelle o de dedo), tanto la información relacionada con el espectro como la información relacionada con la amplitud han sido incluidas en los experimentos.

Los tiempos de ataque de los armónicos de las notas medidas han sido calculados como los intervalos de tiempo que se extienden desde el momento en que alcanzan el umbral de los -50 dB de la amplitud máxima (en dB) hasta el momento en que alcanzan el umbral de los -5 dB de la amplitud máxima (en dB). Esta definición tiene en cuenta el enorme rango dinámico del oído humano [Braasch & Ahrens 2000].

Ha de tenerse en cuenta que en la literatura técnica sobre el acordeón el tiempo de respuesta se define como el intervalo de tiempo que va desde el instante en el que el acordeonista activa el fuelle o los dedos ("Note Onset Time") hasta el momento en que el sonido es ya estable [Gordon 1987 pp. 88-105]. Una parte de este intervalo temporal queda excluido entonces de nuestra definición de tiempo de ataque, a saber, el intervalo inicial de tiempo que va desde el mismo momento en que se activan el fuelle o el

dedo hasta el instante en que el armónico considerado alcanza el umbral de -50 dB de la amplitud máxima (en dB).

2.2.3.2.2. Centroide espectral

La distribución de energía con respecto a la frecuencia es uno de los mayores determinantes de la calidad de un sonido o de su timbre. El timbre se define como aquella cualidad del sonido en términos de la cual un oyente puede juzgar como diferentes dos sonidos complejos estacionarios de la misma sonoridad, altura y duración [Plomp 1970].

El timbre así definido depende principalmente de las magnitudes relativas de los tonos parciales (armónicos o parciales). El brillo de un sonido puede ser una indicación de la proporción de frecuencias altas, lo que parece estar relacionado con el centroide espectral [Beauchamp 2007, Grey 1977]. El centroide espectral es un descriptor espectral marcadamente correlacionado con el brillo percibido de una señal: describe el centro de gravedad de los armónicos, pesados con sus respectivas amplitudes. Se puede expresar como

$$f_{\text{centroide}} = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} f_k A(k)}{\sum_{k=1}^{k=n} A(k)} \quad (2.32)$$

donde f_k es la frecuencia y $A(k)$ es la amplitud, en Pascales, del k -ésimo parcial de un espectro con n componentes de frecuencia.

En algunos experimentos la suma es extendida al rango completo de frecuencias, hasta 20000 Hz, de modo que la expresión anterior puede reescribirse como:

$$f_{\text{centroide}} = \frac{\int_{20}^{20000} df \cdot f A_p(f)}{\int_{20}^{20000} df \cdot A_p(f)} \quad (2.33)$$

Aunque el centroide espectral no describe completamente el timbre (varios espectros armónicos con diferente distribución de armónicos pueden tener un mismo centroide), se ha comprobado que el centroide espectral guarda correlación con la percepción del brillo (brillantez) del sonido: cuanto mayor sea la aportación de las amplitudes de los armónicos altos, mayor es el centroide espectral y mayor el brillo del sonido. Deberíamos también tener en cuenta que el oído humano no puede distinguir entre dos transitorios separados menos de 10 ms [Moore 1997].

2.2.3.2.3. Estructura espectral fina

La estructura espectral fina (*Fine Spectral Structure*) es la ratio entre la suma de amplitudes de los armónicos pares y la suma de amplitudes de los armónicos impares. Si es mayor que la unidad, dominan los armónicos pares; si es menor que uno, son los armónicos impares los que predominan. Puede ser expresada como:

$$f_{SS} = \frac{\sum_{k \text{ par}} A(k)}{\sum_{k \text{ impar}} A(k)} \quad (2.34)$$

donde $A(k)$ es la amplitud, en Pascales, del k -ésimo parcial del espectro.

2.3. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS

El objetivo general de este trabajo es organizar un corpus de conocimiento físico que caracterice los diversos modos de producción sonora en el acordeón, desde la **vibración de las propias lengüetas** hasta la **acción del intérprete en la creación del sonido (ataques) y su mantenimiento (estado estacionario)**, incluyendo diversas características del instrumento, en particular el efecto **pitch bending**. El objetivo es multidisciplinar en el sentido de que, siendo fundamentalmente un estudio

acústico-físico tiene en cuenta, asimismo, la perspectiva de fabricación y reparación, así como las de ejecución y enseñanza del instrumento.

El objetivo general se ha desplegado en un conjunto de objetivos específicos que se indican a continuación.

2.3.1. Lengüetas cargadas

Es nuestro objetivo profundizar en el conocimiento del comportamiento vibratorio de lengüetas libres cargadas para su optimización sonora. Son varios los aspectos que queremos investigar: en primer lugar, la variación de la frecuencia fundamental con el valor de la carga y su posición sobre la lengüeta; segundo, la modificación de los modos normales de vibración y de las formas modales al cargar la barra; en tercer lugar, la comparación entre las expresiones aproximadas obtenidas utilizando la teoría de Euler-Bernoulli para barras delgadas y los resultados de los experimentos; por último, el efecto que la colocación de una carga en el extremo libre de las lengüetas produce en timbre de las mismas.

2.3.2. Ataques

Buscamos una caracterización física objetiva de los principales tipos de ataque a través del análisis del establecimiento, evolución y duración de los armónicos que conforman el sonido durante el ataque. Pretendemos averiguar también de qué manera esta evolución de los armónicos influye en el timbre percibido. Queremos estudiar qué parámetros de la interpretación musical modelan un ataque: la influencia del sentido del movimiento del fuelle, de la altura de la nota atacada, de la dinámica, de la sucesión temporal relativa de las acciones de los dedos y del fuelle, y de la velocidad de pulsación del botón.

2.3.3. Estado estacionario

Queremos investigar varios aspectos: en primer lugar, buscamos caracterizar la influencia que los registros y el *cassotto* ejercen sobre los sonidos de las diferentes notas; en segundo lugar, nos preguntamos por la

influencia de la acción del fuelle sobre la sonoridad de los sonidos emitidos y por cómo modifica esta sonoridad la mayor o menor profundidad de pulsación de los botones; en tercer lugar, queremos analizar la influencia del nivel de presión sonora al que se somete una lengüeta sobre el tono emitido por esta; en cuarto lugar, nos cuestionamos por las relaciones entre la sonoridad y el timbre y entre el tono y el timbre de los sonidos; en quinto lugar, nos fijamos en las características en cuanto a sonoridad y timbre de los manuales derecho e izquierdo; por último, nos fijamos en algunas peculiaridades respecto a sonoridad y timbre que en el manual de bajos libres supone la elección de un acordeón *con "doble bajo"* o de un acordeón *sin "doble bajo"*.

2.3.4. Pitch bending

Siendo el *pitch bending* un efecto característico (que no exclusivo) del acordeón, queremos clasificar y caracterizar desde un punto de vista físico los distintos tipos de *pitch bending* que se pueden implementar sobre el acordeón. Queremos analizar cómo evolucionan la frecuencia y el nivel de presión sonora de los distintos armónicos y ver también cómo cambia el timbre con la ejecución del *pitch bending*. Y, en la medida de lo posible, queremos apuntar una explicación del proceso por el que se produce este efecto.

2.4. HIPÓTESIS GENERAL Y ESPECÍFICAS

Nuestra *hipótesis general* es que puede profundizarse en el conocimiento acústico del acordeón y contribuir a una mejor descripción y comprensión de su funcionamiento que pueda revertir en su optimización acústica, siendo este conocimiento particularmente significativo para investigadores acústicos, constructores, lutieres reparadores e intérpretes del instrumento. Además, midiendo y analizando el sonido del acordeón, podremos conseguir un mayor conocimiento del control ejercido por un instrumentista y por tanto contribuir a la mejora tanto de la ejecución musical como de la enseñanza instrumental.

A continuación, enumeramos de forma más concreta las *hipótesis específicas* (H\$) de partida para los objetivos específicos del trabajo, algunas de ellas extraídas de la literatura científica y musical o de conversaciones mantenidas con investigadores, constructores, luthiers e intérpretes. Se incluyen también las correspondientes cuestiones, *research questions* (RQ\$), que se investigarán para corroborar o descartar dichas hipótesis.

2.4.1. Lengüetas cargadas

H1. La colocación de la carga másica en el extremo libre de la lengüeta es la solución óptima para conseguir un mayor descenso de la frecuencia fundamental de la lengüeta con un mínimo de carga.

RQ1. Si la carga se coloca en el extremo libre, ¿cuál es la dependencia de la frecuencia fundamental con la carga?

RQ2. ¿Cuál es la dependencia de la frecuencia fundamental con la carga si ésta se sitúa en otros puntos situados entre la punta y el extremo fijo?

RQ3. ¿Cuál es la solución tradicionalmente adoptada por los fabricantes?

H2. La colocación de la carga en el extremo libre de la lengüeta modifica el timbre original de la lengüeta.

RQ4. La colocación de una carga en el extremo libre de la lengüeta, ¿varía la distribución de armónicos?

RQ5. En caso de existir una variación del timbre, ¿es este cambio describible por medio de algún parámetro psicoacústico?

H3. La colocación de la carga en el extremo libre de la lengüeta modifica las formas modales de una barra fija-libre.

RQ6. Cuando se coloca una carga en el extremo libre de la lengüeta, ¿cómo varían las formas modales de una barra fija-libre?

RQ7. ¿Se modifica el comportamiento de la barra cuando aumenta la carga másica?

RQ8. ¿Tiene algún efecto la carga en las características de los picos de resonancia?

2.4.2. Ataques

H4. Los ataques cerrando el fuelle son más largos que los ataques abriendo.

RQ9. ¿Se puede establecer una dependencia clara de la duración del ataque con el sentido del fuelle para todo el rango de notas estudiado?

RQ10. ¿Es posible desechar la influencia del hecho de que las lengüetas correspondientes a abrir y cerrar el fuelle, son, para una misma nota, diferentes?

H5. Los ataques sobre notas graves son más largos que los ataques sobre notas en la zona media de la tesitura del acordeón.

RQ11. ¿Se puede establecer una dependencia clara de la duración del ataque con la tesitura?

RQ12. ¿Existen notas o zonas de la tesitura para las que parezca darse una dependencia clara?

RQ13. ¿Hay otros parámetros que puedan interferir en el estudio de esta dependencia?

H6. El análisis de los tiempos de comienzo y finalización de los armónicos y el estudio de su evolución temporal pueden dar

pistas sobre la diferente percepción de los ataques de dedo (duros) y de fuelle (blandos). El estudio de la evolución de una serie de parámetros psicoacústicos va a ayudar a la caracterización de ambos ataques. Una menor velocidad de pulsación de los botones (o teclas) durante el ataque tiene como efecto, al menos, aumentar la duración del mismo.

RQ14. ¿Cómo comienzan y cómo finalizan, con relación unos a otros, los primeros armónicos, en un ataque duro y en un ataque blando?

RQ15. ¿Influye de alguna manera la dinámica en esa relación entre los comienzos y finales de los armónicos?

RQ16. ¿Hay algún parámetro psicoacústico cuya evolución sea característicamente diferente en los ataques duros y los ataques blandos?

RQ17. ¿Se ve afectada la duración de un ataque por una velocidad de pulsación más lenta?

RQ18. ¿Influye esa pulsación más lenta en alguna otra característica del ataque aparte de su duración?

RQ19. ¿Las características globales de un ataque con pulsación lenta hacen que dicho ataque se asemeje más a un ataque duro o a un ataque blando?

H7. Una dinámica tendente hacia el *forte* tiende a acortar los ataques con respecto a una dinámica más en *piano*.

RQ20. ¿Son más cortos los ataques duros con dinámica *mezzo forte* que los ataques duros con dinámica *piano*?

RQ21. ¿Son más cortos los ataques blandos con dinámica *mezzo forte* que los ataques blandos con dinámica *piano*?

RQ22. ¿Influye la tesitura de la nota atacada en el modo en que una dinámica *mezzo forte* acorte o alargue el ataque con respecto a una dinámica en *piano*?

H8. El *cassotto* no influye en la duración de los ataques.

RQ23. ¿Son los ataques duros *mezzo forte* más cortos o más largos cuando se llevan a cabo sobre lengüetas dentro del *cassotto* que cuando son ejecutados sobre lengüetas fuera del *cassotto*?

2.4.3. Estado estacionario

H9. La disposición de las lengüetas dentro de los registros afecta al timbre de los sonidos.

RQ24. ¿Son los sonidos de las notas en el interior de *cassotto* más apagados o más brillantes que fuera de él?

RQ25. En el manual izquierdo, que no tiene *cassotto* ¿existe diferencia tímbrica entre las voces baja, central y alta?

RQ26. En caso de existir diferencias en el timbre de las tres voces del manual izquierdo, ¿cuál es?

H10. El control el fuelle es esencial para el control de la sonoridad, que también puede ser modificada por la profundidad de pulsación de los botones.

RQ27. ¿Existe algún límite al aumento de presión del fuelle y para la sonoridad?

RQ28. ¿Afecta la profundidad de pulsación de los botones a la sonoridad para una misma presión sobre el fuelle?

H11. La frecuencia de una lengüeta se ve también afectada por el nivel de presión sonora.

RQ29. ¿Existe algún cambio de frecuencia emitida al variar el nivel de presión sonora al que se somete la lengüeta?

RQ30. En caso de existir, ¿cómo varía la frecuencia con la presión sobre el fuelle y de qué orden es el cambio?

RQ31. ¿Depende este cambio del tono de la lengüeta?

H12. Una mayor intensidad/frecuencia del sonido va asociada a un predominio de armónicos superiores y timbre más brillante.

RQ32. ¿Existe alguna relación entre la intensidad del sonido, y su timbre?, ¿cuál?

RQ33. ¿Existe alguna relación entre la frecuencia del sonido y su timbre?, ¿cuál?

H13. La sonoridad y el timbre del manual derecho e izquierdo son diferentes.

RQ34. ¿Existe alguna diferencia, en cuanto a sonoridad y/o timbre entre el manual derecho e izquierdo?, ¿cuál?

RQ35. En caso de existir diferencias en la sonoridad y el timbre de ambos manuales, ¿cuál es la razón de las mismas?

H14. Los acordeones con “doble bajo” y sin él presentan sonoridades y timbres diferentes.

RQ36. ¿Produce alguna peculiaridad, en cuanto a sonoridad y/o timbre el hecho de contar con manual de bajos libres?, ¿cuál?

2.4.4. Pitch bending

H15. La modalidad de pitch bending más comúnmente usada, esto es, la que involucra la acción conjunta del fuelle (mayor tensión o compresión del mismo) y de los dedos, es la que consigue una

mayor disminución de la frecuencia fundamental de la nota de partida.

RQ37. ¿Cuál es la disminución de frecuencia en un pitch bending realizado con el fuelle más el dedo y en un pitch bending llevado a cabo con solo el dedo?

H16. El pitch bending descendente, comúnmente efectuado con el manual derecho, es del mismo valor para toda la tesitura.

RQ38. ¿Existe alguna variación del valor del pitch bending para las notas del manual derecho dependiendo de su tesitura?

RQ39. ¿En caso de no haber variación (con la tesitura de la nota) en la disminución de frecuencia, cuál es el intervalo musical aproximado del pitch bending?

H17. La disminución de frecuencia en el pitch bending descendente es mayor cerrando el fuelle que abriéndolo.

RQ40. ¿Se puede establecer una dependencia clara de la variación del valor del pitch bending con el sentido de movimiento del fuelle?

H18. Durante la evolución del pitch bending la disminución de frecuencia es acompañada de una disminución de intensidad.

RQ41. ¿Cuál es la variación del nivel de presión sonora en un pitch bending realizado con el fuelle más el dedo y en un pitch bending llevado a cabo con solo el dedo?

H19. El cassotto no influye en el valor del pitch bending.

RQ42. ¿Son los valores del pitch bending más cortos o más largos cuando se llevan a cabo sobre lengüetas dentro

del cassotto que cuando son ejecutados sobre lengüetas fuera del cassotto?

H20. Durante la evolución del pitch bending el contenido armónico del sonido de partida va cambiando, sin perderse la armonicidad de la nota.

RQ43. A medida que evolucionan los armónicos en un pitch bending, ¿cómo cambia la relación entre sus frecuencias?

H21. Para poder efectuar un pitch bending es necesario que la lengüeta tenga en el lado opuesto de la abertura donde se encuentra remachada, una tira de cuero (o de plástico) cubriendo totalmente dicha abertura.

RQ44. ¿Es posible realizar el pitch bending con lengüetas carentes de una tira cubriendo el lado opuesto de su abertura?

RQ45. ¿Qué efecto tiene sobre el pitch bending la presencia o no de una tira cubriendo el lado opuesto de la abertura de la lengüeta?





Capítulo 3

Metodología

3. METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

La calidad del sonido producido por un instrumento musical depende principalmente de sus propiedades físicas. La forma, los materiales, el ensamblaje de sus diferentes elementos, etc. determinan su tesitura, rango dinámico y timbre. A todos estos aspectos hay que añadir el importante efecto que tiene el instrumentista en el sonido final. La interacción músico-instrumento no puede ignorarse, ya que el instrumento requiere la entrada de energía para funcionar y esta es justamente una de las funciones básicas del músico. Cuanto más se conoce el mecanismo de producción de sonido en un instrumento musical, mayor es el interés en conocer el papel del músico durante la interpretación. En este sentido existen numerosos estudios que incluyen el papel del músico en el sonido de diversos instrumentos musicales [Volumen especial (2015)]. Los diversos roles del músico pueden estudiarse utilizando técnicas que provienen de varias disciplinas científicas: mecánica, acústica, sistemas dinámicos, percepción, lingüística, psicología, estadística y/o fisiología.

En este trabajo se han realizado principalmente medidas del sonido emitido por un acordeón o algunos de sus componentes (peines de lengüetas) en condiciones de interpretación real, con experimentos "in vivo" y posterior tratamiento estadístico de los datos obtenidos. También se han realizado experiencias similares con una melódica (ver Apéndice 3). Las medidas se han realizado en una sala mediana ($V \approx 128 \text{ m}^3$) sin tratamiento anecoico, intentando simular las condiciones habituales de salas de ensayo y de interpretación para instrumentos solos o pequeños grupos.

Un plan de medidas exhaustivas podría incluir medidas realizadas en diferentes acordeones de alta calidad y por diversos intérpretes. Sin embargo, en nuestro caso la opción ha sido complementar el estudio

experimental con un único intérprete con opiniones de otros intérpretes, de constructores de acordeón y de lutieres.

Además, se han realizado medidas de la vibración de lengüetas similares a las de acordeón pero de mayor tamaño. Estas medidas han permitido analizar los modos de vibración de las lengüetas bajo diversas condiciones de contorno y se enmarcan en el ámbito del control del instrumento durante su construcción, fuera del ámbito de control del músico.

3.1.1. FFT. Estudio del sonido emitido por una fuente

El análisis de frecuencia de un sonido puede hacerse mediante dos procesos diferentes: (i) hacer pasar la señal a través de varios filtros con diferentes frecuencias centrales y medir la potencia transmitida a cada frecuencia mediante el detector apropiado, y (ii) utilizar métodos numéricos de tratamiento de señales y calcular la transformada de Fourier de la señal.

Los métodos numéricos han permitido un gran avance en el análisis y la síntesis del sonido. Se parte de la adquisición de valores numéricos de la onda acústica a intervalos discretos, pero suficientemente próximos en el tiempo, que permitan analizar y recomponer posteriormente esta señal. Una vez adquiridas estas muestras pueden ser almacenadas y procesadas para obtener toda la información que transmiten. Los cálculos matemáticos para calcular la transformada de Fourier de una señal son bastante complejos, y se basan en el descubrimiento de Fourier: cualquier señal periódica puede ser representada por una serie de funciones armónicas (de frecuencia única).

En términos matemáticos la transformada de Fourier es un operador que aplicado a una función temporal la convierte en otra función de la frecuencia que aporta la misma información que la primera y que informa de todas sus periodicidades. Recíprocamente, existe el operador antitransformada, que aplicado a una función frecuencial permite recomponer su función temporal original. El proceso de cálculo de la

transformada o la antitransformada es complejo, pero factible por métodos numéricos. La utilidad de esta transformación está en que algunos fenómenos se explican más fácilmente y tienen un tratamiento matemático más ágil desde el dominio de la frecuencia que desde el dominio del tiempo.

El descubrimiento del algoritmo denominado Transformada Rápida de Fourier (FFT) ha facilitado enormemente la rapidez de este cálculo, por lo que hoy en día los analizadores lo realizan prácticamente en tiempo real; de tal forma que podemos visualizar sobre la pantalla de un analizador la forma de la función en función de la frecuencia a medida que se produce la evolución del correspondiente parámetro a estudiar. Evidentemente, la simultaneidad en sentido estricto nunca es posible, ya que la FFT se realiza sobre muestras temporales que siempre serán anteriores al proceso de cálculo. El algoritmo impone la restricción de que el número de estas muestras sea exactamente una potencia de 2. La función obtenida vendrá dada también en forma discreta; exactamente con una cantidad de muestras igual a la mitad de las que tenía la función temporal. El proceso modifica implícitamente la señal, dando lugar a las tres desventajas de la FFT: "aliasing" (un error en el muestreo digital en el que dos frecuencias no pueden ser distinguidas; está causado por el muestreo a menos de dos veces la frecuencia máxima en la señal), "leakage" (un problema que es consecuencia directa de la necesidad de tener solamente una longitud finita de la historia de tiempo, junto con la suposición de periodicidad) y efecto "picket fence" (denominado así por su similitud a mirar el espectro a través de una cerca de estacas y también denominado "scallop-loss" o pérdidas por ondulación, originado por una resolución insuficiente de la señal de medida). Para evitarlos es importante realizar una buena elección de los parámetros del análisis FFT.

Nuestro sistema de medida consiste en tres elementos básicos: una fuente sonora (acordeón de concierto/peine de lengüetas/melódica), un instrumentista experimentado con amplia experiencia en la enseñanza del acordeón, y un sistema de análisis acústico del sonido escogido entre los

mejores del mercado. Hemos utilizado un acordeón de bajos libres de la marca Pignini, modelo Sirius [Pignini 2015], un bloque de lengüetas especialmente preparado por un lutier para este trabajo y una melódica Melodihorn Samick A-32.

Los sonidos se han grabado con un micrófono pre-polarizado de campo libre $\frac{1}{2}$ " tipo 4189-A21 fabricado por Bruel&Kjaer, colocado a aproximadamente a 50 cm frente al emisor sonoro. Los datos, tanto en dominio de frecuencias como en dominio temporal, han sido obtenidos por medio del software PULSE Bruel&Kjaer. Los parámetros del análisis FFT se han adecuado a los parámetros buscados en cada experimento. De esta forma, los rangos de frecuencia, la duración del sonido grabado, y sus errores de medida dependen de cada experimento y se detallarán en los apartados correspondientes.

Además, la dinámica del sonido se ha controlado midiendo su nivel de presión con un sonómetro "Extech Instruments 407727" colocado aproximadamente a 50 cm frente a la fuente sonora objeto de estudio. La dinámica *piano* y la dinámica *mezzo forte* corresponden, respectivamente, a unos 55 dBA y 70 dBA en el sonómetro.

3.1.2. Análisis modal. Estudio de vibraciones

El análisis modal es una herramienta útil para determinar las características vibratorias de un sistema. La respuesta dinámica del sistema en estudio se determina bajo la acción de alguna fuerza aplicada que produce su vibración. Los modos normales son las formas adoptadas por el sistema cuando este es excitado a una de estas frecuencias naturales. Utilizando esta técnica, es posible obtener las frecuencias naturales, los modos normales de vibración y los coeficientes del sistema. Es posible excitar un sistema de diferentes maneras: golpeándolo con un martillo o excitándolo con un oscilador externo. En este último método, tras un período transitorio el sistema pasa a oscilar según un estado estacionario con la misma frecuencia que el excitador. A fin de estudiar algunas

frecuencias naturales, la frecuencia del movimiento oscilatorio del excitador se varía a lo largo del intervalo de frecuencias de interés.

En los sistemas reales la energía se disipa al entorno según transcurre el tiempo. A esta disipación de energía se le denomina amortiguamiento. El oscilador es la fuente externa de energía que mantiene activa la oscilación. La cantidad de amortiguamiento de una estructura afecta a la agudeza de las resonancias. En el caso de oscilaciones sin amortiguamiento, la amplitud de resonancia crece infinitamente y puede llevar a una “resonancia catastrófica”. En el caso de oscilaciones amortiguadas con amortiguamiento débil, la amplitud alcanza un máximo para un valor de la frecuencia del excitador algo menor que la frecuencia natural del sistema.

Existen varios métodos para medir el amortiguamiento de un sistema. El método de decremento logarítmico se utiliza para medir el amortiguamiento en el dominio temporal. En el dominio frecuencial, se utiliza la semianchura de la banda de resonancia [Kinsler et al. 1995]. La anchura de banda de un sistema lineal de un solo grado de libertad es una función del factor de amortiguamiento (*damping ratio*) y de su frecuencia natural. Para una frecuencia natural fija, cuando el factor de amortiguamiento disminuye, también decrece la anchura de banda.

3.2. LENGÜETAS DE ACORDEÓN

A continuación se detallan las principales características del montaje experimental utilizado en el estudio de las lengüetas de acordeón. Se han realizado dos tipos de experimentos. En primer lugar se ha estudiado el efecto de una carga colocada en puntos diferentes de una lengüeta sobre su frecuencia fundamental. En segundo lugar, se ha profundizado en el estudio de la lengüeta cargada en el extremo libre incluyendo un apartado relativo al timbre del sonido que emite.

Este estudio se ha realizado sobre lengüetas de acordeón. Cada una de las lengüetas va montada sobre su propia plaqueta. A su vez, estas se han dispuesto sobre un bloque común de varias lengüetas independientes, cada

una con su propia cámara de resonancia. El montaje ha sido realizado por un lutier especialmente para este trabajo y puede verse en la Figura 3.1. Estos peines no se introducen dentro del instrumento para poder manipular las lengüetas más fácilmente.



Figura 3.1: Vista parcial de un bloque de lengüetas utilizado en este estudio.

Para la excitación de las lengüetas se ha procedido a aspirar directamente a través del orificio de entrada a las cámaras de resonancia. El nivel de presión sonora medido por el sonómetro ha sido de unos 70 dBA , lo que corresponde aproximadamente a una dinámica *mezzo forte*.

El sonido se ha recogido con el micrófono situado a la distancia habitual de 50 cm . En previsión de que las amplitudes de los armónicos más altos dependan de la posición angular relativa entre la lengüeta y el micrófono, se han realizado 15 medidas de cada lengüeta para tres posiciones relativas diferentes (0° , 22.5° y 45°). Finalmente se ha promediado sobre todas las medidas tomadas.

Los espectros FFT se han tomado para 6400 frecuencias comprendidas entre 20 Hz y 20 kHz , esto es, hay una imprecisión de 3.13 Hz en la medida de la frecuencia. La duración de cada grabación ha sido de 2000 ms y la precisión en la medida del tiempo ha sido de 10 ms .

Los datos han sido analizados utilizando Matlab. Para cada nota se han intentado obtener el mayor número posible de armónicos.

3.2.1. Efecto de la carga en la frecuencia fundamental

Para analizar el efecto de la colocación de una carga de masa M sobre diferentes puntos de una lengüeta, se han utilizado dos lengüetas diferentes (sin carga), que llamamos Lengüeta 1 y Lengüeta 2, a las que se han ido pegando pequeños pesos. La Tabla 3.1 muestra sus características principales.

	L (m)	m (kg)	M (kg)	f_1 (Hz)
Lengüeta 1	0.042	0.68×10^{-3}		142.7
Lengüeta 2	0.037	0.29×10^{-3}		226.4
Lengüeta 3	0.042	0.68×10^{-3}	0.08×10^{-3}	121.9
Lengüeta 4	0.052		M_4	87.5
Lengüeta 5	0.052		M_5	71.9
Lengüeta 6	0.052		M_6	62.5

Tabla 3.1: Características principales de las lengüetas utilizadas en este estudio. Las masas incluidas son m =masa de la lengüeta, M = masa de la carga

3.2.2. Efecto de la carga en el timbre

En cuanto al estudio de la influencia de la carga de las lengüetas en el timbre del sonido hay que hacer notar que el modo en que se manipulen las lengüetas puede alterar la distribución de los armónicos del sonido emitido. Comprobamos que el repetido proceso de pegar una pequeña masa y volver a despegarla no cambiaba las frecuencias de los armónicos, como era de esperar, pero sí modificaba sus intensidades relativas. Es por ello que para

esta parte del estudio hemos preferido utilizar lengüetas cargadas y afinadas por un lutier.

Así pues, en esta parte de los experimentos hemos trabajado con cuatro lengüetas adicionales, colocadas en el mismo bloque que las lengüetas 1 y 2. La Tabla 3.1 muestra sus características principales. La denominada Lengüeta 3 se ha obtenido cargando una lengüeta similar (en longitud y masa) a la Lengüeta 1. Las Lengüetas 4, 5 y 6 se han obtenido a partir de tres lengüetas de acordeón similares entre sí pero cargadas cada una con una masa diferente M_4 , M_5 y M_6 , respectivamente. El valor exacto de estas cargas máxicas no nos es conocido, puesto que en el proceso de afinación el lutier eliminó parte del material. Sin embargo, sí sabemos que verifican $M_4 < M_5 < M_6$.

3.3. BARRAS METÁLICAS GRANDES

Para el estudio de las vibraciones de una barra fija-libre se han utilizado barras metálicas de *13,5 cm* de longitud y *4.31 g* de masa. Estas barras son similares a las lengüetas de acordeón, pero de un tamaño mayor. Un oscilador (Pasco SF-9324) [Pasco] proporciona oscilaciones mecánicas de frecuencia variable (*0.1-5000 Hz*) y amplitud también variable (de hasta *5mm* para una frecuencia de unos *50 Hz*). Un generador digital de funciones alimenta el oscilador. Al oscilador le llega una excitación sinusoidal, que recorre el rango de frecuencias de interés. Este método tiene la ventaja de que toda la energía aportada se centra en una frecuencia particular en cada instante, pudiéndose ajustar el nivel de amplitud para optimizar el análisis. El amortiguamiento de las barras es débil.

Estos experimentos nos permiten visualizar fácilmente los modos normales de vibración de una barra fija-libre con diversas condiciones de contorno y complementar nuestro estudio de lengüetas de acordeón, dado que no disponemos de medios ópticos de medida.

La Figura 3.2 muestra el montaje experimental trabajando a una frecuencia de *21 Hz* (primer modo normal de la barra metálica sin carga).



Figura 3.2: Montaje experimental

Con este montaje, se van a determinar las frecuencias naturales y la forma de los modos normales tanto para la barra sin carga como para barras cargadas en su extremo libre. La carga de las barras se lleva a cabo pegando diferentes masas M . Los valores escogidos fueron: 0, 0.05m, 0.1m, 0.16m, 0.19m, 0.21m, 0.26m, 0.35m, 0.42m, 0.47m, 0.49m, 0.51m, 0.56m, 0.58m, 0.63m, 0.74m, 0.79m, 0.84m, 0.91m, m y 5m ($m=4.31$ g, masa de la barra)

El experimento comienza con un valor bajo de la frecuencia de excitación que se va aumentando lentamente. Cuando la frecuencia de excitación se aproxima a una frecuencia natural, la barra muestra grandes amplitudes de vibración, de modo que podemos obtener los valores de las frecuencias naturales.

Cuando la barra vibra a una frecuencia natural, la forma del modo normal correspondiente puede observarse y ser fotografiado para su caracterización posterior. Debido al tamaño de las barras metálicas utilizadas, la vibración tiene una amplitud suficientemente grande como para que los tres primeros modos de vibración normal puedan ser observados a simple vista. Por tanto, las posiciones de los puntos nodales y la amplitud del extremo libre pueden medirse sobre las fotografías tomadas.

Con este montaje puede estudiarse el efecto de la carga másica (i) sobre la frecuencia fundamental de la barra, (ii) sobre las formas de los

modos normales de vibración y las posiciones de los puntos nodales y (iii) sobre la anchura de banda del modo fundamental.

3.4. ATAQUES

Los acordeonistas diferencian [Lips 2000, Buchmann 2010, Gervasoni 1986, Kymäläinen 1994, Smetana 1965, Jacomucci 1998] entre dos tipos de ataques: duros o ataques de dedo (el fuelle se pone primero en tensión para a continuación pulsar el botón) y blandos o ataques de fuelle (el botón se pulsa antes de accionar el fuelle). En los ataques de fuelle se pulsa primero el botón (o tecla) para después accionar el fuelle. En los ataques de dedos es el fuelle el que primero se pone en movimiento (tirando del mismo o empujándolo) para inmediatamente después pulsar el botón.

Los ataques de dedo son percibidos más marcados o articulados que los ataques de fuelle, independientemente de la dinámica empleada. Los ataques de fuelle son percibidos como menos marcados que los ataques de dedo, debido a que en la articulación del fuelle el flujo de aire se controla por medio del movimiento de toda la caja izquierda del acordeón [Lips 2000, Buchmann 2010]. Un buen intérprete puede llevar a cabo un amplio rango de ataques intermedios entre los ataques duros y los ataques blandos. Ataques similares pueden llevarse a cabo en los instrumentos de viento-madera, dependiendo en este caso de la interacción entre la lengua y los labios del intérprete y la caña [Fletcher & Rossing 1998 p. 483].

En este trabajo hemos recogido y comparado estos dos tipos de ataque, analizando además las relaciones entre el control del instrumento, los sonidos emitidos y cómo estos sonidos son percibidos.

Los tiempos de ataque de los armónicos de las notas medidas han sido calculados como los intervalos de tiempo que se extienden desde el momento en que alcanzan el umbral de los -50 dB de la amplitud máxima (en dB) hasta el momento en que alcanzan el umbral de los -5 dB de la amplitud máxima (en dB), que considera el amplio rango dinámico del oído humano [Braasch & Ahrens 2000].

Aunque el acordeón es un instrumento con un espectro armónico muy amplio y es probable que las amplitudes los armónicos más altos dependan de la dirección en la que se recoge el sonido, en todos estos experimentos, tanto en la primera como en la segunda tanda de medidas, se ha optado por utilizar una posición fija para el micrófono que ofrezca un buen balance sonoro [Shure Microphones 2013]. El sonido se ha recogido con el micrófono situado a la distancia habitual de 50 cm, perpendicular al plano del instrumento, la misma para la serie completa de medidas efectuadas.

Los espectros FFT se han tomado para 6400 frecuencias comprendidas entre 20 Hz y 20 kHz, esto es, hay una imprecisión de 3.13 Hz en la medida de la frecuencia. La duración de cada grabación ha sido de 2000 ms y la precisión en la medida del tiempo ha sido de 10 ms.

Los datos han sido analizados utilizando Matlab. Para cada nota se han intentado obtener el mayor número posible de armónicos.

En una primera parte del estudio, el intérprete ha tocado las notas A1, A2, A3, A4, y A5 del registro de 8 pies del manual izquierdo, en dinámica *piano* y *mezzo forte*, tanto abriendo como cerrando el fuelle. Estas notas se atacan con ataque de dedo y ataque de fuelle. El propósito de estas primeras medidas ha sido el de estudiar la influencia del sentido del fuelle, de la dinámica, de la dureza del ataque y de la altura de la nota en la duración de los ataques. Cada medida (en cada tipo de ataque, cada nota y en cada sentido del fuelle) se ha repetido un mínimo de seis veces, para realizar después la media sobre las mismas. Además, todas aquellas medidas no dadas por buenas por el intérprete han sido descartadas antes de llevarse a cabo el análisis de errores.

Una vez analizados los resultados del primer estudio, se ha pasado a llevar a cabo un segundo estudio, para profundizar en algunos de los resultados obtenidos en la primera tanda de experimentos a la vez que incorporar aspectos de la caracterización de la percepción subjetiva de los

distintos tipos de ataque. Aquí el que el intérprete ha tocado una muestra más amplia de notas del manual derecho del acordeón, distribuidas por varias octavas, utilizando un registro básico de una sola voz central fuera de *cassotto*, y utilizando dinámica *piano* y dinámica *mezzo forte*. Estas notas se ejecutan con ataque de dedo y ataque de fuelle, resultando un total de cuatro combinaciones por nota si tenemos en cuenta las dos dinámicas empleadas. A la vista de los resultados de la primera tanda de experimentos, segundo grupo de medidas se ha realizado siempre abriendo el fuelle.

En esta ocasión, para cada tipo de ataque y cada nota, se ha aumentado el número de veces en que se repite cada medida. En concreto, cada medida se ha repetido un mínimo de *quince veces*, y se han realizado promedios para cada armónico, calculándose todos los posibles de estos. Nuevamente, aquellas medidas no dadas por buenas por el intérprete han sido descartadas y repetidas antes de registrarse y de llevarse a cabo el análisis de errores.

En particular, las notas elegidas han sido: A2, A#2, B2, A3, A#3, B3, A4, A#4, B4, A5, A#5, B5, A6, A#6 y B6. La razón para haber escogido siempre tres notas consecutivas de cada octava es que de esta forma se minimiza la probabilidad de encontrar una lengüeta mal ajustada y que pudiera conducir a resultados erróneos. El más pequeño cambio en la forma de la lengüeta o en su ajuste sobre la plaqueta metálica puede dar lugar a transitorios de ataque muy diferentes [Millot & Baumann 2007, Benetoux 2002, Benetoux 2005].

Dentro de este segundo estudio, aparte del procedimiento general, sobre las notas A4 y A#4 se ha llevado a cabo un ataque de pulsación lenta (con ataque de dedo y dinámica *mezzo forte*), para de este modo analizar el efecto de la velocidad de los dedos en los transitorios de ataque. Y por último, sobre las mismas notas A4 y A#4, se ha estudiado también el posible efecto del *cassotto* en los ataques. Para ello se han llevado a cabo ataques tanto de dedo como de fuelle, todos ellos con dinámica *mezzo forte*.

Con el propósito de caracterizar la percepción subjetiva de los diferentes ataques, en este segundo grupo de medidas se han estudiado los siguientes parámetros además de la duración de los ataques: comienzo y el final de los armónicos, la evolución temporal de la velocidad de cambio del nivel de presión sonora (en *dB/ms*) y la evolución temporal del centroide espectral normalizado durante los ataques.

Por último, hemos extendido este trabajo a los ataques llevados a cabo sobre la melódica, un instrumento de lengüeta libre frecuentemente utilizado en el ámbito de la educación musical escolar. Los datos relativos a este instrumento están contenidos en el Apéndice 3.

3.5. ESTADO ESTACIONARIO

Hemos realizado una caracterización del estado estacionario de las notas del acordeón de concierto objeto de estudio. Se ha realizado el estudio sonoro de notas de una amplia tesitura de ambos manuales, diferentes registros, dentro y fuera de *cassotto*, tanto abriendo como cerrando el fuelle. Se ha estudiado el efecto de la profundidad de la pulsación del botón o tecla en la sonoridad del sonido emitido. Se ha estudiado el comportamiento de la frecuencia y el timbre en función de la presión (sonoridad) y del timbre en función de la frecuencia. Además se ha caracterizado la diferencia entre el sonido de un acordeón sin "doble bajo" en su manual izquierdo con otro similar pero con "doble bajo". También se ha investigado sobre la influencia del *cassotto* en el sonido percibido.

El sonido se ha recogido con el micrófono situado a la distancia habitual de *50 cm*, perpendicular al plano del instrumento, la misma para la serie completa de medidas efectuadas, ya que ofrece un buen balance sonoro [Shure Microphones 2013].

Para cada nota y cada sentido de movimiento del fuelle (en el estudio Frecuencia vs. Presión), la medida se ha repetido un mínimo de *quince veces* y se han realizado promedios. Todas aquellas medidas no dadas por buenas

por el intérprete han sido descartadas antes de llevarse a cabo el análisis de errores.

Los espectros FFT se han tomado para *6400 frecuencias* comprendidas entre *20 Hz* y *20 kHz*, esto es, hay una imprecisión de *3.13 Hz* en la medida de la frecuencia.

Para el estudio de la frecuencia en función de la presión, el sonido fue grabado durante *diez segundos* mientras el acordeonista realizaba un "crescendo" desde *piano* hasta *forte*. Se recogieron los valores de la frecuencia y la presión de los *diez primeros armónicos* en intervalos de un segundo, hasta completar los *diez segundos*. Se realizaron medidas para las siguientes notas: E2, E3, E4, E5, E6, E7 (con los registros de 8 pies con y sin *cassotto* del manual derecho). Para completar la tesitura se añadió la nota E1 (solo obtenible, en el caso del manual derecho, con el registro de 16 pies, con *cassotto*). En todos los casos se realizaron medidas abriendo y cerrando el fuelle.

Para el estudio del timbre, el músico se encargó de tocar diversas notas del manual derecho e izquierdo del acordeón, con tres dinámicas diferentes (*piano*, *mezzo forte* y *forte*), que corresponden aproximadamente a *55*, *70* y *80 dBA* en el sonómetro. Se tomaron *10 medidas* diferentes para cada nota y cada dinámica, que después se promediaron para obtener el espectro. Los centroides se obtuvieron a partir de los *30 primeros armónicos* de cada nota. En el caso del manual izquierdo se tomaron medidas sobre el "Acordeón A" (sin "doble bajo") y sobre el "Acordeón B" (con "doble bajo").

Como ya vimos al describir el acordeón de concierto, el registro de una sola voz del manual izquierdo puede distribuirse de dos formas: sin "doble bajo" (8 pies, 4 pies, 2 pies) o con "doble bajo" (8 pies, 8 pies, 2 pies). Al comprar el instrumento, el acordeonista debe elegir entre una mayor flexibilidad en las mezclas de los registros disponibles en un acordeón sin "doble bajo", o la potencia y la riqueza del acordeón con "doble bajo". Para estudiar las diferencias entre estos dos tipos de manual, se han utilizado dos

acordeones modelo Sirius de Pignini, como se muestra en la Tabla 3.2. El "acordeón A" es el mismo acordeón de concierto, utilizado en el resto del trabajo, y no tiene "doble bajo". El "acordeón B" es el que tiene la opción de "doble bajo". Los manuales derechos de ambos acordeones son completamente iguales.

	Acordeón A	Acordeón B
	Sin "doble bajo"	Con "doble bajo"
Registros de una voz en el manual izquierdo	8 pies	8 pies
	4 pies	8 pies
	2 pies	2 pies
Registros de una voz en el manual derecho	16 pies <i>cassotto</i>	16 pies <i>cassotto</i>
	8 pies <i>cassotto</i>	8 pies <i>cassotto</i>
	8 pies	8 pies
	4 pies	4 pies

Tabla 3.2: Características principales del "Acordeón A" y el "Acordeón B"

3.6 PITCH BENDING

Aunque la lengüeta libre se caracteriza por una cierta estabilidad de la frecuencia frente a cambios de presión [Gervasoni 1986, pp. 112-113], existen ciertas técnicas especiales de interpretación que consiguen un descenso continuo de la frecuencia. Es el *pitch bending* o *glissando* no temperado. La primera partitura para acordeón en la que apareció explícitamente el *pitch bending* fue "Anatomic Safari", escrita por el compositor noruego Per Nørgård en 1967. Pero fue quizá la compositora

rusa Sofia Gubaidulina quien hizo popular este efecto tras su utilización en "De Profundis", en 1978.

En este apartado se van a describir y estudiar los dos tipos principales de pitch bending. En concreto, se va a estudiar la influencia del pitch bending en la altura y en el contenido armónico del sonido emitido por las lengüetas del acordeón.

3.6.1. Descripción y tipos de pitch bending

El pitch bending en el acordeón puede llevarse a cabo de tres modos diferentes [Lips 2000, pp. 48-49], aunque solo dos de ellos son utilizados en la interpretación real.

En el método habitual de pitch bending (que denominaremos a partir de ahora "fuelle más dedo") se combina un incremento de presión sobre el fuelle con la apertura parcial de la zapata (por medio de una pulsación parcial de los botones).

Un segundo método (que denominaremos a partir de ahora "solo dedo") consiste en soltar gradualmente el botón pulsado mientras la presión sobre el fuelle se mantiene constante. A causa de su menor eficiencia, este segundo método es menos utilizado que el primero.

Podríamos caracterizar un tercer método (que denominaríamos "solo fuelle"), consistente en hacer una presión creciente sobre el fuelle mientras el botón se encuentra ligeramente pulsado. No es un método que suela ponerse en práctica en la interpretación real, por la dificultad de mantener un botón pulsado ligeramente y por su menor eficiencia en comparación con el primer método.

Existiría incluso un cuarto método, en el que la acción sobre el fuelle crece considerablemente mientras el botón se encuentra pulsado en su totalidad. Se da una pequeña caída de presión, inapreciable en la práctica, por lo que ni compositores ni intérpretes hacen uso de él. Este comportamiento de la lengüeta libre frente al aumento de presión ha sido

estudiado para el acordeón y otros instrumentos de lengüeta libre [Cottingham 2005. Cottingham 2010, Coyle 2009]. Se corresponde con el estudio que hemos llevado a cabo de la dependencia del tono con la dinámica en el apartado dedicado al estado estacionario.

De acuerdo a la literatura sobre el pitch bending y a la experiencia de los músicos, estas son las características del pitch bending en el acordeón:

- No es posible forzar un crecimiento del valor de la frecuencia [Macerollo, 1980, p. 64; Buchmann 2010, p.83].
- El nivel de presión sonora disminuye a medida que la frecuencia baja [Macerollo, 1980, p. 64; Lips 2000, pp. 48-49; Buchmann 2010, p. 86].
- El registro de 8 pies (fuera o dentro de *cassotto*) o el registro de 16 pies, ambos el manual derecho, son los más adecuados para llevar a cabo el pitch bending. El registro de 4 pies no es aconsejable [Macerollo, 1980, p. 64]. El pitch bending se ejecuta más cómodamente si se apoya la mano derecha sobre el canto del manual derecho, mientras la mano izquierda permanece libre para un control total del fuelle.
- No hay regularidad entre diferentes botones (lengüetas) ni siquiera instrumentos en cuanto al grado de respuesta a las técnicas de pitch bending se refiere [Macerollo, 1980, p. 64], pero el descenso máximo de frecuencia alcanzable es de aproximadamente un semitono [Buchmann 2010, p.86].
- El timbre cambia al bajar la frecuencia. Se hace más fino y más nasal. El ruido del aire y el zumbido de la lengüeta pueden hacerse audibles [Buchmann 2010, p.86].

3.6.2. Procedimiento experimental

Se han realizado dos conjuntos diferentes de medidas para estudiar el pitch bending.

En ambos grupos de medidas, los sonidos se han grabado con un micrófono pre-polarizado de campo libre 1/2" tipo 4189-A21 fabricado por Bruel&Kjaer, colocado aproximadamente a 50 cm delante del acordeón. Todas las medidas fueron llevadas a cabo sin variar esta posición relativa, que se ha elegido porque ofrecía un buen balance sonoro [Shure Microphones 2013].

Ambos grupos de medidas, tanto en dominio de frecuencias como en dominio temporal, han sido obtenidos por medio del software PULSE Bruel&Kjaer.

3.6.2.1. Primer grupo de medidas

En el primer grupo de medidas, la intención ha sido comprobar si el pitch bending muestra alguna dependencia del registro, de la tesitura de la nota interpretada o de la dirección del fuelle.

En este primer grupo de medidas, el pitch bending se ha llevado siempre a cabo mediante el método que denominamos "fuelle más dedo"), en dinámica *mezzo forte* y durante un tiempo de *diez segundos*, sobre los siguientes grupos de notas del manual derecho: E1 a D#3 del registro de 16 pies, E2 a D#3 del registro de 8 pies dentro de *cassotto*, y E2 a D#3 del registro de 8 pies fuera de *cassotto*. Cada vez, se han registrado los sonidos inicial y final, registrando las medidas de la frecuencia y nivel de presión sonora de los *diez* primeros armónicos de cada nota. Cada medida se ha repetido *cinco veces*. Todos los resultados son los valores medios de estas *cinco* medidas.

En el primer grupo de experimentos, los espectros FFT se han tomado para *3200 frecuencias* comprendidas entre 20 Hz y 10 kHz, esto es, hay una imprecisión de 3.13 Hz en la medida de la frecuencia. En el dominio temporal, se han tomado medidas cada 25 ms, completando una duración total de *diez segundos* para cada medida.

3.6.2.2. Segundo grupo de medidas

En un segundo grupo de medidas, hemos tratado de caracterizar los dos tipos principales de pitch bending, además de profundizar en el comportamiento individual de los armónicos de la nota interpretada. Con este fin, nos hemos centrado en una octava completa de notas (desde A#2 hasta A3) en la zona media-grave de la tesitura del manual derecho del acordeón y en un registro simple de una sola voz media fuera de *cassotto*, con dinámica *mezzo forte*. Estas notas han sido sometidas a los dos tipos principales de pitch bending, siempre *abriendo* el fuelle. Cada vez, se han registrado los sonidos inicial y final, anotando las medidas de la frecuencia y nivel de presión sonora de los *veinte primeros armónicos* de cada nota. Cada medida se ha repetido *quince veces*. Todos los resultados son los valores medios de estas quince medidas.

En este segundo grupo de medidas, los espectros FFT se han tomado para *6400 frecuencias* comprendidas entre *20 Hz* y *20 kHz*, esto es, hay una imprecisión de *3.13 Hz* en la medida de la frecuencia. En el dominio temporal, se han tomado medidas cada *50 ms*, completando una duración total de *cinco segundos* para cada medida.

3.6.3. Tratamiento de los datos experimentales

Denotaremos por f_{or} la frecuencia del sonido original, y por f_{fin} la frecuencia del sonido final, *diez* o *cinco segundos* después (dependiendo del grupo de medidas, las primeras o las segundas, respectivamente), tras haberse llevado a cabo el pitch bending.

Para expresar la variación de frecuencia durante el pitch bending, podremos utilizar bien el siguiente tanto por ciento:

$$\Delta f(\%) = 100 \frac{f_{or} - f_{fin}}{f_{or}} \quad (3.1)$$

o, de manera equivalente, podemos el cambio de frecuencia tras el pitch bending mediante el número de cents contenidos en el intervalo que va de la frecuencia f_{or} a la frecuencia f_{fin} , y que puede calcularse por medio de la expresión:

$$\text{número de cents} = 1200 \log_2 \left(\frac{f_{fin}}{f_{or}} \right) = 3986 \log_{10} \left(\frac{f_{fin}}{f_{or}} \right) \quad (3.2)$$

Esta manera de expresar el cambio de frecuencia permite visualizar más fácilmente a qué intervalo musical corresponde la variación de frecuencia experimentada durante el pitch bending.

Por otro lado, denotaremos por Lp_{or} el nivel de presión sonora del sonido original (de cada armónico del sonido original), y por Lp_{fin} el nivel de presión sonora del sonido final, tras haberse llevado a cabo el pitch bending. El cambio de nivel de presión sonora vendrá dado entonces por la expresión siguiente, que ya introdujimos en (2.26):

$$\Delta Lp = Lp_{or} - Lp_{fin} \quad (3.3)$$

Al tratar con estas magnitudes, el cambio en la frecuencia y el cambio en el nivel de presión sonora, hemos calculado dos tipos de valores medios.

Por un lado, hemos calculado una media sobre los armónicos analizados (diez o veinte, según el grupo de experimentos) para cada nota. Si estos armónicos experimentan un cambio de frecuencia similar, ello querrá decir que podremos resumir el cambio de frecuencia de todos ellos en un solo valor.

El segundo tipo de valor medio que hemos calculado se fija en cada armónico particular (de los diez o veinte analizados según el grupo de experimentos) y promedia sobre doce notas diferentes que se han medido.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos en este trabajo. Comenzaremos por mostrar aquellos relativos a las lengüetas de acordeón, para continuar con los de las barras metálicas grandes. Posteriormente se exponen los resultados obtenidos a partir de sonidos del acordeón: ataques, estado estacionario y pitch bending.

4.1. LENGÜETAS DE ACORDEÓN CON Y SIN CARGA MÁSICA

Seguidamente se estudia la influencia que una carga másica ejerce sobre la frecuencia fundamental y el timbre de una lengüeta.

4.1.1. Efecto del valor de la masa de carga en la frecuencia fundamental

Vamos a estudiar en primer lugar cómo influye en la frecuencia fundamental de las lengüetas el valor M de la masa de carga. Para ello colocaremos la masa siempre en el mismo punto de la lengüeta (extremo libre) e iremos variando su valor. Se ha elegido este punto de colocación por ser el que habitualmente utilizan los fabricantes.

La Figura 4.1 muestra los resultados experimentales obtenidos para el cambio de frecuencia fundamental cuando la Lengüeta 1 se ha cargado con diferentes masas M . Los valores de M son: $0.14m$, $0.19m$ y $0.33m$. Las frecuencias fundamentales medidas de las lengüetas cargadas son f_1' y la frecuencia fundamental medida de la lengüeta sin cargar es $f_1=142.7$ Hz. La carga produce un descenso más pronunciado de la frecuencia fundamental cuando M crece. Sobre la propia gráfica se ha dibujado la recta de ajuste por mínimos cuadrados, cuya ecuación resulta ser:

$$\left(\frac{f_1}{f_1'}\right)^2 = 3.5\left(\frac{M}{m}\right) + 1.00 \quad (4.1)$$

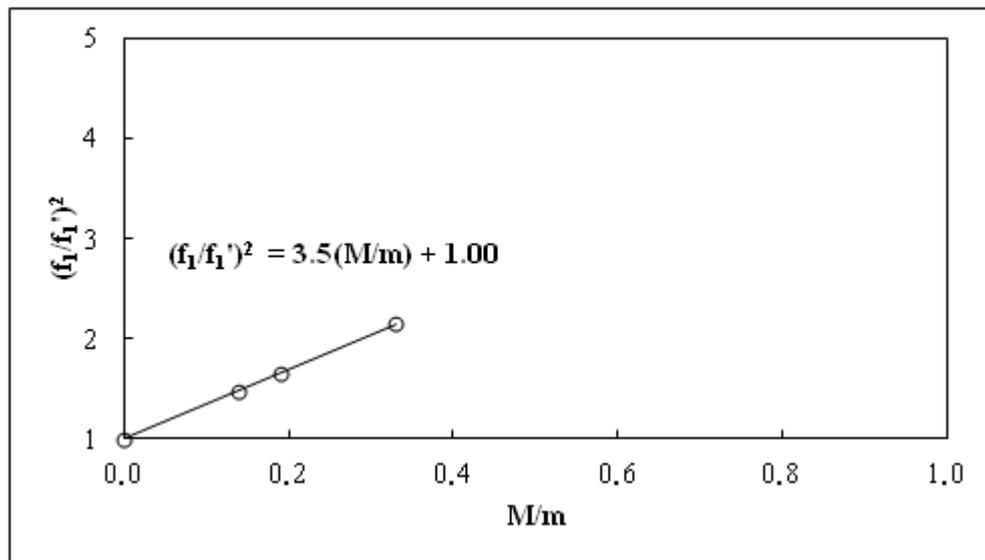


Figura 4.1: Valores del cuadrado de la ratio de frecuencias fundamentales vs. ratio entre masa de la carga y masa de la Lengüeta 1. f_1 es la frecuencia fundamental de la lengüeta sin carga y f_1' corresponde a la frecuencia de la lengüeta cargada en su extremo con una masa de valor M.

Del mismo modo, la Figura 4.2 muestra los resultados experimentales obtenidos para el cambio de frecuencia fundamental cuando la Lengüeta 2 se ha cargado con diferentes masas M. Los valores de M son: 0.05m, 0.32m, 0.44m y 0.80m. Las frecuencias fundamentales medidas de las lengüetas cargadas son f_1' y la frecuencia fundamental medida de la lengüeta sin cargar es $f_1=226.4$ Hz. También sobre la propia gráfica se ha dibujado la correspondiente recta de ajuste por mínimos cuadrados, de ecuación:

$$\left(\frac{f_1}{f_1'}\right)^2 = 3.7\left(\frac{M}{m}\right) + 0.98 \quad (4.2)$$

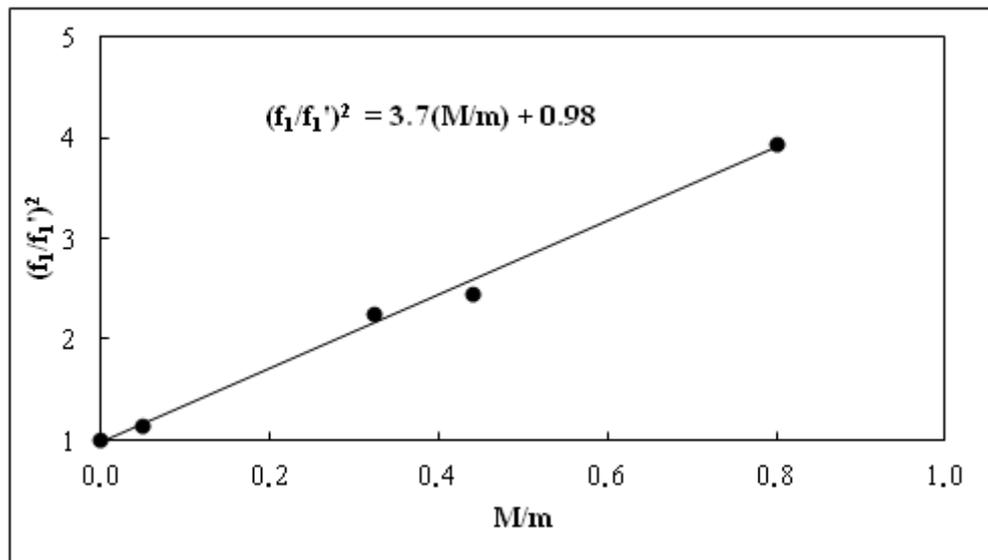


Figura 4.2: Valores del cuadrado de la ratio de frecuencias fundamentales vs. ratio entre masa de la carga y masa de la Lengüeta 2. f_1 es la frecuencia fundamental de la lengüeta sin carga y f_1' corresponde a la frecuencia de la lengüeta cargada en su extremo con una masa de valor M.

Los valores obtenidos para las pendientes de las rectas de regresión son ligeramente más pequeños que los valores aproximados predichos por la Ecuación (2.18).

4.1.2. Efecto del punto de colocación de la masa de carga en la frecuencia fundamental

Una vez analizada la influencia sobre la frecuencia fundamental de las lengüetas del valor M de la masa de carga, vamos a investigar cómo influye la posición de colocación de la carga M a lo largo de la lengüeta, desde el extremo libre ($x=L$) hasta el extremo fijo ($x=0$).

Para la lengüeta 1 se han colocado las cargas ($M=0.14m$, $0.19m$ y $0.33m$) en las siguientes posiciones: $x=L$, $x=0.88L$, $x=0.76L$, $x=0.64L$, $x=0.52L$, $x=0.40L$. La Figura 4.3 muestra $(f_1/f_1')^2$ en función de (M/m) , carga relativa, para la Lengüeta 1. Las frecuencias fundamentales medidas de las lengüetas cargadas son f_1' y la frecuencia fundamental medida de la lengüeta sin

cargar es $f_1=142.7$ Hz. La Tabla 4.1 muestra el ajuste por mínimos cuadrados de los resultados experimentales correspondientes a la Figura 4.3.

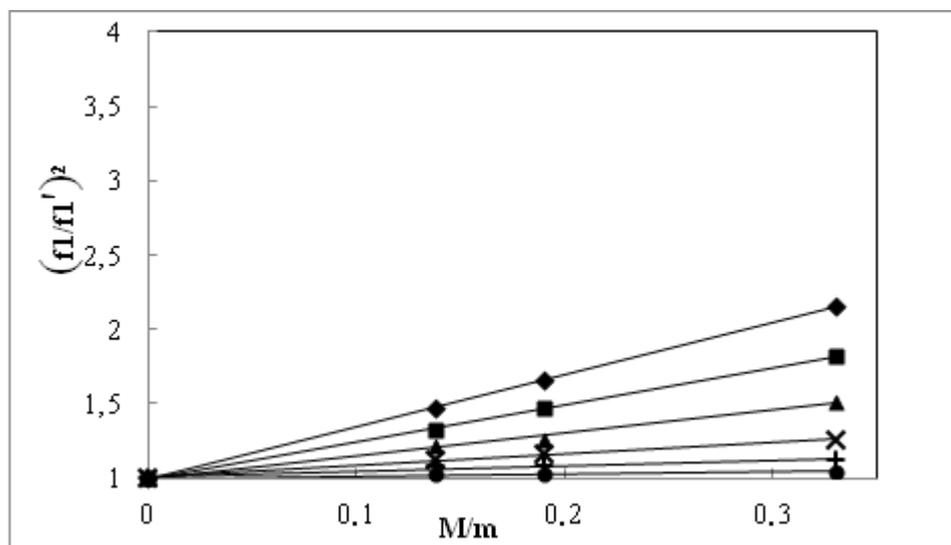


Figura 4.3: Ratio de los cuadrados de las frecuencias fundamentales en función de la carga relativa para la Lengüeta 1. Posición de la carga: (◆) $x=L$, (■) $x=0.88L$, (▲) $x=0.76L$, (X) $x=0.64L$, (+) $x=0.52L$, (●) $x=0.40L$

Posición de M	Ajuste por mínimos cuadrados	R^2
$x=L$ (extremo libre)	$(f_1/f_1')^2=3.5(M/m)+1.0$	0.999
$x=0.88L$	$(f_1/f_1')^2=2.5(M/m)+1.0$	0.999
$x=0.76L$	$(f_1/f_1')^2=1.6(M/m)+1.0$	0.988
$x=0.64L$	$(f_1/f_1')^2=0.8(M/m)+1.0$	0.988
$x=0.52L$	$(f_1/f_1')^2=0.4(M/m)+1.0$	0.957
$x=0.40L$	$(f_1/f_1')^2=0.2(M/m)+1.0$	0.976

Tabla 4.1: Ajuste por mínimos cuadrados de los valores experimentales de $(f_1/f_1')^2$ en función de (M/m) para la Lengüeta 1.

Para la lengüeta 2 se han colocado las cargas ($M=0.05m, 0.32m, 0.44m$ y $0.80m$) en las siguientes posiciones: $x=L, x=0.86L, x=0.73L, x=0.59L, x=0.46L, x=0.32L$. La Figura 4.4 muestra $(f_1/f_1')^2$ en función de (M/m) para la Lengüeta 2. Las frecuencias fundamentales medidas de las lengüetas cargadas son f_1' y la frecuencia fundamental medida de la lengüeta sin cargar es $f_1=226.4$ Hz. La Tabla 4.2 muestra el ajuste por mínimos cuadrados de los resultados experimentales correspondientes a la Figura 4.4.

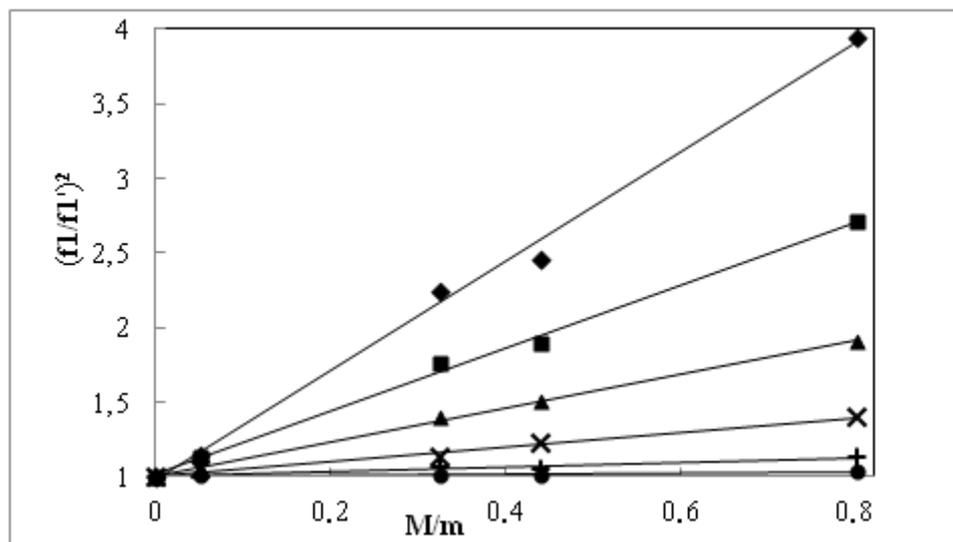


Figura 4.4: Ratio de los cuadrados de las frecuencias fundamentales en función de las cargas relativas para la Lengüeta 2. Posición de la carga: (◆) $x=L$, (■) $x=0.86L$, (▲) $x=0.73L$, (X) $x=0.59L$, (+) $x=0.46L$, (●) $x=0.32L$

Las medidas muestran que cuando se carga una lengüeta, su frecuencia fundamental disminuye. El cambio de frecuencia depende tanto del valor de la masa de la carga como de su posición sobre la lengüeta, de modo que la frecuencia puede cambiarse bien modificando la masa de la carga o bien variando la ubicación de la carga a lo largo de la lengüeta. Cuanto mayor sea la masa de carga, más disminuye la frecuencia fundamental de la lengüeta. Y cuanto más cerca del extremo libre de la lengüeta se ubique la carga, mayor será la disminución de la frecuencia fundamental. Puede comprobarse que cargar la lengüeta muy cerca del

extremo fijo ($x \approx 0$) no tiene apenas repercusión en el valor de su frecuencia fundamental. Es por esto que los fabricantes cargan siempre las lengüetas en su punta.

Posición de M	Ajuste por mínimos cuadrados	R ²
x=L (extremo libre)	$(f_1/f_1')^2=3.7(M/m)+1.0$	0.996
x=0.86L	$(f_1/f_1')^2=2.1(M/m)+1.0$	0.997
x=0.73L	$(f_1/f_1')^2=1.1(M/m)+1.0$	0.998
x=0.59L	$(f_1/f_1')^2=0.5(M/m)+1.0$	0.989
x=0.46L	$(f_1/f_1')^2=0.2(M/m)+1.0$	0.927
x=0.32L	$(f_1/f_1')^2=0.03(M/m)+1.0$	0.765

Tabla 4.2: Ajuste por mínimos cuadrados de los valores experimentales de $(f_1/f_1')^2$ en función de (M/m) para la Lengüeta 2.

Las lengüetas más graves del acordeón van cargadas en su punta para disminuir su frecuencia natural sin aumentar su longitud [Benetoux 2002]. Sin estas cargas, algunas lengüetas serían demasiado grandes para las dimensiones normales del instrumento haciendo imposible su colocación dentro del acordeón. La Tabla 4.3 compara las características de cada lengüeta cargada con las de la correspondiente lengüeta no cargada que emitiría la misma frecuencia fundamental. Para este cálculo se ha hecho uso de la ecuación (2.8).

$$f_1 = \frac{c\kappa}{2\pi L^2} 1.875^2 = \frac{1.875^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{mL^3}} = 0.162 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.8)$$

Lengüeta	f_1' (Hz)	Lengüeta cargada		Lengüeta no cargada equivalente	
		$M + m$ (kg)	L (m)	m' (kg)	L' (m)
1	97.3	0.00090	0.042	0.00083	0.051
	110.8	0.00081		0.00078	0.048
	117.5	0.00078		0.00074	0.046
	142.7	0.00068		0.00068	0.042
2	114.0	0.00052	0.037	0.00041	0.052
	144.3	0.00042		0.00036	0.046
	151.0	0.00038		0.00035	0.045
	211.3	0.00030		0.00030	0.038
	226.4	0.00029		0.00029	0.037

Tabla 4.3: Comparación entre masas ($M + m$) y longitudes (L) para lengüetas cargadas y lengüetas sin carga que producirían la misma fundamental (L', m').

La carga reduce la longitud de la lengüeta e incrementa ligeramente su masa. Los problemas de espalda son un riesgo laboral para los acordeonistas, de modo que el peso del instrumento debe mantenerse dentro de unos límites razonables. Esta circunstancia apoya la práctica habitual de cargar las lengüetas en sus puntas. Esta técnica produce una mayor reducción de frecuencia con el mínimo incremento de peso.

4.1.3. Efecto de la carga en el timbre de una lengüeta

Una vez que hemos analizado la influencia sobre la frecuencia fundamental de las lengüetas del valor y la posición de la masa de carga M , pasamos a analizar cómo influye en el timbre del sonido.

La Tabla 4.4 resume los resultados obtenidos para la estructura espectral fina y para el centroide de algunas de las lengüetas objeto de estudio. Se incluye una lengüeta sin carga (Lengüeta 1) y otras cuatro (Lengüetas 3, 4, 5 y 6) cargadas por el lutier (lengüetas 3 a 6).

Lengüeta	M	f_1 (Hz)	f_{ss}	$f_{centroide}$ (Hz)
4	M_4	87.5	0.79	$1298 \approx 15f_1$
5	M_5	71.9	0.90	$1257 \approx 17f_1$
6	M_6	62.5	0.81	$970 \approx 16f_1$

Tabla 4.4: Valores de la estructura espectral fina y el centroide para lengüetas sin carga y con carga. Recordar que $M_4 < M_5 < M_6$

Los resultados experimentales muestran que el valor de la estructura espectral fina se sitúa entre 0.8 y 0.9 para las lengüetas cargadas, mientras que para la lengüeta sin carga toma valores cercanos a 0.4. Así pues, para lengüetas sin carga, los armónicos impares predominan, mientras que para las lengüetas cargadas la proporción entre armónicos pares e impares está más equilibrada.

El resultado no parece especialmente clarificador en lo que al valor del centroide se refiere. Si comparamos las Lengüetas 4, 5 y 6, vemos que cuando M aumenta, el centroide disminuye y las lengüetas tendrían un sonido menos brillante. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la nota que suena no es en todos casos la misma (diferente carga inicial implica diferente tono emitido), de modo que decidir si el timbre de una es más brillante que el de otra escuchando el sonido que emite la lengüeta es más complicado que si hubiéramos contado con la misma nota para dicha comparación.

4.2. BARRAS METÁLICAS GRANDES CON Y SIN CARGA MÁSCA

A continuación se presentan los resultados obtenidos para barras metálicas grandes, sin carga másica y con ella colocada en el extremo libre de la barra.

4.2.1. Efecto del valor de la masa de carga en la frecuencia fundamental

En la primera serie de medidas, estudiamos el efecto de una carga de masa M sobre la frecuencia fundamental de la barra. La carga se pega al extremo libre de la barra.

La Figura 4.5 muestra los resultados experimentales obtenidos para el cambio en la frecuencia fundamental cuando se carga la barra con masas M que iban desde $M=0$ hasta $M=5m$. Cuanto mayor es el valor de la carga M , tanto mayor es el descenso de la frecuencia fundamental. El ajuste por mínimos cuadrados muestra un buen comportamiento lineal. No obstante, el valor obtenido para la pendiente es menor que el valor aproximado

predicho por la Ecuación (2.18) $\left(\frac{f_1}{f_1'}\right)^2 \approx 1 + 4.1 \frac{M}{m}$ para una barra fija-libre con

masa distribuida m y con una masa M concentrada en su extremo libre.

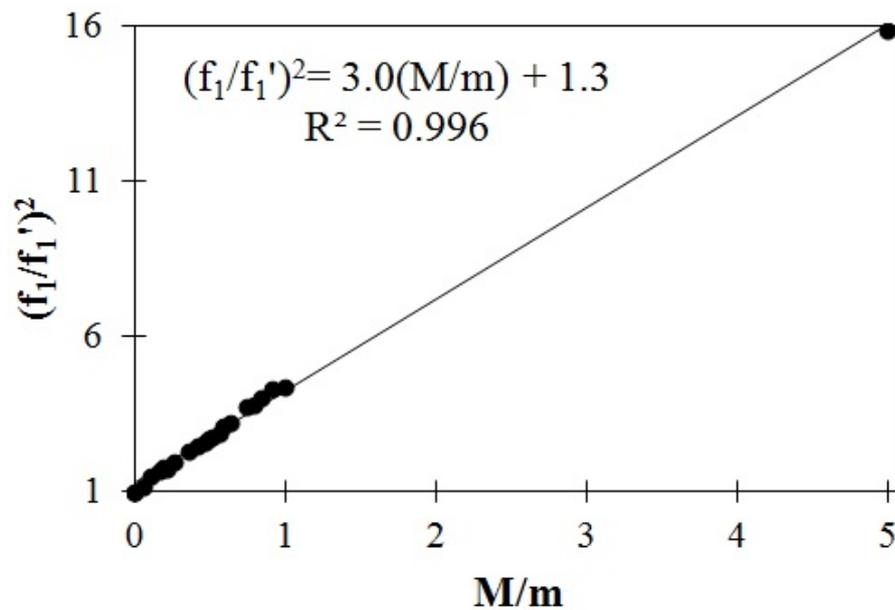


Figura 4.5: Valores del cuadrado de la ratio de frecuencias fundamentales vs. masa relativa. f_1 es la frecuencia fundamental de la barra sin carga y f_1' corresponde a la frecuencia de la barra cargada en su extremo libre con una masa de valor M.

Este comportamiento de la pendiente se puede explicar por la dependencia del primer coeficiente de frecuencia natural Ω_1 con el cociente M/m . Como ya explicamos en el Capítulo 2, la ecuación (2.13), ecuación característica de una barra fija-libre con una masa en el extremo libre varía con M/m . Cuando M/m es muy pequeño, la ecuación característica se aproxima a la ecuación (2.5), correspondiente a la barra fija en un extremo y libre en el otro. Cuando M/m se hace grande, la ecuación característica se aproxima a la ecuación (2.15), correspondiente a la barra fija por un extremo y articulada (o bisagra) en el otro. El mismo comportamiento se encuentra para el respectivo modo n -ésimo, descrito por las ecuaciones (2.9) (libre), (2.14) (cargado) y (2.16) (articulado o bisagra). Así pues, cabe esperar que el comportamiento de $(f_1/f_1')^2$ se acercará al predicho por la ecuación (2.18)

$$\left(\frac{f_1}{f_1'}\right)^2 \approx 1 + 4.1 \frac{M}{m}$$

hemos llevado a cabo un procesado similar de datos para rangos más cortos de M/m . Los resultados pueden observarse en la Tabla 4.5.

Rango de valores de M/m	Ajuste por mínimos cuadrados	R ²
0 a 5.0 (21 puntos)	$(f_1/f_1')^2=3.0(M/m)+1.3$	0.996
0 a 0.63 (15 puntos)	$(f_1/f_1')^2=3.4(M/m)+1.1$	0.992
0 a 0.26 (7 puntos)	$(f_1/f_1')^2=3.7(M/m)+1.1$	0.978

Tabla 4.5: Ajuste por mínimos cuadrados de los valores experimentales de $(f_1/f_1')^2$ en función de M/m.

El ajuste de los resultados experimentales muestra un buen comportamiento lineal en todos los casos. Puede observarse que el valor de la pendiente aumenta a medida que el valor máximo de M/m disminuye. Este comportamiento puede interpretarse como un cambio continuo del comportamiento vibratorio de la barra, de fija-libre a fija-articulada a medida que M/m aumenta.

4.2.2. Efecto de la carga másica sobre las formas de los modos normales de vibración y sobre los puntos nodales

Las Figuras 4.6 a 4.9 muestran la forma del segundo y tercer modo normal de vibración para varios valores de la masa M de carga.

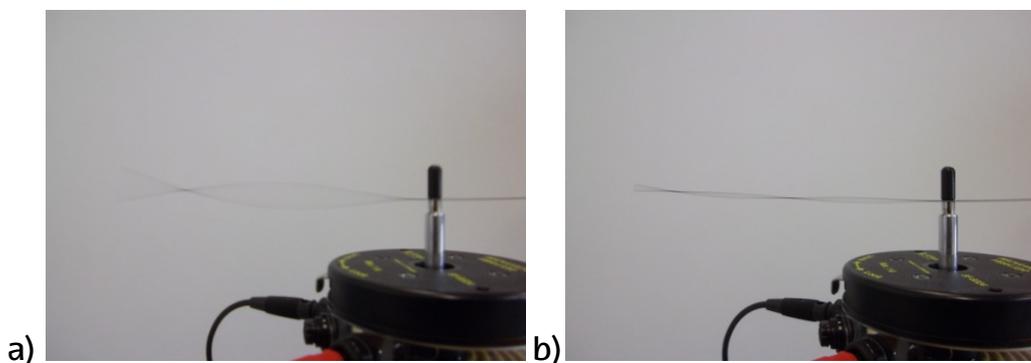


Figura 4.6: a) Segundo y b) tercer modos normales para M/m=0.

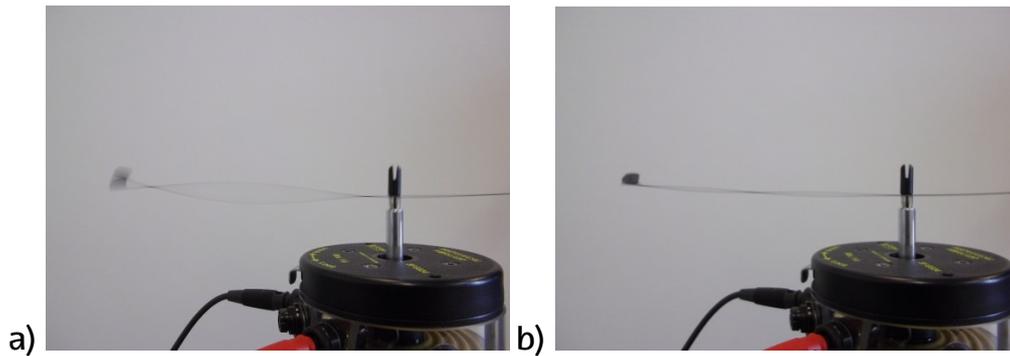


Figura 4.7: a) Segundo y b) tercer modos normales para $M/m=0.1$

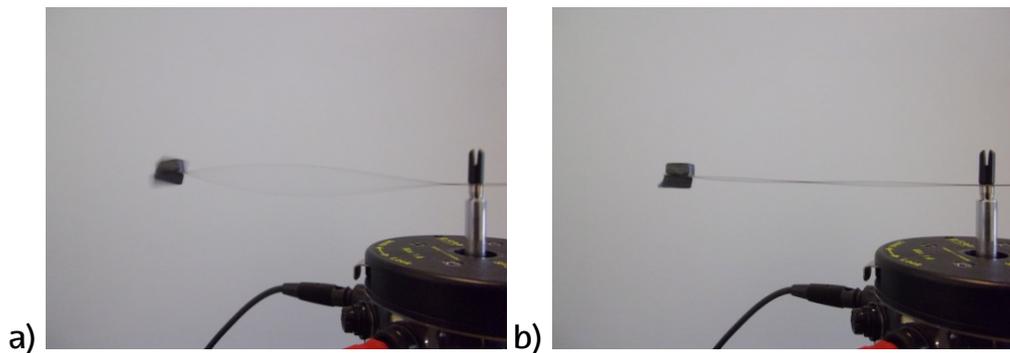


Figura 4.8: a) Segundo y b) tercer modos normales para $M/m=1.0$

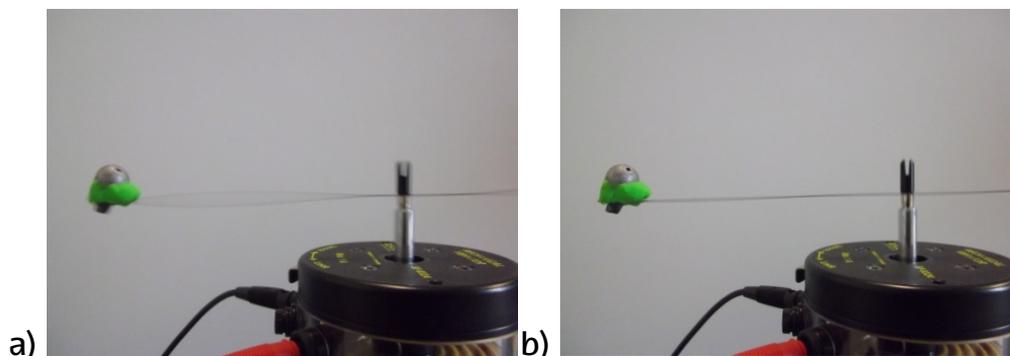


Figura 4.9: a) Segundo y b) tercer modos normales para $M/m=5.0$

A medida que M crece, el nodo más cercano al extremo libre se aproxima a éste. Para $M/m=5$, el extremo libre está prácticamente en reposo, y la forma del modo se aproxima a la forma de una barra fija en un extremo y articulada en el otro, de acuerdo a la teoría. La posición de los nodos puede medirse fácilmente sobre la figura para así comparar los

resultados con los valores dados por los modelos teóricos (Tabla 4.6). El punto nodal del extremo fijo no se incluye en la tabla.

Condiciones de contorno	M/m	Primer modo	Segundo modo	Tercer modo
Fija-libre	0	-	0.783L	0.504L 0.868L
Fija-libre	0.1	-	0.841L	0.530L 0.921L
Fija-libre	1.0	-	0.953L	0.550L 0.983L
Fija-libre	5.0	-	0.988L	0.550L 0.996L
Fija-articulada	0	L	0.5575L L	0.386L 0.692L L

Tabla 4.6: Posición de los nodos para una barra fija-libre con carga en el extremo libre

Como muestran los resultados teóricos [Balachandran & Magrab 2009, p. 578 y pp. 582-583], cuando $\frac{M}{m}$ se aproxima a infinito, el coeficiente de frecuencia natural de una barra fija-libre con una masa en el extremo libre se aproxima a cero, y el modo n-ésimo de la barra fija-libre se convierte en el (n-1)-ésimo modo de una barra fija en un extremo y articulada en el otro. Los resultados experimentales obtenidos muestran un buen acuerdo con lo predicho por el modelo teórico.

Si una barra tiene un extremo libre en $x=L$, tanto el momento de flexión $EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ como la fuerza de cizallamiento $\frac{\partial \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)}{\partial x}$ se anulan en dicho punto. Las condiciones de contorno (2.4) corresponden a estos requerimientos para barras homogéneas de sección transversal uniforme. Sin embargo, cuando el extremo de la barra está articulado, tanto el

momento de flexión $EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ como la deflexión y se hacen cero. Así pues, la diferencia entre un extremo libre y un extremo articulado reside en el valor de su fuerza de cizallamiento (cero para el extremo libre) y su deflexión (cero para el extremo articulado). Los resultados experimentales obtenidos para la frecuencia fundamental y las posiciones de los nodos para la barra cargada en su extremo libre confirman un cambio del comportamiento del tipo de vibración de la barra, que pasa de ser fija-libre a ser fija-articulada cuando M / m crece, de acuerdo con la teoría. Es más, para $M/m=5$, el extremo libre está prácticamente en reposo, con lo que puede esperarse que su deflexión se aproxime a cero (extremo articulado), cuando M/m se acerque a infinito.

4.2.3. Efecto de la carga másica sobre la anchura de banda del modo fundamental

El factor de amortiguamiento se ha estimado midiendo la anchura de banda de mitad de potencia promedio. En primer lugar, medimos el desplazamiento (A_1) de la lámina de metal para varias frecuencias en las proximidades de la frecuencia del primer modo normal de vibración. A continuación, se representa el cuadrado de esta cantidad en función de la frecuencia [Repetto et al. 2014]. La Figura 4.10 muestra los resultados obtenidos para varios valores M de la carga. Cuando el valor M de la carga crece, la anchura de banda disminuye. Este resultado indica que cuando aumenta M/m el sistema se vuelve más selectivo.

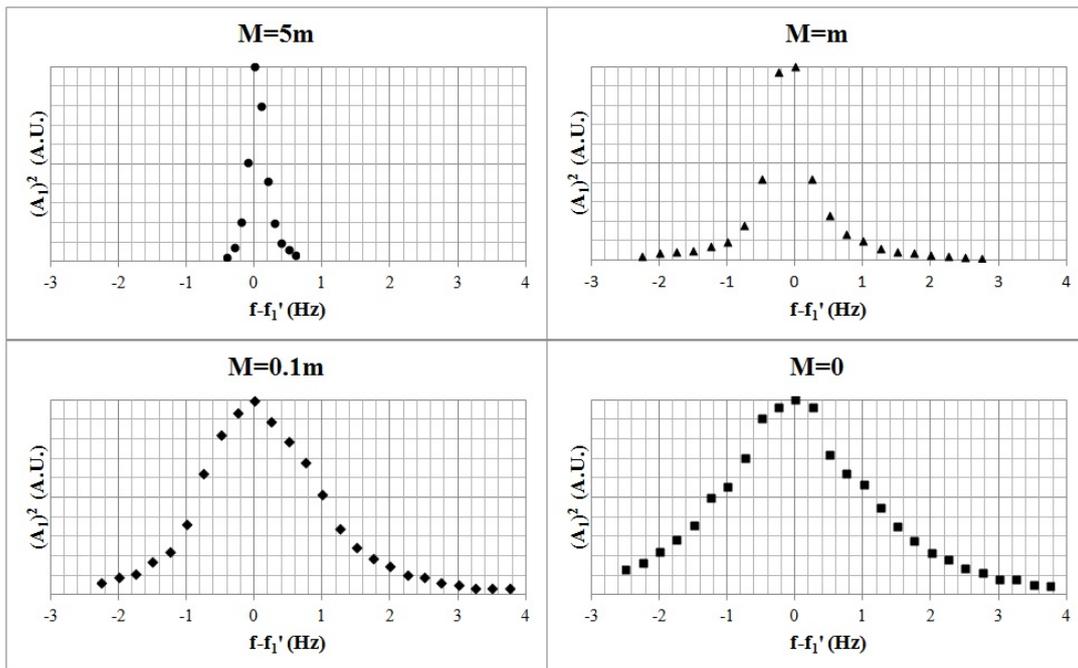


Figura 4.10: Cuadrado de los desplazamientos del extremo libre vs. frecuencia en la vecindad del primer modo de vibración normal (f_1') para diversos valores M de la carga.

4.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y PSICOACÚSTICA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ATAQUE

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los ataques del acordeón que son realizados con técnica instrumental diferente: ataques de dedo y ataques de fuelle.

4.3.1. Ataques de dedo y ataques de fuelle

Como se ha señalado en la introducción, en el acordeón se dan dos tipos básicos diferentes de ataques: el ataque de fuelle y el ataque de dedo. La figura 4.11 muestra un ejemplo del crecimiento de los primeros armónicos del sonido para ambos tipos de ataque. En esta sección se analizan estos ataques haciendo uso de los conceptos físicos de tiempo de ataque y centroide espectral.

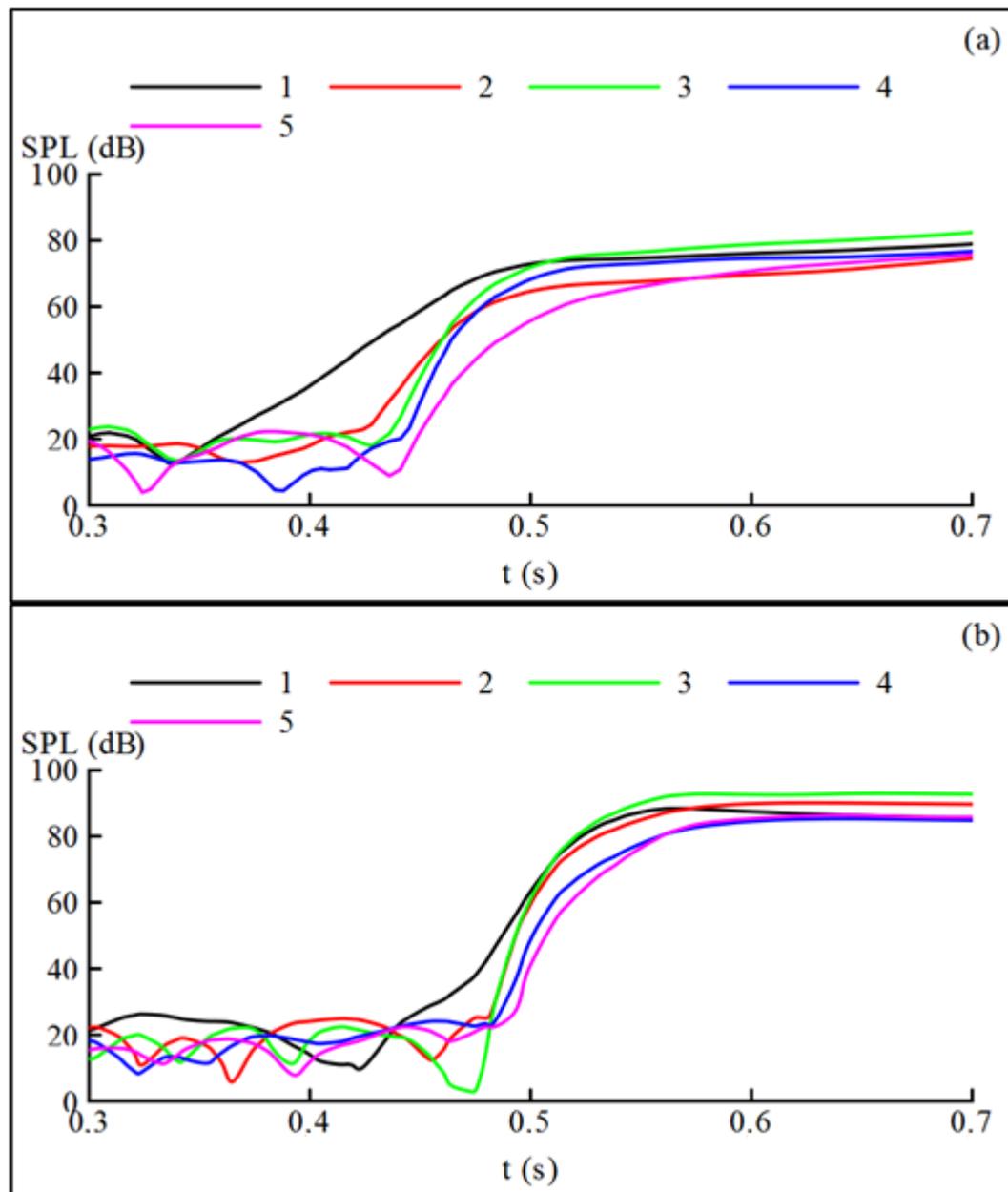


Figura 4.11: Crecimiento del nivel de presión sonora para los cinco primeros armónicos de A4 en mezzo forte y (a) ataque de fuelle y (b) ataque de dedo.

4.3.1.1. Tiempo de ataque

Las medidas realizadas para varias notas del registro de 8 pies del manual izquierdo llevadas a cabo en dinámica *piano* y *mezzo forte* abriendo y cerrando el fuelle, muestran que el tiempo de ataque no depende del sentido de movimiento del fuelle. Los resultados obtenidos para el tiempo de ataque del primer parcial se muestran en la Tabla 4.7.

Nota	<i>piano</i>		<i>mezzo forte</i>	
	Abriendo	Cerrando	Abriendo	Cerrando
A1	250 ms	280 ms	295 ms	200 ms
A2	175 ms	190 ms	155 ms	300 ms
A3	185 ms	160 ms	135 ms	230 ms
A4	160 ms	150 ms	145 ms	105 ms
A5	190 ms	280 ms	145 ms	130 ms

Tabla 4.7: Tiempo de ataque del primer parcial (en ms) para varias notas del registro de 8 pies del manual izquierdo, para dinámica *piano* y *mezzo forte*, abriendo y cerrando el fuelle, con ataque duro.

No obstante, cuando los instrumentistas buscan una respuesta más rápida (especialmente cuando precisan ejecutar un acento musical, o tocar en dinámica *forte*), suelen preferir tocar esas notas abriendo el fuelle en lugar de cerrándolo. Es probable que esta preferencia tenga una base física o fisiológica: abrir (rotación externa) los brazos parece ser una respuesta más energética o innata que cerrar los mismos.

La Tabla 4.8 muestra el tiempo de ataque (T) del primer armónico de las notas del manual derecho del acordeón estudiadas en la segunda tanda de experimentos. Se comprueba que los ataques de dedo son más cortos que los ataques de fuelle, independientemente de la dinámica (*piano* o *mezzo forte*) utilizada en el ataque. La forma en que los ataques de dedo y de fuelle son creados y la definición de tiempo de ataque implican duraciones

diferentes para ambos tipos de ataque. Esta diferencia de duración está relacionada con la apertura de la válvula: cuando se pulsa el botón, se levanta la válvula, permitiendo que el aire ponga en movimiento las lengüetas. En el caso de los ataques de fuelle, la válvula se levanta antes de que se mueva el fuelle; en el caso de los ataques de dedo, primero se tensa el fuelle y solo después se abre la válvula.

Dinámica		<i>mezzo forte</i>		<i>piano</i>	
Nota	Frecuencia	Ataque de fuelle	Ataque de dedo	Ataque de fuelle	Ataque de dedo
	f (Hz)	T (ms)	T (ms)	T (ms)	T (ms)
A2	112.5	450	80	660	110
A#2	112.5	390	70	---	---
B2	125.0	540	100	---	---
A3	225.0	480	110	380	90
A#3	237.5	220	70	440	100
B3	250.0	190	60	380	70
A4	437.5	390	60	410	90
A#4	462.5	440	60	390	140
B4	500.0	390	70	410	120
A5	887.5	610	50	300	60
A#5	937.5	630	50	320	80
B5	1000.0	520	50	320	80
A6	1762.5	510	100	350	130
A#6	1875.0	430	60	330	80
B6	1987.5	590	70	250	80

Tabla 4.8: Valores de la frecuencia f y del tiempo de ataque T para el primer armónico de todas las notas del manual derecho estudiadas.

Con respecto a la influencia de la dinámica en la duración de los ataques, la Tabla 4.8 muestra que, con la excepción de la nota A3, los ataques de dedo en *mezzo forte* son más cortos que los ataques de dedo en *piano*. En el caso de los ataques de fuelle, el rango de dinámica no parece tener influencia alguna en la duración de los ataques. El comportamiento diferente de la nota A3 podría deberse a que esa lengüeta concreta no estuviera apropiadamente ajustada, tal y como se señaló en el Apartado 3.4 que podría ocurrir.

En lo que a la influencia de la frecuencia de la nota en la duración de los ataques no se observa un comportamiento constante. No obstante, en la literatura técnica sobre acordeón hay varias referencias [Lips 2000 p. 37, Buchmann 2010 pp. 40-43, Gervasoni 1986 pp. 112-113] a que las lengüetas más grandes (sonidos más graves) de la tesitura de tanto el manual derecho como el izquierdo precisan de un cierto tiempo de respuesta mayor que el requerido por las lengüetas más pequeñas. El mismo fenómeno es referido por lutieres, que recomiendan una disposición especial de la lengüeta en equilibrio (ligeramente más elevada que lo normal sobre el plano del portalengüetas) para minimizar este retardo en la respuesta de las lengüetas más graves [Alberdi & Orobengoa 2015]. Esta aparente contradicción podría explicarse parcialmente teniendo en cuenta la diferencia entre el tiempo de respuesta y el tiempo de ataque, explicada en el Capítulo 2 al tratar el tiempo de ataque. No obstante, teniendo en cuenta que todas estas lengüetas más graves de la tesitura del acordeón están cargadas, y que son más cortas y algo más pesadas que lo que correspondería para una lengüeta sin carga que vibrara a la misma frecuencia fundamental, es probable que sea la carga la característica diferenciadora que podría tomarse como punto de partida para un análisis en mayor profundidad en futuras investigaciones.

Este comportamiento de las lengüetas más graves está también referenciado en otros instrumentos de lengüeta libre, como es el órgano americano [Cottingham 2014].

La Tabla 4.8 muestra que hay una gran variación en las duraciones de los ataques, hecho que podríamos considerar inesperado para notas que difieren tan solo un semitono. Esta diversidad puede ser atribuida a varios factores de los que depende la respuesta de la lengüeta: la forma de la misma [Benetoux 2005 pp. 31-32], el ajuste de la lengüeta sobre la plaqueta metálica [Benetoux 2002 p. 41] e incluso las características de la tira de piel o de plástico que cubre el lado opuesto de la rendija de las plaquetas metálicas en el caso de lengüetas graves y medias [Benetoux 2005, p 61].

Este comportamiento es consistente con el estudio teórico llevado a cabo por Millot y Baumann [Millot & Baumann 2007], que encontraron diferentes comportamientos dinámicos cuando se variaban las secciones eficaces de la lengüeta.

La Figura 4.12 muestra el comienzo (-50 dB del umbral de la amplitud máxima) y final (-5 dB del umbral de la amplitud máxima) de los dos tipos de ataque en *mezzo forte* para los armónicos más bajos de la nota A#3. Del mismo modo, la Figura 4.13 muestra el comienzo y final para los armónicos más bajos de la nota A3 atacada también en *mezzo forte* con ambos tipos de ataque. Al igual que ocurría al estudiar el primer armónico, puede verse también aquí que los ataques de fuelle son más largos que los ataques de dedo para todos los armónicos considerados.

En los ataques de dedo en *mezzo forte*, todos los ataques comienzan y finalizan casi simultáneamente. En los ataques de fuelle en *mezzo forte*, los armónicos comienzan casi simultáneamente, pero acaban en instantes diferentes.

Con dinámica en *piano*, los ataques de dedo y de fuelle tienen un comportamiento similar: en el caso de ataques de dedo en *piano* todos los armónicos empiezan y acaban casi simultáneamente; en los ataques de fuelle en *piano* los armónicos comienzan y terminan de una manera no simultánea (Figura 4.14).

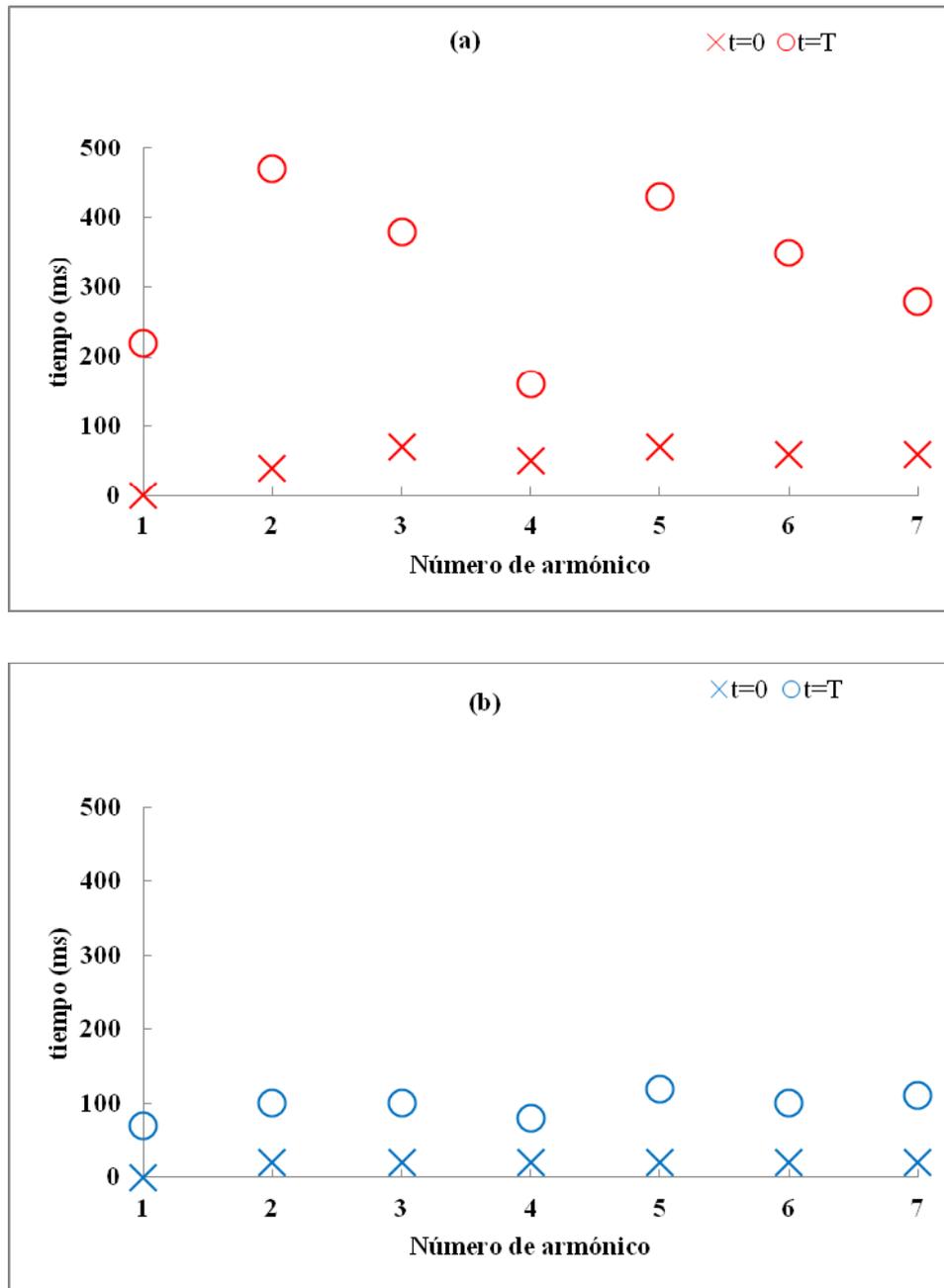


Figura 4.12: Tiempos de comienzo (x) y de final (o) de los (a) ataques de fuelle y (b) ataques de dedo sobre la nota A#3 del manual derecho en dinámica mezzo forte.

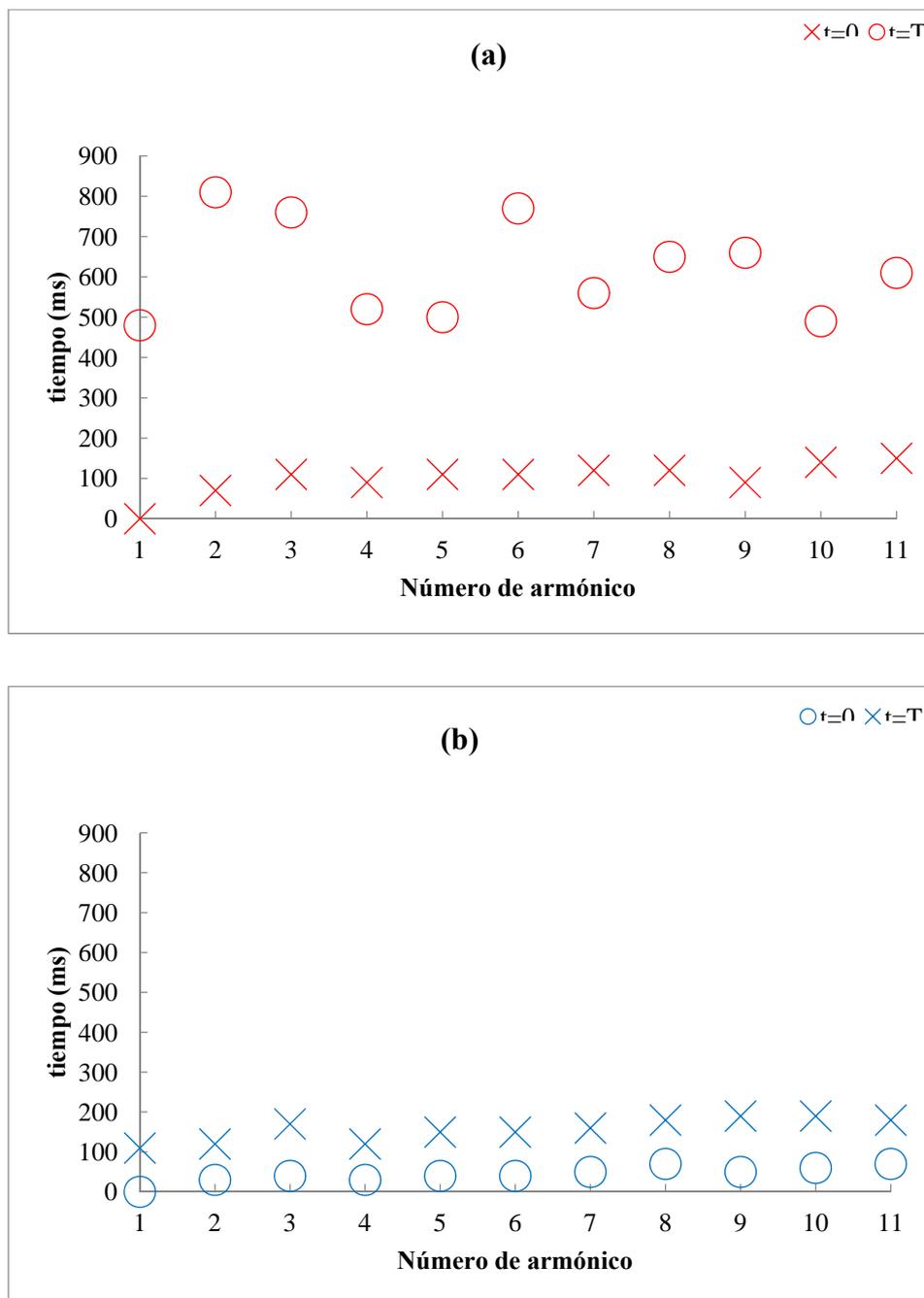


Figura 4.13: Tiempos de comienzo (x) y de final (o) de los (a) ataques de fuelle y (b) ataques de dedo sobre la nota A3 del manual derecho en dinámica mezzo forte.

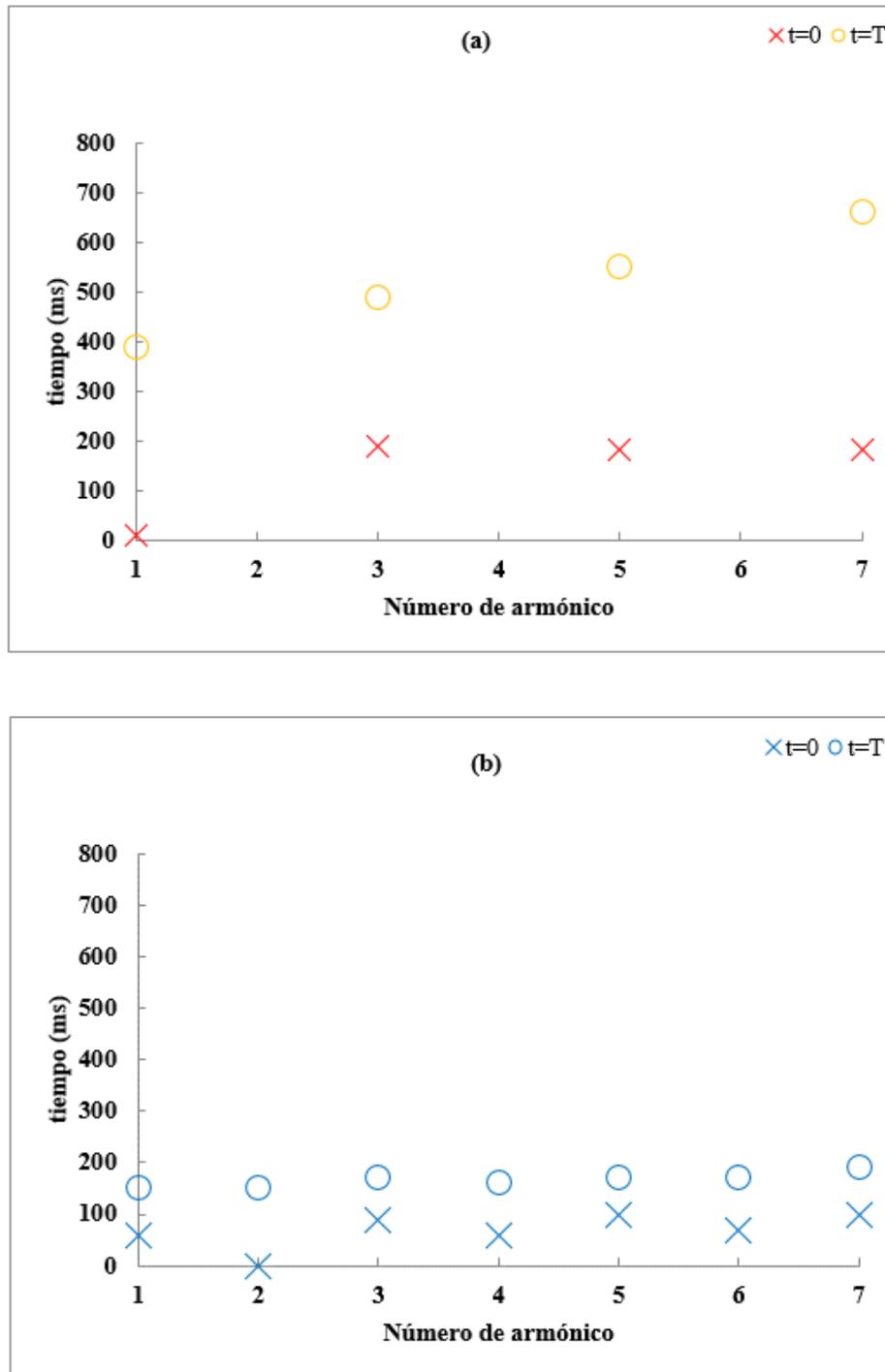


Figura 4.14: Tiempos de comienzo (x) y de final (o) de los (a) ataques de fuelle y (b) ataques de dedo sobre la nota A3 del manual derecho en dinámica piano.

4.3.1.2. Cambio del nivel de presión sonora

La velocidad de cambio del pico de presión y otros atributos dinámicos bien podrían jugar un papel clave en la percepción de los transitorios de ataque [Heil & Irvine 1998]. Si la única diferencia entre los dos tipos de ataque fuera su duración, sus respectivas velocidades de cambio del nivel de presión sonora (en dB/ms) deberían evolucionar también de la misma manera. Sin embargo, si se divide el tiempo de ataque (T) de cada armónico en cuatro intervalos iguales de tiempo ($0-0.25T$, $0.25T-0.5T$, $0.5T-0.75T$, $0.75T-T$), puede observarse cómo cada tipo de ataque tiene una evolución característica que lo diferencia del otro. La Figura 4.15 muestra la velocidad de cambio del nivel de presión sonora de los dos tipos de ataque, para los armónicos más bajos de la nota A#3, atacada en *mezzo forte*, del manual derecho del acordeón. La Figura 4.16 da la misma información, pero para ataques en *piano* sobre la misma nota A#3.

Los ataques de fuelle muestran una velocidad más alta de cambio del nivel de presión sonora durante el primer cuarto del tiempo de ataque de cada armónico. Para el resto del ataque, esta velocidad es muy baja. En cambio, para los ataques de dedo, esta velocidad de cambio está más equilibrada durante todo el ataque. Esto podría contribuir a una diferente percepción de ambos tipos de ataque.

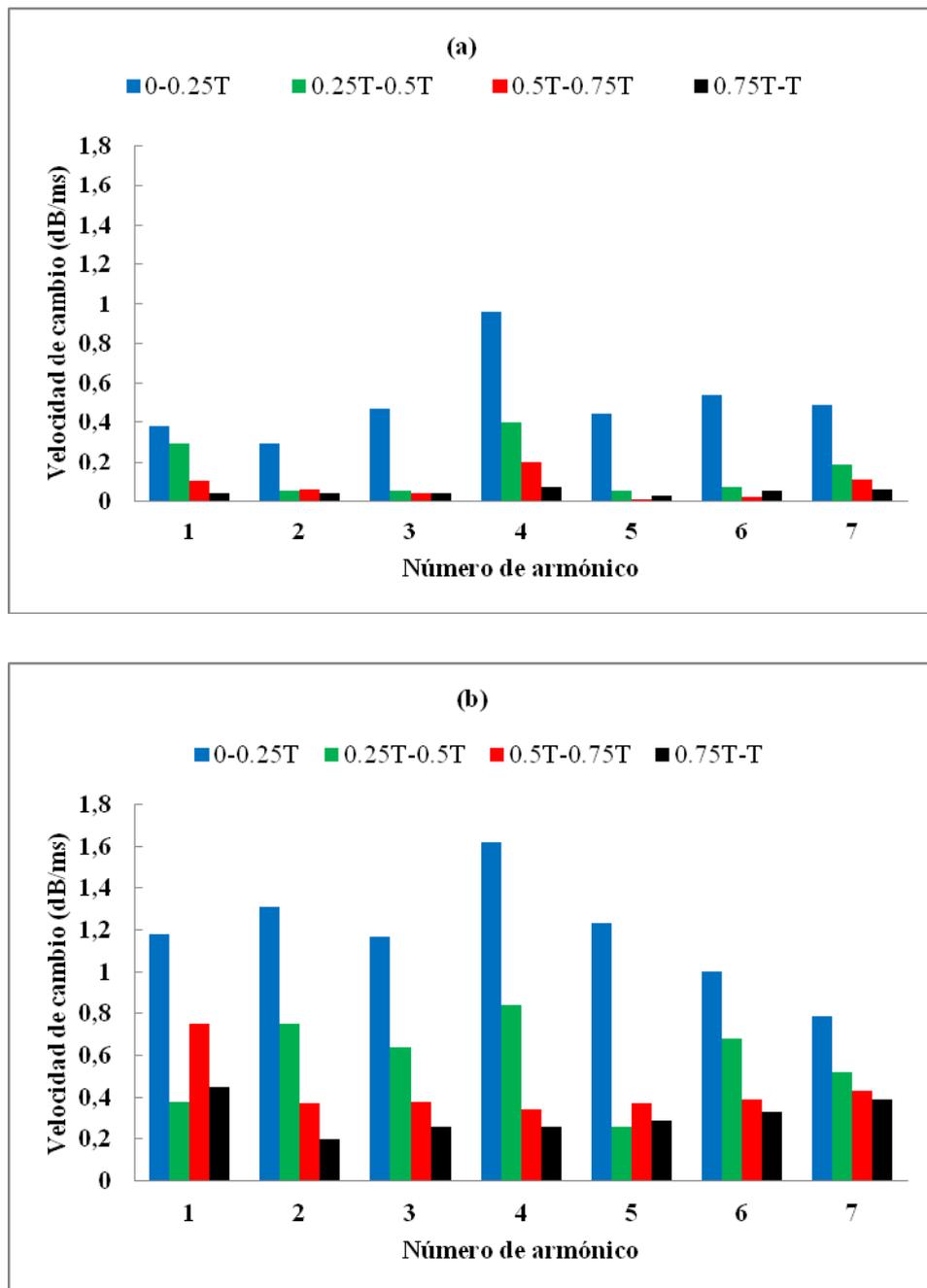


Figura 4.15: Velocidad de cambio del nivel de presión sonora (en dB/ms) de los siete primeros armónicos de la nota A#3, atacada en mezzo forte, en cada uno de los cuatro segmentos del tiempo de ataque T. (a) ataque de fuelle y (b) ataque de dedo.

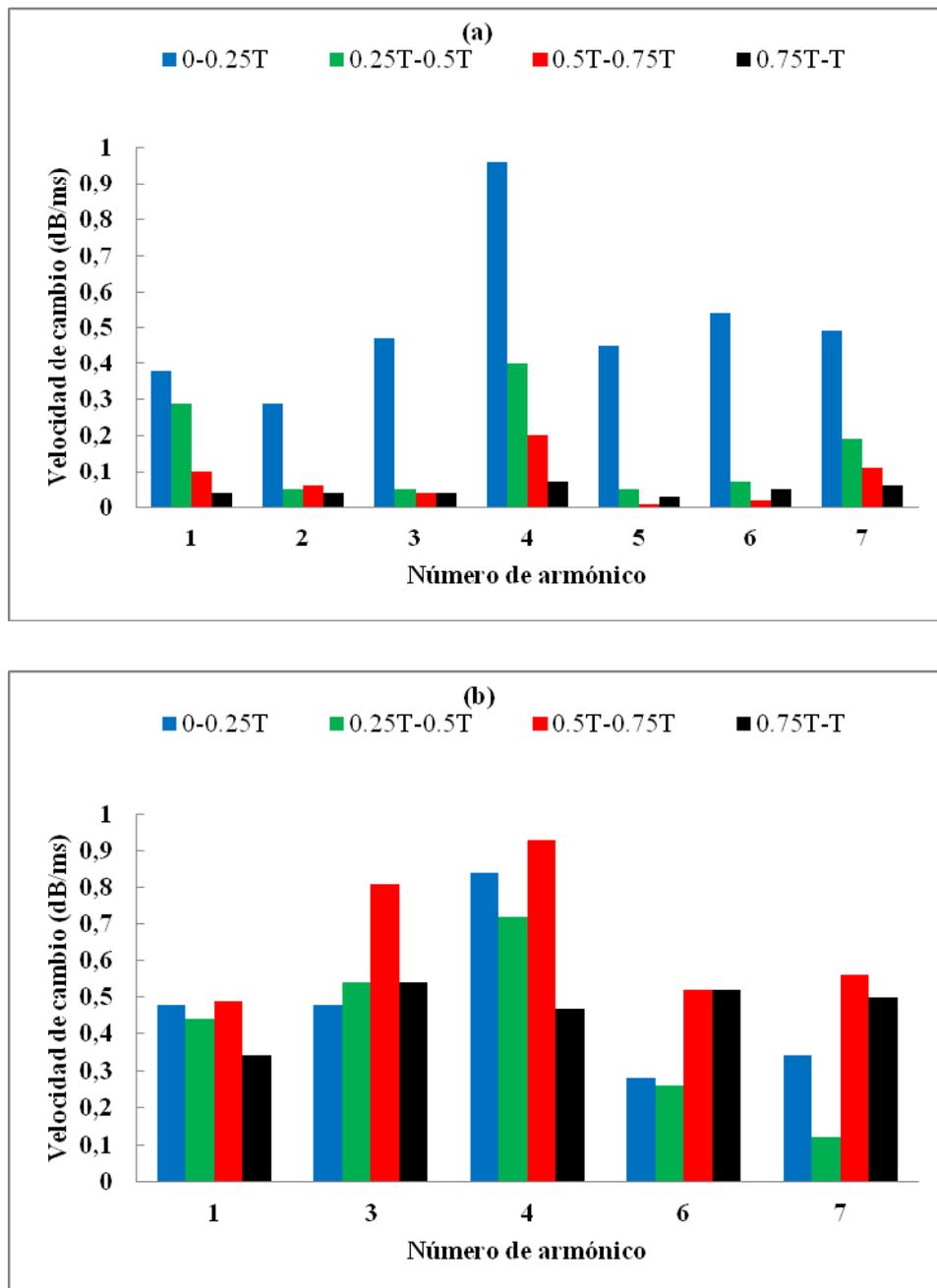


Figura 4.16: Velocidad de cambio del nivel de presión sonora (en dB/ms) de los siete primeros armónicos de la nota A#3, atacada en piano, en cada uno de los cuatro segmentos del tiempo de ataque T. (a) ataque de fuelle y (b) ataque de dedo.

4.3.1.3. Evolución temporal del Centroide Espectral

Un ejemplo de la evolución temporal del centroide para ataques de dedo y de fuelle puede observarse en la Figura 4.17.

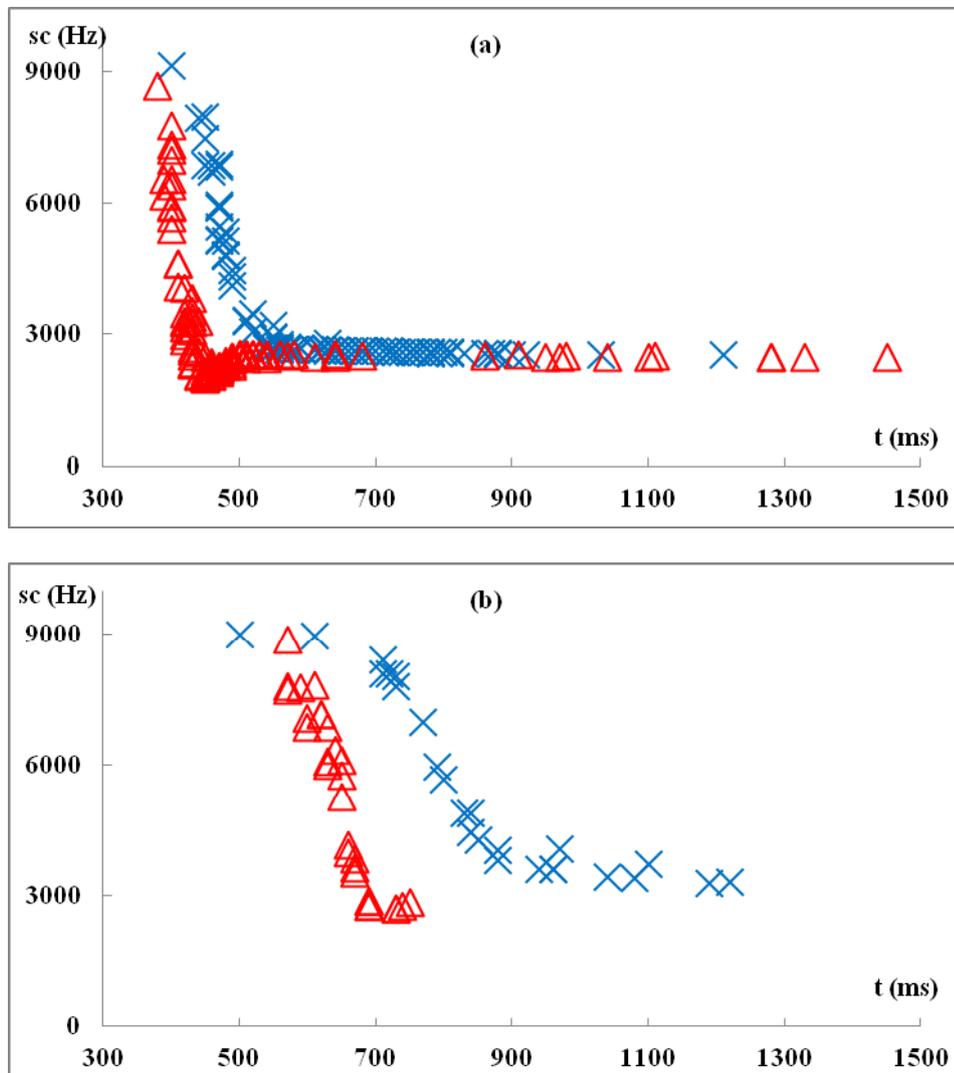


Figura 4.17: Evolución del centroide espectral de la nota A#3 en (a) mezzo forte, y (b) piano, para ataques fuelle (aspas azules) y ataques de dedo (triángulos rojos). El máximo error en los valores del centroide es de 40 Hz.

Con el fin de comprobar si la única diferencia entre los dos tipos de ataque es su duración, la Figura 4.18 muestra la evolución de los centroides de la Figura 4.17 pero ahora con el eje horizontal expresando unidades del tiempo de ataque (t/T), donde T es el tiempo de ataque del primer armónico,

diferente para cada tipo de ataque. Si la única diferencia entre los dos tipos de ataque fuera su duración, ambos centroides deberían evolucionar de la misma manera. Sin embargo, el gráfico muestra que el centroide del ataque de fuelle permanece siempre por encima del centroide del ataque de dedo tanto para dinámica en *mezzo forte* como para dinámica en *piano*.

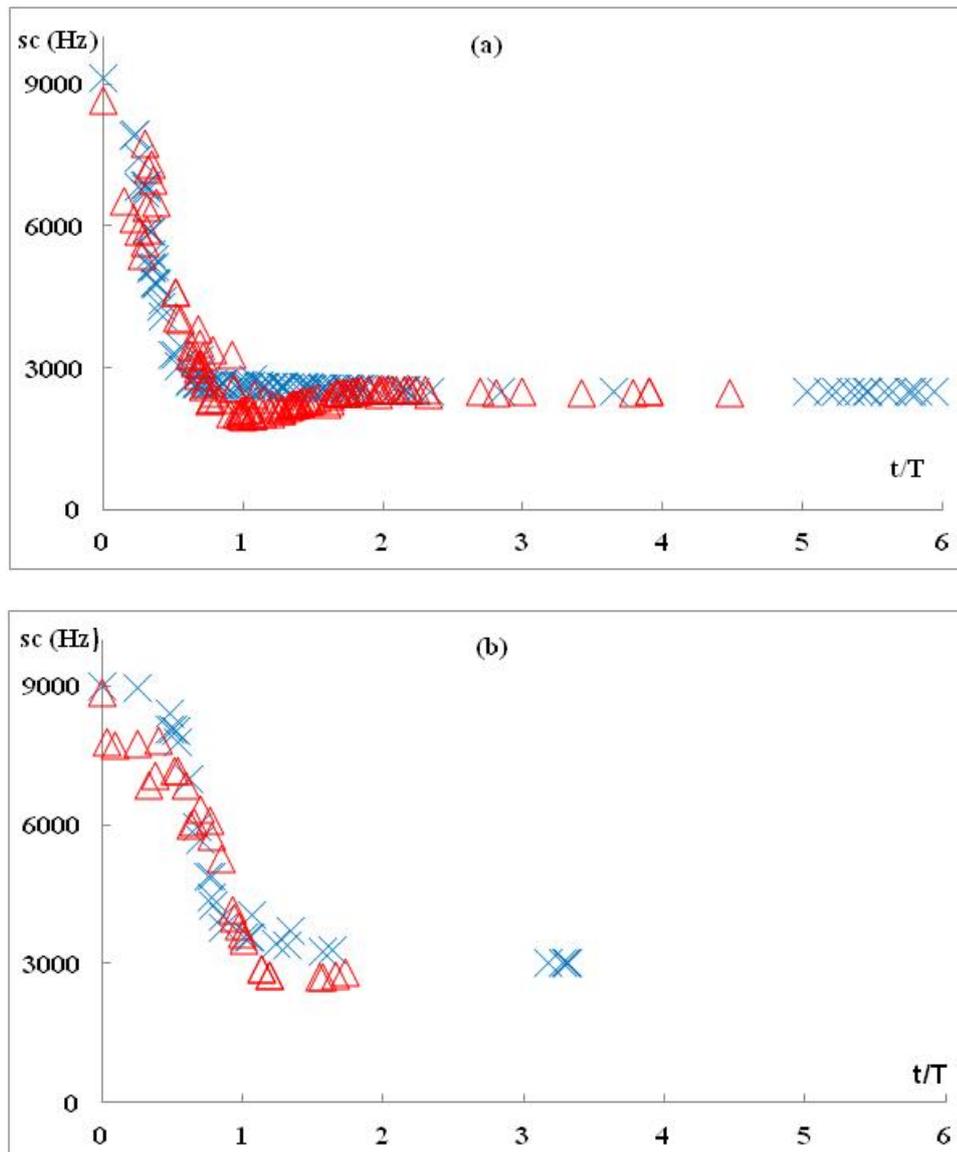


Figura 4.18: Evolución temporal (en unidades de tiempo de ataque) de los centroides espectrales durante el ataque de la nota A#3 en (a) *mezzo forte*, (b) *piano*. Las espas azules corresponden a los ataques de fuelle y los triángulos rojos a los ataques de dedo. El máximo error en los valores del centroide es de 40 Hz.

Con dinámica *mezzo forte*, en el comienzo del ataque el valor del centroide está cercano a 8500-9000 Hz. Esto es así para ambos tipos de ataque. En el caso del ataque de dedo el centroide varía más rápidamente durante el comienzo del ataque, alcanza después un mínimo, y termina creciendo lentamente. La diferencia más significativa entre los ataques de dedo y de fuelle se encuentra, aproximadamente, en el intervalo de tiempos comprendido entre $0.7T$ y $1.7T$, durante el cual el centroide del ataque de dedo es menor que el centroide correspondiente al ataque de fuelle. Al final del ataque todos los centroides permanecen cercanos a 2500 Hz. El hecho de que el centroide de cada tipo de ataque evolucione de diferente manera durante una parte del ataque es un indicador de que el timbre evoluciona de manera diferente. En cualquier caso, ello no implica necesariamente que esta diferencia pueda ser siempre percibida. Sería necesaria más información acerca del limen del centroide antes de hacer una afirmación tan general y categórica.

El intervalo de tiempo en el que el centroide del ataque de dedo es menor que el centroide del ataque de fuelle parece variar ligeramente dependiendo de la altura de las notas atacadas, pero esa diferencia entre ambos tipos de ataques es una característica identificadora. En particular, en el caso de las notas más graves, el comienzo de este intervalo temporal característico parece estar más retrasado comparado con el de notas medias o agudas. Para esas notas más graves, las pendientes descendentes iniciales de ambos centroides son menos acusadas que las pendientes correspondientes a notas medias. Además, el intervalo de tiempo en que el centroide del ataque de dedo es menor que el centroide del ataque de fuelle se ha desplazado ligeramente a valores mayores del tiempo. Esto resulta congruente con que los ataques sobre notas graves se sienten más lentos tanto por oyentes como por intérpretes [Lips 2000, Gervasoni 1986, Grey 1977].

En cualquier caso, para cualquier altura dada de sonido, los valores de los centroides asociados con los ataques de fuelle y de dedo se aproximan a

un valor común al final del ataque, como debe ser, puesto que el modo en que una nota es atacada solo tiene efecto sobre la parte transitoria del sonido.

En el caso de ataques con dinámica *piano*, existe también un intervalo de tiempos durante el cual el centroide del ataque de dedo es menor que el centroide del ataque de fuelle.

En el caso de las notas más agudas analizadas en este trabajo (A#5, B5, A6, A#6, B6) la evolución temporal de los centroides correspondientes a ataques de fuelle y de dedo con dinámica *piano* no muestran una diferencia clara que permita identificar el tipo de ataque. De cualquier modo, el estado final de cada par de ataques de fuelle y de dedos tiene siempre un valor común de centroide.

4.3.2. Ataques de dedo con pulsación lenta

La dureza de un ataque, al comienzo de un tono, puede ser modificada mediante la variación de la velocidad con la que se pulsa el botón [Lips 2000, Jacomucci 1998].

En el caso de un ataque habitual de dedo, el dedo pulsa rápidamente el botón (el botón se pulsa lo más rápidamente posible) y el fuelle está tenso antes de que actúe el dedo. Por lo tanto, el espacio por donde sale el aire a través de la cámara de la lengüeta queda libre rápidamente. Los ataques usuales de dedo son realizados en unos 0.05 s aproximadamente. Los ataques con pulsación lenta pueden llevarse a cabo tan lentamente como se desee, pero su duración suele ser de unos 0.50 s.

En el caso de un ataque de dedo con pulsación lenta el botón se pulsa lentamente. El fuelle está también tenso antes de que se active el dedo, pero el espacio a través del cual pasa el aire en la cámara de la lengüeta se va a abrir ahora lentamente, según la velocidad del botón, y el flujo de aire va a crecer con menos rapidez que en el caso de un ataque ordinario (rápido) de dedos. Esta pequeña abertura inicial de la válvula puede de algún modo

tener influencia no solo en la dinámica del comienzo del ataque, sino también en el espectro inicial, favoreciendo ciertos armónicos, lo que podría reflejarse a su vez en algunos parámetros psicoacústicos como puede ser el caso del centroide.

Hemos llevado a cabo algunas medidas para analizar el tiempo de ataque y la velocidad de cambio del nivel de presión sonora (en dB/ms) de los primeros armónicos para ataques de dedo y fuelle con dinámica *mezzo forte* y pulsación lenta sobre las notas A4 y A#4 del manual derecho del acordeón.

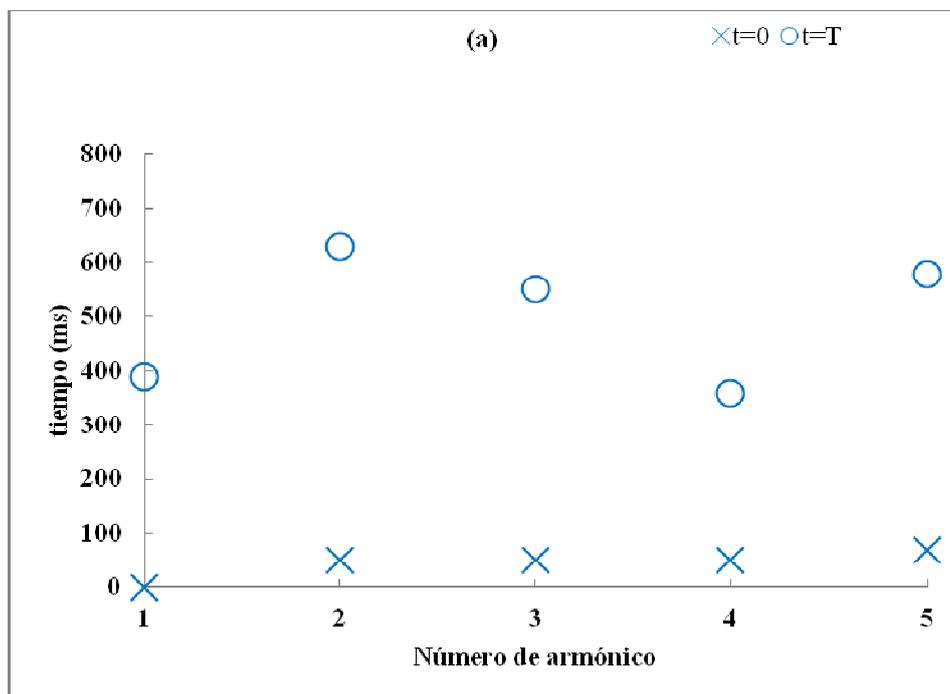
La Tabla 4.9 muestra los valores obtenidos para el tiempo de ataque (T) del primer armónico de los ataques de dedo con pulsación lenta para las notas A4 y A#4. Para facilitar la comparación se han representado también los valores obtenidos con ataques ordinarios de dedo y de fuelle.

Los resultados muestran que, cuando disminuye la velocidad del botón, el tiempo de ataque toma un valor intermedio entre aquellos obtenidos para ataques de dedo y los obtenidos para ataques de fuelle. Se podría decir que el ataque de dedo se ha “suavizado o ablandado”.

		dinámica <i>mezzo forte</i>			dinámica <i>piano</i>		
nota	f (Hz)	Fuelle	Dedo con pulsación lenta	Dedo	Fuelle	Dedo con pulsación lenta	Dedo
		T (ms)	T (ms)	T (ms)	T (ms)	T (ms)	T (ms)
A4	437.5	390	80	60	410	220	90
A#4	462.5	440	150	60	390	180	140

Tabla 4.9: Valores de la frecuencia y del tiempo de ataque para el primer armónico de A4 y A#4 para ataques de dedo efectuados con pulsación lenta comparados con los valores obtenidos para ataques ordinarios de dedo y de fuelle.

La Figura 4.19 muestra el comienzo (-50 dB del umbral de la amplitud máxima) y final (-5 dB del umbral de la amplitud máxima) de los primeros armónicos de la nota A4 para (a) ataques de fuelle, (b) ataques ordinarios de dedo, y (c) ataques de dedo llevados a cabo con pulsación lenta del botón. Todas las medidas se han realizado con dinámica *mezzo forte*. La Figura 4.20 da la misma información para la nota A#4. Como ocurría con el primer armónico, cuando la velocidad del botón disminuye, el tiempo de ataque toma valores entre los correspondientes a ataques de dedo y los correspondientes a ataques de fuelle. Estos resultados confirman que una pulsación lenta del botón durante un ataque de fuelle suaviza el ataque: el tiempo de ataque del ataque de dedo se alarga y la evolución de los armónicos muestra un comportamiento intermedio entre el que se da en los ataques de dedo y el que se presenta en los ataques de fuelle.



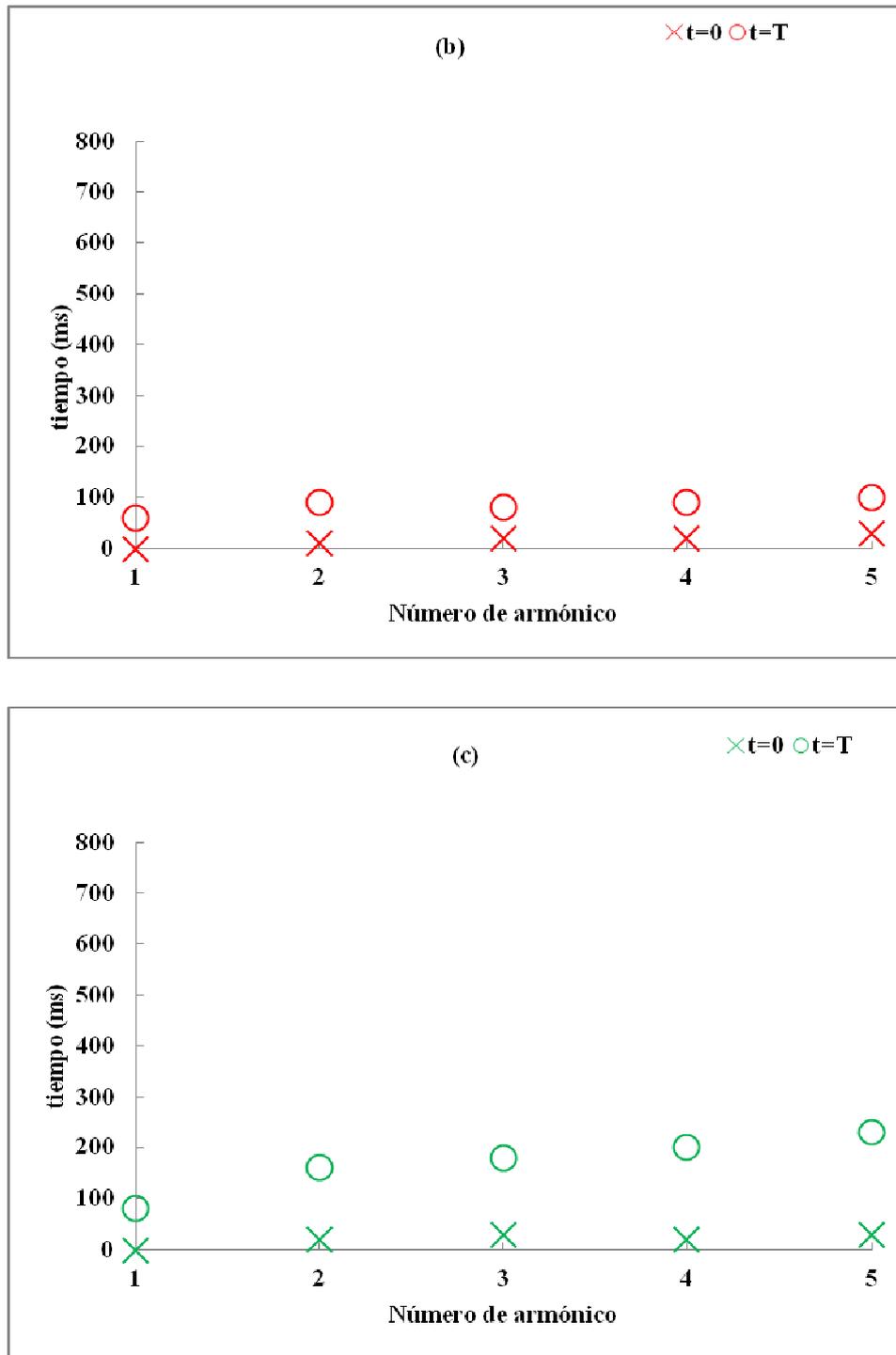
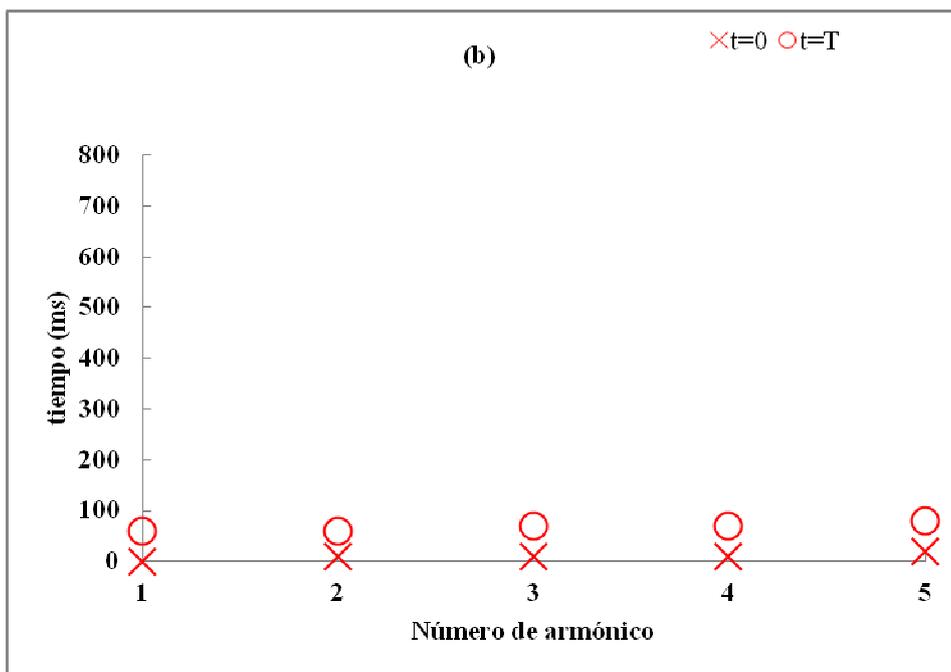
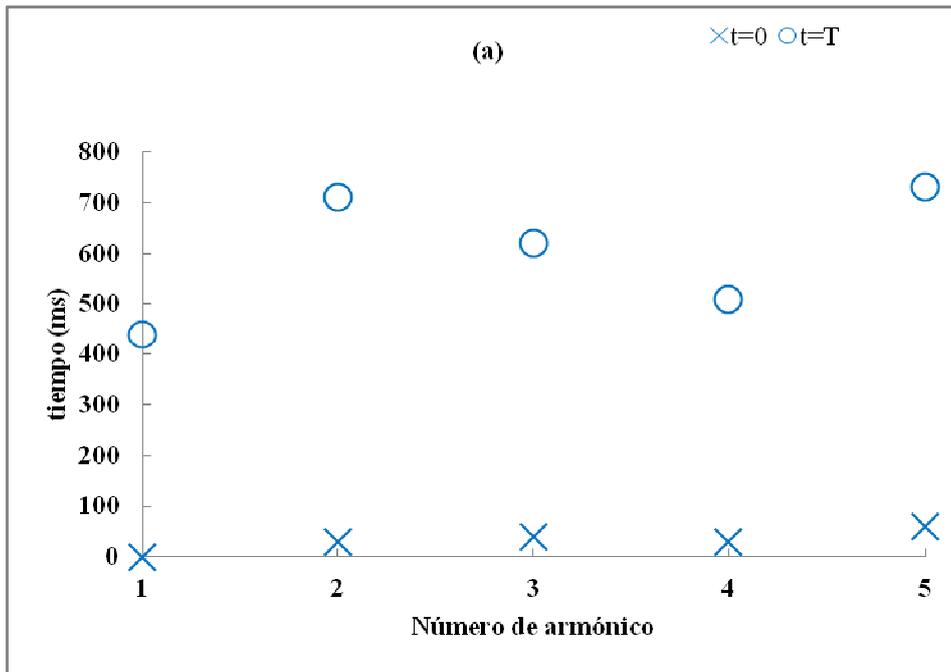


Figura 4.19: Comienzo (x) (umbral de -50 dB de la amplitud máxima) y final (o) (umbral de -5 dB de la amplitud máxima) de los primeros armónicos de la nota A4 para (a) ataque de fuelle, (b) ataque de dedo, y (c) ataque de dedo con pulsación lenta, todos ellos con dinámica mezzo forte.

4. Resultados y discusión



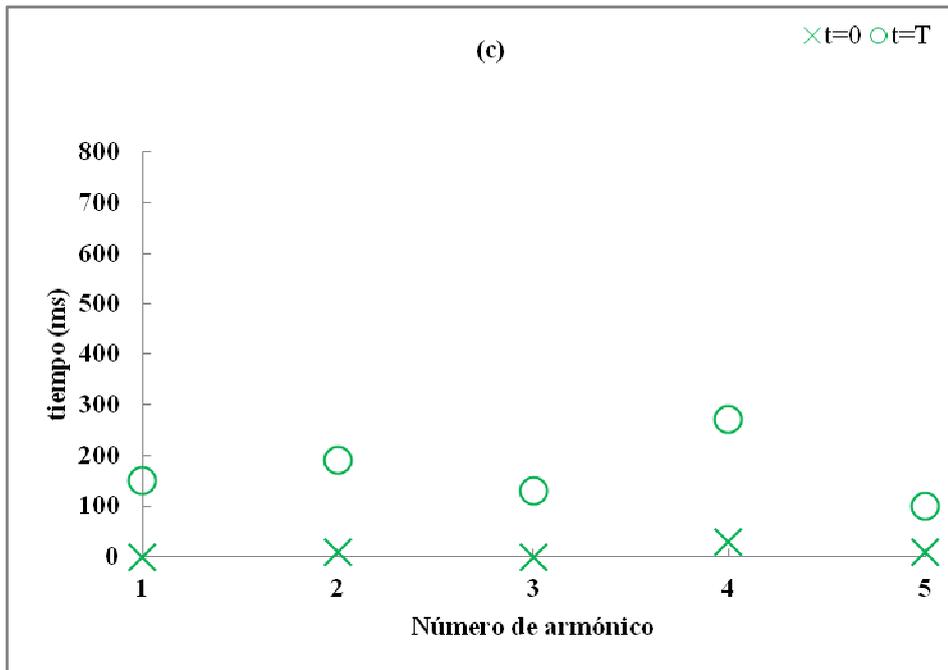
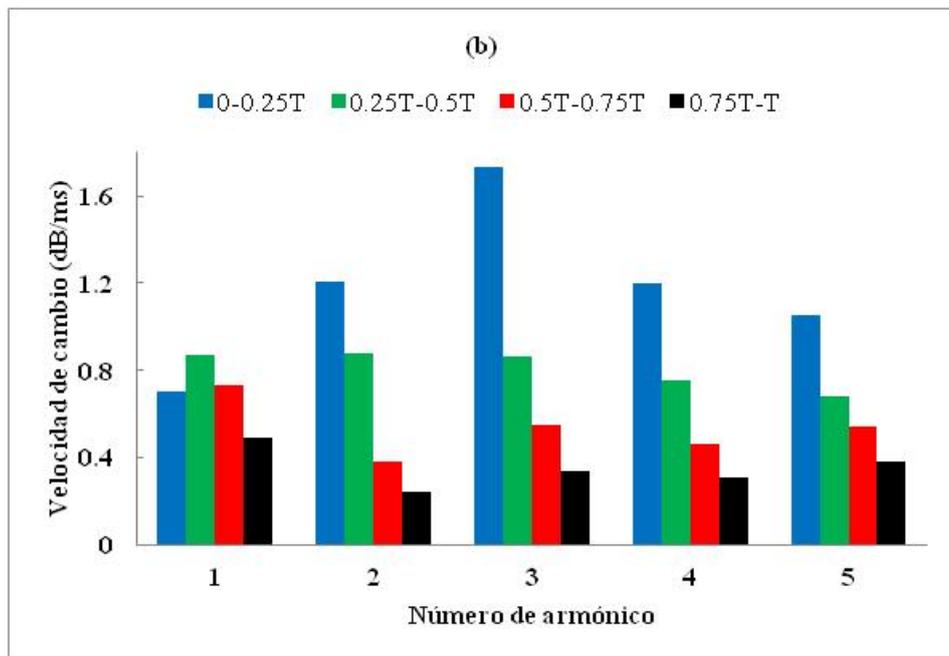
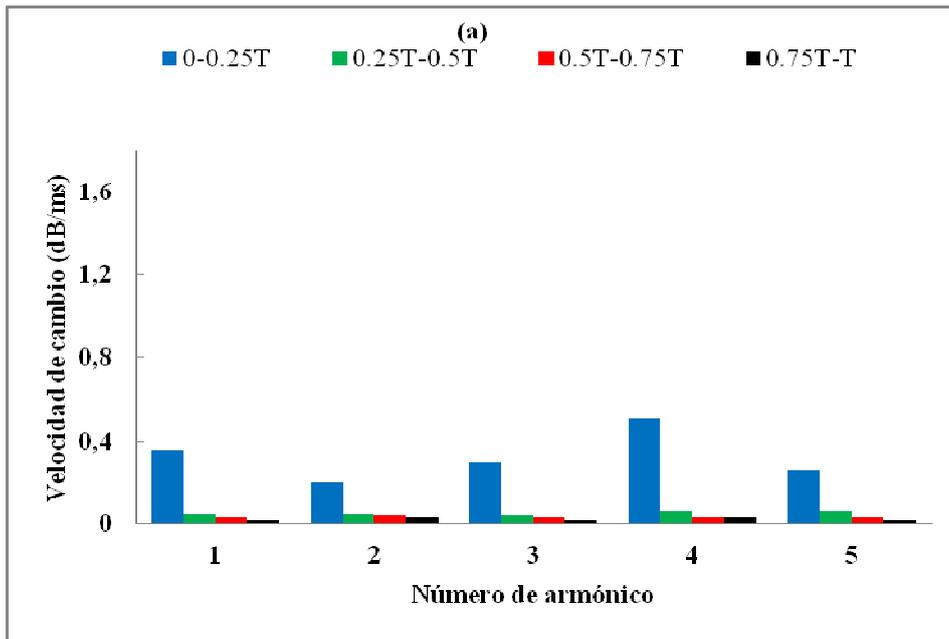


Figura 4.20: Comienzo (x) (umbral de -50 dB de la amplitud máxima) y final (o) (umbral de -5 dB de la amplitud máxima) de los primeros armónicos de la nota A#4 para (a) ataque de fuelle, (b) ataque de dedo, y (c) ataque de dedo con pulsación lenta, todos ellos con dinámica mezzo forte.

El efecto del ataque lento sobre el botón se refleja también en la velocidad de cambio del nivel de presión sonora (en dB/ms) de los primeros armónicos, modificándola de forma que su comportamiento para los ataques de dedo se parece al de los ataques de fuelle (Figura 4.21).

4. Resultados y discusión



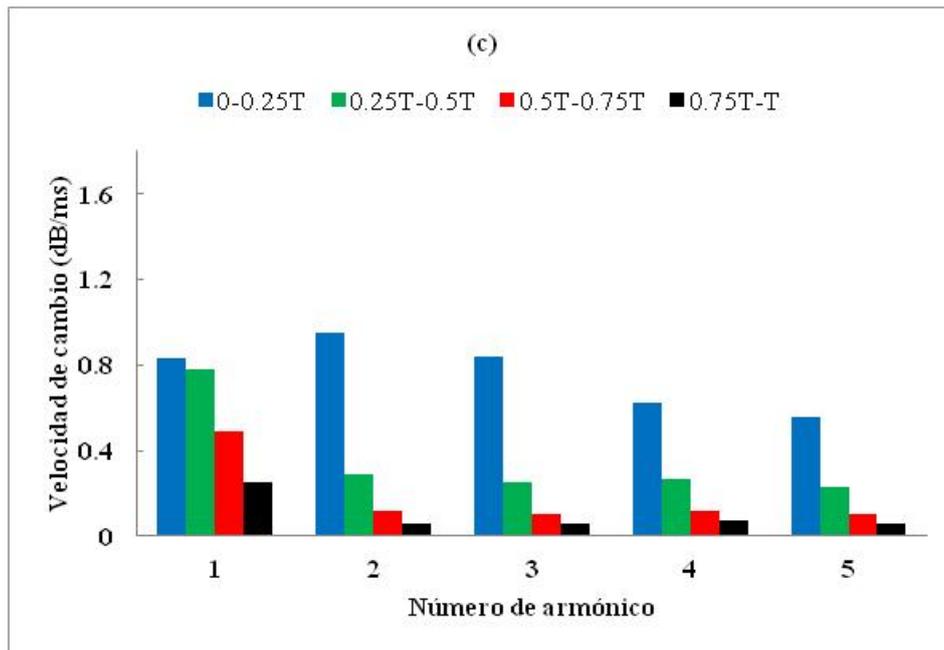


Figura 4.21: Velocidad de cambio del nivel de presión sonora (en dB/ms) de los primeros armónicos de la nota A4 para (a) ataque de fuelle, (b) ataque ordinario de dedo y (c) ataque de dedo con pulsación lenta, todos ellos con dinámica mezzo forte

Al comparar los ataques de fuelle y de dedos sobre la misma nota y con la misma dinámica, vimos que el centroide de un ataque de fuelle permanecía siempre sobre el centroide del correspondiente ataque de dedo y que existía un intervalo característico de tiempo durante el cual el centroide del ataque de dedo era significativamente menor que el centroide del ataque de fuelle correspondiente.

El efecto de una pulsación lenta en un ataque de dedo se refleja en el centroide (Figura 4.22a y Figura 4.22b) como un incremento de sus valores. En primer lugar, el centroide de un ataque con pulsación lenta permanece por encima del ataque ordinario de dedo. En segundo lugar, no hay un intervalo característico de tiempo que diferencie el centroide del ataque de dedo con pulsación lenta del centroide del ataque de fuelle. La pulsación lenta parece hacer más blando (menos marcado, menos puntuado) el ataque de dedo; aparentemente modela el flujo de aire de un ataque de

fuelle suavizando la zona característica que lo diferencia de un ataque de fuele.

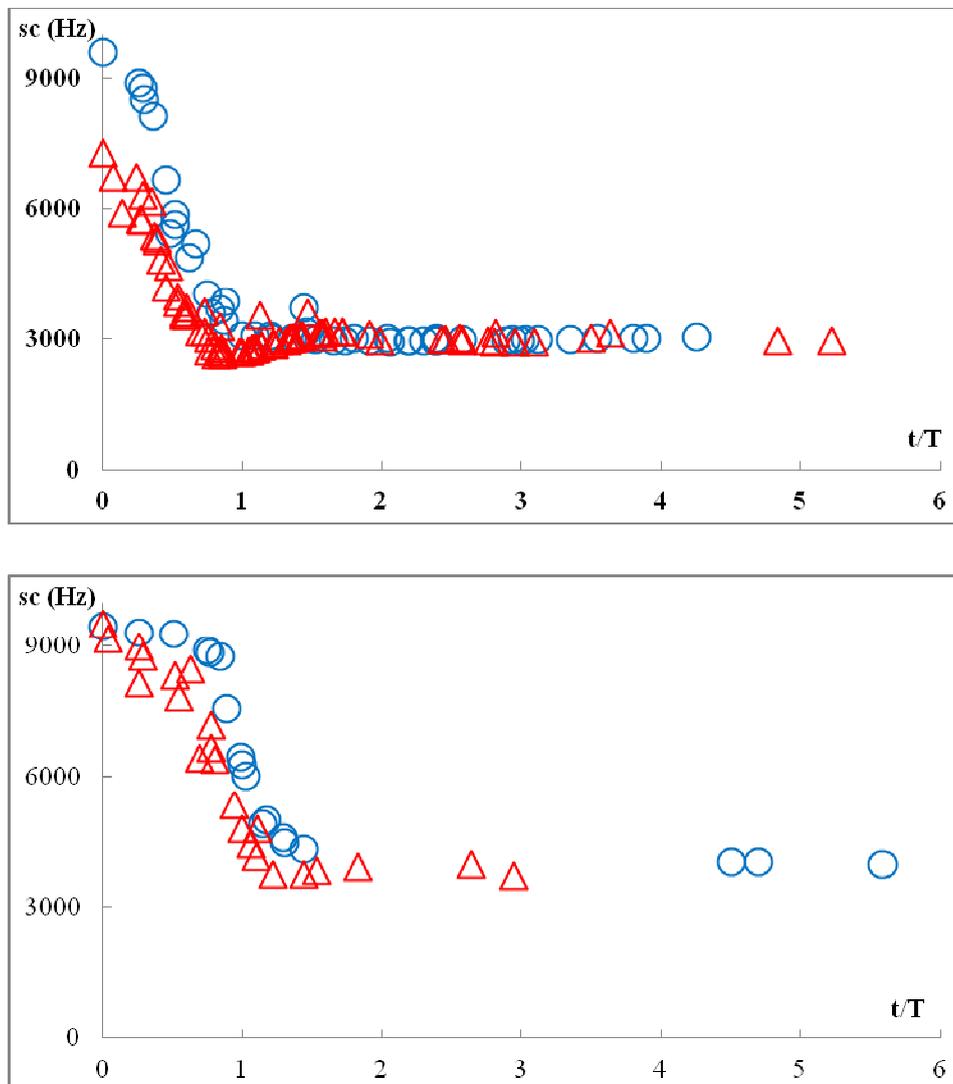


Figura 4.22a: Centroide espectral vs. tiempo en unidades de tiempo de ataque correspondiendo a (a) ataque en mezzo forte y (b) ataque en piano sobre la nota A4. Los triángulos corresponden a ataques ordinarios de dedo y los círculos a ataques de dedo con pulsación lenta. El error máximo en los valores del centroide es de 40 Hz.

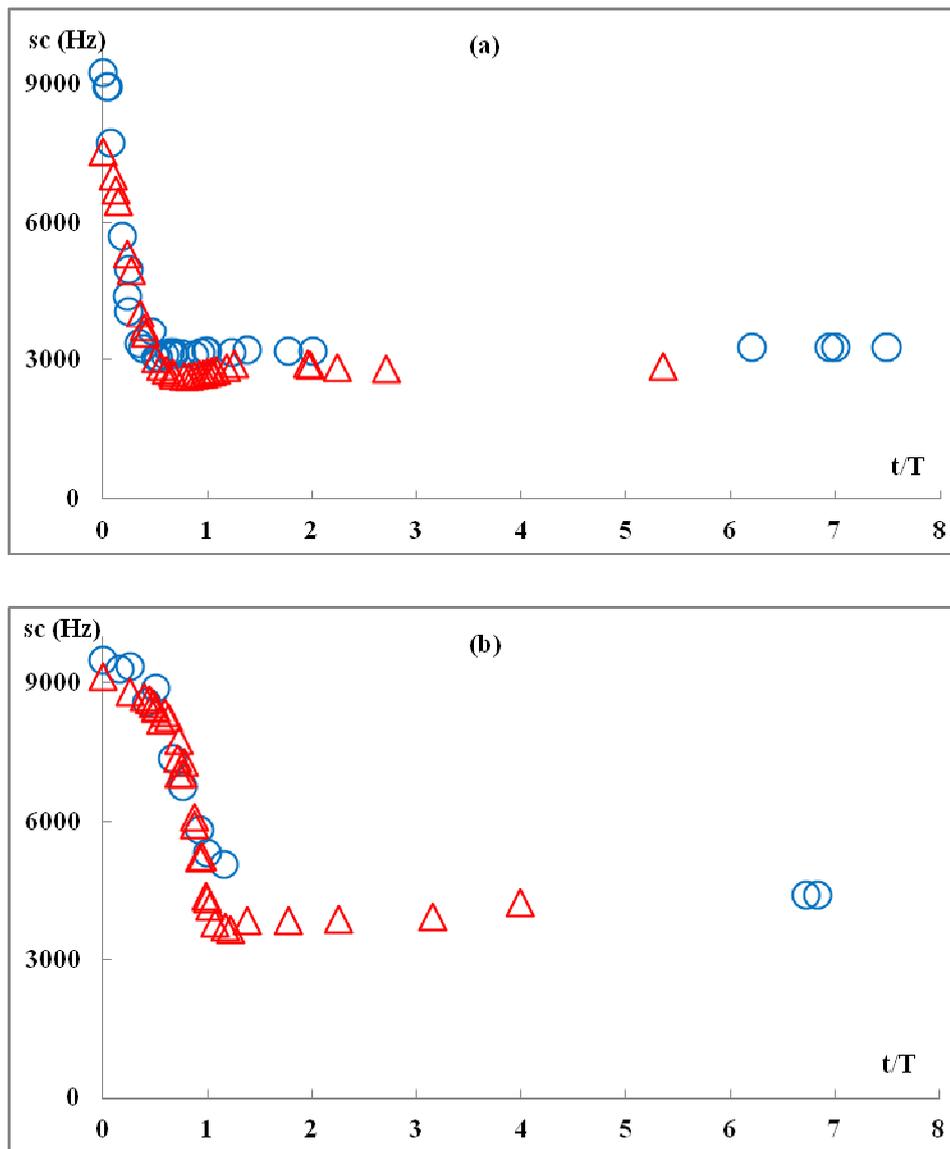


Figura 4.22b: Centroide espectral vs. tiempo en unidades de tiempo de ataque correspondiendo a (a) ataque en mezzo forte y (b) ataque en piano sobre la nota A#4. Los triángulos corresponden a ataques ordinarios de dedo y los círculos a ataques de dedo con pulsación lenta. El error máximo en los valores del centroide es de 40 Hz.

4.3.3. Ataques realizados sobre lengüetas en cassotto

Como se ha mencionado ya, el cassotto es una cámara especial de resonancia donde se colocan dos de los cuatro conjuntos de lengüetas del manual derecho (ver Figura 1.4).

El *cassotto* atenúa los armónicos agudos, dando un timbre más cálido. Actúa sobre el sonido generado por la lengüeta, pero no actúa sobre la lengüeta misma. Por tanto, era de esperar que el *cassotto* no tuviera influencia en la duración relativa y en el comportamiento de los ataques de fuelle y de dedo. Esto es coherente con la ausencia en la literatura técnica sobre acordeón de cualquier tipo de consejo para evitar o preferir el uso de registros en *cassotto* en cuanto a la respuesta de las lengüetas se refiere. En este estudio hemos llevado a cabo ataques de fuelle y de dedo con dinámica *mezzo forte* sobre las notas A4 y A#4 de los registros de 8 pies dentro de *cassotto*, para así compararlas con la misma clase de ataques realizados sobre las mismas notas A4 y A#4 del registro de 8 pies fuera de *cassotto*.

La Tabla 4.10 muestra los valores obtenidos para el tiempo de ataque (T) del primer armónico para ataques de fuelle y de dedo realizados con dinámica *mezzo forte* sobre las notas A4 y A#4 dentro de *cassotto*. Para una mejor comparación, se han anotado también los valores obtenidos para los ataques sobre las mismas notas pero fuera de *cassotto*. El *cassotto* no tiene ningún efecto sobre la duración total de los ataques. Los resultados obtenidos son similares a los representados en las Figuras 5.2 y 5.3.

dinámica <i>mezzo forte</i>		Fuera de <i>cassotto</i>		Dentro de <i>cassotto</i>	
nota	f (Hz)	Fuelle	Dedo	Fuelle	Dedo
		T (ms)	T (ms)	T (ms)	T (ms)
A4	437.5	390	60	480	60
A#4	462.5	440	60	320	60

Tabla 4.10: Valores de la frecuencia y del tiempo de ataque del primer armónico de las notas A4 y A#4 (dentro y fuera de cassotto) para ataques de dedo y ataques de fuelle con dinámica mezzo forte.

El efecto del *cassotto* en los armónicos altos queda reflejado en los bajos valores del centroide correspondiente (Figura 4.23).

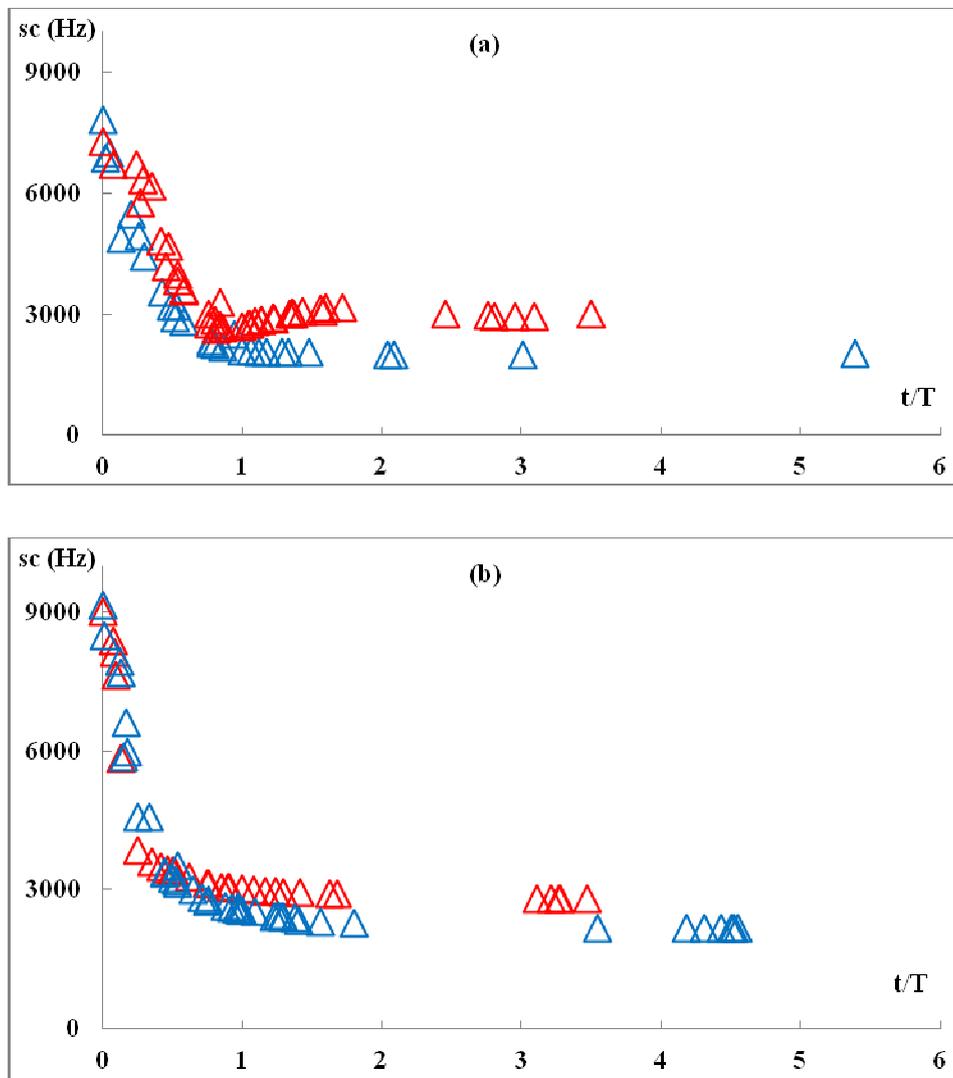


Figura 4. 23: Centroide espectral vs. tiempo en unidades de tiempo de ataque (t/T) correspondientes a ataques de dedo en dinámica fuerte llevados a cabo sobre la notas (a) A4 y (b) A#4 del registro de 8 pies en cassotto (triángulos azules) y la misma nota del registro de 8 pies fuera de cassotto (triángulos rojos). El error máximo en los valores del centroide es de 40 Hz.

Al comparar los centroides de los ataques llevados a cabo sobre notas dentro de *cassotto*, puede verse de nuevo que, al igual que se observaba en la Figura 4.18 encontramos un intervalo de tiempo en el que el centroide de los ataques de dedo toma valores menores que el de los ataques de fuelle. En cualquier caso, la zona característica no se muestra de una manera tan clara como en el caso en que los ataques de fuelle y de dedo se llevaban a cabo sobre lengüetas fuera de *cassotto*. El modo en que el *cassotto* atenúa los armónicos agudos tiene por efecto el suavizado de las diferencias entre los centroides espectrales correspondientes a los ataques de fuelle y a los ataques de dedo. Es más, como en el caso de ataques realizados sobre lengüetas situadas fuera de *cassotto* (Figura 4.15), los ataques de fuelle muestran de nuevo un valor alto para la velocidad de cambio del nivel de presión sonora (en *dB/ms*) durante el primer cuarto del tiempo de ataque de cada armónico (Figuras 4.24). Para el resto del ataque, esta velocidad es muy lenta. Sin embargo, para los ataques de dedo, esta velocidad de cambio está más equilibrada durante todo el intervalo.

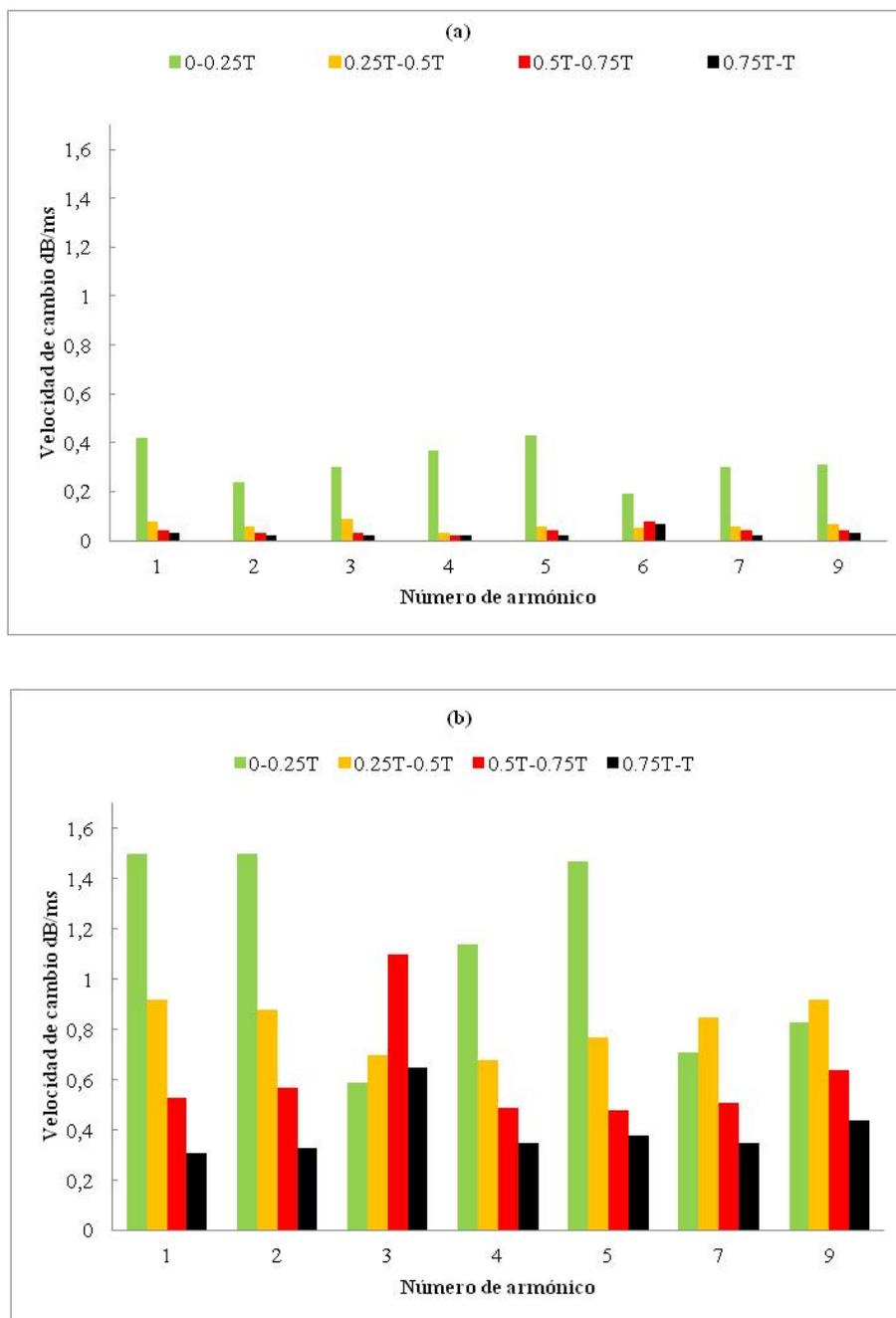


Figura 4.24: Velocidad de cambio del nivel de presión sonora (en dB/ms) de los primeros armónicos de la nota A4 para (a) ataque de fuelle, registro en cassotto, (b) ataque de dedo, registro en cassotto, todos ellos con dinámica mezzo forte.

4.3.4. Proceso de creación de los diferentes ataques

A partir del análisis de los procesos de creación de cada tipo de ataque se pueden derivar algunas ideas cualitativas sobre los mismos. En el ataque de dedo el fuelle se pone inicialmente en tensión. Esto implica que se crea una diferencia de presión entre el exterior y el interior del acordeón. Si en ese momento se pulsa un botón, la válvula correspondiente abrirá la cámara de la lengüeta y el aire del espacio circundante fluirá hacia dicha lengüeta, generando el sonido. Una vez que el fuelle está en tensión, la velocidad a la que se pulsa el botón se convierte en el parámetro que regula la mayor o menor brusquedad o inmediatez del movimiento del aire. La abertura creciente que se genera por la pulsación del botón (y la correspondiente elevación de la válvula o zapata) es el único obstáculo que dificulta el paso del aire de una región a otra (siempre a través de la lengüeta). Como el dedo puede bajar muy rápidamente el botón (y así lo hace en los ataques ordinarios de dedo), el ataque es percibido casi como instantáneo.

En los ataques de fuelle el aire es de nuevo obligado a moverse entre dos regiones de diferente presión, pero en este caso el botón permanece bajado desde un principio. Por tanto, la mayor o menor rapidez de la puesta en marcha del fuelle es ahora el factor que determina la mayor o menor inmediatez del ataque. Dado que la caja izquierda tiene una mucha mayor inercia (masa) que los botones, el ataque de fuelle se siente más lento que el ataque de dedos. Sin embargo, nada obstaculiza ahora el paso del aire, puesto que el botón permanece bajado desde el principio.

Las diferentes inercias del botón y del fuelle se reflejan en la manera en que crecen los armónicos (Figura 4.11). Los armónicos del sonido generado en un ataque de fuelle tienen una pendiente de crecimiento menor que la de los armónicos del correspondiente ataque de dedo. Esto está estrechamente relacionado con el hecho de que el centroide espectral de un ataque de dedo tiene una pendiente inicial mayor que la del ataque de fuelle correspondiente.

La manera en que se produce cada ataque sugiere una que la presión externa de soplo tiene una forma diferente en cada caso. Un ataque de dedo podría ser modelado mediante una presión de soplo de tipo escalón de Heaviside. Análogamente, un ataque de fuelle podría ser representado mediante una presión de tipo rampa. Este tipo de investigación ha sido llevada a cabo por para el clarinete [Bergeot et al. 2012, Almeida et al. 2015].

Los efectos transitorios se incluyen también en el modelado de una lengüeta libre realizado por Millot y Baumann [Millot & Baumann 2007]. Estos dos autores se centran en la comparación de tres modelos de secciones eficaces para la lengüeta libre, con el flujo entrante correspondiendo a lo que sería un ataque de dedo. Un trabajo relacionado con este que acabamos de mencionar, para lengüetas batientes hacia afuera, fue llevado a cabo por Tarnopolsky et al. [Tarnopolsky et al. 2001], quienes estudiaron el comportamiento umbral y las oscilaciones de larga amplitud de una lengüeta batiente hacia afuera sobre la que incide una corriente de aire. Su modelo, tal y como ocurre con el de Millot y Baumann, depende marcadamente de los detalles de la geometría de la lengüeta.

Por último, los patrones característicos de crecimiento de los ataques de dedo y de fuelle, mostrados en la Figura 4.11, se reflejan también en la velocidad de cambio de la magnitud (en dB) de la presión. Esta tiene un crecimiento más regular en los ataques de dedo. En los ataques de fuelle (Figura 4.15a), los armónicos crecen rápidamente durante la primera parte del ataque para experimentar posteriormente un crecimiento más lento. Sin embargo, los armónicos de un ataque de dedo (Figura 4.15b) no solo tienen un crecimiento más rápido que los armónicos del correspondiente ataque de fuelle, sino un crecimiento que puede ser descrito como más uniforme.

En cuanto a los ataques de dedo con pulsación lenta se refiere, el botón, y su correspondiente zapata, se baja lentamente. Cuanto más lenta es la pulsación, mayor es el tiempo que le cuesta pasar al flujo de aire en comparación con lo libremente que puede circular en el caso de un ataque ordinario de dedo. Pero hay otra característica específica de este tipo de

ataque. Si el fuelle se mantiene tenso de manera firme (con dinámica *mezzo forte* o *piano*) antes de la acción del dedo al comienzo del ataque de dedo con pulsación lenta, y el botón es pulsado muy lentamente (para acentuar el efecto de esta pulsación lenta), tenemos un rápido flujo de aire que circula a través de una abertura muy pequeña (el hueco entre la válvula y el bloque de lengüetas). Se puede originar así un efecto Venturi que puede dificultar la apertura de la válvula, esto es, la pulsación del botón. El intérprete siente el botón más duro que en condiciones normales, y el comienzo del ataque puede ser inestable. Esta inestabilidad podría también influir en el espectro inicial del sonido. Se trata de un tema abierto para el que sería preciso realizar medidas dentro del propio acordeón.

Varias referencias de la literatura técnica sobre acordeón abordan la diferente percepción de los diferentes tipos de ataque. En [Jacomucci 1998], por ejemplo, se describen algunas analogías onomatopéyicas entre los diferentes tipos de articulación (fuelle o dedo) y la articulación lingual de un cantante. El ataque de fuelle es comparado con un sonido tipo /aa/; el ataque de dedo se relaciona con un sonido tipo /'ta/.

Esto puede explicarse en primer lugar por la forma en que se produce cada ataque y se refleja en el mayor tiempo de ataque de los armónicos de los ataques de fuelle comparado con los correspondientes ataques de dedo. En segundo lugar, en los ataques de dedo todos los armónicos comienzan y acaban casi simultáneamente, mientras que los finales de los armónicos de los ataques de fuelle se extienden a lo largo de un intervalo más largo de tiempo. Esta propiedad da lugar a que los ataques de dedo se perciban como más duros o marcados y cortos que los ataques de fuelle. En tercer lugar, el centroide de un ataque de dedo muestra una pendiente inicial más acusada que el centroide del correspondiente ataque de fuelle. Esto puede contribuir al hecho de que los ataques son percibidos de manera diferente por el oyente. Por último, ya vimos que los ataques de fuelle muestran una alta velocidad de crecimiento de la magnitud (en dB) de la presión durante el primer cuarto del tiempo de ataque de cada armónico, mientras que los

ataques de dedo tenían una velocidad de cambio más equilibrada a lo largo del intervalo completo. De nuevo, esto puede contribuir a una percepción diferente por parte de un oyente.

En la misma referencia [Jacomucci 1998] se asocia un ataque con pulsación lenta a un sonido tipo /uua/. Este comienzo más suave del sonido puede explicarse por los tiempos de ataque más largos que caracterizan a estos ataques (en comparación con los ataques ordinarios de dedo) y por las modificaciones que la bajada lenta del botón (apertura lenta de la válvula) causa en el centroide espectral y en la velocidad de cambio del magnitud (en *dB*) de la presión.

Los compositores pueden aprovechar el carácter más puntuado o marcado de los ataques de dedos para asignar diferentes marcas de articulación a melodías diferentes interpretadas por la misma mano [Kymäläinen 1995]. Esto es algo crucial en el acordeón, puesto que la dinámica determina la dinámica de ambas manos (con la excepción de un pequeño efecto sobre la dinámica que se consigue variando la profundidad a la que se pulsan los botones): si el fuelle se utiliza para la articulación, tendrá un efecto global sobre todas las lengüetas [Buchmann 2010].

4.4. ESTADO ESTACIONARIO

La Figura 4.25 muestra una parte del espectro sonoro (estado estacionario) obtenido para una lengüeta de acordeón sin cargar cuando se excita con el flujo de aire del fuelle. Cuando la lengüeta se ve sometida al campo de presiones generado por la corriente aérea, aparecen los armónicos de su frecuencia fundamental (marcados con una estrella en la figura). Estos sobretonos no son los parciales (no armónicos) de los modos de vibración de la lengüeta fija-libre. Los parciales de la barra suelen ser mucho más débiles que los armónicos producidos por el flujo de aire y a menudo son imperceptibles, como se comprueba en el ejemplo de la Figura 4.25.

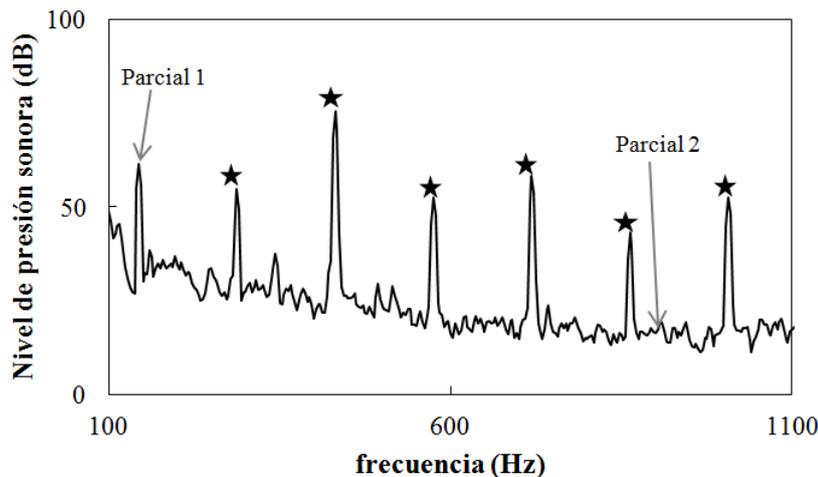


Figura 4.25: Espectro sonoro (entre 100 y 1100Hz) de una lengüeta de acordeón sin cargar (de frecuencia fundamental $f_1=144$ Hz) que se excitó con aire. Pueden observarse el pico del primer parcial (fundamental), la situación aproximada del segundo parcial (imperceptible) y los picos correspondientes a los armónicos del fundamental que se generan debido al flujo de aire (marcados con una estrella, $n=2$ a $n=7$).

La altura (tono) de la nota está determinada por la frecuencia natural de la lengüeta que vibra, y se extiende desde la nota E1 ($f_1=41.49$ Hz) hasta la nota C#8 ($f_1=3969$ Hz) tomando para la nota A4 una frecuencia $f_1=442$ Hz.

Comparando el rango de frecuencias de la fundamental con el espectro completo de frecuencias de un acordeón, se observa que el rango de frecuencias de los sobretonos extiende el intervalo de frecuencias por un factor de más de dos octavas.

El principal responsable del control de la sonoridad en el acordeón (aunque no el único) es el fuelle. El control del flujo de aire con el fuelle es utilizado para la expresión y para variar la dinámica. Además, la extensión máxima del fuelle limita la duración máxima de las notas.

El timbre en el estado estacionario depende de la relación de intensidades de los armónicos. En general depende de factores geométricos de la lengüeta, pero también lo hace de la posición de las lengüetas dentro del acordeón. Por esto, cada registro tiene su propia personalidad tímbrica, no siempre porque las lengüetas sean diferentes, algunas veces por su ubicación dentro del acordeón.

4.4.1. Control de la dinámica. El fuelle y la profundidad de pulsación

Cuando se aumenta/disminuye la presión sobre el fuelle, el sonido se hace gradualmente más fuerte/suave. Cuando se le aplica más presión, la amplitud de oscilación de la lengüeta aumenta, dando lugar a un volumen sonoro mayor. El fuelle gestiona ambos manuales (derecho e izquierdo) al mismo tiempo, de modo que el nivel de la dinámica es el mismo para ambos, a menos que se utilicen los registros. Sin embargo, pueden conseguirse pequeñas variaciones de la sonoridad de cada manual de forma independiente modificando la profundidad de la pulsación de los botones [Macerollo 1980, Llanos & Alberdi 2002].

La Tabla 4.11 muestra las diferentes intensidades alcanzadas por el sonido cuando se pulsa el botón por completo o de forma parcial. Las medidas se realizaron con un sonómetro situado a 50 cm del acordeón.

Este efecto se explica fácilmente teniendo en cuenta que si el botón está parcialmente pulsado, la válvula o zapata correspondiente estará cerca de la entrada a la cavidad, produciendo un silenciamiento. Si se continúa liberando el botón, puede aparecer el efecto pitch bending.

Registro	Tono	Botón completamente pulsado Lp (dBA)	Botón parcialmente pulsado Lp (dBA)
16-pies (cassotto)	E1	65.0	58.0
	E2	64.0	61.0
	E3	69.0	65.0
	E4	73.0	70.0
	E5	79.0	75.0
	E6	69.0	66.0
8-pies (cassotto)	E2	67.0	63.0
	E3	69.0	66.0
	E4	74.0	71.0
	E5	78.0	74.0
	E6	65.0	58.0
	E7	62.0	55.0
8-pies (sin cassotto)	E2	66.0	61.0
	E3	68.0	64.0
	E4	73.0	67.0
	E5	74.0	70.0
	E6	74.0	64.0
	E7	74.0	68.0
4-pies (sin cassotto)	E3	74.0	65.0
	E4	74.0	68.0
	E5	74.0	69.0
	E6	73.0	69.0
	E7	74.0	71.0

Tabla 4.11: Variación del nivel de intensidad obtenidos variando la profundidad de pulsación del botón con diversos registros del manual derecho.

4.4.2. Frecuencia y nivel de presión sonora

De acuerdo con la literatura pedagógica [Lips 2000, Macerollo 1980] el acordeón combina una amplitud dinámica relativamente grande en toda su tesitura y el nivel de presión sonora de una nota se puede variar dentro de aproximadamente 40 dB, medido a una distancia de 1 m del acordeón, sin cambiar la frecuencia [Gervasoni 1986]. Para comprobarlo, se han realizado

medidas de diferentes notas variando la dinámica desde *piano* hasta *forte* (crescendo). La Tabla 4.12 resume los resultados obtenidos.

Nota/Registro	Fuelle	f_{min} (Hz)	f_{max} (Hz)	Δf (cent)	Lp_{min} (dBA)	Lp_{max} (dBA)	ΔLp (dBA)
E1/16 cass	abrir	41	42	-41	26.6	45.6	19.0
E1/16' cass	cerrar	39	42	-127	31.7	44.8	13.1
E2/8' cass	abrir	83	83	0	31.9	47.2	15.3
E2/8' cass	cerrar	82	83	-21	35.7	47.0	11.3
E2/8' nocass	abrir	83	83	0	47.0	62.6	15.6
E2/8' nocass	cerrar	81	83	-41	40.9	48.3	7.4
E3/8' cass	abrir	166	166	0	37.5	58.1	20.6
E3/8' cass	cerrar	164	166	-21	43.4	57.5	14.1
E3/8' nocass	abrir	166	166	0	45.5	60.2	14.7
E3/8' nocass	cerrar	164	166	-21	39.2	57.4	18.2
E4/8' cass	abrir	331	332	-5	49.0	70.7	21.7
E4/8' cass	cerrar	330	331	-5	48.4	63.3	14.9
E4/8' nocass	abrir	331	331	0	36.1	63.3	27.2
E4/8' nocass	cerrar	331	332	-5	36.6	56.2	19.6
E5/8' cass	abrir	662	664	-5	55.4	76.8	21.4
E5/8' cass	cerrar	662	664	-5	46.4	69.4	23.0
E5/8' nocass	abrir	662	662	0	47.0	72.2	25.2
E5/8' nocass	cerrar	662	662	0	48.2	61.2	13.0
E6/8' cass	abrir	1325	1325	0	33.7	62.3	28.6
E6/8' cass	cerrar	1325	1325	0	40.7	60.2	19.5
E6/8' nocass	abrir	1325	1328	-4	40.4	67.1	26.7
E6/8' nocass	cerrar	1325	1325	0	40.3	59.7	19.4
E7/8' cass	abrir	2650	2656	-4	47.8	65.8	18.0
E7/8' cass	cerrar	2650	2650	0	44.5	54.9	10.4
E7/8' nocass	abrir	2650	2656	-4	44.5	65.6	21.1
E7/8' nocass	cerrar	2650	2653	-2	44.4	57.0	12.6

Tabla 4.12: Resultados obtenidos para las variaciones de frecuencia (Δf) y de nivel de presión sonora (ΔLp) para el primer armónico de las notas estudiadas durante el crescendo desde piano hasta forte. Se indican también los valores mínimos y máximos obtenidos para la frecuencia y el nivel de presión sonora.

Los valores del nivel de presión sonora que se muestran en la tabla corresponden únicamente al armónico fundamental. Si se tomara el nivel de presión total del sonido, el valor de Lp_{min} estaría cerca de 55dBA (*piano*) y el de Lp_{max} cerca de 80dBA (*forte*).

En la Tabla 4.12, los valores en cents nos permiten apreciar la variación de la frecuencia expresada en partes de un semitono, independientemente del valor de frecuencias en que nos situemos.

La Figura 4.26 muestra la evolución de la frecuencia para la nota E1 en *cassotto*, abriendo y cerrando el fuelle. La Figura 4.27 muestra la evolución de la frecuencia para la nota E4 en *cassotto*, abriendo el fuelle. Nótese que una disminución de 1Hz en la frecuencia no corresponde al mismo intervalo musical en las dos notas. El error máximo en los valores de la frecuencia es de 1Hz .

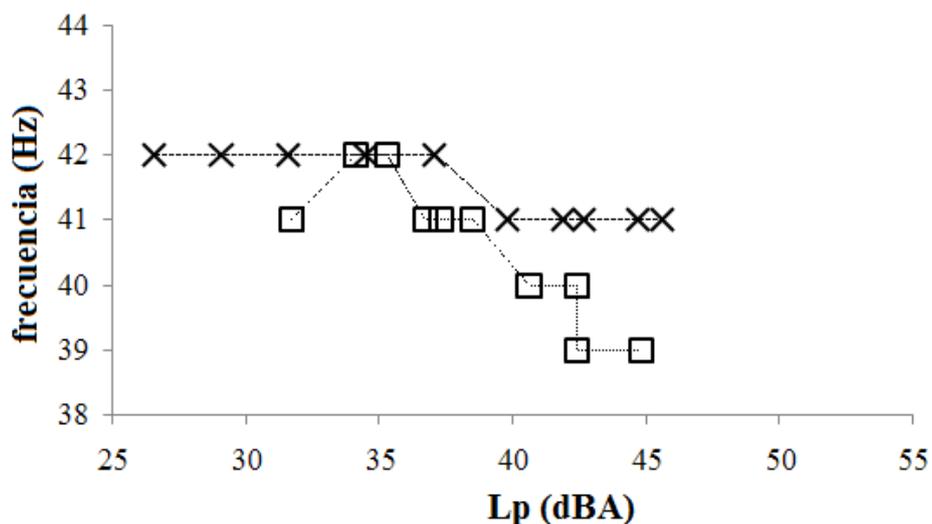


Figura 4.26: Variación de la frecuencia en función del nivel de presión sonora (en dBA) del primer armónico de la nota E1 (en *cassotto*); (x) abriendo y (□) cerrando el fuelle.

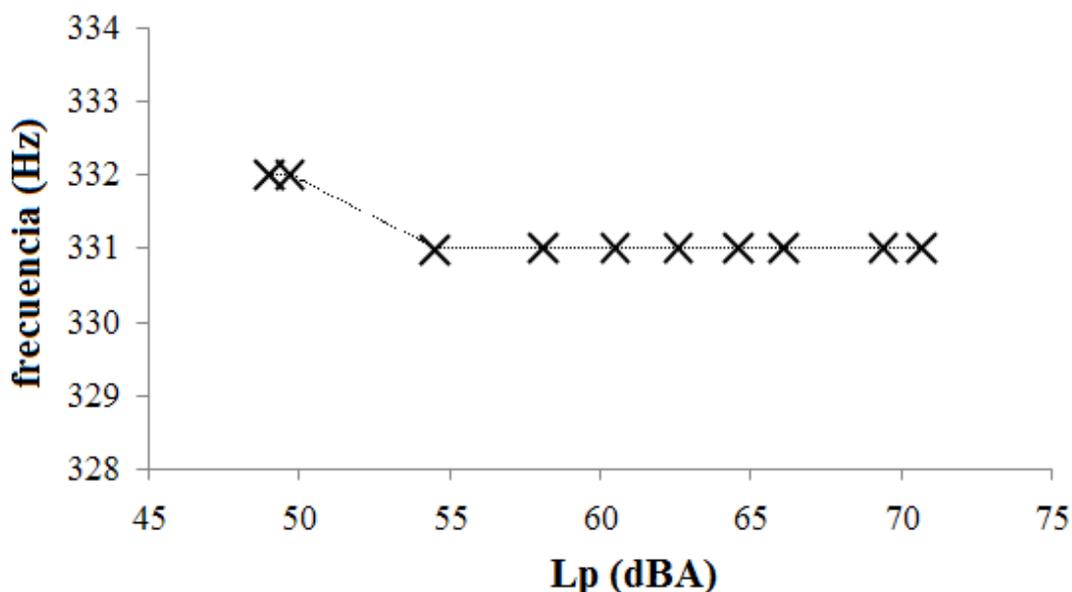


Figura 4.27: Variación de la frecuencia en función del nivel de presión sonora (en dBA) del primer armónico de la nota E4 (en cassotto) abriendo el fuelle.

Los resultados muestran que la frecuencia se mantiene estable en un rango de la dinámica que depende de la nota, y que es más estable cuanto más alto es el tono de ésta. El valor de la frecuencia disminuye al aumentar la presión del fuelle, y el cambio de frecuencia es pequeño en la mayoría de los casos. Estos resultados están de acuerdo con la práctica instrumental en el acordeón [Gervasoni 1986].

4.4.3. Timbre: centroide espectral

Con el fin de estudiar la relación del timbre con la sonoridad y su dependencia con respecto al registro, la altura de la nota o la característica especial del “doble bajo” en el manual de bajos libres, vamos a hacer uso del centroide espectral.

Así, a partir de las medidas realizadas sobre las mismas notas en tres dinámicas diferentes (*piano*, *mezzo forte*, *forte*), hemos analizado la dependencia del centroide espectral con el tono, la dinámica, el registro y la posibilidad del “doble bajo”.

Los resultados muestran que el centroide crece con el tono de la nota que suena, reflejando el aumento de su frecuencia fundamental y la de sus armónicos. Como ejemplo, la Tabla 4.13 muestra los valores de los centroides para tres notas (E1, A#1, G2) del registro de 8 pies del manual izquierdo del "Acordeón A" utilizando la dinámica *mezzo forte*.

Nota	E1	A#1	G2
$f_{\text{centroide}}$ (Hz)	620	885	1456

Tabla 4.13: Centroide espectral en función de la nota. Dinámica *mezzo forte*.

Registro de 8 pies del manual izquierdo del "Acordeón A".

La Tabla 4.14 muestra los valores de los centroides para tres notas (E1, E2, E4 y E6) del registro de 16 pies del manual derecho del "Acordeón A" (sin "doble bajo") utilizando la dinámica *mezzo forte*.

Nota	E1	E2	E4	E6
$f_{\text{centroide}}$ (Hz)	511	731	1078	3369

Tabla 4.14: Centroide espectral en función de la altura de la nota. Dinámica *mezzo forte*. Registro de 16 pies del manual derecho del "Acordeón A".

Los resultados muestran que el centroide cambia también con la dinámica. La tabla 4.15 muestra el valor obtenido para el centroide para la nota E1 del registro de 8 pies del manual izquierdo del "Acordeón B" (con "doble bajo") y la nota E2 del registro de 8 pies fuera de cassotto del manual derecho del "Acordeón A".

Nota	Dinámica	<i>piano</i>	<i>mezzo forte</i>	<i>forte</i>
E1	$f_{\text{centroide}}$ (Hz)	405	467	487
E2	$f_{\text{centroide}}$ (Hz)	925	1025	945

Tabla 4.15: Centroide espectral en función de la dinámica.

Para la nota E1, el centroide crece con la dinámica. Los resultados coinciden con el comportamiento esperado, ya que en los instrumentos de

viento se produce un aumento de la amplitud de los armónicos altos cuando la dinámica crece [Campbell 2001 p. 322].

En algunos casos, el centroide crece al pasar de *piano* a *mezzo forte* para volver a disminuir cuando se pasa a *forte*. Estos resultados muestran la superposición de dos efectos. Por un lado las amplitudes de los armónicos superiores crecen al aumentar la dinámica, haciendo que el centroide aumente. Por otro lado, como se ha visto en el apartado anterior, las frecuencias de los armónicos pueden caer ligeramente al aumentar la dinámica, resultando en un menor valor del centroide. La nota E2 que muestra la Tabla 4.14 muestra este comportamiento.

Para estudiar la influencia del registro en el centroide, se han comparado sus valores para la misma nota (E4) en varios registros del manual derecho dentro y fuera de *cassotto* del manual derecho del "Acordeón A" utilizando la dinámica *mezzo forte*. La Tabla 4.16 muestra los resultados obtenidos.

Registro	16 pies (<i>cassotto</i>)	8 pies (<i>cassotto</i>)	8 pies (no <i>cassotto</i>)	4 pies (no <i>cassotto</i>)
$f_{\text{centroide}}$ (Hz)	1078	1389	2013	1820

Tabla 4.16: Centroides espectrales para notas dentro y fuera de *cassotto*. Nota E4.

Como era de esperar, los registros dentro de *cassotto* muestran un valor más bajo del centroide espectral, ya que el *cassotto* es una cámara que actúa como un filtro que atenúa los armónicos más altos, lo que resulta en un sonido menos brillante [Macerollo 1980]. Debemos recordar que la nota E4 de cada registro está asociada a una lengüeta diferente, es decir estamos comparando resultados de 4 lengüetas que emiten el mismo tono, lo que puede dar lugar a pequeñas variaciones ligadas a cada lengüeta.

El efecto del *cassotto* sobre los armónicos altos del sonido puede verse en la figura 4.28, que muestra los espectros obtenidos para la nota E4 en el registro de 8 pies dentro y fuera de *cassotto*. Se observa claramente la disminución de los armónicos altos en el registro dentro de *cassotto*.

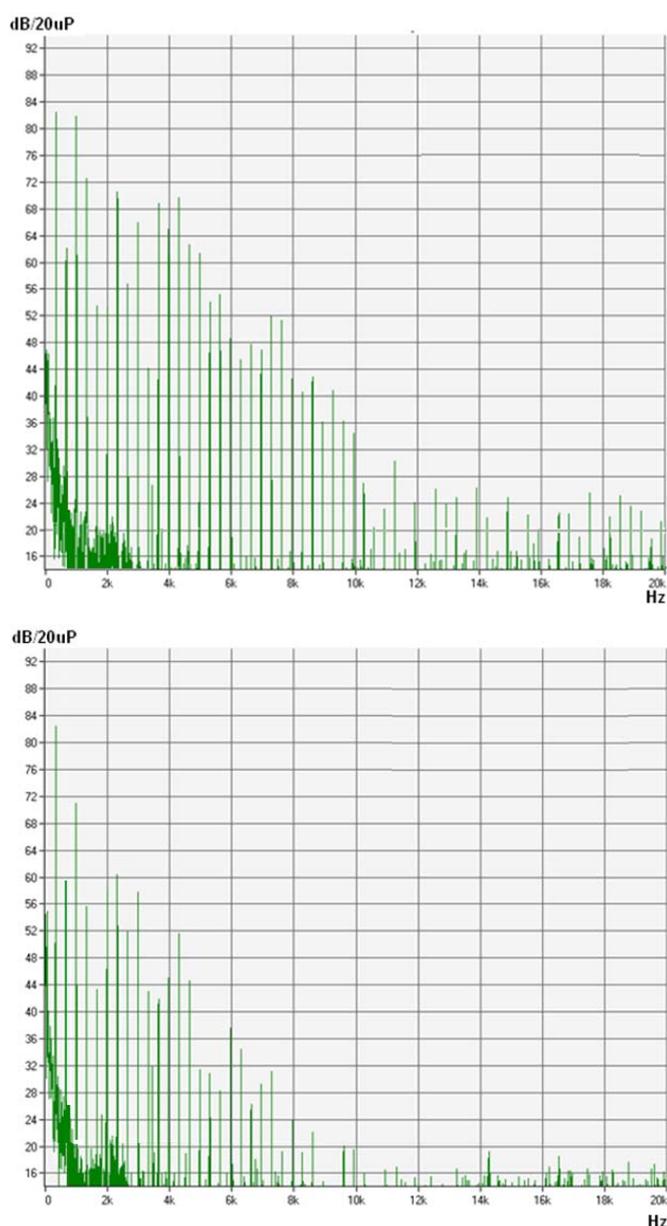


Figura 4.28: Espectrograma correspondiente a la nota E4 del manual derecho, con el registro de 8 pies fuera de cassotto (arriba) y dentro de cassotto (abajo) y dinámica mezzo forte.

Aunque no existe *cassotto* en el manual izquierdo, si se comparan los sonidos de la misma nota para las tres voces de ese manual (8 pies, 4 pies y 2 pies) se observan diferencias entre los tres registros (ver Tabla 4.17). El

registro de 8 pies presenta una mayor atenuación de los armónicos superiores dando lugar a un centroide menor. Esto coincide con la sensación de un sonido menos brillante para esta voz. También tiene sus armónicos superiores más atenuados que los de las voces central y alta. Este hecho se debe a la disposición de las lengüetas dentro de los registros.

Registro	8 pies	4 pies	2 pies
$f_{centroide}$ (Hz)	1665	2006	1942

Tabla 4.17: Centroide espectral para la nota E4 en los tres registros del manual izquierdo del "Acordeón A" y dinámica mezzo forte.

4.4.4. Comparación de los espectros del registro de 8 pies de la mano izquierda para dos acordeones, uno sin "doble bajo" y otro con "doble bajo"

A partir de los espectros obtenidos, se calcularon los centroides de las notas E1, A#1 y E2, del registro de 8 pies del manual izquierdo para el "Acordeón A" (sin "doble bajo") y el "Acordeón B" (con "doble bajo"). En todos los casos las notas se tocaron en dinámica *forte*. Los resultados se muestran en la Tabla 4.18.

Nota	Acordeón A $f_{centroide}$ (Hz)	Acordeón B $f_{centroide}$ (Hz)
E	381	487
A#1	733	744
E2	852	754

Tabla 4.18: Valores del centroide de las notas E1, A#1 y E2 del registro de 8 pies del manual izquierdo con dinámica forte.

El centroide del "Acordeón B" es mayor para las notas más bajas de la primera octava de la tesitura de un acordeón concierto (E1-D2). Cuando

comienza la siguiente octava (E2), ocurre lo contrario y es el "Acordeón A" el de mayor valor del centroide. Esto corresponde con el hecho de que el registro de 8 pies del manual izquierdo del "Acordeón B" es más brillante que el del "Acordeón A" para las notas más bajas de su tesitura, dando la sensación de un timbre más potente y brillante. Esta situación se invierte para notas más altas.

4.5. PITCH BENDING

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el estudio del pitch bending.

Como hemos explicado en el apartado 3.6, se han llevado dos grupos diferentes de medidas. En el primero se trataba de encontrar la posible dependencia del pitch bending con la tesitura, el registro, el sentido del movimiento del fuelle y de la presencia o no del *cassotto*. En el segundo grupo de medidas se trataba de averiguar las diferencias entre los dos métodos principales de llevar a cabo el pitch bending.

4.5.1. Espectrograma y evolución temporal

Antes de pasar a describir los resultados, damos unos ejemplos de espectrogramas que muestran gráficamente la variación que sufren los armónicos, en frecuencia y en intensidad, cuando la lengüeta es sometida al pitch bending.

La Figura 4.29 y la Figura 4.30 muestran un detalle del espectrograma de la nota B2 interpretada en *mezzo forte* sobre un registro de 8 pies fuera de *cassotto* a la que se aplica el pitch bending del tipo 'solo dedo'. En azul los armónicos antes de efectuar el pitch bending. En rojo el espectrograma resultante una vez efectuado el pitch bending, *cinco segundos* después.

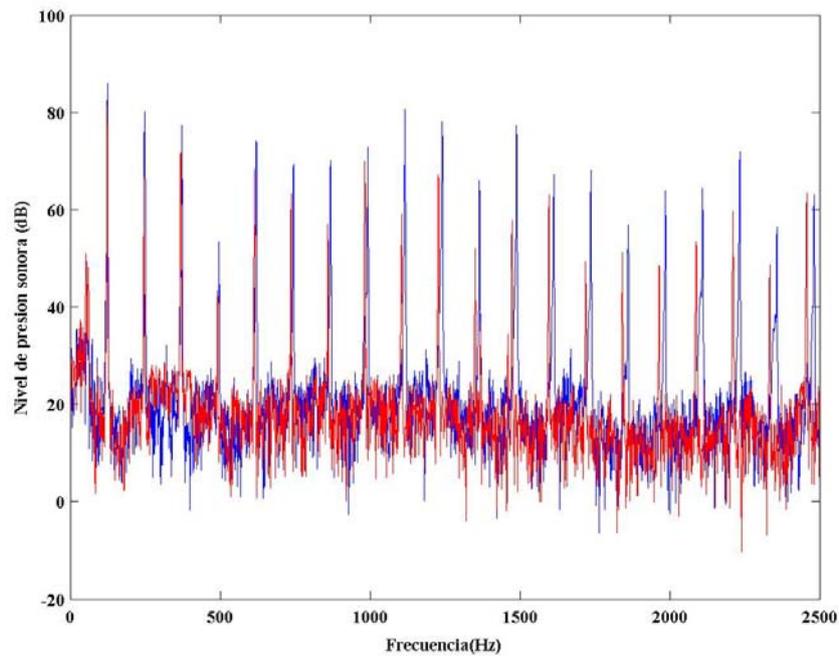


Figura 4.29: Espectrograma de la nota B2 tocada en mezzo forte con el registro de 8 pies fuera de cassotto antes (azul) y después (rojo) de aplicar el pitch bending del tipo 'solo dedo'.

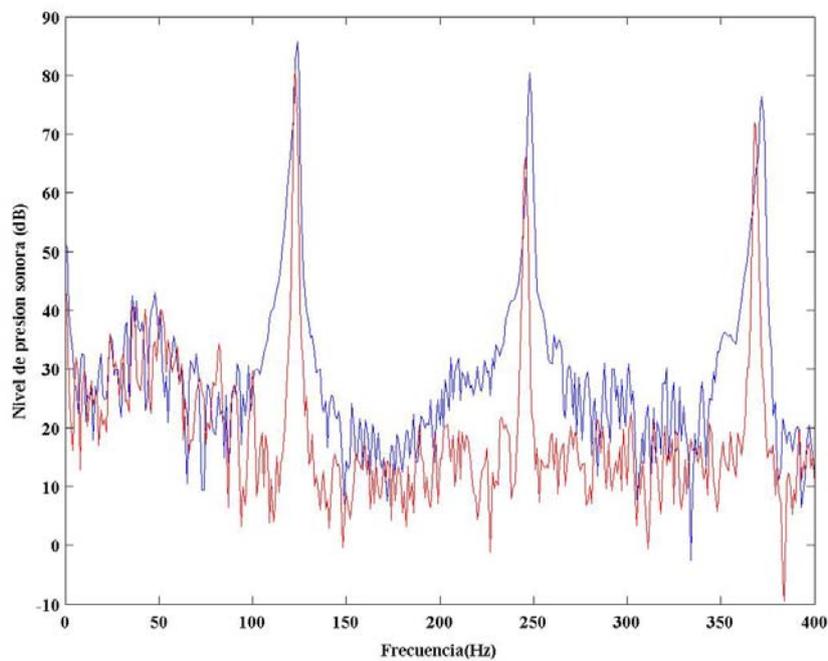


Figura 4.30: Ampliación a los primeros armónicos del espectrograma de la Figura 4.29.

La Figura 4.31 muestra la evolución con el tiempo de la frecuencia de los primeros armónicos de la misma nota B2 tocada en *mezzo forte* con el registro de 8 pies fuera de *cassotto* al aplicar el pitch bending del tipo 'solo dedo'.

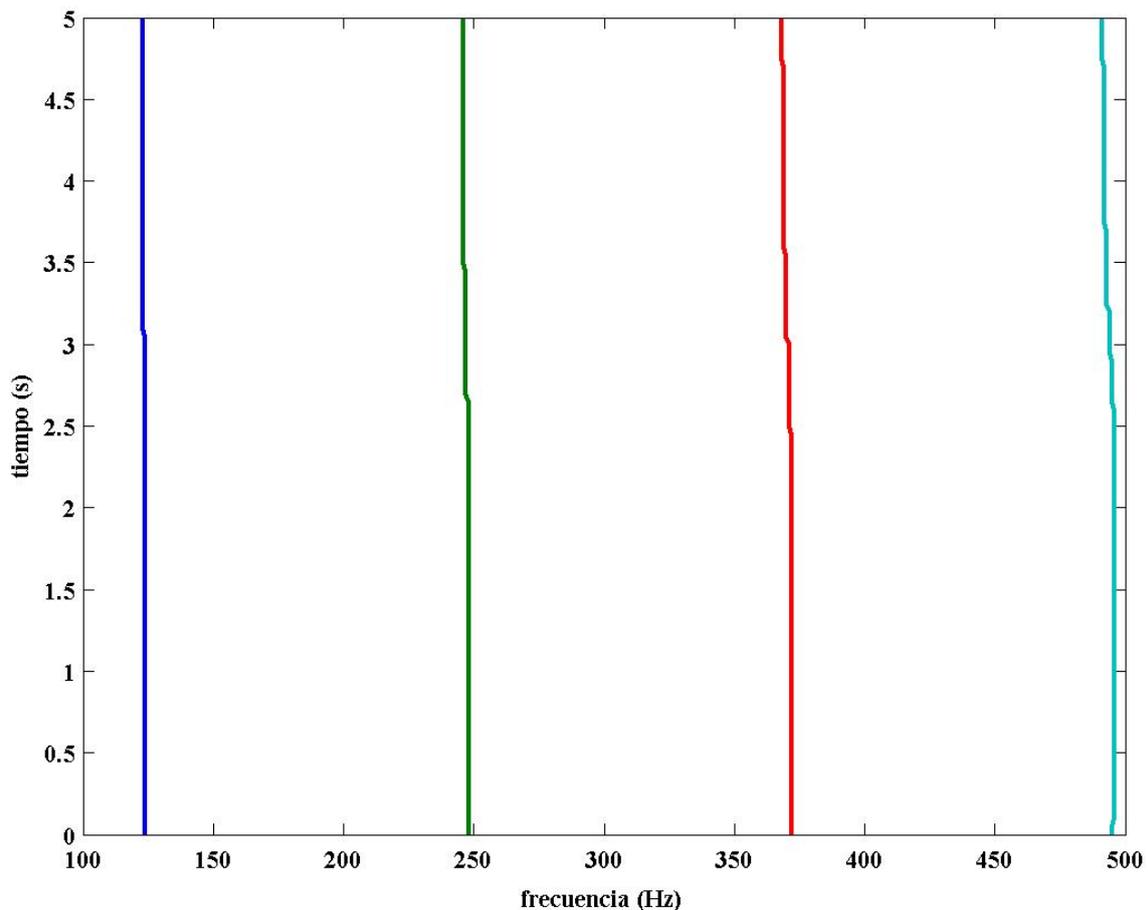
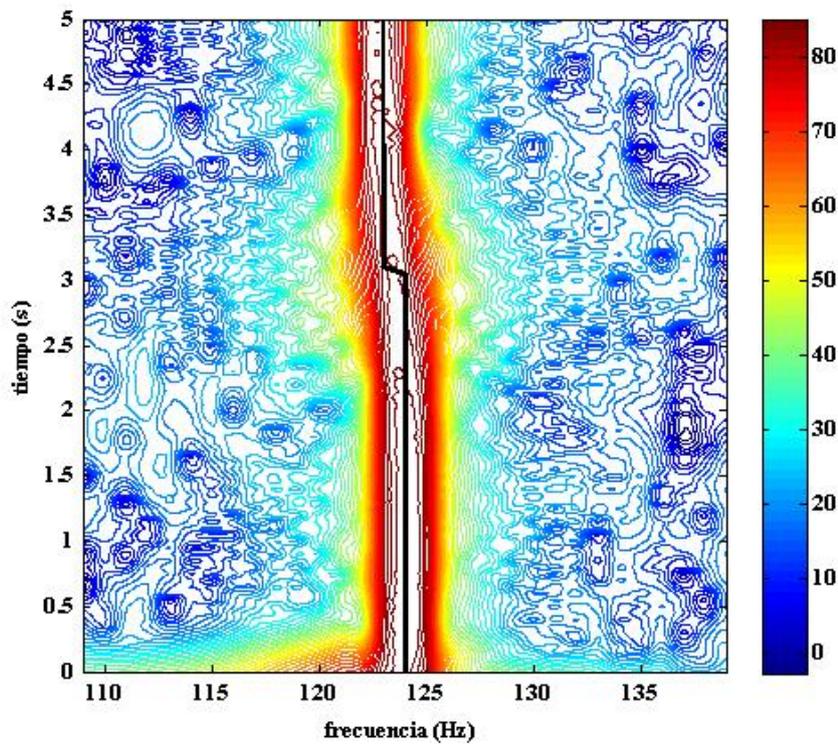
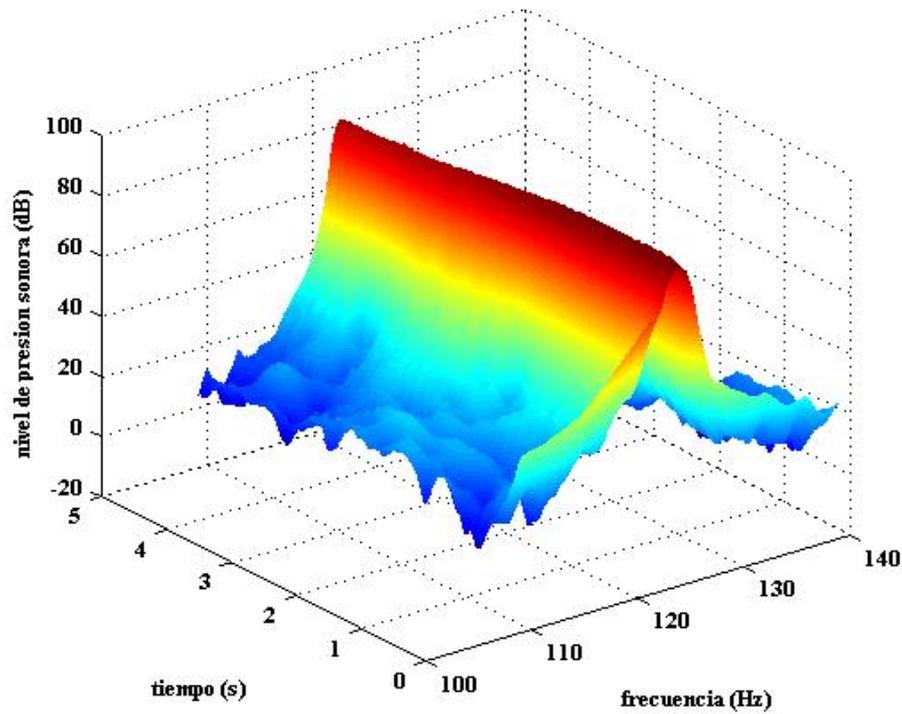


Figura 4.31: Evolución con el tiempo de la frecuencia de los primeros armónicos de la nota B2 tocada en mezzo forte con el registro de 8 pies fuera de cassotto al aplicar el pitch bending del tipo 'solo dedo'.

La Figura 4.32 muestra la evolución con el tiempo de la frecuencia y del nivel de presión sonora (*dB*) de la fundamental de la nota B2 interpretada en *mezzo forte* sobre un registro de 8 pies fuera de *cassotto*.



Figura

Figura 4.32: Evolución con el tiempo de la frecuencia y del nivel de presión sonora (dB) del armónico fundamental de la nota B2 interpretada en mezzo forte sobre un registro de 8 pies fuera de cassotto.

4.5.2. Influencia del sentido de movimiento del fuelle, el registro y la tesitura. Primer grupo de medidas

Haciendo uso de la expresión (3.1) para mostrar la variación de frecuencia durante el pitch bending,

$$\Delta f(\%) = 100 \frac{f_{or} - f_{fin}}{f_{or}} \quad (3.1)$$

las Figuras 4.33a, 4.34a y 4.35a muestran el tanto por ciento de variación de la frecuencia fundamental durante el pitch bending ("fuelle más dedo"), sobre las notas E1-D#3 (o E2-D#3) de tres registros diferentes en función de su frecuencia fundamental, tanto abriendo (o) como cerrando (x) el fuelle. Las Figuras 4.33b, 4.34b y 4.35b expresan esa misma variación en forma de cents, calculados según la expresión (3.2):

$$\text{número de cents} = 1200 \log_2 \left(\frac{f_{fin}}{f_{or}} \right) = 3986 \log_{10} \left(\frac{f_{fin}}{f_{or}} \right) \quad (3.2)$$

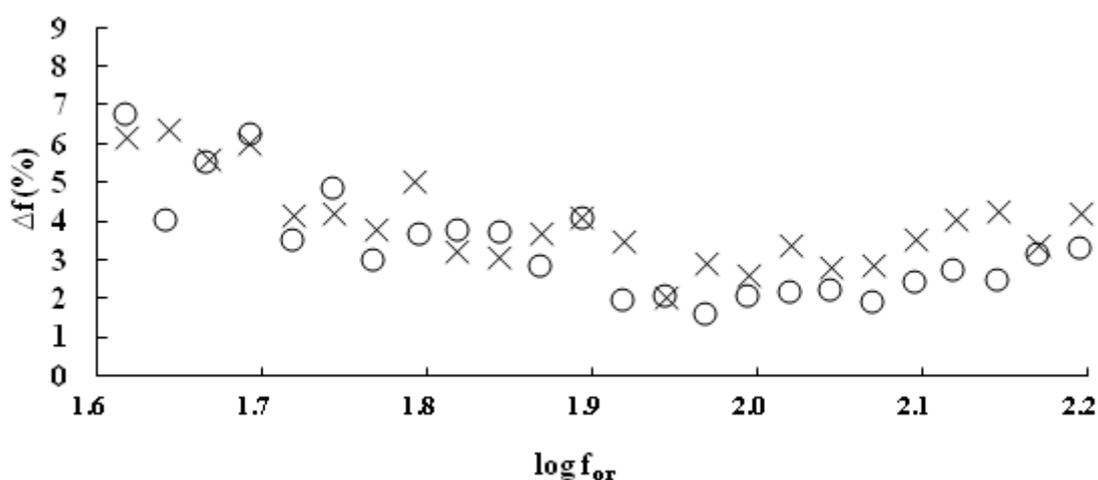


Figura 4.33a: Porcentaje de variación de la frecuencia durante el pitch bending para las notas E1-D#3 del registro de 16 pies (en cassotto) en función de su frecuencia fundamental (abriendo (o) y cerrando (x) el fuelle).

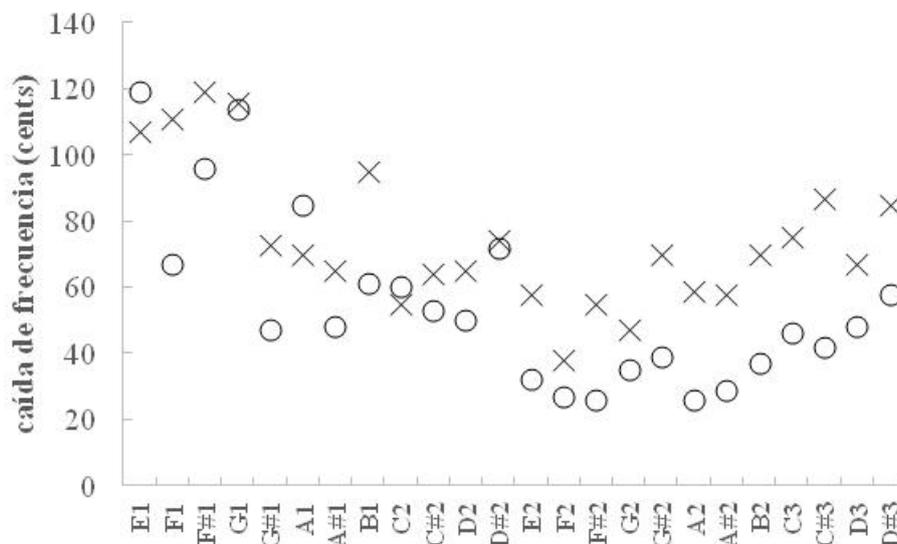


Figura 4.33b: Caída (en cents) de la frecuencia fundamental durante el pitch bending para las notas E1-D#3 del registro de 16 pies (en cassotto) (abriendo (o) y cerrando (x) el fuelle).

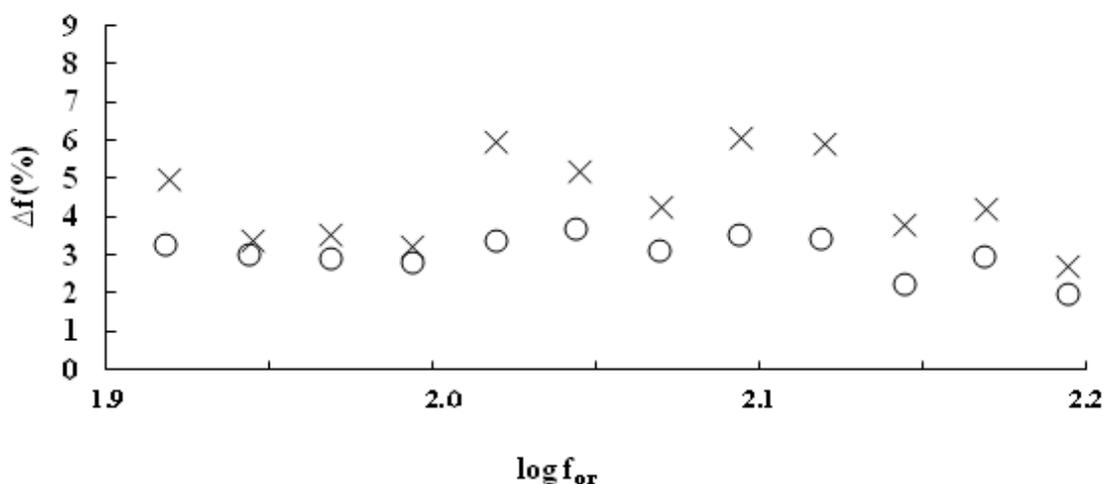


Figura 4.34a: Porcentaje de variación de la frecuencia durante el pitch bending para las notas E2-D#3 del registro de 8 pies (en cassotto) en función de su frecuencia fundamental (abriendo (o) y cerrando (x) el fuelle).

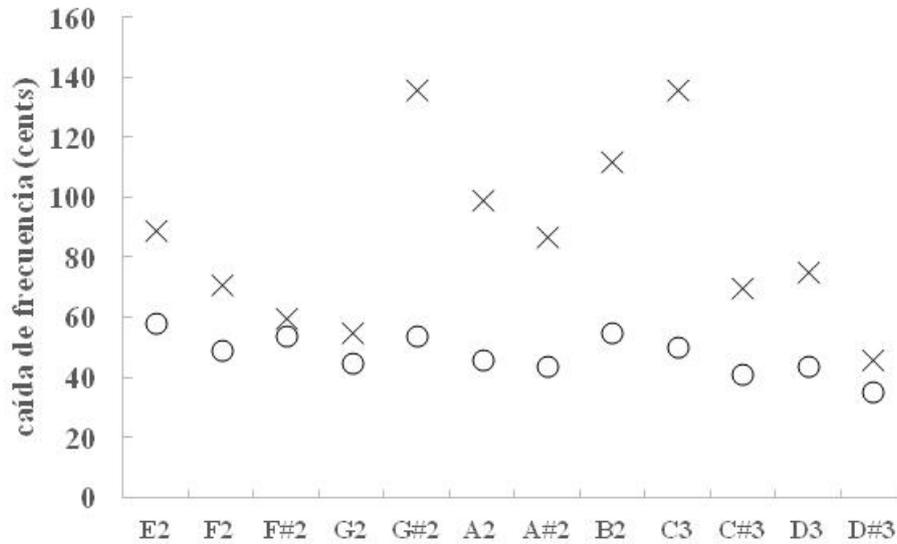


Figura 4.34b: Caída (en cents) de la frecuencia fundamental durante el pitch bending para las notas E2-D#3 del registro de 8 pies (en cassotto) (abriendo (o) y cerrando (x) el fuelle).

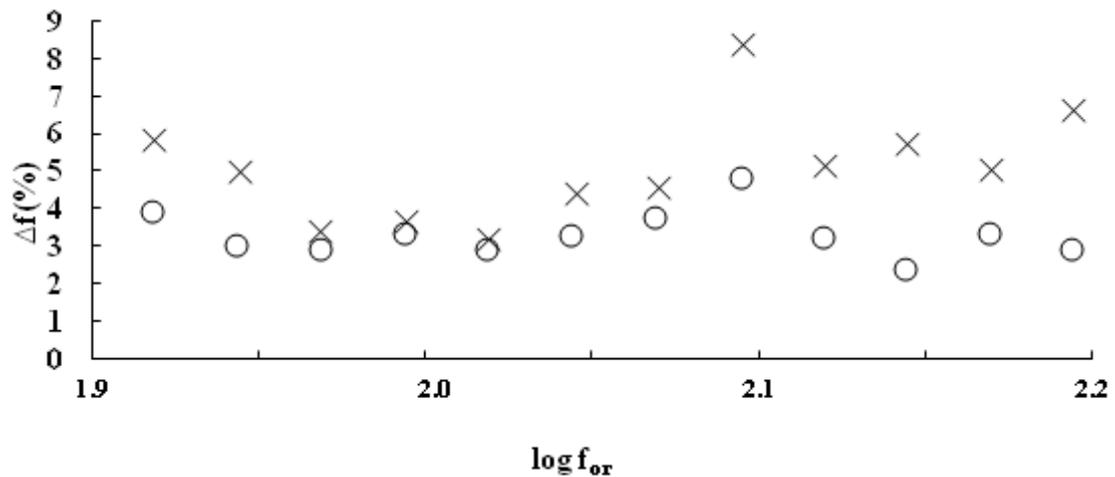


Figura 4.35a: Porcentaje de variación de la frecuencia durante el pitch bending para las notas E2-D#3 del registro de 8 pies (fuera de cassotto) en función de su frecuencia fundamental (abriendo (o) y cerrando (x) el fuelle).

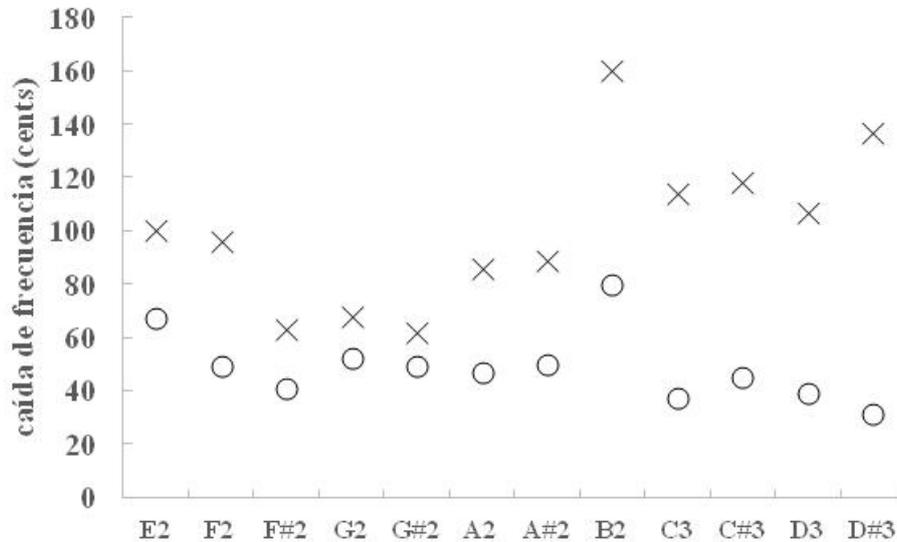


Figura 4.35b: Caída (en cents) de la frecuencia durante el pitch bending para las notas E2-D#3 del registro de 8 pies (fuera de cassotto) (abriendo (o) y cerrando (x) el fuelle). Se ha promediado la caída de los diez primeros armónicos.

Hemos representado los cambios en la frecuencia fundamental de las notas sobre las que se ha llevado a cambio el pitch bending. Si hubiéramos graficado el cambio en el promedio de los diez primeros armónicos, el resultado habría sido muy parecido, puesto que todos los armónicos registrados sufren una variación similar.

El máximo error en el cambio de frecuencia, expresado por (3.2), es del 2%. Se observa un ligero aumento en el cambio de frecuencia cuando el fuelle se cierra. A pesar de que estos resultados podrían sugerir que el cambio en la frecuencia en el pitch bending es mayor al cerrar el fuelle que al abrirlo, esta pequeña diferencia puede atribuirse a un factor fisiológico natural: el cierre de los brazos parece ser menos enérgico y más controlable que su apertura. De hecho, al tomarse la medida final al cabo de 10 segundos, es posible que ese estado final no represente el sonido con la frecuencia más baja a la que se puede llegar, sino un sonido más o menos estable con una frecuencia suficientemente baja. Si se procede a efectuar el pitch bending sin intentar llegar a un estado estable al cabo de un tiempo

determinado, se encuentra que tanto abriendo como cerrando se llega a caídas de frecuencia más iguales entre sí que las aquí anotadas. No olvidemos tampoco que las lengüetas que suenan al abrir y al cerrar el fuelle son diferentes.

De los mismos resultados, también se puede concluir que no existen diferencias significativas en el cambio de frecuencia entre los diferentes registros y notas. Todas las notas tienen porcentajes de cambio de frecuencia que varían entre el 1% y el 8%, estando la frecuencia final entre 0.99 y 0.92 veces el valor de la frecuencia original, que supone un cambio máximo de un semitono, a excepción de las notas más graves del registro de 16 pies, que sufren una caída mayor de frecuencia. Esto es congruente con los resultados obtenidos al estudiar la variación de la frecuencia con la presión sobre el fuelle del apartado 4.4.2.

4.5.3. Influencia del *cassotto*

La Figura 4.36 muestra el tanto por ciento de variación de la frecuencia durante el pitch bending (tipo "fuelle más dedo") para las notas de los registros de 8 pies dentro y fuera de *cassotto*.

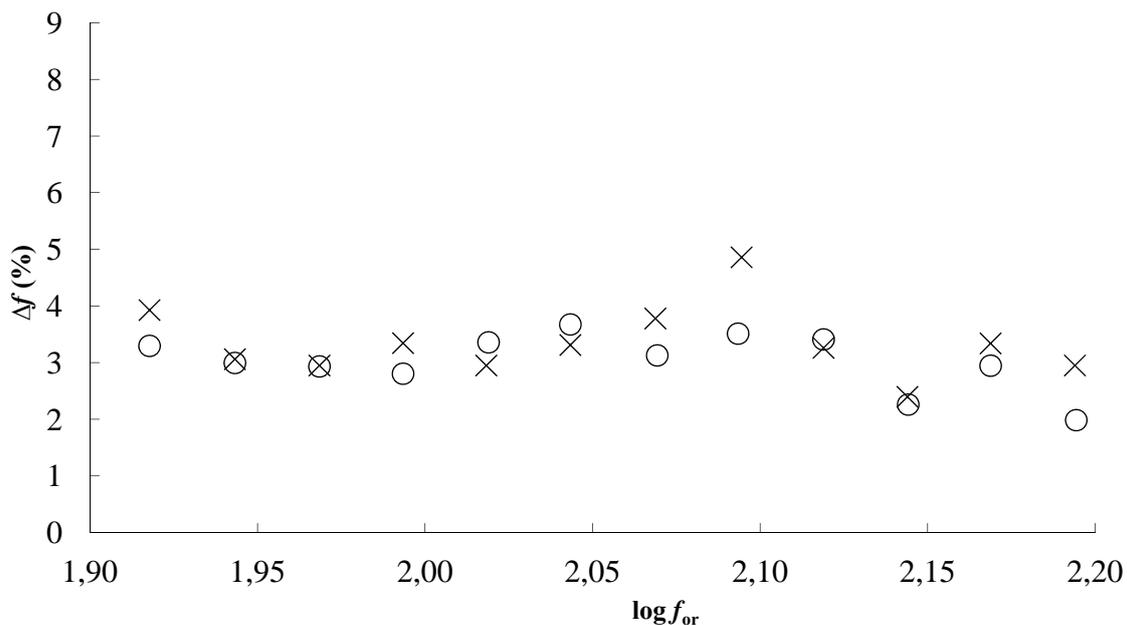


Figura 4.36: Porcentaje de variación de la frecuencia durante el pitch bending (tipo "fuelle más dedo") para las notas E2-D#3 de los registro de 8 pies (o) en cassotto y (x) fuera de cassotto, en función de su frecuencia fundamental, abriendo el fuelle.

Como era de esperar, el cassotto no afecta a los valores de frecuencia, ya que no actúa directamente sobre la lengüeta, sino que únicamente atenúa los armónicos superiores del sonido que emiten. Al igual que en otros casos, las pequeñas diferencias que se observan pueden estar relacionadas con el hecho de que se están comparando resultados obtenidos para 24 lengüetas diferentes (una para cada nota y registro).

4.5.4. Variación de la frecuencia. Segundo grupo de medidas

Cuando una nota se somete a la técnica del pitch bending, la frecuencia e intensidad de cada armónico se va a transformar de manera diferente, aunque teniendo siempre en cuenta que al armonicidad se va a mantener, puesto que las vibraciones forzadas de la lengüeta libre son periódicas.

La Figura 4.37 muestra la disminución en frecuencia experimentada por cada armónico, medida en cents y promediada para las doce notas de la octava que va desde A#2 hasta A3 del manual derecho del registro de ocho pies fuera de *cassotto* del acordeón estudiadas. Vemos que las frecuencias de todos los armónicos experimentan una caída similar, independientemente del tipo de pitch bending, con lo que, como cabía esperar, la armonicidad se conserva [Fletcher 2002].

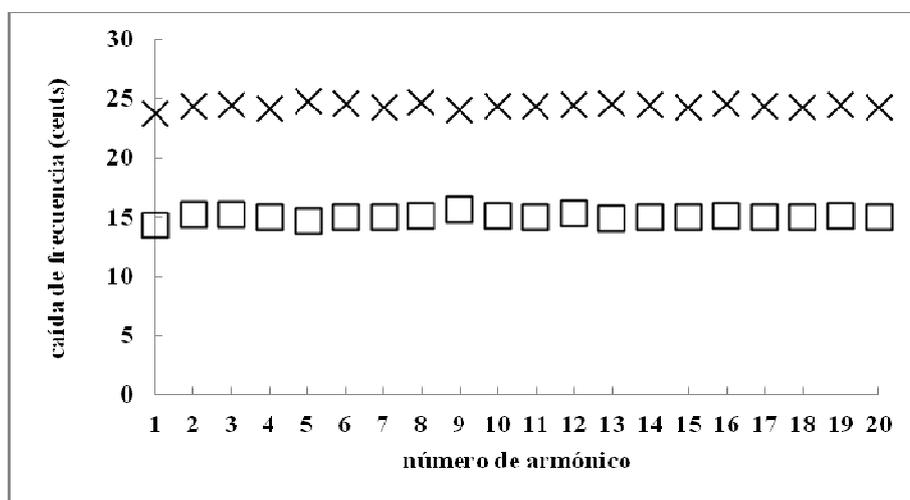


Figura 4.37: Caída de frecuencia para cada armónico (en cents) promediada sobre las doce notas A#2-A3 del registro de ocho pies fuera de cassotto del manual derecho. Las aspas corresponden al pitch bending con fuelle más dedo y los cuadrados al pitch bending solo con dedo. El máximo error es 1 cent.

Comprobada la esperada armonicidad de los sonidos sometidos a pitch bending, podemos promediar la caída de frecuencia de los veinte primeros armónicos de cada nota. El resultado se muestra en la Figura 4.38.

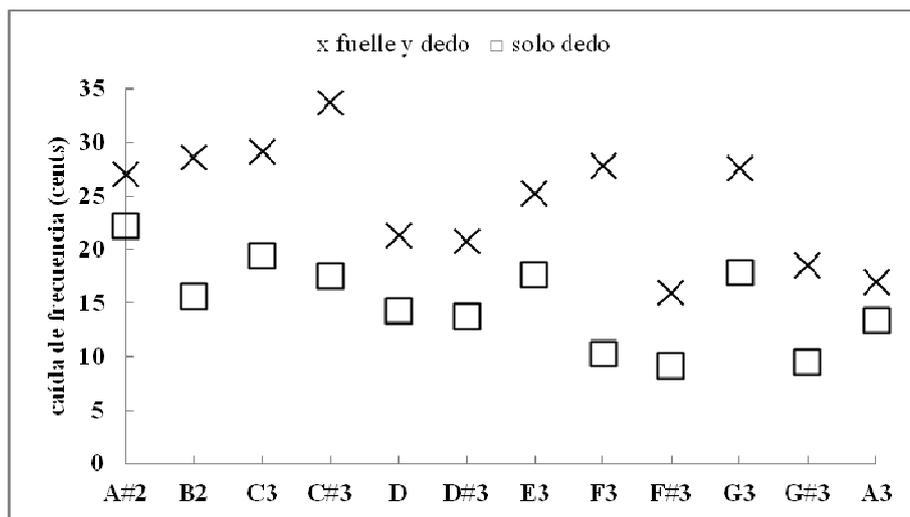


Figura 4.38: Caída de frecuencia medida en cents (promediada a los veinte primeros armónicos) experimentada por cada nota A#2-A3 del registro de ocho pies fuera de cassotto del manual derecho. Las aspas corresponden al pitch bending llevado a cabo con fuelle más dedo. Los cuadrados hacen referencia al pitch bending realizado solo con el dedo. El máximo error es 1 cent.

Todas las notas experimentan una disminución de la frecuencia que oscila entre los 10 y los 35 cents. Es decir, el máximo cambio es menor que un semitono. Como ya hemos comentado arriba, se podría haber alcanzado una disminución más acusada de la frecuencia si no se hubiera intentado que la bajada de frecuencia no fuera la máxima al cabo de un tiempo exacto (*cinco segundos*) después del inicio del sonido. En la interpretación real no se suele pedir que una frecuencia (nota) final sea alcanzada al cabo de un tiempo exacto: bien se pide una máxima caída (incluso con pérdida del sonido) o bien una caída aproximada con o sin vuelta a la frecuencia original, sin limitación de tiempo de ejecución.

De la Figura 4.38 se deduce que el cambio en la frecuencia es mayor (aproximadamente 9 cents más en promedio) cuando el pitch bending se lleva a cabo con el fuelle más el dedo al mismo tiempo (primer método). Resumimos estos resultados en la Tabla 4.19. Esta muestra los valores

medios de cambio de frecuencia, así como sus valores máximos y mínimos, para ambos tipos de pitch bending: el método "fuelle más dedo" produce una mayor disminución en la frecuencia de la nota original. Estos resultados son congruentes con los calculados por Coyle et al. [Coyle et al. 2009] sobre un acordeón parcialmente desmontado.

Cambio de la frecuencia (cents)	1er método: Fuelle más dedo	2º método: Solo dedo
Valor medio	22	15
Valor máximo	34	22
Valor mínimo	16	9

Tabla 4.19: Valores medio, máximo y mínimo del cambio en frecuencia (en cents) para los dos métodos de pitch bending estudiados.

4.5.5. Cambio en el nivel de presión sonora. Segundo grupo de medidas

Podemos estudiar ahora el cambio en el nivel de presión sonora que sufre cada nota tras realizarse el pitch bending, comparando ambos métodos. Nuevamente, para cada nota, promediaremos el cambio experimentado por sus veinte primeros armónicos. El resultado se representa en la Figura 4.39.

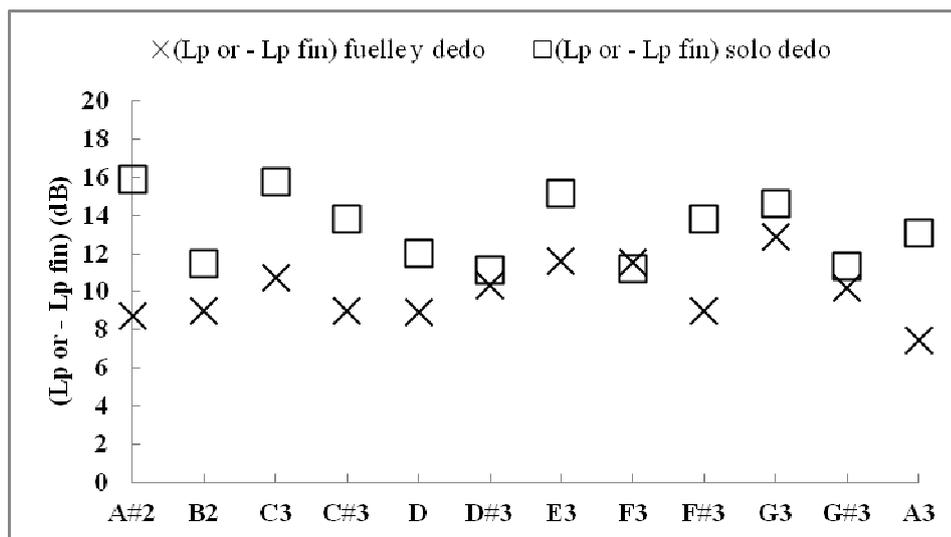


Figura 4.39: Cambio de nivel de presión sonora (en dB) (promediado a los veinte primeros armónicos) experimentada por cada nota A#2-A3 del registro de ocho pies fuera de cassotto del manual derecho. Las aspas corresponden al pitch bending llevado a cabo con fuelle más dedo. Los cuadrados hacen referencia al pitch bending realizado solo con el dedo. El máximo error en Lp es del 1%.

Se observa que ambos tipos de bending conllevan un descenso del nivel de presión sonora, más acusado en el caso del método "solo dedo". Tanto la disminución de la frecuencia como el del nivel de presión sonora se explican teniendo en cuenta que la lengüeta libre es un dispositivo controlado por el flujo [Braasch & Ahrens 2000, St. Hilaire et al. 1971, Ricot et al. 2005, Tonon 2005]. Cuando una válvula se va cerrando gradualmente, una cantidad cada vez menor de aire llega a la lengüeta, disminuyendo la energía, así como su frecuencia y su amplitud. En el caso del tipo "fuelle más dedo", esta pérdida de energía se compensa en cierto modo mediante la acción del fuelle. En el caso del tipo "solo dedo" no existe tal compensación, con la consiguiente mayor caída en el nivel de presión sonora. Del mismo modo, el mayor descenso en la frecuencia asociado al pitch bending tipo "fuelle más dedo" podría explicarse por la contribución adicional de energía

por parte del fuelle, que permitiría a la lengüeta vibrar a frecuencias más bajas, evitando la completa atenuación de los armónicos.

Debido a esta redistribución de la energía de cada armónico tras el bending, el timbre del sonido cambia, aunque manteniéndose siempre la armonicidad.

Podemos también analizar la mayor o menor uniformidad, en cuanto a nivel de presión sonora se refiere, de las notas estudiadas, antes y después del pitch bending. Para ello calculamos, para cada armónico, el valor del nivel de presión sonora promediado a todas las notas de la octava estudiada. El resultado puede verse en la Figura 4.40 para el método 1 (fuelle más dedo) y en la Figura 4.41 para el método 2 (solo dedo).

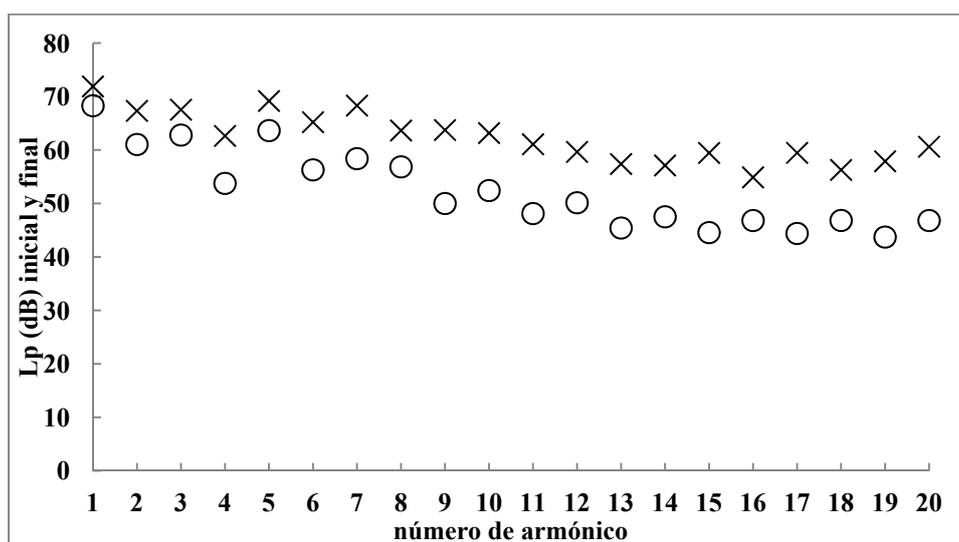


Figura 4.40: Valores obtenidos para $L_{p_{or}}$ (aspas) y $L_{p_{fin}}$ (círculos) para los veinte primeros armónicos (promediada para las doce notas A#2-A3 del registro de ocho pies fuera de cassotto del manual derecho), en el caso del pitch bending llevado a cabo de acuerdo al primer método (fuelle más dedo).

El error máximo en L_p es del 1%.

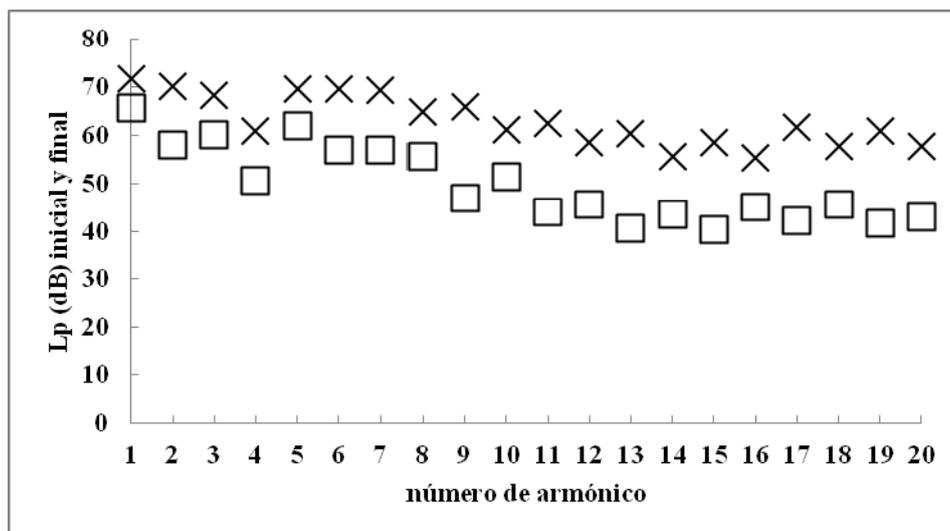


Figura 4.41: Lp_{or} (aspas) y Lp_{fin} (cuadrados) para los veinte primeros armónicos (promediada para las doce notas A#2-A3 del registro de ocho pies fuera de cassotto del manual derecho), en el caso del pitch bending llevado a cabo de acuerdo al segundo método (solo dedo). El error máximo en Lp es del 1%.

En el caso del pitch bending llevado a cabo con el fuelle más dedo (Figura 4.40), el rango de los valores del nivel de presión sonora tras el pitch bending es aproximadamente un 8% mayor que la diferencia entre los valores más extremos del nivel de presión sonora antes de realizar el pitch bending.

Al tratar con el pitch bending ejecutado con solo los dedos (Figura 4.41), esta diferencia es de aproximadamente un 9%.

Este resultado está relacionado con la dificultad física de realizar el pitch bending. El intérprete experimenta una sensación de inestabilidad al tratar de mantener el botón ligeramente pulsado. Puede contribuir también que la corriente de aire se ve obligada a pasar por un espacio cada vez menor, de modo que es posible que el efecto Venturi tienda a cerrar la zapata ligeramente entreabierto.

Ha sido imposible realizar el pitch bending con aquellas lengüetas cuyas alturas van de C6 a C#8, precisamente las lengüetas que no tienen tira de plástico o piel que evita las fugas de aire por el hueco (en el portalengüetas) de la lengüeta que no suena. Esto podría indicar que es necesaria la hermeticidad de la cámara de resonancia para que todo el aire que entra o sale tenga que hacerlo por el estrecho espacio que queda entre la lengüeta que vibra y el hueco en el portalengüetas. La viscosidad podría jugar un papel clave en el modelado del flujo de aire que atraviesa la lengüeta.





Capítulo 5

Conclusiones

5. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones generales del trabajo en función del objetivo general previsto. Se presentarán también las conclusiones correspondientes a los objetivos específicos según los resultados recogidos en los apartados del capítulo 4 de esta memoria.

Los resultados y conclusiones de este trabajo se hayan publicados en las contribuciones indicadas en el Capítulo 7.

Como *conclusión general*, en primer lugar se ha confirmado que el desarrollo interactivo entre los aspectos físico y musical proporciona posibilidades claras y precisas para las actividades investigadoras en acústica musical y docente e interpretativa del acordeón, contribuyendo a que ambas actividades sean más eficientes.

Se han reseñado las bases teóricas para el estudio físico de las vibraciones de una lengüeta libre, contemplando tanto las oscilaciones de esta cuando es simplemente desplazada momentáneamente de su posición de equilibrio, como cuando la vibración se produce por las fuerzas aerodinámicas generadas por el paso de una corriente de aire a través del pequeño espacio que queda entre la lengüeta y el hueco sobre el que vibra en la placa metálica donde va montada.

Asimismo, se han estudiado las tres cualidades distintas que caracterizan los sonidos musicales en cada etapa del sonido, las magnitudes físicas utilizadas en su medida y los parámetros psicoacústicos que relacionan la percepción humana del sonido con las magnitudes físicas.

5.1. LENGÜETAS CARGADAS

Se ha comprobado la veracidad de las siguientes hipótesis:

-
- H1. La colocación de la carga másica en el extremo libre de la lengüeta es la solución óptima para conseguir un mayor descenso de la frecuencia fundamental de la lengüeta con un mínimo de carga.
 - H2. La colocación de la carga en el extremo libre de la lengüeta modifica el timbre original de la lengüeta.
 - H3. La colocación de la carga en el extremo libre de la lengüeta modifica las formas modales de una barra fija-libre.
-

Se ha visto que se dispone de dos parámetros para modificar la frecuencia fundamental de la lengüeta: el valor de la masa (a mayor carga, más disminución de la frecuencia fundamental) y el punto de colocación de la misma (cuanto más cerca de la punta de la lengüeta, mayor es la bajada en la frecuencia fundamental). Esto resulta coherente con la práctica artesanal, dado que los artesanos cargan siempre las lengüetas en la punta, en el extremo libre, para maximizar el efecto de la carga.

Se ha encontrado un ajuste razonablemente bueno entre los datos experimentales y el valor aproximado de la frecuencia fundamental de las barras fijas-libres con masa m distribuida uniformemente y con una masa M colocada en el extremo libre, que predice la teoría de barras delgadas de Euler-Bernoulli. Este hecho puede utilizarse para calcular el tamaño de una masa de carga que, colocada en el extremo libre, produciría un cambio concreto en la frecuencia de la barra fija-libre. Así, se ha mostrado cuáles serían las longitudes y pesos que deberían tener las lengüetas de acordeón si se quisiera obtener sonidos relativamente graves sin cargar las mismas. La carga de las lengüetas supone lograr un instrumento más manejable.

Se ha visto también que la forma de los modos normales cambia con el valor de la masa de carga M colocada en el extremo libre. Se han utilizado barras metálicas grandes para visualizar y medir los modos normales de vibración de las lengüetas con y sin carga. Cuando la masa de carga se hace muy grande con respecto a la masa de la propia lengüeta m , el n -ésimo modo de una barra fija-libre se convierte en el $(n-1)$ -ésimo modo de una barra fija en un extremo y articulada en el otro. Los resultados experimentales obtenidos para la posición de dicho punto nodal están en buen acuerdo con las predicciones teóricas.

Se ha encontrado que la presencia de una carga en la punta de la lengüeta modifica el timbre de esta: para lengüetas no cargadas, predominan los armónicos impares, mientras que para las lengüetas cargadas la proporción entre armónicos pares e impares está más equilibrada. El parámetro psicoacústico que describe este cambio de forma más adecuada es la estructura espectral fina.

Se han diseñado experimentos que pueden ser llevados a cabo utilizando un equipamiento básico de laboratorio. Por un lado el alumnado de un Grado Superior de Música en la especialidad de Acordeón, puede aprovechar estos experimentos para comprender mejor, de una manera simple y directa, algunos detalles de la construcción de su instrumento, de la labor desempeñada por los artesanos al afinar las lengüetas y del comportamiento vibratorio de estas. Por otro lado, estos experimentos deberían ser útiles para estudiantes de Ingeniería, Arquitectura y otras disciplinas científicas, facilitándoles un aprendizaje y entendimiento directo de las ideas centrales sobre ondas estacionarias por flexión en barras.

5.2.ATAQUES

Se ha comprobado la falsedad de las siguientes hipótesis:

H4. Los ataques cerrando el fuelle son más largos que los ataques abriendo.

H5. Los ataques sobre notas graves son más largos que los ataques sobre notas en la zona media de la tesitura del acordeón.

Se ha comprobado la veracidad de la siguiente hipótesis:

H6. El análisis de los tiempos de comienzo y finalización de los armónicos y el estudio de su evolución temporal pueden dar pistas sobre la diferente percepción de los ataques de dedo (duros) y de fuelle (blandos). El estudio de la evolución de una serie de parámetros psicoacústicos va a ayudar a la caracterización de ambos ataques. Una menor velocidad de pulsación de los botones (o teclas) durante el ataque tiene como efecto, al menos, aumentar la duración del mismo.

Se ha comprobado la veracidad de la siguiente hipótesis, en el caso de ataques duros:

H7. Una dinámica tendente hacia el *forte* tiende a acortar los ataques con respecto a una dinámica más en *piano*.

Se ha comprobado la veracidad de la siguiente hipótesis:

H8. El *cassotto* no influye en la duración de los ataques.

En cuanto a la caracterización de los dos principales tipos de ataque, duros (de fuelle) y blandos (de dedo), se ha determinado la variación del timbre a través de la evolución de los armónicos. Se ha encontrado diferente evolución del centroide espectral, y diferente evolución de la velocidad de cambio del nivel de presión sonora (dB/ms).

La dirección de movimiento del fuelle (abrir o cerrar) no parece tener una influencia clara en el valor de los tiempos de ataque. Los tiempos de ataque de los ataques de fuelle son más largos que los tiempos de ataque de los ataques de dedo. Los ataques de dedo en *mezzo forte* son más cortos que los ataques de dedo en *piano*. En el caso de los ataques de fuelle, el rango de dinámica no parece tener influencia alguna en la duración de los ataques.

En los ataques de dedo todos los armónicos evolucionan de una manera similar en duración, tiempos de comienzo y final, y velocidad de cambio del nivel de presión sonora (dB/ms). En los ataques de fuelle los armónicos comienzan casi simultáneamente, pero terminan en instantes diferentes. Es más, este tipo de ataques muestra una alta velocidad de cambio durante el primer cuarto del tiempo de ataque de cada armónico, permaneciendo después muy baja esta velocidad para el resto de la duración del ataque.

Para ataques en *mezzo forte*, el centroide de los ataques de dedo es menor que el centroide del ataque de fuelle en una zona característica de diferenciación entre ambos ataques. En ataques en *piano*, la zona característica de diferenciación de los dos tipos de ataque no se muestra tan claramente. Esta característica aparece relacionada con las dos maneras diferentes de abrir las válvulas. Los ataques de dedo realizados con pulsación lenta del botón muestran un cierto parecido al de los ataques de fuelle.

El *cassotto* no tiene efecto alguno en la duración o comportamiento de los ataques.

Un apunte sobre el tiempo de ataque en notas muy graves: en *mezzo forte*, independientemente de cómo sea el resto de parámetros (dureza, sentido del fuelle) las notas de aproximadamente la primera octava más grave tienen siempre un tiempo de ataque más largo. A medida que se pasa a las siguientes octavas los tiempos disminuyen y son del mismo orden, tal y como afirma la hipótesis H5. Este hecho aparece reiteradamente en las opiniones expresadas por intérpretes y lutieres. Todas estas lengüetas están cargadas, lo que aparece como un rasgo diferenciador que podría tomarse como punto de partida para un análisis en mayor profundidad en futuras investigaciones.

Se ha realizado un estudio similar sobre los ataques en la melódica, otro instrumento de lengüetas libres (Apéndice 3) y concluido que las características diferenciadoras de los ataques duros y blandos sobre el acordeón se mantienen también en el caso de la melódica.

5.3. ESTADO ESTACIONARIO

Se ha comprobado la veracidad de las siguientes hipótesis:

-
- H9.** La disposición de las lengüetas dentro de los registros afecta al timbre de los sonidos.
 - H10.** El control el fuelle es esencial para el control de la sonoridad, que también es modificada por la profundidad de pulsación.
 - H11.** La frecuencia de una lengüeta se ve también afectada por el nivel de presión sonora.
 - H12.** Una mayor intensidad/frecuencia del sonido va asociada a un predominio de armónicos superiores y timbre más brillante.
 - H13.** La sonoridad y el timbre del manual derecho e izquierdo son diferentes.
-

H14. Los acordeones con “doble bajo” y sin él presentan sonoridades y timbres diferentes.

Tras realizar una caracterización básica de los sonidos del acordeón de concierto y el efecto de algunos de sus componentes en ese sonido, se ha observado que, independientemente del tono y la dinámica, los sonidos de notas dentro de *cassotto* presentan armónicos superiores mucho más atenuados que los correspondientes a registros fuera de *cassotto*. Como consecuencia el sonido es más brillante en los registro fuera de *cassotto*.

Aunque no existe *cassotto* en el manual izquierdo, si se comparan los sonidos de la misma nota para las tres voces de ese manual (baja, central y alta) se observa que el registro correspondiente la voz más baja también tiene sus armónicos superiores más atenuados que los de las voces central y alta. Este hecho se debe a la disposición de las lengüetas dentro de los registros.

En cuanto a la intensidad, se ha observado que, manteniendo fijo el resto de parámetros, cuanto mayor es la intensidad del sonido aumenta la intensidad de los armónicos más altos. Sin embargo, cuando la sonoridad aumenta mucho la amplitud de los armónicos puede disminuir. Este resultado es consistente con el hecho de que al aumentar la presión del fuelle una lengüeta puede “ahogarse”. Aplicación pedagógica: los estudiantes deben aprender a utilizar el fuelle inteligentemente, sin ejercer una fuerza mayor que la que las lengüetas pueden soportar sin empezar a ahogarse y disminuir su respuesta.

Respecto al tono de la nota, se observa que cuanto mayor es la frecuencia fundamental, más intensos son los armónicos altos.

También se han encontrado diferencias en sonoridad y timbre en los dos manuales (izquierdo y derecho), que se deben a dos causas. En primer lugar, las cámaras de resonancia de los dos manuales tienen diferentes tamaños y contienen diferente número de lengüetas que están colocadas de formas distintas. Este entorno que actúa como un filtro del sonido

emitido por las lengüetas modifica el sonido fuera del instrumento. Además, en el caso de las lengüeta más graves, las del manual derecho tienen más carga y son más cortas y notablemente más estrechas que las equivalentes del manual izquierdo (más largas y con menos carga). Esto es así independientemente de que las lengüetas de esa zona grave se dispongan o no en placa común. Hemos visto el caso del acordeón Pignini Sirius que hemos utilizado, con solo las lengüetas más graves del manual izquierdo en placa. Pero también hay diferencia entre las lengüetas graves de ambos manuales en acordeones con todas las lengüetas en placa, como puede ser el caso del modelo Pignini Mythos y de los acordeones similares de la casa rusa Jupiter. También se dan estas mismas diferencias entre las lengüetas de la tesitura grave de ambos manuales en el caso de acordeones de menos calidad, sin ninguna lengüeta en placa (todas en piastrino). Esta diferencia de dimensiones y carga de las lengüetas de ambos manuales también modifica el timbre, como se ha comprobado en el estudio de lengüetas cargadas. Aplicación pedagógica: este hecho debe tenerse en cuenta en la composición y la transcripción de partituras creadas para otros instrumentos.

Peculiaridades del manual del bajos libres: al comparar la octava más grave (E1 a F#2) del manual de la mano izquierda para dos acordeones similares, uno con "doble bajo" y otro sin él, se observa que en el acordeón sin "doble bajo" esta octava está más atenuada que el resto de las notas del registro. Este efecto no aparece en el acordeón "con doble bajo" que presenta una sonoridad y un color más homogéneos. Esto puede deberse a la colocación de las lengüetas dentro del manual. Aplicación pedagógica: el instrumentista debe elegir entre la homogeneidad y sonoridad del acordeón con "doble bajo" o la mayor flexibilidad en la elección de los registros del acordeón sin "doble bajo".

5.4. PITCH BENDING

Se ha comprobado la veracidad de las siguientes hipótesis:

H15. La modalidad de pitch bending más comúnmente usada, esto es, la que involucra la acción conjunta del fuelle (mayor tensión o compresión del mismo) y de los dedos, es la que consigue una mayor disminución de la frecuencia fundamental de la nota de partida.

Se ha comprobado la veracidad de la siguiente hipótesis, a excepción de las notas más graves del registro de 16 pies, que sufren una caída mayor de frecuencia:

H16. El pitch bending descendente, comúnmente efectuado con el manual derecho, es del mismo valor para toda la tesitura.

Se ha comprobado la falsedad de la siguiente hipótesis:

H17. La disminución de frecuencia en el pitch bending descendente es mayor cerrando el fuelle que abriéndolo.

Se ha comprobado la veracidad de las siguientes hipótesis:

H18. Durante la evolución del pitch bending la disminución de frecuencia es acompañada de una disminución de intensidad.

H19. El *cassotto* no influye en el valor del pitch bending.

H20. Durante la evolución del pitch bending el contenido armónico del sonido de partida va cambiando, sin perderse la armonicidad de la nota.

H21. Para poder efectuar un pitch bending es necesario que la lengüeta tenga en el lado opuesto de la abertura donde se encuentra remacha remachada, una tira de cuero (o de plástico) cubriendo totalmente dicha abertura.

Se ha caracterizado el efecto del pitch bending para el manual derecho de un acordeón de concierto. Cuando una nota se somete a pitch bending, tanto la frecuencia como la sonoridad de dicha nota experimentan un descenso.

En cuanto al descenso de frecuencia se refiere, se ha observado que todas las notas sufren una disminución similar, no llegando en ningún caso al semitono, con excepción de las notas más graves del registro de 16 pies, que pueden sufrir una caída mayor. El método de pitch bending realizado con el dedo más fuelle ha producido una mayor disminución de la frecuencia que el método de solo dedo.

Con respecto al nivel de presión sonora, ambos métodos de pitch bending han producido una disminución de dicho nivel, pero el pitch bending realizado solo con el dedo ha conducido a un estado final de menor sonoridad que el pitch bending llevado a cabo con el fuelle más dedo.

Estas diferencias han sido atribuidas al aporte extra de energía que el fuelle suministra a la lengüeta en el caso de pitch bending realizado con el fuelle más dedo.

Se ha constatado que la cámara de la lengüeta ha de estar herméticamente cerrada para que todo el aire pase por el estrecho espacio que queda entre la lengüeta y el hueco de la plaqueta a través del cual vibra. Si la lengüeta opuesta no lleva piel o tira de plástico el pitch bending no es posible.

Apéndice 1

Modelos físicos del funcionamiento de las lengüetas del acordeón

APÉNDICE 1: Modelos físicos del funcionamiento de las lengüetas del acordeón

Consideraremos a continuación algunos modelos descritos en la literatura científica.

A1.1. Modelo de Fletcher para las oscilaciones automantenidas de una lengüeta

A continuación se identificarán las condiciones necesarias para las oscilaciones automantenidas considerando la acción de la válvula del acordeón.

A1.1.1. Condiciones necesarias para el mantenimiento de oscilaciones automantenidas

El modelo de Fletcher [Fletcher 1993] es una descripción físico-matemática relativamente simplificada de la acción de una válvula al paso de un fluido a su través y que permite identificar las condiciones necesarias para el mantenimiento de oscilaciones automantenidas.

Se parte de un reservorio de aire conectado a un tubo al final del cual tenemos una válvula o lengüeta. Esta se comunica con un tubo de salida. Podemos ver el diagrama correspondiente a esta asociación de fuente, tubos y válvula en la Figura A1.1 [Fletcher1993 figura 2.b]:

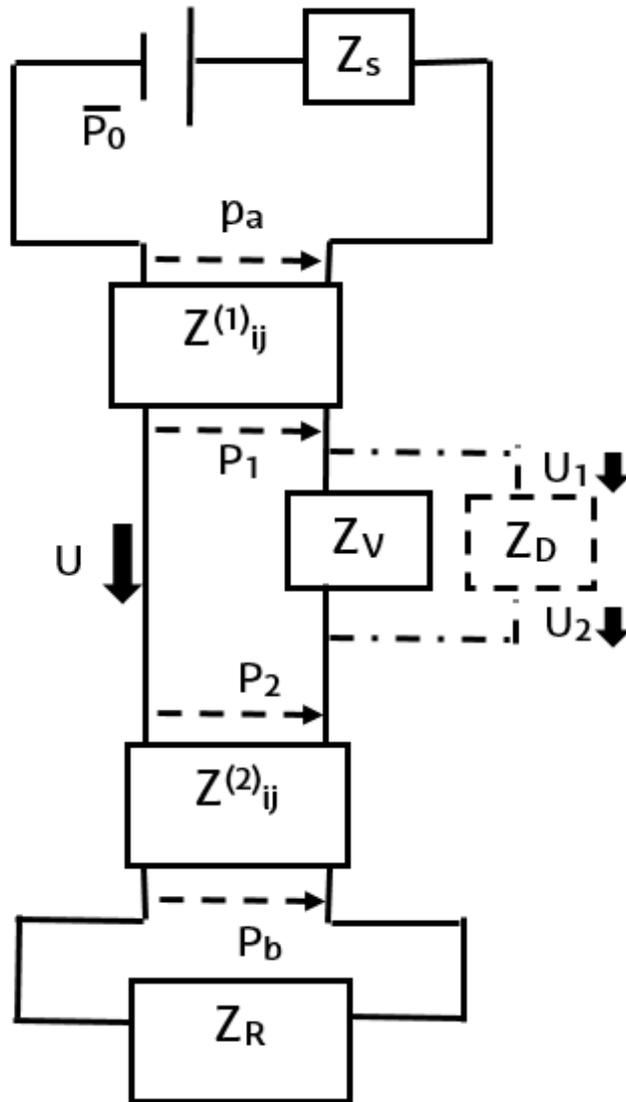


Figura A1.1: Diagrama esquemático de una lengüeta controlada por presión conectada a tubos de entrada y de salida

El reservorio de aire, con impedancia Z_s , crea una sobrepresión $\overline{p_0}$. A la entrada de la válvula, conectando la fuente de aire con la válvula tendremos un tubo con una impedancia caracterizada por los coeficientes $Z_{ij}^{(1)}$. Análogamente, a la salida de la válvula tendremos un tubo cuya impedancia vendrá caracterizada por los coeficientes $Z_{ij}^{(2)}$. Normalmente, la impedancia Z_s de la fuente será grande comparada con las impedancias Z_{ij} de los tubos conectados a la entrada y salida de la válvula. Vamos a suponer

una resistencia nula de ambos tubos al paso del flujo estacionario a su través. p_1 representa la presión justo a la entrada de la válvula y p_2 la presión justo a la salida. Estas cantidades serán variables en el tiempo cuando la lengüeta oscile. Para especificar cantidades relativas a flujo estacionario y frecuencia cero de vibración empleamos una barra sobre los símbolos correspondientes de presión, resistencia o velocidad volúmica.

En primer lugar se busca una expresión para el flujo volúmico en el canal de la lengüeta a partir de la ecuación de Bernoulli en condiciones de flujo estacionario, cuando la frecuencia es cero. Esta utilización de la ecuación de Bernoulli implica implícitamente que la presión del chorro que atraviesa el canal de la lengüeta iguala, a la salida de dicho canal, a la presión acústica a la entrada al resonador [Hirschberg et al 1990, Ricot et al 2005]. Asimismo, estamos suponiendo que las velocidades del fluido son lo suficientemente altas como para que se pueda aplicar la ecuación de Bernoulli (en caso contrario predominarían los efectos de la viscosidad sobre los convectivos). Así, en condiciones de flujo estacionario, si \bar{x} y \bar{W} son, respectivamente, la apertura y la anchura \bar{W} de la válvula en este modelo simple, si ρ es la densidad del gas (supuesto incompresible alrededor de la lengüeta), y \bar{p}_1 y \bar{p}_2 son las presiones respectivas a la entrada y a la salida de la lengüeta, el flujo volúmico a través del canal vendrá dado entonces por:

$$\bar{U} = \left(\frac{2}{\rho} \right)^{1/2} \bar{W} (\bar{p}_1 - \bar{p}_2)^{1/2} \bar{x} \quad (\text{A1.1})$$

A esta expresión se le pueden añadir diversas correcciones, y así se ha efectuado en distintas aplicaciones concretas del modelo de Fletcher. Por ejemplo, se puede introducir una corrección debida a la inercia del aire en el canal de la lengüeta, el cual introduce un pequeño retraso en el flujo volúmico (por ser un término proporcional a la derivada temporal de este flujo). Este efecto, derivado de manera rigurosa a partir de las ecuaciones generales de un flujo potencial incompresible, será el que explique el

mantenimiento de las oscilaciones de la lengüeta libre [Ricot et al. 2005]. La resistencia al flujo en el canal se ha hecho cero, lo que puede no ser cierto en lengüetas dobles, donde el canal es relativamente largo y estrecho. Asimismo, la geometría del canal puede ser más complicada que lo que hemos supuesto, y hay que tener en cuenta que el modelado del flujo a través del canal de la lengüeta es crucial para la reproducción por parte del modelo teórico de los datos medidos [Benade 1990, Hirschberg et al. 1994, Tarnopolsky et al. 2001; Millot & Baumann 2007]. Esta dependencia era bien conocida antes de la elaboración de este modelo. En el propio caso de las lengüetas libres, la contribución al flujo total por parte de los lados de las lengüetas dominará sobre la contribución de la punta, y la abertura variará como x^2 [Fletcher & Rossing, 1998, p. 413]. Otra variación más viene dada por el tipo de flujo circulante. En efecto, dependiendo del problema planteado, algunos autores llegan incluso a sustituir el modelo de flujo potencial por uno de flujo laminar con viscosidad en ciertos tramos del canal de la lengüeta [Miklos et al. 2003]: en este caso la relación entre velocidad y caída de presión no vendrá ya dada por la Ecuación (A1.1). Por último, en la expresión anterior tampoco se ha tenido en cuenta el flujo asociado al desplazamiento de la propia lengüeta. Este flujo recíproco inducido por el movimiento de la lengüeta será solo importante cuando, en modelos como el de [Ricot et al 2005], se trate de estimar la presión resultante en campo cercano que habrá que añadir a la presión aerodinámica al cotejar las predicciones teóricas con los datos experimentales. Por lo demás, todos esos factores supondrán, por lo general, solo una pequeña corrección al comportamiento general de la lengüeta.

El siguiente paso es escribir una expresión de la ecuación del movimiento de la lengüeta, donde esta queda asimilada a un oscilador armónico forzado cuyo desplazamiento viene a dar cuenta de la apertura de la lengüeta con respecto a su posición de equilibrio, con una masa, rigidez y amortiguamiento efectivos. Para ser más generales habría que considerar el comportamiento de cada modo de vibración de la lengüeta y sumar sus desplazamientos para encontrar el área de paso del aire. En la práctica basta

limitarse al modo fundamental de vibración de la lengüeta [Ricot et al. 2005, Fletcher 1993, Cottingham, Lilly, Reed 1999].

Este oscilador está sometido a una fuerza cuya expresión se busca a partir de la fuerza total que actúa sobre la lengüeta. En rigor, para calcular esta fuerza, habría que partir primero de las ecuaciones de Navier-Stokes generales, adecuarlas a las condiciones del fluido y la geometría del problema en cuestión, y de ellas calcular la presión en todos los puntos del fluido en contacto con la lengüeta. Posteriormente, se evaluaría la integral de superficie de dicha presión en todos los puntos de la lengüeta, identificando a posteriori, si fuera el caso, las componentes de la fuerza asociadas al término de Bernoulli. En algunos problemas es posible proceder de esta manera, con más o menos simplificaciones, para abordar las ecuaciones del fluido. Es el caso de los cálculos llevados a cabo, por ejemplo, por [St Hilaire et al. 1971] para las lengüetas del armonio, [Miklos et al. 2003] para las lengüetas de los tubos de órgano con lengüeta o [Ricot et al. 2005] para la lengüeta del acordeón.

En el modelo de Fletcher se llevan a cabo algunas simplificaciones a este planteamiento ideal. Se supone que la lengüeta ofrece una cierta superficie efectiva S_1 al flujo de entrada (con presión p_1), otra superficie efectiva S_2 al de salida (con presión p_2) y una tercera superficie efectiva S_3 al flujo que atraviesa el canal de la propia lengüeta (con presión también p_2 , congruentemente con las suposiciones que hemos establecido arriba sobre la salida del chorro de aire al finalizar el canal de la lengüeta). Este último término representaría una fuerza de Bernoulli en el cómputo total de la fuerza. Sobre la primera superficie actúa la presión de entrada. Para una lengüeta del tipo (σ_1, σ_2) la ecuación queda como sigue:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2k \frac{dx}{dt} + \omega_0^2(x - x_0) = \frac{1}{m}(\sigma_1 p_1 S_1 + \sigma_2 p_2 S_2) + \frac{1}{m} p_2 S_3 \quad (\text{A1.2})$$

donde x_0 es la apertura de la válvula cuando no se aplica ninguna presión y ω_0 es la frecuencia de resonancia de la lengüeta. La determinación de las superficies efectivas S_1 , S_2 y S_3 dependerá de cada caso particular [Fletcher 1993, Tarnopolsky et al. 2001], de la forma de la lengüeta y su canal y de cómo se separa el flujo de aire al contactar con ella [Hirschberg et al. 1990, Hirschberg et al. 1994].

A continuación se supone que la lengüeta oscila con una pequeña amplitud a una frecuencia ω comparable con su frecuencia de resonancia y se expresan las expresiones para las velocidades volúmicas, presiones y apertura de la lengüeta como suma de la cantidad correspondiente a frecuencia cero más una parte oscilante.

$$U = \bar{U} + \hat{U}(\omega); p = \bar{p} + \hat{p}(\omega); x = \bar{x} + \hat{x}(\omega) \quad (\text{A1.3})$$

donde \bar{U} representa la velocidad volúmica a frecuencia cero, con $\hat{U}(\omega) = \hat{U}e^{j\omega t}$, siendo \hat{U} una amplitud compleja que contiene una fase $e^{j\phi}$, y expresiones similares para $\hat{p}(\omega)$ y para $\hat{x}(\omega)$.

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación de Bernoulli (A1.1) y las expresiones de las impedancias a la entrada y salida de la lengüeta se llega, tras un laborioso cálculo, a una nueva expresión de la ecuación del movimiento (A1.2), que queda como sigue:

$$-\omega^2 \hat{x} + 2jk\omega \hat{x} + \omega_0^2 \hat{x} = \left(\frac{2W\bar{p}_1(\sigma_2\mu_2Z_2 - \sigma_1\mu_1Z_1)}{\left((2\rho\bar{p}_1)^{1/2} + W\bar{x}(Z_1 + Z_2) \right)} \right) \hat{x} \quad (\text{A1.4})$$

El lado izquierdo de esta ecuación expresa que la lengüeta lleva a cabo una vibración amortiguada. El lado derecho refleja las influencias de la presión de entrada \bar{p}_1 (a frecuencia cero) y de las impedancias de entrada y de salida Z_1 y Z_2 , respectivamente. Estas impedancias son normalmente números complejos, de modo que el lado derecho de la ecuación es un

número complejo: su parte real se combinará con el término $\omega_0^2 \hat{x}$ del lado izquierdo para modificar la frecuencia de resonancia, mientras que la parte imaginaria se combinará con el término $2jk\omega \hat{x}$ del lado izquierdo para afectar al amortiguamiento. Imponiendo la condición de que el amortiguamiento sea negativo, llegamos a las condiciones necesarias para que se den vibraciones automantenidas. El resultado general se resume en la siguiente tabla de condiciones necesarias para cada respectivo tipo de lengüeta:

$$(-,+): \omega < \omega_r \text{ y } X_1 + X_2 > 0 \quad (\text{A1.5a})$$

$$(+,-): \omega > \omega_r \text{ y } X_1 + X_2 < 0 \quad (\text{A1.5b})$$

$$(+,+): \frac{(\omega - \omega_r)}{(X_1^2 - X_2^2)} > 0 \text{ y } X_1 - X_2 < 0 \quad (\text{A1.5c})$$

donde X_1 y X_2 son, respectivamente, las inertancias (partes imaginarias de las impedancias) de entrada y salida a la válvula. Para llegar a este resultado se desprecian las pérdidas en las paredes de los tubos de entrada y de salida y también la parte resistiva de la impedancia de radiación Z_R . Asimismo, se supone que la impedancia Z_S de la fuente es mucho mayor que las impedancias que conectan los tubos de entrada y de salida de la válvula.

Hay que tener en cuenta que estas condiciones son sólo condiciones necesarias para el inicio de vibraciones automantenidas, que han sido obtenidas para régimen lineal de pequeñas oscilaciones, que la frecuencia real de oscilación ω tendrá una relación definida con la frecuencia de resonancia de la lengüeta (y también, caso de que lo haya, con el tubo resonador situado a la salida) y que habrá que superar una presión p_0 mínima para que la vibración pueda iniciarse. Por lo general, las pequeñas oscilaciones de la lengüeta tienden a crecer rápidamente hasta vibrar a gran amplitud. Para su estudio es necesario un tratamiento intrínsecamente no

lineal [Fletcher 1978, Fletcher 1999]. Por otro lado, la lengüeta puede tener varias frecuencias de resonancia mecánica. El modelo se limita a la frecuencia fundamental, puesto que suele ser la más efectiva en el movimiento de la lengüeta [Ricot et al. 2005, Fletcher 1993, Cottingham, Lilly, Reed 1999].

A1.1.2. Análisis de las condiciones de inicio de oscilaciones automantenidas para una lengüeta del tipo $(-,+)$

Extraigamos la información física contenida en las condiciones (A1.25) que acabamos de mostrar.

Las inecuaciones (A1.5) nos dicen que, para una lengüeta del tipo $(-,+)$, como es el caso de los instrumentos de viento madera, de las lengüetas metálicas de los tubos de lengüeta de órgano, de las lengüetas del harmonio y de las lengüetas del acordeón (al menos en su configuración inicial, antes de que debido a la vibración pudieran pasar al otro lado del portalengüetas), la frecuencia de vibración de la lengüeta debe ser menor que su frecuencia de resonancia. Asimismo, la reactancia total de los conductos de entrada y de salida $(X_1 + X_2)$ debe ser positiva. Si tenemos en cuenta que en aproximación de baja frecuencia (cuando las dimensiones características del tubo son mucho menores que la longitud de onda involucrada en el proceso acústico) la reactancia de un tubo de longitud l y sección S es imaginaria positiva (inertancia) y viene dada por $X = \omega \left(\frac{\rho l}{S} \right)$ [Fletcher & Rossing 1998 p. 228], se sigue que la presencia de un tubo de entrada o de salida favorecerá el inicio de las vibraciones. Por el contrario, la cavidad bucal (en el caso de los instrumentos de viento madera) añadirá rozamiento a la vibración, puesto que en la misma aproximación de baja frecuencia dicha cavidad puede asimilarse a un volumen con una reactancia imaginaria negativa dada por $X = -\rho c^2 / V \omega$ [Fletcher & Rossing 1998 p. 228].

Si consideramos p_1 constante e igual a la presión de soplo p_0 y calculamos la admitancia compleja Y_r como función de la frecuencia (creciente en la dirección de las flechas), siendo la presión de soplo p_0 un parámetro, obtenemos una figura como la siguiente Figura A1.1 [Fletcher & Rossing 1998 figura 13.5a]:

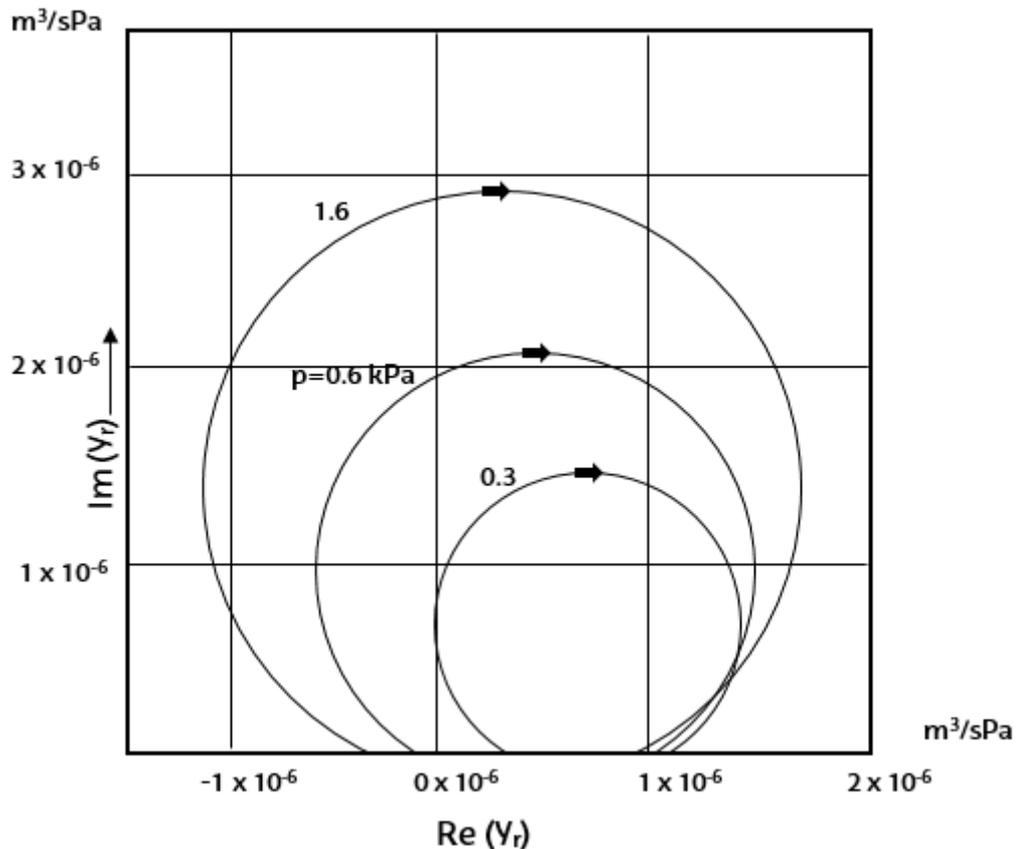


Figura A1.2: Admitancia compleja Y_r en función de la frecuencia para una lengüeta $(-,+)$. La presión de entrada es mostrada como un parámetro.

La lengüeta sólo puede actuar como generador acústico en cuando la parte real de su admitancia, su conductancia, es negativa, esto es, en la mitad izquierda del plano. Por esto mismo se necesita una presión mínima de soplo para que la lengüeta inicie su vibración.

Otro gráfico que nos va a aportar mucha información es el de la parte real de la admitancia, la conductancia, en función de la frecuencia, con el rozamiento como parámetro Figura A1.3.

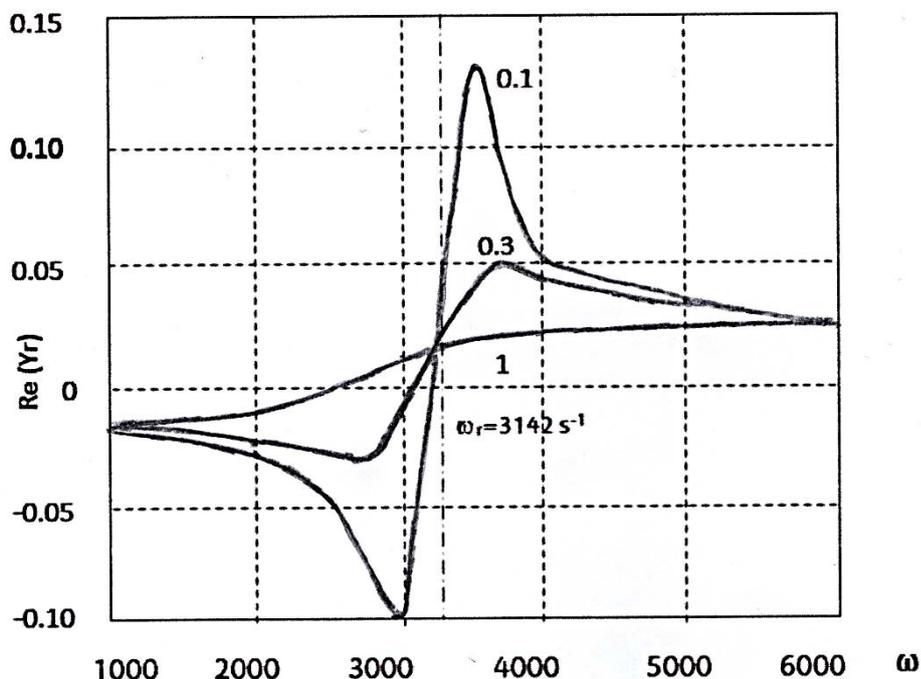


Figura A1.3: Conductancia G_r de una lengüeta $(-,+)$ en función de la frecuencia. El amortiguamiento de la lengüeta aparece como un parámetro.

La frecuencia de resonancia de la lengüeta es $\omega_r = 3142 \text{ s}^{-1}$.

La lengüeta puede actuar como un generador en el rango de valores de la frecuencia donde la conductancia es negativa, esto es, en un rango de frecuencias más o menos amplio que va desde valores bajos hasta alcanzar la propia resonancia de la lengüeta. El mayor o menor rozamiento (que en la Figura A1.3 aparece como parámetro) tendrá importancia a la hora de establecer este rango de valores. Por ejemplo, en el caso de las lengüetas metálicas tanto del órgano como del acordeón, el rozamiento es mucho menor que en el caso de la caña de un clarinete, lo que se refleja en el pico negativo de la admitancia en la Figura A1.3, para $\gamma = 0,1$. En estas circunstancias, el pico negativo de la conductancia G_r puede ser suficientemente grande a una frecuencia ligeramente inferior a la de

resonancia como para satisfacer la inecuación correspondiente de Fletcher y dominar a la resonancia del tubo de salida. No obstante, en el caso de la lengüeta metálica del órgano, el sonido es más fuerte cuando se ajusta la resonancia de la lengüeta con la del tubo resonador [Miklos et al 2006]).

A1.1.3. La lengüeta libre en el modelo de Fletcher

En el caso de las lengüetas metálicas libres del acordeón o armónica, éstas comienzan con una configuración $(-,+)$, pero si la diferencia de presión a ambos lados de la misma es suficientemente grande, pasará al otro lado del portalengüetas, y su configuración será entonces $(+,-)$. Dado que las lengüetas del acordeón son largas y estrechas el flujo principal pasará por los lados de la lengüeta, por las dos rendijas que quedan entre ésta y el portalengüetas.

St. Hilaire et al. [St Hilaire et al, 1971] mostraron que la inercia del flujo de aire hacia la lengüeta y a través de su canal añade una inercia acústica importante que resulta, de acuerdo con las inecuaciones arriba mostradas, en un amortiguamiento negativo para la configuración $(-,+)$ y una resistencia positiva para la configuración $(+,-)$. A esto hay que añadir el hecho de que, de acuerdo a las inecuaciones de Fletcher (Ecuaciones A1.5), el pequeño canal del propio portalengüetas, favorecerá aún más la configuración $(-,+)$, ya que funcionará como un tubo con inercia positiva en aproximación de baja frecuencia. Así pues, la configuración $(-,+)$ tendrá una presión umbral de inicio de oscilaciones automantenidas menor que la configuración $(+,-)$.

En la disposición habitual de las lengüetas del acordeón, con dos lengüetas idénticas, una a cada lado del portalengüetas, la lengüeta que funciona es precisamente la $(-,+)$. Como ya vimos, una tira de piel o de plástico cubre el hueco del portalengüetas correspondiente a la lengüeta

remachada sobre el lado opuesto, y que ahora funcionaría como $(+,-)$. Ello evita que el aire se fugue por el canal correspondiente. Este aire cuya fuga se pretende bloquear simplemente doblaría hacia afuera la lengüeta del otro lado del portalengüetas, la $(+,-)$, sin llegar a hacerla sonar, pero reduciendo el flujo de aire hacia la lengüeta $(-,+)$, con la consiguiente pérdida de efectividad de esta lengüeta. En los portalengüetas pequeños no se coloca ningún tipo de piel, puesto que el canal es pequeño y el flujo de aire despreciable. Así pues, en la práctica, la lengüeta $(-,+)$ de cada portalengüetas del acordeón será la que suene y, como hemos discutido arriba, lo hará a una frecuencia un poco menor que su propia frecuencia de resonancia, como corresponde a una lengüeta metálica (poco amortiguamiento comparado con una caña de clarinete) batiente hacia adentro.

Nos referiremos nuevamente al estudio de St. Hilaire et al. cuando tratemos del modelo de Ricot et al., en el epígrafe A1.2 de este mismo Capítulo.

A1.1.4. Aplicaciones prácticas concretas del modelo de Fletcher

Diversos autores han investigado la generación de sonido por lengüetas de diversas configuraciones aplicando el modelo de Fletcher, con ligeras variaciones debidas a las particularidades de cada instrumento. Sin intención de hacer una enumeración completa, podemos repasar los diversos estudios en los que el modelo de Fletcher se ha aplicado a diversos instrumentos musicales. La armónica diatónica ha sido estudiada, entre otros, por [Johnson 1987], [Bahnsen et al. 1998], [Milot et al. 2001] y [Debut & Millot 2001]. La formación del sonido en los tubos de órgano con lengüeta, sin y con resonador, ha sido investigada por [Miklos et al. 2003] y [Miklos et al. 2006]. Los instrumentos de viento madera, con especial atención al clarinete, entre otros, por [Hirschberg et al. 1990] y [Hirschberg et al. 1994]. Las lengüetas del acordeón por [Ricot et al. 2005, Millot & Baumann 2007]. Y

una aplicación directa a válvulas del tipo $(+,-)$ se puede encontrar en [Tarnopolsky et al. 2001].

A1.2. Modelo de Ricot-Caussé-Misdariis

Seguidamente nos fijaremos especialmente en las propiedades aerodinámicas del flujo de aire que incide sobre la lengüeta y atraviesa el canal del portalengüetas.

A1.2.1. Análisis de los mecanismos de generación de las oscilaciones automantenidas de una lengüeta libre

Cuando se aplica el modelo propuesto por Fletcher y que acabamos de describir en el apartado anterior a ciertos instrumentos, por ejemplo los tubos flautados de órgano o como la voz humana, se encuentra que dicho tratamiento puede resultar demasiado simple desde el punto de vista de la dinámica de fluidos [Hirschberg et al. 1994]. Se llega a la conclusión de que un enfoque en el que el campo acústico y el flujo aerodinámico sean incorporados en un único modelo musical aeroacústico puede resultar más adecuado.

El modelo de Ricot et al. [Ricot et al. 2005] para la vibración de la lengüeta metálica libre presta especial atención a las propiedades aerodinámicas del flujo de aire que incide sobre la lengüeta y atraviesa el canal del portalengüetas. El modelo sigue unos pasos similares a los establecidos en el modelo de Fletcher (ecuación de Bernoulli y ecuación de movimiento de la lengüeta). La diferencia clave con este modelo estriba en que Ricot et al. no formulan una expresión ad hoc, a partir de la expresión de Bernoulli clásica, para la expresión de la fuerza aerodinámica ejercida por el fluido sobre el canal de la lengüeta, sino que calculan directamente dicha fuerza a partir de la solución de las ecuaciones dinámicas del fluido particularizadas al régimen de flujo y condiciones geométricas existentes.

En primer lugar Ricot et al. repasan los diversos mecanismos físicos por los que una lengüeta, en el seno de un fluido circulante, puede

convertirse en un mecanismo generador de vibraciones automantenidas. En el modelo de Fletcher las inertancias de entrada y de salida de la lengüeta determinan las condiciones necesarias para el inicio de oscilaciones automantenidas. Se supone que la retroalimentación acústica de los tubos de entrada y salida proporcionan esas inertancias. En el caso del acordeón, más allá del propio canal del portalingüetas, no hay un tubo de entrada o de salida que pueda proporcionar retroalimentación acústica a la lengüeta.

Para una superficie constante de contacto entre el flujo de aire y la lengüeta (condición con la cual evitamos considerar fuerzas generadas por desprendimiento del chorro de aire: *stall flutter, vortex shedding...*), la fuerza de excitación dinámica va a consistir en una combinación de la presión acústica y la presión inducida por la variación de velocidad del flujo de aire debido al cambio del área de apertura (fuerza de Bernoulli). Las fluctuaciones de presión inducidas por el cambio en la velocidad del fluido que atraviesa el canal del portalingüetas son calculadas a partir de la ecuación estacionaria de Bernoulli.

No obstante, sin otros mecanismos físicos como la realimentación acústica (originada habitualmente por un tubo resonador a la salida de la lengüeta), estas fluctuaciones de presión no pueden inducir autooscilaciones: la transferencia de energía entre un suministro de presión constante y la oscilación de la lengüeta no es posible si consideramos tan solo la fuerza de Bernoulli, deducida a partir de la ecuación estacionaria de Bernoulli, que dependa solo de la apertura del canal de la lengüeta, ya que el trabajo realizado por dicha fuerza a lo largo de un ciclo es cero [Titze 1988, Hirschberg et al. 1994, Fabre et al. 2012].

Es preciso algún tipo de asimetría de la fuerza de presión durante cada ciclo para que se dé una transferencia neta de energía a la lengüeta. Si queremos seguir suponiendo válida la aplicabilidad de la ecuación estacionaria de Bernoulli, podemos examinar otros tipos de mecanismos de oscilación para ver si se presenta algún tipo de asimetría en la fuerza de

presión que permita explicar las auto-oscilaciones mantenidas de la lengüeta del acordeón.

Ricot et al., tras hacer un repaso de las diversas situaciones encontradas en los diversos instrumentos (evolución compleja de la geometría del sistema físico, efecto de separación y reagrupamiento del flujo en el canal de la lengüeta) muestran que no son aplicables al caso del acordeón, de tal forma que la única posibilidad para describir el flujo inestable a través de la lengüeta metálica es descartar la validez de la ecuación estacionaria de Bernoulli y buscar explicaciones alternativas.

Dos soluciones son examinadas. Una es estudiar la creación de una fuerza periódica a partir de la formación y liberación de vórtices detrás de una estructura sólida expuesta a un flujo. Pero St Hilaire et al. [St Hilaire et al. 1971] ya habían mostrado que esta liberación de vórtices no era la responsable de la excitación de la lengüeta libre del harmonio. La segunda posible solución es la propuesta por los propios St Hilaire et al.: el efecto inercial del flujo aguas arriba es el responsable del mecanismo de excitación de las lengüetas. Ricot et al. se decantan por verificar esta propuesta de St Hilaire et al. para el caso de las lengüetas del acordeón.

A1.2.2. Descripción del flujo según la dinámica de fluidos

El estudio de Ricot et al. comienza por analizar las características del fluido que atraviesa la lengüeta libre desde el punto de vista de la dinámica de fluidos. Se observa que la lengüeta oscila de acuerdo al primer modo de vibración de una barra fija-libre. Aguas arriba, el flujo es laminar, incompresible (números de Mach y de Helmholtz pequeños), sin viscosidad y describible mediante una función potencial que corresponde a dos sumideros situados a lo largo de las rendijas laterales entre lengüeta y portalengüetas.

Además, suficientemente lejos del hueco dejado por la punta de la lengüeta, el flujo es bidimensional (para una discusión sobre la continuidad entre las regiones bi y tridimensionales, tanto en el trabajo de St. Hilaire et al

como en el de Ricot et al., ver [Fabre et al. 2012]). Los puntos de separación del flujo se sitúan en los bordes de la lengüeta. No hay reagrupamiento en el lado opuesto de la lengüeta, de modo que la superficie de la lengüeta inmersa en el flujo es constante. Se puede considerar que el flujo saliente está formado por chorros planos que no interactúan con el lado correspondiente de la lengüeta, lo que muestra que el flujo saliente no toma parte en el mecanismo de oscilación. El canal de la lengüeta hace de canal de salida, siendo por tanto su longitud igual a la anchura del portalengüetas. Esta longitud es bastante mayor que la anchura del hueco que queda entre la lengüeta y las paredes del hueco del portalengüetas, con lo que se espera que sí haya reagrupamiento del flujo sobre estas paredes del hueco del portalengüetas.

Aguas abajo, el flujo es turbulento, no tiene las características de una estela y no se presentan grandes vórtices coherentes que pudieran ser responsables de la excitación de la lengüeta. No obstante, puede ser considerado como laminar e irrotacional hasta cierta distancia del hueco entre lengüeta y portalengüetas. Por tanto, se pueden utilizar expresiones potenciales para describir tanto el flujo aguas arriba como el flujo aguas abajo.

El flujo total puede ser explicado como la suma de dos flujos potenciales idénticos creados por sendos sumideros laterales.

A1.2.3. Cálculo de la fuerza aerodinámica sobre la lengüeta

Una vez establecidas las características del flujo, se procede a calcular el potencial aguas arriba como suma de una distribución continua de sumideros. Para calcular el potencial aguas abajo se impone continuidad de ambos potenciales, de la velocidad y de la presión en el centro del espacio que queda entre cada lado de la lengüeta y su pared más próxima, siempre en el plano determinado por la cara superior de la lengüeta en reposo. La Figura A1.4 [Ricot et al 2005 figura 1] muestra un esquema de la lengüeta remachada sobre su soporte. El flujo va de derecha

a izquierda. Se muestran también las direcciones de los ejes coordenados utilizados en la derivación del modelo matemático.

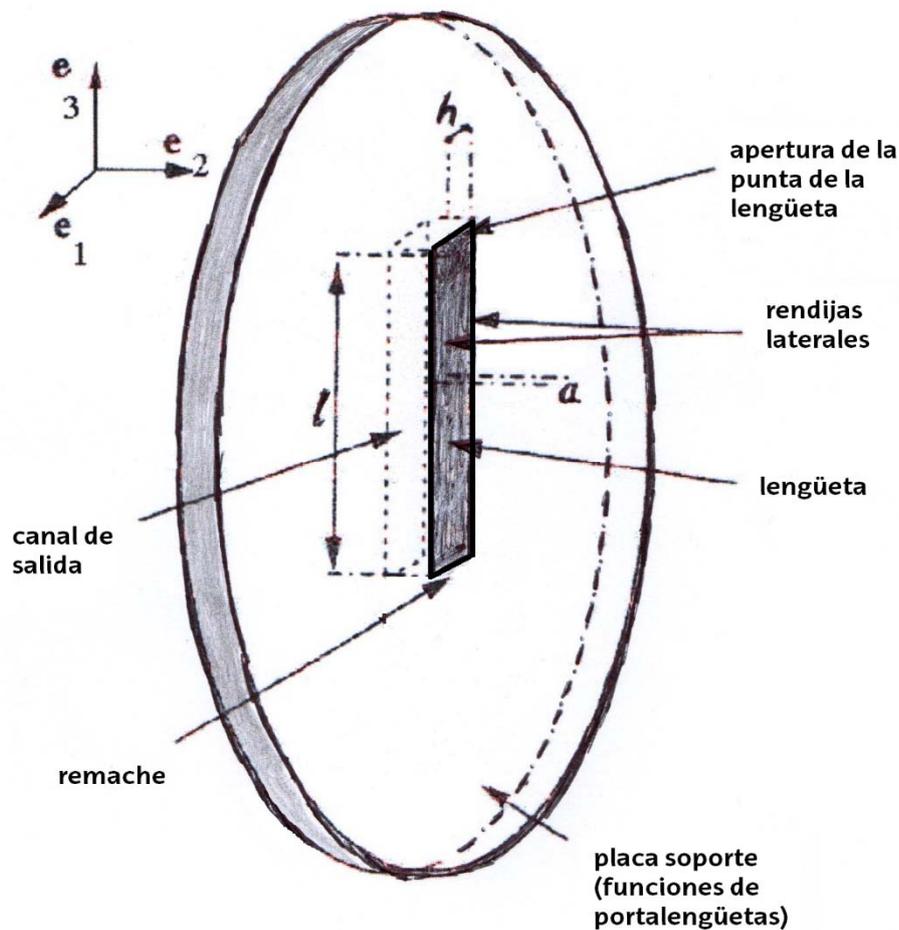


Figura A1.4: Esquema de la lengüeta sobre su soporte y direcciones de los ejes coordenados.

A continuación se impone que la función potencial verifique la ecuación de Bernoulli no estacionaria [Paterson 1983 p. 233, Barrero & Pérez-Saborid 2002 ec. 13.84)].

$$\frac{\partial \phi(x,t)}{\partial t} + \frac{\|v(x,t)\|^2}{2} + \frac{P(x,t)}{\rho_0} = C(t) \quad (A1.6)$$

donde x denota (x_1, x_2) , siendo $P(x,t)$ representa la desviación de la presión sobre la presión atmosférica, ρ_0 la densidad del fluido (aire) y $C(t)$ una

constante que solo depende del tiempo y que puede determinarse aplicando la ecuación de Bernoulli en un punto determinado.

A partir de la función potencial y la ecuación de Bernoulli no estacionaria se puede obtener primero la presión aerodinámica del fluido sobre cada punto de la cara superior (aguas arriba) de la lengüeta y, a continuación, la fuerza total sobre la misma cara.

$$F_1(t) = -h \frac{\rho_0}{2} V^2(t)(1 - A_1(t)) + \rho_0 h^2 A_2(t) \frac{\partial V}{\partial t} - \rho_0 h A_3(t) \frac{\partial q}{\partial t} \quad (\text{A1.7})$$

donde h es la anchura de la lengüeta, $v(t)$ el módulo de la velocidad del flujo saliente y $q(t) = v(t)e(t)$ es el flujo volúmico a través de la rendija, donde $e(t)$ mide la anchura variable del hueco del portalingüetas.

El primer término lado derecho de la igualdad, $-h \frac{\rho_0}{2} V^2(t)(1 - A_1(t))$, representa la fuerza clásica de Bernoulli que aparece en los modelos cuasi-estacionarios. El parámetro $A_1(t)$ representa unas variaciones de presión asociadas con las fluctuaciones de flujo debidas al movimiento de oscilación de la lengüeta. La fuerza variable originada por este parámetro de contracción dependiente del tiempo no es la responsable del mecanismo de excitación de la lengüeta, pues en primer orden resulta ser proporcional a $e^2(t)$, estando por tanto en fase con la apertura de la lengüeta, no con su velocidad, no transfiriendo por tanto energía al movimiento de la lengüeta [Hirschberg et al. 1994, Richards 2003].

Volviendo al término clásico de Bernoulli, vemos que esta fuerza depende de $v^2(t)$. Este término está originado por la carga inercial del fluido, como también los términos segundo y tercero del último miembro para la expresión de la fuerza (Ecuación A1.7). Todos estos términos generados por la inercia del fluido y las fuerzas inerciales correspondientes son las que explican el mecanismo de oscilación de la lengüeta, puesto que las

fluctuaciones de velocidad de flujo inducidas por ellos no están en fase con el desplazamiento de la lengüeta.

Entre todos ellos el término de Bernoulli es dominante, razón por la cual las fuerzas de inercia, representadas por el segundo y tercer términos del lado derecho de la Ecuación A1.7, se suelen desprestigiar en la mayoría de modelos de lengüeta. Calculando valores medios de la presión del fluido (fuerza entre superficie de la cara superior de la lengüeta) entrante sobre la cara superior de la lengüeta y sustituyendo los valores de la velocidad a partir de la ecuación no estacionaria de Bernoulli, se llega a la siguiente expresión para la presión media de excitación:

$$\langle P_1(t) \rangle_{exc} = -\rho_0 K_0(t) (1 - A_1(t)) \frac{\partial q}{\partial t} \quad (\text{A1.8})$$

Esta expresión tiene la forma de una relación de impedancia, en este caso una impedancia inercial, cuya masa asociada, dependiente del tiempo, vendría dada por $M(t) = \rho_0 K_0(t) (1 - A_1(t))$. Al contrario que la aproximación tradicional (Fletcher) al estudio de lengüetas, basada en las impedancias de los tubos de entrada y salida, esta expresión está relacionada con la impedancia del orificio en la plaqueta por el que pasa la lengüeta. $M(t)$ puede ser interpretada como la corrección de masa del extremo del lado aguas arriba de la rendija. Su forma concreta depende de la geometría de la rendija y de la forma concreta flujo potencial incidente.

A1.2.4. Movimiento de la lengüeta y flujo recíproco

Medidas realizadas por Ricot et al. muestran que el movimiento de la lengüeta es prácticamente sinusoidal, lo que ya había sido referenciado en la literatura [Millot et al. 2001 para las lengüetas libres de la armónica, Miklós et al. 2003 para las lengüetas metálicas del órgano]. El modo predominante es el fundamental de la barra fija-libre, que es el sistema físico que mejor representa a la lengüeta libre.

Así, podemos modelar la lengüeta por medio de un sistema oscilante masa-muelle-amortiguamiento unidimensional. El movimiento de la lengüeta crea una corriente de flujo recíproco que no depende del flujo variable principal. La contribución a la presión total de la vibración de la superficie de la lengüeta puede estudiarse [Kinsler et al. 1995] usando la expresión para la impedancia de radiación de un pistón rectangular con pestaña:

$$Z_m = \frac{F_r(\omega)}{u(\omega)} \quad (\text{A1.9})$$

donde $u(\omega)$ es la velocidad normal de la lengüeta y $F_r(\omega)$ es la fuerza de reacción del fluido sobre el pistón, todo ello a una frecuencia ω . Para longitudes de onda suficientemente mayores que las dimensiones de la lengüeta, la parte dominante de la impedancia de radiación es la reactancia, que fue calculada por Morse e Ingard [Morse & Ingard 1968], a partir de cuya expresión podemos identificar la masa efectiva m_f de radiación:

$$m_f = \frac{8}{9\pi} \rho_0 l h \frac{l^2 + lh + h^2}{l + h} \quad (\text{A1.10})$$

$$F_r(\omega) = Z_m(\omega)u(\omega) = -i\omega m_f u(\omega) \quad (\text{A1.11})$$

La fuerza $F_r(\omega)$ está en oposición de fase con la aceleración de la lengüeta y nos dice que el fluido arrastrado por un lado de la lengüeta tiene una masa aparente de valor m_f . Por tanto, la masa efectiva $2m_f$ debe ser añadida a la masa de la propia lengüeta en la ecuación del movimiento de esta:

$$\frac{(m + 2m_f)}{l} \frac{\partial^2 x_2}{\partial t^2} + \frac{c}{l} \frac{\partial x_2}{\partial t} + \frac{k}{l} (x_2 - x_0) = F_1(t) \quad (\text{A1.12})$$

donde c y k son, respectivamente, el amortiguamiento y la rigidez equivalentes de la lengüeta, x_2 es la coordenada que mide la distancia en un plano perpendicular a las direcciones principales de la lengüeta a la vez que paralelo a la dirección transversal de la misma (ver Figura A1.4) y x_0 es su valor en ausencia de flujo, l es la longitud de la lengüeta y h su anchura. El efecto de la fuerza $F_r(\omega)$ es sólo importante en el campo cercano a la lengüeta.

Llegamos finalmente a la conclusión de que el modelo matemático que describe la excitación de la lengüeta es un sistema diferencial con dos ecuaciones no lineales acopladas (la ecuación no estacionaria de Bernoulli –Ecuación (2.25)- y la ecuación del movimiento –Ecuación (A1.12)-) con $x_2(t)$ y $q(t)$ como incógnitas.

A1.2.5. Producción de sonido en un flujo. Analogía de Lighthill

Hemos visto que el sonido producido por el acordeón es consecuencia del flujo inestable a través de los huecos entre lengüeta y portalengüetas. En el caso del acordeón, el sonido no puede deducirse del análisis de la respuesta de un resonador a un flujo entrante, como ocurre con los instrumentos de viento madera y viento metal usuales, sino que se debe considerar que el fluido fluctuante actúa directamente como fuente de sonido en el medio acústico libre (el aire circundante).

El problema de la producción de sonido por un flujo fue investigado por primera vez por Lighthill [Lighthill 1952]. (Puede consultarse un tratamiento más actual en [Hirschberg & Rienstra 2004]). La idea clave de Lighthill fue derivar, a partir de las ecuaciones exactas de conservación de la masa y del momento, una ecuación de onda no homogénea que se reduce a la ecuación de onda homogénea en la región donde se encuentra el oyente.

Es decir, esta visión de las ecuaciones de propagación del sonido es apropiada para el estudio del campo acústico propagado desde una región

donde circula un fluido hasta otra región donde se halla el oyente, en una zona de fluido estanco, lejos de las fuentes. En ningún caso suponen una aproximación, sino que son tan exactas como la formulación habitual en función de fluctuaciones de la presión y la densidad en las ecuaciones de conservación de masa y momento lineal. Lighthill propuso usar una formulación integral basada en el formalismo de las funciones de Green. El campo acústico lejano se calcula mediante la convolución de las fuentes de Lighthill con las funciones de Green para el espacio libre de fuentes.

En concreto, las ecuaciones de conservación toman la siguiente forma en el formalismo de Lighthill:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = Q \quad (\text{A1.13})$$

con: $\rho' = \rho - \rho_0$ y $p' = p - p_{atm}$.

El término de fuentes viene dado por:

$$Q = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (\text{A1.14})$$

siendo T_{ij} es el tensor de esfuerzos, que puede expresarse como:

$$T_{ij} = \rho v_i v_j - \sigma_{ij} + (p - c^2 \rho) \delta_{ij} \quad (\text{A1.15})$$

El primer término, el llamado tensor de esfuerzos de Reynolds, es el responsable de la generación de sonido por fuerzas convectivas no lineales en el flujo, como la producción de sonido por turbulencias. El segundo término refleja la influencia de la viscosidad. El último representa la producción de sonido debida a procesos no isentrópicos o a una diferencia local en la velocidad del sonido. En el caso de la lengüeta de acordeón, con flujos sin viscosidad, incompresibles y sin fuentes de calor, solo queda el primer término.

En la derivación de las ecuaciones por Lighthill es crucial que la constante c es la velocidad del sonido en la región donde se sitúa el oyente.

En tanto que las formulaciones aeroacústicas basadas en variables acústicas (ρ', p', \dots) , diferentes a (ρ, p, \dots) , son en principio equivalentes mientras no se introduzca ninguna aproximación, el objetivo de la aeroacústica es obtener una predicción razonable de la producción de sonido basada en la fuente. Así pues, no hay una relación simple a priori del tipo $p' = c^2 \rho'$. En cada problema concreto habrá que ver que variable es más adecuada, ρ' , p' u otras.

Ricot et al. utilizan este formalismo de Lighthill para calcular la presión acústica en una zona alejada del flujo que pasa por la lengüeta. El resultado final, que no damos aquí, implica integrales de superficie sobre una superficie que rodea a las fuentes.

A1.2.6. Experimentación y comparación con el modelo

Con este modelo como referencia, Ricot et al. realizan una serie de medidas para luego cotejarlas con el modelo físico-matemático que acabamos de explicar. Dado lo simplificado del modelado del flujo saliente (se calculaba el potencial de flujo saliente por continuidad con el entrante, eliminando así toda posibilidad de descripción de las turbulencias originadas a la salida de la placa), Ricot et al. realizan sus cálculos teóricos (tanto de presión aerodinámica como acústica) con las expresiones para flujo entrante, y suponen la simetría del sonido producido a la entrada y salida de la lengüeta para comparar esos resultados teóricos con la presión aerodinámica medida corriente arriba y con la presión acústica medida corriente abajo. Aun con estas limitaciones, el modelo reproduce bastante bien las medidas experimentales.

Como ya hemos comentado más arriba, el movimiento de la lengüeta es casi sinusoidal en torno a una posición de equilibrio, que para baja presión de sople podemos tomar como el propio desplazamiento estático. La

presión aerodinámica alcanza un pronunciado pico en el momento en que la lengüeta entra en la ranura de la placa. (Resultados similares fueron obtenidos por [Millot et al. 2001] para la armónica). Como la posición de equilibrio coincide casi con el plano de la placa, la fuerza inducida por esta fuerte variación de presión que acabamos de señalar está en prácticamente en fase con la velocidad de la lengüeta. Así pues, esta fuerza asociada al pico de presión comunica energía al oscilador [Hirschberg et al. 1994, Richards 2003]. Una variación similar de presión, esta vez negativa, ocurre al salir la lengüeta de la rendija, pero de una manera menos violenta, quedando un superávit de energía que explica el mecanismo de oscilación de la lengüeta.

La presión acústica medida en la región de flujo saliente (en campo lejano) tiene poco en común con la presión aerodinámica que acabamos de describir medida en la región de flujo entrante. Ello se debe al complejo mecanismo de conversión de la energía mecánica del fluido en energía acústica. Sólo los picos violentos de la presión aerodinámica quedan luego reflejados en la presión acústica. El espectro armónico es muy rico, predominando los armónicos impares.

A1.2.7. Mejoras al modelo

En el modelo de Ricot es mejorable la modelización de la variación de la abertura [Millot & Baumann 2007]. Cerca de la punta de la lengüeta sería posible un modelado tridimensional. Falta un estudio del mantenimiento o no de la oscilación en el caso de flujos bajos [St. Hilaire et al. 2001]. También sería importante realizar un análisis de la dependencia de la frecuencia con la presión. Tampoco se estudia la influencia de las cámaras de resonancia [Tonon 2005].

A1.3. Influencia de las cámaras de resonancia de las lengüetas

A continuación, se presentan las conclusiones de varias investigaciones sobre el rol desempeñado por las cámaras de resonancia.

A1.3.1. Estudio de Tonon

Hemos visto que el mecanismo de oscilación de la lengüeta y el sonido emitido no depende de la influencia acústica de los volúmenes a la entrada y salida de la válvula por lo que este tipo de válvula oscilante se puede llamar de lengüeta fuerte o dominante [Ricot et al. 2005].

Ello no quiere decir que la influencia de la cámara de resonancia sobre la que se asienta el portalingüetas sea siempre despreciable. Tonon [Tonon 2005] ha estudiado la influencia de estas cámaras en la vibración de las lengüetas suponiendo tres modelos diferentes para estas cámaras, según sean las dimensiones características de estas en comparación con la longitud de onda del sonido emitido por las lengüetas dispuestas sobre ellas.

Se observa que cuando la frecuencia de vibración de una lengüeta se acerca a la frecuencia de resonancia de la cámara, la vibración del aire de la cámara se hace lo suficientemente grande como para influir el mecanismo de autoexcitación. El que esa influencia ayude o estorbe a la emisión del sonido musical resultante depende del modo resonante de la cavidad y de cómo esté montada la lengüeta en relación con la cavidad.

Cuando la longitud de onda del sonido emitido es mucho mayor que las dimensiones características de la cámara de resonancia de la lengüeta correspondiente, esta cámara se puede modelar como un resonador de Helmholtz. La experiencia dice que si el modo de resonancia de la cámara coincide o es algo menor que la fundamental de la lengüeta, la interferencia es fuerte, al menos para cavidades grandes. Esta interferencia desaparece si el modo resonante de la cavidad queda por encima de la fundamental de la lengüeta.

Si la longitud de onda del sonido emitido por la lengüeta (o alguno de los armónicos de esta) es del orden de las dimensiones de la cavidad, esta debe modelarse como un tubo abierto-cerrado. La resonancia del tubo se dará a frecuencias iguales a un cuarto de su longitud (y los armónicos correspondientes). Si esta frecuencia coincide con la de la lengüeta se nos

plantea un conflicto: en resonancia, el aire de la cámara debe vibrar con un nodo de velocidades en el extremo cerrado y con un vientre de velocidades (nodo de presiones) en el extremo abierto. Por el contrario, el mecanismo de generación de las oscilaciones automantenidas de la lengüeta libre requiere el máximo paso posible de flujo, con lo que requiere un vientre de velocidades, justo lo contrario del requerimiento de la cavidad en ese mismo lugar. Así pues, ninguno de los dos sistemas satisface los requerimientos del otro, con lo que es muy probable que la aparición de interferencias en el mecanismo de autoexcitación de la lengüeta.

Todas estas interferencias se presentarán con mayor evidencia cuando el modo fundamental de la cavidad coincida con el modo fundamental de la lengüeta. La interferencia puede incluso ahogar completamente la vibración de la lengüeta. Con armónicos más altos de la lengüeta el acoplo es menor.

Tonon añade que todas estas interferencias pueden eliminarse practicando un pequeño agujero en la cavidad, limando la punta de la lengüeta, retirando las pieles o tiras de plástico de las dos lengüetas dispuestas sobre el mismo portalengüetas que va montado en la cavidad en cuestión, reduciendo la cavidad al mínimo posible (sin que la lengüeta que va montada en la parte interna del portalengüetas llegue a tocar con el suelo de la cámara de resonancia) o montando la lengüeta con la punta cerca del alvéolo o hueco de entrada del aire a la cámara. Efectivamente, los propios artesanos confirman que en las lengüetas más pequeñas, correspondientes a sonidos muy agudos, se suelen quitar las pieles o plásticos de los portalengüetas y las lengüetas se montan efectivamente con la punta cerca del alvéolo (Figura A1.5). Incluso se llega a redondear la entrada a la cámara, para facilitar una correcta circulación del aire, aprendida a base de prueba y error (Figura A1.6) [Alberdi et al. 2005-2007].



Figura A1.5: Detalle de un bloque de lengüetas. Las lengüetas más pequeñas, asociadas a notas más agudas, se han dispuesto con la punta cerca del orificio de entrada a la cámara de resonancia.



Figura A1.6: Detalle de un bloque de lengüetas agudas. Las entradas a las cámaras de resonancia están modificadas para facilitar la entrada del aire.

A1.3.2. Estudio de Plitnik para las lengüetas de órgano

Estudios similares al de Tonon habían sido realizados anteriormente para las lengüetas metálicas de los tubos de órgano [Plitnik 2000]. En este caso el equivalente a las cámaras de resonancia de las lengüetas del acordeón lo constituyen las chalotas de los tubos de órgano. Considerando tres tipos diferentes de chalota (americana, francesa y alemana), cada una con unas características geométricas propias, Plitnik estudia el efecto de la variación del volumen de las mismas (mediante cera) en la frecuencia fundamental y también en el espectro emitido.

Apéndice 2

El conocimiento de algunos lutieres

APÉNDICE 2: EL CONOCIMIENTO DE ALGUNOS LUTIERES

Con el fin de contrastar los conocimientos físico-acústicos y los resultados experimentales, hemos llevado a cabo unas entrevistas con lutieres que reparan acordeones. Cada una de las entrevistas corresponde a un lutier diferente (L1, L2 y L3), realizada por el mismo entrevistador (R). *Las preguntas y comentarios añadidos por el entrevistador R aparecen en cursiva.*

A2.1. PRIMERA ENTREVISTA CON UN LUTIER (L1)

R: *¿Por qué son necesarias dos lengüetas?*

L1: En el caso de un armonio, el reservorio de aire es como una caja que se llena al dar a los pedales, pero aunque estos no se accionen, el órgano sigue sonando. Siempre suena la misma lengüeta, pero en el acordeón la lengüeta contraria no suena.

Carini, un afinador ya jubilado, me contaba que ya se había intentado hacer que una sola lengüeta de acordeón sonara al abrir y cerrar el fuelle, pero que no daba resultado. Esa lengüeta debería estar en medio de la plaqueta con una abertura "no sé muy bien cómo" para que empiece a moverse.

Cuando el aire viene por el lado "contrario" al que le corresponde normalmente la lengüeta se ve alejada del marco (*plaqueta*), no entra dentro de éste y por tanto no suena.

La badana evita que el aire se escape por las rendijas que deja la lengüeta contraria. A las lengüetas pequeñas no se les pone badana porque el aire que escapa es muy poco.

R: *¿Cuál es la influencia del tamaño del alvéolo y del volumen de la cámara interior?*

L1: La "base" (*distancia entre la plaqueta y el alvéolo*) más alta, más gorda, dificulta la emisión de sonido en el caso de lengüetas pequeñas. Cuanto más base, más cuesta sacar el sonido, suena menos.

Sin embargo, si la plaqueta (*pequeña*) se cabeza abajo, aunque sea a distancia grande del alvéolo (*equivalente a tener mucha base*) el sonido sale fácil, no más intenso, sino fácil. Las lengüetas más agudas de algunos acordeones Royal Standard fabricados en la antigua Alemania Oriental, se colocaban así. Los somieres de estos acordeones eran de plástico. Tenían la abertura ancha, un hueco grande.

En los acordeones y trikitixas, las lengüetas agudas siempre las coloco así, "cabeza abajo", (*la punta de la lengüeta cerca del alvéolo, en lugar de la disposición habitual, con la punta lejos del alvéolo*), pues esto favorece la emisión del sonido. Sin embargo, si ponemos la lengüeta, pequeña, de esta manera pero el hueco es muy grande no llega a sonar. El hueco y la posición influyen también en la afinación, para lograr por ejemplo el trémolo buscado, en una posición la lengüeta parece ser excesivamente sensible a la afinación.

En cualquier caso, un hueco adecuado es necesario para que la lengüeta no choque contra las paredes de la cámara.

La forma del alvéolo, la de la entrada (circular o rectangular) no creo que influya mucho. Lo importante es que haya suficiente hueco para vibrar, "para que el rebote sea adecuado".

R: ¿Cuál es la influencia de los materiales de lengüetas y piastrinos?

L1: La lengüeta normalmente es de acero. Importa el temple del acero y la carne (*el grosor de la lengüeta*) de la lengüeta. Las lengüetas muy finas, muy delgadas empiezan muy fácil pero no tienen luego fuerza, no llegan a dar gran intensidad.

La aleación del piastrino también influye. Cuanto más duro sea, se oye como diferente. Los buenos la llevan de duraluminio, o de "avionale". Antes

se hacía de aluminio dulce. También antiguamente se hacía, lo que es la placa, en cinc y también en bronce. Actualmente también los piccolos vienen en bronce, pesan mucho más. Si todas las lengüetas fueran de bronce, el acordeón sonaría más, pero pesaría mucho. Con cinc también pesa más. Hay acordeones diatónicas viejas que vienen en cinc. A veces vienen lengüetas muy antiguas en bronce (*ahora se refiere a la lengüeta, no a la plaqueta*). No es que las lengüetas de bronce suenen más. Son frágiles. Los armonios de iglesia llevaban lengüetas de bronce, pero no se las sometía a cambios tan bruscos como en el caso del acordeón. La forma de las lengüetas de los armonios de iglesia es similar a las del acordeón, con carga o sin carga en las puntas.

L1 muestra unos piastrinos de bronce para los piccolos de un acordeón Jupiter y comenta: Cuanto más dureza tiene el marco, más sonido se produce. No se trata de que el remache ceda, puesto que si el remache cede la lengüeta no suena; se trata del propio marco: el bronce hace que suene más que el aluminio. He tenido de aluminio blando, de duraluminio y de latón. Las de latón suenan más. Las lengüetas pequeñas, suenan más.

R: ¿Cuál es la influencia del grosor de las plaquetas?

L1: Cuando la lengüeta está dentro del canal de la plaqueta, “come” menos aire. Hay plaquetas que son más gruesas por la punta de la lengüeta. Creo que se trata de ese efecto: cuanto más fino sea el portalengüetas, más aire come. Por tanto, en la punta de la lengüeta, que es lo que más se mueve, se corresponde un grosor mayor del portalengüetas.

Por la misma razón (dentro del canal hay menos pérdida de aire), las lengüetas más graves llevan un portalengüetas más grueso.

R: ¿Cuál es la influencia de las maderas utilizadas?

L1: Las maderas de los somieres tienen mucho que decir. Basta con que la madera del medio del somier sea diferente para que el sonido se resienta. Basta probar hundiendo con la uña. Si es blanda el sonido será

menos intenso, pues la madera se lo come. La madera blanda absorbe el sonido; a la hora de expulsar, expulsa menos (*el sonido*).

También importa la cantidad de madera de la "base" (*la distancia entre portalengüetas y alvéolo*). Influye en la salida que tiene. Cuanto menos base, más fácil la emisión (sobre todo en la mano derecha). El efecto es mayor en las lengüetas agudas. En las diatónicas, en que se busca más rapidez de emisión (*L1 no cree que suene más, sino más inmediato, y dice que es algo que varía*), esa base está limitada al mínimo.

R: ¿Qué opina del sistema de lengüetas en placa?

L1: La placa no vibra. Creo que el sistema con placa es mejor. La razón es la siguiente: en los italianos cada lengüeta lleva su propia placa (*portalengüetas*), pero lengüetas y portalengüetas pueden ser iguales, o casi, dentro de un mismo somier (por ejemplo, con doce lengüetas por somier), emitiendo sonidos diferentes gracias a la diferente carga que soportan en la punta. En los rusos, donde todas las lengüetas van en placa, aunque también hay lengüetas cargadas, estas lengüetas son de diferente tamaño a lo largo de una placa. En mi opinión, cada nota necesita su lengüeta (con su tamaño) para vibrar de manera óptima. En los acordeones con sistema de lengüetas en placa, tanto mano derecha como izquierda llevan placa y no portalengüetas.

La placa es de aleación de duraluminio, como el portalengüetas o piastrino. Las lengüetas de acero.

R: ¿Qué diferencias hay entre un acordeón ruso y uno italiano?

L1: Son diferentes en construcción y mecánica. En el ruso todas las lengüetas en placa. La distribución de graves es casi similar a la del italiano (*comprobamos que en el Jupiter ruso va de Mi1 a Mi2, trece lengüetas, mientras que en el Pignini-Sirius italiano son tres lengüetas más... vemos que en el ruso el somier grave termina antes y queda un hueco relleno con unas lengüetas pequeñas*).

Creo que las aleaciones de los aceros son diferentes, lo que influirá en el sonido.

En Italia hay muchas fábricas de lengüetas y los fabricantes de acordeones normalmente se las compran a estas empresas en lugar de fabricarlas ellos mismos. Puede ser que Pignini fabrique sus propias lengüetas para sus acordeones Sirius, pero no lo creo (*aunque dice que quizá para un Sirius sí las haga, pero no lo sabe*). Antiguamente Paolo Soprani fabricaba sus propias lengüetas. Así, hay veces en que un mismo acordeón, en distintas remesas, viene con lengüetas diferentes.

Para las diatónicas prefiero las Antonelli, pues se rompen poco y de sonido están muy bien; sin embargo, las Canione rompen más fácilmente. En las diatónicas con lengüetas "tipo a mano", al menos.

Comprobamos que el Jupiter ruso tiene lengüetas más rectangulares (en lugar de las más afiladas del Sirius), pero L1 dice que también hay casos a la inversa (con base más estrecha y la punta más ancha), que los Borsini también han tenido en su momento esa forma rectangular.

R: ¿Has oído hablar de la armonización de acordeones?

L1: No he oído nada sobre ese tema (aparte de lo del *cassotto*, en que el sonido no sale directamente al exterior, sino que primero sale dentro de una cajita y de ahí al exterior). No sé qué función tendrá el que en el acordeón Sirius que el *cassotto* esté todo arrugado. Alguna función tendrá. Además, se ve que se ha intentado un que esa forma sea irregular, como a golpes.

R: ¿Qué diferencias hay entre abrir y cerrar el fuelle?

L1: El peso de la caja izquierda hace que se abra por sí mismo, lo que igual te ayuda.

A2.2. SEGUNDA ENTREVISTA CON UN LUTIER (L2)

R: *¿Qué afinación se utiliza: temperada u otra?*

L2: Se basa en un afinador electrónico (marca Peterson). Se afina toda una voz, por ejemplo el 8. Después se coge el 8 fuera de cassotto. Se regula la afinación relativa al otro 8 mirando el efecto óptico que da la máquina (giro del disco luminoso implica desafinación). *Explica con detalle cómo afina la primera voz utilizando el afinador.*

La afinación sí es temperada, con el afinador electrónico que utilizo de herramienta se pueden crear diferentes patrones de afinación según se necesite pero lo común es utilizar el "equal temperament". Por tanto no se trata de afinar a quintas justas, a cada intervalo de quinta le corresponde una velocidad de batimento que se puede comprobar en la práctica fácilmente, aunque en la práctica se utiliza la referencia del afinador electrónico, el oído evidentemente imprescindible, avisará de imperfecciones, cuanto de lejos o próximos estamos del resultado perfecto y hará el trabajo mucho más ágil. *Comenta cómo sí ha afinado alguna vez por quintas, evitando trémolos, el resultado es una octava muy cerrada y sólida en afinación pero no se puede ir más allá de una octava porque estás quedan muy desajustadas.*

Hoy en día también he trabajado afinaciones en cuartos de tonos para obras específicas creadas para ello o algún tipo de mesotónicas simulando la afinación de órganos antiguos para tocar música de época.

R: *¿Suena la lengüeta contraria?*

L2: Vibra por simpatía. La piel evita el paso del aire y también evita algo la vibración por simpatía. Pero siempre hay un efecto de vibración por simpatía; poca, pero la hay. Tenemos el remache que sujeta la lengüeta, todo es un bloque común.

Las lengüetas pequeñas no tienen piel, porque el paso de aire es por sí muy pequeño, el ajuste es más preciso y la piel entorpecería el ejercicio del aire (abrir, cerrar).

En afinación, si hay una gran diferencia de afinación entre la pareja de lengüetas de abrir y cerrar puede afectar en un pequeño grado a la altura de la afinación de estas. *(Por un lado dice que existe esa vibración por simpatía que parece influir a la lengüeta contraria, pero por otro matiza que el cambio es casi inapreciable).*

R: ¿Cuál es la influencia del tamaño del alvéolo y del volumen de la cámara interior?

L2: El tamaño de la cámara es obvio que va siempre en relación con el alvéolo. El tamaño de la cámara es el adecuado para una vibración óptima de la lengüeta. Así el paso de aire será el adecuado. Un tamaño demasiado grande o pequeño hará que la lengüeta vibre poco (poca amplitud) o se ahogue. En las lengüetas agudas la cámara es menor y normalmente la entrada está rebajada y en las más agudas están giradas para que el aire incida directamente sobre la punta de la lengüeta.

Posteriormente me muestra una lengüeta sobre un alvéolo de plástico creado para demostraciones; la lengüeta se sopla por un tubo. Es algo similar a los peines que nos hizo a nosotros. Me indica que la cámara es demasiado grande para una vibración óptima de la lengüeta, por lo que ésta vibra mal, la lengüeta no termina de abrir al batir. Además cree que la forma en que llega el aire a la cámara (por un tubo) no es la correcta. Probablemente los tamaños de las cámaras vienen dados por prueba y error, por buscar un compromiso entre el tamaño ideal de cada cámara y por el espacio disponible para todo.

En los nuevos Sirius han modificado el tamaño de la cámara de las lengüetas más graves. Parece ser que con ello la vibración de las lengüetas es menos "ahogada" (admite una presión un poco mayor que la normal sin bajar la frecuencia y sin sonar con exceso de aire). No cree que este nuevo

diseño la entrada se dé antes (de hecho, el que les ha llegado entra más tarde, por el propio reglaje de las lengüetas sobre los portalingüetas).

L2 muestra cómo los alvéolos de las lengüetas más agudas (más pequeñas) tienen las cámaras rellenas, "encogidas", mediante madera en las paredes, para hacer estas cámaras más pequeñas. Además, la entrada a esta cámara "encogida" tiene la entrada graduada, modelada de forma que el encogimiento sea gradual, para que el flujo de aire no se encuentre un escalón contra el que choque y lo perturbe.

R: ¿Por qué se usa ese encogimiento gradual de la cámara y no se usa un alvéolo más pequeño directamente, adecuado al tamaño menor de la cámara (con lo que se evitaría ese escalonamiento brusco caso de no modelar la entrada)?

L2: El sistema longitudinal de registración (unas láminas correderas metálicas) implica que la entrada a las cámaras (los alvéolos) tiene que ser de igual tamaño dentro de un somier. O al menos los alvéolos deben ser iguales o mayores que los agujeros de las láminas correderas de la registración. Así, la registración implica tamaños iguales de entrada a los alvéolos. Pero las cámaras son más pequeñas para las lengüetas más pequeñas, tal y como acabamos de ver. Lo ideal sería que los alvéolos tuvieran diferente tamaño, adecuado a las cámaras que a su vez son óptimas para cada lengüeta (según su tamaño), pero en un sistema longitudinal de registración esto no es posible. Hay otros sistemas, que se están estudiando ahora, en los intenta solventar este problema. *Explica en detalle las relaciones de tamaño entre los huecos de las láminas de registración, los alvéolos y las cámaras de las lengüetas.*

La importancia del tamaño de los alvéolos no reside en el tamaño de los huecos, sino en la presión de aire que se genere ahí (dentro de la cámara). Cuanto menor sea el hueco (la superficie del alvéolo), mayor va a ser la presión.

También he pensado en la mezcla del aire que entra con el aire ya presente. Creo que la influencia del volumen de la cámara es pequeña, pues si al cerrar el aire pasa de la cámara a la lengüeta y al exterior (habitación), al cerrar lo que hacemos es meter el aire de la habitación, que sería una cámara muy grande a la lengüeta y luego a la cámara. Si ese volumen de la cámara previa a la lengüeta fuera tan importante nos encontraríamos con que el sonido cambiaría radicalmente al abrir o al cerrar. He pensado mucho sobre esto y creo que lo importante es la velocidad a la que accede el aire contra la lengüeta. Al mover el fuelle más deprisa el aire llega a mayor velocidad contra la lengüeta, con lo que crea una mayor presión sobre la superficie de la misma. *Pone varios ejemplos en los que una hipotética cámara muy grande dificultara la vibración de la lengüeta, no por el tamaño en sí de la cámara sino por la dificultad de hacer presión y de hacer que el aire circule con la velocidad necesaria para hacer vibrar la lengüeta.*

R: ¿Sonaría una lengüeta sin cámara?

L2: Sí, sonaría. Una lengüeta sobre su portalengüetas y sin cámara, puesta directamente en los labios, sí vibra, porque al aire no le queda otra salida (si sellamos bien los labios) que pasar por la lengüeta. *(En este caso quizá habría que considerar la cavidad bucal como cámara).*

Volvemos a comentar el razonamiento de antes: si al entrar el aire en el fuelle el aire sigue el camino alvéolo-cámara-portalengüetas-lengüeta y la cámara es tan importante, en el caso contrario, al salir el aire, el camino sería el inverso, la cámara de salida no existiría (si acaso toda la cámara interior del acordeón, pero en el caso del artilugio que nos construyó ni siquiera eso, puesto que al soplar la cámara exterior no existe). Cree que las cavidades no son tan importantes, sino cómo el aire pasa por ellas, aunque admite que es posible que esas cavidades influyan en cómo pasa el aire.

Me hace ver cómo si la lámina corredera de la registración está medio tapando la salida de los alvéolos, el efecto sería similar a la del pitch bending, con lo que el bending tiene su explicación en el comportamiento del flujo de

aire. Comenta cómo el aire se ve impedido en su paso, bien por el cierre parcial del botón (válvula o zapata), bien por las láminas de la registración colocadas tapando parcialmente los alvéolos.

R: *¿Cuál es la influencia de los materiales de lengüetas y piastrinos?*

L2: Cuanto más duro sea el acero, la fuerza que ejerce la lengüeta contra la fuerza del aire será mayor (mayor elasticidad y fuerza para volver al punto de reposo) y facilita una vibración más precisa en frecuencias a diferentes presiones y sonido más brillante.

R: *¿Cuál es la influencia del grosor de las plaquetas? ¿Qué ocurriría en el caso de una plaqueta de espesor nulo?*

L2: He pensado mucho sobre las dimensiones de la propia lengüeta (*menciona varios parámetros*), pero no sobre el grosor del piastrino, quizá porque viene dado de fábrica. Me doy cuenta de que su grosor va en relación con el tamaño de la lengüeta. Creo que este grosor irá relacionado con la absorción de las vibraciones por el portalingüetas.

R: Me pregunta hasta qué punto considero la estrechez de ese marco. Le pongo el caso de un portalingüetas de espesor casi nulo.

Las funciones principales del marco porta-lengüetas son servir de soporte sólido para la lengüeta sin restar capacidad de vibración a esta y la obturación del paso del aire cuando este incide sobre el acero de la lengüeta. Si ponemos un soporte (marco) tan fino no sería un punto de sujeción fiable y la incidencia del aire sobre la lengüeta en el momento de la obturación (que creo que es donde más incide y más importante es) sería demasiado poco. No puede funcionar bien.

Le hago ver que parece ser que el grosor del marco tiene su influencia en el sostenimiento de las vibraciones. Comenta su visión del proceso físico de vibración. Al acercarse la lengüeta al marco (debido a la presión ejercida sobre una de sus caras por el aire), ésta obtura el agujero sobre el marco y obliga a la lengüeta a moverse hacia dentro del marco. Pero si el grosor de

éste es muy pequeño enseguida pasa al otro lado y la presión sobre la cara de la disminuirá y ganará el efecto de la elasticidad de la lengüeta y el ciclo volvería a repetirse. Pero como el grosor es pequeño este paso al otro lado y posterior vuelta ocurriría con mayor "rapidez", de forma que la amplitud de vibración es pequeña y la sonoridad final también. *En el caso de un grosor mínimo del portalingüetas (supuesta posible su construcción), cree que se produciría sonido pero muy muy débil, un simple "impulso".*

R: ¿Cuál es la diferencia entre lengüetas en placa o sobre piastrinos?

L2: Sabemos que el sonido es diferente en ambos casos, luego sí influye el sistema de placas. En las voces graves la calidad del sonido no viene aparentemente afectada por el tipo de sistema como lo es en las voces medias o agudas. En estos casos nuestro oído detecta que el sonido es más metálico. Tiene un brillo más metálico. Es como si se reflejara más el sonido, como si se absorbiera menos por la madera. La influencia puede deducirse sin más que observar que en caso de lengüetas sobre portalingüetas entre una y otra de éstas hay un trozo de madera (del somier) con cera (de pegar los piastrinos sobre los somieres), madera que absorberá las vibraciones de diferente manera que el metal). Este efecto no se nota tanto en los graves. *Sin embargo en el Sirius las voces más graves van en placa. Me dice que la respuesta es mejor (calidad tímbrica pero sobre todo la respuesta sonora en pianos): no obstante cree que la razón no está solamente en la propia placa, sino por la forma diferente de las lengüetas (menos trapezoidal) y el preciso corte de las placas por electroerosión creando un ajuste realmente preciso entre estas y las lengüetas, las fuga de aire en el momento de la obturación en la vibración es mínima.*

R: ¿Por qué entonces no se ponen todas las lengüetas en placa?

L2: La razón estriba en una cuestión de gustos y tipos de construcción: el sonido más metálico producido no es del gusto del fabricante.

En los Mythos, toda la lengüetería va en placa (*Remarca que son voces rusas, no italianas, aunque menciona que Artigiana sí construye voces en placa para la zona grave de la tesitura, en manual izquierdo*). También en el Bando de Pignini (modelo de bandoneón) (*En este caso voces rusas o voces checas*).

En cualquier caso el sonido tan resonante del bandoneón se debe a la forma de la caja (*le comento el caso del Peter Pan –que me confirma que tiene lengüetas de calidad mínima- y del C3, dos modelos pequeños de Pignini, que presentan una muy buena resonancia en su manual izquierdo*). En el Peter Pan, como en el Bando, las voces van directamente encoladas sobre la tabla de armonía. De esta manera la vibración va directamente a la tabla de armonía, todo un bloque (hecho que no se da en el resto de modelos, que tienen somieres y registración entre estos y la tabla armónica, que no van tan fijados al resto del acordeón y hacen que se pierda vibración). *Esta disposición parece ser a la que se refería L1 al hablar de ciertos acordeones diatónicos (me lo confirma L2)*.

R: ¿Cómo influyen las tablas de armonía?

L2: La tabla de armonía de la derecha suele ser de metal y la de la izquierda de madera (aunque tiene una parte metálica para acoger la registración). Una razón es que para sujetar las láminas de registración de la derecha hace falta que la tabla de armonía tenga al menos un fondo y un contrafondo de metal, o incluso toda la placa de metal (*aluminio en el caso que tenemos delante, una lámina de unos dos milímetros*), que le den solidez. Sin embargo, en la izquierda esto no es necesario. En la izquierda la tabla es de madera con fondo y contrafondo metálicos (de aluminio) para sujetar la registración. Al final la elección de metal para toda la tabla de armonía de la derecha parece ser una cuestión de comodidad en algún proceso de fabricación y estabilidad del material a los cambios que se vayan a dar en la vida de un instrumento. *Miramos varios acordeones para ver si las tablas de cada mano son siempre de esta manera, metálica la derecha y metálica más madera la izquierda. Los que vemos son así*.

Con las lengüetas sobre la tabla de armonía se necesitaría muchísimo espacio para disponer todas las lengüetas de un acordeón. Los somieres ahorran espacio (mismo volumen pero mucha mayor superficie).

R: *¿Por qué se ahoga una lengüeta cuando se tensa mucho el fuelle?*

L2: La razón es que la presión es mucho mayor que la fuerza, elasticidad del acero, impidiéndose la oscilación.

R: *¿Es más fácil el pitch bending cuando se cierra el fuelle que cuando se abre?*

L2: Cree que es una pregunta más para intérpretes. Le explico mi punto de vista, cómo levantando el fuelle al cerrarlo, el bending se controla más fácilmente. La manera de cerrar o abrir puede ayudar a sentir más fácil el movimiento. Puesto el acordeón sobre una mesa implicaría una igualdad entre la facilidad al abrir y al cerrar. Opina que es muy difícil ver cuándo es más fácil, salvo que se accione el fuelle con un brazo hidráulico. Habría que tener claro si se hace la misma fuerza al abrir que al cerrar (los pesos y la fuerza de gravedad puede estar influyéndonos), y que la lengüeta fuera la misma, igualmente reglada.

R: *¿Y es más fácil el ahogo cerrando?*

L2: Como en el caso del bending, la facilidad debería ser la misma. Y si hay alguna diferencia es porque la forma de tocar lo hace más fácil. Se remite a todo lo hablado anteriormente sobre paso del aire, cavidades...

R: *¿Por qué suena más el registro de 8 pies del acordeón de doble bajo que el de no doble bajo?*

L2: Habría que ver cada caso porque hay diferentes configuraciones de Sirius pero la diferencia básicamente está en la registración que sí se coloca en la primera octava en un no doble bajo y que no se coloca en un doble bajo. Al no haber registración ni "puertas que cerrar" podemos hacer el "marco" de estás (alveolos) casi del tamaño que queramos (que la lengüeta necesite). La

pega será que el piccolo (2') en esa primera octava (en realidad del Mi al Fa#) nunca sonara suelto porque no podremos cerrar el 8'.

R: ¿Qué Importancia tienen las pieles?

L2: La piel debe en primer lugar realizar su función: obturar el paso del aire por la lengüeta "contraria".

Una piel verdadera (de cabra o vaca...) tiene una mejor capacidad de sellado que una plástica por la pelusa de su parte interior y una buena flexibilidad. La correcta flexibilidad y el material natural hacen que se adapte mejor a los bordes del agujero sobre el piastrino. Las pieles de plástico fino tienen la ventaja de que el clima y el paso del tiempo les afectan mucho menos y que en los tamaños correspondientes a las lengüetas medias o agudas tienen una respuesta muy precisa. Pero estas pieles de plástico sólo se usan en tesituras medias. En más graves, se dice que la respuesta del plástico no es tan buena, el sonido pierde calidez (*se refiere a que lo que va a comentar a continuación: se pierde menos aire, el sonido es más limpio*) y, sobre todo, el ajuste al agujero del piastrino es menor que en el caso de las pieles sintéticas. (*Ver lo que dice L3*).

R: Armonización del acordeón

L2: Terminología que inventa la gente para dar cierto pedigrí a sus trabajos. El resultado bueno de una afinación realizada es sólo uno, cuando la altura de las notas están donde deben estar. Sí entiendo que para llegar a ese resultado hay metodologías varias y diferentes.

R: ¿De qué tipo son las maderas utilizadas?

L2: Podemos ver que por ejemplo un somier puede tener 6 maderas diferentes en su construcción. La madera central que separa las dos cámaras (más oscura) es más con el objetivo de escupir el sonido y absorberlo lo menos posible. (*coincide básicamente con L1 y L3*). En acordeones de construcción básica, verás maderas de peor calidad que sólo

buscan la fiabilidad y estabilidad de estas al paso de los años (un valor importante para el buen funcionamiento de todos los mecanismos que irán sobre ellas), mientras que en acordeones de alta calidad se buscará un compromiso entre los anterior, el peso y la calidad sonora que éstas nos aportan.

R: ¿Cuáles crees que son las mejoras que se podrían introducir en el instrumento?

L2: Quitar material de todas partes quitando voces, mecanismos... El problema del acordeón es que se quiere todo en poco espacio: voces, tesitura, timbre, volumen sonoro... Hay que tener en cuenta que el acordeón ya está definido. Cambiarlo de forma tan radical sería realizar otro instrumento. Los ingenieros van aportando pequeños cambios. No podemos pretender que tenga la resonancia de un oboe (menor, más especializado...).

Por otra parte, hace ya tiempo que los constructores han demostrado cuánto puede hacer un acordeón, la cantidad de prestaciones musicales que podemos incluir en tan reducido tamaño pero ahora es el momento de sacrificar parte de estas para lograr el mejor sonido y proyección posibles. Creo que en poco tiempo veremos la creación de diferentes instrumentos en función de las exigencias sonoras de un intérprete.

A2.3. TERCERA ENTREVISTA CON UN LUTIER (L3)

R: *¿Cuál es la influencia del tamaño del alvéolo y del volumen de la cámara interior?*

L3: Si pusiéramos la misma plaqueta y lengüeta sobre una cámara mucho más grande, lo primero que notaríamos sería que el acordeón consumiría una cantidad de aire muy grande (R: *¿A pesar de que la apertura de la plaqueta y la lengüeta sean las mismas? Y cuando el aire viene en sentido inverso?*). Esto se notaría sobre todo al tocar acordes (más consumo de aire).

Dependiendo del tamaño de cada lengüeta y de si tiene mucha elasticidad o tiene un contrapeso (lengüeta cargada) se le hace un rebaje en el fondo para que la punta no toque el fondo de la cámara.

Por tradición o porque funciona en la práctica, se ajusta el tamaño de la cámara al tamaño de la lengüeta.

No estoy seguro de que por hacer una cámara más grande la sonoridad de la lengüeta fuera mayor. Para la sonoridad lo importante es la cantidad de aire que llega a la lengüeta. Si entra un exceso de aire ("con respecto a lo que la lengüeta puede aguantar") pueden ocurrir dos cosas: un primer efecto es que la lengüeta puede bloquearse, por el exceso de presión (*similar a lo que comentaba L2*) sobre la lengüeta. Y un segundo efecto es que la badana (*opuesta*) no aguante y llegue a vibrar por el centro.

Los pasos de aire de una lengüeta (más la plaqueta) alemana, una rusa y una italiana son diferentes. La lengüeta alemana es de aleación muy dura pero muy elástica y para conseguir la misma nota con un tamaño más o menos parecido tiene que ser más cuadrada y con menos material. La italiana es más blanda, tiene menos elasticidad, y para conseguir la misma nota con el mismo tamaño tiene más material, más grosor y la forma es de punta de lanza. La lengüeta alemana, más elástica, necesitará más espacio interior, para no chocar con el fondo de la cámara.

En relación con esto, en la disposición habitual de los somieres, cada uno de éstos lleva dos portalengüetas, que serán de tamaños diferentes (*puesto que el portalengüetas de cada lado va asociado a un registro diferente*), con lo que las cámaras respectivas deberán ser diferentes. Es decir, el somier se divide por su parte central en dos partes diferentes, para adecuar las cámaras resultantes al tamaño de las lengüetas de cada lado. Esta división en dos partes diferentes se consigue con un tabique central de madera de un grosor que va aumentando de un extremo a otro del somier. De esta manera el flujo de aire que llega al somier se divide en dos partes, una para cada cámara (*suponiendo que se abrieran las válvulas correspondientes a los dos portalengüetas opuestos sobre un somier, lo que corresponde a una nota sonando con un registro de dos voces*) a cada cámara le llega un flujo de aire diferente (sic), y con diferente fuerza a cada portalengüetas (sic). (*Parece tener que ver con lo que dice L2 sobre flujos diferentes a cada lengüeta en función del volumen de la cámara...*).

Siguiendo con los tipos de lengüetas (alemanas, italianas y rusas), en el caso de un acordeón ruso con lengüetas en placa única (remachadas directamente sobre la placa, sin ningún tipo de portalengüetas), los separadores de madera de las cámaras acústicas de los somieres son más estrechos que los correspondientes a un somier italiano (con portalengüetas independientes fijados con cera sobre el somier). En las italianas son más anchos, no para lograr una mayor sonoridad (*R- supongo que apunta esto en relación con la pregunta inicial sobre si una mayor cámara implica una mayor sonoridad*), sino para que puedan luego colocarse las lengüetas, para que haya una separación entre una y otra (el portalengüetas ocupa un espacio adicional que no es necesario en el somier ruso). Además de todo esto, en el caso de un soporte ruso, al tratarse de una placa única, es necesario colocar una tira de piel entre la placa metálica y el somier de madera, para que cuando se coloque la placa el aire no pase de una cámara a otra (*al tratarse de una placa única en lugar de diferentes portalengüetas pegados con cera sobre el somier, cualquier irregularidad de la placa dejaría un hueco entre la*

misma y el somier, por donde se fugaría el aire). Y el separador de madera es más estrecho que el de un acordeón italiano.

Continuando con la forma de las lengüetas, la lengüeta italiana es en forma de forma de lanza, y las rusas y alemanas más rectangulares. Probablemente estas formas estén relacionadas con el tipo de material, con su dureza, con vistas a lograr una elasticidad adecuada para el material empleado. Por ejemplo, la forma punta de lanza deja vibrar más fácilmente la parte de la punta, logrando una mayor elasticidad para las condiciones que de por sí tiene (recordemos que estas lengüetas italianas son más blandas –menos elásticas–, por lo que en principio necesitan más material, más grosor, para conseguir la misma nota que una más dura; un rebaje de material en la punta –logrado con esa forma en punta de lanza– hará que la elasticidad aumente). Hay que conseguir el espesor justo para que a un máximo de presión de aire la lengüeta tenga el brillo requerido y no se rompa con facilidad.

La forma de los alvéolos es circular (y no rectangular) en los acordeones alemanes. Este tipo de alvéolos se daba antes en la mayoría de los acordeones; hoy sólo en aquellos somieres que son de una voz, que no llevan láminas correderas de registración (pues éstas necesitan unas aperturas rectangulares, como las de las propias láminas).

Sobre las cuñas que se introducen dentro de algunas cámaras para reducir el tamaño de las mismas, cree que será un método posterior a la construcción de los somieres (pues lo normal es hacer las cámaras ajustadas al tamaño de la plaqueta, desde el principio).

En el caso de los piccolos, a veces él suele hacer un agujero en la madera del somier para que el aire escape y la presión sobre la lengüeta no sea excesiva y pueda ahogarse.

R: ¿De qué materiales están hechas las lengüetas?

L3: No se sabe si las casas comerciales no dicen los materiales de las aleaciones por razones de competitividad o porque realmente trabajan por tradición, ignorando la composición exacta. En algunos bandoneones antiguos se utilizaban aleaciones que lograban un sonido muy bueno. Se pueden analizar y copiar, pero no les sale rentable a las fábricas de acordeones.

R: ¿Qué tipo de madera se utiliza?

L3: Sí se sabe qué maderas van mejor para según qué tipo de lengüeta, pero nadie te dice qué exactamente o por qué (*cita el cedro*). Incluso la dirección de las vetas de la madera de las cámaras del somier, en sentido transversal a la dirección del aire, influye en el paso del aire (*no explica por qué*). La parte de la base del somier (donde los alvéolos) debe ser más dura para que no se deforme y no se pierda la "hermeticidad" (por efecto de la humedad, paso del tiempo...). En cuanto al resto del material del somier se suelen emplear hasta tres tipos de madera: una para la "alma" central, cuyo espesor varía, aumentando hacia las cámaras de las lengüetas agudas, para que el paso del aire sea menor (*para que estas cámaras sean menores*); luego está la madera de los separadores y por último la de la tapa superior (que a veces coincide con la madera de los separadores y otras veces no, no sabe si por razones más comerciales que acústicas, o qué).

R: ¿Cómo influyen las tablas de armonía?

L3: La derecha es metálica (necesidad de la colocación de las láminas correderas de la registración... *aunque nuevamente ver lo que él también dice sobre la tabla izquierda*) y la de la izquierda de madera (aunque con tapa y fondo metálicos para sujetar también las láminas de registración), probablemente para conseguir un sonido más "redondeado" en los graves. (*Coincide con lo expresado por L2 en su entrevista*). Habla de "anonización" del metal de la tabla metálica de la derecha, para "eliminar partículas".

R: *¿Cuál es la influencia del grosor de las plaquetas? ¿Qué ocurriría en el caso de una plaqueta de espesor nulo?*

L3: Si rebajamos el grosor de una plaqueta (las demás condiciones iguales) la lengüeta tendría menos resonancia, puesto que la lengüeta tendría menos recorrido en el interior (de la plaqueta) y generaría la onda de forma diferente. Las plaquetas más delgadas se usan con agudos, "cuya elasticidad es menor"... Juega un papel muy importante. Con las voces "a mano" el piastrino suele ser más grueso, parece ser que porque la lengüeta, una vez que está dentro, vibrando, va a canalizar mejor las ondas, la resonancia. Las lengüetas hechas "a mano" están trabajadas para que tengan más elasticidad y se ajusten también mejor a la forma de la ventana de la plaqueta.

Habla un poco de los "high piccolo", patentado por un técnico holandés, los piccolos cuyas plaquetas están abocinadas en la punta. Sabe lo que viene en Internet, que es un técnico que se va a jubilar y quiere vender la patente. Los fabricantes italianos no parecen haber mostrado mucho interés. Hasta ahora, lo que ha hecho es recibir acordeones y modificar los agudos.

R: *¿Qué importancia tienen las pieles?*

L3: Tienen más importancia de la que pensamos.

Badanas de plástico: van con las lengüetas que producen sonidos medio-altos. Vemos que la badana contraria a la lengüeta que suena (*en el caso de ser de plástico*) va a ensuciar el ruido (*me pone el ejemplo sonoro*), porque choca contra la plaqueta (tiene un poco de vibración). Como ventaja, ofrecen menos resistencia al paso de aire desde la lengüeta que funciona: si fuera muy dura o resistente podría llegar a estorbar el paso del aire reduciendo la frecuencia y la sonoridad y la brillantez. Para los medios-agudos, estas lengüetas de plástico son óptimas, porque si bien no se pegan tan ajustadamente a la plaqueta, no presentan este efecto de obturación que acabamos de describir, a la vez que el ruido es mínimo. En los graves meterían mucho ruido y con el tiempo se abrirían más fácilmente. El tiempo

atmosférico sí les influye (*contrastar con L2, aunque quizá el efecto al que se refiere L3 es una consecuencia secundaria más que un efecto directo del tiempo atmosférico*): por ejemplo, pequeñas gotitas de agua hacen que el plástico se quede pegado al aluminio.

Badanas de piel: el ajuste es mejor y no se da este ruido. Cualquier deficiencia en la piel que haga que esta piel se abra influirá en el sonido (pone los ejemplos de pieles normal, abierta y combada, en este último caso se oye el típico ronquido).

Pone varios ejemplos de sonidos de lengüetas con badanas de piel, de plástico y mixtas, mostrando sus posibles defectos.

La lengüeta contraria no vibra por simpatía (*contrastar con L2*). Precisamente es la función de las badanas evitar que vibre la lengüeta opuesta.

R: ¿Cuál es la diferencia entre lengüetas en placa o sobre piastrinos?

L3: La placa facilita sobre todo el paso del aire en los graves por la distribución de los separadores, las cavidades de resonancia pueden ser mayores. El ajuste de la placa sobre el somier debe ser perfecto (recordar lo hablado antes sobre esa piel intermedia). La brillantez es mayor. Las lengüetas se suelen tallar con mayor cuidado para un perfecto ajuste sobre la ventana (realizadas ahora en la placa, no sobre un piastrino). El sonido es más brillante y consistente (*aparentemente, diferente opinión que L2*). Se consigue mayor sonoridad (lo expresa al preguntarle sobre las posibles futuras mejoras al instrumento)

R: ¿Cuáles crees que son las mejoras que se podrían introducir en el instrumento?

L3: La línea a seguir sería conseguir una mayor sonoridad. Dentro de una orquesta el acordeón queda apagado. Pero habría que quitar cosas de

dentro: menos voces, menos tesitura... este menor peso permitiría emplear luego otras maderas más pesadas pero que den mayor resonancia (tanto del somier como del interior de la caja).

No está claro (antes se pensaba que sí) que una caja de resonancia más grande conduzca siempre a una mayor sonoridad: se han conseguido resonancias grandes con cajas pequeñas.

Habría que llegar a una estandarización con menos notas y materiales, y a partir de ahí pensar qué materiales y formas usar. *Cita el ejemplo del bandoneón, que consigue un sonido más intenso, bonito, cálido...*

Apéndice 3

Los ataques sobre la melódica

APÉNDICE 3: LOS ATAQUES SOBRE LA MELÓDICA

Con el fin de verificar si las relaciones que hemos visto entre ataques duros y ataques blandos son algo particular del acordeón (de las lengüetas de acordeón) o se cumplen también para otros instrumentos de lengüeta libre, hemos llevado a cabo unos experimentos similares sobre una melódica.

A3.1. Presentación de la melódica

La melódica es un instrumento de viento de lengüetas libres, pequeño, ligero y portable. En su forma actual la melódica fue inventada por Höhner en los años 50 del pasado siglo XX. Presenta un teclado en la parte superior, el cual produce sonido solo cuando además de pulsar una tecla del mismo se sopla a través de una boquilla situada en un extremo del instrumento.

Al presionar una tecla se abre un orificio por el que el aire soplado puede circular a través de una pequeña cámara de resonancia y atravesar una lengüeta libre colocada sobre la misma. Su teclado suele constar de dos o tres octavas. Las lengüetas de la melódica se remachan todas ellas sobre una placa metálica común y únicamente por un lado de dicha placa.

Tanto lengüetas como placa suelen estar hechas de latón, para minimizar el efecto de la humedad provocada por el aire soplado por el intérprete [Alberdi & Orobengoa 2015]. La melódica ha tenido una cierta relevancia como instrumento utilizado en la educación musical infantil.

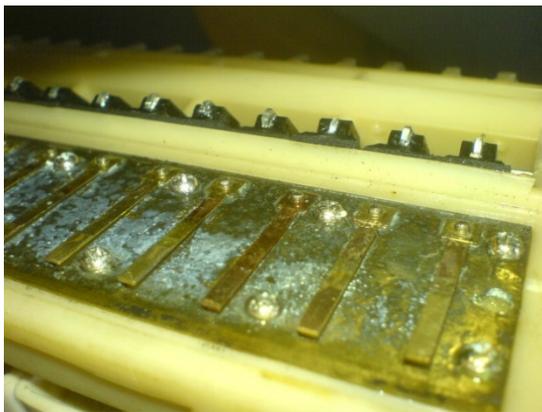


Figura A3.11: Vista de las lengüetas de la melódica remachadas sobre una placa común..

En los últimos años, y especialmente en Francia, ha resurgido un instrumento similar a la melódica conocido como *accordina*. A primera vista, la *accordina* viene a ser una melódica en el que el teclado tipo *piano* es sustituido por una botonera de tres filas de botones ordenados cromáticamente, similarmente a las tres primeras filas del manual derecho de un acordeón de botones y cromático. El instrumento fue inventado por André Borel en los años 30 del pasado siglo XX [Accordinas Marcel Dreux 2015] y perfeccionado a partir de los años 70 por varios fabricantes franceses. Las actuales accordinas de calidad utilizan el mismo tipo de lengüetas que un acordeón de concierto alto de gama y van colocadas sobre plaquetas individuales [Alberdi & Orobengoa 2015]. Existen también accordinas con teclado tipo *piano*. En este caso el instrumento se denomina *clavietta*. La *accordina* ha sido utilizada muy especialmente en música de jazz y canción francesa, aunque también en otros ámbitos como la música contemporánea o la música de cine, entre otros.

A3.2. Montaje experimental

Se ha utilizado una melódica Melodihorn Samick A-32. Se ha procedido a medir ataques duros y blandos, en dinámica *mezzo forte*, sobre la nota A4 de una melódica. Cada nota ha sido tocada al menos 15 veces para cada tipo de ataque. Tanto el control de la dinámica, la grabación y la posición relativa melódica-micro han sido controlados e implementados

con iguales instrumentos y condiciones que en el caso de las medidas llevadas a cabo sobre el acordeón. Igualmente, los espectros FFT se han tomado para 6400 frecuencias comprendidas entre 20 Hz y 20 kHz, esto es, hay una imprecisión de 3.13 Hz en la medida de la frecuencia. La duración de cada grabación ha sido de 2000 ms y la precisión en la medida del tiempo ha sido de 10 ms.

Para ejecutar un ataque duro en la melódica, se impide primero el paso de aire entre la boca del intérprete y la boquilla del instrumento bien cerrando los labios sobre la boquilla o colocando la punta de la lengua para que el aire no pase. Después se crea una presión en el tracto vocal. Por último, desbloquea súbitamente el paso del aire y este entra de repente en el instrumento.

Para llevar a cabo un ataque blando se deja abierto desde un principio el paso entre boca y boquilla. Se sopla entonces dentro de la boquilla.

A3.3. Tiempo de ataque

La Tabla 5.4 muestra el tiempo de ataque (T) del primer armónico de las notas estudiadas.

		Dinámica <i>mezzo forte</i>	
Nota	Frecuencia	Ataque blando	Ataque duro
	$f(Hz)$	$T(ms)$	$T(ms)$
A3	225.0	260	70
A4	437.5	180	60

Tabla A3.1: Valores de la frecuencia f y del tiempo de ataque T para el primer armónico de todas las notas estudiadas. Error máximo en la frecuencia 10 Hz. Error máximo en el tiempo 10 ms.

Los valores de los ataques duros son equivalentes a los de la misma nota del acordeón. En el caso de los ataques blandos son más cortos en la melódica que en el acordeón. Además de que se trata de diferentes lengüetas, hay que tener en cuenta la dificultad de mantener y controlar el soplo en el caso de la melódica, lo que limita la lentitud de ejecución de los ataques blandos en este instrumento.

Análogamente a lo mostrado para el acordeón en las Figuras 4.12 y 4.13, podemos analizar también, en el caso de la melódica, el comienzo y final de los primeros armónicos en cada uno de estos dos tipos de ataque sobre las notas A3 y A4 de la melódica. La Figura A3.1 y la Figura A3.2 muestran los comienzos y finales de las notas A3 y A4, respectivamente, tanto para ataques blandos como duros, con dinámica *mezzo forte*.

Tal y como ocurría en el caso del acordeón, los ataques duros y *mezzo forte* en la melódica son también más cortos que los correspondientes ataques blandos. También aquí los armónicos comienzan casi simultáneamente. En los ataques blandos acaban en instantes diferentes, mientras que los ataques duros empiezan y acaban casi simultáneamente (además, como hemos dicho, de durar menos).

Las Figuras A3.3 y A3.4, ilustran la velocidad de crecimiento del nivel de presión sonora. Al igual que en el caso del acordeón, los ataques blandos muestran una velocidad más alta de cambio del nivel de presión sonora durante el primer cuarto del tiempo de ataque de cada armónico. Para el resto del ataque, esta velocidad es muy baja. En cambio, para los ataques duros, esta velocidad de cambio está más equilibrada durante todo el ataque.

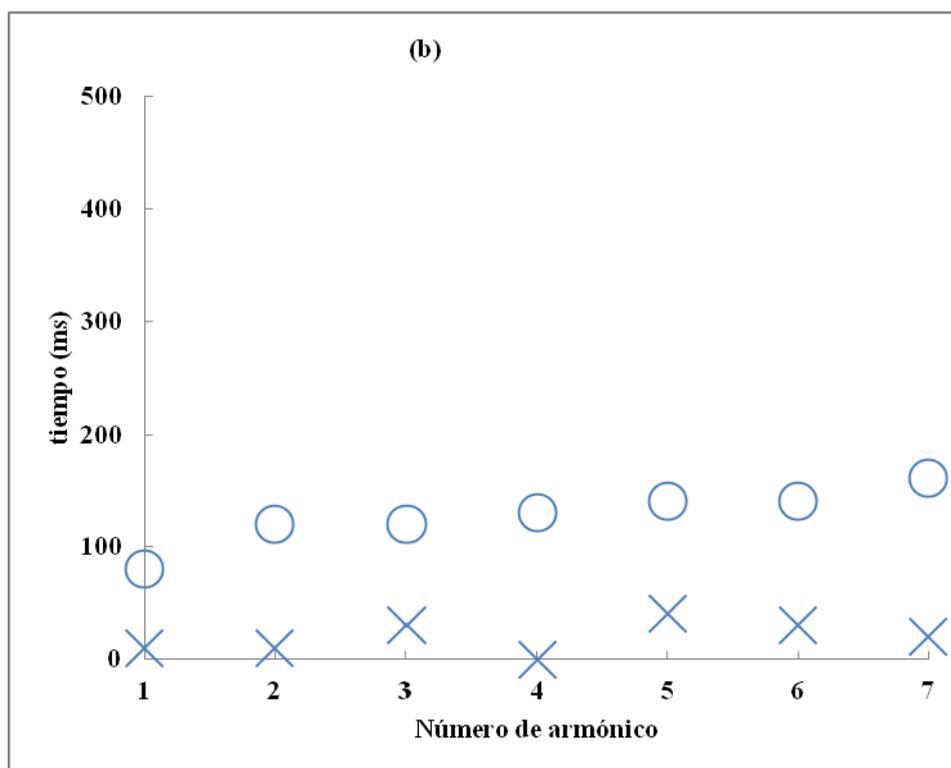
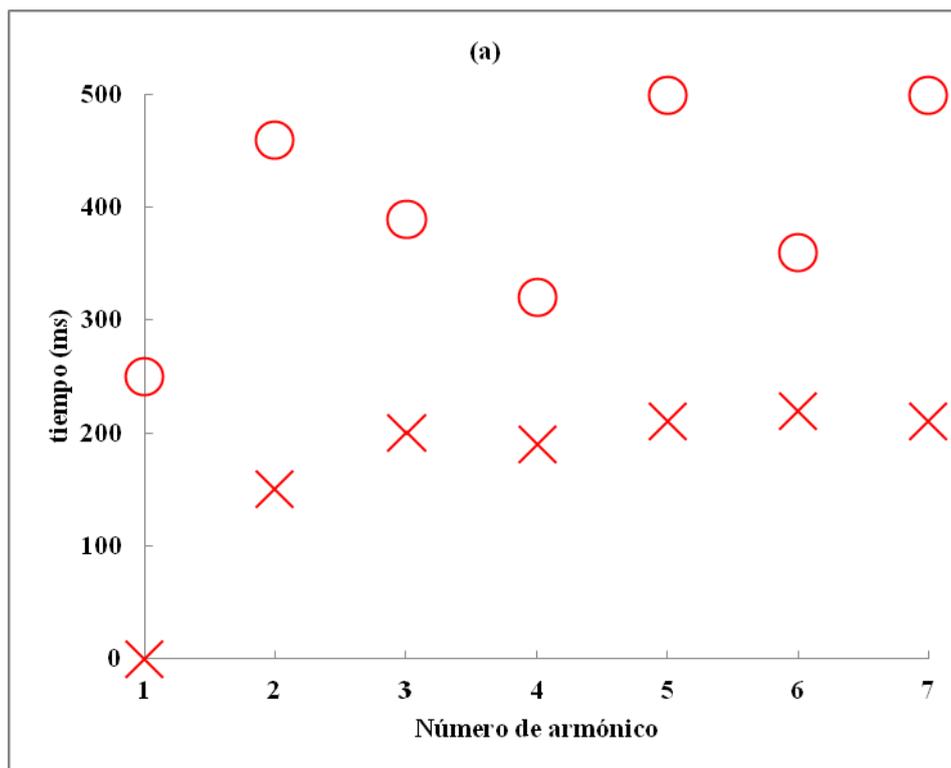


Figura A3.1: Tiempos de comienzo (x) y de final (o) de los (a) ataques blandos y (b) ataques duros sobre la nota A3 de la melódica en dinámica mezzo forte.

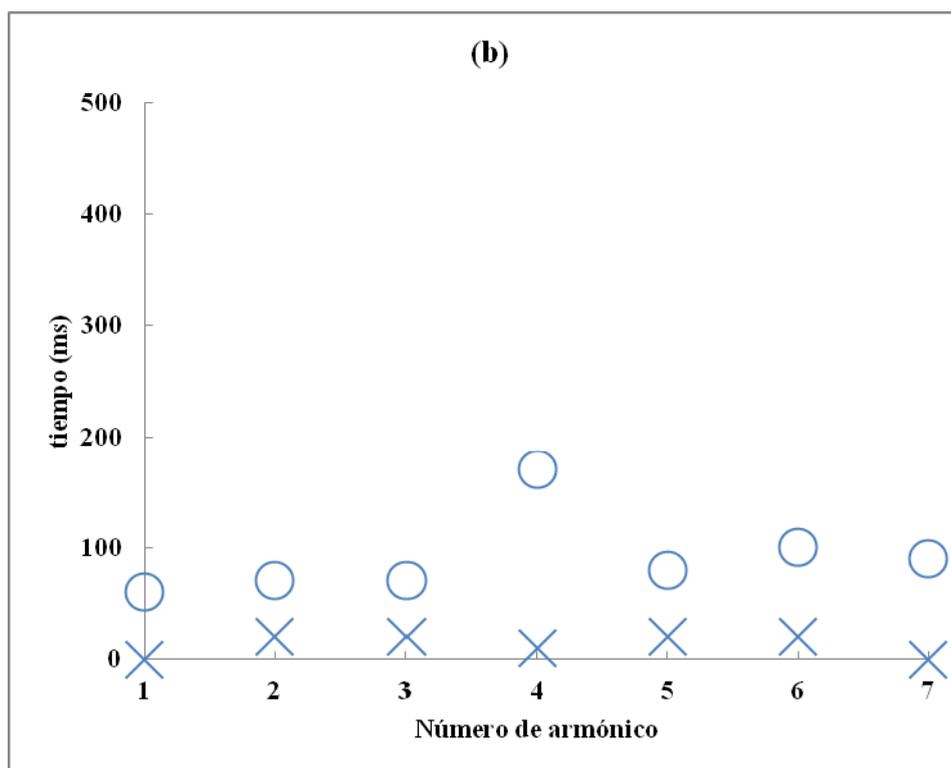
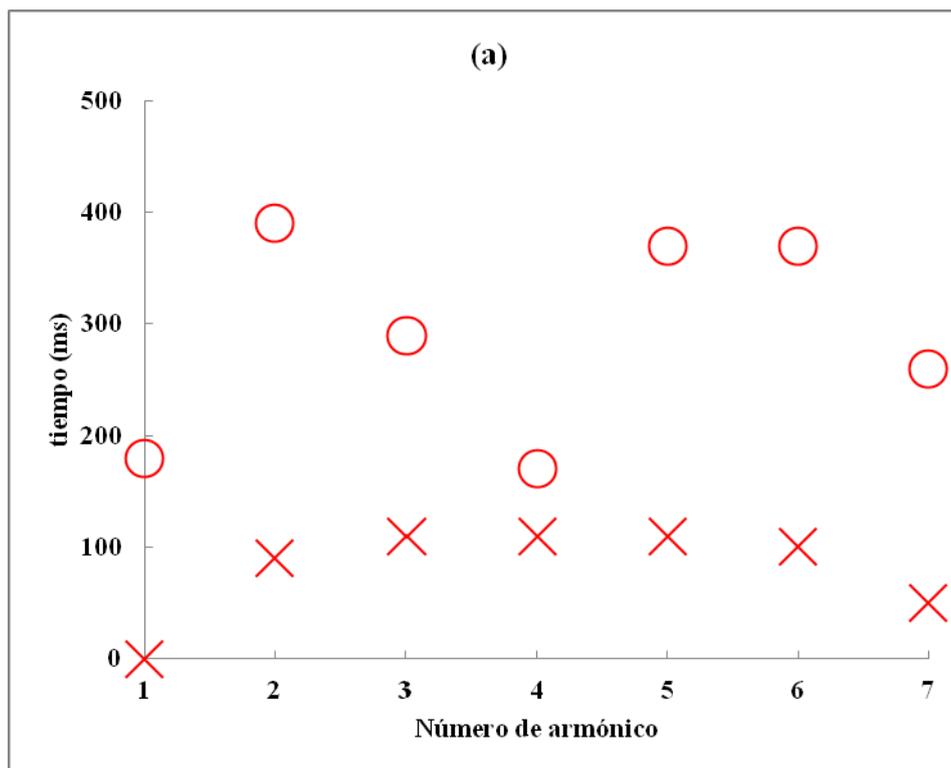


Figura A3.2: Tiempos de comienzo (x) y de final (o) de los (a) ataques blandos y (b) ataques duros sobre la nota A4 de la melódica en dinámica mezzo forte.

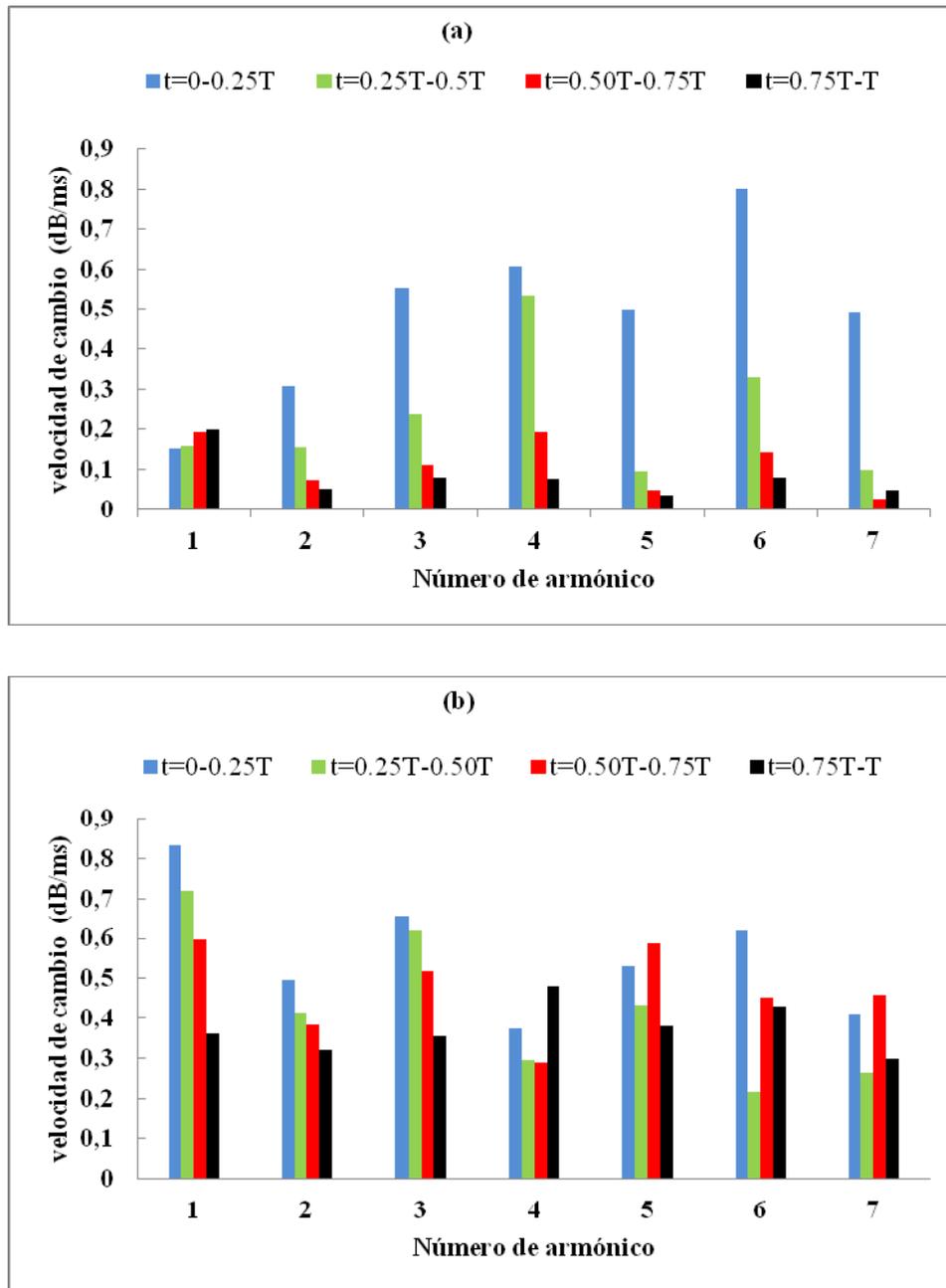


Figura A3.3: Velocidad de cambio de la magnitud de la presión (en dB/ms) de los siete primeros armónicos de la nota A3 de la melódica, atacada en mezzo forte, en cada uno de los cuatro segmentos del tiempo de ataque T .

(a) ataque blando y (b) ataque duro.

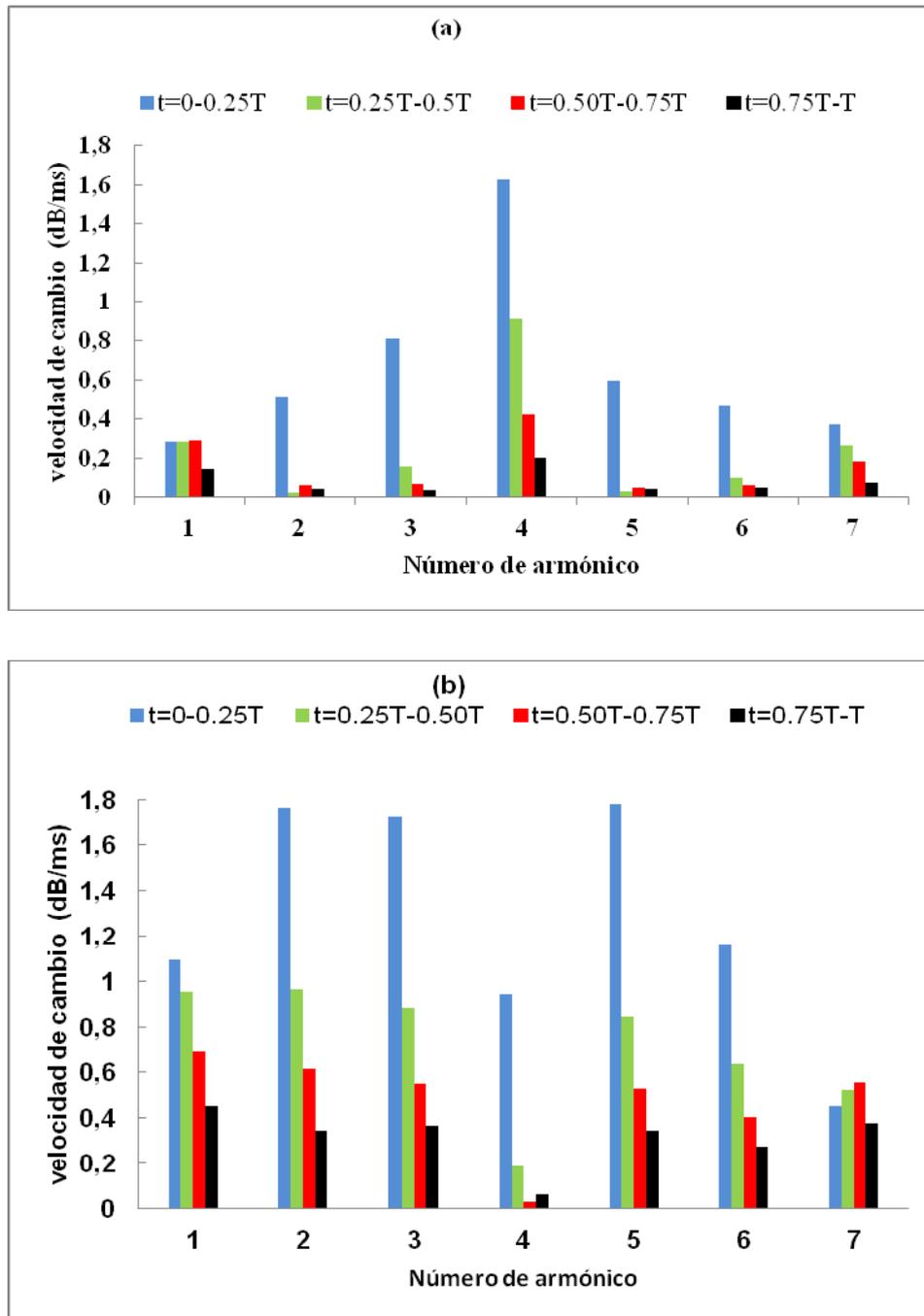


Figura A3.4: Velocidad de cambio de la magnitud de la presión (en dB/ms) de los siete primeros armónicos de la nota A4 de la melódica, atacada en mezzo forte, en cada uno de los cuatro segmentos del tiempo de ataque T . (a) ataque blando y (b) ataque duro.

A3.4. Centroide espectral

Al comparar la evolución (en unidades temporales relativas al tiempo de ataque de la fundamental) de los centroides de los ataques duros y de los ataques blandos nos volvemos a encontrar (Figura A3.5) con un intervalo característico de tiempo durante el que el centroide de los ataques duros es menor que el de los ataques blandos.

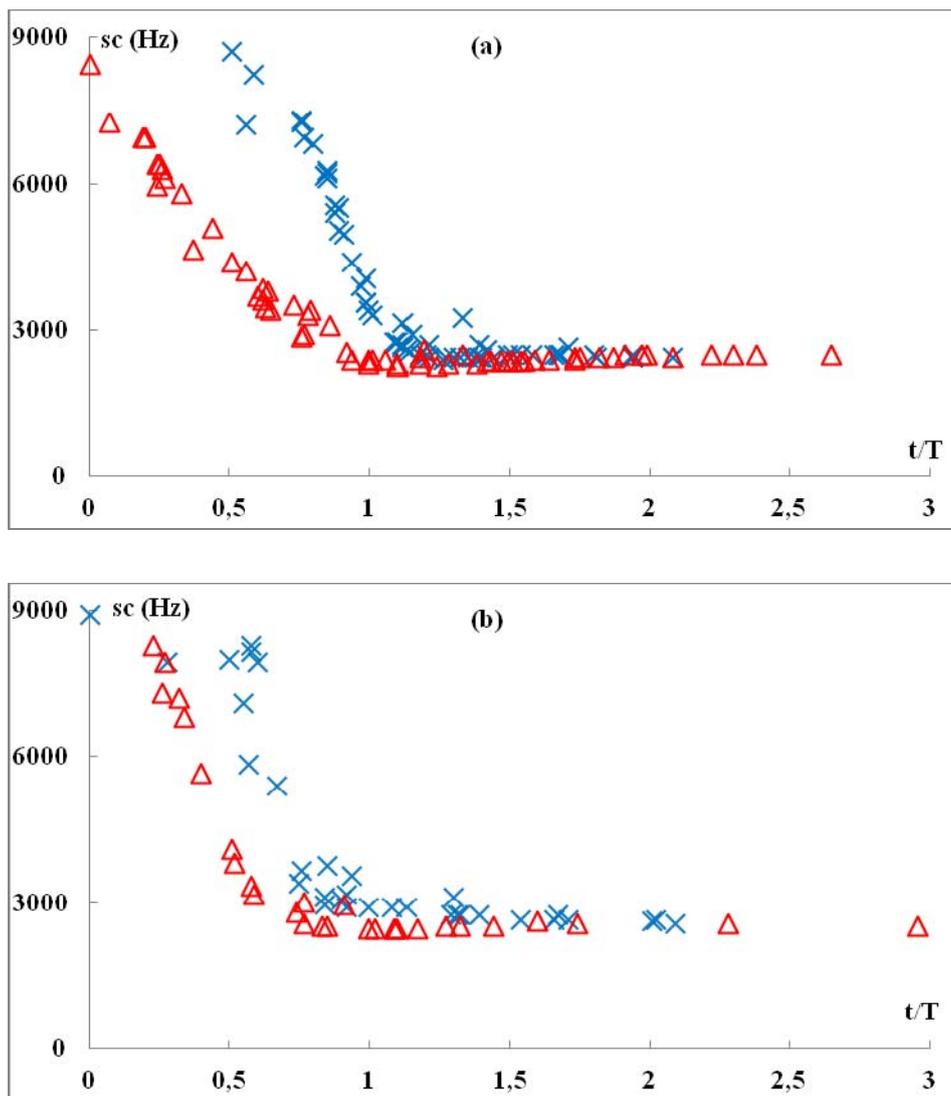


Figura A3.5: Evolución temporal (en unidades de tiempo de ataque) de los centroides espectrales durante el ataque para las notas (a) A3 y (b) A4, en mezzo forte de la melódica. Las espas azules corresponden a los ataques blandos y los triángulos rojos a los ataques duros. El máximo error en los valores del centroide es de ± 40 Hz.

De la Figura A3.5 podemos ver que en el caso de la melódica el intervalo característico (en unidades de tiempo relativo al tiempo de ataque de la fundamental) que diferencia las evoluciones temporales de los centroides de los ataques duro y blando abarca ahora desde el inicio del ataque hasta $T=1$ aproximadamente. Hay que tener en cuenta que el método de suministro de aire a las lengüetas de la melódica es muy diferente al empleado con las lengüetas de acordeón. El fuelle del acordeón permite un mayor control tanto de la liberación repentina del flujo de aire en los ataques duros como de la liberación progresiva en el caso de los ataques blandos. Ello, además de las características geométricas de los canales por donde circula el aire en cada instrumento puede tener influencia en los detalles de los resultados. Pero lo importante es que, para ambos instrumentos, los ataques duros y los ataques blandos muestran una evolución de sus respectivos centroides, lo que puede ser utilizado para caracterizar ambos tipos de ataque.

A3.5. Conclusiones

Hemos estudiado las sutiles diferencias de timbre correspondientes a los dos tipos de ataques característicos (ataques de fuelle y ataques de dedo) en un acordeón de concierto. Los descriptores de timbre utilizados son el tiempo de ataque y el centroide espectral. También hemos caracterizado la evolución temporal del nivel de presión sonora de los primeros armónicos.

En los ataques de dedo todos los armónicos evolucionan de una manera similar en duración, tiempos de comienzo y final, y velocidad de crecimiento de la magnitud (en *dB*) de la presión. Los tiempos de ataque de los ataques de fuelle son más largos que los tiempos de ataque de los ataques de dedo. En los ataques de fuelle los armónicos comienzan casi simultáneamente, pero terminan en instantes diferentes. Es más, este tipo de ataques muestra una alta velocidad de cambio durante el primer cuarto del tiempo de ataque de cada armónico, permaneciendo después muy baja esta velocidad para el resto de la duración del ataque.

En cuanto a los centroides se refiere, para ataques en *mezzo forte*, hay una región de tiempos relativos en la que el centroide de los ataques de dedo es menor que el centroide del ataque de fuelle correspondiente. En ataques en *piano*, la zona característica de diferenciación de los dos tipos de ataque no se muestra tan claramente. Estas características, relacionadas con las dos maneras diferentes de abrir las válvulas y las correspondientes entradas diferentes del flujo de aire en cada tipo de ataque, podrían contribuir a la diferente percepción de los dos tipos de ataque.

Los ataques de dedo realizados con pulsación lenta del botón muestran un cierto parecido al de los ataques de fuelle. El *cassotto* no tiene efecto alguno en la duración o comportamiento de los ataques. Ambos resultados son consistentes con las descripciones de técnicas de interpretación sobre el acordeón encontradas en la literatura técnica del instrumento.

Hemos realizado un estudio similar sobre la melódica, otro instrumento de lengüetas libres, en este caso puestas en vibración por el aire producido expelido directamente por el intérprete. La conclusión es que las características diferenciadoras de los ataques duros y blandos sobre el acordeón se mantienen también en el caso de la melódica.

De acuerdo con estudios sobre el modelado del Tiempo de Percepción de Ataque, el patrón de crecimiento de los primeros armónicos parece jugar un papel primordial en la diferenciación entre ataques de fuelle y ataques de dedo.

En nuestro trabajo sobre tiempos de ataque nos hemos limitado a intervalos de tiempo que van desde el momento en que se alcanza el umbral de -50 dB de la amplitud máxima (en dB) hasta el instante en que se llega al umbral de -5 dB de la amplitud máxima (en dB). En investigaciones futuras se quiere incluir el estudio de los transitorios desde el mismo momento en que el botón es presionado (ataque de dedo) o en que el fuelle es puesto en movimiento (ataque de fuelle).

Capítulo 6

Bibliografía

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Accordinas Marcel Dreux: <http://www.accordinas.com>, [Último acceso: 30 de abril de 2015].
- [2] Alberdi, J.; Baraiazarra, K.; López, J. M.: Personal communications (2005-2007).
- [3] Alberdi, J.; Orobengoa, J: Comunicación personal (2015).
- [4] Almeida, A.; Bergeot, B.; Vergez, C.; Gazengel, B.: *Analytical determination of the attack transient in a clarinet with time-varying blowing pressure*, Acta Acustica United with Acustica Vol. 101 (2015) 1026-1038.
- [5] ANSI S1.1-1994: *American National Standard. Acoustical terminology*. Acoustical Society of America (1994).
- [6] Bahnson, H. T.; Antaki, J. F.; Beery, Q. C.: *Acoustical and physical dynamics of the diatonic harmonica*, J. Acoust. Soc. Am. 103 (4) (1998).
- [7] Balachandran, B. & Magrab, E. B.: *Vibrations*, 2nd ed., Cengage Learning, 541-649, Toronto, Canadá (2009).
- [8] Barrero Ripoll, A.; Pérez-Saborid Sánchez-Pastor, M.: *Fundamentos y Aplicaciones de la Mecánica de Fluidos*, McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U., Madrid (2005).
- [9] Beauchamp, J. W.: *Analysis, Synthesis and perception of musical Sounds*, New York: Springer, New York (2007).
- [10] Benade, A. H.: *Fundamentals of Musical Acoustics*, 2nd ed., Dover, New York (1990).
- [11] Benetoux, T.: *L' Accordéon & Sa Diversité Sonore*, Editions Thierry Benetoux, Le Tour, Francia (2005).

-
- [12] Benetoux, T.: *The Ins and the Outs of the Accordion*, Editions Thierry Benetoux, Le Tour, Francia (2002).
- [13] Bergeot, B.; Almeida, A.; Vergez, C.; Gazengel, B.: *Attack transients in a clarinet model with time-varying blowing pressure*, in Acoustics 2012, Nantes, France (23-27 de Junio, 2012).
- [14] Bergeot, B.; Almeida, A.; Vergez, C.; Gazengel, B.: *Measurement of attack transients in a clarinet driven by a ramp-like varying pressure*, in Acoustics 2012, Nantes, France (23-27 de Junio, 2012).
- [15] Bismarck, G. von: *Timbre of steady sounds: a factorial investigation of its verbal attributes*. *Acustica*, Vol. 30 (1974) 146-159.
- [16] Braasch, J.; Ahrens, C.: *Attack Transients of Free Reed Pipes in Comparison to Striking Reed Pipes and Diapason Pipes*, *Acustica, Acta Acustica*, Vol. 86 (2000) 662-670.
- [17] Buchmann, B.: *The Techniques of Accordion Playing. Die Spieltechnik des Akkordeons*, pp. 40-43, Bärenreiter-Verlag, Kassel, Germany (2010).
- [18] Campbell, M.; Greated, C.: *The Musician's Guide to Acoustics*, 2nd ed., Oxford University Press, Oxford (1987, reprinted 2001).
- [19] Cottingham, J. P.: *Analysis of free reed attack transients*, Forum Acusticum 2014, Kraków, Poland, (September 7-12, 2014).
- [20] Cottingham, J. P.: *Pitch Bending and Anomalous Behaviour in a Free Reed Coupled to a Pipe Resonator*, Forum Acusticum 2005 (2005).
- [21] Cottingham, J. P.: *Pitch bending and multiple-mode reed vibration in mechanically-blown free reed instruments*, in Proceedings of the International Symposium on Music Acoustics (Associated Meeting of the International Congress on Acoustics), Sydney and Katoomba, Australia (25-31 August 2010).

- [22] Cottingham, J. P.; Lilly, C. J.; Busha, M.: *Variation of frequency with blowing pressure for an air-driven free reed*, Collected papers of the 137th meeting of The Acoustical Society of America and the 2nd Convention of the European Acoustics Association Forum Acusticum, Berlin, March 14-19 (1999).
- [23] Cottingham, J. P.; Lilly, C. J.; Reed, C. H.: *The motion of air-driven free reeds*, Collected papers of the 137th meeting of The Acoustical Society of America and the 2nd Convention of the European Acoustics Association Forum Acusticum, Berlin, March 14-19 (1999).
- [24] Coyle, W. L.; Behrens, S. L.; Cottingham, J. P.: *Influence of accordion reed chamber geometry on reed vibration and airflow*, *J. Acoust. Soc. Am.* 126, 2216(A) (2009).
- [25] Debut, V.; Millot, L.: *Time domain simulation of the diatonic harmonica*, Mosart Workshop on Current Research Directions in Computer Music (2001).
- [26] Dieckmann, E. A.: *Input impedance of Asian free-reed mouth organs*, *J. Acoust. Soc. Am.* 120 (5), 3076-3076 (2006).
- [27] Dokstoski, H.: *The Classical Free-Reed, Inc. A Short History of the Free-Reed Instruments in Classical Music* (Versión resumida del libro *The Classical Squeezebox*), <http://www.ksanti.net/free-reed/history.html> (1998).
- [28] Fabre, B.; Gilbert, J.; Hirschberg, A.; Pelorson, X.: *Aeroacoustics of Musical Instruments*, *Annu. Rev. Fluid Mech.* (2012).
- [29] Fernández de la Gándara, G.; Llorente, M.: *Acústica Musical*, 2^a ed., Publicaciones del Instituto Complutense de Ciencias Musicales, Madrid, 1998.
- [30] Fletcher, N. H.: *Autonomous vibration of simple pressure-controlled valves in gas flow*, *J. Acoust. Soc. Am.* 93, 2172-2180 (1993).

-
- [31] Fletcher, N. H.: *Mode locking in nonlinearly excited inharmonic musical oscillators*, J. Acoust. Soc. Am. 64, 1566-1569, (1978).
- [32] Fletcher, N. H.: *The nonlinear physics of musical instruments*, Rep. Prog. Phys. 62, 723–764, (1999).
- [33] Fletcher, N. H; Rossing, T. D.: *The Physics of Musical Instruments*, 2nd ed., Springer-Verlag, New York (1998).
- [34] Gervasoni, P.: *L'Accordéon, Instrument du XXème Siècle*, Editions Mazo, Paris, Francia (1986).
- [35] Gordon, J. W.: *The perceptual attack time of musical tones*, J. Acoust. Soc. Am. 82 (1), 88-105, (1987).
- [36] Grey, J. M.: *Multi-dimensional perceptual scaling of musical timbres*, J. Acoust. Soc. Am. 61, 1270–1277, (1977).
- [37] Han S. M.; Benaroya H; Wei T.: *Dynamics of transversely vibrating beams using four engineering theories*, Journal of Sound and Vibration, 225, 935-988 (1999),
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X99922575>
- [38] Heil, P.; Irvine, D. R. F.: *The posterior field P of cat auditory cortex. Coding of envelope transients*, Cerebral Cortex 8, 125-141 (1998).
- [39] Helmholtz, H. L. F.: *Die Lehre von den Tonempfindungen* (1863). *On the Sensations of Tone* (4th ed.), (translated by A. J. Ellis), Longmans, Green and CO., Londres (1895).
- [40] Hermosa, G.: *The accordion in the 19th century*, Editorial Kattigara, Santander, España (2013).
- [41] Hirschberg, A. & Rienstra, S.W.: *An introduction to aeroacoustics*, <http://www.win.tue.nl/~sjoerdr/papers/les-swr-mh.pdf>, (2004)

- [42] Hirschberg, A.; Gilbert, J.; Wiknands, A. P. J.; Valkering, A. M. C.: *Musical aero-acoustics of the clarinet*, Journal de Physique IV, Colloque C5, supplement au Journal de Physique III, Volume 4, May 1994 (1994).
- [43] Hirschberg, A.; Van de Laar, R. W. A.; Marrou-Maurières, J. P.; Wijnands, A. P. J.; Dane, H. J.; Kruijswijk, S. G.; Houtsma, A. J. M.: *A Quasy-stationary Model of Air Flow in the Reed Channel of Single-reed Woodwind Instruments*, Acustica, Vol. 70 (1990).
- [44] Irvine, T.: *Bending Frequencies of Beams, Rods, and Pipes*, in <http://www.vibrationdata.com/tutorials/beam.pdf> (2012).
- [45] Jaccomucci, C.: *Tecnica I per fisarmonica a bottoni (C-griff)*, p. 31, Edizioni Musicali Bèrben, Ancona, Italy (1998).
- [46] Johnston, R. B.: *Pitch Control in Harmonica Playing*, Acoustics Australia, Vol. 15, No. 3 (1987).
- [47] Kinsler, L. E.; Frey, A. U.; Coppens, A. B.; Sanders, J. V.: *Fundamentos de Acústica*, 3ª ed., Limusa S.A., México D.F. (1995).
- [48] Kymäläinen, H.: *Harmonikka taidemusiikissa (The accordion in Classical Music)*, Suomen Harmonikkainstituutti, Ikaalinen (Finlandia) (1994).
- [49] Lhermet, V.: *Higher level education in Europe 2014*, 2ed, Conservatoire National Supérieur de Musique et de Danse de Paris, Paris (2014).
- [50] Lighthill, M. J.: *On sound generated aerodynamically. I. General theory*, Proc. R. Soc. London, Ser. A 221, 564-587 (1952).
- [51] Lips, F.: *The Art of Bayan Playing (Technique, Interpretation, and Performance of Playing the Accordion Artistically)*, Karthause-Schmülling Verlagsgesellschaft, Kamen, Alemania (2000).
- [52] Loudini M., *Advances in Robot Manipulators, Chapter 31: Timoshenko beam theory based dynamic modeling of lightweight flexible link*

- robotic manipulators*, (CC BY-NC-SA 3.0 license: Ernest Hall Ed.) (2010)
<http://www.intechopen.com/books/advances-in-robot-manipulators/timoshenko-beam-theory-based-dynamic-modeling-of-lightweight-flexible-link-robotic-manipulators> (último acceso, marzo 2015).
- [53] Macerollo, Joseph: *Accordion Resource Manual*, The Avondale Press, Wollowdale, Canadá (1980).
- [54] Maurer, W.: *Akkordion*, Edition Harmonia, Viena (1983).
- [55] Mersenne, P. M.: *Harmonie Universelle*, Paris, (1636). Disponible en http://imslp.org/wiki/Harmonie_universelle_%28Mersenne,_Marin%29 (último acceso en marzo de 2015).
- [56] Miklós, A.; Angster, J.; Pitsch, S.; Rossing, T. D.: *Interaction of reed and resonator by sound generation in a reed organ pipe*, J. Acoust. Soc. Am. 119(5) (2006).
- [57] Miklós, A.; Angster, J.; Pitsch, S.; Rossing, T. D.: *Reed vibration in lingual organ pipes without the resonators*, J. Acoust. Soc. Am. 113(2) (2003).
- [58] Miller, T. E.: *Free-reed instruments in Asia*, de *Music East and West, Essays in Honor of Walter Kaufmann*, 63-100., Pendragon Press, New York (1981).
- [59] Millot, L.; Baumann, C.: *A proposal for a minimal model of free reeds*, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 93, 122-144, (2007).
- [60] Millot, L.; Cuesta, C.; Valette, C.: *Experimental Results when Playing Chromatically on a Diatonic Harmonica*, Acoustica 87, 262-270 (2001).
- [61] Mirek, A.: *Reference book on harmonicas*, Autopublicado, Moscú (1992).

- [62] Misdariis, N.; Ricot, D.; Caussé, R.: *Modélisation physique de la vibration d'une anche d'accordéon*, Proceedings of the 5th French Congress on Acoustics, 281-283, Laussane, France (2000).
- [63] Monichon, P.: «*Que sais-je?*» (n° 1432): *L'Accordéon*, Presses Universitaires de France, París (1971).
- [64] Monichon, P.: *L'Accordéon*, Payot, Lausana, Suiza (1985).
- [65] Moore, B. C. J.: *An introduction to the psychology of hearing*, Academic, New York (1997).
- [66] Morse, P. M.; Ingard, K. U.: *Theoretical Acoustics*, Princeton University Press, Princeton (1968).
- [67] PASCO Mechanical Wave Driver Manual (SF-9324), http://www.pasco.com/prodCatalog/SF/SF-9324_mechanical-wave-driver/
- [68] Paterson, A. R.: *A fist course in fluid dynamics*, Cambridge University Press., Cambridge, 232, (1983).
- [69] Pignini (accordion manufacturer) <http://www.pignini.com/en/> (Último acceso: 1 de marzo de 2015).
- [70] Plitnik, G. R.: *Vibration characteristics of pipe organ reed tongues and the effect of the shallot, resonator, and reed curvature*, The Journal of the Acoustical Society of America 107, 6 (2000).
- [71] Plomp, R.: *Timbre as a multidimensional attribute of complex tones, Frequency analysis and periodicity detection in hearing*, Leiden-Sijthoff, Amsterdam (Holanda) (1970).
- [72] Plomp, R.: *Aspects of tone sensation*, Academic, London (Reino Unido) (1976).

- [73] Pollard, H.F.; Jansson, E.V.: *A tristimulus method for the specification of musical timbre*, *Acustica* 51, 162-171 (1982).
- [74] Repetto, C. E.; Roatta, A; Welti R. J.: *Measurements of resonant frequencies, loss factor and dynamic Young modulus of cantilever beams*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* 36 p. 1314 (2014).
- [75] Repp, B. H.: *Patterns of note onset asynchronies in expressive piano performance*, *J. Acoust. Soc. Am.* 100, 3917-3932 (1996).
- [76] Richards, O.: *Investigation of the Lip Reed Using Computational Modelling and Experimental Studies with an Artificial Mouth*, University of Edinburgh (2003).
- [77] Richter, G.: *Akkordeon*, VEB Fachbuchverlag, Leipzig, Alemania (1990).
- [78] Ricot, D.; Caussé, R.; Misdariis, N.: *Aerodynamic excitation and sound production of blown-closed free reeds without acoustic coupling: The example of the accordion reed*, *J. Acoust. Soc. Am.* 117 (4). Pt. 1. (April 2005).
- [79] Roederer, J. G.: *The physics and psychophysics of Music: An introduction*. Springer-Verlag, third edition (1995).
- [80] Rossing, T. D.; Moore, F. R.; Wheeler, P. A.: *The science of sound*, 3rd ed., pp. 181-182, Addison Wesley, Reading, Massachusetts (Estados Unidos) (2002).
- [81] Shure Microphones: *Miking an accordion with Shure mic element inside*,
http://shure.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/1736/kw/accordion/session/L3RpbWUvMTM4MDgxMjg3MS9zaWQvbFNSaTIUQmw%3D (Último acceso: 1 de marzo de 2015).
- [82] Smetana, J.: *Základy nové techniky hry na akordeon, Díl II. Praktická cvicení (About fundamentals of the new accordion technique, Vol. 2, Daily practice)*, Editio Bärenreiter, Prague (1965).

-
- [83] St. Hilaire, A. O.; Wilson, T. A.; Beavers, G. S.: *Aerodynamic excitation of the harmonium reeds*, J. Fluid. Mech. 49, 803-816 (1971).
- [84] Tarnopolsky, A. Z.; Lai, J. C. S.; Fletcher, N. H.: *Flow structures generated by pressure-controlled self-oscillating reed valves*, J. Sound Vib. 247, 213-226 (2001).
- [85] Thomson, W. T.: *Theory of Vibration with Applications*, 4th ed., Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1993).
- [86] Timoshenko, S. P.: *History of Strength of Materials*, Dover Publications, Inc., New York (1953).
- [87] Timoshenko S. P., *On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars*, Phil. Mag. 41 744-6, (1921).
- [88] Timoshenko S. P.: *On the transverse vibrations of bars of uniform cross-section*, Phil. Mag. 43, 125-131, (1922).
- [89] Titze, I. R.: *The physics of small-amplitude oscillation of the vocal folds*, J. Acoust. Soc Am. 83 (4), 1536-1552, (1988).
- [90] Tonon, T.: *Reed Cavity Design and Resonance*, http://www.concertina.org/pica/pica_2005_2/pdf/reed_cavity_design_resonance.pdf, (2005).
- [91] Volumen especial titulado "Musician-acoustic instrument interaction" Acta Acustica united with Acustica Vol. 101 (2015).



Capítulo 7

Contribuciones

7. CONTRIBUCIONES

- [1] Llanos, R.; Alberdi, I.: *¿Acordeón...?*, Música y Educación (Revista Trimestral de Pedagogía Musical) nº 39, Madrid, (Octubre 1999).
- [2] Llanos, R.; Alberdi, I.: *Acordeón para compositores*, Música y Educación (Revista Trimestral de Pedagogía Musical) nº 42, Madrid (Junio 2000).
- [3] Llanos-Vázquez, R.; Alonso-Moral, J.; Elejalde-García, M. J.; Macho-Stadler, E.: *First suggestions for the improvement of accordion reeds*, Official Publication of the Forum Acusticum Sevilla 2002, Revista de Acústica, Vol. XXXIII, ISBN 84-87985-06-8, Sociedad Española de Acústica, Madrid (2002).
- [4] Llanos-Vázquez, R.; Elejalde-García, M. J.; Macho-Stadler, E.; Alonso-Moral, J.: *A pedagogical utilisation of the accordion to study the vibration behaviour of free reeds*, Official Publication of the Forum Acusticum Sevilla 2002, Revista de Acústica, Vol. XXXIII, 2002; ISBN 84-87985-06-8; Sociedad Española de Acústica, Madrid (2002).
- [5] Llanos, R.; Alberdi, I.: *Accordion for composers*, Editado por los autores, I.S.B.N.: 84-607-6778-7, www.ialberdi.com (2002).
- [6] Llanos-Vazquez, R.: *Acordeón Divertido / Akordeoi Alaia / Jolly Accordion (Método para acordeón cromático de bajos libres)*, 2ª edición (revisada), Autopublicado, I.S.B.N.: 84-607-5721-8, Vitoria-Gasteiz, España (2002).
- [7] Llanos-Vázquez, R.; Alonso-Moral, J.; Elejalde-García, M. J.; Macho-Stadler, E.: *Interaction among physical acoustic knowledge and performance in the accordion and its educational side*, Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference, August 6-9, 2003 (SMAC 03), Stockholm, Sweden (2003).
- [8] Elejalde-García, M. J.; Llanos-Vázquez, R.; Macho-Stadler, E.: *Control interpretativo sobre el acordeón y su didáctica*, IV Congreso Ibero-

-
- Americano De Acústica, IV Congreso Ibérico De Acústica, XXXV Congreso Español De Acústica, Tecniacústica Septiembre 2004, European Acoustics Symposium, Guimarães (Portugal), (2004).
- [9] Llanos-Vázquez, R.; Elejalde-García, M. J.; Macho-Stadler, E.; Alonso-Moral, J.: *Efecto pitch bending en el acordeón*, IV Congreso Ibero-Americano De Acústica, IV Congreso Ibérico De Acústica, XXXV Congreso Español De Acústica, Tecniacústica 2004, European Acoustics Symposium, Guimarães (Portugal), (Septiembre 2004).
- [10] Llanos-Vazquez, R.: *Pun txan txan (Método para acordeón cromático de bajos standard)*, Autopublicado, ISBN: 84-609-1973-0, Vitoria-Gasteiz, España (2004).
- [11] Llanos-Vázquez, R.; Elejalde-García, M. J.; Macho-Stadler, E.; Alonso-Moral, J.: *El conocimiento de los mecanismos acústicos del acordeón y su utilización en el proceso de interpretación y de enseñanza musical*, Música y Educación (Revista Trimestral de Pedagogía Musical) nº 60, pp. 89-108, Madrid (Diciembre 2004).
- [12] Llanos-Vázquez, R.; Elejalde-García, M. J.; Macho-Stadler, E.: *Attack transients in accordion*, Proceedings CD Rom, ISBN: 3-9501554-5-7. The Thirteenth International Congress on Sound and Vibration-ICSV13, Julio 2006, Viena (2006).
- [13] Llanos-Vázquez, R.; Elejalde-García, M. J.; Macho-Stadler, E.: *Acoustical analysis of spectral centroid for a modern concert accordion*, ISMA 2007, International Symposium on Musical Acoustics, 9-12 Septiembre 2007, Barcelona (2007).
- [14] Llanos-Vázquez, R.; Elejalde-García, M. J.; Macho-Stadler, E.: *Controllable pitch-bending effects in the accordion playing*, in Acoustics'08, Paris, France (June 29 – July 4, 2008).
- [15] Llanos-Vázquez, R.; Agos-Esparza, A.; Macho-Stadler, E.; Elejalde-García, M. J.: *Psychoacoustic study of attack transients in accordion*, in

The Sixteenth International Congress on Sound and Vibration (ICSV16), Kraków, Poland (July 5-9, 2009).

- [16] Llanos-Vázquez, R.; Elejalde-García, M. J.; Macho-Stadler, E.: *Comparison between Attack Transients of Accordion and other Free-reed Instruments*, Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark (June 27 – July 1, 2011).
- [17] Llanos-Vázquez, R.; Elejalde-García, M. J.; Macho-Stadler, E.: *Acústica de la lengüeta libre del acordeón*, 45º Congreso Español de Acústica, 8º Congreso Ibérico de Acústica, Simposio Europeo sobre Ciudades inteligentes y Acústica Ambiental, Tecniacústica 2014, Murcia (España), (29-31 Octubre 2014).
- [18] Llanos-Vázquez, R.; Elejalde-García, M. J.; Macho-Stadler, E.; Agos-Esparza, A.: *Physical and Psychoacoustic characterization of different types of attacks on the accordion*, Acta acustica united with Acustica Vol 100, pp. 375-384 (March/April 2014).
- [19] Elejalde-García, M. J.; Macho-Stadler, E.; Llanos-Vázquez, R.: *Vibration of bars: an experimental study of the sound produced by free reeds*, Proceedings CD Rom. The 22nd International Congress on Sound and Vibration-ICSV22, Florence, Italy (12-16 July 2015).
- [20] Elejalde-García, M. J.; Macho-Stadler, E.; Llanos-Vázquez, R.; Agos-Esparza, A.: *Experimental study of the sound produced from a concert accordion*, Proceedings. The Third Vienna Talk on Music Acoustics “Bridging the gaps 2nd”, Vienna, Austria (16-19 September 2015).
- [21] Macho-Stadler, E.; Elejalde-García, M. J.; Llanos-Vázquez, R.: *Oscillations of end loaded cantilever beams*, European Journal of Physics Vol 36, 055007 (September 2015).

