



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

TESIS DOCTORAL

ESTUDIO Y ANALISIS SOBRE LA ACUSTICA Y ORGANOLOGIA DEL CLARINETE Y SU OPTIMIZACION

Presentada por:

Vicente M. Pastor García

Dirigida por:

Dr. D. Vicente Gómez Lozano

Departamento de Física Aplicada
Universidad Politécnica de Valencia

Dr. D. Ricard Huerta Ramon

Departamento de Didáctica de la Expresión Musical, Plástica y Corporal
Universidad de Valencia

Valencia, abril 2005



Departamento de Comunicación Audiovisual, Documentación e Historia del Arte

© Copyright 2005 by Vicente Pastor García

A la memoria de mi madre

A Mónica

A Paula

AGRADECIMIENTOS

A mis directores de tesis, Ricard Huerta y Vicente Gómez, por acceder a escuchar y dirigir mi proyecto y guiarme por el camino correcto.

A mi padre y a mi hermana, eminentes clarinetistas y pedagogos, por su sorda pero efectiva aportación a este trabajo fraguada a lo largo de mi formación musical.

A mi mujer y a mi hija, por ser las víctimas colaterales de este proyecto y soportar los efectos secundarios del proceso de elaboración.

Al Departamento de Física Aplicada de la Universidad Politécnica de Valencia, por la colaboración prestada en el uso de las instalaciones y medios técnicos para llevar a cabo la parte experimental del trabajo.

A mis alumnos, por su útil colaboración e información desinteresada e inconsciente aportada en la docencia diaria.

A mis colegas, por sus valiosos consejos e ideas recibidas.

Y por último, a mi clarinete, compañero infatigable y leal. Sin él no hubiese sido posible completar esta empresa. Ahora te conozco un poco mejor, aunque espero seguir conociéndote todavía más.

A todos, ¡gracias!

*Estaba ayer por la tarde en la Opera de Mannheim,
estaba sentado por encima de la orquesta,
había 4 violines primeros, 17 segundos violines, 3 violas,
14 violoncellos, 3 contrabajos y todo un conjunto de instrumentos de viento:
Entre estos, 2 clarinetes. Dos clarinetes padre;
¡No puede imaginar la belleza del sonido del clarinete!,
¡Si los tuvieramos en nuestras orquestas!*

(Carta escrita por W.A. Mozart a su padre en 1778)

*“Su voz es la del amor heróico; y si las masas de instrumentos de metal,
en las grandes sinfonías musicales, despiertan la idea de una tropa cubierta de armaduras
centellante marchando a la gloria o a la muerte, los numerosos unisonos de clarinetes,
oídos al mismo tiempo, parecen representar las mujeres amadas,
las amantes de orgullosa mirada, que coronan los vencedores o mueren con los vencidos.
Jamás he podido oír de lejos una música militar sin sentirme
hondamente conmovido por ese timbre femenino de los clarinetes
y preocupado de imágenes de esa índole, como después de la lectura
de las antiguas epopeyas. Ese bello soprano instrumental,
tan sonoro, tan rico en acentos penetrantes,
cuando se le emplea por masas, en el solo gana en delicadez...”*

(Berlioz, 1844)

RESUMEN

Las causas del funcionamiento acústico del clarinete se conocen de forma vaga -e imprecisa en algunos casos- por la mayor parte de la comunidad clarinetística. Aunque se tratan someramente en algunos manuales de acústica musical y libros monográficos sobre el clarinete, algunas cuestiones se dan por sentado convencionalmente por la acústica tradicional con escasa base científica. Así, varias son las dudas que alberga el clarinetista en relación con el funcionamiento acústico de su instrumento y no existe ningún tratado o manual que se ocupe de modo específico de este asunto. La consecuencia más directa de este desconocimiento es, en la mayoría de los casos, un uso del instrumento por debajo de sus prestaciones acústicas.

Por su especial funcionamiento acústico, el clarinete se halla sometido a determinados fenómenos físico-acústicos en sus columnas aéreas, lo que reduce notablemente su rendimiento acústico. Así, la afinación perfecta y el timbre homogéneo en el clarinete son pura teoría. En la actualidad, las nuevas tecnologías y los innovadores medios que aporta la física acústica han estimulado el interés por los músicos y físico-acústicos a investigar estos temas. En efecto, aunque en nuestro país todavía no se ha iniciado su estudio de forma rigurosa, en los últimos treinta años se han desarrollado diversos estudios -en algunas universidades extranjeras- encaminados a optimizar la acústica del clarinete. Estos trabajos se centran en el diseño de un clarinete ideal mediante la acústica lineal. La descripción lineal es muy útil para predecir la afinación en niveles sonoros bajos. Por su parte, el uso de la impedancia de entrada en el instrumento ha supuesto un gran avance para el estudio y optimización de la afinación y la calidad tonal de los instrumentos de viento madera. En este sentido, la función de suma se utiliza para determinar las posiciones y diámetro exacto de los orificios tonales que deben dar las frecuencias exactas del modelo geométrico ideal. El problema subyace debido a que el tubo del clarinete no es un cilindro perfecto y, por tanto, deben determinarse todas las posibles correcciones por esas alteraciones del tubo, lo cual requiere un estudio de mayor complejidad.

Se trata, en definitiva, de encontrar las posiciones idóneas y el diámetro preciso de algunos orificios tonales, así como practicar ciertas alteraciones en la sección cruzada del tubo que posibiliten una afinación precisa, un timbre homogéneo y, en definitiva, una calidad tonal óptima. También se estudia el diseño de un segundo orificio de registro que pueda corregir las discrepancias derivadas de un solo orificio de registro por su especial funcionamiento de tubo cerrado. Aunque la mayoría de estos estudios han sido publicados, su aplicación práctica en el instrumento no ha sido efectiva hasta el momento presente debido, por una parte, a las reticencias de las multinacionales constructoras de instrumentos que no ven con buenos ojos toda innovación que conlleve alteraciones drásticas en el mecanismo por el coste que supone su aplicación y, por otra, al recelo del instrumentista, poco partidario de adoptar cambios radicales en la técnica que tanto trabajo le ha costado dominar. Además, la aplicación de estos estudios al instrumento es de enorme complejidad

debido a la influencia de determinados fenómenos cuya magnitud en el proceso sonoro todavía se desconoce. Hasta ahora, las contadas innovaciones técnicas que se han aplicado en el clarinete, consistentes en ligeras modificaciones en el mecanismo, no han tenido una gran acogida por parte de los clarinetistas, lo que explica, por otra parte, el recelo de los fabricantes.

Con este panorama, la otra línea de investigación la constituye la optimización acústica del instrumento por parte del clarinetista, desde el conocimiento y la comprensión de todos los fenómenos intervinientes en el proceso sonoro del clarinete. En este sentido, la presente Memoria constituye un Trabajo Doctoral en el que se ha desarrollado una línea específica de trabajo dentro de la Acústica Musical. En concreto, se ha realizado un estudio de la acústica y organología del clarinete, con especial atención a su afinación y a su timbre, en orden a su optimización en la ejecución musical. Para ello, además de efectuar un exhaustivo trabajo de campo en todos los aspectos que conciernen al tema que se ha investigado, se ha procedido mediante un método experimental al análisis de la acústica del instrumento, buscando aplicaciones prácticas de interés musical que faciliten y optimicen el trabajo del ejecutante.

El Trabajo se ha estructurado en cinco partes. En la primera parte se aporta una introducción al tema objeto de estudio. En la segunda y tercera parte se ha efectuado un estudio de campo analizando todos los fundamentos de acústica física y musical necesarios para el desarrollo ulterior del estudio, así como los fenómenos que intervienen en el proceso sonoro que acontece en el clarinete. Asimismo, se ha desarrollado un estudio sobre los armónicos, la constitución de la escala musical y los tubos sonoros, considerados aspectos primordiales en la investigación de la acústica de cualquier instrumento musical de viento madera. La cuarta parte constituye la sección experimental del Trabajo donde se ha realizado un riguroso estudio de la acústica del instrumento mediante un método analítico. Se han adoptado, en este sentido, los parámetros que se han considerado más relevantes para el fin que se persigue. Los resultados obtenidos han sido discutidos y, por otra parte, se han aportado las aplicaciones prácticas que se han considerado oportunas con una clara vocación práctica y pedagógica. Con respecto a las medidas experimentales obtenidas, se ha empleado la respuesta frecuencial y espectral aleatoria de varias muestras acústicas emitidas en un ambiente anecoico. Asimismo, se ha obtenido el mapa acústico completo del clarinete, esto es, se han aislado, identificado y catalogado todos los sonidos susceptibles de ser emitidos con ciertas garantías acústicas, lo que se espera coadyuve sobremanera en el trabajo diario de docentes e intérpretes. Además, se han estudiado las propiedades acústicas de ciertos elementos del sistema acústico del clarinete y su incidencia en su funcionamiento acústico. Finalmente, en la quinta parte del Trabajo se ha tratado de conjugar el estudio de campo sobre los aspectos relacionados específicamente con la acústica del clarinete, con la aplicación de los resultados experimentales obtenidos. Así, se ha procedido a analizar y describir los elementos de su sistema acústico y sus propiedades, su funcionamiento acústico, su afinación y su timbre, considerando especialmente los resultados experimentales obtenidos y complementándolos con las aportaciones más recientes en este campo. Asimismo, se han analizado ciertas cuestiones prácticas y los métodos correctores de la afinación y el timbre. Se puede decir que esta parte constituye, junto con la experimental, la matriz del Trabajo, dado que contiene los aspectos más importantes del tema estudiado así como las aportaciones personales.

RESUM

Les causes del funcionament acústic del clarinet són conegudes de forma vaga (i imprecisa en alguns casos) per la major part de la comunitat clarinetística. Tot i que són tractades breument en alguns manuals d'acústica musical i llibres monogràfics sobre el clarinet, algunes qüestions es donen per assumides convencionalment per part de l'acústica de caire tradicional amb una escassa base científica. Així doncs, alguns són els dubtes que tindrà el clarinetista en relació amb el funcionament acústic del seu instrument, i no existeix cap tractat o manual que s'ocupe de manera específica d'aquest assumpte. La conseqüència més directa d'aquest desconeixement és, en la majoria dels casos, un ús de l'instrument que està per sota de les seues prestacions.

Per seu especial funcionament acústic, el clarinet es troba sotmés a determinats fenòmens físico-acústics en les seues columnes aèrees, la qual cosa redueix notablement el seu rendiment acústic. És per això que l'afinació perfecta i el timbre homogeni en el clarinet són pura teoria. En l'actualitat, les noves tecnologies i els innovadors mitjans que aporta l'acústica física han estimulat l'interès dels músics i acústics per investigar aquests temes. En efecte, encara que al nostre país encara no s'ha iniciat el seu estudi de forma rigurosa, en els últims trenta anys s'han desenvolupat diversos estudis -en algunes universitats estrangeres- orientats a optimitzar l'acústica del clarinet. Aquests treballs es centren en el disseny d'un clarinet ideal mitjançant l'acústica lineal. La descripció lineal és molt útil per a les prediccions de l'afinació en nivells sonors baixos. Per la seua part, l'ús de la impedància d'entrada en l'instrument ha suposat un gran avanç per a l'estudi i optimització de l'afinació i la qualitat tonal dels instruments de vent-fusta. En aquest sentit, la funció de suma s'hi utilitza per determinar les posicions i diàmetre exacte dels orificis tonals que deuen donar les freqüències exactes del model geomètric ideal. El problema hi subjau degut a que el tub del clarinet no és un cilindre perfecte i, per tant, deuen determinar-se totes les possibles correccions per aquestes alteracions del tub, la qual cosa requereix un estudi de major complexitat.

Es tracta, en definitiva, de trobar les posicions idònies i el diàmetre precís d'alguns orificis tonals, així com practicar certes alteracions en la secció creuada del tub que possibiliten una afinació precisa, un timbre homogeni i, en definitiva, una qualitat tonal òptima. També s'estudia el disseny d'un segon orifici de registre que podria corregir les discrepàncies derivades d'un sol orifici de registre pel seu especial funcionament de tub tancat. Encara que la majoria d'aquests estudis han estat publicats, la seua aplicació pràctica en l'instrument no ha estat efectiva fins al moment present, degut fonamentalment a les següents raons: les reticències de les multinacionals constructores d'instruments que no veuen amb bons ulls tota innovació que comporte alteracions dràstiques en el mecanisme pel cost que suposaria la seua aplicació; el recel del clarinetista, poc partidari d'adoptar canvis radicals en la tècnica que tant de treball li ha costat dominar; l'enorme complexitat que suposa degut a la influència de determinats fenòmens, la influència dels quals en el procés sonor rau encara sense clarificar; per últim, els efectes secundaris que comporta l'aplicació de determinats estudis. Fins ara, les comptades innovacions tècniques que s'han

aplicat en el clarinet, consistents en lleugeres modificacions en el mecanisme, no han tingut una gran acollida per part dels clarinetistes, la qual cosa explica, per una altra part, el recel dels fabricants.

Amb aquest panorama, l'altra línia d'investigació la constitueix l'optimització acústica de l'instrument per part del clarinetista, des del coneixement i la composició de tots els fenòmens que intervenen en el procés sonor del clarinet. En aquest sentit, la present Memòria constitueix un Treball de Doctorat en el qual s'hi ha desenvolupat una línia específica de treball dins de l'Acústica Musical. En concret, s'hi ha realitzat un estudi de l'acústica i organologia del clarinet, amb una especial atenció a la seua afinació i al seu timbre, en mirades a la seua optimització en l'execució musical. Per a això, a més d'efectuar un exhaustiu treball de camp en tots els aspectes que afecten al tema que s'ha investigat, s'ha procedit mitjançant un mètode experimental a l'anàlisi de l'acústica de l'instrument, buscant aplicacions pràctiques d'interès musical que faciliten i optimitzen el treball de l'executant.

El treball s'ha estructurat en cinc parts. En la primera part s'hi aporta una introducció al tema objecte d'estudi. En la segona i tercera parts s'hi ha efectuat un estudi de camp analitzant tots els fonaments d'acústica física y musical necessaris per al desenvolupament ulterior de l'estudi, així com els fenòmens que intervenen en el procés sonor que esdevé en el clarinet. Així mateix, s'hi ha desenvolupat un estudi sobre els harmònics, la constitució de l'escala musical i els tubs sonors, considerats aspectes primordials en la recerca de l'acústica de qualsevol instrument musical de vent-fusta. La quarta part constitueix la secció experimental del Treball, on s'hi ha realitzat un rigorós estudi de l'acústica de l'instrument mitjançant un mètode analític. S'hi han adoptat, en aquest sentit, els paràmetres que s'han considerat més rellevants per a la finalitat perseguida. Els resultats obtinguts han estat contrastats i, per una altra banda, s'hi han aportat les aplicacions pràctiques que s'han considerat oportunes amb una clara vocació pràctica i pedagògica. Pel que fa a les mesures experimentals obtingudes, s'hi ha utilitzat la resposta freqüencial i espectral de diverses mostres acústiques emeses en un ambient anecònic. Així mateix, s'ha obtingut el mapa acústic complet del clarinet, això és, s'hi han aïllat, identificat i catalogat tots els sons susceptibles de ser emesos amb certes garanties acústiques, la qual cosa s'espera ajude sobremanera en el treball diari de docents i intèrprets. A més, s'han estudiat les propietats acústiques de certs elements del sistema acústic del clarinet i la seua incidència en el seu funcionament acústic. Finalment, en la cinquena part del Treball s'hi han tractat de conjugar l'estudi de camp sobre els aspectes relacionats específicament amb l'acústica del clarinet, amb l'aplicació dels resultats experimentals obtinguts. Així, s'ha procedit a analitzar i descriure els elements del seu sistema acústic i les seues propietats, el seu funcionament acústic, la seua afinació i el seu timbre, considerant especialment els resultats experimentals obtinguts i completant-los amb les aportacions més recents en aquest camp. Així mateix, han estat analitzades certes qüestions pràctiques i els mètodes correctors de l'afinació i el timbre. Es pot dir que aquesta part constitueix, juntament amb l'experimental, la matriu del Treball, ja que conté els aspectes més importants del tema estudiat, així com les aportacions personals.

SUMMARY

The causes of the acoustic operation of clarinet are known vague and not in precise form, in some cases by most of the clarinet-community. Although they are briefly in some manuals musical acoustics and monographic books on clarinet, some questions occur by seated conventionally by the traditional acoustics with little scientific base. Thus, several are the doubts that the clarinetist in relation to the acoustic operation of its instrument lodges and any manual treaty does not exist or that takes care of specific way of this subject. The most direct consequence of this ignorance is, in most of the cases, a use of the instrument below its benefits.

By its special acoustic operation, clarinet is put under certain physical-acoustic phenomena in its aerial columns, which reduces its acoustic efficiency remarkably. Thus, the perfect refining and the homogenous timbre in clarinet are pure theory. At the present time, the new technologies and the average innovators who contribute the physical acoustics has stimulated the interest by the musicians and hearing aids to investigate these subjects. In effect, although in our country its study of rigorous form has still not begun, in the last thirty years have been developed diverse studies -in some foreign universities-directed to optimize the acoustics of clarinet. These works are centred in the design of clarinet ideal by means of the linear acoustics. The linear description is very useful to predict the refining in low sonorous levels. On the other hand, the use of the impedance of entrance in the instrument has supposed a great advance for the study and optimization of the refining and the pitch quality of the wind instruments wood. In this sense, the sum function is used to determine the positions and exact diameter of the pitch orifices that must give the exact frequencies of the ideal geometric model. The problem starts because the tube of clarinet is not a perfect cylinder and, therefore, must determine all the possible corrections by those alterations of the tube, which requires a study of greater complexity.

One treats, really, to find the positions and the precise diameter of some pitch orifices suitable, as well as to practice certain alterations in the crossed section of the tube that make possible a precise refining, a homogenous timbre and, really, an optimal pitch quality. Also the design of a second orifice of registry studies that can correct the discrepancies derived from a single orifice of registry by its special operation of closed tube. Although most of these studies they have been published, its practical application in the instrument has not been effective until the present moment due, fundamentally, to the following reasons: the reluctance of the construction multinationals of instruments that do not see with good eyes all innovation that entails drastic alterations in the mechanism by the cost that supposes its application; the distrust of the clarinetist, little in favour to adopt radical changes in the technique that as much work has cost to dominate to him; the enormous complexity that supposes due to the influence of certain phenomena, whose influence in the sonorous process still remains without clarify; finally, the indirect effect that the application of certain studies tolerates. Until now, counted the technical innovations that have been applied in clarinet, consisting of slight modifications in the mechanism, have

not had a great welcome on the part of the clarinetists, which explains, on the other hand, the distrust of the manufacturers.

With this panorama, the other line of investigation constitutes the acoustic optimization of the instrument on the part of the clarinetist, from the knowledge and the understanding of all the intervening phenomena in the sonorous process of clarinet. In this sense, the present Memory constitutes a Doctoral Work in which a specific line of work within the Musical Acoustics has been developed. In particular, it has been made a study of the acoustics and instrument of clarinet, with special attention to his refining and its timbre, in order to his optimization in the musical execution. For it, besides to carry out an exhaustive work of field in all the aspects that concern the subject which it has been investigated, has come by means of an experimental method to the analysis from the acoustics from the instrument, looking for practical applications of musical interest that they facilitate and they optimize the work of the executant's.

The Work has been structured in five parts. In the first part study object is contributed to an introduction to the subject. In the second and third part a field study has taken place analyzing all the necessary foundations of acoustics physics and musically for the later development of the study, as well as the phenomena that take part in the sonorous process that occurs in clarinet. Also, a study has been developed on the overtones, the sonorous constitution of the musical scale and tubes, considered fundamental aspects in the investigation of the acoustics of any musical wind instrument wood. The fourth part constitutes the experimental section of the Work where a rigorous study of the acoustics of the instrument by means of an analytical method has been made. They have been adopted, in this sense, the parameters that have been considered more excellent for the aim that is persecuted. The obtained results have been discussed and, on the other hand, the practical applications have been contributed that they have been considered opportune with a clear practical and pedagogical vocation. With respect to the obtained experimental measures, the frequencies and spectral answer of several emitted acoustic samples in an anechoic atmosphere has been used random. Also, the complete acoustic map of clarinet has been obtained, that is to say, are had isolated, identified and catalogued all the sounds susceptible to be emitted with certain acoustic guarantees, which delay is helped excessively in the daily work of educational and interpreters. In addition, the acoustic properties of certain elements of the acoustic system of clarinet and their incidence in their acoustic operation have studied. Finally, in the fifth part of the Work one has been to conjugate the field study on the aspects related specifically to the acoustics of clarinet, with the application of the obtained experimental results. Thus, it has been come to analyze and to describe to the elements of his acoustic system and its properties, their acoustic operation, its refining and its timbre, considering specially the experimental results obtained and complementing them with the most recent contributions in this field. Also, certain practical questions have been analyzed and the methods correctors of the refining and the timbre. The experimental one, the matrix of the Work can be said along with that this part constitutes, since it contains the most important aspects of the studied subject as well as the personal contributions.

CONTENIDOS

PRESENTACION

I. CONTEXTUALIZACIÓN Y JUSTIFICACION	1-6
II. OBJETIVOS	7-9
III. METODOLOGIA Y ORGANIZACION	11-12

I. INTRODUCCION

CAPITULO 1 BREVE RESEÑA HISTORICA DE ACUSTICA MUSICAL	15-20
CAPITULO 2 HISTORIA Y EVOLUCION DEL CLARINETE Y SU ACUSTICA	21-29

II. FUNDAMENTOS DE ACUSTICA FISICA APLICADOS AL CLARINETE

CAPITULO 3 ORIGEN Y PROPAGACION SONORA

3.1 Introducción	33-34
3.2 Génesis sonora	34-41
3.3 Propagación sonora	41-47
3.4 Longitud de onda	47-49
3.5 Forma de onda	50-54

CAPITULO 4 SENSACION SONORA

4.1 Introducción	55-56
4.2 Altura	56-57
4.3 Intensidad	57-63
4.3.1 Decibelio	58-59
4.3.2 Rango Dinámico	59
4.3.3 Límites de Audibilidad	60-61
4.3.4 Potencia Acústica	61
4.3.5 Presión Acústica	62
4.3.6 Intensidad Sonora	62-63
4.4 Timbre	64-65

CAPITULO 5 FENOMENOS Y ACCIDENTES ACUSTICOS IMPLICADOS EN EL PROCESO SONORO DEL CLARINETE

5.1 Las Interferencias	67-68
5.2 La Reflexión	69-70
5.3 Las Ondas Estacionarias	70-71
5.4 La Difracción	72
5.5 Las Pulsaciones	73
5.6 La oscilación forzada y la oscilación natural	73
5.7 La Resonancia	74
5.8 Las Bocinas	74-75

CAPITULO 6 *ESPECTRO ACUSTICO E IMPEDANCIA ACUSTICA*

6.1	Introducción	77-78
6.2	Espectro Acústico	78-79
6.3	Impedancia Acústica	79-83

III. FUNDAMENTOS DE ACUSTICA FISICO-MUSICAL APLICADOS AL CLARINETE

CAPITULO 7 *EL FENOMENO FISICO-ARMONICO: LOS ARMONICOS*

7.1	Introducción y generalidades	87-90
7.2	Escala de los armónicos: descripción y constitución	90-95
7.3	Intervalos de la escala de los armónicos	95-96
7.4	Características de los principales armónicos	96-98
7.5	Los armónicos en el clarinete tipo	98-109
	7.5.1 Generalidades y evolución	98-104
	7.5.2 Descripción y análisis	104-109

CAPITULO 8 *CONSTITUCION Y AFINACION DE LA ESCALA MUSICAL*

8.1	Introducción	111-112
8.2	Sistemas de afinación	112-116
8.3	Procedimiento para la obtención de las frecuencias de la escala	116-119
8.4	Aspectos generales y prácticos de la afinación	120-124

CAPITULO 9 *TUBOS SONOROS Y COLUMNAS AEREAS*

9.1	Descripción y propiedades acústicas	125-130
9.2	Influencia del material en el comportamiento de las columnas aéreas	130-131
9.3	Radiación sonora en tubos	131-133
9.4	Resonancia en los tubos	133-135
9.5	Mecánica vibracional	135-141
9.6	Sistemas acústicos acoplados en los instrumentos de viento madera	142-143

IV. ANALISIS ACUSTICO EXPERIMENTAL DEL CLARINETE

CAPITULO 10 *PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA EL ANALISIS DE LOS SONIDOS DEL CLARINETE*

10.1	Metodología y diseño experimental	147-149
10.2	Consideraciones y medidas preliminares generales	150-160

CAPITULO 11 *ANALITICA ACUSTICA DEL CLARINETE TIPO Sib*

11.1	Frecuencias y pulsaciones	161-175
	11.1.1 Medidas preliminares	161-162
	11.1.2 Resultados experimentales	163-171
	11.1.3 Análisis y discusión de los resultados obtenidos	172-175

11.2	Valoración de la afinación	175-180
11.2.1	Medidas preliminares	175-176
11.2.2	Resultados experimentales	177-180
11.3	Longitudes de onda y de tubo	181-188
11.3.1	Medidas preliminares	181
11.3.2	Resultados experimentales	182-186
11.3.3	Análisis y discusión de los resultados obtenidos	187-188
11.4	Espectrogramas y composición armónica	188-212
11.4.1	Medidas preliminares	188-189
11.4.2	Resultados experimentales	190-208
11.4.3	Análisis y discusión de los resultados obtenidos	209-212
11.5	Naturaleza sonora	212-220
11.5.1	Medidas preliminares	212-213
11.5.2	Resultados experimentales	214-217
11.5.3	Análisis y discusión de los resultados obtenidos	218-220
11.6	Armónicos válidos como notas de la escala	220-223
11.6.1	Medidas preliminares	220
11.6.2	Resultados experimentales	221
11.6.3	Análisis y discusión de los resultados obtenidos	222
11.7	Oscilogramas	223-237
11.7.1	Medidas preliminares	222-223
11.7.2	Resultados experimentales	224-235
11.7.3	Análisis y discusión de los resultados obtenidos	236-237
11.8	Recomendaciones generales de uso para la ejecución musical	237-238

V. ESTUDIO ORGANOLÓGICO Y ACÚSTICO DEL CLARINETE

CAPITULO 12 *LA FAMILIA DEL CLARINETE*

12.1	Reseña histórica y generalidades	241-243
12.2	Instrumentos transpositores	243-245
12.3	Descripción y características técnicas y acústicas de los componentes	246-255

CAPITULO 13 *SISTEMAS DE LLAVES*

13.1	Introducción	257
13.2	Sistemas base: Müller y Boehm	258-261
13.3	Sistemas y mejoras posteriores	261-265

CAPITULO 14 *DESCRIPCION Y FUNCION ACUSTICA DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA ACUSTICO DEL CLARINETE*

14.1	El tubo	267-271
14.2	La embocadura de lengüeta simple	271-277
14.3	Los orificios tonales	277-282
14.4	El orificio de registro	282-285
14.5	El barrilete	285-286
14.6	El pabellón	287-289

IV

CAPITULO 15 *FUNCIONAMIENTO ACUSTICO DEL CLARINETE*

15.1	Introducción y consideraciones	291-293
15.2	Funcionamiento acústico	293-296
15.3	Algunas cuestiones de interés práctico	296-298
15.4	Métodos para la obtención de sonidos en el clarinete	298-302

CAPITULO 16 *LA AFINACION EN EL CLARINETE*

16.1	Análisis y descripción	303-314
16.1.1	Introducción	303-304
16.1.2	El efecto de la corrección del extremo final	304-307
16.1.3	Influencia de las alteraciones en el tubo sobre la afinación	307-310
16.1.4	El efecto de la caña sobre la afinación	310-312
16.1.5	El efecto del tracto vocal sobre la afinación	312-314
16.2	Métodos correctores de la afinación en el clarinete	314-321
16.2.1	Introducción	314-315
16.2.2	Métodos exógenos	315-319
16.2.3	Métodos endógenos	320-321

CAPITULO 17 *EL TIMBRE Y LA CALIDAD TONAL DEL CLARINETE*

17.1	Introducción y consideraciones	323-326
17.2	Descripción y análisis	326-329

CAPITULO 18 *NOCIONES BASICAS PARA EL DISEÑO Y FABRICACION DE UN CLARINETE*

333-335

VII. CONCLUSIONES

<i>I. CONCLUSIONES</i>	339-350
<i>II. LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACION</i>	351-352

VIII. ANEXOS

ANEXO I. <i>FUNDAMENTOS DE ACUSTICA FISIOLOGICA</i>	355-360
ANEXO II. <i>FRECUENCIAS TEORICAS DE LA ESCALA DEL CLARINETE</i>	361-362
ANEXO III. <i>INDICES ACUSTICO-MUSICALES</i>	363-364
ANEXO IV. <i>SERIES ARMONICAS</i>	365-367
ANEXO V. <i>ESTRUCTURA MORFOLOGICA DEL CLARINETE</i>	369
ANEXO VI. <i>GRAFICO DE DIGITACION DEL CLARINETE</i>	371
ANEXO VII. <i>EXTENSION DEL CLARINETE</i>	373
ANEXO VIII. <i>CLASIFICACION DE LOS INSTRUMENTOS DE VIENTO MADERA</i>	375-377
ANEXO XI. <i>SINOPSIS DE LA HISTORIA Y EVOLUCION DEL CLARINETE</i>	379-383
ANEXO X. <i>LA CAMARA ANECOICA</i>	385-388

BIBLIOGRAFIA

<i>I. BIBLIOGRAFIA</i>	391-394
<i>II. REFERENCIAS Y RECURSOS ON LINE</i>	395

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

I. FIGURAS

- Fig. 2.1 Instrumentos antiguos
- Fig. 2.2 Modelos de Chalumeau
- Fig. 2.3 Extensión del Chalumeau
- Fig. 2.4 Modelo de clarinete de Denner (1700)
- Fig. 2.5 Modelo de clarinete de Denner (1720)
- Fig. 2.6 Extensión del clarinete de Denner
- Fig. 3.1 Movimiento oscilatorio rectilíneo
- Fig. 3.2 Movimiento oscilatorio curvilíneo
- Fig. 3.3 Representación gráfica del movimiento armónico con expresión de su Período y Amplitudes
- Fig. 3.4 Representación gráfica de la función seno del movimiento armónico
- Fig. 3.5 Movimiento vibratorio complejo
- Fig. 3.6 Simulación gráfica de una propagación sonora en el tubo del clarinete
- Fig. 3.7 Movimiento de una onda longitudinal
- Fig. 3.8 Movimiento de una onda transversal
- Fig. 3.9 Representación gráfica de una propagación sonora
- Fig. 3.10 Simulación gráfica de una propagación sonora esférica
- Fig. 3.11 Simulación gráfica de ondas planas en un tubo
- Fig. 3.12 Grado de agitación de las partículas en el interior del tubo del clarinete, emitiendo el sonido fundamental Mi_2
- Fig. 3.13 Desplazamiento y presión del aire en un tubo cilíndrico cerrado produciendo su tercer modo de resonancia
- Fig. 3.14 Longitud de onda y amplitud de una onda
- Fig. 3.15 Variación de la longitud de onda del sonido con la frecuencia
- Fig. 3.16 Variación de la longitud de onda (100 Hz) con la temperatura
- Fig. 3.17 Longitud de onda fundamental en el tubo del clarinete
- Fig. 3.18 Longitud de onda y frecuencia de la fundamental y su tercer y quinto armónico
- Fig. 3.19 Onda senoidal
- Fig. 3.20 Onda no senoidal emitida por el clarinete
- Fig. 3.21 Onda en dientes de sierra con expresión de la amplitud de los armónicos respecto de la fundamental
- Fig. 3.22 Onda triangular con expresión de las amplitudes de los armónicos respecto de la fundamental
- Fig. 3.23 Onda cuadrada con expresión de las amplitudes de los armónicos respecto de la fundamental
- Fig. 3.24 Oscilograma del Mi_2

- Fig. 3.25 Oscilograma del Si₃
 Fig. 3.26 Oscilograma del Do#₅
 Fig. 4.1. Movimiento armónico de un sonido grave y uno agudo
 Fig. 4.2 Variación del rango de frecuencias con la edad
 Fig. 4.3 Umbrales de audibilidad
 Fig. 4.5 Niveles de Presión Sonora
 Fig. 4.6 Definición gráfica de la Intensidad Sonora
 Fig. 5.1 Tipos de interferencias de dos ondas
 Fig. 5.2 Onda resultante de la superposición de dos sonidos
 Fig. 5.3 Representación gráfica de una reflexión sonora
 Fig. 5.4 Onda estacionaria resultante de la interferencia de una onda incidente y su refleja
 Fig. 5.5 Onda estacionaria originada mediante reflexión en el tubo del clarinete (primer parcial)
 Fig. 5.6 Difracción sonora
 Fig. 5.7 Bocina exponencial
 Fig. 5.8 Bocina cónica
 Fig. 6.1 Espectrograma del Mi₂
 Fig. 6.2 Espectrograma del Si₃
 Fig. 6.3 Espectrograma del Do#₅
 Fig. 6.4 Curva de impedancia para el Mi₂ (Wolfe, 2002)
 Fig. 6.5 Curva de impedancia para el Si₃ (Wolfe, 2002)
 Fig. 6.6 Curva de impedancia para el Do#₅ (Wolfe, 2002)
 Fig. 7.1 Representación musical de la serie armónica (Calvo-Manzano, 1991)
 Fig. 7.2 Escala del clarinete del sistema Boehm
 Fig. 7.3 Escala del clarinete según Gevaert (1887)
 Fig. 7.4 Escala de los 16 primeros armónicos del clarinete
 Fig. 7.5 Terceros armónicos
 Fig. 7.6 Quintos armónicos
 Fig. 7.7 Séptimos armónico
 Fig. 7.8 Novenos armónicos
 Fig. 7.9 Onceavos armónicos
 Fig. 8.1 Intervalos respecto de la tónica de la Escala de Aristógenes o Zarlino
 Fig. 8.2 Relaciones interválicas entre los diferentes grados de la escala de Do Mayor
 Fig. 9.1 Forma de la onda estacionaria en un tubo abierto emitiendo el sonido fundamental
 Fig. 9.2 Forma de la onda estacionaria en un tubo abierto emitiendo su segundo armónico
 Fig. 9.3 Forma de la onda estacionaria en un tubo abierto emitiendo su tercer armónico
 Fig. 9.4 Forma de la onda estacionaria en un tubo cerrado emitiendo el sonido fundamental
 Fig. 9.5 Forma de la onda estacionaria en un tubo cerrado emitiendo su segundo armónico
 Fig. 9.6 Forma de la onda estacionaria en un tubo cerrado emitiendo su tercer armónico
 Fig. 9.7 Modos de resonancia de los tres tipos de tubo
 Figs. 10.1/2 Dispositivo experimental
 Fig. 10.3 Muestras objeto de estudio con indicación de sus digitaciones
 Fig. 11.1 Espectrograma del Mi₂
 Fig. 11.2 Espectrograma optimizado del Mi₂
 Fig. 11.3 Armónicos válidos como notas de la escala expresados musicalmente.
 Fig. 12.1 Ejemplo de transposición musical

- Fig. 12.2 Altura real de la escala del clarinete soprano Sib obtenida mediante digitaciones básicas
- Fig. 12.3 Clarinetes utilizados actualmente
- Fig. 13.1 Diagrama de las medidas de las longitudes acústicas de la flauta de Boehm (Boehm, 1964)
- Fig. 13.2 Clarinete Sistema Muller (1812)
- Fig. 13.3 Clarinete Sistema Boehm (1850)
- Fig. 13.4 Clarinete Modelo Albert (1865)
- Fig. 13.5 Clarinete Modelo Clinton (1871)
- Fig. 13.6 Clarinete Modelo Albert (1875)
- Fig. 13.7 Clarinete Modelo Clinton (1899)
- Fig. 13.8 Clarinete Sistema Muller-Oehler (1900)
- Fig. 13.9 Clarinete Sistema Oehler (1902)
- Fig. 13.10 Clarinete Modelo Clinton-Boehm (1905)
- Fig. 13.11 Clarinete Sistema Boehm Buffet (1910)
- Fig. 13.12 Clarinete Modelo Schmidt (1912)
- Fig. 13.13 Clarinete Modelo Marchi (1960)
- Fig. 14.1 Clarinete con indicación de aberturas acústicas de su tubo
- Fig. 14.2 Primer modo vibracional del tubo del clarinete
- Fig. 14.3 Segundo modo vibracional del tubo del clarinete
- Fig. 14.4 Tercer modo vibracional del tubo del clarinete
- Fig. 14.5 Cuarto modo vibracional del tubo del clarinete
- Fig. 14.6 Quinto modo vibracional del tubo del clarinete
- Fig. 14.7 Embocadura del clarinete
- Fig. 14.8 Partes integrantes de la embocadura
- Fig. 14.9 Estructura de una lengüeta
- Fig. 14.10 Posición inicial de la caña 0°
- Fig. 14.11 Posición de entrada de aire
- Fig. 14.12 Posición de 90° -1/4 de ciclo-. Reflexión en el extremo abierto
- Fig. 14.13 Posición de 180° -1/2 ciclo-. Reflexión en el extremo cerrado
- Fig. 14.14 Posición de 270° -3/4 ciclo-. Reflexión en el extremo abierto
- Fig. 14.15 Posición de 360° -1 ciclo-
- Fig. 14.16 Espectrograma de un sonido emitido con la boquilla en *piano*.
- Fig. 14.17 Espectrograma de un sonido emitido con la boquilla en *forte*.
- Fig. 14.18 Ubicación aproximada de los orificios tonales en el clarinete sistema Boehm
- Fig. 14.19 Ilustración de la corrección del extremo final
- Fig. 14.20 Longitud de onda efectiva para diferentes diámetros de orificio en un cilindro
- Fig. 14.21 Llave portavoz (n° 12)
- Fig. 14.22 Onda estacionaria para el Do_4 , Fa_4 y Do_5
- Fig. 14.23 Onda estacionaria para el Fa_4 y Do_5
- Fig. 14.24 Onda estacionaria para el Do_5
- Fig. 14.25 Barrilete
- Fig. 14.26 Pabellón
- Fig. 14.27 Curva de impedancia para dos tubos, uno de ellos con pabellón
- Fig. 14.28 Espectrograma del Mi_2 obtenido con la adición de la campana
- Fig. 14.29 Espectrograma del Mi_2 obtenido sin la adición de la campana

VIII

- Fig. 15.1 Simulación virtual del funcionamiento acústico del clarinete emitiendo un sonido fundamental y su tercer armónico
- Fig. 15.2 Escala cromática del clarinete obtenida con digitaciones básicas y generalizadas con expresión de la naturaleza de sus sonidos y su vinculación
- Fig. 16.1 Curva de impedancia del La_2 (Wolfe, 2002)
- Fig. 16.2 Curva de impedancia para el Mi_2 emitido con una caña dura y una blanda
- Fig. 16.3 Espectrograma del Sol_5 emitido con una caña blanda
- Fig. 16.4 Espectrograma del Sol_5 emitido con una caña dura
- Fig. 16.5 Digitación normal del Do_3
- Fig. 16.6 Digitación cruzada del Si_2
- Fig. 16.7 Digitación normal del Mi_5
- Fig. 16.8 Digitación cruzada del Mib_5
- Fig. 17.1 Curva de impedancia del Do_3 (Wolfe, 2002)
- Fig. 17.2 Espectrograma del Mi_2 emitido en dinámica de piano
- Fig. 17.4 Espectrograma del Mi_2 emitido en dinámica de forte
- Fig. 17.3 Espectrograma del Si_3 emitido en dinámica de piano
- Fig. 17.5 Espectrograma del Si_3 emitido en dinámica de forte
- Fig. 17.6 Espectrograma del Mi_2
- Fig. 17.7 Espectrograma del Sib_3 (1)
- Fig. 17.8 Espectrograma del Si_3 (1)
- Fig. 17.9 Espectrograma del $Do\#_5$ (1)
- Fig. 17.10 Espectrograma del Sol_5
- Fig. 17.11 Espectrograma del Si_5
- Fig. I.I Anatomía del oído humano
- Fig. I.II Estructura de los huesecillos del oído medio
- Fig. I.III Corte transversal de la cóclea o caracol
- Fig. III.I Extensión de la escala general
- Fig. III.II Notación musical de la escala cromática del clarinete según el índice acústico musical franco belga
- Fig. V.I Gráfico del clarinete con indicación de la numeración de sus llaves y orificios
- Fig. VI.I Gráfico de digitación
- Fig. VII.I Extensión del clarinete con expresión de sus frecuencias, registros y naturaleza
- Fig. X.I Sala Cremer
- Fig. X.II Sala Wedge (Sala anecóica del Dpto. de Física Aplicada de la Universidad Politécnica de Valencia)
- Figs. X.III/IV Dispositivo de medición de una sala anecóica

II. TABLAS

Tabla 7.1 Intervalos de la serie armónica

Tabla 7.2 Orden de consonancia de los intervalos

Tabla 7.3 Orden de consonancia de los acordes

Tabla 9.1 Relación de la velocidad del sonido con la temperatura

Tabla 11.1 Frecuencias teóricas y experimentales de las muestras analizadas

Tabla 11.2 Pulsaciones resultantes entre la frecuencia teórica y la experimental de las muestras analizadas

Tabla 11.3 Valoración de la afinación

Tabla 11.4 Longitudes de onda y de tubo real de las muestras analizadas

Tabla 11.5 Espectrogramas de las muestras analizadas

Tabla 11.6 Composición armónica de las muestras analizadas

Tabla 11.7 Naturaleza de las muestras analizadas

Tabla 11.8 Armónicos válidos como notas de la escala

Tabla 11.9 Oscilogramas de las muestras analizadas

Tabla 12.1 Clasificación de la familia

Tabla 12.2 Características técnicas y acústicas de la familia del clarinete

Tabla 14.1 Frecuencias experimentales -y teóricas- de las notas Sol₃, Sol#₃, La₃ y La#₃, Si₄ y Do₅ (a 445 Hz) extrayendo y sin extraer el barrilete

Tabla II.I Frecuencias de la escala del clarinete a 440, 442 y 445 Hz

Tabla III.I Índices acústico musicales más empleados

Tabla IV.I Series armónicas de los sonidos de la escala del clarinete

Tabla VIII.I Clasificación genérica de los instrumentos de viento madera

Tabla IX.I Sinopsis de la historia y evolución del clarinete

PRESENTACION



I. CONTEXTUALIZACION Y JUSTIFICACION

La organología y acústica de los instrumentos musicales es una de las disciplinas que menos se investiga -especialmente por los músicos-, al contrario de lo que sucede con otras ramas de la acústica. Efectivamente, la actividad investigadora sobre la acústica musical no ha experimentado el crecimiento de otros campos de la acústica. Es posible que la razón estribe en la poca simpatía que profesan los músicos a la ciencia física o, simplemente, que el músico prefiera la interpretación musical al estudio de estos temas. No olvidemos, también, que la acústica musical requiere el concurso de dos materias muy distintas: la música y la ciencia y que por tanto ambas deben complementarse para avanzar en cualquier estudio de esta índole. En este sentido, debe ser el músico quien lleve la iniciativa en esta empresa, dado que, obviamente, el físico raramente se interesa por estos temas.

Las causas del funcionamiento acústico del clarinete se conocen de forma vaga e imprecisa por la mayor parte de la comunidad musical, aunque su estudio científico ya se ha desarrollado en algunas universidades. Aunque se tratan someramente en algunos manuales de acústica musical y libros monográficos sobre el clarinete, algunas cuestiones se dan por sentado convencionalmente por la acústica tradicional con escasa base científica. Así, varias son las dudas que albergan los músicos en relación con el funcionamiento acústico de sus instrumentos, especialmente en nuestro país, donde la investigación en este campo es prácticamente inexistente.

Los instrumentos de viento madera se han desarrollado empíricamente. En su origen los avances fueron notables, especialmente el desarrollo de mecanismos para el cierre de agujeros. La música también evoluciona en consonancia con estos avances y los

compositores inmediatamente los toman en consideración. Actualmente, no hay ningún acontecimiento espectacular en la sección de instrumento de viento madera. Todavía se están perfeccionando los diseños viejos.

La investigación sobre el funcionamiento acústico de los instrumentos musicales ha sufrido un proceso de desarrollo considerable desde que se llevarán a cabo en los siglos XV y XVI los primeros estudios científicos sobre el temperamento de los instrumentos de teclado a cargo de los teóricos Salinas y Ramos de Pareja. También fue en esta época cuando Zarlino (1517-1590), uno de los teóricos musicales más relevantes del panorama renacentista, inventó su escala inspirada en la de los físicos y basada en la serie armónica, uno de los avances más importantes en la acústica de los instrumentos de viento. Asimismo, el descubrimiento de la teoría matemática de los tubos sonoros de Bernoulli esclareció muchos interrogantes y permitió avanzar considerablemente en el estudio acústico de estos instrumentos.

La investigación científica sistemática de instrumentos musicales no se inició antes del final del siglo XIX. Podemos mencionar a Von Helmholtz, Rayleigh y Bouasse como los precursores del estudio de la acústica moderna de los instrumentos musicales. Asimismo, esta centuria fue decisiva para consolidar y fundamentar la acústica musical moderna con diversos estudios sobre el timbre y los armónicos que fueron posibles gracias al uso de diversos aparatos que permitían analizar los sonidos musicales. Cabe citar, a este respecto, al físico Ohm, Tyndall, Helmholtz, Koenig, etc. Posteriormente el estudio organológico de los instrumentos a finales del siglo XIX y principios del XX de Gevaert, Sachs o Hornsbostel permitieron dilucidar muchas cuestiones, además de clasificarlos en orden a su forma y acústica.

Los instrumentos de viento madera más tempranos consistieron en un tubo con seis orificios, lo cual les permitía emitir precariamente una octava. Por sobresoplado, la escala podría ser ampliada a una octava a las frecuencias más altas. El clarinete es el único instrumento que se comporta de manera diferente: el sobresoplado u octaveo se realiza a la doceava -octava más quinta- en lugar de a la octava. Cuando se requería, los semitonos se obtenían por la cobertura parcial del agujero o cerrando uno o más agujeros por debajo del orificio abierto alto, lo que se conoce actualmente como digitación cruzada -véase el subapartado 16.2.2-. Como los resultados no eran satisfactorios, durante los siglos XVII y XVIII se montaron varias llaves suplementarias para ser accionadas con los dedos que se encontraban libres. El resultado era un sistema poco práctico de tocar con impurezas marcadas. En 1812 encontramos el primer punto de inflexión de la evolución del clarinete con la irrupción del revolucionario sistema Müller de trece llaves. Posteriormente, un flautista llamado Theobald Boehm inventa un mecanismo ingenioso para la flauta, que consistió en un radical cambio del taladro y la posición y el tamaño de los orificios tonales. Este diseño permanece vigente actualmente en el empleo general sin alteraciones importantes. Este sistema inspiró a un clarinetista de la época, Klosé, para desarrollar un mecanismo clave para el clarinete -alrededor de 1843-, al que denominaron sistema Boehm y que gradualmente ha ganado el reconocimiento como el mejor y mecánicamente más simple y práctico.

Es a partir de la implantación del sistema Boehm en el clarinete cuando los intérpretes y los constructores de instrumentos, alentados por los hallazgos de la ciencia, comienzan a interesarse no solo por los problemas técnicos de digitación sino también por estos temas. Las innovaciones se suceden de forma intermitente a lo largo del último siglo

pero los principales problemas acústicos que presenta por su condición de octaveador a la doceava, aunque logran neutralizarse, no son superados de forma óptima. Los sistemas Albert, Lefevre, Stark, Clinton, Schmidt, Romero, Oeheler, Mazzeo, Marchi, inspirados en el sistema Müller y/o Boehm, lo intentan pero no logran consolidarse. En resumidas cuentas, se podría afirmar que si bien el clarinete ha evolucionado considerablemente desde el punto de vista técnico en las dos centurias posteriores a su invención, desde el punto de vista acústico, aunque se han alcanzado puntuales logros, no ha habido cambios espectaculares.

En el último medio siglo parece haberse asumido por la comunidad clarinetística que el clarinete por su especial funcionamiento acústico presenta ciertos problemas de afinación y timbre que le son inherentes y que, lejos de resultar una minusvalía acústica, constituyen la particular excelencia del instrumento además de conferirle ciertas ventajas en relación con sus homólogos de la orquesta -que serán objeto de estudio a lo largo del trabajo-. Se plantea aquí una cuestión de indudable interés: ¿compensan más las ventajas técnico-acústicas que pueden aportar las innovaciones técnicas en el clarinete que los efectos secundarios que llevan asociados? En mi opinión, conviene estudiar y combatir los inconvenientes para perfeccionarlo acústicamente, pero sin adoptar cambios radicales que puedan desvirtuar su particular idiosincrasia.

Así todo, las nuevas tecnologías y los innovadores medios que aporta la física acústica han estimulado el interés de algunos músicos y científicos a investigar estos temas. En efecto, el asunto está siendo objeto de investigación en algunas universidades extranjeras, aunque en nuestro país todavía no se ha iniciado su estudio de forma rigurosa. En este sentido se han desarrollado algunos estudios en universidades de todo el mundo y otros están siendo objeto de investigación por magníficos científicos. Entre ellos cabe reseñar los siguientes: Backus (1961) estudia la acción de la caña del clarinete. Además, desarrolla una ingente labor investigadora en el campo de la acústica de los instrumentos de viento madera y, especialmente, del clarinete; Mercer Cremer, Ising y Coltman han investigado los mecanismos sopladores de flautas y tubos de órgano; Boehm (1991) fue el primero en estudiar los cálculos de las posiciones más idóneas de los orificios tonales, pero posteriormente Bouasse, Richardson y Benade dieron una base teórica firme a estos cálculos -es muy recomendable la lectura del libro de este último autor, *Fundamentals of Musical Acoustics*, publicado en 1990 por Dover-; Benade, además, es uno de los investigadores más fecundo en estos temas, en especial, en el diseño del clarinete ideal; Nederveen -Delft University- ha ampliado este método a un tubo con muchos agujeros, aplicándolo a clarinetes y oboes -sus resultados científicos están publicados en su manual técnico *Acoustical Aspects of Woodwind Instruments* publicado en 1969 por Frits Knuf-. Posteriormente, en 1995, Daltmon actualiza los estudios de Nederveen; Joe Wolf -University of New South Wales de Sydney- realiza un formidable estudio sobre la acústica del clarinete mediante el cálculo de la impedancia de entrada en el clarinete y su espectro sonoro; Neville Fletcher, de la Universidad Nacional Australiana, y Thomas Rossing, de la Northern Illinois University, publican un completo estudio en 1998 sobre la física de los instrumentos musicales de gran utilidad para los investigadores; Murria Campbell y Clive Great son autores de una guía completa para los músicos sobre acústica -uno de los pocos libros de acústica dedicados al músico, con un lenguaje menos técnico que el resto-; el trabajo de Lee Gibson (1998) sobre la acústica del clarinete, publicado por Indiana University Press, es el único tratado que se ocupa de forma específica de la acústica del

clarinete con un enfoque más didáctico. Más recientemente, Schumacher, Sommerfeld y Gazengeld (1988) han estudiado el clarinete de forma exhaustiva por simulación de computadora.

El objetivo de estas investigaciones científicas se centra en encontrar un método para calcular las posiciones idóneas y el tamaño de los agujeros del clarinete, lo cual puede ser útil para diseñar un instrumento nuevo o cambiar uno ya existente modificando el diámetro y ubicación de algún orificio para corregir determinados tonos anómalos o agregando orificios extra para trinos. Sin embargo, se corre el riesgo de desequilibrar la balanza cromática o de estropear otros tonos. Asimismo, otro aspecto importante en el diseño de un clarinete se centra en corregir las discrepancias en la afinación causados por un solo orificio de registro que sube la frecuencia del segundo modo en ambos finales de la escala del segundo registro. Se persigue, pues, el diseño del clarinete ideal, tarea harto compleja por las particularidades que comporta la acústica del clarinete.

Hemos reseñado algunos estudios en este sentido, sin embargo, estos trabajos son insuficientes si se comparan con los realizados en cualquier otro campo de la acústica. Las razones de esta carencia de trabajos hay que buscarlas en varios frentes.

En primer lugar, la asociación del músico con el físico es vital para avanzar en el estudio de estos temas dado que cada uno de ellos debe aportar conocimientos diferentes pero necesarios para la investigación. El primero, con sus conocimientos sobre la acústica física, debe fundamentar todos los fenómenos acústicos y asesorar al músico en la resolución de las cuestiones físicas, amén de facilitar el dispositivo técnico con la tecnología más actual para la experimentación. El segundo, por su parte, debe aportar sus conocimientos musicales en el campo de la teoría y la acústica musical y, lo más importante, el objeto de la investigación, su instrumento y el conocimiento sobre él. Dada la poca simpatía que profesan los músicos a la ciencia física, se encontrará normal que esta relación sea prácticamente inexistente. Además, el músico es reacio a investigar estos temas, generalmente por su desconocimiento de la acústica física y musical y, también, porque su finalidad es la ejecución musical, la expresión de los sonidos, no su estudio. Efectivamente, el intérprete rara vez se detiene a indagar en los procesos de producción y propagación del sonido que emite su instrumento. Eso le llevaría a perderse en una maraña de ecuaciones matemáticas y físicas de compleja resolución que le tendría ocupado gran parte del tiempo disponible para la práctica de su estudio diario. Por esta razón, la mayoría de las veces pospone esa tarea dado que a fin de cuentas lo importante es interpretar, eso es lo que quiere el músico, tocar. Por esta razón, cualquier estudio en este sentido, para ser bien acogido por la comunidad musical, debe estar dirigido a la práctica musical. No debe limitarse a analizar y estudiar la acústica del instrumento sino que debe de ir más allá, buscando aplicaciones de interés musical que puedan ser útiles para el músico. Además, lo que es más importante, debe utilizar un lenguaje que el músico pueda comprender, dado que los estudios que se han desarrollado suelen emplear un lenguaje técnico que el músico desconoce.

En segundo lugar, el investigador se encuentra con el problema añadido de que la bibliografía a este respecto es frugal y no va más allá de ciertos principios y generalidades aceptados uniforme y convencionalmente. Muchos de estos principios fueron producto de diversos estudios experimentales, realizados con artefactos rudimentarios y de forma empírica, que se han ido estableciendo y consolidando a lo largo de los últimos tiempos. Además, en ocasiones, determinados manuales adolecen de ciertos dogmatismos, esto es,

dan por sentado ciertas cuestiones pero en ocasiones no se analizan detenidamente sus razones. La falta de un estudio riguroso ha propiciado el establecimiento de ciertos tópicos y convenciones sobre el asunto que en la mayoría de los casos son poco esclarecedores y generan cierta confusión entre la comunidad. Por otra parte, es difícil que algún estudio de estas características se publique por las reticencias de las editoriales musicales al poco interés que suscitan estos temas en la comunidad musical.

Existen media docena de libros aproximadamente en habla inglesa -no hay ninguno en lengua castellana- que se ocupan de la acústica del clarinete en alguno de sus apartados y solo uno lo trata de manera específica. El caso es que cada uno de ellos omite algún aspecto y algunos se limitan a recoger los contenidos sobre estos temas que aportan los manuales de acústica física sin ninguna aplicación práctica. Además, muchos de ellos -excepto los que se han citado anteriormente- adolecen de una parte experimental o, en el caso de aportarla, tiene un marcado carácter técnico que resulta estupefaciente para el músico. Son escasos los trabajos en este menester publicados con un enfoque más musical y didáctico que puedan tener una aplicación práctica para los músicos. No me constan, en este sentido, trabajos donde se hayan aislado, catalogado y analizado todos los sonidos potenciales que puede emitir el clarinete identificando sus componentes, o estudios donde se analice el funcionamiento del instrumento con rigor aportando aplicaciones musicales o, cuanto menos, no han sido publicados. En definitiva, lo que persigue el músico no es ni más ni menos que perfeccionar y optimizar el rendimiento de su instrumento para aplicarlo a la ejecución musical sin que ello suponga importantes cambios en la técnica que tanto le ha costado dominar. Urge, por consiguiente, llevar a cabo un estudio de estas características.

En tercer lugar, se encuentra el problema antes aludido de los fabricantes de instrumentos que deben aplicar estas innovaciones. Como los instrumentos empíricamente diseñados son satisfactorios, siempre ha habido una carencia de interés comercial a la investigación de los instrumentos. Los constructores de instrumentos guardan celosamente sus conocimientos sobre la acústica de sus instrumentos y no suelen revelarlos, así que el investigador debe prescindir de esa valiosa ayuda y experimentarlo por sí mismo. Por otra parte, no ven con buenos ojos cualquier propuesta innovadora debido, por una parte, a la incertidumbre que genera la acogida por parte de los músicos reacios a cambios radicales en su técnica y, también, porque su aplicación supone un alto coste que no siempre están dispuestos a soportar. Piénsese que, por lo general, estas empresas de fabricación eran -y algunas son todavía- pequeñas y tradicionales y no suelen tener contacto con el científico. Además, la aplicación de estos estudios resulta muy compleja y suele tener efectos secundarios serios, como se comprobará en el curso del Trabajo. No obstante, en la actualidad se tiende cada vez más hacia la producción en serie con empresas multinacionales, lo cual se espera que redunde en la calidad de los instrumentos.

Con este panorama, la otra línea de investigación la constituye la optimización de la acústica del clarinete mediante el concurso del ejecutante, desde el conocimiento y la comprensión del proceso sonoro que acontece en el clarinete. Dado que el clarinete deviene en una extensión del clarinetista y, por tanto, éste incorpora los reflejos propios de tal situación, es lógico pensar que se le deba requerir un conocimiento pleno sobre el funcionamiento técnico pero también acústico de su instrumento. Se trata, por tanto, de trabajar con el clarinete actual en mejorar sus prestaciones, sin menoscabo, por supuesto, de cualquier innovación técnica que no suponga cambios severos en su técnica, ni pueda modificar su particular timbre. Piénsese que la mayoría de literatura clarinetística ha sido

concebida para este clarinete y su especial timbre. Si se le suministra al clarinetista un instrumento perfecto, lo más posible es que vea limitadas sus capacidades técnicas, su sentido de la afinación y, en definitiva, su desarrollo integral. Además quedaría desvirtuado su característico timbre que tanto le singulariza.

No se quiera ver aquí una oposición a la primera línea de investigación descrita en el curso de este apartado, no. Ambas líneas de estudio deben complementarse de tal forma que no sea posible avanzar sin el concurso ineludible de alguna de ellas.

Así pues, se va a tratar de estudiar el funcionamiento acústico del clarinete analizando todos y cada uno de los fenómenos implicados, buscando aplicaciones de interés musical que puedan coadyuvar a mejorar el rendimiento acústico del instrumento. Se espera, pues, que el resultado de la investigación proporcione una guía útil para la comunidad clarinetística.

II. OBJETIVOS

El estudio de la música se puede llevar a cabo en cuatro grandes disciplinas diferenciadas, pero integradoras, a saber: el estudio histórico, la teoría y el análisis musical, la interpretación y el estudio de los sonidos. No es menester decir aquí que el análisis musical y la interpretación son las más estudiadas por los músicos a lo largo de la historia. Sin embargo, el estudio de los sonidos y de los instrumentos musicales -la acústica musical y la organología- raramente merece la atención del músico. El presente Trabajo va a desarrollar una línea de estudio e investigación en esta disciplina. En concreto, se va a llevar a cabo un estudio y análisis sobre la acústica y la organología del clarinete.

Dado que, como hemos argumentado en el apartado precedente, ya se han llevado a cabo estudios para el diseño de un clarinete ideal -aunque no han sido aplicados-, el objeto del presente trabajo no será éste, sino el de analizar y estudiar el funcionamiento del instrumento y su acústica para optimizar las prestaciones del instrumento, buscando, asimismo, aplicaciones prácticas de interés musical. Se va a tratar de compilar y trufar todos los aspectos relacionados con la acústica del clarinete en un solo manual, con especial atención a la parte experimental donde se llevará a cabo el análisis acústico de la secuencia completa de sonidos susceptibles de ser emitidos, identificados, aislados -entiéndase solo los armónicos, no los sonidos fundamentales- y catalogados, esto es, su mapa acústico. Esta información nos proporcionará respuesta a numerosos interrogantes y, lo que es más importante, nos permitirá combatir las minusvalías e imperfecciones acústicas que presenta nuestro instrumento, así como prevenir ciertos accidentes frecuentes en la interpretación, optimizando así su rendimiento acústico. Por otra parte, esto nos permitirá estudiar la

afinación y el timbre del instrumento para tratar de corregir las discrepancias que se producen en ciertos tonos, fundamentando científicamente estas anomalías y aportando métodos de corrección. Se pretende, en suma, realizar un tratado o guía específica sobre la acústica del clarinete que tenga una vocación no solo científica, sino también pedagógica. En este sentido, se pretende llevar a cabo un análisis exhaustivo de todos los sonidos emitibles mediante una serie de parámetros que permitan establecer unas conclusiones que esclarezcan ciertas cuestiones de indudable interés para el clarinetista.

Se persigue, pues, la optimización de la acústica del instrumento desde el conocimiento y comprensión de su funcionamiento acústico. Se va a tratar de resolver y fundamentar de una forma didáctica muchas cuestiones en las que el intérprete no suele reparar -y, si lo hace es de soslayo- que son de vital importancia para comprender como se desarrolla el proceso sonoro en el clarinete. Muchos son, en este sentido, los interrogantes que se plantean: ¿Cómo se lleva a cabo el proceso sonoro en el clarinete?, ¿Cuáles son los mecanismos que hacen posible la producción y propagación del sonido en el clarinete?, ¿Qué factores determinan el timbre de un instrumento, en nuestro caso el clarinete, y por qué se producen esas discrepancias de timbre tan marcadas entre los diferentes registros?, ¿Mediante qué procedimientos se obtienen los diferentes sonidos en el clarinete?, ¿Por qué suena de un modo determinado y no de otro, diferenciándose así de otros instrumentos análogos? ¿Por qué la emisión de algunos armónicos resulta tan complicada o incluso imposible y otros tienen frecuencias imprecisas?, ¿Cuáles son las causas de la imprecisa afinación del clarinete y de su heterogéneo timbre?, ¿Qué es lo que provoca el temible pitido?, etc.

Cualquier clarinetista se ha planteado estas cuestiones, sin embargo dado lo arisco del tema, de ordinario se soslayan puesto que su respuesta requiere cierto tiempo de estudio y comprensión, mientras que en la práctica del instrumento la respuesta es más inmediata y satisfactoria. De modo que su estudio se lleva a cabo de una forma somera, sin profundizar, sobre la base de ciertos estudios y convenciones generales relativas a la acústica musical, pero con escasa base científica. Además, algunas de estas cuestiones son de compleja resolución.

Es frecuente que en el curso de una interpretación se produzcan ciertos accidentes cuya génesis y naturaleza el instrumentista desconozca. Así, una disfunción acústica de nuestro instrumento, inducida por un incorrecto uso del ejecutante, suele provocar la emisión de ciertos pitidos que deslucen el resultado que se persigue. También suele ocurrir a menudo que se produzcan ligeras e incluso sensibles discrepancias de timbre y afinación por un desconocimiento del funcionamiento acústico del instrumento y de las particularidades de las series armónicas naturales y del temperamento igual.

Ordinariamente solemos asociar estos problemas con una cierta insolencia técnica del ejecutante unido a las deficiencias acústicas que presenta el instrumento. La resolución de esos problemas se lleva a cabo en la mayoría de los casos de forma mecánica y sobre la base de ciertos convencionalismos establecidos a lo largo de la historia del instrumento. En mi opinión, el problema se debe cortar de raíz, y ello solo puede realizarse si se conocen las causas que lo motivan de forma científica.

Personalmente considero que el conocimiento de estas cuestiones redundará en beneficio del clarinetista, aunque en ocasiones les resulten poco gratas por la complejidad que comportan. Es indudable que si conoce el funcionamiento acústico de su instrumento así como sus posibilidades sonoras, podrá resolver ciertas cuestiones que coadyuvarán

positivamente en su aprendizaje y formación musical. Si conocemos cómo se constituye el sonido en nuestro instrumento y mediante qué procedimientos se obtienen las diferentes notas de la escala cromática podremos perfeccionar muchos aspectos relacionados intrínsecamente con estas cuestiones y dar respuesta a numerosos interrogantes. Las aplicaciones prácticas, en este sentido, son numerosas: la corrección de la afinación, variar el color de un determinado sonido en aras de una mayor expresividad, el uso de digitaciones auxiliares para obtener mayor resonancia en el tubo, mitigar las diferencias acústicas entre los diferentes registros, obtener determinados efectos sonoros muy demandados en la música contemporánea, homogeneizar los sonidos por mor de exigencias interpretativas, etc. En fin, se trata de ampliar nuestro conocimiento sobre el instrumento para obtener un mejor rendimiento.

A continuación se enuncian, de forma resumida, los objetivos que se pretenden alcanzar con el estudio:

- Optimizar las prestaciones técnico-acústicas del clarinete.
- Estudiar y analizar todos y cada uno de los aspectos relacionados con la acústica del clarinete: origen y propagación sonora, fenómenos acústicos implicados, armónicos, afinación, tubos sonoros, obtención de sonidos, constitución de su escala, familia, sistemas de llaves, funcionamiento acústico, etc.
- Catalogar y analizar todos los sonidos que emite el clarinete mediante diversos parámetros físicos y musicales: naturaleza y origen del sonido, digitaciones, serie armónica, frecuencia, componentes armónicos, longitud de onda y de tubo, onda estacionaria, espectrograma, oscilograma, etc.
- Investigar y estudiar las posibilidades sonoras del clarinete.
- Estudiar el timbre y la afinación del clarinete para su optimización en la ejecución musical, analizando la influencia de todos los fenómenos implicados.
- Establecer unas conclusiones que permitan esclarecer ciertas cuestiones relativas a la acústica del clarinete y que puedan tener su aplicación práctica en el trabajo diario de estudiantes, intérpretes y docentes, a saber:
 - Resolución y fundamentación de los principales accidentes y disfunciones acústicas que se plantean en la ejecución musical.
 - Fundamentación y corrección de los problemas comunes de afinación.
 - Resolución de problemas técnicos relacionados con la digitación.
 - Problemas relacionados con la heterogeneidad del timbre.
- Aportar una herramienta útil de trabajo para la comunidad clarinetística.

II. METODOLOGIA Y ORGANIZACION

Para conseguir los objetivos previstos se ha desarrollado un estudio de campo consistente en analizar los trabajos más recientes en el tema objeto de estudio, y un análisis experimental del funcionamiento acústico del instrumento y de las propiedades acústicas de ciertos elementos de su sistema acústico. Para ello, el presente trabajo se ha estructurado en cinco partes generales.

La Primera Parte del Trabajo constituye la Introducción, donde se presenta una reseña de Acústica Musical y la historia y evolución del clarinete y su acústica. Estos contenidos se consideran de interés para contextualizar el tema que se va a estudiar.

Para alcanzar los fines que se persiguen es menester clarificar y comprender algunos conceptos generales de acústica física relativos a la producción y propagación del sonido sin el concurso de los cuales sería estéril ahondar en el tema. Es por esto por lo que en la Segunda Parte del estudio se analizan las cuestiones de física acústica que se consideran más relevantes para el desarrollo ulterior del estudio. Asimismo, en esta parte se analizan todos los fenómenos implicados en el proceso sonoro del clarinete y algunos de los parámetros que se emplean en la parte experimental, a saber: la forma de onda, la longitud de onda y el espectro sonoro. Aunque algunos de estos contenidos puedan parecer obvios para el físico, resultan necesarios por el carácter interdisciplinar del estudio.

En la Tercera Parte se desarrolla un estudio acerca de los fundamentos de Acústica Físico-Musical implicados en el tema que se investiga. Esta parte es de suma importancia dado que los contenidos y conceptos tratados en ella están directamente interrelacionados con la mayoría de los capítulos. Se estructura en tres capítulos: el primero se ocupa de los armónicos, donde se describe y constituye su escala, sus intervalos, sus características, y se analizan y describen los armónicos del clarinete tipo; el segundo trata de la escala musical, su constitución y su afinación. En él se aporta el procedimiento para la obtención de frecuencias y se estudian los aspectos prácticos que atañen a la afinación; el tercero, estudia

los tubos sonoros y las columnas aéreas. Este capítulo está considerado de especial relevancia dada la naturaleza del estudio. Así, se describen sus propiedades acústicas y todos los fenómenos inherentes a las columnas aéreas, así como sus modos vibracionales.

La siguiente parte -la Cuarta- constituye la sección experimental donde se analizan los sonidos del clarinete. Asimismo, en esta parte se llevan a cabo diversos experimentos para estudiar las propiedades acústicas de determinados elementos del sistema acústico del clarinete con el fin de estudiar su optimización desde el punto de vista de la afinación y el timbre. Para ello se ha establecido la siguiente metodología: (1) medición y registro de las muestras objeto de estudio; (2) resultados experimentales obtenidos; (3) análisis y discusión de los resultados experimentales obtenidos. Además, se aportan las aplicaciones prácticas que se consideran más relevantes para la ejecución musical.

Para el desarrollo de esta parte, se procede al análisis de varias muestras acústicas mediante un programa informático. Previamente se efectúan, en varias sesiones, las mediciones acústicas oportunas en la cámara anecoica del laboratorio del Departamento de Física Aplicada de la Universidad Politécnica de Valencia. El dispositivo técnico utilizado, así como el procedimiento experimental se describe en el Capítulo 10. Se trata de aislar, analizar y catalogar todos y cada uno de los armónicos de cada sonido fundamental susceptibles de ser emitidos. El análisis se lleva a cabo obteniendo y estudiando los parámetros que se han considerado más relevantes para el fin que se persigue. Para ello, se ha procedido mediante la respuesta frecuencial y espectral de varias muestras acústicas emitidas en un ambiente anecoico.

En la Quinta Parte, considerada la matriz del estudio junto con la experimental, se efectúa un estudio riguroso sobre la acústica del clarinete mediante el análisis de las aportaciones más recientes en este menester. En esta parte, el material experimental obtenido se emplea para determinar y fundamentar las razones de los numerosos problemas que se plantean en la ejecución musical -afinación imprecisa, disfunciones acústicas, timbre heterogéneo, etc.- y dar respuesta a numerosas cuestiones relacionadas con el funcionamiento acústico del clarinete. Los dos primeros capítulos de esta parte se ocupan de la familia del clarinete y de los sistemas de llaves, aspectos considerados de especial interés para complementar el estudio acústico del instrumento. Se puede decir que los restantes son los más importantes del estudio. En ellos se aplican los resultados experimentales al estudio de campo realizado para complementarlo. Así, se estudian y analizan los elementos de su sistema acústico, su funcionamiento acústico del clarinete, su afinación y su timbre, tratando de fundamentar científicamente todos y cada uno de los aspectos tratados. Finalmente se aportan, en el último capítulo, algunas normas básicas para el diseño y fabricación de un clarinete.

En la siguiente parte se aportan las conclusiones derivadas del estudio de campo y del análisis experimental efectuado, y se proponen algunas líneas futuras de investigación.

Finalmente, los Anexos completan el Trabajo. Dado el carácter interdisciplinar de la Tesis, se ha optado por incluir algunos anexos que, aunque puedan parecer obvios e improcedentes para alguna de las disciplinas intervinientes, resultan necesarios para completar la información acerca del objeto del estudio.

Asimismo, debido a que el destinatario último de este trabajo lo constituye el músico y considerando sus lagunas en las cuestiones de acústica física, se ha optado, en aras de una mejor comprensión, por emplear un lenguaje que soslaye, en la medida de lo posible, las ecuaciones matemáticas y los conceptos técnicos.

I. INTRODUCCION

BREVE RESEÑA HISTORICA DE ACUSTICA MUSICAL



Concierto en La K.622 para Clarinete y Orquesta. Mozart (1758-1791)

El concepto de *Acústica*, del griego *Akoustikos*, designa una parte de la Ciencia Física que se ocupa del estudio del sonido y sus fenómenos de producción, propagación y percepción. Dentro de la Acústica se estructuran diversas ramas que estudian diferentes disciplinas, a saber: Acústica Física, Acústica Musical, Acústica Fisiológica, Acústica Arquitectónica, Electroacústica, Acústica del Medio Ambiente.

Convencionalmente se suele establecer el inicio histórico de la Acústica Musical en los albores de la filosofía griega en la figura de Pitágoras (582 – 500 a. C.), pues es este filósofo quien efectuó las primeras experiencias científicas sobre el sonido. Aunque no se puede constatar la autoría de sus ideas y doctrinas filosóficas debido a la ausencia de documentos escritos, muchas de éstas se refieren en obras de otros filósofos posteriores como Aristóteles o Platón. Además, algunas de sus ideas no eran exclusividad suya sino que más bien podían atribuirse a alguno de los discípulos de su Escuela -Euclides, Eratóstenes, Ptolomeo, etc.-, ya fuera bien de forma individual, bien de forma colectiva.

La aportación pitagórica a la Acústica consistió básicamente en la observación de la relación que se establecía entre las longitudes de las cuerdas y los intervalos armónicos más sencillos. En efecto, una vibración de una cuerda cuya longitud es una parte alícuota de ésta produce tonos que suenan armónicamente con la vibración completa o de máxima longitud. Es fácil deducir, pues, que la longitud de una cuerda se divide en fracciones enteras cuyas frecuencias vibratorias son múltiplas enteras de aquélla. Esta idea básica, consistente en describir un evento de la naturaleza mediante relaciones matemáticas simples, estableció la base para muchas especulaciones y permitió abrir un vasto campo de investigación. Aplicadas a la Acústica Musical, estas observaciones permitieron dar

respuesta a ciertas cuestiones relativas a la afinación de los instrumentos musicales. En realidad, se podría decir que las experiencias pitagóricas constituyen un modelo simplificado del Teorema de Fourier enunciado en el siglo XIX. Estas teorías fueron perfeccionadas y ampliadas posteriormente con el aporte de Aristógenes y Aristóteles.

A partir de esta época se produce un largo letargo en la evolución y progreso de la Acústica Musical. Es posible que la razón de este paréntesis estribe en el escaso interés de la Escuela Pitagórica a aplicar sus avances en los problemas prácticos musicales y no centrarse en las cuestiones filosóficas del hallazgo, esto es, considerar la naturaleza numérica de los sonidos como principio y fundamento del mundo.

Se tiene noticia, en el siglo VI, de un tratado titulado *De Institutione Musica* donde se compila toda la teoría musical de esta época. Su autor, Severino Boecio, tuvo una gran influencia y sus trabajos tuvieron vigencia y fueron referentes para otros teóricos hasta finales del siglo XIV.

La evolución en la escritura musical y el creciente auge de los instrumentos musicales en los siglos XIV y XV motivaron el interés de varios teóricos por diversas cuestiones de acústica musical aplicadas al funcionamiento de los instrumentos. Es destacable, en este sentido, la labor llevada a cabo por los teóricos Salinas y Ramos de Pareja en la resolución de cuestiones relacionadas con el temperamento de los instrumentos de teclado. El primero, organista español, fue capaz de desarrollar un sistema, denominado *temperamento desigual*, en virtud del cual se templaba la escala por medio de una sucesión de cuatro quintas justas reducidas de tal modo que daban la tercera mayor de Aristógenes y no la de Pitágoras. Ramos de Pareja, por su parte, estableció y sistematizó el *temperamento igual* en 1482, aunque ya fue utilizado por los vihuelistas españoles. Este sistema, basado en la división de la octava en doce semitonos iguales mediante la rectificación de la quinta natural en quinta templada, tardó tiempo en imponerse debido a la complejidad de establecerlo. Fue J. S. Bach quien consagró este sistema con su célebre *Clave bien temperado* en el siglo XVIII. La mayor ventaja de este sistema radicó en la obtención de la enarmonía, esto es, todos los semitonos iguales. Su aplicación, en consecuencia, en los instrumentos de teclado fue un éxito pues se simplificaron los intervalos y la afinación.

Trascendente fue, también, la aportación a la acústica musical del célebre teórico Gioseffo Zarlino (1517-1590), en especial para los instrumentos de viento. En su obra *Institutione Armoniche* (1558) ya se vislumbra un inusitado interés por los problemas prácticos de la afinación instrumental y de la armonía. En este último caso fue decisiva su contribución a sustituir el sistema modal de la Edad Media por el tonal. En lo referente a la afinación de la escala musical, trabajó y perfeccionó la escala ya anticipada por Aristógenes¹ basada en la serie de armónicos -también denominada *escala de la justa entonación, natural o de los físicos*-. Los sonidos de esta escala, como su nombre indica, se disponen de forma que sus relaciones interválicas se corresponden con la escala de los armónicos. En consecuencia, este sistema presenta varios tipos de tonos y semitonos y, por tanto, la enarmonía es inexistente. Por esta razón, este sistema solo es aplicable a los instrumentos de entonación libre o variable, siendo imposible su uso en los de entonación fija como el piano. Pensemos que de cuerdo con este sistema² una misma nota puede variar

¹ Filósofo y músico griego nacido aproximadamente 350 años a. de C. en la ciudad de Tarento. Fue discípulo de Aristóteles y compuso varias obras, de las cuales solo han llegado a nosotros sus *Elementos Armónicos* y un fragmento de *Elementos de la Rítmica*.

² Véase el apartado 8.2.

su afinación al modular a otra tonalidad, con lo cual precisaría dos teclas. Imagínese, entonces, este problema ampliado a varias notas. El resultado sería un piano con 72 notas por octava, pues para poder modular a todas las tonalidades se precisaría 72 sonidos diferentes. Este problema, insuperable en estos instrumentos, se podía, empero, corregir en los instrumentos de cuerda y de viento. El clarinete construye su escala gracias al uso de armónicos, con lo cual la relación interválica de sus sonidos se corresponde con el sistema de Zarlino, y aunque su afinación es imprecisa en determinados sonidos, puede corregirse con el uso de varios métodos³. En cualquier caso, en la actualidad todos los instrumentos de viento se afinan según el sistema temperado por razones prácticas.

El siguiente punto de inflexión en la evolución de la acústica musical lo encontramos en la figura de varios teóricos del siglo XVI. Es en este siglo donde esta disciplina experimenta sus primeros estudios científicos rigurosos y serios. Si los trabajos Pitagóricos versaban sobre la relación que se establecía entre la altura de un sonido y el tamaño del objeto vibrante, estos nuevos estudios se centraron en relacionar la altura de tono con la frecuencia del movimiento vibratorio generador. Es decir, mientras los primeros ligaban la altura de tono con el parámetro físico de longitud, ahora se trataba de hacerlo con el parámetro de frecuencia temporal, con lo cual se describía de forma más precisa su periodicidad, aunque fuera un parámetro más difícil de observar. Tal condición hizo necesario que se idearan diversos instrumentos que permitiesen medir la frecuencia de un sonido dado.

Galileo Galilei (1564-1642) y Gassendi (1592-1655) trabajaron en este sentido. Se atribuye a este último el descubrimiento de la idea enunciada en el párrafo precedente, si bien Galileo Galilei también trabajó con esta idea. Sus experiencias se centraron en observar la relación de altura de un tono, obtenido al raspar una placa metálica con un cincel, con su frecuencia de rascado. Efectivamente, pudo constatar que los tonos eran más agudos cuando el rascado era más rápido, mientras que acontecía lo contrario si el rascado era más lento, con lo cual pudo determinar la frecuencia temporal de una oscilación. Este nuevo parámetro físico se impuso como el más preciso para describir la altura de tono de un sonido en detrimento del parámetro físico de longitud de onda.

Marin Mersenne (1588-1648) teólogo franciscano y científico francés llevó a cabo diversos estudios empíricos tendentes a determinar ciertas cuestiones de las vibraciones de las cuerdas, así como del fenómeno del eco. En relación con las vibraciones de las cuerdas pudo demostrar que la velocidad de propagación de una perturbación transversal en una cuerda depende únicamente de la tensión a la que está sometida y de la masa por unidad de longitud. De este modo estableció las leyes que aún llevan su nombre sobre las vibraciones de las cuerdas y las publicó en 1636 en su obra *Harmonie Universelle -La théorie et la pratique de la musique-*. La teoría matemática de dichas leyes fue establecida posteriormente por los físicos Euler (1707-1783) y D'Alembert (1717-1783).

Experiencias similares a las de Mersenne fueron realizadas por el matemático suizo Johann I. Bernoulli (1667-1748), pero aplicadas a los tubos sonoros. Mediante sus estudios empíricos pudo establecer las leyes que rigen la frecuencia producida al excitar la columna gaseosa encerrada en un tubo⁴. Estos trabajos fueron de gran utilidad para

³ Se analizan estos métodos en el apartado 16.2.

⁴ Se enuncian en el apartado 9.1.

determinar posteriormente el funcionamiento acústico de los instrumentos musicales y perfeccionar su construcción en orden a optimizar su acústica.

Siguiendo con esta línea de trabajo, investigadores como Robert Hooke (1633-1703) o Charles Cagniard de la Tour (1777-1859) idearon unos dispositivos con el fin de poder determinar la frecuencia oscilatoria de un cuerpo.

Pero fue el matemático Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) quien fundamentó científicamente las observaciones precedentes con su ingenioso teorema en el cual se relacionaba los movimientos vibratorios, cualquiera que fuese su grado de complejidad, con movimientos armónicos simples. Según este teorema, una función periódica determinada se compone de una suma de funciones simples de tipo sinusoidal con unas determinadas relaciones de fase y amplitud, cuyas frecuencias deben ser múltiplas de aquélla. Cada una de estas funciones simples es lo que denominamos los armónicos cuyas alturas deberán coincidir con la de la fundamental, o bien con el intervalo correspondiente de acuerdo con la escala de los armónicos. Este Teorema, de indudable interés acústico, fue inicialmente presentado para estudiar la propagación del calor en el tratado *La Theori analytique de la chaleur* (1822), si bien su fundamentación ulterior pudo aplicarse también a problemas acústicos.

La figura de Fourier constituye, pues, un nuevo punto de inflexión en la evolución de la acústica, pues aunque su idea básica ya fue utilizada desde la antigüedad, su enunciado en el siglo XIX permitió definir y sistematizar muchos de los conceptos y fundamentos de acústica tales como la periodicidad, la frecuencia y la simultaneidad de armónicos en un complejo sonoro dado. Además, se pudo investigar y analizar científicamente complejos sonoros mediante su representación en el dominio de frecuencias gracias a su espectro, con lo cual se obtenía una valiosísima información para la descripción y resolución de determinados problemas acústicos.

Destacable es también la labor realizada por el francés Felix Savart (1791-1841) en el campo de la acústica del violín. Sus observaciones y experimentos llevadas a cabo en este instrumento permitieron determinar muchos interrogantes relacionados con su comportamiento acústico que no se considera menester detallar.

A finales del siglo XIX encontramos la figura de Hermann von Helmholtz (1821-1894) físico y filólogo alemán, quien contribuyó de forma decisiva a sistematizar muchos de los fundamentos anteriormente enunciados. Su aportación más destacable consistió en la observación de los armónicos de una sustancia sonora mediante el fenómeno de la resonancia, gracias a unos artilugios que diseñó de forma esférica y con dos aberturas a los que denominó *resonadores de Helmholtz*. Una de estas aberturas era la encargada de captar los sonidos y la otra, de forma cónica, se introducía en el canal auditivo. Cuando un tono externo coincidía en frecuencia fundamental con la masa de aire encerrada en el dispositivo, ésta resonaba de forma patente. La inconveniencia que presentaba este artilugio consistía en que se debían disponer de varios resonadores ya que cada uno de ellos respondía a un solo complejo sonoro. Koenig, pudo subsanar este problema con sus resonadores de forma cilíndrica. Estos instrumentos poseían un mecanismo consistente en un enchufe telescópico que permitían alterar el tamaño del resonador, con lo cual se podían utilizar para analizar varios sonidos. También es destacable su cápsula manométrica para estos menesteres como complemento a los susodichos resonadores.

Siguiendo con Helmholtz, no hay que obviar en su contribución al progreso de la acústica sus relevantes estudios sobre la percepción auditiva y los mecanismos de

determinación de las cualidades musicales de altura, sonoridad y timbre. Además, en relación con el fenómeno físico-armónico es reseñable su Teorema sobre la consonancia de los acordes, siguiendo el razonamiento del Teorema sobre la consonancia de los distintos intervalos de la serie armónica que su colega John Tyndall (1820-1823) enunciaba en su obra *Sobre el Sonido* en 1867. Ambos teoremas establecen que un intervalo o acorde será más consonante cuanto más simple sean las frecuencias de sus sonidos, en el caso del primero, o la numeración de sus sonidos, en el caso del segundo.

Paralelamente a la labor realizada por Helmholtz, se hallan los trabajos de Lord Rayleigh encaminados al estudio de los modos vibracionales de diversos instrumentos de percusión tales como membranas, placas, barras, etc. Además, se le debe la tarea de dotar a la acústica de una formulación matemática integral dentro del seno de la mecánica clásica, así como el estudio de las propiedades acústicas de los tubos sonoros, asunto éste último de gran utilidad para el perfeccionamiento de los instrumentos de viento madera.

Finalmente, es destacable la aportación experimental de Young y Edison sobre inscripción de movimientos vibratorios, así como la invención del gramófono por este último.

Los estudios reseñados en los párrafos precedentes fundamentaron la acústica musical moderna y abrieron al arte y a la ciencia amplias perspectivas. Así, este panorama científico de la acústica física unido a los progresos técnicos del siglo XX motivó un creciente interés por esta disciplina que se tradujo en una ingente actividad investigadora en las últimas décadas. Todas las ramas de la acústica han sido y son actualmente objeto de continuo estudio y análisis en un campo que se antoja vasto.

Existe una pléyade de investigadores más recientes cuya labor ha sido de una gran utilidad para el progreso de la Acústica, de los cuales solo vamos a citar los más relevantes. En este sentido, cabe destacar a Dayton C. Miller. Sus trabajos se centraron en analizar y fotografiar los oscilogramas de varios sonidos mediante un aparato, inventado por él, al que denominó *phonodeik*. En relación con la Acústica Arquitectónica la aportación de Wallace Clement Sabine (1868-1919) fue decisiva para su desarrollo. Sus estudios permitieron resolver muchos de los problemas de acústica que presentaban las salas de conciertos. También es destacable la labor de Harvey Fletcher (1884-1981) en el campo de la fisiología auditiva, en especial, sobre el funcionamiento de la membrana basilar. Por último, cabe destacar las investigaciones llevadas a cabo por Reiner Plomp en relación con el sentido de consonancia y disonancia de un intervalo armónico o un acorde, siguiendo la pauta de trabajo comenzada por Tyndall y Helmholtz.

En cuanto a la investigación sobre el funcionamiento acústico de los instrumentos musicales de viento madera, y especialmente sobre el clarinete, en los últimos años ha experimentado un considerable auge -insuficiente todavía-. Efectivamente, se han desarrollado en varias universidades diversos estudios sobre aspectos variados de acústica, en orden a la optimización del instrumento. En este sentido, podemos citar como los precursores de los estudios sobre la acústica del clarinete y de los instrumentos de viento madera a J. Backus y A. Benade. Sus estudios experimentales sobre la impedancia, la función acústica de los orificios tonales -la corrección del extremo final-, la influencia de las resonancias de la caña y del tracto vocal en la acústica del clarinete, en suma, el diseño del clarinete ideal, han sentado las bases para que otros acústicos retomen estos temas. Entre ellos encontramos al ingeniero holandés Cornelius J. Nederveen, con su magnífico estudio científico sobre el funcionamiento acústico de los instrumentos de viento madera

-las posiciones ideales de los orificios tonales, el efecto de la caña, las aplicaciones del espectro de impedancia, el efecto de las resonancias del tracto vocal-; el análisis de Thompson (1979) sobre el efecto de las resonancias de las cañas en la producción del tono de los instrumentos de viento madera; el riguroso estudio general sobre la acústica del clarinete de Lee Gibson; los trabajos experimentales de Joe Wolfe (2002) sobre la acústica del clarinete basados en el estudio de la impedancia y el espectro acústico del clarinete; el estudio sobre simulación de un sistema clarinete-clarinetista de S. Sommerfeldt y W. Strong (1988); la modelización y caracterización de un clarinete simplificado de S. Stewart y W. Strong, W. (1980).

A parte de estos trabajos más específicos, podemos citar otros más generales que también se ocupan, de forma menos detallada, de la acústica del clarinete: T. D. Rossing (1990), H. F. Olson (1967), J. Jeans (1968), N. H. Fletcher y T. D. Rossing (1998), M. Campbell y C. Greated (1987), todos ellos en menor o mayor medida han contribuido a profundizar en el conocimiento de la acústica y organología de los instrumentos musicales.

CAPITULO 2

HISTORIA Y EVOLUCION DEL CLARINETE Y SU ACUSTICA



Sonata en Mib Bemol Mayor n° 2, Op. 120. Brahms (1833-1897)

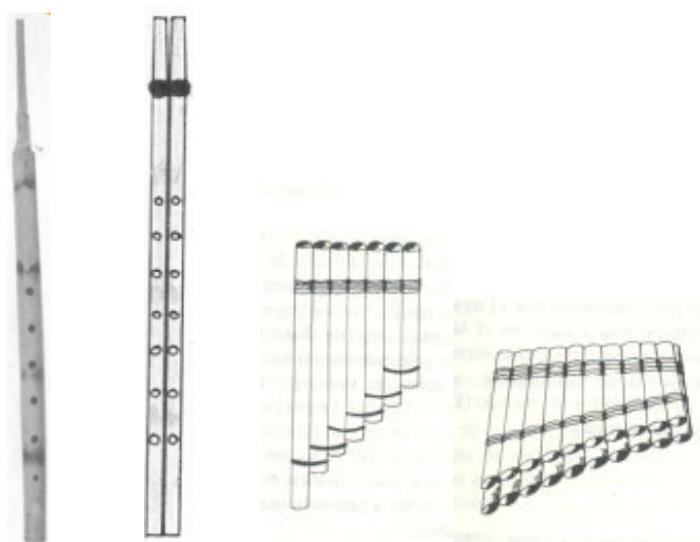
En sus orígenes, los instrumentos aerófonos de madera -antepasados del clarinete- consistían en pequeñas ramas o huesos huecos que, al ser sopladados, permitían emitir un número indeterminado de sonidos. Al objeto de obtener alturas diferentes, varios de estos tubos de diferentes longitudes se unían de forma rudimentaria. Posteriormente estos instrumentos arcaicos fueron perforados con varios orificios dispuestos de forma que podían ser obturados digitalmente, a fin de obtener las columnas aéreas necesarias que permitiesen emitir una escala. Mas con este procedimiento solo se obtenía una escala diatónica precariamente afinada. La obtención de la escala cromática requería el uso de otros métodos. Se sabe que estos instrumentos se desarrollaron y evolucionaron en las distintas civilizaciones con formas diversas⁵ a lo largo de todos los períodos históricos.

Aunque a menudo se dice que el clarinete es el único instrumento que fue inventado y que por tanto no fue producto de un proceso evolutivo, lo cierto es que se le pueden atribuir un buen número de antepasados, de los cuales conserva ciertos elementos primarios. En este sentido, se considera antecesor del clarinete a un instrumento aerófono de lengüeta simple conocido como *Ma'met*, originario de Egipto, dos mil seiscientos años antes de Cristo. El célebre musicólogo C. Sachs en su tratado *Los instrumentos de Música de Madagascar*, constata la existencia de este instrumento al que pudo reconocer en un relieve del año 2700 a. de C. Asimismo, en su manual *The History of Musical Instruments*

⁵ El taladro cónico y cilíndrico han convivido a lo largo de la historia, algunas veces incluso los instrumentos presentaban una combinación de ambas formas. La forma exterior también ha adoptado una suerte de formas diversas.

sostiene que en la India, China y Egipto existió un tipo de aerófono que él denominaba clarinete doble al estar constituido por dos tubos unidos. Este instrumento, basado en un mismo principio acústico, aparece con diferentes denominaciones en las distintas civilizaciones: en Madagascar bajo el nombre de *Farara o Foa*; en China, *Shackupachi*; en el nuevo Egipto, como *Zummara*; en Grecia, *Aulos*; en el Próximo Oriente árabe, como *Arghul*. En todos los casos, el instrumento mencionado estaba construido con dos tubos de caña y carecía de pabellón. Uno de los tubos era de una longitud triple con respecto al otro y constaba de varios orificios para la digitación. El otro tubo carecía de orificios, dado que estaba destinado a ejercer la función de bordón. Estos instrumentos evolucionaron de forma desigual en las distintas civilizaciones.

Fig. 2.1 Instrumentos antiguos



Ya en la Edad Media se tiene constancia de un tipo de aerófono constituido por varios cuerpos, bajo el nombre genérico de *Cornamusa*. Su uso se extiende de forma generalizada por toda Europa Occidental bajo diversas denominaciones.

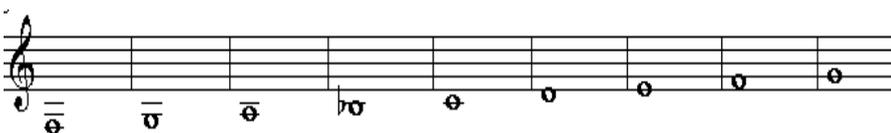
Otro instrumento al que se le atribuyen ciertas analogías con el clarinete primitivo es el denominado *Caramillo*, nombre genérico de las flautas y oboes de los siglos XVI y XVII. Construido con un tubo cilíndrico sin llaves, esta variedad tuvo vigencia en varios países, con formas diversas, asociado al folklore. Algunos musicólogos relevantes del panorama mundial consideran que el clarinete evolucionó a partir de este instrumento. Es el caso de M. Mersenne quien sostiene en su obra *Armonía Universal* (1636) que el verdadero antepasado del clarinete fue el *Caramillo* de caña de trigo aparecido en el Renacimiento.

En cualquier caso, este aerófono se desarrolló y perfeccionó en Francia con el nombre de *Chalumeau*⁶. Estaba formado por un cuerpo cilíndrico de madera de boj en cuyo extremo superior se disponía una caja con una lengüeta en su interior, cuyas vibraciones excitaban la columna aérea adyacente. Carecía de pabellón y constaba de ocho orificios cuyo accionamiento producían la serie de sonidos fundamentales. Este instrumento ya figura en algunas obras de principios del siglo XVIII. Compositores como A. Ariosti (1666-1740), A. Sefani (1654-1728), M. A. Ziani (1653-1715) o R. Keiser (1673-1739) lo emplean en sus óperas.

Fig. 2.2 Modelos de Chalumeau



Fig. 2.3 Extensión del Chalumeau



Fue a partir del *Chalumeau* francés cuando el clarinete primitivo es inventado en la primera década del siglo XVIII por un fabricante de instrumentos de Nuremberg llamado Denner (1655-1707). Las primeras noticias de este instrumento las aporta un contemporáneo de Denner llamado Doppelpmary en 1730. En un escrito suyo titulado *Informe sobre los Matemáticos y los Artistas de Nuremberg*, veintitrés años después de la muerte del Denner, declara que Denner inventó el clarinete poco después del año 1700. En este texto suyo aparece la siguiente referencia, en alusión a Johann Cristian Denner:

“Al principio del presente siglo se inventó un nuevo tipo de instrumento de viento, denominado clarinette, para gran satisfacción de los aficionados a la música...”

“...como resultado de su invento, produjo un chalumeau en una forma mejorada...” (Andrés, 2001)

⁶ Del latín *cálamus* -caña en francés-, se ha aplicado indiscriminadamente a todo instrumento de lengüeta batiente.

Sin embargo, no queda del todo claro la autoría de este fabricante. Parece ser que dos de sus contemporáneos, Klenig y Oberlender, también construyeron clarinetes, pero no hay ninguna constancia documental para demostrar quien de ellos fue el primero que fabricó el clarinete.

Al principio se pensaba que Denner desarrolló el clarinete alrededor de 1690, pero la investigación ha conducido a eruditos a creer que fue algunos años más tarde, quizás entre 1701 y 1704. El musicólogo Thurston Dart encontró en la biblioteca del Conservatorio de Bruselas una colección de música para *chaluveau* y *clarinelle* editada por Estienne Roger en el siglo XVIII. Thurston sostiene que la música estaba escrita de manera anónima, y la fechaba entre 1707 y 1716, lo cual podría considerarse como la primera bibliografía para el clarinete.

Más tarde C. G. Murr, en un libro suyo titulado *Descripción de los Rasgos Distinguidos de Nuremberg*, mantiene que Denner había inventado el clarinete en 1690.

Baines, en su Tratado de Instrumentación sostiene, en relación con la invención del clarinete, lo que sigue:

“el instrumento de viento de madera es una creación del siglo XVIII, cuando el énfasis había cambiado hacia la melodía pura, lo cual se desarrolló principalmente como una especie de caja de pintura musical de colores melódicos contrastados.” (Baines, 1844)

También Johann Gottfried Walter cita este instrumento en su diccionario *Musikalisches Lexicon* en los términos siguientes:

“clarinetto, instrumento de viento, de madera, inventado al principio del presente siglo por un ciudadano de Nuremberg. Se parece a un oboe largo, con una embocadura mayor que éste y de lejos suena de forma parecida a una trompeta.” (Walter, 1732)

En cualquier caso no importa demasiado cuando se desarrolló el clarinete, sino que Denner mejoró considerablemente el viejo *chaluveau*. La diferencia más sustancial con respecto al *Chaluveau* la constituía la adición de las dos primeras llaves. La primera, además de producir el La₃, proporcionaba una extensión de tres octavas mediante el uso del tercer y quinto armónico, mientras que la segunda, accionada simultáneamente con la otra, daba el Sib₃. Por otra parte, la caña se disponía en el exterior del instrumento atada a la boquilla, con lo cual era controlada por la boca del ejecutante. Asimismo amplió y alargó el tubo cilíndrico y le añadió un cuerpo cónico en forma de pabellón para obtener mayor resonancia y ajustar la afinación de ciertos sonidos.

El nuevo instrumento, perfeccionado a partir del *Chaluveau*, lo describe formidablemente Filippo Bonani (1722):

“el instrumento similar al oboe, denominado clarote, tiene una longitud de dos palmos y medio; su parte inferior termina con un acampanamiento similar al de la trompeta, de unos siete centímetros de anchura. Tiene siete orificios en la parte de arriba y uno en la de abajo. Además, tiene otros dos agujeros opuestos, aunque no diametralmente, que se abren y cierran mediante dos llaves accionadas con los dedos, cuando se requiere un cambio de notas. Estas son más graves que las obtenidas con el oboe” (Diccionario Harvard de Música, 1997)

Bonani ya advierte la condición de tubo cilíndrico cerrado al afirmar que con una longitud análoga a la del oboe produce sonidos más graves. Efectivamente, Denner supo aplicar en este instrumento el principio de vibración de los tubos sonoros por mitades alicuotas, enunciado por el matemático Bernoulli (1667-1748), con la instalación de la primera llave. No tuvo mucho mérito su invención dado que este experimento ya había sido aplicado con anterioridad en el oboe y la flauta.

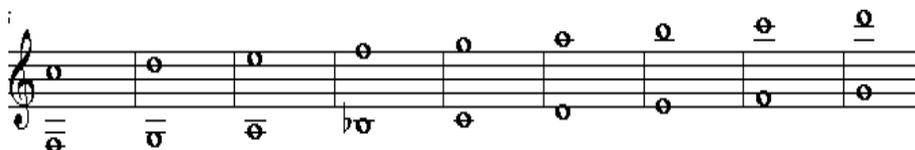
Fig. 2.4 Modelo de clarinete de Denner (1700)



Fig. 2.5 Modelo de clarinete de Denner (1720)



Fig. 2.6 Extensión del clarinete de Denner



Este instrumento, construido con madera de boj, se le denominó originalmente Clarín -pequeña trompeta-. Existe un ejemplar en el Museo Nacional de Baviera (Munich). Asimismo, se conserva este modelo en los museos de Bruselas, Nuremberg, Berlín, Leipzig, Londres (Royal Collage of Music) y San Petersburgo. Su uso tuvo vigencia durante todo el período barroco.

El primer método conocido para este instrumento fue escrito por Thurston Dart en el *Journal of the Golpin Society*. Asimismo, compositores como A. Vivaldi, G. P. Telemann, F. Haendel o J. F. Rameau ya emplean este instrumento en algunas de sus obras. Aunque fue J. Faber, organista de la catedral de Amberes al que se le atribuye ser el primero en utilizarlo en una de sus misas en 1720. En cualquier caso no se tiene constancia escrita de que otro compositor lo empleara con anterioridad.

A partir de esta innovación, consistente en aplicar el principio acústico de vibración de las columnas en mitades alicuotas, se suceden las llaves de forma intermitente

gracias a diversos estudios e investigaciones encaminados a ampliar la extensión del instrumento para poder emitir una escala cromática medianamente afinada. Pensemos que en la escala del clarinete de dos llaves estaba ausente el sonido Si₄ y, por otra parte, algunos sonidos se obtenían mediante digitación de horquilla con unos resultados tímbricos nada plausibles.

El siguiente paso, por tanto, consistió en añadir la llave del Si₄ que enlazaba el registro *Chalumeau*⁷ con el *Clarín*⁸. Para conseguirlo se alargó el tubo y se colocó una llave en la parte inferior -para ser accionada por el dedo meñique izquierdo- que daba la fundamental Mi₂ y, con la llave de octava, el Si₄. Se atribuye este invento a los hijos de Denner, Juan y Jacob Denner en 1740, aunque hay algunos investigadores que sostienen que fue un constructor de instrumentos de Brunswick llamado B. Fritz (1697-1766). Este instrumento de tres llaves fue utilizado como solista por primera vez en los Conciertos de J. W. A. Stamitz y J. M. Molter. Asimismo, fue adoptado por la Orquesta de Manheim a partir de 1759 aproximadamente.

La cuarta y quinta llave fue instalada en el clarinete por J. Beer (1744-1811). Producían el Fa#₂ y Sol#₂, respectivamente, y sus duodécimas el Do#₄ y el Re#₄. Este instrumento fue adoptado por la Orquesta de Manheim a partir de 1759 aproximadamente.

A partir de este momento las innovaciones técnicas del instrumento fueron constantes, ya fuese con la adición de nuevas llaves como por otros elementos del mecanismo. X. Lefevre aporta la sexta llave en 1791 que producía en Do#₃ y su duodécima el Sol#₄. Su invención la constata Diderot (1713-1784) en su *Enciclopedia*, en el Capítulo *El Arte del Constructor de Instrumentos*, del modo siguiente:

“Durante el tiempo que yo escribía este artículo, pasó por Berlín un músico que tocaba el Clarinete de seis llaves, sobre el cual se ejecutaban todos los modos. Ya se han remarcado cuantas dificultades causan las cuatro llaves; con seis debe ser mucho peor.”
(Diderot, 1751)

Se infiere del texto precedente el desconocimiento por el resultado de las innovaciones técnicas que se aplicaban en el instrumento de la época. Es evidente que un clarinete con seis llaves proporcionaría unas mejores prestaciones que uno de cuatro. Este instrumento tuvo gran aceptación y estuvo vigente durante varios años.

Mr. Folth con su clarinete de ocho llaves y Griessling con la invención de la décima llave siguieron perfeccionando el instrumento hasta la irrupción en 1812 del clarinete de trece llaves de I. Müller. Para entonces ya existían clarinetes de once y doce llaves, aunque ninguno de ellos tuvo mucho éxito al afectar problemas acústicos evidentes. Después vendría el sistema de T. Boehm instalado en la flauta, cuyas mejoras fueron formidablemente aplicadas en 1842 al clarinete por H. Klose y la inestimable colaboración del constructor de instrumentos francés L.A. Buffet⁹.

Es, por tanto, a partir del período romántico cuando estos instrumentos experimentan notables mejorías como consecuencia de diversos perfeccionamientos

⁷ Denominado así porque esta era la extensión del Chalumeau.

⁸ Denominación dada por su similitud con el timbre de la trompeta.

⁹ Estos sistemas, junto con otros menos relevantes en la evolución técnico-acústica del clarinete, son objeto de estudio en el apartado 4.3.2. del Trabajo, por lo que no se tratarán en este apartado.

empíricos alentados por las nuevas exigencias estéticas. En efecto, la dificultad técnica que presentaban ciertas tonalidades, unido a los problemas de afinación inherentes a estos instrumentos, así como un afán de facilitar su manejo técnico, suscitaron el interés de ciertos instrumentistas y constructores a idear sistemas de llaves que pudiesen minimizar al máximo estos inconvenientes y satisfacer las demandas técnicas de los intérpretes. Hasta entonces, los instrumentos de viento madera se construían de forma tal que sus orificios se disponían de acuerdo con la norma que establecía la distancia natural de separación que marcaban los dedos del intérprete. Para poder obtener una escala cromática se debía recurrir a digitaciones cruzadas o de horquilla¹⁰, puesto que las llaves disponibles no eran suficientes para este propósito. A partir de este período y en lo sucesivo los orificios se disponían según la norma que establecía la división racional del tubo sonoro basada sobre las leyes de la resonancia natural y determinada por los nodos de las vibraciones. Esto es, se considera la llave como una extensión del dedo que la acciona y que le permite acceder a orificios donde sería imposible hacerlo sin su concurso. Se plantean, en este sentido, nuevos taladros, innovaciones en los juegos de llaves, se redistribuyen los orificios¹¹, en fin, se imponen innovaciones técnicas importantes en el mecanismo.

Algunos instrumentos solventaron el problema de las dificultades técnicas de ejecución que presentaban algunas tonalidades diseñando nuevos modelos de instrumentos modificados en su longitud acústica de modo que quedaban afinados en diferentes tonalidades. Esta innovación permitía tocar música en diferentes tonalidades con ciertas garantías gracias al uso de un sistema de digitación universal para todos los miembros de una misma familia instrumental, pero, en su contra, presentaba una gran variedad de timbres, dado que cada modelo poseía un color sonoro característico que no siempre era bien recibido por los intérpretes y compositores. Además la acción de tener que cambiar constantemente de instrumento suponía un trastorno importante para los intérpretes. Así todo, este procedimiento convivió con los nuevos sistemas de llaves y actualmente todavía se utiliza en algunos instrumentos. El caso más representativo lo constituye el clarinete, cuyo modelo tipo en Do¹² sufrió numerosas derivaciones a diferentes afinaciones. También el oboe, la flauta o el saxofón disponen de una familia más o menos numerosa que les permiten unas mejores prestaciones técnicas y musicales manteniendo el sistema de digitación del instrumento tipo. Empero, muchos de estos modelos han caído en desuso en parte por sus cualidades tímbricas poco agraciadas, en parte por la idea de globalización instrumental alentada por las necesidades orquestales que imponen los compositores y directores, con lo cual los más perfeccionados en este sentido se han impuesto a aquéllos. Es ni más ni menos que un proceso evolutivo determinado por las necesidades musicales donde los más poderosos han persistido en detrimento de los más débiles. Todo lo cual no es óbice para que paralelamente a este proceso se experimentaran notables innovaciones técnicas y acústicas como consecuencia del diseño de nuevos taladros y sistemas de llaves que facilitaban sobremanera al intérprete su trabajo.

¹⁰ Consiste este método en obturar uno o más orificios que se hallen separados del orificio abierto más alto, dejando entre ellos uno o varios orificios destapados, para prolongar artificialmente la columna aérea. La frecuencia con este procedimiento desciende alrededor de un semitono relativo, proporcionando una alternativa cromática -véase el subapartado 16.2.2-.

¹¹ Se trata este aspecto en el Capítulo 13.

¹² Este instrumento cayó en desuso y fue sustituido por el afinado en Sib por sus más óptimas cualidades tímbricas.

Siguiendo con el tema que nos ocupa, estas innovaciones en los sistemas de llaves empezaron a fraguarse al final del clasicismo, pero fue en el período romántico donde fueron objeto de una notable experimentación y elaboración. Gracias a estos juegos de llaves, los orificios se dispusieron en las posiciones más óptimas desde el punto de vista acústico de acuerdo con simples leyes científicas y acústicas. La obturación de los orificios inalcanzables por los dedos se llevaba a cabo ahora con comodidad accionando las llaves oportunas. También los orificios cuyo diámetro excedía el de las yemas de los dedos se veían beneficiados con estos sistemas. La consecuencia más directa era un enriquecimiento de la técnica del instrumento, pues los sistemas de digitación consecuentemente fueron mejorados. Las posibilidades de digitación aumentaron y posibilitaron la elección del intérprete de la digitación más adecuada en cada pasaje, con la consecuente comodidad y facilidad técnica. Con todo, ahora se podía interpretar en todas las tonalidades con relativa comodidad, si bien ciertas tonalidades planteaban más dificultades que otras. En pocas palabras, aumentaron considerablemente las prestaciones del instrumento: facilidad de emisión, afinación más precisa, uniformidad tímbrica, homogeneidad sonora en todos los registros, facilidad de ejecución en los trinos.

Tales innovaciones trajeron consigo paralelamente cambios en la técnica y el timbre de estos instrumentos. Efectivamente, los nuevos juegos de llaves instalados en el tubo del instrumento modificaron los formantes de éste con la consiguiente influencia de éstos en la columna de aire que entra en vibración. Además, la nueva técnica provocó cambios en la articulación y el fraseo, así como en el taladro y el material de construcción del instrumento, todo ello alentado por los continuos cambios de gusto. El timbre así sufrió un proceso de transformación que supuso el alejamiento de las sonoridades barrocas y clásicas. En este sentido, actualmente se suscita la conveniencia o no de interpretar la música de estos períodos con instrumentos de la época. Unos son partidarios de utilizar instrumentos de la época, dado que esa música fue concebida en sus orígenes considerando las cualidades tímbricas de los instrumentos vigentes en la época, si bien en su contra presentan un manejo técnico más limitado por su arcaico mecanismo. En el otro bando se sitúan los prosélitos que propugnan para la interpretación de la música de estos períodos el uso de los instrumentos actuales perfeccionados por sus mejores prestaciones técnicas y de afinación, aún cuando pueda quedar, según los puristas, desvirtuada aquélla. El argumento que sostienen es el siguiente: si los intérpretes de la época no ejecutaban la música con instrumentos más perfeccionados era simplemente porque no disponían de ellos. A buen seguro que de haber podido disponer de ellos la técnica se hubiese enriquecido considerablemente.

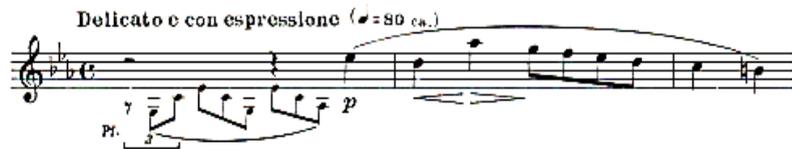
En la actualidad se sigue investigando y aplicando nuevos mecanismos que puedan optimizar las prestaciones del instrumento, si bien estos consisten básicamente en elementos unitarios tales como abrazaderas, barriletes, zapatillas, arandelas, etc., o modificaciones en el taladro y la disposición de los orificios que puedan evitar las imperfecciones acústicas que presenta el clarinete y mejorar, por ende, sus prestaciones. Ningún otro sistema ha podido implantarse con uniformidad después del sistema Boehm, aunque bien es cierto que ha habido varios intentos frustrados. Unas veces por el recelo y conformismo del intérprete a alterar su sonido o técnica, y otros por las reticencias de las multinacionales constructoras de instrumentos por el alto coste que supone su comercialización. Sorprende que, por lo que se refiere a sistemas de llaves, hayamos avanzado tan poco desde 1842 cuando se implantó este sistema en el clarinete. Debemos

estar muy agradecidos los clarinetistas al señor T. Boehm y H. Klosé por su contribución a la optimización técnica y acústica de este formidable instrumento.

***II. FUNDAMENTOS DE ACUSTICA
FISICA APLICADOS AL CLARINETE***

CAPITULO 3

ORIGEN Y PROPAGACION SONORA APLICADA AL CLARINETE



Piezas fantásticas para Clarinete y Piano, Op. 73. Schumann (1810-1856)

3.1 INTRODUCCION

La Acústica Física es una de las ramas de la Acústica que se dedica al estudio de los fenómenos originados durante la producción y propagación del sonido en los diversos medios, ya sean sólidos, líquidos o gaseosos. La producción del sonido comporta la existencia de vibraciones mecánicas y movimientos oscilatorios, mientras que la propagación del sonido lleva aparejada oscilaciones de presión y el movimiento vibratorio asociado de un medio. En el caso del instrumento que nos ocupa, el medio de propagación es gaseoso, las partículas flotantes que vibran en el interior del tubo conforman las columnas gaseosas objeto de estudio en las cuales se propaga el sonido. En cuanto a los fenómenos originados durante la propagación del sonido, se procede a describirlos y analizarlos en el Capítulo 5.

Antes de comenzar con los rudimentos, es menester proceder a definir el sonido y establecer las condiciones que hacen posible su existencia. Pues bien, en una primera aproximación conceptual del sonido, cabe decir que es una sensación que impresiona nuestro sentido auditivo, provocada por la vibración de un cuerpo. Es sustancialmente una impresión subjetiva que se origina al transmitirse las vibraciones en forma de ondas sonoras de presión por nuestro órgano auditivo. Estas ondas son, en rigor, complejas variaciones de la presión atmosférica que al llegar a nuestro aparato auditivo se convierten en sensaciones sonoras.

Pero para que el sonido se lleve a cabo es indispensable que se conjuguen tres elementos o condiciones en el proceso sonoro: *la fuente* sonora, en este caso el instrumento musical, o dicho de forma más precisa, la columna gaseosa alojada en su interior -la productora del sonido por medio de las vibraciones-; *el medio* donde se propague, ordinariamente el aire; y *el receptor* último, nuestro oído, que recoge las vibraciones en forma de ondas sonoras de presión y las convierte en sensación sonora.

En principio, *la fuente* o cuerpo material debe ejercitarse en una suerte de movimientos denominados vibratorios, obtenidos mediante diversos procedimientos. Las moléculas del cuerpo sonoro, en nuestro caso de la columna gaseosa, son desplazadas de su posición de equilibrio al ser perturbadas por una fuerza exógena y, debido a su elasticidad, se originan movimientos que tienden a devolverles a su posición inicial, con lo cual se produce una vibración. En el caso de los instrumentistas el proceso puede activarse mediante la pulsación o fricción de las cuerdas de un instrumento, o bien, mediante la estimulación de las columnas de aire alojadas en el interior del tubo de los instrumentos de viento, como es el caso del clarinete. En el primer supuesto, el cuerpo vibrante es sólido, mientras que en el segundo, el que nos ocupa, es gaseoso, es decir se halla compuesto de una multitud de moléculas de aire.

A continuación, esa vibración o movimiento vibratorio que genera variaciones de la presión atmosférica debe propagarse en *un medio*, que generalmente lo constituye el aire, en forma de ondas sonoras de presión. Se puede decir que las vibraciones tienen su hábitat en el aire, pues es éste el que proporciona su transmisión. En este sentido, las células que proporcionan la vida al sonido son las partículas de aire. La necesidad perentoria y primaria de esta condición se entiende fácilmente si vaciamos una sala de aire. En estas condiciones el sonido no se propaga. Este fenómeno fue descubierto por el físico alemán Otto von Guericke (1602-1686).

La tercera condición o elemento necesario para la producción del sonido la constituye *el receptor*. La importancia de éste es superlativa puesto que sin su concurso solo existirían las ondas producidas por el movimiento vibratorio pero no el sonido propiamente dicho, dado que esas vibraciones en forma de onda deben ser procesadas y codificadas por nuestro oído en modelos de impulsos nerviosos. Por tanto, esas ondas deben ser transformadas en una sensación subjetiva que se capta por el oído externo y se procesa, a través de todas sus redes, por el oído medio e interno -véase Anexo I-.

3.2 GENESIS SONORA

Todo movimiento vibratorio es generado por un cuerpo emisor. Estas vibraciones pueden estar sujetas a rozamiento u otra pérdida de energía. En este sentido, cuando un cuerpo se desplaza de un lado a otro pasando por los mismos puntos a intervalos de tiempo iguales y con análogas velocidades y sentidos, el movimiento vibratorio resultante se denomina *periódico*, porque el periodo dentro del cual se producen sus oscilaciones es isocrono, es decir, de igual duración. Diríase, por ende, que es un movimiento simétrico y regular donde los desplazamientos del cuerpo oscilante son directamente proporcionales a las fuerzas que lo provocan. En tanto en cuanto cumpla esta condición y no sea alterado por fuerzas de resistencia, se considerará un movimiento armónico.

Estas vibraciones, al desplazarse, pueden hacerlo bien de forma transversal, esto es, en sentido perpendicular al cuerpo que las genera, o bien longitudinal, propagándose en sentido análogo al que las produce. En el caso del clarinete, las vibraciones que se engendran en el interior de su tubo oscilan de dentro afuera, son longitudinales dado que recorren un trayecto longitudinal al foco emisor localizado en la boquilla del instrumento, en la lengüeta, encargada ésta de excitar las vibraciones que comunica a la sustancia sonora, esto es, la columna gaseosa del tubo.

Las vibraciones son, pues, las encargadas de transmitir el sonido a través del aire. Las partículas cuando son perturbadas por una fuerza, debido a su cualidad elástica, se comprimen y, a continuación, rebotan rarefactándose, con lo cual generan y relajan presión en la dirección de su recorrido, esto es, en todas direcciones de dentro hacia fuera. En rigor, no son ellas las que se transmiten sino que lo que transmiten es una sucesión de impulsos de energía que origina las ondas de presión que son las encargadas de transportar el sonido por el aire.

Existen innumerables ejemplos de movimientos periódicos. Desde el movimiento que realizan los astros alrededor del sol, hasta las vibraciones de las cuerdas y columnas de aire de los instrumentos musicales. En estos casos el movimiento vibratorio también se denomina *oscilatorio* puesto que el móvil se desplaza alternativamente en un sentido y su opuesto en una trayectoria rectilínea o curvilínea. Por tanto, el movimiento vibratorio producido por un cuerpo vibrante, es un movimiento oscilatorio el cual, a su vez, es periódico.

Llegados a este punto, cabe considerar y definir ciertas magnitudes inherentes al movimiento periódico por mor de las cuales éste queda definido.

Así, *oscilación* es el trayecto desde un extremo a otro del recorrido. Puede ser *simple* cuando completa un trayecto, o *doble* cuando recorre dos trayectos. En el caso del primer supuesto su duración es de medio período, mientras que en el segundo es de un período.

Entendemos el *período de oscilación* (T) como el intervalo de tiempo durante el cual un determinado cuerpo pasa sendas veces consecutivas por un mismo punto con análogo sentido y velocidad. Esta magnitud se mide en segundos y constituye, a su vez, el tiempo del ciclo. En este caso, cuando un cuerpo oscila recorriendo un trayecto en ambos sentidos e idéntica velocidad, ha completado un período, esto es, una oscilación completa. Si el período del movimiento es pequeño se le denomina vibratorio.

Por su parte, se define *fase* como el tiempo transcurrido desde que un cuerpo o móvil pasa de su posición inicial o de equilibrio hasta una posición cualquiera de su trayectoria. Asimismo, se puede producir una diferencia de fase entre dos movimientos periódicos cuando las partículas se mueven en el mismo tiempo en posiciones distantes.

El tiempo que emplea un cuerpo en desplazarse desde la posición inicial a cada uno de sus extremos constituye el *tiempo de la amplitud*. Esta, por su parte, es la máxima distancia entre el cuerpo y su posición de reposo, en un instante dado. Se puede colegir en una sencilla operación que dado que el período es el tiempo que tarda un móvil en pasar dos veces consecutivas por un mismo punto, y el tiempo de la amplitud es el recorrido desde el punto de reposo hasta un extremo, aquél será igual a cuatro veces el tiempo de la amplitud, es decir, $T = 4a$

El recorrido de una partícula o cuerpo desde un punto cualquiera de su trayectoria hasta volver a pasar por éste, queda definido por un *ciclo* (c). Los ciclos son vibraciones

dobles puesto que las partículas se desplazan en ambas direcciones partiendo del punto de equilibrio hasta llegar a uno de los extremos, volviendo al extremo contrario y retornando al punto inicial. Este concepto se interrelaciona intrínsecamente con las magnitudes temporales y espaciales en tanto en cuanto el número de veces que realiza el ciclo un cuerpo constituye la *frecuencia* (f) del movimiento periódico, esto es, las veces que éste pasa por un mismo punto en el mismo sentido. La frecuencia se mide en ciclos por segundo o Hertzios¹³:

$$f = \frac{\text{ciclos}}{\text{sg}}$$

Dado que en un período de segundos se realiza un ciclo, y en 1 segundo se realiza una frecuencia de ciclos, podemos resolver que ambas magnitudes son inversas, luego:

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{y/o} \quad f = \frac{1}{T}$$

La *elongación* (x) es otra magnitud definitoria del movimiento periódico. Constituye la distancia existente en un instante dado entre el cuerpo y su posición primaria. Es mensurable en unidades de longitud, al igual que el ciclo. La máxima elongación posible de un movimiento periódico se conoce como *amplitud* (A), o lo que es lo mismo, la distancia entre el punto inicial y cada uno de sus extremos.

Conocido ya el movimiento periódico y sus magnitudes, conviene ahora analizar y describir un nuevo concepto en la génesis del sonido, a saber, *el movimiento oscilatorio*.

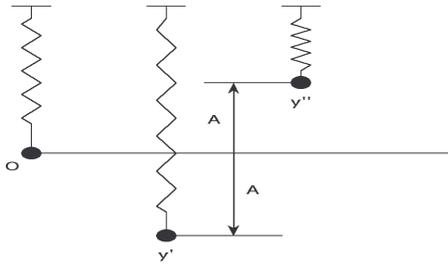
Los movimientos oscilatorios son un caso de movimientos periódicos, puesto que en ellos el móvil se desplaza describiendo una trayectoria que puede ser rectilínea o curvilínea, en un sentido y su contrario. En efecto, estos movimientos experimentan una suerte de oscilaciones periódicas y simétricas que se clasifican en dos modalidades: *rectilíneo* y *curvilíneo*.

Un ejemplo de movimiento oscilatorio rectilíneo (Fig. 3.1) nos lo aporta el recorrido que efectúa un cuerpo colgado de un resorte. Si lo movemos de su posición de reposo y lo soltamos, es evidente que dada su elasticidad y prescindiendo de la resistencia que ofrece cualquier rozamiento, experimenta un movimiento ascendente y descendente, describiendo, por consiguiente, una trayectoria rectilínea en modo vertical, es decir, una oscilación rectilínea.

En estos movimientos, cuando el móvil pasa consecutivamente por un mismo punto en el mismo sentido se denomina oscilación. La frecuencia constituirá el número de oscilaciones por segundo, esto es, Hercio o Hertz (Hz).

¹³ Nombre atribuido en honor al físico alemán Heinrich Hertz.

Fig. 3.1 Movimiento oscilatorio rectilíneo

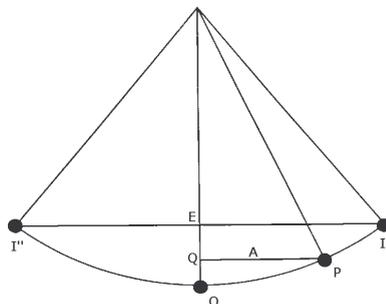


En este supuesto de movimiento rectilíneo, la distancia del punto de equilibrio o reposo a cada uno de sus extremos constituye la amplitud del movimiento. La distancia comprendida entre una posición cualquiera del cuerpo al punto de equilibrio será la elongación. Podríamos concluir, pues, que la amplitud constituye la máxima elongación: $A = oy' = oy''$.

Cuando el móvil recorra el trayecto entre y' e y'' , o viceversa, estará efectuando una vibración simple y su duración, por ende, será de medio período. Constituirá una vibración doble y, consecuentemente, un ciclo o hertz, cuando el móvil o realice los recorridos $y'y''$ e $y''y'$. En este último caso, tal y como habíamos enunciado anteriormente, su duración será de un período T . En función del peso del cuerpo y la elasticidad del resorte variará el período y la amplitud.

La otra modalidad de movimiento oscilatorio acaece cuando el móvil realiza un recorrido oscilatorio en sentido curvilíneo (Fig. 3.2). En este supuesto, aquél describe un arco de circunferencia partiendo de su punto de reposo. Un ejemplo clarificador de esta modalidad lo constituye el movimiento que efectúa el péndulo de un reloj. En este tipo de movimiento la elongación no es mensurable sobre la trayectoria del móvil, sino sobre la distancia desde el cuerpo en un punto dado P hasta la vertical del punto de equilibrio, esto es, la elongación no será el arco PA sino la recta PQ . Del mismo modo la amplitud no será OA' sino $A'Y$. Asimismo, el recorrido que efectúe el móvil desde A' hasta A'' o viceversa constituirá una oscilación simple y durará medio período. En el caso de que el móvil realice ambos recorridos consecutivamente, estaríamos ante una oscilación doble cuya duración sería de un período. En este sentido, la longitud del péndulo determinará el período de su oscilación.

Fig. 3.2 Movimiento oscilatorio curvilíneo

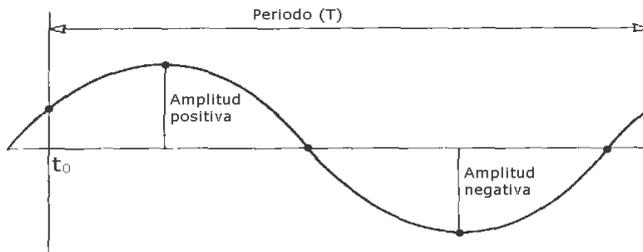


Podemos concluir este apartado enunciando que las partículas flotantes que conforman las columnas gaseosas alojadas en el interior del tubo del clarinete efectúan *movimientos oscilatorios* cuyos periodos son pequeños. Dichos movimientos constituyen un *movimiento vibratorio*, cuyas oscilaciones son denominadas *vibraciones*.

En este sentido, cuando el período de dichos movimientos oscilatorios es muy pequeño, el movimiento vibratorio constitutivo se define como *armónico simple o complejo*, según su naturaleza. En primer caso se produce cuando los desplazamientos del cuerpo vibrante son directamente proporcionales a las fuerzas que provocan dichos desplazamientos, con lo cual el movimiento resultante se considera *armónico* (Fig. 3.3).

Para comprender mejor su naturaleza vamos a proceder a su descripción y representación gráfica. Consideremos, pues, un sistema de eje de coordenadas. En el eje de ordenadas representamos las elongaciones, y en el eje de abscisas fijamos los tiempos medidos como fracciones de períodos: $T/12$, $T/6$, $T/4$... Sobre este sistema se trasladan las diferentes elongaciones que experimenta un cuerpo como consecuencia de su vibración armónica. Pensemos ahora en un cuerpo en movimiento con una cierta elongación x_0 y, en consecuencia, en fase inicial o . Iniciamos la cuenta del tiempo en este instante t_0 . Se producen varias elongaciones hasta el momento representadas como $T/1$, máxima elongación, esto es, la amplitud positiva. A continuación el cuerpo cambia de sentido y se mueve produciendo nuevas elongaciones hasta acaecer el instante t_2 donde se halla el punto de reposo y la nulidad de elongación. Nuevas elongaciones nos transportan hasta el momento t_3 donde de nuevo el cuerpo alcanza su máxima elongación o amplitud negativa. Seguidamente se alcanza de nuevo el punto de reposo donde la elongación es nula. Por último, en el instante t_5 , la elongación alcanzada es igual a la obtenida en la fase inicial. Se ha completado así una vibración doble que ha durado un período.

Fig. 3.3 Representación gráfica del movimiento armónico con expresión de su Período y Amplitudes



Dado que, tal y como habíamos enunciado anteriormente, el período y la frecuencia son magnitudes inversas, conociendo el período, la frecuencia resultante será:
 $f = 1/T$

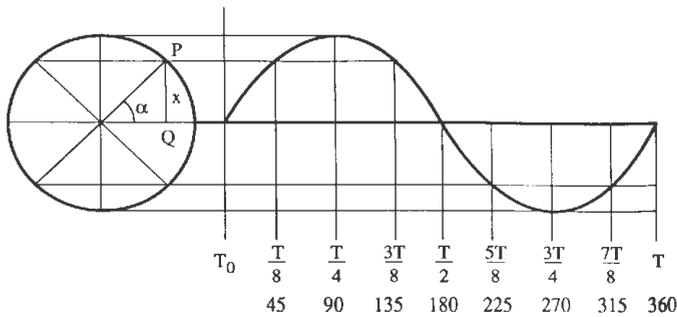
Se obtiene de este modo una curva senoidal como consecuencia de representar la proyección sobre el eje de ordenadas de un cuerpo que se desplaza sobre una circunferencia con una velocidad uniforme, esto es, la representación de la función seno.

En efecto, si consideramos un punto P que recorre la circunferencia de radio OP en sentido de las agujas del reloj y trazamos en cada instante una perpendicular desde el punto

P a cada uno de los diferentes diámetros de la circunferencia, obtendremos un punto Q que será la proyección de P sobre dicho diámetro. Cuando éste se mueva con velocidad uniforme, aquél efectuará un movimiento armónico simple. La curva resultante constituirá una senoidal.

Veámoslo con más detenimiento. Consideremos un punto P y tracemos una perpendicular PQ desde éste hasta el eje de abscisas. Si trasladamos esta perpendicular trazada por cada uno de los puntos de recorrido de la circunferencia en sentido de las agujas del reloj a un eje de coordenadas, obtendremos una curva senoidal. La variación del seno del ángulo que forma en cada instante el radio del punto P , se traduce en la variación que sufre t , lo cual gráficamente equivale a una curva senoidal. La representación se puede llevar a cabo expresando las magnitudes de tiempo en fracción de tiempo y en ángulos medidos en grados o radianes, puesto que una vuelta completa a la circunferencia equivale a recorrer 360° o 2 radianes, invirtiendo un período de tiempo. De modo que: $T(s) = 360^\circ = 2 \text{ radianes}$.

Fig. 3.4 Representación gráfica de la función seno del movimiento armónico



Sin embargo, cuando hablamos de propagación de la onda no debemos confundir esta forma de propagación, que no es ni más ni menos que una representación puramente convencional de las oscilaciones moleculares para facilitar el estudio y comprensión del movimiento ondulatorio, con la propagación real que experimenta la onda sonora -véase el apartado siguiente-.

Hemos analizado la génesis de un movimiento armónico simple, provocado por un movimiento vibratorio cuyas oscilaciones son simples. Empero, nos interesa sobremanera en este punto considerar la naturaleza de los movimientos vibratorios complejos puesto que son los productores de los sonidos generados por el instrumento que nos ocupa. En efecto, cuando estos movimientos se combinan entre sí, con direcciones distintas y amplitudes dispares, se constituye un movimiento vibratorio que se considera complejo (Fig. 3.5).

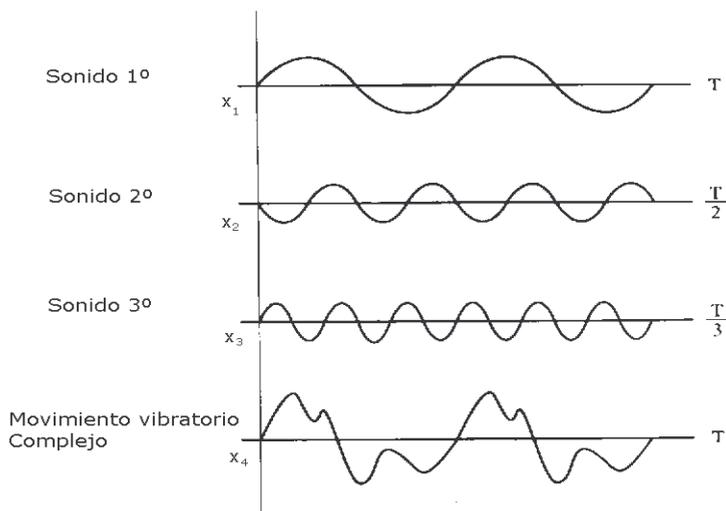
Estos movimientos se pueden reducir mediante el análisis, cualquiera que sea su grado de complejidad, a cada uno de sus movimientos vibratorios constitutivos, los cuales pueden expresarse gráficamente con una curva sinusoidal representativa de una onda

senoidal. Esta teoría, de capital importancia para determinar la naturaleza de un sonido, se atribuye al matemático francés Jean-Baptista Joseph Fourier (1768-1830), de ahí que se conozca con el nombre de *Teorema de Fourier*. Su enunciado es el siguiente: *un movimiento vibratorio cualquiera, de período T y frecuencia f , es siempre expresable como una suma de movimientos armónicos simples cuyos periodos son $T, T/2, T/3, T/4, etc.$, y frecuencias $f, 2f, 3f, 4f, etc.$*

Se puede inferir, pues, que cualquiera que sea la forma de la curva periódica, ésta podrá descomponerse en varias sinusoides, e inversamente acontecerá de forma análoga que la composición de varios movimientos simples armónicos nos proporcionará un movimiento vibratorio complejo.

Para su observación gráfica basta con disponer tres ejes de abscisas x y sobre éstos tres sinusoides representativas de tres sonidos simples o movimientos vibratorios simples. Si procedemos a su composición mediante la suma algebraica de las ordenadas de las curvas para cada abscisa, se podrá observar que el resultado no es una senoide como correspondería a un movimiento armónico simple, sino que la composición efectuada nos proporciona una curva periódica de período T definitiva de un movimiento vibratorio complejo.

Fig. 3.5 Movimiento vibratorio complejo



Pues bien, todos los sonidos fundamentales de cualquier instrumento de viento madera corresponden a sonidos complejos, esto es, están compuestos por un número determinado de sonidos armónicos simples, de ahí la definición de sonidos armónicos para referirnos a los sonidos que acompañan a un sonido complejo. Los restantes sonidos que completan el registro o extensión del instrumento son sonidos armónicos que se obtienen mediante diversos procedimientos -aunque también constituyen complejos sonoros- como veremos posteriormente en el apartado 4.3.5 del estudio. Este fenómeno puede apreciarse afinando el oído cuando se emita un sonido fundamental. En efecto, si agudizamos el oído podremos apreciar varios sonidos que acompañan al sonido fundamental y que constituyen

los denominados sonidos armónicos. Este fenómeno tiene importantes implicaciones en el resultado tímbrico de los sonidos de un instrumento, pues constituye la causa principal que define el timbre de un instrumento, aunque eso lo analizaremos más detenidamente en su momento.

Los sonidos fundamentales pueden descomponerse mediante el análisis en unos gráficos que nos muestran la existencia de los diferentes armónicos consustanciales a todo movimiento vibratorio complejo, con expresión de sus diferentes intensidades medidas en decibelios y frecuencias mensuradas en hertzios. Por su parte, también podemos analizar la forma de la onda resultante de un sonido complejo mediante un analizador de señales. De esta forma observaremos que si el sonido analizado corresponde a un movimiento vibratorio armónico simple, el resultado será una onda senoidal de naturaleza simétrica y regular, mientras que si este sonido corresponde a un movimiento vibratorio complejo, la onda resultante será no senoidal, de orografía asimétrica e irregular.

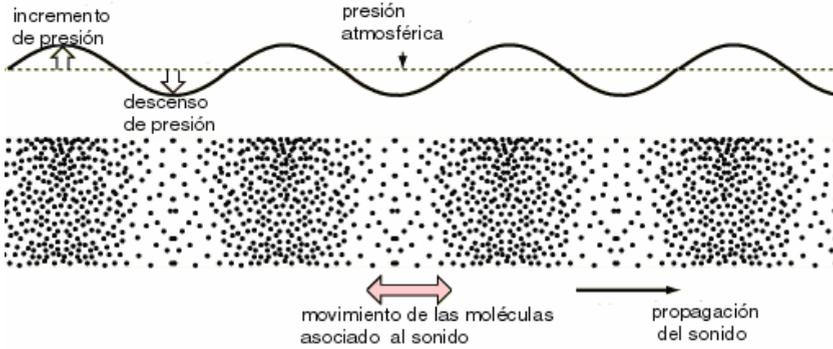
3.3 PROPAGACION SONORA

La propagación del sonido se lleva a cabo, en la mayoría de los casos, en el seno del aire. Este medio está constituido por una mezcla de elementos en diversas proporciones, a saber, un 21% de oxígeno, un 78% de nitrógeno y un 1% de diversos gases nobles, impurezas y vapor de agua. El conjunto de estos elementos constituye un conjunto homogéneo de moléculas con propiedades iguales en todas direcciones, esto es, se trata de un medio isótropo.

Ya sabemos que el medio es condición *sine qua non* para que se lleve a cabo el proceso sonoro, pues es el encargado de transmitir las vibraciones del cuerpo sonoro emisor al receptor último. Este viaje se realiza por medio del movimiento ondulatorio a que es obligado realizar el cuerpo transmisor como consecuencia de los impulsos de energía que originan las vibraciones moleculares. Por lo tanto, cuando en un medio se propagan movimientos vibratorios se genera un movimiento ondulatorio, el cual, a su vez, produce ondas esféricas concéntricas de vibración periódica.

Supongamos que las partículas alojadas en el interior del tubo del clarinete en estado de reposo reciben una perturbación -en este caso el agente excitador es la lengüeta-. A consecuencia de esta energía estas partículas se desplazan de su posición primitiva transfiriendo la energía a las partículas vecinas las cuales, a su vez, colisionan entre sí repitiendo la acción con las siguientes en un efecto dominó. Se origina así una compleja variación de la presión atmosférica. En rigor, no se produce un desplazamiento de la materia propiamente dicho, en tanto en cuanto las partículas una vez que la perturbación se ha extinguido y la onda ha pasado, vuelven a su estado primigenio. Lo que se transmite son impulsos de energía que originan el movimiento de las ondas de presión, no del aire. De este guisa, a fuer de comprimirse y rarefactarse las partículas en el medio elástico, la onda sonora se constituirá cada vez que se produzca este fenómeno (Fig. 3.6). En este sentido, la velocidad de propagación de la onda dependerá de las características del medio y de la naturaleza de ésta. La onda sonora, por tanto, constituirá la siguiente estructura del sonido después de las partículas aéreas.

Fig. 3.6 Simulación gráfica de una propagación sonora en el tubo del clarinete



También se puede ilustrar esta cuestión si observamos las ondas concéntricas que se producen en el sitio preciso donde se ha lanzado una piedra en un estanque de agua. Si hubiese un objeto flotante en el agua observaríamos como se mueve ligeramente de su posición inicial.

El desplazamiento de la onda puede ser longitudinal o transversal, en función del movimiento realizado por las partículas perturbadas. Cuando la dirección de propagación de la onda es análoga a la de la vibración de las moléculas, se dice que son *ondas longitudinales* (Fig. 3.7). Este es el supuesto que acontece en el clarinete. En el caso de que esa dirección sea perpendicular a la de la vibración, las denominaremos *ondas transversales* Fig. (3.8).

Fig. 3.7 Movimiento de una onda longitudinal



Fig. 3.8 Movimiento de una onda transversal

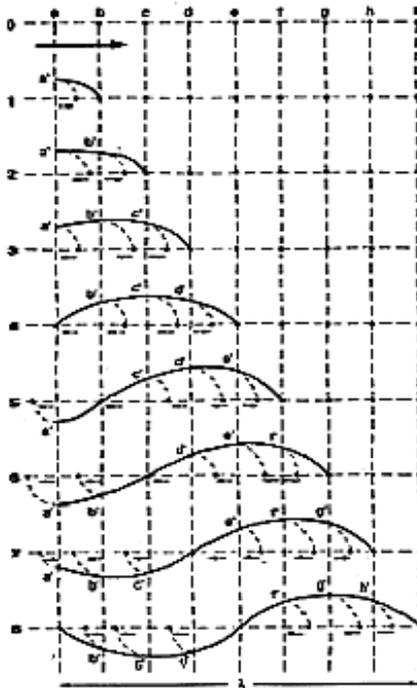


Las flechas discontinuas indican el movimiento de las partículas y las flechas continuas el de la onda.

El sonido se propaga, pues, en el aire merced al movimiento ondulatorio que efectúa el cuerpo transmisor como consecuencia de las vibraciones moleculares. La observación gráfica de un movimiento ondulatorio longitudinal se lleva a cabo mediante la

animación de una serie de partículas como consecuencia de la transmisión de una onda sonora. Imaginemos, de nuevo, una gleba de moléculas residentes en el interior del tubo del clarinete. En un momento dado la partícula más próxima al foco emisor, esto es, a la lengüeta, se verá impelida a salir de su estado de equilibrio por la fuerza que le imprime ésta, desplazando, a su vez, a su vecina y así sucesivamente. Se inicia así un movimiento vibratorio que se irá transmitiendo entre todas las partículas del tubo obteniéndose como consecuencia de este movimiento una curva senoidal que será representativa del fenómeno descrito. Veámoslo en la siguiente figura:

Fig. 3.9 Representación gráfica de una propagación sonora



Se observa en el gráfico que en el momento 1 la partícula *a* se desplaza hacia la derecha como consecuencia de la perturbación que le inflige la lengüeta. Su elongación en ese momento se traslada a su eje de ordenadas. La línea continua en negrita representa el movimiento ondulatorio en cada momento. En el momento 2 la molécula *a* ha alcanzado a la *b* y obliga a la *a* a desplazarse de su posición de equilibrio. En el 3 la molécula *b* alcanza a la *c*, mientras que la *a* vuelve a su posición inicial. En el momento 4, la *a* ya ha alcanzado su posición de equilibrio, mientras que la molécula *b* se encuentra realizando el regreso a su posición de reposo, y la *c* ha alcanzado a la *d* que comienza el ciclo. Repitiendo el proceso para el resto de moléculas llegamos al momento 8 donde la partícula *a* habrá ocupado el punto de reposo, con lo cual se habrá completado un ciclo en el tiempo de un período.

Si de la representación de la onda efectuada con varias moléculas dispuestas en línea recta pasamos a todas las que comprende un plano, el movimiento ondulatorio se desplazará radialmente en todas direcciones, con lo cual las compresiones y expansiones se realizarán en forma de coronas circulares cuyo centro será el punto donde se haya producido la perturbación. En efecto, a diferencia de los gráficos donde hemos representado la onda sonora de forma bidimensional, la propagación de las vibraciones moleculares en el seno del aire se realiza en tres dimensiones, esto es, no se mueven de arriba abajo y de lado a lado, sino en todas direcciones hacia fuera, lo que origina una *propagación esférica* (Fig. 3.10). Dicha propagación consiste en esferas con radio creciente concéntricas al punto donde se ha producido la perturbación. Esta propagación se conoce como *ondas esféricas*, compuestas por una sucesión de capas alternativas de compresión, donde se registra un aumento de la densidad y presión del aire como consecuencia de una mayor concentración de las moléculas; y expansión, en la cual la densidad es menor debido a una menor concentración molecular.

Fig. 3.10 Simulación gráfica de una propagación sonora esférica

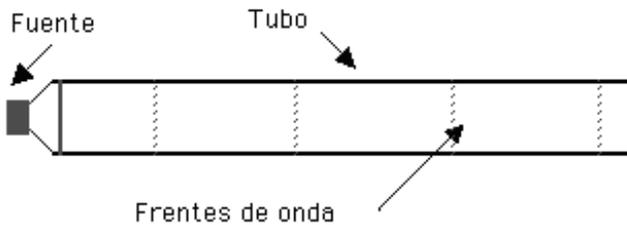


En definitiva, el sonido se propaga en forma de ondas esféricas de radio creciente como consecuencia de las variaciones de densidad y presión que producen los movimientos moleculares, pero también se verifican en el caso del instrumento que nos ocupa en el interior de su tubo como ondas planas. Estos movimientos generan concentraciones periódicas de partículas a medida que la onda avanza, con lo cual se origina una sobrepresión instantánea seguida de una depresión debido a la menor concentración de partículas que se produce a continuación. Por lo tanto, estas variaciones de presión de la onda sonora hacen que dicha presión fluctúe por encima y por debajo del valor de la presión atmosférica.

Todas las moléculas de una misma capa están sometidas al mismo estado de vibración y, por consiguiente, se dice que están en concordancia de fase. A todas esas moléculas es lo que se conoce como *frente de ondas*.

Como decíamos anteriormente, cuando la propagación se produce en el interior de un tubo, las ondas avanzan en planos perpendiculares al eje del mismo, debido a su gran esfericidad y pequeña superficie. Este tipo de ondas se denominan *planas* (Fig. 3.11) y permite conservar mejor la intensidad sonora a lo largo del tubo dado que su avance se mantiene constante al no ser de tipo espacial. Se pueden definir, pues, como ondas progresivas libres unidimensionales que viajan en dirección x y que sus frentes de ondas son planos infinitos perpendiculares al eje x y paralelos entre sí en todo momento (Pérez, 1969).

Fig. 3.11 Simulación gráfica de ondas planas en un tubo



Un ejemplo clarificador de estos dos tipos de ondas lo constituye el caso del oboe y el clarinete. En el primer caso, dado que su tubo es cónico, el sonido se propaga en modo esférico y por tanto su intensidad es proporcional al cuadrado de su amplitud. En el segundo caso, el tubo se mantiene casi cilíndrico y las ondas que se engendran en su interior tienen una solución plana, con lo cual su amplitud se mantiene constante a lo largo del tubo. Esta es la razón -fundamentada matemáticamente- por la cual el oboe y el clarinete con el mismo tipo de embocadura -uno lengüeta simple y el otro doble- pero distinta forma de tubo, producen modos de resonancia diferentes y, por tanto, armónicos distintos.

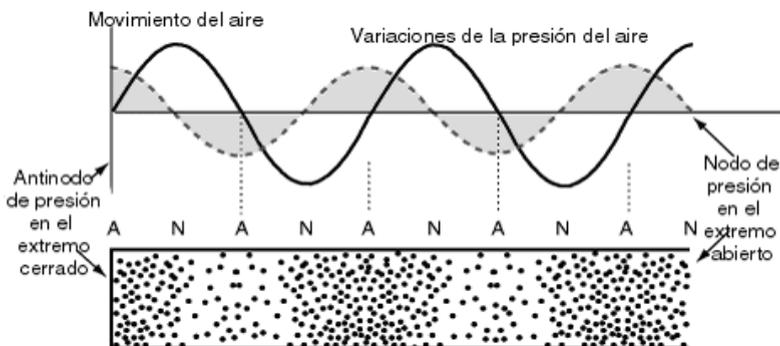
Por lo que respecta a la onda transversal, se origina en las cuerdas vibrantes de los instrumentos de arco por el desplazamiento perpendicular de las partículas, es decir, se mueven en línea perpendicular a la dirección en la que se propaga la onda. Sin embargo, la onda sonora que nos interesa es la que se propaga longitudinalmente en el interior del tubo de los instrumentos aerófonos de viento madera. En la siguiente figura se muestra el grado paulatino de presión de las partículas en estado de vibración en el interior del tubo del clarinete cuando se está emitiendo el sonido fundamental Mi_2 . La mayor agitación, conocida como vientre de presión, se registra en la zona más próxima a la lengüeta, dado que este es el punto de excitación. A partir de esta región la presión va progresivamente remitiendo hasta el pabellón del instrumento donde se verifica el nodo de presión.

Fig. 3.12 Grado de agitación de las partículas en el interior del tubo del clarinete, emitiendo el sonido fundamental Mi_2



Consideremos ahora el tubo del clarinete para comprender la mecánica de la onda longitudinal. Para estimular las partículas de su interior precisamos un agente. El instrumentista, por medio de su columna de aire, le insufla la energía necesaria la cual con la acción conjunta de la lengüeta genera la perturbación. Las vibraciones de la lengüeta comunican su período de oscilación a la columna gaseosa del tubo, con lo cual se fuerza su oscilación¹⁴, a lo que responde aquella vibrando por simpatía, de modo tal que generan y relajan presión en la dirección longitudinal de su recorrido, comprimiéndose y rarefactándose por esas variaciones de presión. En este estado de cosas, la onda nace en el interior del tubo y se desplaza por éste como si fuese un tren continuo de perturbaciones (Fig. 3.13). La forma interior del tubo determinará su trayecto, y por tanto el modelo de resonancia¹⁵. Por otra parte, la velocidad de propagación dependerá de la naturaleza física del medio, así como de la temperatura, y se designa con la expresión velocidad del sonido c . Dado que la velocidad de la onda se incrementa si la elasticidad del medio transmisor aumenta, y viceversa, disminuye si aumenta la densidad, la temperatura influirá sobremanera en la velocidad del sonido, pues al elevarse aquella crecerá ésta, ya que simultáneamente disminuirá la densidad y aumentará la elasticidad. En este sentido, huelga decir que la velocidad del sonido variará sustancialmente en los diversos medios transmisores en función de su naturaleza física.

Fig. 3.13 Desplazamiento y presión del aire en un tubo cilíndrico cerrado produciendo su tercer modo de resonancia



¹⁴ Véase *oscilación forzada* en apartado 5.6.

¹⁵ Se estudia este asunto en el Capítulo 9.

Empero, una vez en el exterior del tubo la energía que no ha sido disipada por la fricción se propagará en modo esférico generando variaciones de la presión atmosférica. El registro por nuestro oído de las sucesivas alternancias de sobrepresiones y expansiones es lo que posibilita la audición del sonido.

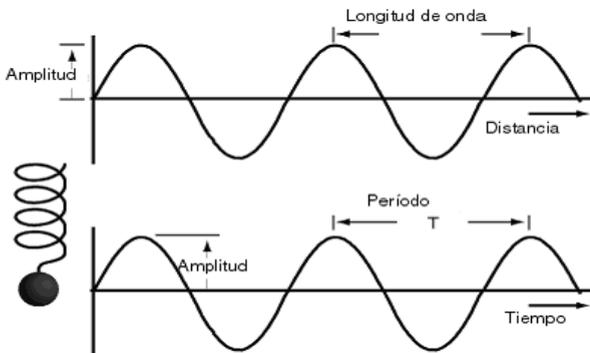
Podemos concluir que el sonido se propaga en el seno del aire, en forma de esfera, mientras que en el interior de un tubo lo hace en forma de ondas planas con variaciones periódicas en la densidad del aire que ésta comprende y, en consecuencia, en oscilaciones de presión. Dada la naturaleza interdisciplinaria del estudio, omitiremos las ecuaciones que las representan para no abrumar al lector músico.

3.4 LONGITUD DE ONDA

Para avanzar en nuestro estudio urge ahora conocer la definición de la longitud de onda, así como el procedimiento para su cálculo.

La longitud de onda (Fig. 3.14) es la distancia existente entre dos puntos que se hallan en la misma fase, o lo que es lo mismo, entre dos compresiones o amplitudes máximas sucesivas. Se representa con la letra griega λ (landa). Dado que en un periodo la onda avanza una distancia igual a la comprendida entre dos compresiones, diríase que la longitud de la onda es la distancia recorrida por la onda en el tiempo de un período. O también, que es el espacio necesario para que se verifique un ciclo de una perturbación en su totalidad.

Fig. 3.14 Longitud de onda y amplitud de una onda



Entre la velocidad sonora, la longitud de onda, su período y su frecuencia se establece la siguiente relación fundamental, a saber, si la onda recorre una distancia igual a una longitud de onda λ con una velocidad constante c en un intervalo de tiempo de un período T , entonces aplicando la expresión $c = e/T$, donde e equivale a la longitud de onda (λ) tendremos que:

$$\lambda = v \times T \quad \text{o} \quad T = \frac{1}{f} \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

Por tanto, conociendo la frecuencia de un sonido y su velocidad, podremos determinar su longitud de onda.

Asimismo, la longitud de onda es dependiente de la frecuencia (Fig. 3.15) y de la temperatura (Fig. 3.16), con lo cual las variaciones de estas magnitudes modificarán aquélla.

Fig. 3.15 Variación de la longitud de onda del sonido con la frecuencia

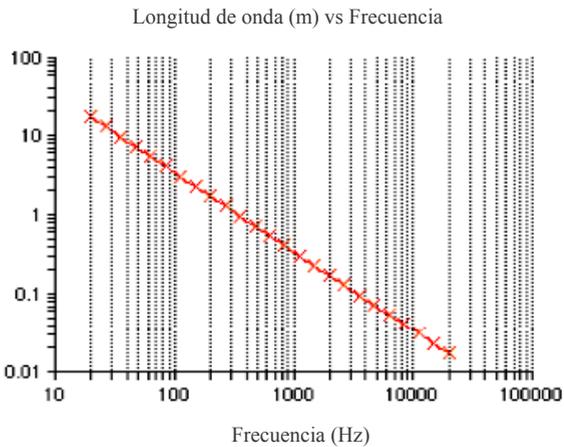
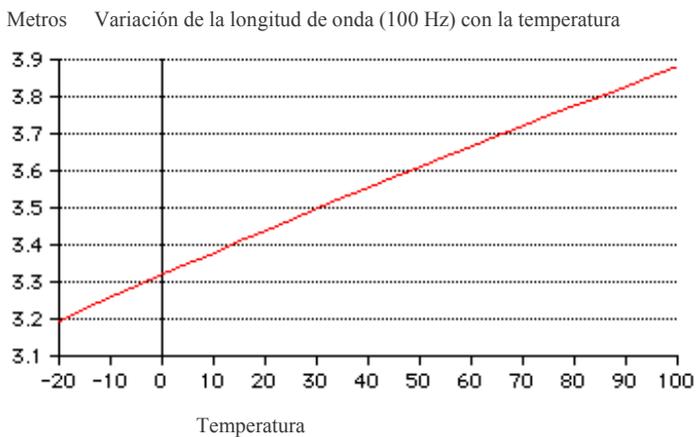
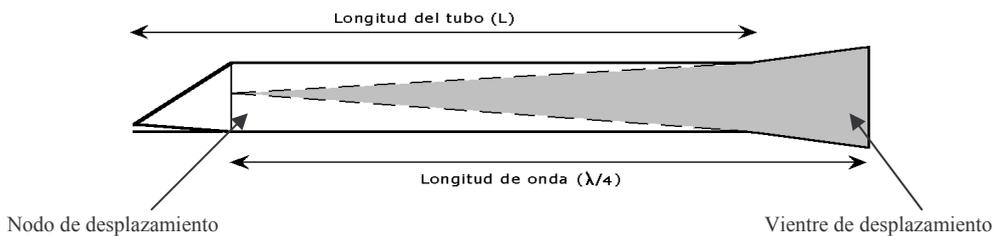


Fig. 3.16 Variación de la longitud de onda (100 Hz) con la temperatura



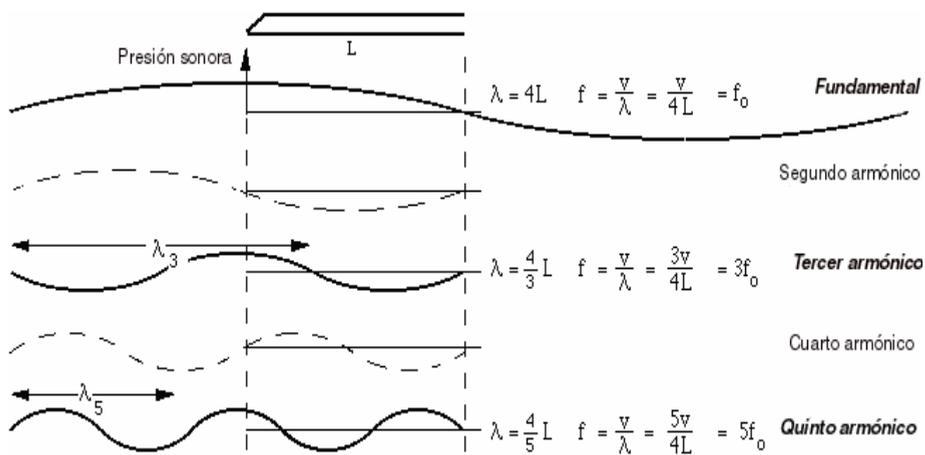
Por lo que respecta a la longitud de onda en los tubos, corresponderá a media longitud de onda o una semilongitud ($\lambda/2$) la distancia entre dos vientres o dos nodos, mientras que la distancia entre un nodo y un vientre o viceversa equivaldrá a $\lambda/4$. Centrándonos en los tubos cerrados que son los que nos interesan, observamos que la longitud de onda de un sonido fundamental, teniendo en cuenta el diseño que presenta su onda estacionaria con un nodo en el extremo cerrado y un vientre en el abierto, corresponde a $\lambda/4$, con lo cual podemos concluir que la longitud de onda en esta clase de tubos equivale a cuatro veces la longitud de tubo (Fig. 3.17). Asimismo, también podremos obtenerla multiplicando la longitud del tubo por cuatro.

Fig. 3.17 Longitud de onda fundamental en el tubo del clarinete



En la siguiente figura se aprecia como están ausentes los armónicos pares. Asimismo, se muestra la longitud de onda y la frecuencia de los dos primeros parciales de un tubo cerrado.

Fig. 3.18 Longitud de onda y frecuencia de la fundamental y su tercer y quinto armónico



3.5 FORMA DE ONDA

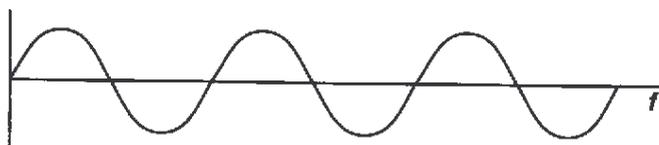
La forma de onda nos interesa sobremanera en nuestro estudio dado que su visualización nos permite obtener una información valiosa para definir la naturaleza del complejo sonoro objeto de análisis y determinar, por consiguiente, la naturaleza de su timbre en orden a su optimización.

Sabemos que dos movimientos vibratorios de análoga frecuencia y amplitud producen sonidos de la misma altura e intensidad. Pues bien, la *forma de onda* viene definida cuando estos sonidos ofrecen un timbre distinto. Este fenómeno se explica por la variación de la elongación en función del tiempo en el intervalo de un período. Esta característica del sonido se representa gráficamente mediante el análisis de un *osciloscopio* o *analizador de señales*, y es lo que se conoce con el nombre de *forma de onda u oscilograma*.

La onda se clasifica en función de su forma en dos tipos generales. La más simple es la *onda senoidal*. Esta onda proviene de sonidos puros, esto es, carente de armónicos. Se puede observar en la figura 3.19 la onda de un sonido armónico dado. Esta onda sólo se puede generar por medio de un diapasón o electrónicamente

Por lo tanto, una onda resultante de un sonido puro de una sola frecuencia corresponde a una senoidal. Un sonido armónico es, en teoría, un sonido puro, con lo cual su forma de onda debe ser una senoidal. No obstante esto debe ser matizado, ya que en la práctica no se manifiesta de modo tan uniforme. En efecto, por diversas razones que analizaremos detenidamente en la siguiente parte, todos los sonidos que emite un instrumento de las características que presenta el clarinete no derivan de un solo movimiento armónico simple, sino que siempre presentan varios componentes armónicos, unos más que otros por diversos factores que serán tratados en el apartado 11.4 del estudio. En la práctica, por tanto, la onda de estos sonidos armónicos¹⁶ se torna más senoidal a medida que se reducen los componentes armónicos, pero nunca se presenta completamente senoidal, dado que para ello debería estar constituido por un solo componente armónico.

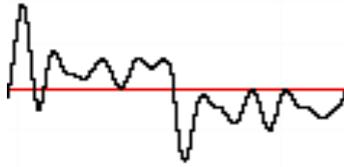
Fig. 3.19 Onda senoidal



Por su parte las *ondas no senoidales* (Fig. 3.20) son las que provienen de sonidos complejos, es decir, contienen determinados armónicos de la frecuencia fundamental. Estas son, generalmente, las que derivan de los sonidos emitidos por los instrumentos musicales, en el caso que nos ocupa, del clarinete.

¹⁶ Se puede observar en los oscilogramas del apartado 11.7.

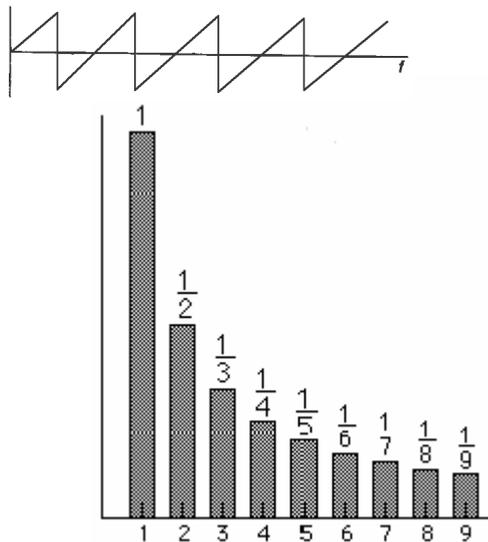
Fig. 3.20 Onda no senoidal emitida por el clarinete



Dentro de esta última categoría podemos, a su vez, establecer una nueva clasificación:

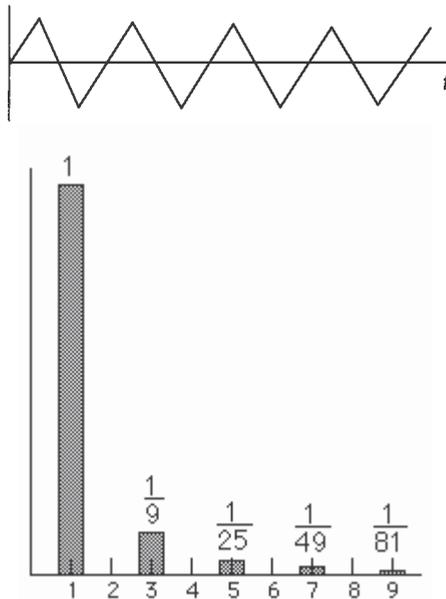
Onda de diente de sierra. Esta onda se constituye mediante la composición de todos los armónicos de la frecuencia fundamental (Fig. 3.21). En su recorrido crece en línea recta desde cero hasta un máximo positivo y luego cae gradualmente hasta un máximo negativo para volver rápidamente a cero. Su obtención es posible mediante un analizador de señales comenzando por una onda senoidal de la fundamental a la que se añade gradualmente las diferentes ondas senoidales de los armónicos hasta obtener por composición la onda resultante de diente de sierra. La relación de las amplitudes de los armónicos en este tipo de onda con respecto a la frecuencia fundamental es la que sigue: $1/2, 1/3, 1/4, \text{etc.}$

Fig. 3.21 Onda en dientes de sierra con expresión de la amplitud de los armónicos respecto de la fundamental



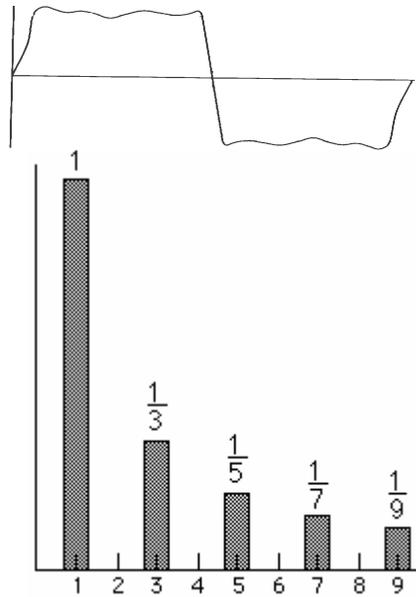
Onda triangular. Esta onda contiene todos los armónicos impares de la frecuencia fundamental con amplitudes decrecientes en relación con la amplitud fundamental de los números $1/9$, $1/25$, $1/49$, $1/81$, etc. (Fig. 3.22). Se puede obtener mediante síntesis de ondas senoidales hallando en principio la frecuencia y amplitud de la onda fundamental sobre la cual iremos superponiendo las diferentes ondas de los armónicos: la primera onda tendrá una frecuencia tres veces la frecuencia de la fundamental, la segunda cinco veces, etc.

Fig. 3.22 Onda triangular con expresión de las amplitudes de los armónicos respecto de la fundamental



Onda cuadrada. Esta modalidad se caracteriza por progresar en una suerte de variaciones súbitas, de forma tal que cambia de sentido y magnitud repentinamente después de conservar la amplitud máxima momentáneamente (Fig. 3.23). Su diseño perfecto se obtiene por combinación de una onda senoidal y sus armónicos impares. La diferencia con la onda triangular, que también contiene todos los armónicos impares, la constituye la diferente relación de amplitudes con respecto a la fundamental, a saber, $1/3$, $1/5$, $1/7$, $1/9$, etc. Esta onda es la que se constituye en las fundamentales del clarinete, pero en modo imperfecto, esto es, en combinación con una onda en dientes de sierra en proporción menor, por mor de algún armónico par presente que invalida aquel diseño.

Fig. 3.23 Onda cuadrada con expresión de las amplitudes de los armónicos respecto de la fundamental



A continuación se muestran a modo de ejemplo varios oscilogramas con la forma de onda de los primeros sonidos de cada registro del clarinete, analizados en la parte experimental del estudio:

Fig. 3.24 Oscilograma del Mi_2

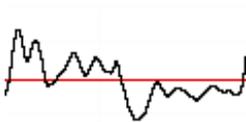


Fig. 3.25 Oscilograma del Si_3

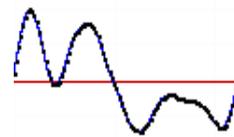
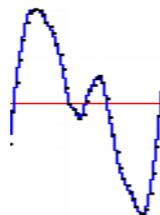


Fig. 3.26 Oscilograma del $Do\#_3$



Se observa que la forma de onda del sonido fundamental (Fig. 3.24) presenta una orografía asimétrica que puede catalogarse como una onda cuadrada en combinación con una en dientes de sierra, dado que contiene de forma predominante armónicos impares, aunque también algunos pares de baja intensidad. El oscilograma del Si_3 (Fig. 3.25) presenta componentes impares y pares de forma escalonada con amplitudes análogas, con lo cual su tipografía correspondería a una onda en dientes de sierra. Por su parte, la fig. 3.26 representa el oscilograma del primer sonido del registro agudo, donde los componentes se reducen de forma considerable y la forma de onda se torna cuasi senoidal.

SENSACION SONORA APLICADA AL CLARINETE



Primer Concierto en Fa menor para Clarinete y Orquesta, Op. 73. Weber (1786-1826)

4.1 INTRODUCCIÓN

Cuando se activa el proceso sonoro en el clarinete mediante la vibración periódica de su lengüeta, se producen varios fenómenos que se pueden encuadrar en tres etapas: origen sonoro, relacionado con la generación en sistemas vibrantes; propagación en el tubo del instrumento y en medios abiertos; recepción de la señal acústica en forma de sensación sonora. Las dos primeras etapas ya han sido tratadas en el capítulo precedente, de manera que nos resta ocuparnos en este capítulo de la sensación sonora.

Una sensación es lo que captamos al percibir algo que nos impresiona. La sensación, entendida como el proceso de recepción de una señal y su ulterior interpretación por el sentido de la audición, se puede dividir en tres fases: *estímulo*, *excitación* y *sensación*. La primera la constituye el agente externo que provoca la sensación y comienza en la membrana del tímpano. La segunda, la excitación, es el proceso de captación y transformación del estímulo en sensación por medio del oído medio e interno¹⁷. Por último, la sensación se define como la impresión que la excitación produce en el cerebro. Esta última depende de la relación constante entre el estímulo y la impresión.

Ya vimos anteriormente que el sonido se definía como la sensación experimentada por nuestro sentido auditivo como consecuencia del movimiento vibratorio de los cuerpos.

¹⁷ Véase el Anexo I.

Es decir, en tanto en cuanto no se produzca tal sensación, no podemos hablar de sonido propiamente dicho. En este sentido, nuestro sentido de la audición nos permite distinguir características o cualidades diferenciadoras de los distintos sonidos. Estas características inherentes a cualquier sensación sonora son *la altura, la intensidad y el timbre*¹⁸. Podemos decir a propósito de estas cualidades que el sonido está producido por movimientos vibratorios de altura, fuente e intensidad definida, mientras que *el ruido*, cuya sensación suele ser desagradable, está constituido por una suerte de sonidos con frecuencias imprecisas y fuentes dispares. Sin embargo, la determinación de ambos conceptos acaecerá subjetivamente. Del mismo modo, las cualidades mencionadas las percibimos como sensaciones subjetivas y, por tanto, no son mensurables científicamente.

Por otra parte, cabe decir en relación con estas cualidades que el oído no transforma en sonidos todas las frecuencias posibles de los movimientos vibratorios, sino únicamente aquellas que considera aptas. En este sentido, el espectro de frecuencias de vibración susceptibles de ser transformadas en sensación sonora por nuestro oído oscila entre los 20 y los 20000 Hz, si bien estos valores son aproximativos y varían de una persona a otra en función de diversos factores.

Procedamos, pues, a definir y analizar las cualidades inherentes al sonido aplicándolas al instrumento que nos ocupa para avanzar en nuestro estudio.

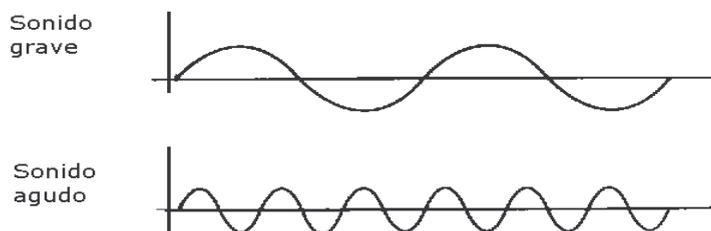
4.2 ALTURA

La altura de un sonido es la cualidad que permite distinguir un sonido agudo de otro grave y viceversa. Es, por lo tanto, la sensación de grave o agudo que experimentamos cuando oímos un sonido, o lo que es lo mismo, el tono.

La sensación de altura depende del número de vibraciones por segundo de un sonido dado, esto es, la frecuencia del movimiento vibratorio generador. Cuando el número de vibraciones, es decir, la frecuencia del movimiento vibratorio aumenta, el sonido resultante será más agudo, y viceversa, cuando la frecuencia decaiga y el número de vibraciones sea menor, el sonido producido será más grave. Por tanto, la altura de un sonido es directamente proporcional a su frecuencia. Se puede observar en la siguiente figura que en la primera onda el número de vibraciones es mayor que en segunda, invirtiendo el mismo tiempo, de modo que el sonido resultante de la primera sinusoide será más agudo que el de la figura segunda.

¹⁸ Además se consideran también como cualidades secundarias del sonido: *la duración*, que depende de la duración del movimiento vibratorio y nos proporciona el ritmo; *la densidad*, entendida como la sensación de homogeneidad del sonido; y *el volumen*, cuya cualidad nos refiere la sensación de más o menos cuerpo de los sonidos.

Fig. 4.1. Movimiento armónico de un sonido grave y uno agudo



Los límites de altura en el clarinete actual quedan establecidos convencionalmente entre el Mi_2 y el Do_6 , cuyas frecuencias a 440 Hz corresponden, según el sistema Temperado, a $146'83$ y $1664'64$, respectivamente¹⁹. Teniendo en cuenta que el clarinete es un instrumento transpositor en Sib, las notas reales corresponderán a Re_2 y Sib_5 . Es posible obtener sonidos más allá de este último, no sin cierta destreza técnica, pero el resultado tímbrico lo desaconseja.

Por otra parte hay que saber que el oído no reacciona igual ante todas las frecuencias posibles de los movimientos vibratorios. Solo una pequeña parte de esas frecuencias son transformadas en sonido. Como ya se ha dicho anteriormente, esta gama de frecuencias se sitúa entre los 20 y los 20000 Hz. No obstante, la práctica musical solo emplea como sonidos fundamentales aquellos que se hallan comprendidos entre los 30 y 12000 Hz aproximadamente. Además, el tono está estrechamente relacionado con la intensidad de forma que su frecuencia puede disminuir o aumentar en función del incremento de intensidad. Así, para todas las frecuencias menores de 1000 Hz el tono decrece si la intensidad aumenta; si éstas están comprendidas entre los 1000 y 5000 Hz el tono se mantiene relativamente independiente de la intensidad; por último, a partir de los 5000 Hz el tono sube si crece la intensidad.

La gama de frecuencias audibles que aludíamos en el párrafo anterior se denomina *Banda de Audiofrecuencias* y puede variar de una persona a otra. Los sonidos cuya frecuencia se sitúa por encima del límite superior o inferior de esta gama, se denominan ultrasonidos e infrasonidos, respectivamente.

Al objeto de concretar y determinar la altura de un sonido se utiliza una clasificación denominada *Bandas de Octava*, que consiste en emplear la relación de octava, esto es, 2 a 1.

4.3 INTENSIDAD

La siguiente cualidad consustancial a toda sustancia sonora la constituye *la intensidad*, entendida ésta como la característica del sonido en virtud de la cual podemos distinguir un sonido fuerte de otro débil o viceversa, esto es, la fuerza productora del sonido. Esta cualidad la percibimos en forma de sensación sonora como sonoridad.

¹⁹ Véase el Anexo II.

La intensidad depende primariamente de la amplitud del movimiento vibratorio precursor, de forma tal que en función del vigor o flujo de energía con el cual la perturbación incide en las partículas en vibración, el sonido será más o menos intenso. En consecuencia, a mayor amplitud de onda sonora, mayor sensación de sonoridad, y viceversa, a menor amplitud menor sensación sonora, o dicho de otro modo, esta cualidad será directamente proporcional a la amplitud de las vibraciones.

Tal y como sucede con la altura, la intensidad es una sensación que acaece de modo subjetivo y que como tal no puede ser medida físicamente. Sin embargo, la magnitud que la relaciona intrínsecamente, esto es, la amplitud representada en la onda sonora, sí es mensurable matemáticamente en decibelios. Por lo que respecta al clarinete, la intensidad máxima que puede alcanzar se cifra en torno a 48 decibelios.

Al hablar de intensidad, debemos considerar varios conceptos y magnitudes en el estudio de los fenómenos sonoros que conviene analizar detenidamente: *decibelio, rango dinámico, límites de audibilidad, intensidad acústica, potencia acústica y presión acústica.*

4.3.1 Decibelio

Se ha demostrado que las variaciones de sensación sonora no son proporcionales a las variaciones de intensidad -estímulo- que el oído percibe. La relación entre estímulo y sensación la define la Ley de Webwe-Fechner, cuyo enunciado es el que sigue: *cuando los estímulos o intensidad crecen en progresión geométrica, las sensaciones o sonoridad crecen en progresión aritmética, es decir, que la magnitud de una sensación crece con el logaritmo del estímulo.*

Por tanto, el oído transforma en sensación el logaritmo del estímulo. La unidad de sensación se llama bel²⁰. Así, se define bel como la sensación experimentada cuando el estímulo, a una determinada frecuencia, tiene una intensidad 10 veces mayor que en el umbral de audibilidad. El bel es, por tanto, el logaritmo en base 10 de la relación de dos potencias o intensidades. No obstante esta unidad resulta demasiado grande, pues supone aumentos de 10 veces, por lo que se ha normalizado el uso de la décima parte del bel, conocido como el *decibel o decibelio (dB)*. Su expresión es la siguiente:

$$S = 10 \text{Log} \frac{I}{I_0}$$

Dado los amplios márgenes de variación, es conveniente cuando se estudia los fenómenos acústicos utilizar escalas logarítmicas para reducirlos. El decibelio es una unidad logarítmica que expresa la sensación entre dos cantidades de fuerza, de presión, de intensidad o de otros parámetros, y es usado para medir el nivel de diferentes parámetros. En función de éstos, dicha sensación adoptará distintas formas²¹. Dicho de otro modo, proporciona una medida relativa de intensidad sonora. El logaritmo utilizado es

²⁰ Nombre atribuido en honor al físico norteamericano Alexander Graham Bell (Edimburgo 1847 – Baddeck 1922), inventor, entre otras cosas, del teléfono.

²¹ No se considera de interés para el estudio expresarlas. Sí es interesante, a modo de ejemplo, saber que siempre que se duplica la potencia, se incrementa la sensación en 3 dB. Asimismo, si se disminuye la distancia a la mitad, la sensación aumenta en 6 dB. En lo que a presión se refiere, cuando se dobla la sensación aumenta en 6 dB. Por último, siempre que se doblen las fuentes, habrá una ganancia de 3 dB.

simplemente la base de 10 expresado como múltiplo del umbral de audibilidad. Por consiguiente, el nivel de referencia siempre se corresponde con 0 dB. El factor de 10 que multiplica el logaritmo se debe, pues, a que un decibelio supone la diferencia más simple de intensidad sonora para un oído normal. Este procedimiento proporciona un rango manejable de números que permite abarcar la amplia gama de respuesta del oído humano, esto es, desde el umbral de audibilidad a 1000 Hz, hasta la cima, diez billones de veces más.

El nivel de referencia varía lógicamente según el parámetro que se quiera obtener. No es el mismo nivel de referencia para la presión acústica, que para la intensidad acústica o para la potencia acústica. A continuación se dan los valores de referencia.

Nivel de Referencia para la Presión Sonora (en el aire) = $0.00002 = 20 \times 10^{-5}$ Pascal

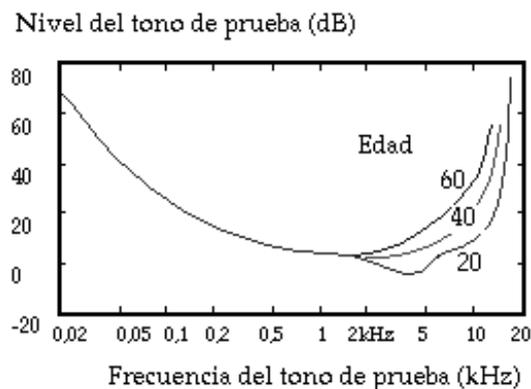
Nivel de Referencia para la Intensidad Sonora (en el aire) = $0.000000000001 = 10^{-12}$ w/m²

Nivel de Referencia para la Potencia Sonora (en el aire) = $0.000000000001 = 10^{-12}$ w

4.3.2 Rango Dinámico

Cualquier ser humano solo es capaz de detectar aquellos sonidos que se encuentren dentro de un determinado rango de amplitudes y frecuencias. Así, se define el *rango dinámico* del oído como la relación entre la máxima potencia sonora que éste puede manejar y la mínima potencia necesaria para detectar un sonido. Asimismo, el rango de frecuencias asignado convencionalmente al sistema auditivo va desde los 20 Hz hasta los 20 kHz, aún cuando este rango puede variar de un sujeto a otro o disminuir en función de la edad del sujeto (Fig. 4.2), de trastornos auditivos o de una pérdida de sensibilidad -temporal o permanente- debida a la exposición a sonidos de elevada intensidad.

Fig. 4.2 Variación del rango de frecuencias con la edad



Ahora bien, la sensibilidad del sistema auditivo no es independiente de la frecuencia; por el contrario, dos sonidos de igual presión sonora pueden provocar distintas sensaciones de intensidad o sonoridad, dependiendo de su contenido espectral.

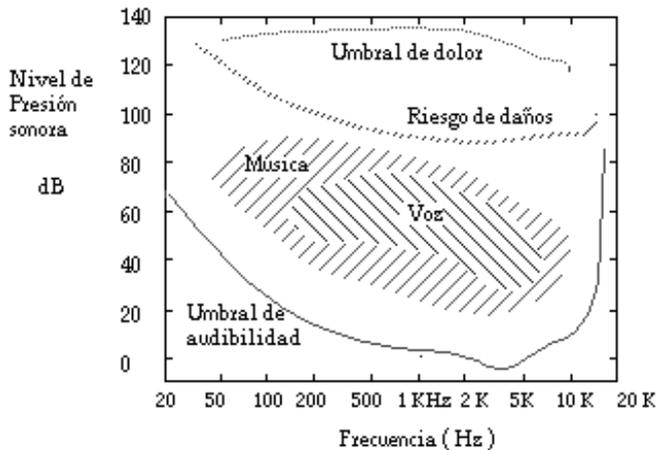
4.3.3 Límites de Audibilidad

Ya hemos dicho que la sensibilidad del aparato auditivo puede variar considerablemente de un sujeto a otro; además, puede cambiar según las condiciones de propagación del sonido. Por esta razón, resulta conveniente definir un umbral de audibilidad promedio, también llamado mínimo campo audible promedio. Existen, por tanto, unos límites tolerables de audición en ambos extremos de la gama audible. Por otra parte, hay que tener en cuenta que el umbral de audibilidad promedio no representa un límite absoluto, sino una medida estadística asociada con la probabilidad de detección de un tono de determinada frecuencia y amplitud y que, por ende, debe ser empleado con cautela.

Para que el oído transforme una determinada energía en sonido necesita unos mínimos niveles de ésta. El punto en el cual un sonido de seguir disminuyendo su intensidad, deja de ser percibido, o bien, el punto que debe alcanzar la intensidad de dicho sonido para empezar a ser oído, se conoce como *Umbral de Audición*. En cuanto al otro extremo, la *Cima de Audibilidad*, lo constituye el punto en el que, de aumentar la intensidad, se produce la sensación de dolor. Ambos extremos varían de una persona a otra y, por otra parte, no todos los sonidos tienen los mismos límites.

Por otra parte, conviene saber que para el oído resulta difícil apreciar variaciones de intensidad en un campo de frecuencias tan amplio. Por eso, estos niveles mínimos varían de unos sonidos a otros en función de la frecuencia. La zona de mayor sensibilidad se halla comprendida entre los 1000 y 3000 Hz. En la banda de los 3000 Hz presenta un mínimo que aumenta tanto para las frecuencias graves como para las agudas.

Fig. 4.3 Umbrales de audibilidad



En la fig. 4.3 se aprecia que el extremo superior del rango dinámico está dado por el umbral de dolor, donde se encuentra el límite de riesgo de daños, el cual representa un umbral de presión sonora que no debe sobrepasarse por más de un cierto período de tiempo -ocho horas diarias por día laboral-, o de lo contrario puede producirse un pérdida de sensibilidad permanente.

En el extremo inferior observamos el umbral de audibilidad (*UA*), el cual representa la sensibilidad del aparato auditivo, es decir, el valor mínimo de presión sonora que debe tener un tono para que éste sea apenas perceptible. De la fig. 4.3 resulta obvio que esta sensibilidad es dependiente de la frecuencia de la señal sonora; a modo de ejemplo, un tono de 1 kHz y 20 dB *SPL* será audible -está por encima de la curva-, mientras que un tono de 50 Hz e igual nivel será inaudible -está por debajo de la curva-. Se desprende, asimismo, de la figura anterior, que nuestro aparato auditivo es capaz de operar sobre un rango de presiones sonoras muy amplio -unos 150 dB-. Las presiones sonoras correspondientes al mínimo del umbral de audibilidad define las presiones sonoras máximas que puede soportar el oído.

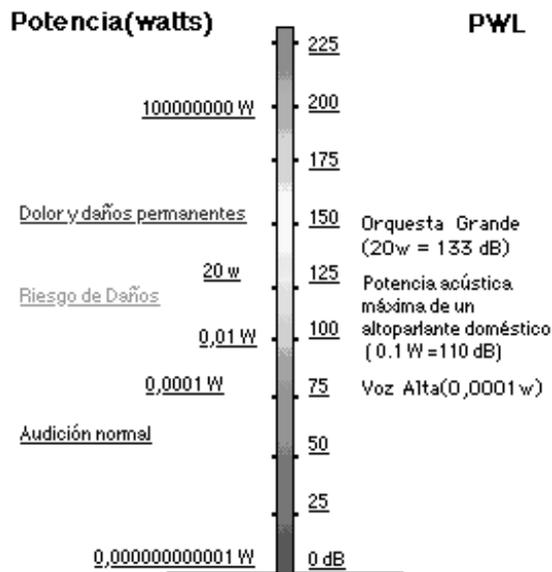
4.3.4 Potencia Acústica

Se define como la cantidad de energía radiada por una fuente determinada. *El Nivel de Potencia Acústica (PWL)* es la cantidad de energía total radiada en un segundo y se mide en watos *W*. Consiste en una medida relativa a un valor de referencia de potencia y se define como:

$$PWL = 10 \log \frac{W}{W_0}, \quad \text{donde } W_0 = 10^{-12} \text{ watos}$$

y *W* es la potencia irradiada por la fuente

Fig. 4.4 Niveles típicos de Potencia Acústica

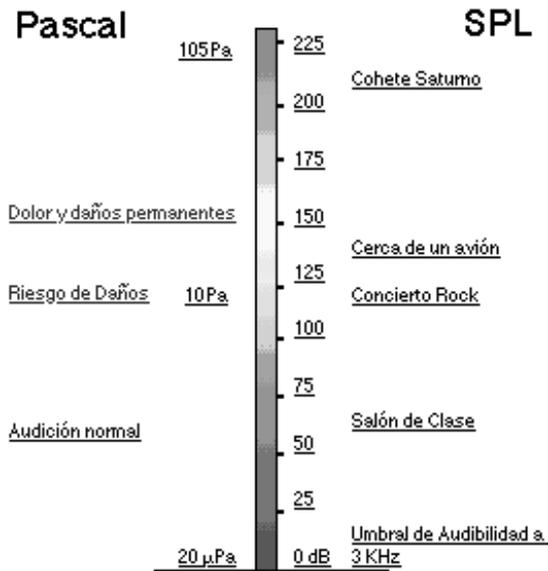


4.3.5 Presión Acústica

Nos refiere las variaciones de presión atmosférica que genera una onda engendrada por una potencia acústica. Estas variaciones se miden en unidades llamadas Pascal ($1 \text{ Pascal} = 1 \text{ Newton/m}^2$). Se tiene, además, que 10^5 Pascal es igual a 1 atmósfera. Por otra parte, la presión acústica aumenta con la raíz cuadrada del incremento de la potencia acústica. Así, no se obtendrá una presión acústica doble sonando al mismo tiempo dos clarinetes, sino sonando cuatro. Por su parte, el *Nivel de Presión Sonora (NPS)* es una medida que relaciona el valor de la presión acústica con el mínimo audible promedio. Se define como 20 veces el logaritmo decimal de la relación entre la presión sonora eficaz y la presión que se toma como referencia (2×10^{-5} Pascal):

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_{ref}} ; P_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pascal (en el aire)}$$

Fig. 4.5 Niveles de Presión Sonora



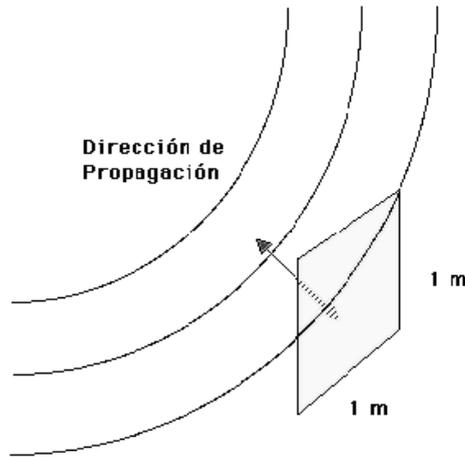
4.3.6 Intensidad Sonora

Ya hemos visto que la intensidad, desde el punto de vista subjetivo, es la sensación auditiva de un sonido fuerte o débil, también conocida como sonoridad. Considerada objetivamente, se define como el valor medio de la energía que atraviesa, en la unidad de

tiempo, la unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación de las ondas. Este valor depende del campo acústico donde se halle el sonido.

Para medir la intensidad se utiliza actualmente analizadores de doble canal con posibilidad de espectro cruzado y una sonda que consiste en dos micrófonos separados a corta distancia. Permite determinar la cantidad de energía sonora que radia una fuente dentro de un ambiente ruidoso. No es posible medirlo con un sonómetro. El nivel de intensidad sonora se mide en w/m^2 .

Fig. 4.6 Definición gráfica de la Intensidad Sonora



La intensidad se puede expresar como *absoluta* o *relativa*. La absoluta nos proporciona la medida de toda la energía de la onda sonora en unidades de intensidad o de presión, mientras que la relativa toma como referencia la intensidad umbral. La expresión de esta última, por tanto, es el cociente entre la intensidad absoluta I y la intensidad umbral I_0 :

$$I_r = \frac{I}{I_0}$$

El Nivel de Intensidad Sonora (IL) es una medida relativa a una referencia:

$$IL = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad \text{donde la referencia es: } I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

4.4 TIMBRE

Esta cualidad nos permite identificar la fuente primigenia del sonido, es decir, permite la diferenciación de dos sonidos con análogas alturas e intensidades, pero de origen dispar. Es, por consiguiente, la cualidad que nos permite diferenciar el sonido proveniente de dos instrumentos diferentes. Físicamente consiste en varias frecuencias secundarias que se superponen a la fundamental, cuyas intensidades son menores.

El timbre lo percibimos subjetivamente en nuestro sistema auditivo como el color de una determinada sustancia sonora. En efecto, podemos identificar la voz de una persona determinada o el instrumento emisor de un sonido por el timbre, dado que esta cualidad lo individualiza. Esto depende del grado de complejidad del movimiento vibratorio precursor del sonido. Según el teorema de Fourier un movimiento vibratorio complejo realizado por un determinado cuerpo esta efectuando simultáneamente varios movimientos armónicos simples, reductibles mediante el análisis. Generalmente cuando las moléculas reciben una perturbación, se excitan con impulsos secundarios diversos y, por tanto, de frecuencia variable. Dado que esta perturbación la genera una causa común, habrá una relación entre sus frecuencias. En el caso del clarinete, la acción vibratoria y generadora de la lengüeta simple perturba las moléculas del tubo en modo diverso en varias direcciones de dentro afuera. De manera que el sonido resultante estará compuesto por una frecuencia fundamental de máxima intensidad y varias frecuencias secundarias múltiples de aquélla, pero de menor intensidad, denominadas armónicos. Del mismo modo el sonido resultante del movimiento vibratorio complejo podrá descomponerse en los sonidos puros que provienen, a su vez, de los movimientos armónicos simples que integran aquél. Cada sonido puro resultante del movimiento armónico simple constituirá un armónico. El primer armónico se denomina fundamental y los demás parciales superiores. Si estos se asemejan a la serie armónica derivada de la fundamental, se dice que son concordantes. En caso contrario son discordantes y se les denomina *sobretonos*.

El físico alemán G. S. Ohm fue el primero en expresar esta cualidad sonora. A este respecto sostenía que el oído humano era capaz de analizar las ondas complejas que le llegan descomponiéndolas en cada una de sus componentes sinusoidales, esto es, movimientos simples. A tal efecto enunció una ley: *las diferencias de timbre de los distintos sonidos provienen únicamente de la presencia de armónicos y de su intensidad relativa*.

Los sonidos parciales o armónicos son en sus frecuencias múltiplos enteros de la fundamental, de modo que el sonido más grave corresponderá al movimiento armónico simple de periodo T -frecuencia n -, el segundo armónico T_2 , el tercer armónico T_3 , y así sucesivamente. El conjunto de sensaciones sonoras producidas por estos armónicos determinará la sensación de timbre. Así, de ordinario podemos oír algunos armónicos individualmente como notas separadas en los procedimientos de obtención de los sonidos de un determinado instrumento, empero cuando oímos todos los armónicos fusionados por nuestro cerebro no lo oímos como notas sino que lo percibimos como timbre. También se pueden escuchar ciertos armónicos en el clarinete, en especial los terceros, como notas independientes, mediante un sutil ejercicio de audición, aunque es siempre más fácil apreciarlos en el complejo sonoro emitido por otro clarinete que en el propio.

Se puede obtener la onda resultante que define el timbre de un instrumento sumando vectorialmente los desplazamientos que realizan los distintos armónicos componentes del complejo sonoro.

El número de armónicos que conforman y determinan el timbre de cada sonido depende del cuerpo sonoro productor y de su modo de excitación, lo cuál revela que el timbre de un sonido nos aporta la procedencia y su modo de obtención. Pero también se halla relacionado con los procesos de ataque, caída y sostenimiento de un sonido, esto es, la curva que define el proceso vital de éste. De modo que en función de estos parámetros quedarán determinado aquél. En el caso del clarinete, su timbre viene determinado por el modo de excitación de su embocadura de lengüeta simple junto con la acción resonadora de su tubo que, a su vez, la determina su forma interna²². Esta asociación de factores son los causantes de un gran número de componentes armónicos en las fundamentales del clarinete, prevaleciendo siempre los impares por su condición de tubo cerrado²³.

No todos los armónicos de una sustancia sonora compleja son perceptibles. Aquellos cuya frecuencia queda por encima del umbral superior de la audición y los que dado su nivel de intensidad se sitúan por debajo del límite audible para esa frecuencia, quedan fuera de la capacidad auditiva. Por esta razón nuestro oído solo puede percibir un número limitado de armónicos de un sonido, los cuales constituyen el denominado *formante del sonido*.

La sensación del timbre de un sonido no es mensurable tal y como sucede con la de altura e intensidad, pero sí se puede obtener analíticamente mediante el denominado espectro acústico, en virtud del cuál se obtiene gráficamente los distintos armónicos de un sonido con expresión de sus frecuencias e intensidades. Del mismo modo, se puede obtener la serie armónica de un sonido fundamental determinado sobre la base de un método práctico que desarrollaremos en el apartado 7.2 del estudio. En todo caso estas cuestiones las analizaremos más detenidamente en la siguiente parte.

En cuanto al timbre del clarinete, dada su relevancia en el desarrollo del estudio, será objeto de análisis y estudio en el Capítulo 17, así como en la parte experimental del mismo.

Llegados a este punto podemos concluir este capítulo definiendo el sonido como *la sensación producida en el oído por un movimiento vibratorio de altura, intensidad y timbre determinados*.

²² Véase el apartado 14.1.

²³ Se pueden observar en los espectrogramas del apartado 11.7.

FENOMENOS Y ACCIDENTES ACUSTICOS IMPLICADOS EN EL PROCESO SONORO DEL CLARINETE



Capricho pintoresco para Clarinete y Piano, Op. 41. Yuste (1870-1947)

Cabe ahora considerar ciertos fenómenos y accidentes acústicos que tienen una importancia superlativa para comprender el proceso de producción y propagación sonora en el clarinete²⁴. Estos fenómenos son: *las interferencias, la reflexión, las ondas estacionarias, la difracción, las pulsaciones, la oscilación natural y la oscilación forzada, la resonancia y el efecto de las bocinas.*

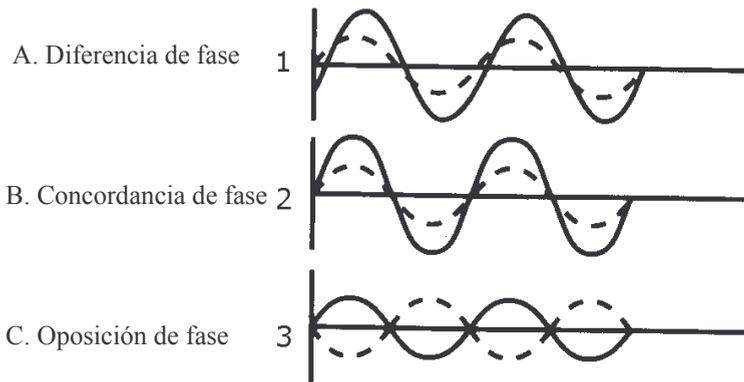
5.1 LAS INTERFERENCIAS

Constituye un fenómeno que se origina cuando dos o más ondas se propagan simultáneamente en un mismo medio elástico, a saber, las elongaciones resultantes de éstas. En este supuesto, las partículas de este medio realizan movimientos que provienen de la composición de los movimientos que aquéllas imprimen individualmente a cada partícula. Este efecto, conocido también como *principio de superposición*, deriva, dependiendo de la naturaleza de las ondas superpuestas, en varios tipos de interferencias. En efecto, las ondas interferentes, en función de su naturaleza, producirán efectos dispares. Así, las ondas con la misma frecuencia y, por lo tanto, análogo período y longitud de onda, además de idéntico sentido, se dice que están en *concordancia de fase* (Fig. 5.1B). Sus valores máximos positivos se superponen en el mismo instante. Cuando estos valores máximos se interfieren

²⁴ Véase también el apartado 16.1.

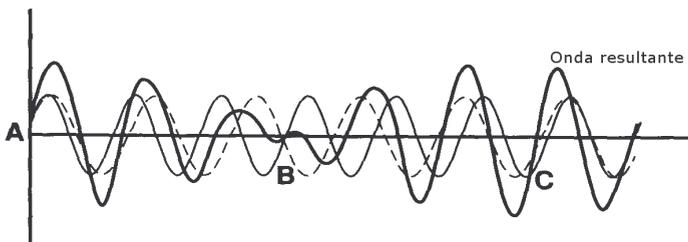
en tiempos distintos, entonces diremos que están en desfase o en *diferencia de fase* (Fig. 5.1A). Por último, esas ondas interferentes, amén de hallarse en concordancia o diferencia de fase, pueden estar en *oposición de fase* (Fig. 5.1C). En todos los casos descritos, este fenómeno de superposición dará lugar a una onda resultante cuya amplitud vendrá determinada por el tipo de interferencia.

Fig. 5.1 Tipos de interferencias de dos ondas



Consideremos ahora para la observación gráfica de este fenómeno de superposición dos sonidos que se interfieren con análoga amplitud pero que difieren sensiblemente en sus frecuencias (Fig. 5.2). Pues bien, podemos observar que en el momento A se hallan en fase; en el B se anulan; y en el C vuelven a estar en fase.

Fig. 5.2 Onda resultante de la superposición de dos sonidos

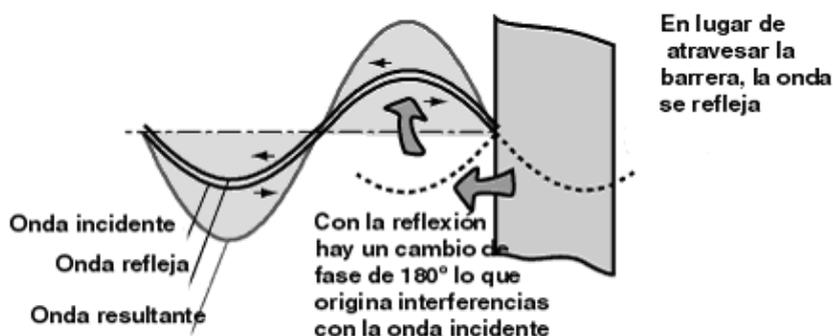


5.2 LA REFLEXIÓN

La reflexión del sonido es un fenómeno que se origina cuando una onda que se propaga en un medio elástico incide en la superficie que separa ésta con otro medio y queda reflejada (Fig. 5.3). Es esta superficie la que actúa como reflectante e impele a la onda a volver a su medio primitivo en sentido contrario, desprendiéndose en su reflejo de cierta energía que queda absorbida en la nueva superficie transformándose en calor. Mas para que se lleve a cabo el fenómeno es indispensable que la superficie objeto de la reflexión sea opaca a la onda incidente, esto es, impida su propagación en dicha superficie. El ángulo resultante de la onda incidente y la refleja es igual siempre que el proceso se lleve a cabo de forma regular. En este sentido, si la onda incide perpendicularmente a la superficie, ésta se reflejará en la misma dirección pero en sentido contrario. Por otra parte, se puede experimentar un retraso de fase si la densidad del medio reflectante es mayor que la del medio primitivo, mientras que si esta densidad es menor la onda refleja no sufrirá retraso de fase.

Este fenómeno es el que se lleva a cabo en el interior del tubo del clarinete en el proceso de formación de la onda estacionaria y es de suma importancia para comprender la mecánica de ésta. En efecto, entre una onda generada como consecuencia de movimientos vibratorios y su reflexión sobre una superficie cualquiera, siempre entre superficies en paralelo, se pueden originar ondas estacionarias -véase el apartado siguiente-, siempre que la distancia entre la superficie reflectora y el foco emisor sea múltiplo entero de la semilongitud de onda. La reflexión debe producirse de forma regular en la superficie reflectora para que de esta forma coincida la dirección de ambas ondas. En este caso, la onda incidente y la refleja quedan neutralizadas en ciertos puntos, con lo cual se originan interferencias. La onda resultante de estas dos ondas que se propaga en la misma dirección y sentido inverso es una vibración de la misma frecuencia y amplitud variable.

Fig. 5.3 Representación gráfica de una reflexión sonora



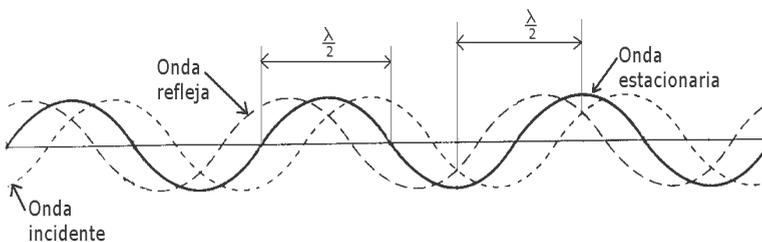
Lo que determina la reflexión de una onda en el extremo abierto de un tubo depende de los tamaños relativos de la longitud de onda de la onda estacionaria y del diámetro del tubo. Si la longitud de onda es mucha más larga que el diámetro del tubo, la energía acústica prácticamente queda encerrada y poco sonido emana del tubo.

5.3 LAS ONDAS ESTACIONARIAS

Este tipo de ondas nos interesan especialmente para comprender la mecánica de producción y propagación sonora en el interior del tubo del instrumento objeto de estudio. Son éstas un tipo especial de interferencia que se produce cuando en un medio elástico se propagan dos ondas con frecuencias y amplitudes análogas en una misma dirección pero en sentido inverso (Fig. 5.4). En esta situación, la onda resultante es una onda estacionaria, dado que las perturbaciones que la constituye permanecen inmóviles, sin variar su posición.

La onda estacionaria, pues, se origina como consecuencia del fenómeno de reflexión sonora. Como consecuencia de una corriente incidente, una primera onda compresiva se propaga en un medio elástico en una dirección y, a causa de la reflexión de ésta, se origina una nueva onda depresiva en sentido inverso que avanza con la misma velocidad. Las amplitudes de ambas son análogas, pero las direcciones opuestas. La onda resultante presentará puntos en los cuales los movimientos vibratorios que la constituyen permanecen en reposo denominados *nodos*, y otros puntos donde la amplitud de éstos variará desde un valor mínimo hasta un máximo denominados *vientres*. En estos puntos el valor de ésta es el doble de la de las ondas que se superponen e interfieren. La distancia entre dos nodos o dos vientres consecutivos es constitutiva de media longitud de onda o semilongitud, esto es, $\lambda/2$.

Fig. 5.4 Onda estacionaria resultante de la interferencia de una onda incidente y su refleja



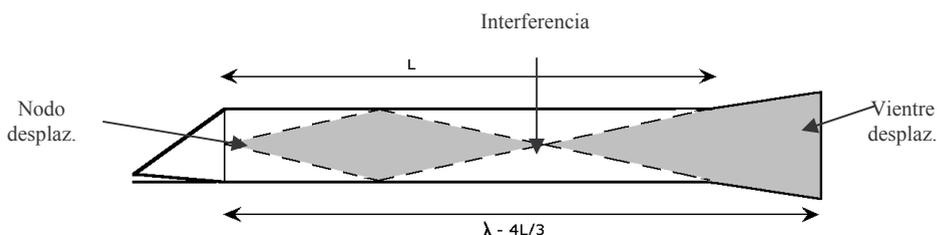
Por tanto, estas ondas se expresan en forma de compresiones y rarefacciones que se mueven abajo del tubo, esto es, son ondas longitudinales dado que los movimientos de las moléculas de aire se mueven en la dirección del eje de tubo, aunque la magnitud de estos movimientos sea muy pequeña. Los modos normales de vibración dependen en este caso de si el final del tubo se halla abierto o cerrado, así como de su forma interna.

Debemos, pues, considerar dos principios fundamentales en la constitución de la onda estacionaria en un tubo (Fig. 5.5):

1. Las frecuencias resonantes que se obtienen son aquellas frecuencias que son reforzadas y sostenidas por la forma del tubo.
2. Las ondas estacionarias solo son posibles si las ondas son reflejadas en el final abierto.

Parece claro que las ondas se reflejan en el final de un tubo cerrado, pero no es tan obvio que la reflexión se produzca en el caso de un final abierto. La razón de la reflexión en este caso es que las ondas son difractadas²⁵ hacia afuera cuando alcanzan el final del tubo, con lo cual sufren un cambio abrupto de condiciones. Esto permite que una parte de la energía de la onda quede reflejada para mantener la onda estacionaria, mientras que el resto se transmite al oído. La cantidad de difracción depende de la relación que se establece entre la longitud de onda y el diámetro del tubo. Si esta relación es pequeña entonces la onda sonora se transmite casi en su totalidad, mientras que si esta relación es considerable, la difracción se producirá de forma importante y una gran proporción de energía sonora se reflejará en el final abierto.

Fig. 5.5 Onda estacionaria originada mediante reflexión en el tubo del clarinete (primer parcial)



Se puede comprobar la existencia de ondas estacionarias por reflexión mediante un tosco experimento consistente en insuflar aire en una especie de flauta construida con una embocadura y un tubo de unos 40 cm de largo por 3 cm de diámetro en cuyo interior hemos dispuestos varios granos o partículas de arena. Pues bien, mientras suena este burdo instrumento podremos observar ciertas zonas donde la vibración es más intensa que correspondes a los vientres, y otras equidistantes de aquellas donde la vibración es prácticamente nula, equivalentes a los nodos. Al cesar el sonido observaremos que las partículas están dispuestas en pequeños montículos que corresponden a los nodos, dado que las partículas se acumulan en regiones inmóviles. Un suceso análogo acaece en el interior del tubo del clarinete, pero en éste las partículas vibrantes son aéreas.

También se puede observar este fenómeno en el proceso de vibración de una cuerda de un instrumento que ha sido frotada. Durante el tiempo que dura la vibración podemos observar la existencia de una onda estacionaria que permanece inmóvil.

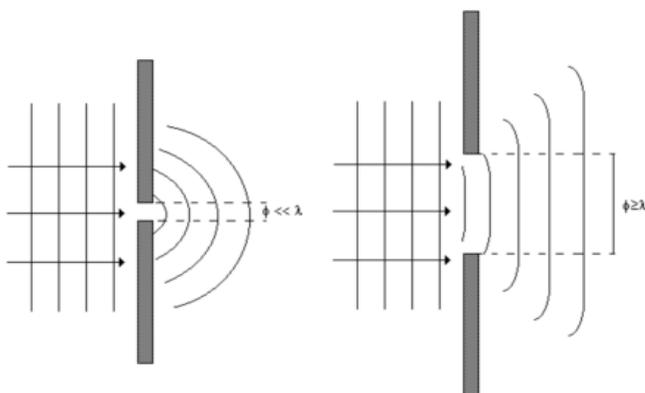
²⁵ Se trata este fenómeno en el siguiente apartado.

5.4 LA DIFRACCION

La difracción, por su parte, es un fenómeno sonoro que también tiene sus implicaciones en la acústica del clarinete. Acaece cuando una onda sonora incide en una superficie con una pequeña abertura y, en función del diámetro de ésta y de su longitud de onda, se propaga en un nuevo medio. Efectivamente, la propagación de la onda al traspasar la abertura se lleva a cabo en función de la relación que se establece entre la longitud de onda y el diámetro de la abertura. De este modo, si la abertura es grande con relación a la longitud de onda, el efecto de la difracción es pequeño, y la onda se propaga en líneas rectas o rayos, de forma semejante a como lo hace un haz de partículas, mientras que si aquella es pequeña con relación a la longitud de onda, ésta se disipa en su paso por la abertura para propagarse después en el nuevo ambiente como si se hubiese originado en la misma. En cualquier caso, un orificio excesivamente pequeño en su diámetro puede distorsionar la onda sonora y producir un sonido débil. Este fenómeno ha sido considerado especialmente por los constructores de instrumentos, los cuales han diseñado los orificios dispuestos a lo largo del tubo guardando una proporción geométrica.

En el clarinete, dado que sus diferentes longitudes de onda son relativamente grandes en relación con los orificios practicados en el tubo al efecto de obtener las diferentes fundamentales al variar la longitud del tubo, la onda sonora que se origina en el interior del tubo como consecuencia de los movimientos vibratorios se difracta cuando alcanza un orificio que ha sido destapado digitalmente, propagándose parcialmente en el nuevo medio (Fig. 5.6). Además, el diámetro de los orificios del tubo guarda una proporcionalidad con la longitud de éste, de modo tal que conforme se reduce la longitud del tubo, también lo hace el diámetro de los orificios. Es inevitable, sin embargo, que suceda este fenómeno de distorsión en los sonidos de la parte más alta del tubo del clarinete con diámetros pequeños, motivado por su condición de octaveador a la duodécima en lugar de a la octava²⁶.

Fig. 5.6 Difracción sonora



²⁶ Acontece este fenómeno, especialmente, en los sonidos Sol#₃, La₃ y La#₃.

5.5 LAS PULSACIONES

Este fenómeno constituye un caso particular de interferencias. Tienen su razón de ser en tanto en cuanto la frecuencia de las ondas que se propagan simultáneamente en un medio elástico difiere. En este supuesto, la amplitud de la onda resultante experimentará valores máximos y mínimos que tendrán su traducción perceptible en aumentos y disminuciones periódicas de la intensidad. Esta sensación sonora es empleada para afinar los instrumentos que no son de entonación fija. A modo de ejemplo consideremos dos clarinetes emitiendo el mismo sonido con una ligera desafinación. Pues bien, la diferencia entre la frecuencia de ambos determinará el número de pulsaciones existente entre ellos. Así, un sonido de 443 Hz y otro de 445 Hz producirán 2 pulsaciones por segundo que serán perceptibles en el conjunto sonoro produciendo una cierta disonancia y aspereza que deberá ser corregida por el instrumentista. Obviamente, conforme las frecuencias de las ondas se aproximan más, la frecuencia del batido es cada vez menor hasta que llega a desaparecer cuando éstas se igualan. Aunque este fenómeno se produce invariablemente, nuestro oído solo lo percibe cuando las frecuencias de las dos ondas son muy parecidas, ya que en el resto de los casos la amplitud varía demasiado rápidamente para que el oído las distinga -el oído humano puede distinguir hasta 10 pulsaciones por segundo-. Cuando las frecuencias son menos similares los batidos pueden ser demasiado rápidos para nuestro oído. Ahora bien, aunque los batidos no llegan a percibirse separadamente sí que pueden modificar el timbre del conjunto.

5.6 LA OSCILACION NATURAL Y LA OSCILACION FORZADA

Nos referimos a *oscilación natural* cuando un cuerpo capaz de realizar movimientos oscilatorios efectúa sistemáticamente el movimiento oscilatorio que requiere menor energía. El período que realiza dicho cuerpo se conoce con el nombre de *período o frecuencia natural de oscilación* y viene determinado principalmente por la elasticidad y la masa del cuerpo. Asimismo, hay que considerar en este fenómeno que determinados cuerpos ofrecen cierta resistencia al susodicho movimiento oscilatorio con lo cual se produce un amortiguamiento de las oscilaciones. Este fenómeno se conoce con el nombre de impedancia y es especialmente considerado por los constructores de instrumentos en su proceso de diseño.

La otra modalidad de oscilación, *la forzada*, acontece cuando el período con el que oscila el cuerpo difiere de su período natural de oscilación debido a la acción de un agente exterior que le comunica su propio período de oscilación. La amplitud de esta oscilación es siempre proporcional a la de la fuerza excitante que le comunica el agente exterior, mientras que su frecuencia es análoga. Estas oscilaciones son las que se producen en la mayoría de los instrumentos musicales.

5.7 LA RESONANCIA

El siguiente fenómeno sonoro cuya mecánica y naturaleza precisamos para comprender el proceso sonoro en el clarinete es *la resonancia*, también entendida como *vibración por simpatía*. Su concurso sobreviene cuando una fuerza periódica excita a un cuerpo con una frecuencia natural, igual o semejante a la de éste, haciéndole vibrar con la frecuencia de la fuerza excitante. Dicho de una manera más sencilla, la resonancia se produce cuando un cuerpo vibra junto a las vibraciones emitidas por otros cuerpos, esto es, las vibraciones de uno se comunican al otro. La forma del cuerpo -en el caso que nos ocupa, el tubo del instrumento- determinará el modelo de resonancia²⁷. La producción de este fenómeno es posible tanto en los cuerpos sólidos como en los gaseosos. Este fenómeno determina en gran medida el timbre del sonido producido, así como su afinación y es imprescindible para los instrumentos que precisan un resonador para potenciar las vibraciones que produce el agente excitador y obtener las diferentes longitudes acústicas que determinen la altura de cada sonido. En el clarinete, su tubo realiza formidablemente esta función acústica reforzando esas vibraciones y configurando su peculiar timbre.

Para comprender mejor este último fenómeno, vamos a aplicarlo al proceso sonoro en el clarinete. El tubo del clarinete tiene su propia frecuencia natural al igual que la lengüeta o la embocadura, así que cuando el cuerpo gaseoso -el aire contenido en el tubo- sea excitado por la fuerza de aquella, éste experimentará oscilaciones forzadas -dado que su período no será igual al de su período natural- y, por tanto, vibrará por simpatía al comunicarse las vibraciones de ambos cuerpos. La frecuencia de la fuerza excitante de la lengüeta y la del cuerpo gaseoso será análoga, mientras que la fase entre ambas oscilaciones sufrirá un cierto retraso. Este fenómeno lo definió muy bien *A. P. French* enunciando lo que sigue: un oscilador físico -la columna gaseosa contenida en el tubo del instrumento- se somete a una fuerza impulsora periódica -la vibración de la lengüeta- mediante un agente externo -el sople del instrumentista-.

5.8 LAS BOCINAS

El funcionamiento de este elemento constituye también un fenómeno sonoro relacionado con la acústica del clarinete. Sabemos que la emisión del sonido es de tipo esférico, por lo que si no se modifica su propagación natural será igual en todos los sentidos. Sin embargo interesa en ocasiones modificar esa propagación para conseguir dirigir la radiación sonora y alcanzar una mayor distancia. Su función, por tanto, es la de acoplar la energía acústica disponible a las características de emisión que se deseen.

Las bocinas se construyen de diversas formas y con materiales diferentes. Pero su forma básica consiste en una sección creciente hacia el exterior que se acopla al emisor al que se desea modificar su propagación natural. Es el caso del clarinete, cuya parte más inferior constituye la bocina o pabellón, encargado de dirigir la radiación sonora.

²⁷ Véanse los apartados 9.4 y 9.5.

La superficie interior de la bocina, al igual que sucede con las demás secciones del instrumento, debe ser totalmente reflectante para que no exista absorción de la energía radiante. Además debe ajustarse en forma y dimensiones a las características acústicas del instrumento dado que de ello depende también la afinación de los sonidos de esa zona del tubo.

Existen dos tipos principales de bocinas: la exponencial (Fig. 5.7) y la cónica (Fig. 5.8). La primera es la que se utiliza en los instrumentos musicales. En el caso del clarinete, se parte de la creencia por parte de docentes e intérpretes de que el pabellón del instrumento es cónico, cuando esto no es así. Este tipo de bocina se emplea para aplicaciones de megafonía en exteriores, pero para la música es inadmisibles porque su calidad de radiación sonora es inferior a la de la exponencial. Por lo tanto, para los instrumentos musicales -en nuestro caso, el clarinete- se utiliza la exponencial dado que proporciona más calidad a la radiación.

Fig. 5.7 Bocina exponencial

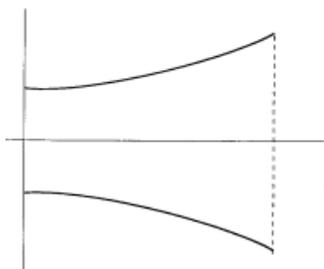
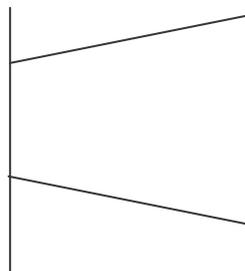


Fig. 5.8 Bocina cónica



ESPECTRO ACUSTICO E IMPEDANCIA ACUSTICA



6.1 INTRODUCCION

El estudio acústico de los instrumentos musicales se lleva a cabo científicamente mediante dos herramientas de trabajo que se hallan interrelacionadas: el espectro acústico y la impedancia acústica.

La primera permite realizar el estudio del timbre de un instrumento determinado mediante el análisis de su contenido armónico. Este procedimiento se lleva a cabo midiendo sus sonidos en un ambiente anecóico²⁸ y obteniendo así sus componentes armónicos con sus amplitudes relativas y sus frecuencias, lo cual resulta útil, desde el punto de vista del músico, para su ulterior optimización en la práctica musical.

La segunda proporciona una información valiosísima en orden a la optimización del instrumento en su fase inicial de diseño. Es útil, por tanto, desde el punto de vista del físico-acústico y del fabricante, dado que permite observar la respuesta del tubo a las distintas resonancias que serán válidas como notas de la escala y optimizar así aquellas discrepancias más acentuadas en su acústica. Asimismo, es el método utilizado para determinar las frecuencias de corte de los instrumentos musicales de viento, tan importantes en la calidad tonal. El procedimiento utilizado en este caso consiste en la obtención de las curvas de impedancia que permiten observar en un gráfico las resonancias -en forma de

²⁸ Véase el Anexo IX.

picos y valles- que podrán ser utilizadas como notas de la escala de forma estable y relativamente afinada.

Ambos procedimientos requieren ciertos conocimientos de acústica física y musical, así como unos medios técnicos adecuados para llevarlos a cabo.

Aunque en el análisis experimental se ha prescindido del parámetro de impedancia acústica debido a que ya ha sido llevado a término en otro estudio, sí se hace necesario su concurso en el estudio de campo para comprender ciertas cuestiones que atañen al funcionamiento acústico del clarinete.

6.2 ESPECTRO ACUSTICO

Llamamos espectro acústico al conjunto de armónicos o parciales superiores con sus diferentes intensidades y frecuencias que integran un sonido complejo. Mediante el espectro podemos analizar el timbre de un determinado sonido. El primer físico que analizó sonidos fue Helmholtz²⁹ mediante unos resonadores que el mismo había diseñado. Estos aparatos permitían determinar los armónicos presentes en cada sonido complejo analizado, pero no su intensidad.

El procedimiento de análisis de un sonido se lleva cabo mediante unos aparatos denominados analizadores de espectros o espectrómetro, en virtud de los cuales se obtienen gráficamente los diferentes armónicos de cada sonido analizado con expresión de sus frecuencias, representadas en el eje de abscisas, e intensidades, medidas en el eje de ordenadas. El espectro queda así registrado gráficamente en un diagrama mediante unas líneas, cada una de las cuales representa un armónico, que definen el timbre en función de sus amplitudes.

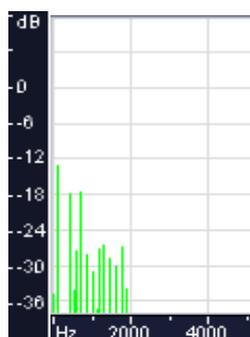
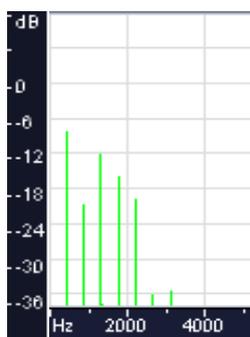
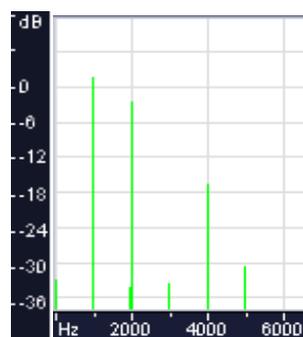
El espectro acústico no es ni más ni menos que la onda sonora analizada. La primera línea corresponde al primer armónico o fundamental, la segunda al segundo armónico o parcial de frecuencia doble de la fundamental, la tercera al tercero, de frecuencia triple, etc. La intensidad decrece progresivamente a medida que se asciende por la serie armónica, esto es, hay una disminución de la amplitud, lo que se traduce en una pérdida de sensación auditiva. En este sentido, la intensidad se consigna, en los espectrogramas, en decibelios en modo negativo, para indicar más claramente esta pérdida de sensación sonora.

En la actualidad se utilizan diversos programas informáticos mediante los cuales es posible obtener el análisis espectral de cualquier sonido registrado previamente.

Podemos observar en la parte experimental donde se analizan los sonidos que el número e intensidad de estos difiere en cada uno de los registros. Aunque las causas de este fenómeno las analizaremos detenidamente en la tercera y cuarta parte del estudio donde realizaremos el análisis y estudio de la acústica del clarinete, para tener una primera aproximación podemos decir que el timbre depende de la proporción e intensidad de estos componentes, lo cual, a su vez, se halla en función del modo de excitación de la columna gaseosa, en mayor medida, y de la naturaleza del tubo y sus formantes.

²⁹ Físico y filólogo alemán famoso por sus trabajos sobre las impresiones de los sentidos.

Por lo que respecta a la forma de onda u oscilograma, en función de las diferentes intensidades de los armónicos ésta quedará configurada. En las siguientes figuras se muestra a modo de ejemplo el espectrograma de los primeros sonidos de cada registro del clarinete.

Fig. 6.1 Espectrograma del Mi_2 Fig. 6.2 Espectrograma del Si_3 Fig. 6.3 Espectrograma del $Do\#_5$ 

Se observa como los componentes son más numerosos en el registro grave debido fundamentalmente a las largas longitudes de onda y a unas frecuencias bajas que facilitan la reflexión de las ondas y, por consiguiente, su establecimiento. A medida que se asciende por la escala los componentes se reducen por las altas frecuencias generadoras que, debido al efecto de la corrección de los orificios tonales abiertos³⁰, son irradiadas de forma más óptima al exterior del tubo, con lo cual se produce una menor reflexión sonora y las resonancias se debilitan. Además, hay una pérdida mayor de energía en las frecuencias altas. Por otra parte, una mayor longitud de tubo favorece la aparición de componentes dado que disponen de un mayor margen espacial para su verificación. A medida que se acorta esta longitud, el contenido espectral se reduce proporcionalmente.

6.3 IMPEDANCIA ACUSTICA

En un clarinete las vibraciones de la caña son dominadas por las resonancias del tubo, y estas, a su vez, determinan la afinación y la composición espectral del sonido en colaboración con otros factores. La impedancia acústica de un instrumento puede entenderse, desde el punto de vista musical, como la respuesta del tubo a las distintas frecuencias de excitación. En el caso del clarinete, la impedancia se mide en la boquilla del instrumento y permite cuantificar esas resonancias.

La impedancia acústica (Z) es igual a la fluctuación de presión dividida por la velocidad del volumen del fluido. Para una onda progresiva que se mueve en un largo tubo

³⁰ Se estudia este fenómeno en el subapartado 16.1.2.

esta cantidad es independiente de la posición del modelo de onda estacionaria formada por las frecuencias resonantes. En la boquilla, la resonancia está caracterizada por fluctuaciones de presión grandes y velocidades de las partículas muy pequeñas. La impedancia de aire, así, será considerable, de forma que si se obtiene la curva de impedancia, las resonancias resaltarán como una serie de picos agudos.

La impedancia acústica es el parámetro más importante del comportamiento de un elemento perforado. Efectivamente, para el diseño y el análisis de los instrumentos de viento es necesario conocer la impedancia del aire de entrada en la boquilla como una función de la frecuencia y ser capaz de medir los efectos de los orificios tonales abiertos y de otras perturbaciones. En teoría, esta cuestión parece simple: solo es preciso producir un flujo acústico de amplitud constante en la entrada de la boquilla y luego usar un micrófono para medir la presión de paso. Sin embargo, en la práctica este procedimiento se torna hartamente complejo. Dada la dificultad de modelar la interacción flujo-onda acústica en la región de los orificios, se recurre frecuentemente al uso de medidas experimentales que proporcionan modelos empíricos de la impedancia.

El problema principal radica en la producción de un flujo acústico en la entrada del instrumento. Para hacer esto se necesita una fuente de flujo con una impedancia de aire más alta que la que se va a medir en la boquilla, esto es, algún mecanismo controlado de forma automática para mantener un flujo constante ante el cambio de la impedancia de la boquilla.

Medidas experimentales de este tipo han sido realizadas sobre varios instrumentos de viento madera. Se trata de medir la presión acústica y el flujo de volumen acústico en el punto seleccionado -en la abertura que deja la caña con la boquilla-, o a través de ese punto. La presión acústica no presenta ningún problema, solo se requiere un pequeño micrófono de sonda con una impedancia acústica bastante alta para no desajustar las medidas. El flujo de volumen acústico es más difícil de medir. En este sentido, se han desarrollado varios métodos para medir este flujo.

Los primeros experimentos consistieron en producir una presión acústica considerable en una cavidad por un altavoz controlado automáticamente y un oscilador, y alimentar esta energía a la boquilla con un tubo capilar de impedancia alta. Benade (1960) usó un método similar, pero con un tubo lleno de algodón. El método capilar fue posteriormente perfeccionado por Backus (1974), quien usó un tubo capilar anular, que consistía en una barra centrada dentro de un tubo estrecho, para reducir la dependencia de la frecuencia con la resistencia de la fuente. Más recientemente, este último acústico e Ibsi (1987) han empleado un artilugio eléctrico con una frecuencia de resonancia alrededor de 5 KHz para generar el flujo, con una impedancia suficientemente alta para que el paso del flujo acústico pueda ser calculado directamente con su propia curva de resonancia sin necesidad de cualquier otro control.

Se han desarrollado otros métodos independientes y bastante diferentes. El más reseñable es el de Wolfe (2002), quien utilizó una fuente de ruido de altavoz de banda ancha en una cavidad, acoplado esto al punto de medida con una trompa afilada. El interior de esta trompa estaba lleno de algodón para aumentar la resistencia y la humedad de las resonancias principales. De esta forma obtuvo la impedancia de entrada de un largo tubo estrecho en tiempo real.

Se obtiene con este procedimiento un espectro donde se observan valores diferentes para frecuencias diferentes. El resultado nos aporta información acerca del trabajo recíproco de la caña y los labios del instrumentista y cómo esta colaboración incide

en el funcionamiento acústico del instrumento de una manera objetiva. Además, nos permite comparar las diferencias sutiles entre los instrumentos y visualizar las frecuencias susceptibles de ser emitidas en orden a su ulterior diseño.

Los cálculos obtenidos aportan también información detallada sobre la variación de la impedancia de entrada con la frecuencia. En esencia, estos métodos deben proporcionar las medidas correctas para dividir el tubo del instrumento en un número grande de pequeñas longitudes. Además, se puede medir el coeficiente sonoro de absorción de los varios tipos de materiales y el comportamiento acústico de silenciadores y otros tipos de filtros acústicos. Los resultados son útiles para estudiar la calidad del sonido emitido por el instrumento y optimizarlo.

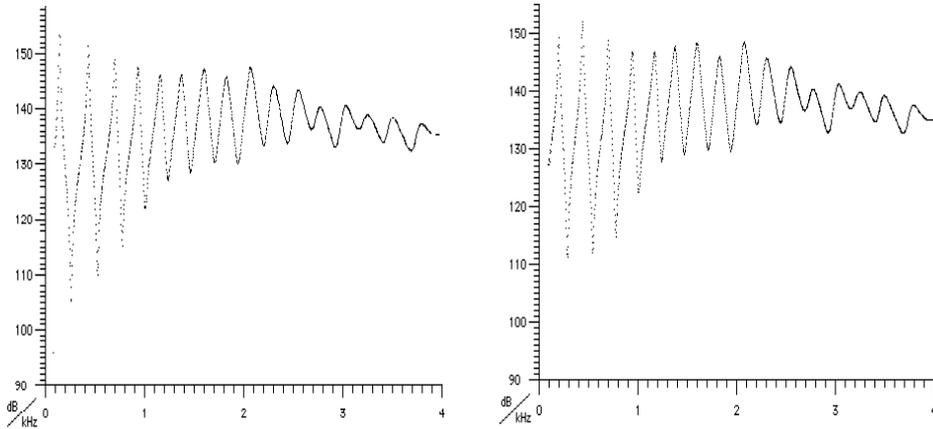
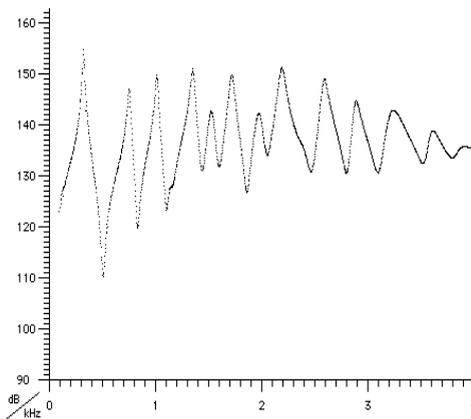
De manera que una curva de impedancia puede decirnos mucho sobre las características de emisión de un instrumento. Cuando se toca una nota sostenida de afinación constante, el tubo está excitado por la caña en un número considerable de frecuencias simultáneamente que deben formar una serie armónica, dado que la forma de onda periódica es compleja. La cantidad de amplificación dada a cualquier armónico por la resonancia de tubo viene determinada por la altura de la curva de impedancia en aquella frecuencia. Así, si la frecuencia de un pico de impedancia determinado coincide con un múltiplo entero del fundamental, entonces este armónico será fuertemente amplificado dentro del tubo.

La impedancia acústica de instrumentos de viento musicales varía espectacularmente con la frecuencia dado que estos instrumentos se diseñan para sólo producir solo varias frecuencias en una configuración particular. Debido a que los instrumentos del viento tienen una caña que se sella por la boca del ejecutante, estos instrumentos operan a unos máximos de Z : la variación de presión es grande, pero la parte oscilante del flujo aéreo es pequeño en la caña.

En cada una de las curvas de impedancia para el clarinete se aprecian unos máximos bastante altos y afilados. Así, el clarinete normalmente tocará una nota con una frecuencia cerca de cada uno de esos máximos altos. La facilidad de emitirla y la estabilidad de la nota depende de la altura y estrechez de los máximos. Por ejemplo, las notas más altas son más difíciles de tocar debido a la escasa presencia de máximos altos para estas notas.

La impedancia acústica del clarinete para cualquier digitación es uno de los factores que, en mayor medida, determina la respuesta acústica del instrumento en esa digitación. Determina qué notas pueden emitirse de forma estable con esa digitación.

En las siguientes figuras se muestra la curva de impedancia para la primera nota de cada registro:

Fig. 6.4 Curva de impedancia para el Mi_2 (Wolfe, 2002) Fig. 6.5 Curva de impedancia para el Si_3 (Wolfe, 2002)Fig. 6.6 Curva de impedancia para el $Do\#_5$ (Wolfe, 2002)

Los primeros máximos de cada gráfico pueden emitirse con estabilidad. Sin embargo los máximos y mínimos tienden a nivelarse en las frecuencias altas. Esto es por varias razones. En primer lugar, la pérdida de energía es mayor cuando el aire en movimiento está cerca de las paredes en las frecuencias altas. En segundo lugar, la campana del instrumento radia mejor las frecuencias altas que las bajas, con lo cual existe menos reflexión de frecuencias altas y las resonancias son más débiles. Por último, el efecto de la elasticidad de la caña es reducir las resonancias de las frecuencias altas, por eso las cañas más suaves no pueden emitir las notas altas de forma óptima.

Se puede comprobar, por otra parte, que es a partir de 1500 Hz aproximadamente cuando los picos se debilitan. Efectivamente, la frecuencia de corte³¹ de los clarinetes suele fijarse en 1500 Hz, con lo cual cuando se supera este límite, determinado por el diseño de los orificios tonales -su diámetro y espaciado-, resulta complicado emitir unos sonidos de forma estable y afinada, a no ser que se practiquen con un número considerable de orificios tonales cerrados.

Por otra parte, los picos más prominentes en cada gráfico corresponden a la resonancia de la nota emitida. Por ejemplo, en la fig. 6.5 el segundo pico es el más prominente -debido a que la llave portavoz ha debilitado la fundamental- y corresponde al tercer armónico -debido al funcionamiento de tubo cerrado del clarinete-, esto es, al Si_3 , con una frecuencia de 440 Hz. Por su parte, en la fig. 6.6 se aprecia como el quinto armónico es el más intenso, después de la fundamental, si bien ésta ha sido desplazada de su frecuencia normal y dado que ya no sigue la serie armónica, queda inalterada, saltando así el quinto armónico.

En suma, la impedancia acústica tiene una influencia grande en el sonido producido por lo que su estudio se hace indispensable para diseñar los instrumentos musicales. Su medida objetiva aporta a los científicos y fabricantes de instrumentos una información valiosísima en orden a su diseño y ulterior construcción.

³¹ Véase el apartado 14.3 para cualquier aclaración al respecto.

***III. FUNDAMENTOS DE ACUSTICA FISICO-
MUSICAL APLICADOS AL CLARINETE***

EL FENOMENO FISICO-ARMONICO: LOS ARMONICOS



Concierto para Clarinete y Orquesta. Francaix (1912-1997)

7.1 INTRODUCCION Y GENERALIDADES

El fenómeno Físico-Armónico es el resultado obtenido de la vibración libre de una cuerda ideal entre dos apoyos rígidos. El primero en dar una explicación científica de este fenómeno fue el francés Joseph Sauveur. Su trabajo sobre los armónicos superiores se publicó hacia el año 1701 y tuvo tal importancia que en 1722 Rameau basaría en él su *Teoría de la Armonía*. Muchos fueron los precursores de Sauveur en la idea de que al tono fundamental emitido por una cuerda le acompañaban otros tonos: Vincenzo Galilei, Galileo Galilei, Mersenne, y sobre todo René Descartes –piedra clave en el desarrollo del teorema-, fueron algunos nombres propios.

La amistad de Descartes con el matemático Isaac Beeckman movió a aquel a escribir el *Compendio de Música*. Este Tratado, que estaba escrito y dirigido al matemático, fue terminado el 31 de Diciembre de 1618 y sirvió de regalo de Año Nuevo a Beeckman el 1 de Enero de 1619. Beeckman era un teórico musical que se preocupaba de explicar físicamente las consonancias y disonancias, la teoría de los modos y cuestiones relacionadas con el placer de la audición, entre otros muchos conceptos.

La explicación del fenómeno Físico-Armónico dice que cuando una cuerda vibra libremente, lo hace de forma fraccionada siguiendo una proporción armónica obteniéndose como resultado unos tonos armónicos cuyas frecuencias son múltiplas enteras de la producida por la cuerda sin fraccionar. Al tono emitido por la cuerda sin fraccionar se llama

fundamental o primer armónico, al resultado del fraccionamiento en dos partes, segundo armónico, al de tres, tercer armónico, al de cuatro, cuarto armónico, y así, sucesivamente. De esta relación los teóricos deducen la *escala de los armónicos* o de la *resonancia superior de un tono puro*, constituida por una serie de intervalos musicales, en orden ascendente, cada vez más pequeños.

Ya sabemos que el matemático Fourier desarrolló un tipo de análisis matemático por el que cualquier onda periódica compuesta puede descomponerse en una suma de ondas senoidales de amplitud, frecuencia y fase adecuadas. Las frecuencias de estas ondas senoidales guardan una relación sencilla entre sí; son todas múltiplas enteras de la frecuencia fundamental. Pues bien, el más grave de estos sonidos se designa como fundamental y los demás, si coinciden con la serie serán *parciales o armónicos concordantes*, y si no lo hacen se les denominará *parciales discordantes*.

No resulta muy complicado hallar la relación entre este Teorema y el anteriormente expuesto fenómeno Físico-Armónico; la onda periódica compuesta a la que se refiere Fourier es el resultado de la vibración libre de la cuerda -de los teóricos musicales aludidos- y las diversas ondas senoidales son los diversos tonos emitidos por dicha cuerda. A partir de estos conceptos se ha desarrollado universalmente la definición de tonos y ruidos: tonos constituyen los movimientos periódicos que se descomponen en series armónicas y ruidos -físicamente hablando- los que no tienen relaciones armónicas en su descomposición, haciéndolo por tanto siguiendo series inarmónicas. Consecuencia directa de esto es la clasificación de los instrumentos musicales en generadores de tonos ó ruidos, definiendo a los primeros como instrumentos de entonación determinada y a los segundos instrumentos de entonación indeterminada.

Por consiguiente, cuando hablamos del fenómeno físico-armónico nos estamos refiriendo a la producción concomitante de varios sonidos adosados a uno principal. Este sonido principal lo percibimos como la altura y se le denomina fundamental, mientras que los restantes, llamados armónicos, son fusionados sensorialmente como el timbre. En función de su número y calidad éste quedará conformado. Este fenómeno se conoce también con el nombre de *resonancia*³². Efectivamente todo cuerpo sonoro que vibra produce además del fundamental, una serie de sonidos armónicos de altura creciente e intensidad decreciente, que constituyen la denominada *escala de los armónicos*. En los instrumentos de viento madera constituidos por un tubo, la suma de las ondas que viajan a través del tubo origina ondas estacionarias con unos modelos determinados de vibración que están determinados por la forma del tubo. Cada uno de esos modos de resonancia o vibración es lo que se conoce con el nombre de *armónicos*.

Por su parte, las cuerdas de los instrumentos musicales distan mucho de comportarse como cuerdas ideales: por el hecho de estar sujetas por sus extremos, su rigidez de flexión varía continuamente desde el centro al punto de sujeción. En el centro se puede mover libremente, pero en los extremos al estar sujeta e impedir su movimiento, deja de comportarse como una cuerda y se convierte en una varilla, la transición es gradual y continua desde el centro a los extremos, y sólo si estos estuvieran en el infinito -como en la cuerda ideal- se retrasaría hasta el infinito el cambio. Por otro lado los apoyos no son rígidos para poder transmitir la energía contenida en la cuerda a la caja de resonancia del instrumento, y además para completar el problema, la cuerda debe ser excitada con un

³² No se debe confundir con la resonancia entendida como la vibración (por simpatía) de un cuerpo por concordancia de su vibración natural con la de otro cuerpo que vibra.

cuerpo más o menos ancho, lo que conlleva dos puntos de excitación diferentes separados a una distancia igual al ancho del mecanismo excitador. Todos estos condicionantes hacen que la cuerda no se fraccione siguiendo proporciones armónicas, no obteniéndose por tanto tonos armónicos en el espectro resultante, lo que nos impide hablar de tonos y nos aboca sin remisión a hablar de ruidos o inarmonicidad.

La capacidad auditiva del ser humano es muy pobre para discriminar pequeñas desviaciones en la afinación de los parciales con respecto a la fundamental, por lo que percibirá intervalos musicales dentro de un gran margen relacional, siendo engañado acústicamente porque la inarmonicidad presente no la interpretará como desafinación y sí como uno de los parámetros más del timbre del instrumento en cuestión.

En los tubos sonoros sucede un caso análogo, no son inherentemente armónicos. Para tal caso deberían presentar un diseño perfecto. Mas esto no sucede así, en realidad presentan un gran inarmonicidad debido a la forma desigual de su tubo y su diámetro finito. Las complicaciones en el taladro rompen la armonicidad del tubo, con lo cual se generan diversas relaciones armónicas. Este fenómeno se puede observar en los espectros de la parte experimental del estudio.

En estos instrumentos, es la forma de la embocadura la que genera en principio todos los armónicos, pero éstos a su vez son controlados y reforzados por los modos de resonancia del tubo, de tal forma que únicamente aquéllos que permita la forma del tubo estarán presentes de forma estable. Visualizados en un espectro, sólo los más fuertes, esto es, los picos más altos, podrán ser emitidos de forma estable. En el clarinete, los modos de resonancia posibles, al funcionar acústicamente como tubo cerrado, son aquellos cuyas frecuencias sean múltiplas impares de la fundamental. Recuérdese, al respecto, que la columna aérea solo puede fraccionarse en estos tubos por tercios, quintos séptimos, etc., nunca por mitades.

Cuando hablamos de armónicos debemos hacer una matización previa pues su definición puede inducir a error. Efectivamente urge establecer una diferenciación conceptual, a saber, armónicos entendidos como el sonido producido cuya frecuencia es múltiplo entero de la fundamental, o bien considerados como el movimiento armónico simple componente de un sonido complejo, esto es, asociado a su resonancia superior. El primero de los supuestos es el que se da en los procedimientos para la obtención de los sonidos en los instrumentos aerófonos³³, esto es, cuando una columna gaseosa produce la fundamental y, subdividida, un corto número de armónicos -entiéndase no simultáneamente- que se emplean para constituir la escala. El segundo, por su parte, es el que utilizamos para referirnos a los componentes inherentes a todo sonido producido por el instrumento que nos ocupa y que conforman su timbre. En el primer supuesto descrito también se utiliza el término *sobretono o parcial*.

La comprobación de este fenómeno es ostensible observando los espectros de la parte experimental del estudio. Junto con el primer armónico, al que denominamos fundamental, figuran varios armónicos de altura fija e intensidad variable. Todos ellos fusionados por nuestro sentido auditivo conforman la sensación de timbre. Pero no todos pueden ser utilizados como notas para fines musicales. Esto dependerá de la forma del tubo y del diseño de sus orificios. En el caso del clarinete, debido a su funcionamiento acústico

³³ Se analizan estos procedimientos en el apartado 15.4.

como tubo cerrado³⁴, solo pueden ser utilizados para este fin los armónicos de orden impar. Todos los pares, presentes en número e intensidades nimias, pero no despreciables, se limitan a configurar el timbre sin otra función acústica. Como bien arguye Robert Donington al respecto:

“Existe ciertamente más intensidad de lo que podría esperarse de los armónicos octavo, décimo y duodécimo; y, en cualquier caso, estamos ante bandas flexibles de resonancia más que ante respuestas circunscritas con precisión... A pesar de todo, cuando surge la resonancia persiste la sensación de que hay algo que falta, algo que normalmente habría de estar presente: es decir, el cociente esperado de armónicos pares. No falta nada artísticamente, pero sí acústicamente, y es esta ausencia en sí misma la que define la particular excelencia del instrumento.” (Donington, 1982)

Por tanto, distinguimos los armónicos considerados como sonidos utilizados para formar la escala de acuerdo con el principio acústico de vibración de su tubo, y, por otro lado, los armónicos entendidos como componentes de un tono complejo o compuesto cuya única función es la de definir del timbre.

7.2 ESCALA DE LOS ARMONICOS: DESCRIPCION Y CONSTITUCION

Llamamos, pues, escala de los armónicos de un sonido a la gama de sonidos producidos por modelos de resonancia determinados que acompañan a un sonido fundamental generador. También se denomina escala de la resonancia superior de un sonido puro. Este sonido se denomina fundamental o primer armónico de la escala cuya frecuencia denominamos f . Los demás sonidos, tal y como anticipábamos, los llamaremos armónicos o parciales y los designaremos por número de orden: segundo armónico, tercer armónico, etc. Sus frecuencias serán múltiplas enteras de la frecuencia f del sonido fundamental, de modo que el segundo armónico será de frecuencia $2f$, el tercer armónico $3f$ y así sucesivamente hasta completar toda la serie armónica.

Cualquier sonido fundamental emitido por los instrumentos musicales presenta una serie de sonidos que aparecen en diferentes intensidades y proporciones, en función de su naturaleza física-acústica. Para obtener la frecuencia de cada uno de los armónicos de un sonido fundamental basta con conocer su número de orden en la escala armónica y multiplicarlo por la frecuencia de la fundamental. Así por ejemplo la frecuencia del quinto armónico del La_4 de 440 ciclos será: $440 \times 5 = 2200$ Hz.

La gama de armónicos que acompaña a un sonido fundamental determina en gran medida el timbre del instrumento. Independientemente de la altura del sonido fundamental, existe un ámbito de frecuencias fijas denominadas *ámbito de formantes* que se componen de sonidos parciales o armónicos con sus respectivas amplitudes. Helmholtz, en este sentido, sostenía que el timbre de los sonidos dependía de la relación entre las frecuencias de los distintos armónicos y la frecuencia de la fundamental. Esta teoría fue posteriormente rebatida por E. Schumann y su *teoría del formante*, en virtud de la cual para cada timbre existe una banda estrecha de frecuencias de altura fija que siempre está presente con

³⁴ Véase apartado 15.2.

independencia de la frecuencia de la fundamental. Esta teoría se basa en las siguientes leyes:

1. *El timbre de los instrumentos viene determinado, independientemente de la altura del sonido fundamental, por un ámbito de frecuencias de alturas sonoras fijas, denominado ámbito de formantes, el cual está configurado por sonidos parciales de diferentes intensidades.*
2. *Al aumentar la intensidad de un sonido, el máximo se desplaza a un nivel superior en el orden de los sonidos parciales, intensificando los componentes superiores y debilitando los inferiores.*
3. *En sonidos con dos ámbitos de formantes al pasar de una intensidad de piano a fortísimo el máximo pasa a su vez del ámbito inferior al superior.*
4. *Junto con la altura absoluta del ámbito de formantes y la intensidad de cada uno de los parciales, es determinante para el timbre el intervalo que forman, con independencia de la altura de la fundamental, los sonidos parciales más intensos de uno y otros ámbitos.*

Desde el punto de vista musical, cada sonido de la serie debe definirse determinando el intervalo que corresponde a sendos armónicos consecutivos. Dado que la representación de la escala armónica se efectúa según el sistema temperado, para determinar sus sonidos se debe calcular el intervalo temperado que corresponde a cada pareja de armónicos consecutivos.

El sistema temperado³⁵ divide la octava en doce partes alícuotas llamadas semitonos temperados. Pues bien, el valor de ese semitono se define por la expresión $(\sqrt[12]{2})^n$, esto es, un número que multiplicado doce veces por sí mismo sea igual a dos. Para llegar a esta expresión se procede del siguiente modo. Consideremos dos sonidos a la octava uno de otro. Establecemos a continuación una progresión geométrica entre ambos sonidos cuyo primer término es 1 y cuyo último término es 2 . Pues bien, la razón geométrica será: $\sqrt[12]{2}$

Para calcular el intervalo del semitono temperado entre cada pareja de sonidos consecutivos se opera por suma de intervalos definiendo cada sonido de la escala. El número de veces que un intervalo está contenido en otro se expresa como potencia del intervalo contenido. Para hallar el número de semitonos entre cada dos sonidos correlativos se eleva el valor del semitono temperado a un número genérico n que será la incógnita que se busca. Consideramos dos armónicos cualquiera, definidos por a , como el armónico de menor orden, y b , como el inmediatamente posterior:

$$\left(\sqrt[12]{2}\right)^n = \frac{b}{a}$$

para despejar la incógnita hay que proceder con logaritmos:

$$\text{Log}\left(\sqrt[12]{2}\right)^n = \text{Log}\frac{b}{a}$$

³⁵ Véase apartado 8.2.

operando:

$$n \text{Log}(\sqrt[12]{2}) = \text{Log}b - \text{Log}a$$

$$n \frac{1}{12} \text{Log}2 = \text{Log}b - \text{Log}a$$

de donde:

$$n = 12 \frac{\text{Log}b - \text{Log}a}{\text{Log}2}$$

Para obtener los semitonos de cada intervalo aplicamos esta expresión:

$$\text{Intervalo } 2/1 \quad n = 12 \frac{\text{Log}2 - \text{Log}1}{\text{Log}2} = \text{semitonos}$$

Y así sucesivamente obtendremos los semitonos reales de cada intervalo.

Una vez conocido el intervalo comprendido entre dos sonidos consecutivos la siguiente operación consiste en calcular a qué nota corresponde cada sonido. Para ello, una vez conocido el sonido fundamental, los demás armónicos corresponden a las notas cuyo número entero de semitonos se aproxime más al calculado. Por ejemplo, si entre los sonidos 3 y 4 existen 4,98 semitonos, dado que el sistema temperado no tiene fracciones de semitono, se redondeará con el número entero más próximo, esto es, 5 semitonos. Todos los sonidos se obtienen con este procedimiento excepto el 12 y el 14, que se obtienen directamente como octavas de su octava inmediatamente inferior dado que si lo calculamos por intervalos no guardan la relación aritmética con los demás sonidos.

Veamos en la siguiente figura la serie armónica del sonido fundamental Do_1 -según el índice acústico musical franco belga- hasta su armónico 32, consignando los semitonos reales y los corregidos, de acuerdo con el sistema temperado, así como el número de orden del armónico.

Fig. 7.1 Representación musical de la serie armónica (Calvo-Manzano, 1991)

A:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
B:	12	7	5	4	3	3	2	2	2	2	2

C:	12	7'02	4'98	3'86	3'16	2'67	2'31	2'04	1'82	1'66
----	----	------	------	------	------	------	------	------	------	------

A:	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
B:	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1

C:	1'51	1'39	1'28	1'19	1'12	1'05	0'99	0'93	0'89	0'83
----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

A:	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
B:	1	-	1	1	-	1	1	-	1	-	1	1

C:	0'82	0'77	0'74	0'71	0'68	0'65	0'63	0'61	0'58	0'57	0'55
----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

A: Numeración del armónico
 B: Distancia corregida
 C: Distancia real

Se puede observar en la escala representada que a partir del sonido 22 tenemos sonidos enarmónicos. Dado que se toma un número entero de semitonos con el primero de su octava más próximo al realmente calculado, la distancia entre ambos resulta la misma. Por otra parte, se observa en la serie que los sonidos 7, 11, 13 y 14 figuran en negrita debido a que su tesitura se diferencia considerablemente de la real, esto es, no forman con

los demás grados de la escala un intervalo racional dado que su frecuencia no es mensurable con nuestro sistema musical temperado. En este sentido conviene conservar siempre el mismo intervalo entre la fundamental y cada uno de ellos:

- para los sonidos 7 y 14, *séptima menor baja*
- para el sonido 11, *cuarta justa alta*
- para el sonido 13, *sexta mayor baja*

La escala armónica de un sonido dado contiene las mismas series de intervalos, de modo que conociendo la altura del sonido fundamental y los intervalos entre cada armónico podremos elaborar cualquier serie armónica. En teoría la serie es infinita, mas en la práctica se obtienen en torno a los 16 primeros.

Para construir la escala de los armónicos de un sonido fundamental determinado podemos hacer uso de un método práctico que describe Calvo-Manzano (1991) del siguiente modo: en principio, se debe respetar dos normas fundamentales: por una parte cada armónico nuevo se halla entre dos sonidos ya conocidos, y por otra, que los sonidos de doble número de orden se hallan a una octava de distancia; entonces, si conocemos el sonido fundamental, de inmediato conoceremos los armónicos de doble número de orden, esto es, el 2, 4, 8, 16, etc; el armónico tercero hay que determinarlo dividiendo la distancia existente entre los intervalos ya conocidos de 2-4 en dos partes, una mayor que corresponderá al intervalo más grave, y otra más pequeña que pertenecerá al más agudo; dado que la distancia entre el 2 y el 4 es de una octava dividida en doce semitonos, según el sistema temperado, tendremos que siete semitonos corresponderán para el intervalo 2-3, el más grave, y cinco para el 3-4, el más agudo; de forma que si hemos obtenido el tercer armónico con este sencillo procedimiento, conocemos de inmediato los armónicos de doble frecuencia, esto es, el 6, 12, 24, etc; para calcular el armónico 5 procedemos de igual modo que con el tercero; dividimos los siete semitonos que existen entre el 4 y el 6, de donde cuatro corresponderán al intervalo 4-5 y tres al 5-6. Una vez calculado el quinto, ya tenemos el 10, 20, 40, etc; y así procederemos hasta obtener la serie completa. Algunos intervalos resultan iguales al ser divididos, con lo cual el intervalo resultante estará a una distancia igual de cada uno de los sonidos más próximos. Es el caso del sonido 8 y de algunos sonidos de orden superior.

Existen dos excepciones a esta norma entre los 16 primeros armónicos, a saber, entre el armónico 12 y 14 tienen que haber 1'51 semitonos. Al no ser número entero, si tomamos 2 semitonos obtendremos un sonido que se hallará a 8 semitonos del primero de su octava. Sin embargo, el sonido 12 es la octava del armónico 6, el cual se halla a 7 semitonos del primero de su octava. Luego para obtenerlo debemos tomar un semitono en lugar de dos.

Por otra parte la serie que hemos representado es aplicable a cualquier altura según la fundamental de referencia. Además, un mismo sonido puede ser armónico de diferentes fundamentales con solo modificar su número de orden. Así, observamos que el Do_4 es segundo armónico de Do_3 , pero también tercero de Fa_2 .

De la observación de la serie armónica podemos colegir lo siguiente:

- *Que cada octava contiene tantos sonidos como el número de orden del armónico sobre el cual empieza y doble que la octava anterior.* Si observamos, por ejemplo, la tercera octava de Mi_2 que lleva el número de orden 8, contiene ocho armónicos.
- *Que los intervalos disminuyen entre cada dos armónicos sucesivos.* El segundo armónico con el primero es de una octava justa; el tercero con el segundo de una quinta justa; el cuarto con el tercero de una cuarta justa, etc.
- *Que cuando un intervalo cualquiera pueda dividirse, el cociente será el número de orden que el sonido más agudo tendría dentro de la escala armónica cuya fundamental fuera el más grave.* Es decir, que un armónico será el segundo armónico, es decir su octava, de otro si tiene doble número de orden.
- *Que entre armónicos equivalentes, todas las fracciones interválicas representan el mismo intervalo.*
- *Por último, que un mismo sonido puede ser armónico de diferentes series o escalas, con sólo cambiar su número de orden.*

7.3 INTERVALOS DE LA ESCALA DE LOS ARMONICOS

Una vez constituida toda la escala de armónicos hasta el número 16, podemos obtener los intervalos entre cada sonido mediante un procedimiento deductivo. Para ello, expresamos en forma de fracción el intervalo como cociente de frecuencias. Esta fracción la constituye la frecuencia del sonido de referencia y la frecuencia del sonido que forma el intervalo con él, siendo siempre el denominador la frecuencia de referencia. De este modo el intervalo entre el Mi_3 y el Si_3 será el siguiente: $3/2$.

Dado que tenemos semitonos fraccionados, debemos definirlos y catalogarlos en varias especies. Así, los intervalos los podemos agrupar en cinco categorías: *Aumentados*, *Mayores*, *Justos*, *Menores* y *Disminuidos*. Existen excepciones a estas categorías que se designan como *Máximos*, *Mínimos*, *Grandes* y *Pequeños*.

Veamos, pues, los intervalos que forman entre sí los sonidos de la serie armónica representada. La fracción designa el intervalo entre el sonido representado en el numerador y el denominador respectivamente:

Tabla 7.1 Intervalos de la serie armónica

INTERVALOS DE LA SERIE ARMONICA	
Octava justa = 2/1	Quinta Justa = 12/8 (3/2)
Quinta justa = 3/2	Sexta Máxima = 12/7
Cuarta justa = 4/3	Segunda Máxima = 13/12
Tercera Mayor = 5/4	Tercera Grande = 13/11
Tercera Menor = 6/5	Cuarta Máxima = 13/10
Quinta justa = 6/4 (3/2)	Quinta Máxima = 13/
Tercera Mínima 7/6	Sexta Máxima = 13/8
Quinta Mínima = 7/5	Séptima Grande = 13/7
Séptima Mínima = 7/4	Segunda Pequeña = 14/13
Segunda Máxima = 8/7	Tercera Mínima = 14/12 (7/5)
Cuarta Justa = 8/6 (4/3)	Cuarta Mínima = 14/11
Sexta Menor = 8/5	Quinta Mínima = 14/10 (7/5)
Segunda Mayor = 9/8	Sexta Mínima = 14/9
Tercera Máxima = 9/7	Séptima Mínima = 14/8 (7/4)
Quinta Justa = 9/6 (3/2)	Segunda Pequeña = 15/14
Séptima Menor = 9/5	Segunda Mínima = 15/13
Séptima Menor = 9/5	Tercera Mayor = 15/12 (5/4)
Segunda Mayor = 10/9	Cuarta Máxima = 15/11
Tercera Mayor = 10/8 (5/4)	Quinta Justa = 15/10 (3/2)
Cuarta Máxima = 10/7	Sexta Mayor = 15/9 (5/3)
Sexta Mayor = 10/6 (5/3)	Séptima Mayor = 15/8
Segunda Mínima = 11/10	Segunda Menor = 16/15
Tercera Mínima = 11/9	Segunda Máxima= 16/14 (8/7)
Cuarta Mínima = 11/8	Segunda Máxima = 16/14 (8/7)
Quinta Pequeña = 11/7	Tercera Mínima = 16/13
Séptima Mínima = 11/6	Cuarta Justa = 16/12 (4/3)
Segunda Máxima = 12/11	Quinta Máxima = 16/11
Tercera Menor = 12/10 (6/5)	Sexta Menor = 16/10 (8/5)
Cuarta Justa = 12/9 (4/3)	Séptima Menor = 16/9

7.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES ARMONICOS

Cada uno de los armónicos constitutivos de un sonido complejo comporta una serie de características en virtud de las cuales queda definido el timbre. Así, en función de la proporción e intensidad de los armónicos que acompañen al sonido fundamental tendremos unas características determinadas que conferirán el timbre. Pues bien, las características de los 16 primeros armónicos son las siguientes:

El armónico 1º, es el más intenso e importante y determina la altura de los sonidos complejos que comporta.

El armónico 2º y sus octavas, 4º, 8º y 16º, el primero refuerza la fundamental y le confiere precisión, y las octavas intensifican la cualidad del primero.

El armónico 3º y sus octavas, 6º y 12º, el primero forma un intervalo de quinta justa con el segundo, lo que confiere al complejo sonoro un timbre nasal con cierta personalidad. Las octavas refuerzan la sensación del tercero.

El armónico 5º y su octava el 10º, el primero es de suma importancia puesto que forma un acorde perfecto mayor con el tercero y el primero, lo cual confiere al timbre consistencia y calidez. Su octava intensifica esta cualidad.

Los armónicos 11º, 13º y 15º, son intervalos disonantes, por lo que proporcionan al timbre cierta aspereza.

Conforme se va ascendiendo por la serie, los armónicos pierden intensidad y no aportan prácticamente ninguna cualidad apreciable al timbre. En este sentido los de mayor relevancia son los seis primeros, dado que forman un acorde perfecto mayor, lo cual proporciona la sensación de timbre más cálido y homogéneo.

La consonancia de los distintos intervalos fue estudiada por el célebre físico inglés especializado en estudios acústicos J. Tyndall (1820-1893), el cual sostenía que la consonancia interválica venía determinada por la relación de las frecuencias de dos sonidos, de forma que cuanto más simple era ésta, mayor sería la consonancia del intervalo. De acuerdo con esta teoría, el orden de consonancia de los intervalos en los 16 primeros armónicos de la escala quedaba establecido del siguiente modo:

Tabla 7.2 Orden de consonancia de los intervalos

ORDEN DE CONSONANCIA DE LOS INTERVALOS
(2/1) Para la octava justa
(3/2) Para la quinta justa
(4/3) Para la cuarta justa
(5/4) Para la tercera mayor
(5/3) Para la sexta mayor
(6/5) Para la tercera menor
(8/5) Para la sexta menor
(9/8) Para el tono grande
(10/9) Para el tono pequeño
(15/7) Para la séptima mayor
(16/15) Para el semitono diatónico
(16/9) Para la séptima menor

Este orden de consonancia se aplica también a los acordes, de modo que la consonancia de un acorde estará en función de la relación numérica de los sonidos que

forman el acorde. Luego cuanto más simple y proporcional sea la numeración mayor será la consonancia. Por consiguiente el orden de consonancia será el que sigue:

Tabla 7.3 Orden de consonancia de los acordes

ORDEN DE CONSONANCIA DE LOS ACORDES
(6/5/4) Para el perfecto mayor
(9/7/6) Para el de segundo grado
(15/12/10) Para el de tercer grado etc.
(7/6/5/4) Para el de séptima menor
(15/12/10/8) Para el de séptima sobre tónica, etc.

7.5 LOS ARMONICOS EN EL CLARINETE TIPO

7.5.1 Generalidades y Evolución

El clarinete obtiene sus sonidos para constituir la escala en los registros agudo y sobreagudo mediante el uso de los armónicos que permite el funcionamiento de su tubo. A este respecto ya veremos posteriormente cómo su tubo actúa como cerrado y, en consecuencia, solo utiliza para este fin los armónicos impares inherentes a esta clase de tubos. Pues bien, el primer armónico o parcial, entonces, corresponde al tercero de la serie armónica, esto es, la duodécima de la fundamental; el segundo, al quinto de la serie; el tercero, al séptimo, etc. Cada uno de estos armónicos tiene una prominencia e intensidad relativa en cada una de las fundamentales y una altura fija que conforman el particular timbre del instrumento. El conjunto de ellos es lo que denominamos formante del sonido. De su intensidad relativa dependerá su ulterior uso como sonido de la escala. Podemos observar en los espectros de las primeras fundamentales que a partir del onceavo armónico los componentes son cada vez menos intensos y su función se limita a configurar el timbre del sonido dado ya que no pueden ser utilizados como notas de la escala por su escasa presencia. Además se aprecian componentes armónicos pares reforzados por las resonancias del tubo, de la caña y, posiblemente, del tracto vocal³⁶. Asimismo, si observamos las curvas de impedancia del apartado 6.3 se comprobará que los picos más prominentes y que no superan la frecuencia de corte del instrumento son los armónicos que puede ser usados de forma estable y afinada como notas de la escala.

Cada una de las fundamentales del clarinete produce un número limitado de armónicos, propiciados por el uso del orificio portavoz y de un incremento regulado de la presión de sople mediante el diafragma, así como una embocadura adecuada. Empero, no todos son aptos para su uso como sonidos de la escala. Aquellos que no reúnen determinadas condiciones de idoneidad relativas a ciertos niveles de calidad sonora y de afinación, son discriminados para este fin, pero pueden ser empleados para otros fines

³⁶ Se analizan estas cuestiones detenidamente en el apartado 16.1.

-léase trinos, notas de adorno o para determinados pasajes rápidos-. En cualquier caso, una vez seleccionados los armónicos más óptimos para constituir la escala, los demás deben quedar dentro del bagaje técnico-musical del intérprete para que puedan ser empleados en cualquier pasaje que lo requiera, lo cual enriquecerá considerablemente su técnica.

El análisis exhaustivo de cada uno de estos armónicos efectuado en la parte experimental del presente estudio nos revela de forma objetiva cuáles son las características técnicas y acústicas de cada uno de ellos y nos proporciona una información valiosísima para catalogarlos y priorizarlos en orden a su ulterior uso. Un trabajo así realizado coadyuvará en nuestra interpretación pues nos proporcionará las herramientas de trabajo útiles para ser usadas *ad hoc* en nuestra interpretación.

Pues bien, las fundamentales más fecundas en este menester son las más graves, esto es, las que más tubo operativo precisan, dado que tienen más margen de operatividad para practicar subdivisiones en la columna aérea que se halla operando. Además, las ondas de frecuencias bajas se reflejan mejor que las altas, lo que refuerza las resonancias. A medida que se asciende por las fundamentales y se reduce la longitud de tubo y onda las posibilidades de obtener armónicos menguan. Así, nos encontramos que hasta la fundamental La#₂ se pueden obtener hasta el onceavo armónico -solo los impares lógicamente-; a partir de este sonido y hasta el Re₃ se consiguen hasta el noveno armónico; desde el Mi₃ hasta el Fa#₃, son obtenibles hasta el séptimo armónico; las últimas fundamentales, hasta el La#₃, solo producen hasta el quinto -éste último no sin cierta destreza-. A este respecto, Fritz Volbach en su Tratado titulado *La Orquesta Moderna*, en el capítulo donde se ocupa de los instrumentos de viento, da una idea del método para obtener armónicos en un instrumento de viento:

“Del mismo modo que hemos visto producirse en las cuerda sonidos harmónicos (flageolet) por la vibración de la cuerda en partes alicuotas, podemos provocar una división semejante en la columna de aire vibratoria. Este fenómeno se produce por el aumento de presión labial y se llama “octavear”. No consiste simplemente en una mayor intensidad de la corriente introducida, sino que es necesaria una presión especial producida por una más fuerte contracción de los labios”. (Volbach, 1932)

En relación con las condiciones idóneas para producirlos, apunta textualmente lo que sigue:

“El número de sonidos que puede obtenerse por octaveo varía según la forma del tubo. La Ley que rige estas variaciones puede formularse diciendo: a mayor longitud de tubo de calibre estrecho correspondiente, mayor número de sonidos parciales posibles, y a menor longitud de tubo y mayor diámetro, menor número de sonidos parciales. Un buen profesor de trompa puede producir en la trompa grave en Do, cuya extensión mide hasta 16 pies, toda la serie de los harmónicos hasta el décimooctavo, mientras que los tubos mucho más cortos de los instrumentos de madera permiten alcanzar apenas el undécimo”. (Volbach, 1932)

Obviamente Volbach se refiere a armónicos utilizados como sonidos de la escala y no como componentes armónicos de un determinado complejo sonoro, en cuyo caso ya hemos visto que se pueden obtener hasta el 16, alguno de ellos de orden par. Por otra parte, en este último caso, como habíamos comentado anteriormente, no solo estaríamos

hablando de la forma del tubo como causa determinante, como apunta él, sino también de su modo de excitación, esto es, el tipo de embocadura.

Muy ilustrativa y didáctica es, también, la observación sobre el procedimiento de obtención de los armónicos en el clarinete que refiere Robert Donington en su estudio sobre los instrumentos. Dice así:

“En algunos casos, el armónico superior necesario para asumir el control de la altura puede ser favorecido por un agujero “altavoz” que cree un antinodo (algo igual de efectivo que crear un nodo en una cuerda que está vibrando, ya que los nodos y los antinodos son interdependientes). El propio tono excitado puede ser también forzado por un soplo más intenso, induciendo así a la columna de aire a saltar de un armónico al siguiente como resultado de su natural disposición a dividirse en partes cocientes. Esta capacidad está condicionada, asimismo, por el diseño de la embocadura, el tubo y, especialmente, la campana.”

“En los instrumentos de lengüeta, una presión inusual o una falta de presión de los labios puede combinarse con la utilización de digitaciones inusuales para así producir extrañas variantes, con los consiguientes resultados tanto en relación con el timbre como con la obtención de acordes...” (Donington, 1982)

Los armónicos se emplean, pues, como sonidos para formar la escala, pero también como un recurso técnico musical. Mientras que en el primer caso se usan como notas separadas, en el segundo se hace de forma simultánea. En efecto, la fusión del sonido fundamental con sus armónicos proporciona un efecto sonoro interesante que se utiliza en la música más actual. Además, a esta fusión siempre se suman ciertas interferencias incontrolables que refuerzan ese efecto acústico. En este sentido, resultan varias posibilidades: fusión del sonido fundamental y un armónico determinado, fundamental mantenido y los armónicos superpuestos, etc, todo ello con las diversas variantes dinámicas y de ataque. Huelga decir que este recurso técnico únicamente es posible en el registro grave, donde se sitúan las fundamentales.

Conviene, en este punto, realizar una breve reseña evolutiva acerca de la base acústica del instrumento y contextualizar el asunto que nos ocupa. Pues bien, el clarinete, o mejor dicho, la familia de los instrumentos de viento madera fueron diseñados originariamente de modo que obtuviesen sus sonidos fundamentales mediante el acortamiento gradual de sus columnas gaseosas, gracias a los orificios practicados convenientemente a este efecto, mediante el principio acústico de la vibración de sus columnas aéreas. Sin embargo, esos orificios no podían exceder obviamente en número a los dedos disponibles, por lo que el abanico de sonidos era exiguo. Ejemplos de estos tipos de clarinetes existían en casi todas las civilizaciones: el *argul* egipcio, el *aulos* griego, la *zummará* árabe, la *ciaramella* italiana, el *caramillo* francés, etc. Es de este último donde parece ser que se establece el origen de un tipo de clarinete denominado *chalumeau* consistente en un cilindro cerrado con una lengüeta simple capaz de emitir en torno a una octava de sonidos fundamentales.

Mediante investigaciones posteriores se resolvió que accionando un orificio dispuesto convenientemente en el tubo se podía dividir la columna gaseosa fundamental en dos o tres mitades alícuotas, según funcionase como tubo abierto o cerrado, con lo cual se conseguía duplicar el abanico de sonidos por mor de segundos o terceros armónicos, respectivamente, utilizando las digitaciones de los sonidos fundamentales y activando un orificio denominado *portavoz* -llave 12-. Este gran avance fue posible, en el clarinete,

gracias a la aportación del *Chalumeau* de Denner. Este instrumento presentaba, por primera vez dos llaves, una de las cuales permitía aumentar los sonidos fundamentales una doceava mediante el salteo de armónicos. Teniendo en cuenta que la teoría matemática de los tubos sonoros fue enunciada a principios del siglo XVIII por el matemático Bernoulli, se puede colegir que cuando diseñó su clarinete Denner desconocía el fundamento físico de los tubos sonoros, aunque ello no fue óbice para su aplicación al clarinete.

Debido a los avances de la acústica física y musical, el afán experimentador del instrumentista, unido a las exigencias interpretativas y musicales que demanda la música constantemente, estos sonidos primarios experimentaron una suerte de mejoría considerable mientras, por otra parte, el abanico de sonidos devino en un crecimiento ostensible. Este proceso se llevó a cabo añadiendo nuevas llaves y experimentando con nuevas digitaciones al objeto de perfeccionar estos sonidos desde el punto de vista acústico. Así, van irrumpiendo de forma intermitente nuevas llaves en el clarinete, con lo cual la extensión del instrumento se amplía en un nuevo registro, denominado sobreagudo, mediante el uso del tercer, quinto y noveno armónico.

Podemos imaginarnos la dificultad que entrañaba para los intérpretes de la época ejecutar un determinado pasaje musical con este sistema de digitación, amén de los problemas de afinación y timbre a los que se debían enfrentar.

Los avances de la acústica física y musical en el siglo XVIII y principios del XIX, fueron decisivos para la evolución técnica y acústica del clarinete. Así, Müller en 1812 supo aplicar los hallazgos descritos en los párrafos precedentes en su innovador clarinete de trece llaves³⁷. Sus experiencias e investigaciones sobre la acústica del instrumento le permitieron diseñar un instrumento perfeccionado acústica y técnicamente. En su sistema de digitación ya se observa el uso, además del armónico tercero obtenido con el uso del orificio portavoz, ya utilizado anteriormente, del armónico quinto, séptimo y noveno, para constituir su escala, estos últimos obtenidos gracias al incremento regulado de la presión de sople y la ayuda de digitaciones auxiliares. También el clarinete de Klosé-Boehm³⁸ con el sistema Boehm presentado en 1839 aplica estos avances y en su sistema de digitación se aprecia el uso de los armónicos impares hasta el noveno (Fig. 7.2), obtenidos mediante estos procedimientos, para optimizar sus prestaciones acústicas. A continuación se muestra la escala de este último sistema con indicación de la naturaleza y origen de sus sonidos, esto es, el uso de sus armónicos:

³⁷ Véase el apartado 13.2.

³⁸ Idem de la anterior nota.

Fig. 7.2 Escala del clarinete del sistema Boehm

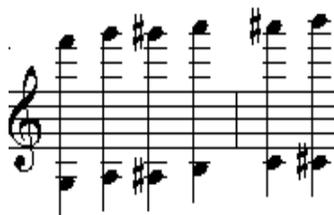
Terceros armónicos



Quintos armónicos



Séptimos armónicos



Novenos armónicos



En relación con la dificultad técnica que presentaban estos clarinetes, Gevaert apuntaba en su Tratado lo que sigue:

“Se consideran fáciles los tonos mayores, desde dos bemoles hasta dos sostenidos (Sib, fa, do, sol, re), los menores, desde tres bemoles hasta un sostenido (do, sol, re, la, mi). Los pasos y arpegios formados de los acordes principales de esos diversos tonos se ejecutan todos sin dificultad. Pero en cuanto los accidente se vuelvan más numerosos, se obrará prudentemente dando al clarinete una parte muy sencilla”. (Gevaert, 1887)

Se infiere del análisis de este párrafo las limitaciones técnicas que presentaban estos clarinetes a principios del siglo XIX para interpretar música en determinadas tonalidades. No llevaba del todo razón, pues, Müller cuando presenta en 1812 su clarinete como omnitónico, es decir, capaz de poder interpretar en cualquier tonalidad con relativa comodidad. Más parecía esta aseveración un eslogan promocional que una realidad manifiesta.

Aludiendo de nuevo a Gevaert, este compositor y musicólogo en su *Tratado General de Instrumentación*, en el apartado referente a la familia de los clarinetes, presenta

del siguiente modo la escala o extensión del clarinete con expresión de sus armónicos constitutivos:

Fig. 7.3 Escala del clarinete según Gevaert (1887)

Terceros armónicos



Quintos armónicos



Novenos armónicos



Si observamos su escala vemos que Gevaert se equivoca al descartar el uso del séptimo armónico en la escala. Dice textualmente a este respecto: *el sonido 7, siendo un armónico discordante, no puede ser utilizado*. Sin embargo, en los sistemas de digitación de los clarinetes de Müller o Klosé-Buffet ya se observa el uso de este armónico como nota de la escala. En efecto, no es cierto que por ser un armónico discordante no pueda ser utilizado como sonido de la escala. Puede utilizarse como cualquier otro de orden impar pues el funcionamiento acústico de su tubo así lo posibilita. Lo que sí es cierto es que su frecuencia está por debajo de los valores normales por las razones que detallaremos en el curso de esta exposición, y por tanto debe ser corregida mediante digitaciones auxiliares. Pero además, en la representación de su escala se observa cómo todavía obtienen los sonidos desde el $\text{Do}\#_5$ hasta el Fa_5 como terceros armónicos y no como quintos, tal y como se hace actualmente. Es posible que los intérpretes todavía no fuesen conscientes de las posibilidades de su instrumento, dado que estos clarinetes perfeccionados ya estaban vigentes cuando se publicó su Tratado. Gevaert, por consiguiente, se limitó a detallar los armónicos del clarinete de una forma lógica y simple, esto es, considerando las fundamentales desde el Mi_2 al $\text{La}\#_3$ y sus subsiguientes armónicos terceros, quintos y novenos hasta constituir su escala hasta el Do_6 , tal y como se conocían antes de la irrupción en 1812 del sistema Müller. Podemos colegir de este planteamiento que, o bien que Gevaert se equivocaba por un desconocimiento o una información errónea de la materia, o bien que en aquella época todavía no se había perfeccionado la técnica del clarinete.

El musicólogo Fritz Volbach tiene más clara esta cuestión. En su Tratado dice de forma textual a este respecto:

“Los sonidos señalados por una x^{39} no son puros; el séptimo, por ejemplo, se halla entre sib y si natural; el undécimo entre fa y fa#; en la práctica pueden corregirse, sin embargo, por embocadura”. (Volbach, 1932)

También el ilustre clarinetista y pedagogo francés Jack Brymer trata de soslayo esta cuestión. Su observación a propósito de este asunto es la siguiente:

“Sencillamente con la posición de la nota fundamental, incluso sin levantar la espiral, y sin la aguda del índice izquierdo, se pueden conseguir los números 1, 3, 5 y 7 por presión labial. Es completamente imposible conseguir los números 2, 4 y 6... Dos observaciones. La primera es que el número 7 no es un Sib como en teoría debe ser, sino que resulta un La, generalmente bien afinado...” (Brymer, 1976)

Brymer acierta parcialmente -también se obtiene el 9 y 11- y apunta la deficiencia acústica del número 7, aunque no expone los motivos.

7.5.2 Descripción y análisis

Antes de proceder a la descripción y análisis de los armónicos del clarinete actual conviene tener en consideración los siguientes aspectos en la afinación de los armónicos. En primer lugar se debe considerar que la afinación de los armónicos está sometida al fenómeno de la compensación entre los dos medios implicados en el proceso sonoro o también a la denominada corrección final del tubo⁴⁰. En este sentido, conforme se asciende por la serie armónica se precisa mayor presión en el tubo con lo cual se incrementa la diferencia de presión con el medio exterior y la compensación requiere mayor espacio para verificarse prolongando la longitud acústica del tubo y, por ende, descendiendo la frecuencia. En segundo lugar, debemos considerar en qué medida afecta el diámetro de los orificios en esta afinación, lo cual será objeto de análisis en el apartado relativo a la afinación. Por último, no debemos olvidarnos de la afinación real del armónico quinto, séptimo y noveno, siempre por debajo de los guarismos normales debido a las particularidades que presenta el sistema de Zarlino inspirado en la serie armónica.

³⁹ Refiérese a los armónicos discordantes 7, 11 y 13. Recuérdese que su entonación no se corresponde con la real. A este respecto se aconseja consultar el apartado 7.2 del estudio.

⁴⁰ Véase el subapartado 16.1.2.

Fig. 7.4 Escala de los 16 primeros armónicos del clarinete⁴¹

A: 12 7'02 4'98 3'86 3'16 2'67 2'31 2'04 1'82 1'66 1'51 1'39 1'28 1'19 1'12

B 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16

C: 12 7 5 4 3 3 2 2 2 2 1 1 2 1 1

Los armónicos más utilizados en el clarinete actual como notas para conformar su escala son el tercero, quinto, séptimo y noveno. Cada uno de estos componentes puede apreciarse en mayor o menor medida cuando se está emitiendo una fundamental. El tercero (Fig. 7.5) es el más prominente por su naturaleza acústica⁴² y su audición es posible con un educado y agudo oído. Por consiguiente, este armónico, situado a 7'02 semitonos reales del segundo, suele ser el más intenso y preciso en cuanto a afinación se refiere, solo dos décimas de error lo separa de su fundamental, a 19'02 semitonos reales de distancia. Si bien es posible emitirlo únicamente con el incremento de la presión de soplo, su obtención mejorada es posible gracias al uso de un orificio denominado portavoz⁴³ encargado de propiciar la subdivisión de la columna gaseosa fundamental en tres partes alicuotas. Debido a su afinación precisa, no es prácticamente necesario hacer uso de métodos correctores de entonación, pues manteniendo las digitaciones de sus fundamentales y accionando el orificio portavoz sobreviene de forma óptima. Únicamente es preceptivo ajustar la afinación en los sonidos de los extremos del tubo, debido a la función colateral de este orificio. Estos armónicos transcurren desde el Si₃ hasta el Do₅. A partir de este último también se obtienen los terceros armónicos de las fundamentales del tramo quintante -desde el Do#₅ hasta el Sol₅-, pero dadas sus bajas prestaciones acústicas debido al efecto de la corrección final del tubo⁴⁴, se usan generalmente para pasajes rápidos o notas de adorno, siendo utilizados como notas de la escala mediante el quinto armónico. El timbre cálido y a la vez brillante de estos armónicos que conforman el registro agudo del instrumento es muy apreciado por los compositores para expresar la música más lírica y apasionada.

⁴¹ A: Distancia real en semitonos; B: Numeración armónicos; C: Distancia corregida en semitonos

⁴² Este es el primer parcial en un tubo cerrado y, por tanto, siempre es el más intenso.

⁴³ Véase el apartado 14.4.

⁴⁴ Consúltese el subapartado 16.1.2 para cualquier aclaración a este respecto.

Fig. 7.5 Terceros armónicos



El tercer parcial, quinto armónico de la serie (Fig. 7.6), es empleado para configurar parcialmente el registro sobreagudo. Al contrario que sucede con los terceros, no todos los quintos son válidos para el propósito de constituir la escala. Aunque se sitúa a una tercera mayor del cuarto, en realidad se halla a 3,86 semitonos reales de su predecesor y a 27'86 de su fundamental, cuando debería estar a 28 semitonos, de tal suerte que su frecuencia se halla siempre por debajo de lo que cabría esperar. Además, el fenómeno de la corrección del extremo final se acentúa en estos sonidos, de ahí que todos los quintos armónicos utilizados en el clarinete como notas de la escala deban corregirse en sus digitaciones fundamentales para ajustarlos en afinación. El método empleado a este fin consiste en destapar el segundo orificio que obtura el dedo índice izquierdo a modo de horquilla. De esta forma la frecuencia se incrementa ligeramente. Pero además es preceptivo accionar la llave 4 para modificar la presión y densidad del aire envolvente y, por consiguiente, la columna gaseosa, tal y como se practica con sus fundamentales cuando se quiere incrementar la frecuencia. Lógicamente conforme se asciende por la escala urgen más mecanismos de control de la afinación por el gradual incremento de la presión del tubo y de la frecuencia, así como por la progresiva apertura de los orificios tonales, lo cual provoca que las ondas se transmitan por el tubo irradiándose al exterior y reduciendo la reflexión. De esta forma, se aumenta la longitud de onda y se reduce la frecuencia, amén de debilitar la onda estacionaria, lo cual lleva aparejado problemas en la emisión del sonido y su calidad tonal.

Los mejores quintos, utilizados de forma generalizada como sonidos de la escala, los encontramos desde la fundamental La_2 hasta el Re_2 , esto es, desde el $Do\#_5$ hasta el Fa_5 o $Fa\#_5$. Hasta el Do_5 se llega por medio de terceros armónicos, y es a partir del $Do\#_5$ cuando, debido a las limitaciones del tubo y a las razones aducidas en el párrafo precedente en relación con la afinación, se debe dar el salto al séptimo armónico para asumir de nuevo el control, no solo desde el punto de vista de la afinación, sino también desde el punto de vista del timbre, dado que utilizando un tubo tan exiguo el sonido carece de efecto resonador y por tanto el timbre se resiente indefectiblemente.

A partir del $Fa\#_5$ se pueden obtener algunos sonidos como quintos armónicos muy útiles para pasajes rápidos o trinos, pero no como sonidos de la escala debido a sus frecuencias imprecisas y, en especial, por su timbre chillón. Cabe decir, a este respecto, que si se sigue ascendiendo por medio de este armónico hasta la fundamental $Sol\#_3$, esto es, hasta su quinto armónico Do_6 , se llega a producir un desfase frecuencial de un semitono descendente aproximadamente, con lo cual debemos hacer uso de diversos mecanismos de

control de la afinación. Como ejemplo basta observar que la frecuencia de los quintos armónicos de las fundamentales Mi_3 y sucesivas está alrededor de un semitono por debajo de lo que cabría esperar. Se encontrará, por ende, que en realidad el quinto armónico y sucesivos de Mi_3 no es un $Sol\#_5$ como debiera ser, sino un Sol_5 bastante afinado y de timbre brillante. La razón de este fenómeno ya ha sido sobradamente analizada en el curso de este apartado.

Fig. 7.6 Quintos armónicos



Por consiguiente, para evitar estos desajustes de afinación y timbre y restablecer las condiciones que hagan posible seguir ascendiendo por la escala, de nuevo se debe dar un salto al siguiente armónico, séptimo (Fig. 7.7). Este nuevo armónico se halla a $2'67$ semitonos reales, esto es, una tercera mínima de su predecesor, con lo cual su distancia corregida en relación con éste se sitúa a 3 semitonos. La distancia con respecto a su fundamental es de 34 semitonos, pero en realidad se trata de $33'69$ semitonos reales. Vemos, por tanto, que existe una diferencia sensible entre el valor real y el corregido de $0'21$, esto es, casi un cuarto de tono. Recuérdese, en este sentido, que este armónico es discordante y su tesitura se diferencia notablemente de la real. Además la presión y densidad del tubo en este armónico se debe incrementar sensiblemente para practicar la nueva subdivisión, con lo cual la diferencia con la presión y densidad del aire circundante se acentúa más, con las implicaciones que ello conlleva. La consecuencia más directa es que en todos los séptimos armónicos obtenidos como notas de la escala en el clarinete deben extremarse los mecanismos de corrección de la afinación, de tal suerte que no es suficiente incrementar la presión de soplo y labial para facilitar la división de la columna gaseosa en siete partes alicuotas, sino que también es preceptivo, además de la activación de la llave 4 ya empleada en los quintos armónicos optimizados, utilizar digitaciones auxiliares⁴⁵. Por tanto, el uso de llaves complementarias en este tramo se hace más indispensable que en cualquiera de sus precedentes debido al desfase frecuencial de un semitono descendente -aproximadamente- que se produce.

En consecuencia, estos armónicos únicamente son válidos como sonidos de la escala desde el $Fa\#_5$ -también es usado como tercero- hasta el $La\#_5$ -también utilizado

⁴⁵ Básicamente consiste este procedimiento en accionar alguna llave que destapa un orificio cromático o bien destapar algún orificio tonal por encima del último obturado -además de las derivaciones que ello conlleva, tales como la digitación cruzada o de horquilla-. De esta forma, se acorta ligeramente la columna vibrante.

como noveno o undécimo-. A partir de este sonido de nuevo se debe saltar al siguiente armónico por los mismos motivos aducidos a propósito de su armónico predecesor -aunque aquí el fenómeno de la corrección final se potencia por el incremento de la frecuencia, lo que supone un debilitamiento más acentuado de las ondas estacionarias una vez que se excede la frecuencia de corte del instrumento-. Huelga decir que, al igual que sucede con los quintos, los sonidos más allá del $La\#_5$ solo pueden ser empleados en determinados pasajes rápidos o como notas de adorno.

Fig. 7.7 Séptimos armónicos



Se completa la extensión del instrumento saltando al noveno armónico (Fig. 7.8) para obtener los sonidos Si_5 y Do_6 -también emitidos como séptimos y undécimos-, aunque se pueden obtener también el $La\#_5$ y algún sonido más allá de los mencionados, pero con pocas garantías.

Fig. 7.8 Novenos armónicos



Fig. 7.9 Onceavos armónicos



Cabe aquí hacer una reflexión final en cuanto al uso de los armónicos en la escala del clarinete de suma importancia. Sabemos por el análisis efectuado en la parte experimental del estudio que a medida que se va ascendiendo por los armónicos y se llega a cierta zona del tubo, éstos comienzan a resentirse y sus niveles de calidad se reducen -debido al enrejado de orificios tonales abiertos, cuando se supera la frecuencia de corte del instrumento las ondas no se reflejan en el primer orificio abierto sino que viajan más allá irradiándose al exterior por estos agujeros, con la consiguiente pérdida de reflexión y

debilitamiento de las ondas estacionarias o resonancias del tubo⁴⁶, con lo cual se pierde el control y, para asumirlo de nuevo, se debe saltar al siguiente armónico, donde se comienza de nuevo desde la parte baja del tubo invalidando así el fenómeno de la corrección final. Esta zona comienza aproximadamente en el armónico quinto de la fundamental Re₃ (Fa#₅) y el séptimo de la fundamental Do₃ (La#₅). Entra en juego aquí el criterio del intérprete para discernir en qué sonido se debe hacer el salto al siguiente armónico, pues de un intérprete a otro puede variar ese salto en función de sus preferencias técnico-musicales. Lo que no cabe duda es que una vez se excede la frecuencia de corte los orificios tonales no reflejan las ondas como es debido y esto se traduce en una emisión precaria del sonido.

Las posibilidades de obtener sonidos en el clarinete mediante armónicos son ilimitadas. Una misma nota puede ser emitida mediante diferentes armónicos con ligeras diferencias de timbre y frecuencia. Debe ser el criterio del intérprete el que decida por uno u otro sonido para ser utilizado en un determinado pasaje. La correcta educación de su oído y su formación musical serán determinantes para conformar ese criterio.

Podemos concluir que el uso de armónicos en el clarinete le confiere al instrumento unas posibilidades técnico-acústicas inusitadas, tanto por la posibilidad de constituir su escala de forma afinada, como por los numerosos efectos acústicos que puede realizar. Sin embargo, es indispensable conocer las características acústicas de cada uno de ellos mediante un estudio experimental para poder catalogarlos y optimizar su uso⁴⁷. Un conocimiento completo de estos armónicos abre al intérprete unas expectativas y posibilidades técnicas ilimitadas.

Para familiarizarnos con el uso de los armónicos se pueden practicar diversos ejercicios consistentes en emitir, a partir de una fundamental dada, todos los armónicos factibles, en orden ascendente y descendente, con diferentes *tempo*s y variando la articulación. Por supuesto se deberá mantener la digitación fundamental con el orificio portavoz activado y regulando la presión de sople y de la embocadura.

En el subapartado 11.6.2 se pueden observar los armónicos que pueden ser utilizados como notas de la escala por su especial calidad.

⁴⁶ Se analiza este fenómeno en el apartado 14.3.

⁴⁷ En la parte experimental se procede a su análisis.

CONSTITUCION Y AFINACION DE LA ESCALA MUSICAL



Concierto para Clarinete y Orquesta, Op. 57. Nielsen (1865-1931)

8.1 INTRODUCCION

Sabemos que la escala es una sucesión de sonidos correlativos ordenados, según su frecuencia, en series de siete sonidos repetidas en sucesivas octavas⁴⁸. Para construirla debemos, en primer lugar, disponer la gama de sonidos seleccionados previamente. El procedimiento con el cual se opera para este fin consiste en fijar las relaciones interválicas entre estos sonidos. En efecto, dado que un intervalo es la distancia existente entre dos sonidos, debemos determinar, para medir un intervalo, el método que nos permita establecer esa medida, así como definir las unidades de medida de las distancias interválicas.

Existen, a este respecto, varias formas para medir un intervalo. La más básica y generalizada entre los músicos consiste en designar numéricamente un intervalo enumerando todos los sonidos diatónicos contenidos en él. Así, para fijar el intervalo entre el Mi_2 y el La_2 deberemos enumerar todos los sonidos comprendidos entre ellos, esto es, Mi, Fa, Sol y La, con lo cual estaremos hablando de una cuarta, que podrá designarse, según corresponda, como ascendente, descendente, simple, compuesta, mayor, justa, etc.

⁴⁸ A lo largo de la historia de la música han coexistido diversos tipos de escalas. Las más comunes son las péntafonas -constituidas por cinco sonidos-, exátonas -seis sonidos-, las diatónicas, politónicas y heptáfonas -siete sonidos- y las mixtas y cromáticas -exceden los siete sonidos-.

Otro sistema consiste en designarlos por medio de fracciones que indican las relaciones de vibración entre los sonidos. Veamos un ejemplo: en el intervalo de Mi_2 y Mi_3 , si por cada vibración del Mi_2 tenemos dos en el Mi_3 , la relación será $2/1$.

También se pueden designar mediante la razón geométrica de los números, esto es, el cociente de las fracciones. Por ejemplo, la relación entre Mi_2 y Si_5 será $1^{\circ}5$, el resultado de dividir $3/2$.

Por último, cabe la posibilidad de la designación por semitonos, según el número de semitonos que separan dos sonidos, o bien por comas⁴⁹.

Hay que hacer constar antes de abordar la materia propiamente dicha del capítulo, que para fijar la afinación de un intervalo debemos operar multiplicando el número de vibraciones o frecuencia de un sonido dado por el quebrado que representa su intervalo, o bien, por el número resultante de la división de ese quebrado. Nótese que multiplicar por un quebrado es lo mismo que dividir por su inverso, o viceversa.

Por otra parte, debemos considerar que la suma de intervalos, fácilmente comprensible desde el punto de vista musical, se expresa matemáticamente multiplicando las cifras que representan a cada uno de ellos, mientras que la resta se llevaría a cabo mediante la división de estas cifras.

8.2 SISTEMAS DE AFINACION

A lo largo de la historia la música ha empleado diversas gamas de sonidos combinándolos en modo diverso para elaborar las diferentes escalas. Mediante la observación matemática de los cuerpos sonoros se han diseñado diversas escalas utilizando sistemas de afinación diferentes.

Cada uno de los grupos instrumentales de la orquesta utiliza un sistema diferente para fijar su afinación. Dado que el clarinete está afinado de acuerdo con el sistema Temperado, pero, como todos los instrumentos de viento, utiliza los armónicos para constituir su escala, los sistemas que nos interesan para nuestro estudio son el de Zarlino (1517-1590) o Aristógenes⁵⁰ y el Temperado. No obstante no por ello vamos a dejar de describir de un modo sucinto los principales sistemas utilizados por otras familias orquestales, a saber: el sistema de Pitágoras y el de Holder. Cada uno de ellos construye su escala mediante relaciones interválicas diferentes. Del mismo modo, el cálculo para hallar la frecuencia de un sonido diferirá en función del sistema empleado.

El sistema de Pitágoras⁵¹ se basa para construir su escala diatónica en la sucesión de quintas justas ($3/2$) dada por la serie armónica. Para afinar su escala utiliza los quebrados de la quinta ($3/2$) y de la octava ($2/1$). La escala resultante de aplicar este sistema queda del siguiente modo: Do, Re, Mi, Fa, Sol, La y Si. Este sistema es el que emplean para fijar su afinación los instrumentos de cuerda frotada.

⁴⁹ Entiéndase *coma* por toda distancia menor de un semitono.

⁵⁰ Filósofo y músico griego nacido aproximadamente 350 años a. C. en Tarento. Fue discípulo de Aristóteles y compuso numerosas obras filosóficas y musicales de las que solo han llegado hasta nosotros *Elementos Armónicos* y *Elementos de la Rítmica*.

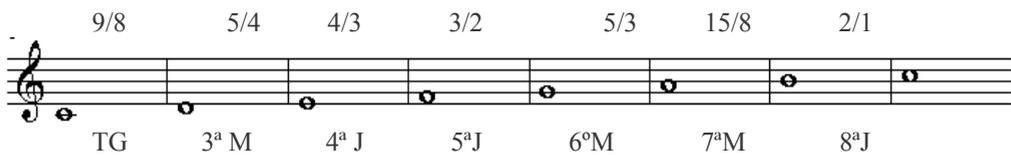
⁵¹ Filósofo y matemático griego (570-497 a. C.). Sus especulaciones y experiencias filosóficas y matemáticas se basaron en la concepción del número como principio y fundamento del mundo.

El sistema Holder⁵², utilizado para afinar la voz, consiste en dividir la octava en 53 partes alícuotas a las que denomina *Coma Holder*. De esta forma se tiene que la octava presenta cinco tonos, cada uno de los cuales contiene nueve comas Holder, y dos semitonos. Además cada tono es la suma de un semitono diatónico que corresponde a cuatro comas Holder, y uno cromático, de cinco comas H. No existe, por consiguiente, en este sistema la enarmonía.

Veamos ahora detenidamente el procedimiento del sistema Zarlino o de Aristógenes -utilizado en el pasado- y el del sistema Temperado -usado actualmente-.

El primero tiene su origen en el filósofo y músico griego Aristógenes el cual intentó perfeccionar el sistema de Pitágoras ajustando a la serie físico-armónica los intervalos de tercera y séptima (Fig. 8.1). También se le conoce como escala de los físicos, escala natural o de la justa entonación. Posteriormente este sistema fue el que utilizó Zarlino para construir su escala, basándose en el mismo fundamento de los físicos y llegando a las mismas conclusiones. Su procedimiento consiste en formar la escala con los mismos intervalos que forma cada sonido con la tónica de la serie armónica, representados mediante una fracción.

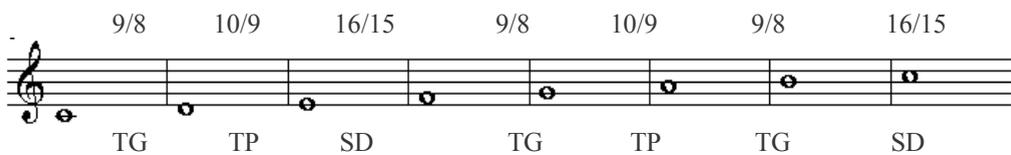
Fig. 8.1 Intervalos respecto de la tónica de la Escala de Aristógenes o Zarlino⁵³



Se puede observar en la figura precedente que los intervalos entre los sonidos se han deducido de la escala de los armónicos.

Para establecer las relaciones entre los diferentes sonidos de la escala diatónica, debemos proceder por resta de intervalos. Así, por ejemplo, Mi-Sol menos Mi-La nos dará Fa-Sol. Las relaciones interválticas entre los diferentes grados quedan del siguiente modo:

Fig. 8.2 Relaciones interválticas entre los diferentes grados de la escala de Do Mayor



⁵² Se atribuye a William Holder, fonetista y compositor inglés del siglo XVII.

⁵³ TG: Tono Grande; TP:Tono Pequeño; SD: Semitono Diatónico.

De las relaciones interválicas enunciadas debemos considerar lo que sigue:

- La escala contiene dos clases de Tonos: *Grande* (9/8), entre el primer y segundo grado, y *Pequeño* (10/9), entre el segundo y tercero.
- Existen dos tipos de Semitonos: *diatónicos* y *cromáticos*. Al existir dos tonos distintos parece lógico pensar que hayan semitonos diatónicos y cromáticos según el tono en el que se hallen comprendidos. Luego debe haber *semitonos diatónicos de tono grande* y *de tono pequeño* y *semitonos cromáticos de tono grande* y *de tono pequeño*. Para el cálculo del semitono cromático debemos dividir el intervalo de tercera mayor por el de tercera menor: $5/4 : 6/5 = 25/24$. En cuanto al semitono diatónico, para el pequeño debemos dividir el tono pequeño por el semitono cromático: $10/9 : 25/24 = 240/225 = 16/15$; el grande, por su parte, se calcula operando con la división entre el tono grande y el semitono cromático.
- La diferencia entre una quinta natural (3/2) y una quinta sintónica (40/27), obtenida de la diferencia entre el tono grande y el tono pequeño, constituye una *coma sintónica* (80/81).
- El tono grande contiene 9,47 comas, mientras que el pequeño contiene 8,47.
- En consecuencia, no existe la enarmonía.
- Entre sonidos enarmónicos existe la *coma sintónica*.

Por lo que respecta a la escala cromática debemos operar para constituirla por suma del intervalo correspondiente, dado que ya tenemos definida la tónica. Para ello debemos utilizar los distintos semitonos conociendo el valor de cada uno de ellos mediante el cociente que le define:

- *Semitono diatónico grande*: $27/25 = 1,08$
- *Semitono diatónico pequeño*: $16/15 = 1,06$
- *Semitono cromático*: $25/24 = 1,04$

Así, al construir la escala cromática vemos cómo las distancias entre sonidos son diversas dado que existen semitonos cromáticos y semitonos diatónicos de dos clases: *grandes* y *pequeños*. Además tenemos distancias mínimas que no tienen notación musical y que denominamos *Comas*. Estos intervalos se suelen dar entre sonidos enarmónicos, por ejemplo, entre el Do# y Reb o el Mi# y Fa.

Los sistemas anteriores presentan el inconveniente de tener tonos y semitonos diferentes, además de comas, y por tanto la enarmonía no existe. Este problema, que podía ser corregido por los instrumentos de entonación libre, era insuperable para los instrumentos de afinación fija como el piano, pues aunque se pudiese construir con tantas teclas como sonidos se precisasen, no se podría tocar. Para resolver este y otros problemas de orden práctico, se ideó un sistema basado en la enarmonía que pudiera ser adoptado universalmente por músicos y constructores. Se trataba de igualar entre sí los diferentes tonos y semitonos de la escala, esto es, lo que se denominó *temperamento igual*⁵⁴.

⁵⁴ El temperamento igual fue sistematizado en 1482 por el teórico Bartolomé Ramos de Pareja (1440-1491). Posteriormente fue consagrado por J.S. Bach (1685-1750) en su obra *El Clave Bien Temperado* (1722).

Sabemos que existe una diferencia de afinación, lo que llamamos coma pitagórica, cuando vamos por dos caminos distintos a un sonido, que de haber enarmonía sería el mismo. Efectivamente, si partimos de un Do_2 , subiendo siete octavas llegamos al Do_9 , y subiendo doce quintas llegaremos al $Si\#_8$, luego tendremos una diferencia de afinación entre ambos sonidos que será lo que conocemos como coma. Dado que las octavas no se pueden modificar, se trata de hacerlo con las quintas. Para ello, conociendo el valor de la coma, se reparte este intervalo entre las quintas que se precisan para formar la escala. De este modo, el intervalo formado por la sucesión de quintas debe ser igual al constituido por las octavas, transformándose así las quintas justas en *quintas templadas*. Es lo que se conoce con el nombre de *templar la escala*. Con este procedimiento, pues, se obtienen enarmonías y se resuelven los inconvenientes de orden práctico de los anteriores sistemas. Este método consiste, por tanto, en corregir ese exceso restando a cada quinta justa un intervalo igual a la coma dividida por el número de quintas. Se trata pues de repartir la diferencia entre las doce quintas de manera que siete octavas y doce quintas nos lleven al mismo sonido. Así, todos los semitonos son iguales y se obtiene la enarmonía. Veámoslo de forma matemática:

Sabemos que la octava y la quinta se representan así: $8^a = 2 / 5^a = 3/2$
 pues bien, si $(2)^7 \leq (3/2)^{12}$, tenemos que: $(3/2)^{12} : (2)^7 =$ coma pitagórica
 para que halla enarmonía: $(3/2)^{12} = (2)^7$
 calculamos el valor de la quinta: $3/2 = 1'4983$

A continuación, partiendo del Do_4 se multiplica su frecuencia por el valor de la quinta, es decir, 1'4983, con lo cual se obtiene su quinta templada, esto es, el Sol_4 ; el valor de éste se multiplica también por 1'4983 y obtenemos el Re_4 , cuyo valor se divide por dos ya que constituye la octava, con lo que obtenemos el Re_3 . Siguiendo con este procedimiento se llega al $Si\#_4$, cuya frecuencia será el doble de Do_4 , con lo cual desaparece la coma.

A partir de este planteamiento, el sistema temperado consiste en dividir la octava en doce partes alícuotas que corresponden cada una a un semitono. Para obtener el valor del semitono temperado se establece una progresión geométrica cuyo primer término es 1 y cuyo último es 2, esto es, la octava. Pues bien, la razón de la progresión la constituirá un número que multiplicado doce veces por sí mismo de 2:

$$\begin{aligned} \text{Semitono}^{12} &= \text{octava} \\ \text{Smt}^{12} &= 2 \\ \text{Smt} &= \sqrt[12]{2} = 1'05946 \end{aligned}$$

Una vez conocido el valor del semitono temperado, los intervalos que forma cada sonido de la escala con la tónica se obtienen por sumas de sucesivos semitonos⁵⁵. Veámoslo:

⁵⁵ Este procedimiento fue ideado por Florence Chladni (1756-1827).

$$\text{I-II (Tónica- Supertónica), dos semitonos -un tono-: } 1'059462^2 = 1'12245$$

$$\text{I-III: } 1'05946^4 = 1'25990$$

$$\text{I-IV: } 1'05946^5 = 1'3348$$

$$\text{I-V: } 1'05946^7 = 1'4983$$

$$\text{I-VI: } 1'05946^9 = 1'61874$$

$$\text{I-VII: } 1'05946^{11} = 1'8876$$

$$\text{I-VIII: } 1'05946^{12} = 1'9999 = 2$$

Por lo que respecta a la escala cromática, todos los semitonos que la componen tienen, según este procedimiento, el mismo valor y, por tanto, podemos hablar de enarmonía.

Podemos concluir que a lo largo de la historia musical se han desarrollado y utilizado diversos sistemas para la construcción de escalas, cada uno de los cuales ajusta la afinación de un modo diferente en base a las relaciones interválicas que se establecen entre sus sonidos y que cada uno de ellos fija de manera diferente. Estos sistemas principales son: el de Aristógenes, posteriormente adoptado por Zarlino -instrumentos de viento-, basado en las relaciones interválicas de la escala armónica; el de Pitágoras, basado en la sucesión de quintas justas -instrumentos de cuerda frotada-; el sistema Holder, consistente en dividir la octava en 53 partes alcuotas denominadas Coma Holder -la voz-; y por último, el sistema temperado, que basa su procedimiento en la división de la octava en doce semitonos, repartiendo las comas entre las quintas que se necesitan para formar la escala, con lo cual éstas se transforman en quintas templadas -instrumentos de teclado-. Dado que cada sistema opera de modo diferente para obtener la afinación o frecuencia de un sonido, a partir de un sonido dado, cada uno de estos sistemas nos llevará, en algunos casos, a entonaciones diferentes. Actualmente se tiende a afinar los instrumentos en su construcción en el sistema temperado.

8.3 PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE LA ESCALA

La gama de frecuencias audibles para el oído humano está comprendida aproximadamente entre los 16 y los 20000 Hz. Esta gama se la denomina *banda de audiofrecuencias* y se divide en *baja*, *media* y *alta*. En lo que respecta a la práctica musical esta gama se circunscribe a los sonidos comprendidos entre los 30 y 12000 Hz.

Dado que la banda de audiofrecuencias contiene un gran número de sonidos, para concretar y determinar la altura de un sonido se utiliza una clasificación denominada *bandas de octava*. Efectivamente, sabemos que la relación entre dos sonidos con frecuencias dobles la constituye la octava, esto es, 2 a 1. Luego, la banda de octava de estos sonidos serán los sonidos comprendidos entre ellos.

El criterio para clasificar las bandas de octavas consiste en aplicar las potencias de 2. La primera sería 2^4 (16 Hz), dado que las frecuencias por debajo de esta potencia son inaudibles.

La extensión de la banda de audiofrecuencias es de diez octavas, que corresponde a la escala general expresada según los índices acústico-musicales⁵⁶. Por consiguiente, la clasificación quedaría del siguiente modo:

$$\begin{array}{lll}
 2^4 = 16 \text{ Hz} & 2^8 = 256 \text{ Hz} & 2^{12} = 4096 \text{ Hz} \\
 2^5 = 32 \text{ Hz} & 2^9 = 512 \text{ Hz} & 2^{13} = 8192 \text{ Hz} \\
 2^6 = 64 \text{ Hz} & 2^{10} = 1024 \text{ Hz} & 2^{14} = 16384 \text{ Hz} \\
 2^7 = 128 \text{ Hz} & 2^{11} = 2048 \text{ Hz} &
 \end{array}$$

Veamos un ejemplo. Sea calcular la frecuencia del Mi_3 , según el índice acústico musical franco belga, en la escala de Do Mayor.

Lo primero que debemos determinar es la octava a la que pertenece dentro de la escala general. Sabemos que corresponde a la quinta si observamos la escala general⁵⁷. Aplicando la equivalencia con las bandas de octavas, tendremos:

$$Mi_3 = 5^a \text{ octava} \quad 5^a \text{ octava} = 2^8 \text{ banda de octava} \quad 2^8 = 256 \text{ Hz}$$

Por lo tanto, la frecuencia de Mi_3 será 256 Hz. Además debemos considerar si el sonido cuya frecuencia se quiere determinar corresponde a un instrumento transpositor, en cuyo caso, debemos trasladar esa frecuencia a la altura real del sonido.

Por su parte, el procedimiento para calcular la frecuencia de cualquier sonido de una escala armónica consiste en aplicar la fórmula que relaciona la frecuencia con la velocidad de propagación y la longitud de onda. Efectivamente, dado que la onda al propagarse a velocidad constante c recorre una distancia igual a una longitud de onda λ en un intervalo de tiempo de un período T , aplicando la expresión de la velocidad en función del espacio y del tiempo tendremos que:

$$c = \frac{e}{t} \quad \text{de donde } e = \lambda \quad \text{y } t = T$$

$$\text{luego, } c = \frac{\lambda}{T} \quad (1/T = f)$$

$$\text{entonces, } c = \frac{\lambda}{f}, \text{ o también } \lambda = \frac{c}{f} \text{ o } f = \frac{c}{\lambda}$$

⁵⁶ Véase el Anexo III.

⁵⁷ Idem de la anterior nota.

Así, para calcular la frecuencia del segundo armónico de una determinada serie armónica en un tubo cerrado cilíndrico, deberemos operar de la siguiente forma:

$$f_2 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4L/3} = \frac{3c}{4L}$$

De donde $4L$ es la longitud de onda del sonido fundamental.

Dado que $c/4L$ es igual a la frecuencia fundamental f_1 , entonces:

$$f_2 = 3f_1$$

Por consiguiente, bastará con multiplicar la frecuencia de la fundamental por el número de armónico del cual queremos obtener la frecuencia.

En el caso, por ejemplo, del clarinete, para calcular la frecuencia teórica de los sonidos analizados en la parte experimental, partimos de la frecuencia del sonido fundamental Mi_2 -según el índice acústico musical franco-belga-, calculada en $148'37$ Hz -de acuerdo con el sistema temperado, a 445 Hz-. De esta forma, para obtener, por ejemplo, la frecuencia del quinto armónico de su escala ($Sol\#_4$) deberemos proceder multiplicando $148'37$ por su número de orden:

$$148'37 \times 5 = 741'85 \text{ Hz}$$

En cualquier caso sabemos que cada sistema de afinación tiene su propio procedimiento de cálculo para hallar la frecuencia. En nuestro caso debemos utilizar el método que utiliza el sistema temperado, porque aunque utilizamos armónicos para constituir la escala, el instrumento viene afinado de origen por razones prácticas según el sistema temperado.

Aun así, es aconsejable conocer también el procedimiento para la obtención de frecuencias del sistema Zarlino. Este procedimiento consiste en operar con los intervalos de una escala de armónicos sobre la base de la frecuencia de un sonido de referencia. Este cálculo se obtiene multiplicando o dividiendo a una frecuencia dada el quebrado del intervalo que la separa del sonido cuya frecuencia buscamos. Este sonido de referencia es el La_4 - La_3 en el índice acústico musical franco belga utilizado por los instrumentos de viento-, a 440 Hz. El método es el siguiente: primero se traslada la frecuencia de referencia a la octava del sonido que buscamos. A continuación aplicamos el intervalo entre la octava del sonido de referencia que hemos trasladado y el que buscamos, o el más cercano en el caso de que aquél se halle alterado. Por último, aplicamos el semitono cromático ascendente o descendente, según corresponda, en el supuesto de que el sonido que buscamos se encuentre alterado.

Procedamos con un ejemplo. Sea determinar la frecuencia del Mi_5 en la escala de Do mayor en el clarinete:

- trasladamos la frecuencia del Mi_5 al La inmediatamente inferior, esto es, el La_4 :

$$La_4 = 440 \text{ Hz} \times 2 \text{ (el doble de vibraciones)} = 440 \times 2 = 880 \text{ Hz}$$

- entonces sumamos, mediante multiplicación, el intervalo entre el La_4 y el Mi_5 con su quebrado que lo representa:

$$\begin{aligned} Mi_5 &= La_4 + 5^{\text{a}} \text{ justa} \\ fMi_5 &= 880 \times 3/2 = 1320 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la frecuencia del Mi_5 será de 1320 Hz. Considerando su cualidad de instrumento traspositor en Sib y dado que la altura con la que se afina en la orquesta es Do, en el clarinete esta frecuencia corresponderá al $Fa\#_5$.

Por su parte el sistema temperado, al que se adscribe el clarinete, utiliza el procedimiento consistente en operar con los 12 semitonos que comprende una octava. Para ello se establece una progresión geométrica cuyo primer término es 1 y cuyo último es dos, esto es, el intervalo de octava. La razón de la progresión será un número que multiplicado doce veces por sí mismo resulte 2. El número resultante designará el valor de un semitono. Este número es el siguiente:

$$2^{2/2} = 1'05946$$

Si atribuimos un valor 1 al Do_1 , el $Do\#_1$ valdrá $1 \times 1'05946 = 1'05946$; el Re_1 $1'05946 \times 1'05946 = 1'12245$; siguiendo con este procedimiento se llegará al Do_2 .

Conociendo este valor, en primer lugar se contabilizan los semitonos existentes entre el sonido cuya frecuencia buscamos y el La inmediatamente inferior -también se puede proceder a la inversa- de su banda de octava, según proceda. A continuación, determinamos la frecuencia del La multiplicando -o dividiendo, según corresponda- por el La patrón tantas veces como octavas tengamos de diferencia y, a su vez, multiplicamos ésta por el número de semitonos que comprende el intervalo. Determinemos con este método el sonido mismo del anterior ejemplo:

$$\begin{aligned} Mi_5 &= La_5 - 7 \text{ semitonos} \\ Mi_5 &= 440^2 : 2^{7/12} \\ Mi_5 &= 880 \times 2^{7/12} = 880 \times 7.414148 = 1320 \\ \text{Luego } Mi_5 &= 1318'48 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Como se puede comprobar este procedimiento es similar al anterior solo que en lugar de operar directamente con el intervalo existente entre el sonido cuya frecuencia buscamos y el La patrón, se procede operando con los semitonos. Podemos observar que en este caso, cada sistema nos lleva a entonaciones distintas para el mismo sonido, debiéndose corregir esa diferencia con los instrumentos de afinación libre o variable mediante la correcta formación del oído musical y la capacidad técnica del ejecutante.

8.4 ASPECTOS GENERALES Y PRACTICOS DE LA AFINACION

La afinación es un ajuste continuo de la frecuencia, constituye la corrección sonora en la realización musical. Se sabe que la altura es la sensación sonora que nos permite distinguir un sonido grave de uno agudo. Depende fundamentalmente de la frecuencia vibratoria la cual, a su vez, se halla influida por las propiedades de la sustancia o estructura vibrante y, en modo secundario, por la forma en que se transmiten las vibraciones.

La definición científica de la afinación reside en las pulsaciones resultantes entre dos sonidos cuyas frecuencias interferidas difieren ligeramente. Esa diferencia en la frecuencia de ambos es lo que produce la sensación de disonancia, esto es, algo armónicamente incorrecto para el oído humano.

Lo primero que debemos tener en cuenta en la afinación de un instrumento es el diseño de su construcción. Este es el principal factor que va a determinar la afinación de un instrumento. De manera que podemos hablar de la existencia de una afinación implícita que viene determinada por la construcción del instrumento⁵⁸, y de una afinación externa condicionada por una serie de factores de orden físico y musical.

Otros factores a considerar en este menester son la temperatura y densidad del medio de propagación que, a su vez, van a determinar la velocidad de propagación del sonido y, también, la influencia de la presión de soplo y labial en la emisión del sonido, este último factor traducido en una embocadura flexible y correcta desde la etapa de iniciación. Además no debemos olvidarnos que una afinación correcta también depende del conocimiento de la igualdad del temperamento y de las series armónicas.

En relación con el primer factor, el constructor debe aplicar los conocimientos prácticos adquiridos fruto de numerosos estudios experimentales acústicos. Se trata de obtener mediante la vibración de las cuerdas o columnas aéreas de los tubos una serie de sonidos que les permita constituir su escala de forma afinada. En el caso del clarinete o de cualquier instrumento de viento madera se considera fundamentalmente la distancia entre cada orificio, su diámetro, el taladro y la forma interior del tubo. Las frecuencias de cada uno de esos sonidos deben ajustarse a los valores que rigen según el sistema de afinación empleado. Para ello es indispensable establecer la frecuencia de un sonido de referencia que nos permita, a partir de él, fijar las frecuencias de los sonidos restantes que servirán para construir la escala. Una vez establecidos estos valores, el constructor debe perforar los orificios en el tubo de tal forma que la frecuencia de la columna aérea vibrante que resulte de cada uno de ellos se aproxime de forma más precisa a aquéllos. En el caso del clarinete, no es suficiente con perforar el tubo con los orificios correspondientes a una octava, tal y como sucede en los restantes instrumentos de viento madera, sino que, por su funcionamiento acústico de tubo cerrado, los orificios necesarios deben cubrir una doceava. Teniendo en cuenta que la flauta, el oboe y el clarinete tienen una longitud análoga, es fácil deducir que los problemas de afinación se amplifican en el clarinete dado que un mínimo error en la ubicación y diámetro de estos agujeros puede conllevar un serio desajuste en la afinación resultante.

El sonido referente al que hacíamos alusión en el párrafo anterior debe ser aceptado mundialmente como patrón de afinación. Actualmente este sonido es el La₄ cuya

⁵⁸ Actualmente se construyen clarinetes afinados a 440 y 442 Hz.

frecuencia está fijada en 440 Hz. Sin embargo, su establecimiento normalizado definitivo en 1939 no ha estado exento de numerosas vicisitudes a lo largo de la historia⁵⁹.

En cuanto al factor de la temperatura y densidad del medio transmisor cabe hacer las siguientes observaciones. El medio ordinario en el cual se propaga el sonido es el aire. La velocidad de propagación depende de la elasticidad y densidad del medio y se halla establecida aproximadamente en 19'3 Km por minuto, esto es, 345 m/sg. Esta velocidad varía según la temperatura y tiene su incidencia en la frecuencia. En efecto, si aumenta la temperatura disminuye la densidad y aumenta la elasticidad del sistema, con lo cual la velocidad del sonido aumentará, mientras que si disminuye la temperatura acontecerá lo contrario. Los instrumentistas de viento conocen los problemas de afinación que se derivan de este fenómeno y saben como corregirlos, no siempre de modo óptimo por la complejidad que comporta ya que de forma ordinaria es nuestro sentido auditivo el que debe detectar esa anomalía.

Nos resta reseñar el factor que atañe a los sistemas de afinación, pero antes es preceptivo saber que cada familia instrumental, por las características acústicas y organológicas que presentan, se clasifica en orden a su entonación de un modo determinado. De acuerdo con el musicólogo belga Gevaert, esta clasificación responde a tres tipos de entonación que se hallan en función del margen de capacidad correctora que alberga cada instrumento.

El primer tipo se denomina instrumentos de entonación fija y, como su nombre indica, se hallan limitados de tal modo que su morfología y principio acústico les impide variar en modo alguno su afinación, esto es, su afinación o la frecuencia de sus sonidos les viene impuesta de forma implícita y no cabe efectuar ajustes. Huelga decir que, en este supuesto, el sistema de afinación más apropiado es el Temperado, doce semitonos iguales por octava y, por consiguiente, enarmonías. Los instrumentos de teclado se adscriben a este tipo de entonación.

La siguiente categoría la constituye los instrumentos cuya afinación es susceptible de ser modificada en modo relativo. Se hallan aquí incluidos los instrumentos de viento cuya morfología y principio acústico permite esta cualidad maleable. Efectivamente dado que la embocadura juega un papel primordial en este tipo de instrumentos se encontrará lógico que su acción en el proceso sonoro pueda acarrear una función secundaria que permita el ajuste relativo en la entonación. Además, el complejo mecanismo instalado en el tubo amén de propiciar la obtención de su escala cromática facilita sobremanera esta función acústica. Por su principio acústico basado en la vibración de las columnas gaseosas, el sistema de afinación más idóneo para este tipo de instrumentos es el de Zarlino o de los

⁵⁹ Las dificultades técnicas y musicales que se derivaban de la falta de uniformidad en la afinación eran en ocasiones insuperables para la práctica musical. El primero en tener conciencia real de este problema fue Mersenne. En su libro *De los movimientos y del sonido de las cuerdas* ya apunta la necesidad de establecer un método de medida de la frecuencia. Además, propone que figure en la partitura la frecuencia de la primera nota de una de las partes. La primera medida sería de normalización data de principios del siglo XIX. Parece ser que fue Sarrete, Director del Conservatorio de París, en 1812 quien fija el diapasón de estudios. A partir de este momento se hace cada vez más indispensable establecer un diapasón para toda Europa. Así, en 1834 un Congreso Internacional de Físicos reunidos en Stuttgart adopta la frecuencia de 440 Hz. Sin embargo, el gobierno francés de forma unilateral establece una nueva medida de referencia fijada en 435 Hz. Este nuevo diapasón francés es aceptado en Europa, excepto por Gran Bretaña, y refrendado en el Congreso Internacional de Viena en 1885. Finalmente se fija la frecuencia patrón en 440 Hz en una conferencia internacional celebrada en Londres en 1939.

físicos, sin embargo la tendencia actual se dirige a normalizar el sistema temperado en todos los instrumentos.

Por último, los instrumentos cuya entonación es susceptible de ser alterada en modo absoluto constituyen la tercera clase, a saber, instrumentos de afinación libre. Los instrumentos de cuerda o arco y la voz se incluyen en esta categoría. La tensión que se imprime a las cuerdas por las clavijas o sus numerosas posibilidades de digitación pueden modificar en grado sumo su afinación, o lo que es lo mismo, producir sonidos de cualquier frecuencia. La voz, por su parte, posee una capacidad de ajuste absoluta e inmediata. El sistema de Pitágoras es el adoptado por los primeros, mientras que los segundos se adscriben al sistema de Holder.

Es de una importancia superlativa conocer los diferentes sistemas de afinación que rigen en cada familia instrumental. Ya hemos visto que cada una de estas familias adopta el sistema de afinación que mejor casa con su morfología y características acústicas. El temperamento uniforme es un logro formidable en este sentido, pero no deja de ser una modificación entre lo físicamente exacto y lo aceptable armónicamente para el oído humano. Mientras que este sistema es altamente satisfactorio en los instrumentos de entonación fija, su aplicación en los instrumentos que dependen de sobresoplar las series armónicas para obtener sus sonidos de los registros agudos es pura teoría. Los fabricantes de instrumentos de viento madera tratan de lograr el temperamento uniforme, pero no siempre lo consiguen de forma satisfactoria, en especial en el clarinete. En los sonidos fundamentales, obtenidos mediante el acortamiento gradual de sus columnas gaseosas, se adopta este sistema a la hora de establecer los puntos donde debe ser perforado el tubo⁶⁰. Empero, una vez obtenidos esta serie de sonidos, los restantes, obtenidos mediante armónicos, deben estar sujetos a la tutela del sistema Zarlino, inspirado en la serie armónica. Ya conocemos, en este sentido, los inconvenientes de orden práctico que presenta este sistema, mas considerando la condición de instrumentos de entonación variable, no debe convertirse estos inconvenientes en un problema insuperable. Diversos métodos de corrección y ajuste de la afinación pueden solventarlos en modo óptimo. Además, en la parte experimental del estudio se tratará de aportar información útil para corregir estos problemas.

El conocimiento del sistema de afinación adoptado por el instrumento con el cual nos hallamos tocando nos servirá de inestimable ayuda para que la afinación entre ambos sea lo más precisa. Cabe, en este sentido, hacer una observación de indudable interés. ¿Quién debe adaptarse a quién? Obviamente, un piano no puede variar su entonación, un clarinete lo puede hacer relativamente y un violín, satisfactoriamente. Luego, cabe establecer una prelación en este menester basada en el mayor margen de capacidad correctora de cada uno de los instrumentos implicados, a saber: un violín deberá adaptarse a un clarinete, un clarinete a un piano, etc. A este respecto, en ocasiones el instrumentista debe exagerar conscientemente los tonos conductores, o bien puede tocar los sostenidos accidentales un poco más altos y los bemoles accidentales más bajos. Recuérdese, al respecto, que una misma nota emitida por un instrumento puede diferir en su frecuencia en función de la tonalidad en la que se halle y producir, por consiguiente, pulsaciones perceptibles para un oído bien adiestrado. Pero, además, si es emitida por instrumentos de familias distintas cuyos sistemas de afinación son diferentes, la frecuencia arrojará unos

⁶⁰ A este respecto, Boehm proporciona amplia información en su libro *La Flauta y la interpretación flautística* (1964).

guarismos distintos en cada uno de ellos. Imagínese, en un discurso musical con sus modulaciones propias y tocando con una orquesta compuesta por familias instrumentales distintas que afinan según diferentes sistemas, cuán compleja puede tornarse la afinación. Aunque, bien es cierto que las pulsaciones en algunos casos son mínimas e imperceptibles para un oído promedio.

Analizados ya los factores que determinan la altura de un sonido, vamos a considerar ahora ciertas cuestiones prácticas que afectan a la afinación.

Se sabe que para que un sonido produzca una sensación clara de altura su duración mínima debe situarse en torno al vigésimo de segundo. En este sentido, es más fácil la afinación con otro instrumento emitiendo tonos cortos, dado que la afinación con tonos largos requiere una discriminación más precisa y, por consiguiente, más compleja.

Por lo que respecta a los límites sensoriales de altura, el umbral queda establecido en torno a los 16 y 18 ciclos. Por debajo de estos valores, se pueden percibir frecuencias irregulares como un ruido sordo. Por su parte, la cima de las sensaciones de altura oscila entre los 16000 y 20000 Hz. Estos valores pueden variar de una persona a otra en función de su capacidad auditiva. Vibraciones de frecuencia más rápida pueden causar una sensación dolorosa. Pero, además, la altura o tono está relacionada con la intensidad de tal suerte que para las frecuencias menores de 1000 Hz el tono disminuye si la intensidad aumenta; entre los 1000 y los 5000 Hz el tono es relativamente independiente de la intensidad; finalmente, a partir de 5000 Hz el tono aumenta si lo hace la intensidad.

Debemos considerar, por otra parte, que un sonido determinado nunca comienza con un régimen permanente o estacionario de vibraciones, a no ser que se origine en un laboratorio electrónico. El ataque del sonido en su fase inicial puede incluir ruidos de diversa índole provenientes de la lengüeta, la embocadura, etc. Además, en su fase de sostenimiento con un régimen permanente, la frecuencia puede verse afectada por una presión incorrecta u otros factores imponderables. De ahí, que cuanto más regular entre un sonido en vibración periódica, más nítidamente lo percibiremos como un tono de una altura definida. Asimismo, el declive del sonido, conocido como fase de caída comienza cuando, tras haber alcanzado una nota su régimen permanente, comienza su extinción, siempre y cuando se deje de transmitir la energía generadora. Nos sirve esta observación para comprender que la frecuencia de un sonido cuyo origen se halle en la vibración de las columnas aéreas, está sometida a ligeras fluctuaciones que debemos tener en consideración a la hora de afinar nuestro instrumento.

En suma, a modo de corolario podemos decir que la afinación es un continuo ajuste de cada sonido, en cada momento de la realización musical. El oído humano debe educarse para detectar las pulsaciones que se producen entre dos o más sonidos como consecuencia de los factores que se han analizado en el curso de esta exposición. Por la complejidad práctica que comporta, su aprendizaje debe comenzar desde temprano, en la etapa de iniciación, y su ulterior desarrollo y dominio debe consolidarse a lo largo del período de aprendizaje y en la etapa profesional. A medida que se logre flexibilidad física y se desarrolle el oído musical la afinación acontecerá de forma automática e inconsciente. En este sentido, es importante que el instrumentista aprenda a oírse a sí mismo desde muy temprano. Pero, lógicamente, una discriminación de altura óptima se logrará tocando colectivamente con otros instrumentos y con un adiestramiento continuo mediante ejercicios de diversa índole que deben realizarse a lo largo de la etapa escolar. En cualquier caso, una afinación correcta, como ya hemos tratado anteriormente, dependerá de un hondo

conocimiento de las peculiaridades del instrumento y de su funcionamiento acústico, así como de la igualdad del temperamento y de las series armónicas. Un oído bien adiestrado junto con una embocadura flexible completarán el trabajo.

TUBOS SONOROS Y COLUMNAS AEREAS



Concierto n°1 para Clarinete y Orquesta, Op. 26. Spohr (1784-1851)

9.1 DESCRIPCION Y PROPIEDADES ACUSTICAS

Los instrumentos de viento madera forman parte de los denominados *tubos sonoros*. Se denominan tubos sonoros porque contienen una columna gaseosa susceptible de producir sonido si se estimula convenientemente. En este caso, el cuerpo sonoro es la columna gaseosa, el medio elástico alojado en el interior del tubo, y no el tubo propiamente dicho. Esta columna gaseosa puede adoptar diferentes modos de resonancia en función de la forma del tubo que la aloja.

Para llevar a cabo el estudio de los tubos sonoros es preceptivo considerar ciertas hipótesis que no siempre se cumplen en los instrumentos musicales. En principio, se considera la onda que viaja en el interior de un tubo cilíndrico como una onda plana, lo cual no es del todo acertado por varias razones: las paredes del tubo no son nunca perfectamente rígidas, ni completamente cilíndricas; la velocidad de la onda no es constante; además, suele haber disipación de energía en el curso de la propagación por los intercambios de calor entre el gas y las paredes, con lo que hay amortiguamiento de la onda. Estas pérdidas que ocurren en las paredes del tubo son definidas como viscosas y termales. Las primeras, debido al hecho de que el aire tiene una viscosidad finita para que la velocidad de la partícula del aire gradualmente se ponga a cero cuando nos acercamos a las paredes. Las segundas, ocurren porque las paredes tienen prácticamente una temperatura constante, mientras que la temperatura en el gas fluctúa debido fundamentalmente a fluctuaciones de

presión adiabáticas. Estas fluctuaciones de temperaturas disminuyen cerca de la pared porque el calor en ocasiones fluye dentro y afuera de la pared.

En los instrumentos de viento madera la situación es tal que la influencia de la pared se puede considerar como una capa divisoria bastante delgada. Fuera de esta capa divisoria la velocidad de la partícula es prácticamente constante a través de toda la sección cruzada y los cambios de estado son casi adiabáticos (Nederveen, 1969).

Por otro lado, cuando hablamos de tubos sonoros debemos tener claro los conceptos de nodos y vientres. Efectivamente, las ondas sonoras longitudinales se reflejan en los extremos cerrados o abiertos originando unos modelos determinados de ondas estacionarias⁶¹, que presentan zonas de máxima presión, denominadas *vientres o antinodos*, y zonas donde la variación de la presión atmosférica es cero, llamados *nodos*. Pues bien, normalmente, estas ondas estacionarias se asocian con la resonancia en las columnas aéreas principalmente por lo que se refiere al desplazamiento de aire en las columnas. Pero también pueden visualizarse por lo que se refiere a las variaciones de presión en la columna. Así, un nodo de desplazamiento siempre es un antinodo de presión y viceversa. Cuando el aire se reprime a un nodo, el movimiento aéreo estará presionando alternadamente hacia ese punto y se extenderá fuera de él, causando una variación de presión máxima. Hablamos de desplazamiento, pues, cuando la curva tiene un vientre en la campana dado que en ese punto las moléculas de aire tienen libertad para moverse, pero cerca de la boquilla el flujo acústico es mínimo. De manera que no hay que confundir los nodos y vientres de presión, que constituyen regiones de compresión y dilatación de las partículas aéreas, con los de desplazamiento, los cuales hacen referencia al movimiento continuo de la onda longitudinal.

Los tubos sonoros se clasifican de acuerdo a tres de sus características morfológicas, a saber: según sus aberturas, su forma interna y su modo de excitación.

En orden al número de aberturas que poseen, se clasifican en *abiertos o cerrados*. Los tubos abiertos como su nombre indica son aquellos que tienen dos o más orificios, cuya ubicación no tienen por qué coincidir con los extremos. Por su parte, los tubos cerrados solo disponen de una abertura que puede situarse en un extremo, o bien a lo largo del tubo. Sin embargo esta clasificación no responde siempre a una cualidad física del tubo, antes bien, en ocasiones se halla en función de su comportamiento que a su vez responde a causas diversas y complejas. Es por esto por lo que en ocasiones un tubo que presente aberturas en cada extremo puede funcionar como cerrado sin serlo físicamente. Este es el caso del clarinete, cuyo tubo, teóricamente abierto en los dos extremos, se cierra en el extremo superior por la embocadura de lengüeta.

El extremo abierto donde se ubica la embocadura no puede ser un nodo de presión dado que constituye el punto de excitación. Este fenómeno es el que acontece en el tubo del clarinete. El vientre de presión, en las diferentes fundamentales, se configura justo en el extremo donde se encuentra la embocadura. Por su parte, se constituye, en el extremo abierto, un nodo en los instrumentos cuyo tubo funciona como cerrado y un vientre en los que funcionan como abiertos. Sin embargo, si nos referimos a nodos y vientres de desplazamiento -y por tanto a la onda estacionaria-, el nodo queda configurado cerca de la boquilla y el vientre con amplitud creciente hacia el exterior de la campana en los tubos

⁶¹ Consúltense el apartado 9.5 para cualquier aclaración a este respecto.

cerrados, mientras que en los abiertos se constituye un vientre en cada extremo y un nodo en el centro⁶².

El procedimiento para el funcionamiento de los tubos, según sea abierto o cerrado, consiste en la producción de una primera onda depresiva que se origina debido al enrarecimiento que provoca la perturbación de la lengüeta. Si el extremo contrario se halla abierto, como sucede en todos los instrumentos de viento madera, ésta es expulsada al exterior y genera una succión interna en el tubo que se traduce en un nuevo enrarecimiento. Como consecuencia de esta situación, se origina una nueva onda expansiva, que avanza hasta la parte opuesta del tubo -como consecuencia de la reflexión sonora-. El comportamiento de la onda, en este momento, difiere según sea el tubo abierto o cerrado. Si el extremo se halla abierto, la onda expansiva aspirará la corriente perturbadora al llegar al extremo donde se dispone la embocadura del instrumento, con lo cual ésta de nuevo penetrará en el tubo para iniciar un ciclo nuevo. Ahora bien, si este extremo se halla cerrado⁶³ por las causas que fueren, la onda expansiva se reflejará y deberá repetir el proceso descrito para completar un ciclo. Se constituye así una onda estacionaria al superponerse las ondas, siempre que el aire insuflado mantenga la suficiente intensidad.

La onda, pues, se propaga en el interior de un tubo abierto dos veces, mientras que en los cerrados lo recorre en cuatro ocasiones, esto es, los desplazamientos son el doble en éstos, de ahí que se diga que la longitud de onda en los tubos abiertos -oboe, flauta, fagot y saxofón- corresponde a dos longitudes de su tubo, por cuatro en los cerrados -clarinete-. Pero las consecuencias no acaban aquí, puesto que en los primeros al ser su longitud de onda la mitad que en los segundos, la fundamental emitida corresponderá al doble de frecuencia que éstos, es decir, la octava o segundo armónico en la serie armónica.

Los orificios que se disponen a lo largo del tubo tienen la finalidad de dividir la columna gaseosa en segmentos con frecuencias propias. En este sentido, estas aberturas funcionan como extremos abiertos al igual que lo hace la campana o pabellón del instrumento, posibilitando de esta suerte las diferentes fundamentales en el registro grave, o bien los armónicos de orden impar en el registro agudo y sobreagudo. El diámetro y grosor del taladro, así como su forma de biselado, son fundamentales para obtener de forma afinada todos los sonidos. El diámetro debe ser proporcional a la longitud de onda, de ahí que a medida que se asciende por la escala y se mengua ésta, aquél se reduzca proporcionalmente. En cuanto al biselado, se taladra en círculos concéntricos al objeto de facilitar el paso de la onda en modo esférico, definir la frecuencia del sonido y, por otra parte, propiciar cierta intensidad en algunos componentes armónicos.

Hay que recordar, sin embargo, que la columna gaseosa no se secciona completamente en el primer orificio destapado, sino que su longitud siempre rebasa ligeramente la longitud del tubo debido a que la diferencia de presión del tubo no puede compensarse exactamente en el mismo punto mismo donde contacta con el aire exterior. Además en las frecuencias altas la masa que se debe mover en el orificio requiere una mayor aceleración que aumenta con el cuadrado de la frecuencia. Así, la corrección final del tubo es mayor para las frecuencias altas que para las bajas.

⁶² La verificación de este fenómeno se puede efectuar calculando la longitud de onda y de tubo de la nota fundamental más grave (Mi_2) con la corrección final aplicada.

⁶³ Entiéndase cerrado acústicamente, no físicamente. Solo en los tubos del órgano podemos hablar de extremos cerrados física y acústicamente.

Las ondas que se producen en un tubo son longitudinales y al llegar al extremo de éste se reflejan en el exterior volviendo en la misma dirección pero con inverso sentido. Si el extremo es cerrado la reflexión resultante ofrece elongaciones nulas y, consecuentemente, nodos. Este tipo de ondas se denominan ondas planas. Su definición aplicada a los tubos, la aporta de forma didáctica José Pérez Miñana en su magnífico estudio sobre Acústica:

“ ...el sonido emitido en el interior de un largo tubo de poco diámetro hará suponer, a una distancia suficientemente grande, que las ondas que avanzan, debido a su pequeña superficie y gran esfericidad, pueden considerarse como planos perpendiculares al eje del tubo. Este carácter de ondas planas sirve también para justificar la conservación de la intensidad sonora a lo largo del tubo, que permite la audición a grandes distancias.”
(Pérez, 1969)

Lo que sucede en el extremo inferior, donde se ubica la campana del instrumento, es más complejo. En este caso la relación que se establece entre la longitud de la onda y la dimensión y diámetro del tubo, así como la densidad del nuevo medio, son determinantes para observar el comportamiento de la onda. En los instrumentos de viento madera, dada la relativa estrechez del diámetro de su tubo, la onda incidente como consecuencia de la excitación de la columna gaseosa por medio de la embocadura se refleja en la superficie del nuevo medio elástico, y retorna en sentido contrario invirtiendo los puntos de presión, en el tiempo de un período. Lo que suceda en el extremo de la embocadura se hallará en función de la forma interna del tubo y, en modo secundario, de la forma que presente aquélla. En los tubos de sección cónica y embocadura de lengüeta la onda refleja es expulsada al exterior, completando así un ciclo⁶⁴, mientras que los de sección cilíndrica con lengüeta simple posibilitan una nueva reflexión en este extremo, con lo cual se debe repetir el procedimiento descrito para completar un ciclo.

Dado que la perturbación se produce en el seno del aire, la velocidad de propagación de las ondas en el interior del tubo será la del sonido.

Por lo que respecta a su forma interior, los tubos se clasifican en *prismáticos*, *cónicos* y *cilíndricos*. Los primeros solo se utilizan en ciertos registros de órgano. Los más comunes, por tanto, son los cónicos y cilíndricos. En ocasiones se utiliza una sección combinada de ambos.

Esta característica que presentan los tubos es la que determina en mayor medida el funcionamiento acústico del instrumento, por encima de la primera clasificación.

Los tubos cónicos asociados a una lengüeta simple o batiente permiten su funcionamiento acústico abierto, facilitando de esta suerte la producción de todos los armónicos de la serie. Por su parte, los cilíndricos con embocadura de lengüeta simple se comportan como cerrados, pudiendo solo producir los armónicos impares. La forma de propagación de las ondas en el interior del tubo determina este comportamiento. En los cilíndricos las ondas tienen una solución plana y, por tanto, tienen la misma amplitud en todo su recorrido y una longitud de onda que corresponde a un cuarto de la longitud del tubo, mientras que en los cónicos la propagación es esférica con lo cual cuando la onda

⁶⁴ Recuérdese que debido a la esfericidad del cono, la intensidad de una onda sonora que se propague dentro de él será proporcional al cuadrado de la amplitud, con lo cual la presión y velocidad serán proporcionales a $1/r$.

completa un ciclo su longitud es análoga a la de los tubos cilíndricos abiertos, esto es, una semilongitud de onda.

Los tubos que se doblan, como sucede con el saxofón o el clarinete bajo, no deben sufrir alteración alguna en el comportamiento de la columna gaseosa que contienen pues de lo contrario no podrían adscribirse a ninguno de estos tipos. Para ello se toma en consideración los radios de curvatura que deben ser grandes con respecto al radio de su sección normal.

Por último, se establece una clasificación según el modo de excitación de la columna gaseosa que contienen los tubos: *tubos de embocadura*, *de lengüeta* y *de boquilla*. Se podría decir que es esta cualidad la que incide en mayor medida en el resultado tímbrico de estos instrumentos. En efecto, en función de cómo se active el proceso sonoro, esto es, de qué manera se ponga en funcionamiento la columna gaseosa, el timbre del sonido obtenido será de una forma u otra.

Las lengüetas pueden ser de dos tipos: *libres*, aquellas que vibran libremente sin encontrar resistencia; *batientes*, las que vibran sobre el soporte al cual están sujetas. Estas últimas a su vez se dividen en *simples* y *dobles*. Las primeras son utilizadas por el clarinete y el saxofón y consisten en una caña que bate contra el borde de la abertura de la boquilla. El segundo tipo, empleadas por el oboe y el fagot, son dos lengüetas que baten la una contra la otra.

Los tubos de lengüeta batiente producen una gran riqueza armónica debido a la compleja acción vibratoria de su lengüeta. Su funcionamiento consiste básicamente en superar inicialmente una resistencia que opone la caña a la corriente de aire. Debido a su cualidad elástica, la caña cierra el hueco de penetración y dado que la reiteración de impulsos se torna periódica, se produce así la excitación de la columna gaseosa adyacente.

En relación con las diferencias acústicas que presentan ambos tipos de lengüetas, José Pérez Miñana apunta lo que sigue en su manual de Acústica:

“Los dos tipos mencionados se diferencian porque en el de la lengüeta libre, y tal como su nombre indica (fig. 5.19 a), ésta puede vibrar libremente al hallarse alojada en un paso que no obstruye totalmente, mientras que en el segundo tipo la lengüeta cierra totalmente la abertura por ser mayor que ésta (fig. 5.19 b), y su vibración es solo parcial. Este tipo se llama de lengüeta batiente y se caracteriza por emitir armónicos de alta frecuencia, por lo que su sonido resulta ácido y penetrante.” (Pérez, 1969)

Además de describir la diferencia más esencial de ambas, en este párrafo se da una idea de la razón por la cual el tubo del clarinete funciona acústicamente como cerrado, aunque no la fundamenta científicamente. En efecto, dado que la lengüeta obtura periódicamente la embocadura, la onda cuando llega a este extremo lo encuentra cerrado por aquélla, con lo cual de nuevo se refleja y repite el ciclo inicial propagándose sendas veces más. Por tanto, la consecuencia más directa del uso de la lengüeta simple es que además de procurar una mayor producción de componentes armónicos, lo cual tiene su influencia directa en el timbre, constituye, junto con la forma interna del tubo, la principal causa del funcionamiento acústico del instrumento al cual va asociada, pues permite cerrar el tubo acústicamente por ese extremo.

La vibración, pues, de este tipo de lengüetas perturba en modo complejo la columna aérea del tubo lo cual origina una ingente cantidad de componentes armónicos,

aunque no todos están presentes, sino solo los que son reforzados por los modos de resonancia del tubo.

Las oscilaciones de aire en el tubo de un instrumento de viento tienden a perder la energía debido a la fricción y el cambio de calor con las paredes, así como a la radiación en las aperturas del tubo. Estas pérdidas deben ser compensadas por la regeneración de la lengüeta.

9.2 INFLUENCIA DEL MATERIAL EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS COLUMNAS AEREAS

El efecto del material con el que se construyen los instrumentos sobre sus propiedades acústicas ha sido motivo de controversia desde la época romántica. Un músico avezado es capaz de reconocer la mínima diferencia de timbre que se produce entre dos instrumentos contruidos con diferentes materiales -por ejemplo una flauta de plata o de oro, o un clarinete de madera o de plástico-.

Los reparadores y clarinetistas también son conscientes de los cambios bastante sensibles de las propiedades acústicas de un instrumento cuando las almohadillas instaladas en la cubierta para el empleo de los orificios tonales son de diferente material o cuando el tubo se engrasa.

La influencia del material en el timbre del instrumento no ha sido especialmente estudiada por los acústicos. Benade (1976) aporta algunas ideas que ayudan al entendimiento de este asunto. Estas ideas las basa en algunos fenómenos que pueden tener un efecto en las propiedades de los tubos. El sostiene que las columnas de aire producidas en un instrumento de viento con diferentes materiales que modifican la porosidad y rigidez de la pared, pueden variar la afinación alrededor de 20 cent. Asimismo, la teoría ha demostrado que las paredes de un tubo perfectamente redondo no pueden vibrar suficiente para radiar sonido en el espacio. Cuando tal tubo se modifica ligeramente de forma elíptica, puede excitarse mucho más fuerte por variaciones de presión internas, pero aún así no puede irradiar el sonido en el espacio con la amplitud suficiente para ser oída en presencia de otras fuentes de excitación. Por esto, los cambios del material o el grosor de las paredes no pueden cambiar el sonido de un instrumento en la medida en que esto depende de la radiación por las paredes.

Siguiendo con este célebre acústico, según su teoría, la vibración de las paredes de instrumento de viento a veces puede influir en el comportamiento del instrumento de forma considerablemente por una razón diferente. Igual que las vibraciones del piano pueden cambiar las frecuencias naturales de los modos de la cuerda, las vibraciones de la pared también pueden modificar las frecuencias de la columna de aire. En efecto, la columna de aire aumenta de tamaño en los puntos de vibración grande de la pared si la frecuencia natural de la pared está por encima del modo de aire que lo conduce, y disminuye cuando esta relación de frecuencia es invertida.

Por otra parte, mantiene que el fenómeno de la humectación que se produce en los orificios tonales tiene una gran influencia en el resultado tímbrico. Asimismo, la turbulencia que se producen los rebordes en el tubo del instrumento también afecta al comportamiento de la columna vibrante. Lo explica en los siguientes términos:

“En los instrumentos de viento, la humectación de la vibración proporcionada por la fricción del aire en las paredes, los efectos sobre la oscilación de la temperatura, la porosidad, etc., tienen menos influencia que la humectación producida por los orificios tonales cuando el sonido se radia al espacio. Como el clarinetista y su caña deben mantener una oscilación en la columna de aire, está claro que la parte principal de su esfuerzo físico está dedicada a la alimentación de energía acústica directamente a las paredes de su instrumento. Dado que materiales diferentes producen variaciones en la humectación, es lógico preguntarse sobre la magnitud de este efecto.”

“La turbulencia que produce el aire que vibra es otro fenómeno que puede hallarse bajo la influencia de la naturaleza del material de la pared del tubo, aunque la relación sea indirecta, ya que esto depende de la capacidad del material para mantener un borde agudo. La presencia de bordes agudos provoca en la presión de sopleo una turbulencia más abajo que lo que lo haría en ausencia de tales bordes.” (Benade, 1976)

Desde 1958 se han llevado a cabo varios estudios sobre las posibles diferencias en la humectación usando en las paredes del tubo diferentes materiales como el cobre, la plata, el níquel o distintas clases de madera. Estos estudios han concluido que si las paredes son bastante gruesas para no vibrar y además no son porosas sino lisas, el cambio de materiales producirá alteraciones de la humectación que son generalmente menos del dos por ciento, los cuales son reconocidos por la mayor parte de los músicos.

En un artículo Backus (1963) demostraba la influencia de las vibraciones de la pared sobre la calidad del sonido. En su experimentación, las paredes de un clarinete vibran con una amplitud de aproximadamente 1 μm , pero la radiación de las paredes debido a esta vibración está por debajo de 40 dB de la señal del aire. Por otra parte, algunas medidas experimentales realizadas recientemente han confirmado que las vibraciones producidas por los clarinetes y las flautas son de tipo flexural, con amplitudes en la gama de 1 μm . Sin embargo, Coltman (1971) en sus experimentos no encontró ningún efecto del material sobre la calidad del tono de la flauta.

Asimismo, en unos experimentos realizados por un constructor de saxofones, se pudo comprobar que estos instrumentos afectaban ciertos problemas para emitir sonidos cuando se les modificaba la campana en el proceso de producción, supuestamente debido a las vibraciones de la pared. Fletcher (1996) aporta una explicación al respecto arguyendo que *estos fenómenos pueden ser estudiados determinando las propiedades acústicas del tubo como una función de la amplitud de vibración de la pared, que debe ser ajustada artificialmente por una excitación externa.*

No queda, por tanto, bien definida la influencia de este elemento sobre la calidad del tono, aunque es evidente que las vibraciones de la pared pueden excitarse por presiones internas ya que el tubo del clarinete no es un cilindro exacto.

9.3 RADIACION SONORA EN TUBOS

Hasta ahora hemos analizado el proceso de producción sonora que acontece en el interior del tubo de nuestro instrumento y cómo se propaga en él hacia el exterior. Es menester en este punto tratar el comportamiento del sonido cuando es expulsado al exterior.

Sabemos que las fuerzas de los parciales medidos dentro de la cavidad de la boquilla tienden a emparejar las alturas de los picos de resonancia correspondientes. Por

otra parte, debido a la salida del sonido de alta frecuencia por los orificios tonales abiertos, la altura de los picos de resonancia por encima de la frecuencia de corte se reducen, al contrario de lo que sucedería si el tubo no tuviese orificios tonales abiertos. Todo lo cual implica la existencia de una frecuencia de corte que determina un espectro interno que tiene los parciales superiores cada vez más débiles⁶⁵, dado que solo una pequeña cantidad de sonido producido puede exceder la frecuencia de corte (Benade, 1976).

Para calcular la radiación sonora de los instrumentos de viento es preciso obtener la función de transformación entre el espectro de energía sonora dentro del tubo y el total de energía sonora irradiada al exterior. Esta transformación es simplemente proporcional al comportamiento de R -radiación- como una función de frecuencia, para que, en una buena aproximación, esto se eleve como la frecuencia, es decir 6 dB por octava, debajo de la frecuencia de corte. Por encima de esta frecuencia, la transformación es independiente de la frecuencia. Esta observación envía toda la energía al total del sonido irradiado y descuida los efectos direccionales que tienden a concentrar las frecuencias más altas en ángulos cerca del eje de tubo (Olson, (1967).

Benade midió el espectro exterior en un instrumento y observó que los parciales superiores no se debilitan como sucede en el interior del tubo debido a que la eficacia del instrumento para la radiación de las altas frecuencias aumenta el triple con respecto al sonido debilitado interno.

El efecto de esta función de transformación puede ser resumido en dos ecuaciones que muestran la relación de las amplitudes de presión medidas internamente, p_1, p_2, \dots , y las amplitudes de los mismos parciales medidos en el exterior del tubo. Las dos ecuaciones se aplican a todo los parciales de los instrumentos cónicos y a los impares de un clarinete:

$$\begin{aligned} \text{Para componentes por debajo de la frecuencia de corte: } P_n(\text{externa}) &= np_1(\text{interna}) \times K \\ \text{Para componentes por encima de la frecuencia de corte: } P_n(\text{externa}) &= (f/f_c)Kp_n(\text{interna}) \end{aligned}$$

Donde K es una pequeña constante numérica, f_c es la frecuencia de corte y f_1 es la frecuencia del componente del tono fundamental emitido. Esta función podría ser descrita también diciendo que la filtración producida por un juego de orificios tonales abiertos se inicia con un aumento triple de 6 dB por octava hasta la f_c , por encima de la cual la transmisión se torna plana.

Las características direccionales de radiación de los instrumentos de viento madera son más complejas que las de los instrumentos de metal porque a la radiación producida por la campana se suma la que se lleva a cabo en los orificios tonales abiertos. Olson explica este fenómeno del siguiente modo:

“Para armónicos con frecuencias debajo de la frecuencia de corte del enrejado -aproximadamente 1500 Hz para oboes, fagotes y clarinetes-, la radiación se produce desde el principio en los dos primeros orificios tonales abiertos, y por tanto se puede considerar casi isotrópica. Pero para armónicos por encima de esta frecuencia de corte, el sonido se propaga a lo largo del tubo y es irradiado por la campana abierta y los agujeros de tono abiertos. De esta forma, la radiación de los agujeros tonales se combina para dar un rayo cónico alrededor del eje del instrumento y la radiación de la campana también se concentra a lo largo de este eje. El resultado total es por lo tanto que el tono producido es

⁶⁵ Obsérvese los espectros de la parte experimental del estudio para ilustrar esta cuestión.

más brillante a lo largo del eje del instrumento que en otras direcciones, al menos en condiciones anecóicas. Como esta radicación es pequeña, cada orificio abierto actúa como una fuente isotrópica. La fase de cada fuente viene determinada por la onda estacionaria interna, y estos agujeros deben por lo tanto estar exactamente 180 ° desfasados, con las posiciones de cambio de signo separadas hacia la mitad de una longitud de onda para el armónico afectado. La amplitud de la fuente puede variar irregularmente de un agujero al siguiente, según la forma del modo de onda estacionaria. Para las fundamentales del registro grave, las fuentes de todos los orificios están en fase. La intensidad de radiación será entonces la más amplia en dirección perpendicular al eje del instrumento y considerablemente reducida en la dirección del eje. Para los tonos del segundo registro, o para los armónico superiores de los tonos graves, es necesario considerar el hecho que los grupos diferentes de fuentes de los orificios tonales se hallan en oposición de fase. Como el diámetro de los agujeros es pequeño en relación con el del tubo, sus posiciones ideales se modifican y el resultado debe generalmente concentrar la intensidad irradiada en una cavidad cónica.” (Olson, 1967)

La radiación de un instrumento puede diferir considerablemente, según la posición del oyente o del micrófono, si el ambiente es casi anecóico. Por suerte, los ambientes donde más escuchamos tienen superficies reflectantes cerca del instrumento y un campo difuso y reverberante moderadamente fuerte. En estas circunstancias, la calidad sonora que escuchamos está bastante cerca del equilibrio espectral del total de energía irradiada, a condición de que el oyente esté en una distancia razonable del instrumento.

9.4 RESONANCIA EN LOS TUBOS

El fenómeno de la resonancia de un cuerpo consiste en la interacción de dos elementos, la lengüeta y el tubo del instrumento. Efectivamente, es la lengüeta la que activa el proceso sonoro al producir varios armónicos con una frecuencia determinada. La oscilación producida se comunica con la columna aérea contenida en el tubo dando lugar a unos determinados modelos resonantes que dependerán de la velocidad del sonido en el aire así como de su longitud y geometría.

Definíamos resonancia como el fenómeno que acontece cuando un cuerpo experimenta una excitación cuya frecuencia natural es análoga a la suya. Las vibraciones resultantes se conocen también con el nombre de vibraciones por simpatía. A este respecto Volbach sostiene que la frecuencia de la columna de aire debe imponerse al de la lengüeta:

“...Si escogemos, en cambio, una de materia flexible⁶⁶ sucederá al revés, es decir, en el conflicto entre los dos ritmos, el ritmo de la lengüeta y el de la columna de aire encerrada en el tubo, irá ganando dominio el de la última. Se trata únicamente de que logremos hallar una lengüeta de tales condiciones que su ritmo vibratorio propio resulte despreciable frente al de la columna de aire (1)⁶⁷. En la práctica ha sido hallada ya en el corte de caña (calamus) muy adelgazado por uno de sus extremos una lengüeta de tales condiciones.” (Volbach, 1928)

⁶⁶ Refiérese a la lengüeta.

⁶⁷ Es este un problema análogo al de la construcción de membranas para auriculares de teléfono, que han de vibrar según la frecuencia de la palabra hablada.

Parece claro que, según Volbach, que entre ambas frecuencias naturales, la de la columna aérea se suele imponer a la de la lengüeta, y para ello es indispensable que el diseño y morfología de ésta así lo posibilite. De forma diferente pero con similar significado arguye Tirso de Olazábal en los siguientes términos:

“Se dice que un cuerpo realiza oscilaciones forzadas cuando oscila con un período que difiere de su período natural de oscilación, bajo el influjo de una fuerza periódica exterior de intensidad suficiente, la que le comunica su propio período de oscilación. La amplitud de las oscilaciones forzadas es proporcional a la fuerza excitante, siendo su frecuencia igual a la de dicha fuerza. Entre las oscilaciones forzadas y la fuerza excitante existe siempre cierto atraso de fase. Las oscilaciones forzadas cesan al cesar la fuerza excitante.” (De Olazábal, 1954)

Por tanto, la frecuencia de ambas se alinean, dado que la fuerza excitante le comunica su período de oscilación a la columna gaseosa. Otra cuestión será la intensidad de la fuerza excitante que deberá ser mayor en el caso de las oscilaciones forzadas, o bien la frecuencia de la columna aérea que determine la longitud del tubo.

Las oscilaciones forzadas es un fenómeno similar al de la resonancia, a la que Tirso de Olazábal (1954) define como *la vibración resultante de un cuerpo que es excitado por una fuerza periódica de frecuencia natural*⁶⁸, igual o semejante a la suya. La frecuencia de vibración del cuerpo será la misma que la de la fuerza excitante dado que aquélla siempre se impone a ésta.

R. Donington también hace referencia a este fenómeno en los términos que siguen:

“Al contrario que la cuerda, cuyas vibraciones condicionan la altura, los dos procedimientos para producir la vibración en los instrumentos de viento tienen en común que, lejos de imponer sus propias frecuencias, se someten sustancialmente a las frecuencias impuestas por la columna de aire.” (Donington, 1986)

Donington se refiere a la capacidad de alterar la frecuencia que tiene la columna gaseosa. Mientras que la frecuencia de la lengüeta solo es posible alterarla con un incremento de la presión de soplo, la de aquélla está sometida a las diferentes longitudes acústicas que permite el tubo y, por tanto, está continuamente modificándose.

En cualquier caso ambos cuerpos deben vibrar con una frecuencia común. La vibración será más o menos intensa, en función de la perturbación recibida, pero la frecuencia de cada uno de ellos será invariable.

La resonancia puede llevarse a cabo de forma desigual en función de la frecuencia del cuerpo excitante y del amortiguamiento que sufra las vibraciones. En relación con el primer factor, si esta frecuencia natural es igual o casi igual a la del cuerpo, éste responde marcadamente y la resonancia diferente a la frecuencia natural del cuerpo, la respuesta de éste es débil y la resonancia producida resultante se dice que es *aguda*. Por el contrario, cuando la frecuencia del primero difiere, se conoce con el nombre de *amplia*. En el caso del clarinete estaríamos hablando del primer supuesto, dado que la columna gaseosa impone su frecuencia a la de lengüeta y por tanto vibran a la misma frecuencia.

⁶⁸ Recuérdese que todo cuerpo capaz de vibrar, lo hace siempre con la misma frecuencia -véase apartado 5.6-.

Pero, en ocasiones, cuando la caña no tiene la humectación suficiente, es posible que vibre a su frecuencia natural y surja así el rechinar que tantos problemas causa al clarinetista.

Los tubos por sí solos no son capaces de producir señales sonoras definidas, dependen de un agente excitador que active su funcionamiento acústico. Su función, pues, se limita a servir de caja resonadora para las diferentes columnas aéreas, determinando asimismo la altura del sonido resultante. La función resonadora se lleva a cabo porque se evita o prolonga el amortiguamiento de las vibraciones al ser difundidas en su interior. Este fenómeno de resistencia al movimiento oscilatorio se conoce con el nombre de *impedancia*⁶⁹, y es el segundo factor que determina la resonancia.

Esta función acústica del tubo del clarinete favorece la homogenización del timbre de los sonidos en sus diferentes registros, amén de servir de corrector de la afinación. En este sentido, los sonidos más ricos desde el punto de vista del timbre y la afinación suelen corresponder a aquellos que más tubo emplean dado que en éstos la resonancia se amplifica. Por su parte, aquellos sonidos cuya longitud de tubo operativo es mínima, adolecen problemas de aquélla índole. Pensemos que la resonancia en estos últimos sonidos surge en un tramo corto de tubo y por lo tanto los componentes armónicos configuradores del timbre no pueden hacer acto de presencia del mismo modo que lo harían con un tubo relativamente largo.

Obviamente este es un problema que se da en el tramo quintante y, en general, en cualquier sonido que utilice poco tubo operativo para su producción. Los instrumentistas conocen este problema y saben cómo solventarlo. La solución pasa por prolongar artificialmente el tubo obturando determinados orificios para que la resonancia se amplifique.

9.5 MECANICA VIBRACIONAL DE LOS TUBOS

Las vibraciones de las columnas de aire contenidas en el interior de los tubos son la fuente sonora en los instrumentos denominados aerófonos. La vibración del sonido en este caso es longitudinal y, tal y como habíamos analizado anteriormente, constituye la matriz de la onda estacionaria. Por consiguiente, estas columnas en su proceso vibratorio presentan nodos, zonas de vibración nula, y, equidistantes, vientres donde la vibración es variable.

Esas columnas gaseosas pueden vibrar con toda su longitud o bien, si la corriente de excitación tiene suficiente intensidad, en subdivisiones iguales. En el primero de los casos el sonido resultante constituye la fundamental o primer armónico, mientras que en el segundo caso los sonidos derivados se denominan armónicos o parciales superiores, en función de la subdivisión que se practique: en mitades, el segundo armónico; en tercios, el tercer armónico, etc.

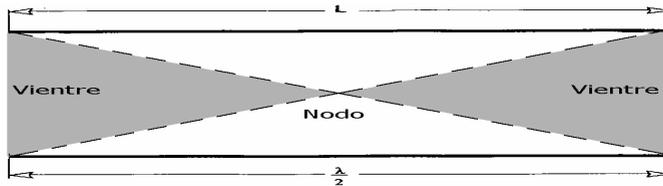
La vibración de la columna gaseosa en un tubo difiere según sea este abierto o cerrado. En los tubos abiertos -en la flauta-, dado que sus extremos abiertos favorecen la oscilación, la onda estacionaria resultante de las ondas longitudinales que operan en el

⁶⁹ Se analiza este fenómeno en el apartado 6.3.

interior del tubo como consecuencia del fenómeno reflexivo proporciona un vientre en cada extremo, con lo cual la formación de armónico será de tipo simétrico. Veámoslo detenidamente. Consideremos que se insufla una corriente de aire en el extremo superior del tubo. Esta corriente genera una presión en la columna de aire contenida en el interior del tubo que avanza en forma de onda compresiva. Al llegar al extremo opuesto, si éste se halla abierto la onda origina una succión al ser expulsada al exterior, lo cual se traduce en una onda expansiva que vuelve al extremo superior. Al llegar a éste aspira la corriente excitadora que vuelve a penetrar en el tubo, con lo cual se completa un ciclo y se inicia otro.

En este supuesto la onda recorre dos longitudes de tubo, de ahí que la longitud de onda corresponda a dos veces la longitud de tubo. De este modo, la vibración más larga posible en estos tubos, es aquella que requiere un vientre en cada extremo y un único nodo en el centro (Fig. 9.1). Esta vibración nos proporciona el sonido fundamental con una longitud de onda que corresponde a dos veces la longitud del tubo. Para obtener la frecuencia del sonido producido basta con relacionar la velocidad de propagación de la onda con la longitud de onda mediante una sencilla ecuación matemática. Sabiendo que la distancia entre los nodos o vientres sucesivos es igual a semilongitud de onda ($\lambda/2$) ya que la frecuencia es igual a la velocidad dividida por la longitud de onda ($f = c/\lambda$), tendremos que $\lambda = 2L$, y consecuentemente la frecuencia de la fundamental será $f_1 = c/2L$

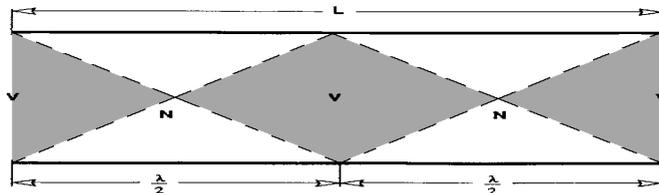
Fig. 9.1 Forma de la onda estacionaria en un tubo abierto emitiendo el sonido fundamental



La siguiente vibración se lleva a cabo disponiendo en el interior del tubo tres vientres y dos nodos (Fig. 9.2). Así sobreviene el segundo armónico, a la octava de la fundamental cuya longitud de onda será la mitad que la fundamental. Dado que entre cada dos vientres consecutivos existe una semilongitud de onda, la longitud del tubo será $L = 2\lambda/2$, luego $\lambda = 2L/2$. Entonces, la frecuencia (f_2) del segundo armónico será:

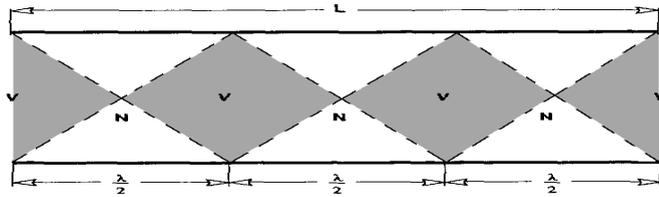
$$f_2 = \frac{c}{\lambda/2} = \frac{2c}{\lambda} = 2f_1, \text{ es decir, el doble de la frecuencia fundamental.}$$

Fig. 9.2 Forma de la onda estacionaria en un tubo abierto emitiendo su segundo armónico



La próxima vibración dividirá la longitud de onda en un tercio de la primera, ofreciendo cuatro vientres y tres nodos (Fig. 9.3), produciéndose así el tercer armónico, a la doceava de la fundamental. Su frecuencia, aplicando la fórmula básica $f = c/\lambda$, será de $f_3 = 3f_1$, el triple de la fundamental.

Fig. 9.3 Forma de la onda estacionaria en un tubo abierto emitiendo su tercer armónico



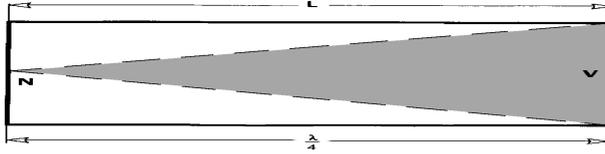
Procediendo con esta operación se obtienen teóricamente todos los sonidos parciales o armónicos de un determinado sonido fundamental, con frecuencias $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$... En la práctica la obtención de la serie armónica completa dependerá también de otros factores como son los formantes del tubo y las resonancias naturales del sonido fundamental. Estos tubos son los que utilizan la flauta, el oboe y el fagot o, dicho de otro modo, el funcionamiento de los tubos de estos instrumentos.

Procedamos ahora a analizar la mecánica vibratoria de los tubos cerrados. El procedimiento en este supuesto es análogo al analizado en los tubos abiertos, pero solo hasta que la onda llega al extremo donde se ubica la embocadura. En efecto, si este extremo se halla cerrado por las causas que fueren, la onda se reflejará de nuevo con un cambio de fase de 180° , y deberá repetir el ciclo realizado. Así, al llegar de nuevo al extremo abierto, de nuevo se producirá el mismo fenómeno que aconteció con la primera onda depresiva, esto es, será succionada y, por reflexión, se formará una nueva onda expansiva que al llegar al extremo opuesto desviará la corriente incidente, pero esta vez hacia el interior del tubo. En este momento las condiciones iniciales quedarán restablecidas y se habrá completado el ciclo. Por consiguiente, en este tipo de tubos los desplazamientos de la onda se doblan en relación con los abiertos.

En este supuesto, el extremo que actúa como cerrado, donde se ubica la boquilla con la lengüeta, debe constituir siempre un nodo y el extremo abierto, esto es, el pabellón u orificio en uso, un vientre. En consecuencia, el sonido fundamental o primer armónico, sobreviene cuando la interferencia de la onda longitudinal y su refleja ofrecen un nodo próximo a la lengüeta y un vientre con amplitud creciente desde aquel hasta el extremo del pabellón (Fig. 9.4). Pues bien, con esta disposición de las ondas obtenemos la mayor longitud de onda completa en estos tubos, que es la que corresponde al sonido fundamental más grave. Dado que una semilongitud de onda ($\lambda/2$) es la distancia entre dos nodos o vientres consecutivos, la distancia entre un nodo y un vientre equivaldrá a $\lambda/4$, por tanto, la longitud de onda será cuatro veces la longitud del tubo. Aplicando la fórmula que relaciona frecuencia, velocidad y longitud de onda, su frecuencia será: $f_1 = c/\lambda = c/4L$. Para obtener

la longitud de onda bastará con dividir la velocidad de propagación del sonido por la frecuencia: $\lambda = c/f$

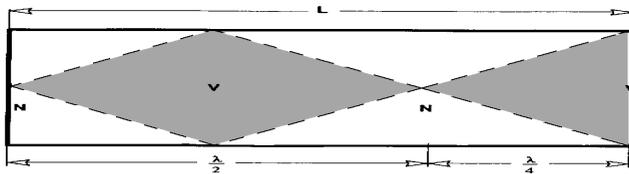
Fig. 9.4 Forma de la onda estacionaria en un tubo cerrado emitiendo el sonido fundamental



La siguiente vibración posible requiere dos nodos y dos vientres (Fig. 9.5). Puesto que en el extremo cerrado, la boquilla, siempre debe haber un nodo, la disposición de las ondas elimina los armónicos pares y solo favorece los impares, esto es, no existen los armónicos pares al estar ausente la mitad de la longitud de onda completa que sería la que promocionaría el segundo armónico. De conformidad con esta norma, el segundo armónico en los tubos cerrados -en el tubo del clarinete- será el tercero de la serie armónica de la fundamental, es decir, la doceava. Su longitud de onda será la suma de $\lambda/2$ y $\lambda/4$, esto es, $3\lambda/4$. De este modo, si $3\lambda/4 = L$, $\lambda = 4L/3$. La frecuencia, pues, del segundo parcial será:

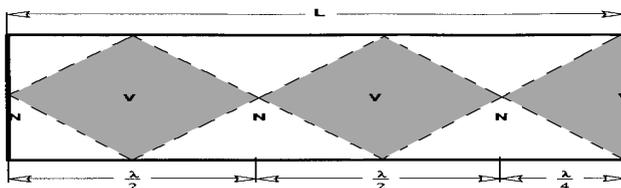
$$f_2 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4L/3} = \frac{3c}{4L}, \text{ luego } f_2 = 3f_1, \text{ es decir, tres veces la frecuencia fundamental.}$$

Fig. 9.5 Forma de la onda estacionaria en un tubo cerrado emitiendo su segundo armónico



El tercer armónico, que en realidad será el quinto de la serie armónica de la fundamental, proporciona tres nodos y tres vientres (Fig. 9.6). La longitud de onda será: $\lambda = 4L/5$; y su frecuencia: $f_3 = 5f_1$

Fig. 9.6 Forma de la onda estacionaria en un tubo cerrado emitiendo su tercer armónico



Procediendo del mismo modo obtendremos todos los parciales superiores de orden impar de la serie armónica.

Bien, pues este es sustancialmente el comportamiento teórico del tubo del clarinete desde el punto de vista de la génesis y obtención de sus sonidos. Actúa como un tubo cerrado desde el punto de vista físico-acústico, pero no de forma uniforme, puesto que también produce algunos armónicos pares como se puede observar en los espectrogramas de los sonidos analizados en la parte experimental del estudio, y estos son inadmisibles en los tubos cerrados.

Hemos analizado el comportamiento de las ondas en un tubo *cilíndrico*, ya sea abierto o cerrado, pero la mecánica vibracional difiere cuando se trata de un tubo *cónico* -el oboe, el saxofón o el fagot representan este tipo de tubos-. Efectivamente, el cono tiene una solución esférica y se expresa en términos de armónicos de tipo esférico, mientras que el cilindro tiene una solución de onda plana y se expresa en términos de coseno y seno. Así, cuando el sonido se propaga fuera de forma esférica simétrica, su intensidad decrece como $1/r^2$, porque se extiende fuera a través del área de una esfera que es proporcional al r^2 . Esta es la razón por la que los sonidos pierden intensidad cuando se alejan. Cuando se dobla la distancia, la energía sonora se extiende por encima de cuatro veces tanta área, así que la energía que entra en nuestro oído es cuatro veces menor. En este supuesto, la intensidad de una onda sonora es proporcional al cuadrado de la amplitud -presión o velocidad- y, así, la presión y velocidad son proporcionales a $1/r$. Por otro lado, una onda que viaja en un cilindro de sección constante es una onda plana. Si despreciamos las pérdidas pequeñas de energía, su amplitud es constante a lo largo de todo el cilindro (Wolfe, 2002).

De modo que la onda sonora en una flauta o un clarinete debe entenderse en términos de sen o cos -no cambia la amplitud-, pero para los saxofones, oboes y fagotes, debe considerarse un factor $1/r$ para el área cruzada que va como el cuadrado de la distancia de la caña.

Veamos ahora la vibración fundamental de los tubos aplicándola a la flauta, al clarinete y al oboe o al saxofón (Fig. 9.7), de acuerdo con el anterior planteamiento de Wolfe.

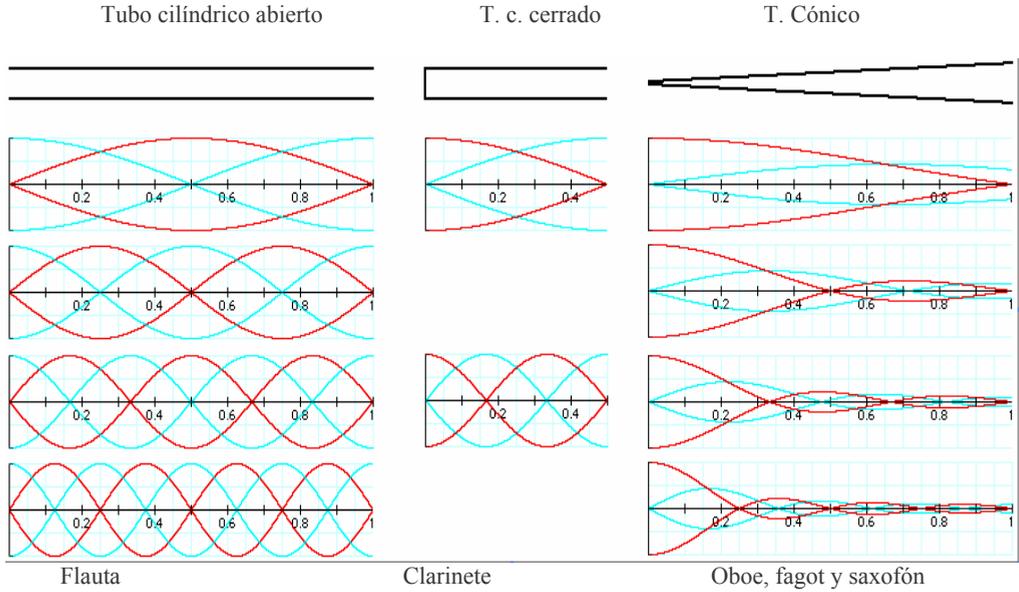
En la flauta el tubo se abre a la atmósfera en ambos extremos, así que la presión ahí es atmosférica, y la presión sonora, por tanto, está cerca del cero. Así, para la flauta se tiene un cero de presión -presión nula- a ambos extremos, y eso se calcula por ondas de seno con una longitud de onda $2L/n$, donde L es la longitud del instrumento y n es un número entero. En la práctica, el extremo del instrumento no es un nodo real, y la longitud eficaz es más larga que L , aproximadamente 0.6.

En el clarinete, se tiene un cero en el extremo abierto -la campana-, y un máximo en la caña. Esto se calcula por ondas del coseno con una longitud de onda $4L/n$, donde L es la longitud del instrumento y n es un número entero impar.

Para los tubos cónicos como el del oboe o saxofón, también se tiene, al igual que en la flauta, una presión cero en la campana y un máximo en la caña, pero las ondas se deben colocar de la forma sen $(1/r)$ y cos $(1/r)$. La onda del seno tendrá una longitud de onda de $2L/n$, donde L es la longitud del instrumento y n es un entero. El seno debe estar en el cero a $r = L$, y tendrá un máximo en la caña. El sonido fundamental tiene, por tanto, el mismo armónico y la misma longitud de onda que un cilindro abierto de la misma longitud.

La consecuencia más directa de estas diferencias es que la flauta y el oboe -aproximadamente la misma longitud- emiten sonidos graves similares mientras que el clarinete -también aproximadamente la misma longitud- toca casi una octava baja.

Fig. 9.7 Modos de resonancia de los tres tipos de tubo



Se observa en el gráfico que un nodo y un vientre de presión siempre se corresponde con un nodo y un vientre de desplazamiento.

Del análisis de las vibraciones de los tubos se pueden extraer varias leyes que enunció el matemático suizo J. I. Bernoulli basándose en las expresiones de la frecuencia de la onda producida en un tubo, a saber:

$$\text{En un tubo abierto: } f_n = \frac{cn}{2L}$$

$$\text{En un tubo cerrado: } f_n = (2n-1) \frac{c}{4L}$$

Pues bien, dichas leyes deducidas de lo anteriormente analizado se enuncian del siguiente modo:

1. La frecuencia del sonido fundamental producido por un tubo es inversamente proporcional a la longitud del tubo. Por ende, a mayor longitud del tubo, más grave será la frecuencia del sonido producido. En este sentido, si la longitud de un tubo es la mitad o el doble que la de otro, el sonido producido corresponderá a su octava aguda o grave respectivamente.
2. La frecuencia del sonido fundamental producido es directamente proporcional a la velocidad de propagación, esto es, se debe aumentar la velocidad de propagación de la onda para producir los armónicos.
3. Un tubo cerrado emite un sonido fundamental que corresponde a la octava grave del sonido fundamental producido por un tubo abierto de la misma longitud.
4. Los tubos abiertos producen la serie completa de armónicos, mientras que los cerrados sólo los armónicos de frecuencia impar de la fundamental, lo cual tiene sus implicaciones en el resultado tímbrico de ambos tubos.

Finalmente debemos considerar que la columna de aire que vibra dentro de los tubos excede siempre los extremos de dicho tubo por las razones ya analizadas en apartados anteriores. Es decir, que la longitud real o efectiva de la columna aérea es mayor que la longitud física del tubo. Para solucionar esta cuestión siempre se añade una longitud, denominada de corrección, que dependerá del radio y del tipo de tubo, así como de la frecuencia -a frecuencias altas la onda se refleja más allá del último orificio abierto-.

En este sentido la longitud operativa -efectiva- de un tubo abierto (L_o) será igual a su longitud física (L_f) menos una cantidad aproximada estimada en $3,3r$, es decir,

$$L_e = L_f - 3,3r$$

Para un tubo cerrado -el tubo del clarinete- la corrección será $2,7$ veces el radio del tubo, es decir,

$$L_e = L_f - 2,7r$$

Además hay que tener en cuenta que en los tubos la frecuencia varía en función de la temperatura (Tabla 9.1), de forma que cuando ésta asciende, aumenta la velocidad de propagación y, consecuentemente, la frecuencia. Además, a medida que se incrementa la frecuencia, la corrección aumenta.

Tabla 9.1 Relación de la velocidad del sonido con la temperatura

TEMPERATURA (grados centígrados)	VELOCIDAD (m/sg.)
-20	319
-10	326
0	332
10	338
20	344
30	350
40	356

9.6 SISTEMAS ACUSTICOS ACOPLADOS EN LOS INSTRUMENTOS DE VIENTO MADERA

En general, el sonido se produce y sostiene en cualquier instrumento de viento gracias a la cooperación entre dos elementos distintos pero interconectados: la cavidad del instrumento -el tubo en los instrumentos de viento- que contiene el aire que produce la resonancia y el dispositivo generador -la caña y la boquilla de un clarinete- de la onda sonora. Ambos elementos constituyen el sistema acústico de cualquier instrumento de viento madera.

Ya hemos enunciado anteriormente que el principio acústico en el instrumento que nos ocupa es la vibración de las columnas de aire contenida en su tubo. Así como en las cuerdas su vibración condiciona la altura del sonido, en los tubos los sistemas para producir la vibración someten sus frecuencias a las producidas por la columna de aire, cuya longitud determina la altura de esas frecuencias.

Dos son los sistemas o métodos empleados para poner en funcionamiento la vibración de las columnas: *el tono de corte* y *el tono de lengüeta*.

El primer procedimiento se basa en pequeñas vibraciones o remolinos de aire que excitan el tono de corte. Se llama tono de corte porque la altura del sonido se obtiene dividiendo la corriente de aire que se insufla al instrumento mediante una hendidura o abertura biselada que se halla dispuesta en la embocadura. Los remolinos se forman debido al choque que se produce por la corriente de aire en la arista de la abertura. De esta forma se excita el tono de corte el cual a su vez provoca la vibración por simpatía de la columna aérea del tubo dado que la frecuencia natural de ambos cuerpos es coincidente.

La altura del *tono de corte* se altera variando la presión de choque de la corriente de aire. En efecto, dado que el aire pierde energía cuando tiene que vencer una resistencia, el tono de corte puede descender si se aleja la arista del extremo del instrumento y se aumenta la fricción, disminuyendo así la frecuencia de los remolinos, o bien reduciendo la presión del aire soplando más suavemente. Pero si se incrementa la presión y la velocidad del aire, reduciendo la distancia entre los labios del instrumentista y la abertura del instrumento, estos remolinos se rompen en dos y el tono de corte salta entonces al segundo armónico, esto es, la octava más aguda, doblándose así la frecuencia. Aumentando la presión de sople es posible que el remolino se rompa en tres mitades y sobrevenga el tercer armónico a la doceava, triplicando la frecuencia de la fundamental de referencia. Con este procedimiento se pueden obtener un corto número de armónicos que utiliza la flauta para constituir su escala. Huelga decir que el método descrito precisa de la habilidad del ejecutante para garantizar el éxito.

El segundo sistema, utilizado por el clarinete y por los restantes instrumentos de lengüeta, es el denominado *tono de lengüeta*, llamado así porque es este elemento el encargado de poner en funcionamiento el proceso sonoro. El tono de lengüeta se obtiene mediante la interacción de esta pieza y el tubo al que va asociado. El método es el siguiente: la lengüeta posee su propia frecuencia natural similar a la del tubo, por lo que las vibraciones de aquella generan una fuerza excitante que es comunicada a la columna gaseosa del tubo excitándola. Para ello, antes de penetrar en el tubo, la corriente de aire insuflada por el instrumentista debe superar una resistencia inicial que le opone la lengüeta. Debido a la presión que le imprime y a su cualidad elástica, la lengüeta se desplaza ligeramente abriendo la abertura de penetración para de nuevo cerrarse por la fuerza de

elasticidad recuperadora. La acción se torna periódica por la reiteración de impulsos con lo cual se genera una vibración susceptible de excitar la columna gaseosa contenida en el tubo la cual vibrará por simpatía con aquella, funcionando el tubo como un resonador acústico.

La vibración de las columnas de aire en los instrumentos de aire depende de su forma de excitación, pero fundamentalmente de su forma interior y de las aberturas que posea. Su longitud queda determinada según la fórmula básica por la cual la longitud de onda es igual a cuatro veces la distancia existente entre un nodo y un vientre. Por consiguiente, la forma del tubo y sus aberturas determinarán la altura fundamental. Recuérdese a propósito de esta cuestión que con una abertura en cada extremo el tubo se considera abierto y la vibración de la columna posibilita todos los armónicos, mientras que un tubo con una abertura se considera cerrado y la vibración de su columna aérea solo promociona los armónicos impares. Pues, en función de esta característica, se pueden obtener el sonido fundamental y un número determinado de armónicos que configuran la extensión del instrumento.

A diferencia del tono de corte, el tono de lengüeta es una fuente rica en armónicos pues la acción vibrante de ésta asociada a un resonador acústico de frecuencia semejante así lo posibilita.

Cabe decir que la altura de los sonidos producidos por un instrumento de viento depende, en primer lugar, de la longitud gaseosa que se halla operando en el interior del tubo. En segundo lugar, entran en juego una serie de factores adicionales como son la temperatura del aire vibrante, la densidad, etc.

Por su parte la intensidad de esos sonidos dependerá de la fuerza con la que se excita la columna de aire, mientras que el timbre dependerá, en primer lugar, del modo de excitación y, en segundo lugar, de la forma interna del tubo y de otros factores secundarios que serán objeto de estudio en el Capítulo 17.

***IV. ANALISIS ACUSTICO EXPERIMENTAL
DEL CLARINETE***

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA EL ANALISIS DE LOS SONIDOS DEL CLARINETE



Trio para Clarinete o Viola, Violoncello y Piano, Op. 11. Beethoven (1770-1827)

10.1 METODOLOGIA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

Al objeto de desarrollar esta parte del estudio, se ha establecido un método de trabajo para obtener información relativa a los sonidos objeto de análisis para su ulterior estudio. Este método se ha estructurado en tres fases: en la primera fase se ha procedido a la medición y registro de las muestras objeto de estudio; en una segunda fase se ha abordado el análisis acústico mediante el uso de varios parámetros e indicadores para obtener y estudiar las magnitudes y características técnicas y acústicas de cada sonido; por último, en la tercera fase se analizan y discuten los resultados obtenidos, buscando aplicaciones de interés musical. Los resultados obtenidos han permitido estudiar el timbre, la afinación, así como ciertos elementos del sistema acústico del clarinete, con el fin de optimizar sus prestaciones en la ejecución musical.

Dado que se van a analizar muestras acústicas, la cámara anecoica⁷⁰ del Departamento de Física Aplicada de la Universidad Politécnica de Valencia es el escenario más idóneo para llevar a cabo la primera fase del estudio. Sus particulares condiciones y propiedades acústicas permiten absorber cualquier energía que incide sobre sus paredes recubiertas de un material especial. Así, cualquier fuente energética situada en su interior se comporta como si estuviese en el espacio libre, eliminando, por tanto, la reflexión y la

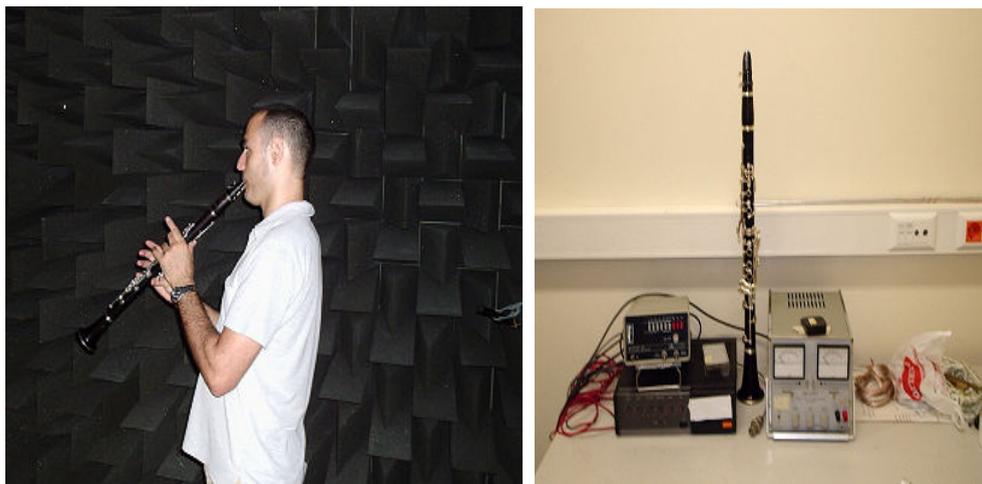
⁷⁰ Véase el Anexo IX.

reverberación sonora. Por consiguiente, los sonidos en ella registrados pueden ser analizados con total precisión y objetividad.

Para las mediciones, se ha utilizado un clarinete en Sib, modelo *Buffet RC* sistema Boehm, una boquilla modelo *B40 profile* de Vandoren, una abrazadera americana modelo *Luyben*, un barrilete modelo *Chadash* de 67 mm y una lengüeta modelo *V12* del número 3 1/2. Se ha optado por elegir estos modelos, en especial el clarinete y la boquilla, por estar su uso totalmente normalizado y generalizado. En efecto, el modelo *RC* y la boquilla *B40* son utilizados universalmente por profesionales y estudiantes de todo el mundo. Con respecto al barrilete, se ha empleado este modelo con esas dimensiones para ajustar la afinación debido a las condiciones atmosféricas en el momento de la medición. Asimismo, se ha elegido el sistema Boehm⁷¹ por las mismas razones aducidas a propósito del modelo de clarinete y boquilla. Para el desarrollo de esta fase se efectuaron las mediciones en varias sesiones.

Al margen de la sala anecoica y el clarinete utilizado con los elementos descritos en el párrafo precedente, el dispositivo técnico empleado para la captura y registro de las muestras ha consistido en un aparato *DAT Tascam* modelo *DA-P1* y micrófonos direccionales *AKG* modelo *C568EB*. Asimismo, el software de análisis y procesamiento utilizado ha sido *COOLEEDIT PRO* para Windows 32 bits.

Figs. 10.1/2 Dispositivo experimental



En una primera sesión se tomaron alrededor de 300 muestras acústicas. Después de una primera selección, se descartaron aproximadamente 30 muestras, quedando en 270 las muestras que comprenden todo el abanico de sonidos que el clarinete puede emitir con ciertas garantías acústicas. Para ello, se ha empleado un complejo sistema de digitaciones,

⁷¹ Consúltese el apartado 13.2 para cualquier aclaración al respecto.

en especial, en el registro sobreagudo donde las posibilidades de emisión de sonidos con diferentes digitaciones son múltiples. Para establecer y definir el mapa de digitaciones empleado, previamente se realizó un estudio práctico con el instrumento, de carácter empírico, y se consultó la bibliografía al respecto. De cada nota se han tomado todas las muestras que más se aproximan a su frecuencia nominal, utilizando las múltiples combinaciones de llaves que el sistema Boehm y la digitación cruzada permiten. Así, se ha tratado de elaborar un mapa de digitaciones lo más completo posible. Es posible emitir algún sonido cuya digitación no la recoja el mapa, mas se ha descartado por su precario resultado tímbrico y frecuencial. Aún más, después de la primera selección, con los resultados experimentales obtenidos de todas las muestras, se han descartado varios sonidos por su bajo rendimiento acústico.

Las muestras se han emitido con una duración aproximada de cuatro segundos y una dinámica de *mezzo forte*.

Posteriormente, en otras sesiones se han medido diversos sonidos de forma aleatoria emitidos con o sin distintos elementos del sistema acústico del clarinete para estudiar sus propiedades acústicas y su incidencia en la afinación y el timbre del instrumento. En concreto, se han medido muestras acústicas emitidas únicamente con la boquilla; sin el pabellón del instrumento; con lengüetas de diferentes durezas -a saber, cañas blandas y duras-; extrayendo gradualmente el barrilete; y, finalmente, en diferentes dinámicas.

La segunda fase, esto es, el análisis propiamente dicho, requiere previamente establecer un procedimiento analítico. A este efecto, se han adoptado los parámetros e indicadores que se han considerado más relevantes para el fin que se persigue: frecuencia teórica y real en hercios, pulsaciones resultantes entre ambas frecuencias, valoración de la afinación, longitud de onda y de tubo real, espectrogramas y componentes armónicos presentes en cada muestra, naturaleza sonora, armónicos válidos como notas de la escala, oscilogramas y, finalmente, recomendaciones generales de uso para la ejecución musical.

Dado el número de parámetros e indicadores que se han estudiado, se ha optado por presentar los resultados experimentales y su análisis por separado en aras de una mejor lectura y comprensión.

El análisis y discusión de los resultados se ha llevado a cabo en la tercera fase, estructurado en los tres registros del instrumento. Finalmente se han aportado las aplicaciones prácticas para la ejecución musical -en los parámetros que ha sido posible- derivadas de los resultados experimentales obtenidos.

Por último, hay que considerar en este estudio que las mediciones efectuadas pueden ser precisas y útiles desde el punto de vista científico, pero desde el punto de vista musical se deben tener ciertas reservas, en especial, con el parámetro de frecuencia. Pensemos que no están realizadas con un mero soplador electrónico, sino con un instrumento musical manipulado por un instrumentista, con lo cual entran en juego otros muchos factores que influyen en el resultado tímbrico y frecuencial, a saber: la presión labial con la que se emite el sonido, la conformación y resonancia bucal del instrumentista, la presión de soplo, las características y naturaleza de la lengüeta, la abrazadera y boquilla del instrumento, la presión diafragmática, los formantes del instrumento, etc. En este sentido, el complejo sonoro y la frecuencia varían sensiblemente en función de estos factores y de otros como son la temperatura y densidad del medio, lo cual tiene su traducción en variaciones tímbricas y de afinación, alterando, por consiguiente, algunos

parámetros relativos a magnitudes físicas. En cualquier caso, este es el método más óptimo para estudiar los sonidos musicales.

10.2 CONSIDERACIONES Y MEDIDAS PRELIMINARES GENERALES

Antes de desarrollar este apartado debemos considerar que en la presente investigación se produce inexorablemente una vinculación entre ciencia y arte. Efectivamente, cada sonido se analiza científicamente, de ahí que todos los parámetros sean objetivables, pero no debemos olvidar que la música como arte comporta ciertas cualidades sensoriales y estéticas. Es por esto por lo que se hace necesario establecer algún parámetro de carácter subjetivo o semiobjetivo que recoja alguna cualidad de este tipo. No olvidemos que si bien podemos considerar un sonido desde el punto de vista científico como un conjunto de magnitudes físicas, desde el punto de vista musical cada uno de estos sonidos tiene entidad y valor propio configurado por una serie de factores inherentes que constituyen la esencia propia de la música. Pensemos que cada uno de estos sonidos puede ser alterado en sus magnitudes físicas por mor de exigencias interpretativas, con lo cual aquellas magnitudes experimentarán alteraciones sensibles que modificarán, a su vez, su analítica. En este sentido, el parámetro de valoración de la afinación y el de recomendaciones generales de uso para la ejecución musical pueden considerarse constitutivos de este tipo de parámetro.

Se puede concluir que ningún sonido es análogo a otro. Aún estando en la misma altura del pentagrama, dos sonidos a priori iguales arrojarán, emitidos por dos intérpretes diferentes, frecuencias ligeramente diferentes y variaciones relativas en sus componentes armónicos que modificarán sensiblemente su timbre. Pero incluso emitidos por el mismo intérprete, sufrirán alguna variación en sus magnitudes fundamentales. Esto, además, sin considerar que cada uno de ellos pueda ser emitido con una digitación diferente, su personal resonancia bucal, un clarinete o boquilla de modelo diferente, abrazadera, caña, etc. todo lo cual aumentaría más si cabe esas diferencias tímbricas y de afinación. Por otra parte, hay que tener en cuenta que la esencia propia del arte la constituye la originalidad y personalidad propia que el intérprete imprime a la obra y a cada uno de sus elementos constitutivos -desde un determinado sonido-, esto es, en el arte no debe haber copias o imitaciones sino que cada obra o, en nuestro caso cada interpretación, debe ser original y personal.

Subyace, empero, una cuestión de vital importancia en la presente investigación, a saber, el establecimiento de una línea imaginaria que separa la ciencia -la acústica física- del arte -la música- y que debemos sortear con sumo cuidado para no confundir al lector. En este sentido, se ha tratado de transitar en un terreno que si bien alberga determinados conceptos y contenidos de acústica física preceptivos para el desarrollo ulterior del estudio, también se cultiva con la esencia propia que emana de la música, lo cual no es óbice para que ambos campos de estudio se interrelacionen y complementen y de ello resulte un cóctel de sabores agridulces. Es por esto por lo que es posible que el lector avezado en cuestiones de física acústica detecte que el estudio experimental adolezca en determinados apartados de cierta rigurosidad en sus contenidos más científicos, pero también puede suceder que el músico demande unos contenidos musicales con más profundidad. Piénsese, en estos casos, en el carácter interdisciplinar del Trabajo para su justificación.

Dicho lo cual se evidencia lo complejo que resulta reducir al análisis el mundo de los sonidos desde el punto de vista físico-musical. Sin embargo, no cabe duda que los resultados de los análisis y sus conclusiones pueden ser muy útiles para comprender muchas cuestiones relativas al funcionamiento de nuestro instrumento que nos ayudarán a conocer mejor este maravilloso y singular instrumento y a optimizar su uso. Además, nos servirán como una herramienta útil para desarrollar nuestra principal función: interpretar los sonidos.

Pues bien, la primera medida preliminar a tener en cuenta atañe a la afinación del instrumento. Al objeto de nivelar en lo posible la afinación, previamente al registro de los sonidos objeto de estudio se dispuso de un tiempo para que el instrumento alcanzara la temperatura idónea, pues se sabe que inicialmente los instrumentos se hallan a una temperatura que puede ser inferior -en invierno- o superior -en verano- a la considerada adecuada para calcular la velocidad del sonido, esto es, 15 °C. La afinación se efectuó con un afinador *Korg*, modelo *DT-3*, a 445 Hz, debido a las extremas condiciones atmosféricas. Aunque estos instrumentos no dan la frecuencia exacta de forma digital, sí se aproximan bastante. Considérese la dificultad que entraña objetivizar este parámetro cuando entran en juego tantos factores aleatorios e imponderables de todo tipo. En cualquier caso, no es tan relevante que este sonido de referencia se halle afinado a 442 o 445 Hz, sino que las frecuencias experimentales se analicen y valoren en su conjunto, esto es, analizar las discrepancias que resultan de un análisis global dado que lo que se persigue es el estudio global de la afinación y el timbre del instrumento para su optimización.

Por otra parte, se ha optado por incluir, además de los espectrogramas de cada muestra, la composición armónica que recoja los componentes que figuran en los espectros de forma digital en aras de una mejor comprensión a la hora de asociarlos con las notas musicales que corresponden a cada serie armónica.

Por lo que respecta a las digitaciones, urge hacer la siguiente consideración que deberemos tener presente a lo largo del presente estudio. En principio se consideran digitaciones básicas las que supuestamente procuran unas mayores prestaciones, estando normalizadas en el uso. Todas las posibles combinaciones o derivaciones que se pueden efectuar en una columna gaseosa entera o fragmentada son posibles gracias al uso de llaves complementarias y a la digitación cruzada. Suelen denominarse digitaciones complementarias que se han ido estandarizando gracias a la experiencia de los instrumentistas. Su uso, por ende, tiene la finalidad de modificar la columna gaseosa generando nuevos puntos de presión y dilatación o coadyuvando a la resonancia de la onda, al efecto de homogeneizar el timbre y nivelar la afinación. La importancia del uso de estas digitaciones es superlativa, puesto que sin su concurso sería cuasi imposible obtener de forma afinada la escala en el clarinete.

El primer y segundo registro del instrumento obtienen sus sonidos con digitaciones consideradas básicas -el segundo manteniendo las mismas digitaciones que el primero y accionando la llave portavoz, con terceros armónicos- y únicamente podemos hablar de digitaciones complementarias en estos registros cuando utilizamos llaves adicionales para subir o bajar la afinación o para modificar el timbre, además de casos puntuales de digitación de horquilla. Sin embargo, en el tercer registro las posibilidades de producir sonidos diferentes son más amplias, dado que está configurado con armónicos de diferentes fundamentales. Por esta razón, las derivaciones mediante digitación cruzada son numerosas y, por tanto, tenemos un gran número de digitaciones complementarias en cada

nota para cada digitación básica que proviene, a su vez, de una digitación básica fundamental.

Hay que tener en cuenta, además, que este asunto que se trata lleva implícito un componente subjetivo ineludible y es que cada intérprete priorizará el uso de estas digitaciones de acuerdo con su criterio y sus preferencias, con lo cual una digitación básica para un intérprete puede ser considerada complementaria para otro o viceversa. Por esta razón, en las recomendaciones de uso se proporciona información relativa al uso que se le da a cada sonido, en función de la digitación utilizada.

Es posible que al término del presente estudio debamos considerar las digitaciones básicas, como así sucede actualmente, como las más comúnmente utilizadas por sus mejores prestaciones acústicas y las complementarias como las relegadas a un uso extraordinario -pasajes rápidos, adornos, etc.-. Pero puede suceder que los resultados de la investigación nos proporcione una información que modifique este planteamiento aceptado universalmente y que, en algunos casos, la digitación complementaria proporcione un mejor rendimiento acústico que la básica. En cualquier caso, el resultado de la investigación nos dará la respuesta.

Se aportan, asimismo, las series armónicas de cada nota en el Anexo IV para su consulta a la hora de asociar los componentes de cada muestra con las notas musicales.

Al efecto de optimizar el espacio al máximo se han utilizado ciertas siglas o abreviaturas en las tablas, que se relacionan a continuación:

- Mst.: Muestras
- Nt.: Notas
- Natur.: Naturalezas
- F_t/F_e : Frecuencia teórica/Frecuencia experimental
- Pulsac.: Pulsaciones
- Valor.: Valoración
- λ : Longitud de onda
- L_r : Longitud de tubo real

A continuación se presenta el mapa de digitaciones empleado para emitir las muestras que constituyen el objeto del análisis⁷²:

⁷² Consúltense el esquema de digitación que figura en el Anexo V para cualquier aclaración al respecto.

Fig. 10.3 Muestras objeto de estudio con indicación de sus digitaciones

(1)

x/xxx/xxx 1-A	x/xxx/xxx 3-C	x/xxx/xxx 2-B	x/xxx/xxx	x/xxx/xxx 4	x/xxx/xxo/
(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)

x/xxx/xxo 4	x/xxx/xxo 2-B	x/xxx/xxx B,1	x/xxx/xoo	x/xxx/xoo 4	x/xxx/xxo 2-B
(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)

x/xxx/xxx 1,B	x/xxx/oxo	x/xxx/xoo 5	x/xxx/xoo 3-C	x/xxx/oxo 1-A	x/xxx/ooo
(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)

x/xxx/ooo 5	x/xxx/ooo 1-A	x/xxx/ooo 6	x/xxx/ooo 6,5	x/xxx/xxx 6,1-A	x/xxo/ooo
(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(4)

x/xxo/ooo 1,3	x/xxx/ooo 5	x/xxo/ooo 7	x/xxx/ooo 6,5	x/xxo/ooo 7b	x/xoo/xoo
(5)	(6)	(1)	(2)	(1)	(2)

x/xoo/oox	x/xxo/oox 7b	x/xoo/ooo	x/xoo/ooo 6	x/ooo/ooo	x/xxo/ooo 6

(3)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)
-----	o/xoo/ooo	x/ooo/ooo 7,8	o/xoo/ooo 1-A	o/xoo/oox	/ooo/ooo

(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)
o/ooo/xxo/	o/oox/xxo	o/ooo/oox/	o/ooo/ooo 9	o/oox/xxo 9	/oox/oox 9

(4)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)
o/oox/oox 9	o/ooo/ooo 10	o/oox/oox 10	o/oox/oox 10	o/ooo/ooo 12,10	o/oox/oox 12,10

(3)	(4)	(1)	(2)	(1)	(2)
o/oox/ooo 12,10,6	o/oox/oox 12,10	x/xxx/xxx 12,1-A	o/ooo/ooo 10,10b	x/xxx/xxx 12,3	o/ooo/ooo 10,11,10b

			(1)	(2)	(3)
x/xxx/xxx 12,2-B	x/xxx/xxx 12	x/xxx/xxx 12,4	x/xxx/xxo 12	x/xxx/xxo 12,4	x/xxx/xxo 12,2-B

(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
x/xxx/xoo 12	x/xxx/xoo 12,2-B	x/xxx/xoo 12,4	x/xxx/oxo 12	x/xxx/xox 12,5	x/xxx/xxx 12,2-B

(4)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)
x/xxx/oxo 12,4	x/xxx/ooo 12	x/xxx/ooo 12,5	x/xxx/ooo 12,2-B	x/xxx/ooo 12,6	x/xxx/xxx 12,6,5

(3) 	(1) 	(2) 	(3) 	(1) 	(2)
x/xxx/000 12,6,3	x/xx0/000 12	x/xx0/000 12,5	x/xx0/000 12,1-A	x/xx0/000 12,7	x/xx0/000 12,7b

(3) 	(4) 	(5) 	(1) 	(2) 	(3)
x/x00/x00 12	x/x00/0x0 12	x/x00/00x 12	x/x00/000 12	x/x00/000 12,5	x/xx0/000 12,3-C

(4) 	(5) 	(1) 	(2) 	(3) 	(4)
x/x00/xxx 12	x/xxx/xxx 12,7	x/000/000 12	x/000/xxx 12	x/000/000 12,4	x/xxx/xxx 12,4

(1) 	(2) 	(3) 	(4) 	(5) 	(6)
x/0xx/xx0 12	o/xxx/xxx 12	x/x0x/xx0 12	o/x00/000 12	x/000/000 12,4	x/0x0/000 12,7,8

(7) 	(1) 	(2) 	(3) 	(4) 	(5)
x/x00/000 12,9	x/0xx/x00 12,4	x/0xx/xx0 12,9	o/xxx/xxx 12,4,9	o/xxx/x00 12,2-B	x/xxx/xx0 12,4,9

(6) 	(7) 	(8) 	(9) 	(10) 	(11)
o/xxx/x0x 12,4	x/0xx/xx0 12,9	o/000/000 7,4	x/000/000 12,9,7	x/000/000 12,10b	x/000/000 12,9,7,8

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<u>#</u>	<u>#</u>	<u>#</u>	<u>#</u>	<u>#</u>	<u>#</u>

x/0xx/x00 12,5,4	x/xxx/0x0 12,4	x/0xx/xx0 12,4	o/xxx/x00 12,9	o/xxx/0x0 12,4	o/xxx/00x 12,4
---------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
<u>#</u>	<u>#</u>	<u>#</u>	<u>#</u>	<u>#</u>	<u>#</u>

x/0xx/x00 12,9,4	o/xxx/x0x 12,9	o/xxx/0xx 12,9	o/xxx/x00 12,5	x/0xx/x00 12,6,4	o/000/000 9,7,8
---------------------	-------------------	-------------------	-------------------	---------------------	--------------------

(13)	(14)	(1)	(2)	(3)	(4)
<u>#</u>	<u>#</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>

x/000/000 12,10	x/000/000 12,10b,9,4	x/0xx/000 12,4	x/0xx/0x0 12,10	x/0xx/00x 12,10	x/0xx/xx0 12,10
--------------------	-------------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------

(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>

x/00x/xxx 12,10	x/xxx/000 12,9,4	x/0xx/x00 12,6,5,4	o/xxx/000 12,5,4	o/xxx/x00 12,6,5,4	-----
--------------------	---------------------	-----------------------	---------------------	-----------------------	-------

(11)	(12)	(1)	(2)	(3)	(4)
<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>

o/000/000 12,10,5	o/000/000 10b,9,4	x/0xx/000 12,6,5,4	o/xxx/000 12,9,6,5,4	x/xxx/000 12,10b,6,4	x/0xx/000 12,11,5,4
----------------------	----------------------	-----------------------	-------------------------	-------------------------	------------------------

(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>

x/0x0/x00 12,5,4	-----	o/xxx/000 12,6	x/xxx/xxx 12,6	x/xxx/0xx 12	o/000/000 2,10,10b,2-B
---------------------	-------	-------------------	-------------------	-----------------	---------------------------

(11)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
x/ooo/ooo	x/oxo/ooo	x/oxo/ooo	x/xxo/ooo	x/xxo/ooo	x/xxo/ooo
12,10b,10,7b	12,12,5,4	12,6	12,7,4	12,11	12,10b

(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
x/oxx/ooo	o/xxo/ooo	x/oxx/ooo	x/xxo/ooo	x/xox/ooo	x/xxo/xxx
12,7,6,4	12,5,4	12,10b,9,6,4	12,11,5,4	12,6	12,4

(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
x/xxx/xxx	x/oxx/xxo	x/ooo/xxx	x/xox/xxx	x/oxo/oxx	x/xxo/oxx
12,6,4	12,6	12,4	12,6	12	12,7,6,B

(18)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
o/ooo/ooo	x/oxo/xxo	x/xoo/xxo	x/xox/xxo	x/xox/xox	x/xxx/xxo
12,11,10b,10,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,,6,4

(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
x/xxx/xxo	x/oxo/xxo	-----	x/xoo/xox	x/xoo/oxx	x/xox/oxx
12,6	12,4		12,4	12,4	12,4

(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
x/xxx/xxx	o/xxo/xxx	-----	x/oxo/ooo	x/xoo/ooo	x/xxo/ooo
12	12,4		12,7,5,4	12,10b,5,4	12,10b,6

(18)	(19)	(20)	(1)	(2)	(3)
x/xoo/ooo	o/xoo/ooo	x/xxx/xxx	x/oxo/xoo	x/oxo/xoo	o/oxx/xoo
12,7b,5	12	12,2-B	12,4	12,5,4	12,6,B

(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
x/oxx/oxo	x/ooo/xoo	x/xoo/xoo	x/xox/xoo	x/oox/oo	x/oxo/xxo
12,4	12,4	12,2-B	12,6,B	12,4	12,5,4

(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
x/oxx/xoo	o/xoo/xxo	x/xxx/xoo	o/oox/oxo	x/xoo/ooo	x/ooo/ooo
12,2-B	12,4	12,5,4	12	12,7,8,6,4	12,4

(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)
x/xoo/ooo	x/ooo/ooo	x/ooo/ooo	x/ooo/ooo	x/oxx/xxx	x/ooo/xxx
12,7b,7,4	12,7b,6,4	12,7,6	12,11,7b	12,2-B	12,2-B

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
x/xx0/xx0	x/xx0/xx0	x/xx0/xxx	o/0xx0/xx0	x/0xx/xxx	/0xx/xxx
12,9,6,B	12,1-A	12,2-B	12,10,4	1210,2-B	12,6,2-B

(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
x/0xx/0xx	x/0xx/xx0	x/xxx/x00	x/0x0/xx0	o/0xx/xx0	o/00x/000
12,6,4	12,9	12,6,4	12,4,2	12,6,4	12,10,5,4

(13)	(14)	(15)	(16)	(1)	(2)
o/000/000	o/000/000	x/xxx/xxx	x/xxx/xxx	x/x00/x00	x/x00/x0x
12,10,6,4	10b,9,4	12,1-A	12,6,3	12,4	12,2-B

(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
x/x00/xx0	x/x00/x00	x/xx0/x00	x/0xx/x00	o/000/xx0	x/0x0/x0x
12,9	12,9	12,9,5,4	12,10,4	12,10,4	12,10,2-B

(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	
x/000/x00	x/000/x00	x/0x0/000	x/0x0/x00	x/xxx/xxx	
12,4	12,10,4	12,4	12,10,5,4	12	

CAPITULO 11

ANALITICA ACUSTICA DEL CLARINETE TIPO SIB



Quinteto para Clarinete y Cuerdas, K. 581. Mozart (1758-1791)

11.1 FRECUENCIAS Y PULSACIONES

11.1.1 Medidas preliminares

Si bien este es un parámetro primordial para determinar la afinación del instrumento y proceder a su ajuste mediante los métodos correctores pertinentes, los resultados obtenidos deben considerarse útiles únicamente para analizar y estudiar la afinación global del instrumento, y no para aplicarlos localmente a una nota determinada. Por su carácter variable, en ningún caso deben considerarse como valores absolutos y definitivos, dado que la frecuencia de cada sonido depende de un buen número de factores que dificultan enormemente su equilibrio. Por consiguiente, la afinación local de cada muestra deberá entenderse en un contexto global. Asimismo, los guarismos obtenidos únicamente son aplicables al modelo de clarinete utilizado, teniendo en cuenta, por supuesto, todos los factores implicados.

En este parámetro se consiga el número de veces que la partícula realiza el ciclo en la unidad de tiempo, esto es, hertzios por segundo. Para tener una información más completa y poder obtener las pulsaciones resultantes que nos indiquen las discrepancias en la afinación, la frecuencia se consigna de dos modos: *teórica*, de acuerdo con el sistema Temperado; *experimental o real*, obtenida mediante la medición de cada sonido. La primera obviamente no varía y el procedimiento para su cálculo y sus valores figuran en el apartado

8.3 y en el Anexo II, respectivamente. La segunda, por su parte, se halla en función de varios factores que serán analizados detenidamente en su momento.

La frecuencia se expresa tomando como referencia el La patrón a 445 Hz, según el sistema Temperado, dado que las mediciones se han efectuado en este diapasón debido a las condiciones atmosféricas de la cámara anecóica en ese momento.

Para tener una idea aproximada de las diferencias de afinación que presentan algunos sonidos en relación con los valores teóricos, se consignan también las pulsaciones resultantes entre la frecuencia teórica y la experimental. Este parámetro nos proporciona, asimismo, una información precisa a la hora de corregir la afinación, pues conocido éste podemos proceder al ajuste de la afinación empleando los métodos adecuados. La detección de las diferencias de afinación entre dos instrumentos se torna compleja mediante la capacidad auditiva del instrumentista cuando estas son nimias, por lo que el uso de este indicador facilitará esta tarea de modo formidable.

Las pulsaciones de cada muestra analizada se consignan precedidas del signo +, cuando el resultado se halla por encima del valor teórico -con lo cual la afinación del instrumento estará alta- o con el signo -, cuando se sitúa por debajo -en cuyo caso las frecuencias estarán bajas-.

Este parámetro nos va a permitir, por tanto, proceder a realizar el estudio detallado de la afinación de cada sonido para su posterior valoración.

Por otra parte, las casillas en las cuales no figuran valores, corresponden a muestras descartadas por su precaria frecuencia o porque su emisión es harto difícil.

11.1.2 Resultados experimentales obtenidos

Tabla 11.1 Frecuencias teóricas y experimentales de las muestras analizadas

Mst.	F _t	F _e	Mst.	F _t	F _e	Mst.	F _t	F _e
Mi ₂	148'37	148'02	Do ₃ (3)	235'72	236'05	Fa# ₃ (2)	333'35	332'29
Fa ₂	157'32	156'23	Do# ₃ (1)	249'74	250'43	Fa# ₃ (3)	333'35	335'57
Fa# ₂	166'67	165'18	Do# ₃ (2)	249'74	251'18	Fa# ₃ (4)	333'35	331'69
Sol ₂	176'58	177'22	Do# ₃ (3)	249'74	249'98	Sol ₃ (1)	353'18	355'80
Sol# ₂	187'08	189'81	Re ₃ (1)	264'59	265'85	Sol ₃ (2)	353'18	354'29
La ₂ (1)	198'21	200'65	Re ₃ (2)	264'59	265'12	Sol ₃ (3)	353'18	353'05
La ₂ (2)	198'21	201'62	Re ₃ (3)	264'59	264'15	Sol ₃ (4)	353'18	353'57
La ₂ (3)	198'21	197'95	Re# ₃ (1)	280'32	279'03	Sol# ₃ (1)	374'17	375'34
La ₂ (4)	198'21	198'07	Re# ₃ (2)	280'32	280'02	Sol# ₃ (2)	374'17	374'03
La# ₂ (1)	209'99	211'65	Re# ₃ (3)	280'32	284'50	Sol# ₃ (3)	374'17	373'49
La# ₂ (2)	209'99	211'78	Re# ₃ (4)	280'32	284'33	Sol# ₃ (4)	374'17	374'81
La# ₂ (3)	209'99	210'87	Re# ₃ (5)	280'32	284'03	La ₃ (1)	396'42	399'24
La# ₂ (4)	209'99	210'50	Re# ₃ (6)	280'32	279'87	La ₃ (2)	396'42	396'75
Si ₂ (1)	222'50	223'78	Mi ₃ (1)	296'74	297'19	La ₃ (3)	396'42	397'90
Si ₂ (2)	222'50	224'39	Mi ₃ (2)	296'74	298'95	La# ₃ (1)	419'99	422'61
Si ₂ (3)	222'50	223'61	Fa ₃ (1)	314'64	316'18	La# ₃ (2)	419'99	420'41
Si ₂ (4)	222'50	222'40	Fa ₃ (2)	314'64	315'73	La# ₃ (3)	419'99	420'96
Do ₃ (1)	235'72	236'57	Fa ₃ (3)	314'64	-----	La# ₃ (4)	419'99	421'69
Do ₃ (2)	235'72	239'04	Fa# ₃ (1)	333'35	336'05	Si ₃ (1)	445'00	445'22

Mst.	F _t	F _e	Mst.	F _t	F _e	Mst.	F _t	F _e
Si ₃ (2)	445'00	439'07	Sol# ₄ (1)	748'35	749'10	Do ₅ (4)	942'91	944'33
Do ₄ (1)	471'45	471'90	Sol# ₄ (2)	748'35	751'19	Do# ₅ (1)	998'98	998'92
Do ₄ (2)	471'45	472'36	Sol# ₄ (3)	748'35	748'66	Do# ₅ (2)	998'98	969'37
Do# ₄	499'49	497'77	La ₄ (1)	782'84	791'11	Do# ₅ (3)	998'98	993'57
Re ₄	529'18	530'77	La ₄ (2)	782'84	788'44	Do# ₅ (4)	998'98	977'44
Re# ₄	560'64	562'88	La ₄ (3)	782'84	791'55	Do# ₅ (5)	998'98	991'66
Mi ₄ (1)	593'48	596'46	La# ₄ (1)	839'98	839'32	Do# ₅ (6)	998'98	998'95
Mi ₄ (2)	593'48	601'98	La# ₄ (2)	839'98	839'80	Do# ₅ (7)	998'98	991'59
Mi ₄ (3)	593'48	591'67	La# ₄ (3)	839'98	842'14	Re ₅ (1)	1058'36	1060'90
Fa ₄ (1)	629'29	630'80	La# ₄ (4)	839'98	844'84	Re ₅ (2)	1058'36	1055'50
Fa ₄ (2)	629'29	628'34	La# ₄ (5)	839'98	844'50	Re ₅ (3)	1058'36	1063'50
Fa ₄ (3)	629'29	632'19	Si ₄ (1)	890'00	890'70	Re ₅ (4)	1058'36	1058'10
Fa# ₄ (1)	666'71	667'69	Si ₄ (2)	890'00	891'51	Re ₅ (5)	1058'36	1062'80
Fa# ₄ (2)	666'71	668'52	Si ₄ (3)	890'00	890'20	Re ₅ (6)	1058'36	1030'00
Fa# ₄ (3)	666'71	665'19	Si ₄ (4)	890'00	892'31	Re ₅ (7)	1058'36	1058'90
Fa# ₄ (4)	666'71	668'36	Si ₄ (5)	890'00	885'34	Re ₅ (8)	1058'36	1046'10
Sol ₄ (1)	706'35	707'57	Do ₅ (1)	942'91	944'05	Re ₅ (9)	1058'36	1044'60
Sol ₄ (2)	706'35	710'98	Do ₅ (2)	942'91	940'58	Re ₅ (10)	1058'36	1058'80
Sol ₄ (3)	706'35	706'97	Do ₅ (3)	942'91	44'18	Re ₅ (11)	1058'36	1050'10

Mst.	F _t	F _e	Mst.	F _t	F _e	Mst.	F _t	F _e
Re# ₅ (1)	1121'29	1118'00	Mi ₅ (6)	1186'96	1190'20	Fa# ₅ (2)	1333'42	1351'30
Re# ₅ (2)	1121'29	1108'10	Mi ₅ (7)	1186'96	1190'70	Fa# ₅ (3)	1333'42	1339'40
Re# ₅ (3)	1121'29	1113'40	Mi ₅ (8)	1186'96	1188'90	Fa# ₅ (4)	1333'42	1322'00
Re# ₅ (4)	1121'29	1112'50	Mi ₅ (9)	1186'96	1180'80	Fa# ₅ (5)	1333'42	1341'60
Re# ₅ (5)	1121'29	1109'30	Mi ₅ (10)	1186'96	-----	Fa# ₅ (6)	1333'42	1334'10
Re# ₅ (6)	1121'29	1114'70	Mi ₅ (11)	1186'96	1176'00	Fa# ₅ (7)	1333'42	1316'50
Re# ₅ (7)	1121'29	1105'30	Mi ₅ (12)	1186'96	1171'30	Fa# ₅ (8)	1333'42	1291'80
Re# ₅ (8)	1121'29	1140'30	Fa ₅ (1)	1258'58	1259'20	Fa# ₅ (9)	1333'42	1319'90
Re# ₅ (9)	1121'29	1179'00	Fa ₅ (2)	1258'58	1252'60	Fa# ₅ (10)	1333'42	1346'90
Re# ₅ (10)	1121'29	1115'50	Fa ₅ (3)	1258'58	1252'70	Fa# ₅ (11)	1333'42	1335'90
Re# ₅ (11)	1121'29	1116'00	Fa ₅ (4)	1258'58	1243'10	Fa# ₅ (12)	1333'42	1311'90
Re# ₅ (12)	1121'29	1104'50	Fa ₅ (5)	1258'58	1260'10	Fa# ₅ (13)	1333'42	1357'70
Re# ₅ (13)	1121'29	1113'30	Fa ₅ (6)	1258'58	-----	Fa# ₅ (14)	1333'42	1338'10
Re# ₅ (14)	1121'29	1072'00	Fa ₅ (7)	1258'58	1238'40	Fa# ₅ (15)	1333'42	1336'00
Mi ₅ (1)	1186'96	1188'00	Fa ₅ (8)	1258'58	1263'40	Fa# ₅ (16)	1333'42	1340'00
Mi ₅ (2)	1186'96	1179'90	Fa ₅ (9)	1258'58	1266'90	Fa# ₅ (17)	1333'42	1349'40
Mi ₅ (3)	1186'96	1179'20	Fa ₅ (10)	1258'58	1231'50	Fa# ₅ (18)	1333'42	1313'10
Mi ₅ (4)	1186'96	1183'20	Fa ₅ (11)	1258'58	1256'50	Sol ₅ (1)	1412'70	1433'60
Mi ₅ (5)	1186'96	1156'50	Fa# ₅ (1)	1333'42	1328'60	Sol ₅ (2)	1412'70	1422'30

Mst.	F _t	F _e	Mst.	F _t	F _e	Mst.	F _t	F _e
Sol ₅ (3)	1412'70	1417'40	Sol ₅ (17)	1412'70	1332'20	Sol# ₅ (11)	1496'70	1498'10
Sol ₅ (4)	1412'70	1419'50	Sol ₅ (18)	1412'70	1346'20	Sol# ₅ (12)	1496'70	1484'50
Sol ₅ (5)	1412'70	1417'50	Sol ₅ (19)	1412'70	1398'60	Sol# ₅ (13)	1496'70	1492'80
Sol ₅ (6)	1412'70	1408'00	Sol ₅ (20)	1412'70	1453'20	Sol# ₅ (14)	1496'70	1490'00
Sol ₅ (7)	1412'70	1393'80	Sol# ₅ (1)	1496'70	1465'90	Sol# ₅ (15)	1496'70	1502'00
Sol ₅ (8)	1412'70	-----	Sol# ₅ (2)	1496'70	1513'70	Sol# ₅ (16)	1496'70	1502'00
Sol ₅ (9)	1412'70	1414'70	Sol# ₅ (3)	1496'70	1502'00	Sol# ₅ (17)	1496'70	1443'80
Sol ₅ (10)	1412'70	1405'30	Sol# ₅ (4)	1496'70	1504'50	Sol# ₅ (18)	1496'70	1453'20
Sol ₅ (11)	1412'70	1390'40	Sol# ₅ (5)	1496'70	1500'90	Sol# ₅ (19)	1496'70	1455'80
Sol ₅ (12)	1412'70	1402'50	Sol# ₅ (6)	1496'70	1482'80	Sol# ₅ (20)	1496'70	1451'70
Sol ₅ (13)	1412'70	1397'10	Sol# ₅ (7)	1496'70	1487'60	Sol# ₅ (21)	1496'70	1475'40
Sol ₅ (14)	1412'70	1461'30	Sol# ₅ (8)	1496'70	1483'40	Sol# ₅ (22)	1496'70	1469'40
Sol ₅ (15)	1412'70	1392'00	Sol# ₅ (9)	1496'70	1482'20	Sol# ₅ (23)	1496'70	1502'90
Sol ₅ (16)	1412'70	1388'50	Sol# ₅ (10)	1496'70	1482'00	La ₅ (1)	1585'68	1581'70

Mst.	F _t	F _c	Mst.	F _t	F _c	Mst.	F _t	F _c
La ₅ (2)	1585'68	1564'9	La# ₅ (9)	1679'96	1605'20	Si ₅ (12)	1780'00	1766'20
La ₅ (3)	1585'68	1562'2	La# ₅ (10)	1679'96	1663'00	Si ₅ (13)	1780'00	1764'70
La ₅ (4)	1585'68	1590'5	La# ₅ (11)	1679'96	1595'20	Si ₅ (14)	1780'00	1764'00
La ₅ (5)	1585'68	1587'8	La# ₅ (12)	1679'96	1671'30	Si ₅ (15)	1780'00	1738'50
La ₅ (6)	1585'68	1563'5	La# ₅ (13)	1679'96	1674'00	Si ₅ (16)	1780'00	1756'50
La ₅ (7)	1585'68	1556'0	La# ₅ (14)	1679'96	1669'20	Do ₆ (1)	1885'80	1877'00
La ₅ (8)	1585'68	1560'8	La# ₅ (15)	1679'96	1691'30	Do ₆ (2)	1885'80	1850'80
La ₅ (9)	1585'68	1517'8	La# ₅ (16)	1679'96	1622'70	Do ₆ (3)	1885'80	1877'00
La ₅ (10)	1585'68	1599'2	Si ₅ (1)	1780'00	1824'00	Do ₆ (4)	1885'80	1832'70
La ₅ (11)	1585'68	1564'9	Si ₅ (2)	1780'00	1722'40	Do ₆ (5)	1885'80	1850'10
La ₅ (12)	1585'68	1562'2	Si ₅ (3)	1780'00	1745'30	Do ₆ (6)	1885'80	1877'00
La# ₅ (1)	1679'96	1652'4	Si ₅ (4)	1780'00	1764'10	Do ₆ (7)	1885'80	1869'70
La# ₅ (2)	1679'96	1663'0	Si ₅ (5)	1780'00	1768'70	Do ₆ (8)	1885'80	1835'40
La# ₅ (3)	1679'96	1597'9	Si ₅ (6)	1780'00	1769'30	Do ₆ (9)	1885'80	1846'80
La# ₅ (4)	1679'96	1601'0	Si ₅ (7)	1780'00	1733'10	Do ₆ (10)	1885'80	1865'00
La# ₅ (5)	1679'96	1603'90	Si ₅ (8)	1780'00	1733'00	Do ₆ (11)	1885'80	1809'10
La# ₅ (6)	1679'96	1598'50	Si ₅ (9)	1780'00	1772'90	Do ₆ (12)	1885'80	1866'70
La# ₅ (7)	1679'96	1593'80	Si ₅ (10)	1780'00	1770'00	Do ₆ (13)	1885'80	1879'80
La# ₅ (8)	1679'96	1609'00	Si ₅ (11)	1780'00	1749'90			

Tabla 11.2 Pulsaciones resultantes entre la frecuencia teórica y la experimental de las muestras analizadas

Mst.	Pulsac.	Mst.	Pulsac.	Mst.	Pulsac.	Mst.	Pulsac.
Mi ₂	- 0'35	Do ₃ (3)	+ 0'33	Fa# ₃ (2)	- 1'06	Si ₃ (2)	- 5'93
Fa ₂	- 1'09	Do# ₃ (1)	+ 0'69	Fa# ₃ (3)	+ 2'22	Do ₄ (1)	+ 0'45
Fa# ₂	- 1'49	Do# ₃ (2)	+ 1'44	Fa# ₃ (4)	- 1'66	Do ₄ (2)	+ 0'91
Sol ₂	+ 0'64	Do# ₃ (3)	+ 0'24	Sol ₃ (1)	+ 2'62	Do# ₄	- 1'72
Sol# ₂	+ 2'73	Re ₃ (1)	+ 1'26	Sol ₃ (2)	+ 1'11	Re ₄	+ 1'51
La ₂ (1)	+ 2'44	Re ₃ (2)	+ 0'53	Sol ₃ (3)	- 0'13	Re# ₄	+ 2'54
La ₂ (2)	+ 3'41	Re ₃ (3)	- 0'44	Sol ₃ (4)	+ 0'39	Mi ₄ (1)	+ 2'98
La ₂ (3)	- 0'26	Re# ₃ (1)	- 1'29	Sol# ₃ (1)	+ 1'17	Mi ₄ (2)	+ 8'5
La ₂ (4)	- 0'14	Re# ₃ (2)	- 0'30	Sol# ₃ (2)	- 0'14	Mi ₄ (3)	- 1'81
La# ₂ (1)	+ 1'66	Re# ₃ (3)	+ 4'18	Sol# ₃ (3)	- 0'68	Fa ₄ (1)	+ 1'51
La# ₂ (2)	+ 1'79	Re# ₃ (4)	+ 4'01	Sol# ₃ (4)	+ 0'64	Fa ₄ (2)	- 0'95
La# ₂ (3)	+ 0'88	Re# ₃ (5)	+ 3'71	La ₃ (1)	+ 2'82	Fa ₄ (3)	+ 2'90
La# ₂ (4)	+ 0'51	Re# ₃ (6)	- 0'45	La ₃ (2)	+ 0'33	Fa# ₄ (1)	+ 0'98
Si ₂ (1)	+ 1'28	Mi ₃ (1)	- 0'45	La ₃ (3)	+ 1'48	Fa# ₄ (2)	+ 1'81
Si ₂ (2)	+ 1'89	Mi ₃ (2)	+ 2'21	La# ₃ (1)	+ 2'62	Fa# ₄ (3)	- 1'52
Si ₂ (3)	+ 1'11	Fa ₃ (1)	+ 1'54	La# ₃ (2)	+ 0'42	Fa# ₄ (4)	+ 1'65
Si ₂ (4)	- 0'10	Fa ₃ (2)	+ 1'09	La# ₃ (3)	+ 0'97	Sol ₄ (1)	+ 1'22
Do ₃ (1)	+ 0'85	Fa ₃ (3)	-----	La# ₃ (4)	+ 1'70	Sol ₄ (2)	+ 4'63
Do ₃ (2)	+ 3'32	Fa# ₃ (1)	+ 2'70	Si ₃ (1)	+ 0'22	Sol ₄ (3)	+ 0'62

Mst.	Pulsac.	Mst.	Pulsac.	Mst.	Pulsac.	Mst.	Pulsac.
Sol# ₄ (1)	+ 0'75	Do ₅ (4)	+ 1'42	Re# ₅ (1)	- 3'29	Mi ₅ (6)	+ 3'24
Sol# ₄ (2)	+ 2'84	Do# ₅ (1)	- 0'06	Re# ₅ (2)	-13'19	Mi ₅ (7)	+ 3'74
Sol# (3)	+ 0'31	Do# ₅ (2)	- 29'61	Re# ₅ (3)	- 7'89	Mi ₅ (8)	+ 1'94
La ₄ (1)	- 1'73	Do# ₅ (3)	- 5'61	Re# ₅ (4)	- 8'79	Mi ₅ (9)	- 6'16
La ₄ (2)	- 5'60	Do# ₅ (4)	- 21'54	Re# ₅ (5)	- 11'99	Mi ₅ (10)	-----
La ₄ (3)	+ 8'71	Do# ₅ (5)	- 7'32	Re# ₅ (6)	- 6'59	Mi ₅ (11)	- 10'96
La# ₄ (1)	- 0'66	Do# ₅ (6)	- 0'03	Re# ₅ (7)	- 15'99	Mi ₅ (12)	- 15'66
La# ₄ (2)	- 0'18	Do# ₅ (7)	- 7'39	Re# ₅ (8)	+ 19'01	Fa ₅ (1)	+ 0'62
La# ₄ (3)	+ 2'16	Re ₅ (1)	+ 2'54	Re# ₅ (9)	+ 57'71	Fa ₅ (2)	- 5'98
La# ₄ (4)	+ 4'86	Re ₅ (2)	- 2'86	Re# ₅ (10)	- 5'79	Fa ₅ (3)	- 5'88
La# ₄ (5)	+ 4'52	Re ₅ (3)	+ 5'14	Re# ₅ (11)	- 5'29	Fa ₅ (4)	-15'48
Si ₄ (1)	+ 0'70	Re ₅ (4)	- 0'26	Re# ₅ (12)	- 16'79	Fa ₅ (5)	+ 1'52
Si ₄ (2)	+ 1'51	Re ₅ (5)	+ 4'44	Re# ₅ (13)	- 7'99	Fa ₅ (6)	-----
Si ₄ (3)	+ 0'20	Re ₅ (6)	- 28'36	Re# ₅ (14)	- 49'29	Fa ₅ (7)	- 20'18
Si ₄ (4)	+ 2'31	Re ₅ (7)	+ 0'54	Mi ₅ (1)	+ 1'04	Fa ₅ (8)	+ 4'82
Si ₄ (5)	- 4'66	Re ₅ (8)	- 12'26	Mi ₅ (2)	- 7'06	Fa ₅ (9)	+ 8'32
Do ₅ (1)	+ 1'74	Re ₅ (9)	- 13'76	Mi ₅ (3)	- 7'76	Fa ₅ (10)	- 27'08
Do ₅ (2)	- 2'33	Re ₅ (10)	+ 0'44	Mi ₅ (4)	- 3'71	Fa ₅ (11)	- 2'08
Do ₅ (3)	+ 1'27	Re ₅ (11)	+ 8'26	Mi ₅ (5)	- 30'46	Fa# ₅ (1)	- 4'82

Mst.	Pulsac.	Mst.	Pulsac.	Mst.	Pulsac.	Mst.	Pulsac.
Fa# ₅ (2)	+ 17'88	Sol ₅ (3)	+ 4'70	Sol# ₅ (2)	+ 17'00	Sol# ₅ (21)	- 21'3
Fa# ₅ (3)	+ 5'98	Sol ₅ (4)	+ 6'80	Sol# ₅ (3)	+ 5'30	Sol# ₅ (22)	- 27'3
Fa# ₅ (4)	- 11'42	Sol ₅ (5)	+ 4'80	Sol# ₅ (4)	+ 7'80	Sol# ₅ (23)	+ 6'2
Fa# ₅ (5)	+ 8'18	Sol ₅ (6)	- 4'70	Sol# ₅ (5)	+ 4'20	La ₅ (1)	- 3'98
Fa# ₅ (6)	+ 0'68	Sol ₅ (7)	- 18'90	Sol# ₅ (6)	-13'90	La ₅ (2)	- 20'78
Fa# ₅ (7)	- 16'92	Sol ₅ (8)	-----	Sol# ₅ (7)	- 9'10	La ₅ (3)	- 23'48
Fa# ₅ (8)	- 41'62	Sol ₅ (9)	+ 2'00	Sol# ₅ (8)	- 13'30	La ₅ (4)	+ 4'82
Fa# ₅ (9)	- 13'52	Sol ₅ (10)	- 7'40	Sol# ₅ (9)	- 14'50	La ₅ (5)	+ 2'12
Fa# ₅ (10)	+ 13'48	Sol ₅ (11)	- 22'30	Sol# ₅ (10)	- 14'70	La ₅ (6)	- 22'18
Fa# ₅ (11)	+ 2'48	Sol ₅ (12)	- 10'20	Sol# ₅ (11)	+ 1'40	La ₅ (7)	- 29'68
Fa# ₅ (12)	- 21'51	Sol ₅ (13)	- 15'60	Sol# ₅ (12)	- 12'20	La ₅ (8)	- 25'68
Fa# ₅ (13)	+ 24'28	Sol ₅ (14)	+48'60	Sol# ₅ (13)	- 3'90	La ₅ (9)	- 67'88
Fa# ₅ (14)	+ 4'68	Sol ₅ (15)	- 20'70	Sol# ₅ (14)	- 6'70	La ₅ (10)	+ 13'52
Fa# ₅ (15)	+ 2'58	Sol ₅ (16)	- 24'20	Sol# ₅ (15)	+ 5'30	La ₅ (11)	- 20'78
Fa# ₅ (16)	+ 6'58	Sol ₅ (17)	- 80'50	Sol# ₅ (16)	+ 6'80	La ₅ (12)	-23'48
Fa# ₅ (17)	+ 15'98	Sol ₅ (18)	- 66'50	Sol# ₅ (17)	- 52'90	La# ₅ (1)	- 27'56
Fa# ₅ (18)	- 20'32	Sol ₅ (19)	- 14'10	Sol# ₅ (18)	-43'50	La# ₅ (2)	- 16'96
Sol ₅ (1)	+ 20'90	Sol ₅ (20)	+40'50	Sol# ₅ (19)	- 40'90	La# ₅ (3)	- 82'06
Sol ₅ (2)	+ 9'60	Sol# ₅ (1)	- 30'80	Sol# ₅ (20)	- 45'00	La# ₅ (4)	- 78'96

Mst.	Pulsac.	Mst.	Pulsac.	Mst.	Pulsac.
La#₅(5)	- 76'06	Si₅(8)	+ 1'50	Do₆(11)	- 76'70
La#₅(6)	- 81'46	Si₅(9)	- 7'10	Do₆(12)	- 19'10
La#₅(7)	- 86'16	Si₅(10)	- 10'00	Do₆(13)	- 6'00
La#₅(8)	- 70'96	Si₅(11)	- 30'10		
La#₅(9)	- 74'76	Si₅(12)	- 13'80		
La#₅(10)	- 16'96	Si₅(13)	- 15'30		
La#₅(11)	- 84'76	Si₅(14)	- 16'00		
La#₅(12)	- 8'66	Si₅(15)	- 41'50		
La#₅(13)	- 5'96	Si₅(16)	- 23'50		
La#₅(14)	- 10'76	Do₆(1)	- 8'80		
La#₅(15)	+ 10'34	Do₆(2)	- 35'00		
La#₅(16)	- 57'26	Do₆(3)	- 8'80		
Si₅(1)	+ 44'00	Do₆(4)	- 53'10		
Si₅(2)	- 57'60	Do₆(5)	- 35'70		
Si₅(3)	- 34'70	Do₆(6)	- 8'80		
Si₅(4)	- 15'90	Do₆(7)	- 16'10		
Si₅(5)	- 11'30	Do₆(8)	- 50'40		
Si₅(6)	- 10'70	Do₆(9)	- 39'00		
Si₅(7)	- 46'90	Do₆(10)	- 20'8		

11.1.3 Análisis y discusión de los resultados obtenidos

- *Registro grave.* Las frecuencias experimentales de este registro hasta el Do_3 se sitúan en una banda que oscila entre los 0 y + 1'50 ciclos por segundo en relación con sus frecuencias teóricas. Estos umbrales se consideran razonables para que no se produzca una perceptibilidad disonante muy acentuada. Dicho de otro modo, son unos límites tolerables para que se considere una afinación medianamente correcta.

Las frecuencias que exceden estos límites corresponden a los sonidos en cuya emisión se ha empleado llaves auxiliares con el fin de alterar la columna gaseosa, bien sea prolongándola o reduciéndola. En este sentido, ya sabemos que a partir del La_2 hasta el Mi_3 es posible alterar la frecuencia vibratoria de la columna abriendo o cerrando determinados orificios, dado que se dispone de un cierto margen espacial en el tubo para que se pueda verificar esa alteración. Así, cualquier llave que se abra por debajo de la columna vibrante -la 4, 5 y 6- la acorta ligeramente elevando su frecuencia vibratoria, mientras que si se cierran determinados orificios -con las llaves 1/A, 2/B y 3- se prolonga su longitud y, por tanto, la frecuencia descende. El efecto que tiene este método sobre la frecuencia del sonido depende del grado de influencia bajo el que se halle el orificio respecto del enrejado de orificios tonales -véase el apartado 14.3-. Normalmente en este registro el efecto es mínimo dado que las ondas de estos sonidos se reflejan en el primer orificio abierto y por tanto no se perturban de igual forma que en los sonidos agudos. Sorprende, sin embargo, las frecuencias del $Sol\#_2$ y La_2 , por encima de los valores normales.

Es a partir del $Fa\#_3$ cuando las frecuencias presentan unas discrepancias mayores por la progresiva reducción del tubo y del diámetro de los orificios tonales, así como la diversa ubicación de los mismos. Por otra parte, la reducción de la sección cruzada en la parte alta del tubo -en la boquilla- produce un aumento local del coeficiente de elasticidad del aire interno, lo que levanta las frecuencias de los sonidos de esta parte del tubo. Recuérdese, a propósito de este fenómeno, que las alteraciones en el tubo se practican, fundamentalmente, para ajustar la frecuencia de los sonidos del registro agudo -en detrimento del grave- las cuales, debido al orificio altavoz, suelen quedar altas. Esta región, comprendida entre el $Fa\#_3$ y el $La\#_3$ es especialmente delicada. Estos desequilibrios, además del problema antes referido, también se pueden achacar ocasionalmente a un mínimo error en la ubicación de su orificio tonal. Piénsese que en un espacio reducido deben disponerse todos los orificios tonales de este tramo. Este es uno de los mayores inconvenientes del funcionamiento acústico de tubo cerrado del clarinete, ya que al octavear a la doceava debe cubrir el hueco tonal que discurre desde la octava hasta la doceava con un tubo análogo al de sus homólogos de la orquesta.

También se observan pulsaciones ostensibles en el $Re\#_3$ (3), (4) y (5), obtenidos mediante digitación cruzada. Este procedimiento proporciona, por lo general, una pésima afinación de tendencia alcista, dado que la frecuencia con este tipo de digitación no se puede precisar de forma óptima. Sin embargo, es una digitación muy socorrida para determinados pasajes.

Los mejores resultados, pues, se han obtenido en los sonidos del registro que más longitud de tubo utilizan y mayor diámetro de orificio tonal. Ambos factores favorecen sobremanera que la frecuencia se ajuste a los valores normales.

- Registro agudo. En general, lo que más llama la atención en este registro es que las frecuencias se hallan ligeramente por encima del valor que cabría esperar, esto es, triple frecuencia que sus fundamentales dado que se tratan de armónicos terceros. Aún así, debe entenderse que no produce análoga sensación las mismas pulsaciones en un registro u otro. Lógicamente, no se percibe de igual modo una pulsación en el registro grave donde la frecuencia es menor y, por tanto los ciclos mayores, que en el agudo, donde los ciclos son más rápidos. De modo que para ser objetivos deberá incrementarse proporcionalmente el valor de las pulsaciones fundamentales para tener una idea aproximada de lo que puede considerarse disonante. Así todo, los valores no se corresponden con la teoría y, de nuevo, se evidencia la precaria afinación del clarinete.

En especial, las pulsaciones se acentúan a partir del Si₄ por las mismas razones expuestas en el anterior subapartado.

La respuesta a este desequilibrio hay que buscarla en el efecto colateral que produce el orificio portavoz. Además de romper el modo fundamental, acorta ligeramente la longitud de la onda y levanta la afinación de los sonidos de los extremos del tubo de este registro en relación con las fundamentales. El problema subyace por la doble función que debe desempeñar este orificio, a saber, producir el octavo y, junto con la llave 10, dar el Sib₃. Como orificio portavoz, tiene un diámetro excesivo, mientras que como orificio tonal es demasiado pequeño.

Consecuentemente, dado que la afinación de estos sonidos se halla ligeramente por encima de los valores teóricos, no es de extrañar que los peores resultados correspondan a las muestras en las que se ha utilizado llaves auxiliares para subir la frecuencia -llaves 4 y 5-. Estas comprenden desde el Re#₄ hasta el Sol₄. A ellas hay que añadir el La#₄ (4) y (5), producidas mediante digitación cruzada. Por su parte, los sonidos en los cuales se ha abierto algún orificio -llaves 5, 2 y 6- arrojan frecuencias por encima de lo normal, lo cual debe valorarse especialmente a la hora de su uso en la ejecución musical ya que este registro suele quedar alto. Piénsese, a este respecto, que en estos sonidos la zona de influencia del enrejado de orificios tonales es mayor dado que las ondas no se refleja en el primer orificio abierto sin que se transmiten más abajo del tubo. Aunque en nuestro estudio algunos de estos sonidos deben descartarse, es importante conocer estas digitaciones porque en determinados casos su concurso resulta imprescindible si se quiere corregir la afinación de un sonido que, por causas diversas, presente una frecuencia precaria.

Al igual que acontece con el registro grave, los sonidos producidos por digitación de horquilla emiten frecuencias harto altas, por lo que su uso deberá moderarse.

- Registro sobreagudo. Es en este registro donde se produce una mayor discrepancia en sus frecuencias. En general se aprecia un descenso de las frecuencias más acusado en los sonidos emitidos mediante armónicos que utilizan una menor longitud de tubo y con una frecuencia más alta. La razón hay que buscarla en el fenómeno de la corrección del extremo final del tubo. A medida que se abren orificios tonales la corrección es mayor y las ondas, en lugar de reflejarse en el primer orificio abierto, se propagan al final del tubo debilitando, por consiguiente, las ondas estacionarias.

Así como en los dos registros antecedentes las frecuencias siguen una línea más o menos coherente, esto es, se observa una pauta determinada, en este registro las frecuencias no siguen una norma común. Bien, eso es así por una razón fundamental: la naturaleza de sus sonidos. Nótese que, tanto en el registro grave como en el agudo, sus sonidos tiene la

misma naturaleza, mientras que en el sobreagudo la diversidad de armónicos es patente. Por esta razón, se advierten en los dos primeros tramos de este registro, un número análogo de frecuencias altas y bajas, mientras que la tendencia general en el último tramo es bajista por el fenómeno de la corrección final del tubo.

Hasta el Fa#₅ -último quinto armónico del tramo antes de saltar al séptimo-, las primeras muestras de cada nota han dado las mejores frecuencias, salvo excepciones, lo que demuestra que las digitaciones más utilizadas actualmente se corresponden con estos sonidos. Sus frecuencias han sido perfeccionadas mediante el uso del orificio 2 que funciona también como portavoz, así como la llave 4, ya que de lo contrario la afinación quedaría muy por debajo de lo normal. Este método se halla directamente relacionado con el enrejado de orificios tonales y la frecuencia de corte –véase apartado 14.3-. Efectivamente, al igual que sucede en el registro agudo, cada vez más las ondas se transmiten a lo largo del tubo y la región de influencia del enrejado es mayor, esto es, aumenta con la frecuencia. De manera que cualquier llave activada o desactivada en esta zona puede alterar considerablemente la frecuencia de un sonido dado.

Las frecuencias altas corresponden de forma ordinaria a los armónicos más altos para cada nota. La razón estriba en que se utiliza, de nuevo, un tubo completo para la emisión y, por tanto, el fenómeno de la corrección final del tubo que afecta a los sonidos más altos del tubo queda aquí invalidado. Así, además de una afinación más precisa, estos sonidos presentan un timbre más homogéneo, lo cual debe ser especialmente considerado para un uso relevante en determinados pasajes musicales.

Por tanto, las frecuencias altas de este registro corresponden invariablemente a las digitaciones base perfeccionadas y a los armónicos más altos. Por su parte, las bajas se adscriben a las múltiples derivaciones y a los armónicos más bajos y con una menor longitud de tubo, debido, por una parte a la reducción de la longitud de tubo que hace imposible sostener una columna aérea con ciertas garantías y al fenómeno de la corrección final del tubo. Por lo que respecta a las derivaciones de horquilla, ya sabemos que con este procedimiento la frecuencia se puede bajar lo que se desee. Además, se incluyen en este bloque, las muestras en las que se ha abierto un orificio -llave 9,10,12 o el orificio que acciona el dedo pulgar izquierdo- por encima de la columna vibrante, lo cual produce un descenso de la frecuencia en un grado determinado por la ubicación del orificio abierto respecto de la columna vibrante. Conociendo la tendencia alcista de los sonidos de los dos primeros tramos del registro, el uso de estas llaves puede resultar un método socorrido para ajustar la frecuencia.

Finalmente se observa en el último tramo las pulsaciones más ostensibles, generalmente a la baja. La razón radica, además de en el fenómeno antes descrito de la impedancia, en las cortas longitudes de onda de estos sonidos y en una onda estacionaria con demasiadas subdivisiones que se sostiene precariamente. Este desequilibrio se manifiesta especialmente en el La#₅ obtenido como séptimo armónico, dado que es el que presenta menor longitud de tubo, además de ser el sonido más alto del tramo. Cuando se efectúa el salto al armónico superior las frecuencias se restablecen debido a que se utiliza una mayor longitud de tubo. Además, hay que considerar que las altas frecuencias que se originan en este tramo son difíciles de mantener por la frecuencia de la lengüeta.

- *Aplicaciones prácticas de interés musical.* Lo primero que se puede extraer del análisis de los resultados es que deben extremarse las medidas correctoras para la afinación,

puesto que la afinación del instrumento esta sujeta a los caprichos de las columnas aéreas y a las particularidades de las series armónicas, además de diversos factores. Por otra parte, no debe constituir un problema el afinar cada una de las notas, dado que las posibilidades de digitación son vastas. Para ello, será primordial conocer el mapa acústico del instrumento con todo su sistema de digitaciones -véase la fig. 10.3-. Veamos algunas normas que coadyuvarán en la ejecución musical:

- Cualquier orificio que se abra elevará la frecuencia del sonido en un grado que vendrá determinado por la ubicación de ese orificio respecto de la columna aérea vibrante.
- Del mismo modo, un orificio que se cierre por debajo del último orificio que determina la longitud del tubo, bajará la frecuencia en un grado determinado por la distancia entre ambos. A mayor distancia mayor descenso, y viceversa. Asimismo, el efecto dependerá de la ubicación del orificio respecto de la zona de influencia del enrejado de orificios tonales y su corrección del extremo final.
- A la hora de ajustar la afinación global del instrumento se debe tener en cuenta que, en los casos que resulte necesario bajarla, la prolongación del tubo deberá llevarse a cabo con barriletes de diferentes longitudes, y no extrayéndolo del cuerpo superior, para no desajustar la balanza global.
- En las frecuencias altas las ondas se reflejan más allá del último orificio tonal abierto, en especial en los sonidos obtenidos con una corta longitud de tubo y, por consiguiente, un enrejado de orificios tonales abiertos. Se hace indispensable, por tanto, extremar las medidas de control de la afinación mediante el uso de digitaciones auxiliares o armónicos superiores.
- Los armónicos 5, 7, 13 y 14 presentan frecuencias teóricas por debajo de lo normal, especialmente los tres últimos. En consecuencia, es menester cuidar su afinación de una forma especial.
- Los sonidos del tramo quintante suelen quedar altos como consecuencia del problema de la contracción de la parte superior del tubo, por su funcionamiento de tubo cerrado y por el efecto colateral de la llave portavoz, con lo cual es preceptivo obturar determinados orificios por debajo del tubo para corregirlo -véase la tabla de digitaciones, apartado 10.2-.
- En el registro sobregado, los armónicos más bajos presentan frecuencias más bajas y los más altos, más elevadas. Es conveniente usar, por tanto, los armónicos más altos para los sonidos importantes y los más bajos para los pasajes rápidos y de paso.

11.2 VALORACIÓN DE LA AFINACION

11.2.1 Medidas preliminares

Este indicador, considerado de carácter semiobjetivo, nos aporta una clasificación de la afinación de todas las muestras en orden a su ulterior uso y optimización en la

ejecución musical. No se debe confundir este indicador con el parámetro que nos refiere la frecuencia. Mientras que este último supone un valor físico, aquél comporta también una sensación subjetiva que debe ser por tanto interpretada por el oyente.

Para su valoración se emplea un sencillo método numérico que los clasifica del 1 al 3 con un adjetivo calificativo, según su grado de afinación. Para ello se han establecido unos márgenes frecuenciales en cada uno de los registros del instrumento teniendo en cuenta las pulsaciones resultantes entre la frecuencia teórica y la experimental de cada muestra. Conociendo el tipo de armónico que se utiliza para cada uno de los registros, se ha incrementado proporcionalmente el valor de cada margen en cada uno de los armónicos utilizados para obtener su valor relativo. Nótese que si bien un margen de 1 hercio o ciclo de diferencia entre ambas frecuencias puede parecer una afinación correcta en sonidos fundamentales del registro grave, en armónicos superiores donde se incrementa la frecuencia y, por tanto, el número de ciclos, se podría considerar como excelente. Dichos márgenes se han determinado de forma empírica mediante la práctica musical, si bien deben ser considerados relativos dada su cualidad subjetiva. Además se completa el indicador con los signos + y -, indicadores de la tendencia de la afinación, alcista o bajista. Veámoslo:

Fundamentales

1: Afinación Excelente: $\leq 0'5$ 2: A. Correcta: $\geq 0'51 \leq 1'5$ 3: A. Precaria: $\geq 1'51$

Terceros armónicos

1: A. Excelente: ≤ 1 2: A. Correcta: $\geq 1'1 \leq 2'5$ 3: A. Precaria: $\geq 2'51$

Quintos armónicos

1: A. Excelente: $\leq 1'5$ 2: A. Correcta: $\geq 1'51 \leq 4$ 3: A. Precaria: $\geq 4'1$

Séptimos armónicos

1: A. Excelente: ≤ 2 2: A. Correcta: $\geq 2'1 \leq 6$ 3: A. Precaria: $\geq 6'1$

Novenos armónicos

1: A. Excelente: $\leq 2'5$ 2: A. Correcta: $\geq 2'51 \leq 8'5$ 3: A. Precaria: $\geq 8'51$

Cabe recordar a propósito de este indicador que los resultados son aplicables únicamente al modelo de clarinete con el que se ha realizado el estudio.

11.2.2 Resultados experimentales obtenidos

Tabla 11.3 Valoración de la afinación

Mst.	Valor.	Mst.	Valor.	Mst.	Valor.	Mst.	Valor.
Mi ₂	1 -	Do ₃ (3)	1 +	Fa# ₃ (2)	2 -	Si ₃ (2)	3 -
Fa ₂	2 -	Do# ₃ (1)	2 +	Fa# ₃ (3)	3 +	Do ₄ (1)	1 +
Fa# ₂	2 -	Do# ₃ (2)	2 +	Fa# ₃ (4)	3 -	Do ₄ (2)	2 +
Sol ₂	2 +	Do# ₃ (3)	1 +	Sol ₃ (1)	3 +	Do# ₄	2 -
Sol# ₂	3 +	Re ₃ (1)	2 +	Sol ₃ (2)	3 +	Re ₄	2 +
La ₂ (1)	3 +	Re ₃ (2)	2 +	Sol ₃ (3)	1 -	Re# ₄	2 +
La ₂ (2)	3 +	Re ₃ (3)	1 -	Sol ₃ (4)	1 +	Mi ₄ (1)	3 +
La ₂ (3)	1 -	Re# ₃ (1)	2 -	Sol# ₃ (1)	2 +	Mi ₄ (2)	3 +
La ₂ (4)	1 -	Re# ₃ (2)	1 -	Sol# ₃ (2)	1 -	Mi ₄ (3)	2 -
La# ₂ (1)	3 +	Re# ₃ (3)	3 +	Sol# ₃ (3)	2 -	Fa ₄ (1)	2 +
La# ₂ (2)	3 +	Re# ₃ (4)	3 +	Sol# ₃ (4)	2 +	Fa ₄ (2)	3 -
La# ₂ (3)	2 +	Re# ₃ (5)	3 +	La ₃ (1)	3 +	Fa ₄ (3)	3 +
La# ₂ (4)	2 +	Re# ₃ (6)	1 -	La ₃ (2)	1 +	Fa# ₄ (1)	1 +
Si ₂ (1)	3 +	Mi ₃ (1)	1 -	La ₃ (3)	2 +	Fa# ₄ (2)	2 +
Si ₂ (2)	3 +	Mi ₃ (2)	3 +	La# ₃ (1)	3 +	Fa# ₄ (3)	2 -
Si ₂ (3)	2 +	Fa ₃ (1)	3 +	La# ₃ (2)	1 +	Fa# ₄ (4)	2 +
Si ₂ (4)	1 -	Fa ₃ (2)	2 +	La# ₃ (3)	2 +	Sol ₄ (1)	2 +
Do ₃ (1)	2 +	Fa ₃ (3)	-----	La# ₃ (4)	3 +	Sol ₄ (2)	3 +
Do ₃ (2)	3 +	Fa# ₃ (1)	3 +	Si ₃ (1)	1 +	Sol ₄ (3)	1 +

Mst.	Valor.	Mst.	Valor.	Mst.	Valor.	Mst.	Valor.
Sol# ₄ (1)	2 +	Do ₅ (4)	2 +	Re# ₅ (1)	2 -	Mi ₅ (6)	2 +
Sol# ₄ (2)	3 +	Do# ₅ (1)	1 -	Re# ₅ (2)	3 -	Mi ₅ (7)	2 +
Sol# ₄ (3)	1 +-	Do# ₅ (2)	3 -	Re# ₅ (3)	3 -	Mi ₅ (8)	2 +
La ₄ (1)	2 -	Do# ₅ (3)	3 -	Re# ₅ (4)	3 -	Mi ₅ (9)	3 -
La ₄ (2)	3 +	Do# ₅ (4)	3 -	Re# ₅ (5)	3 -	Mi ₅ (10)	-----
La ₄ (3)	3 -	Do# ₅ (5)	3 -	Re# ₅ (6)	3 -	Mi ₅ (11)	3 -
La# ₄ (1)	2 -	Do# ₅ (6)	1 -	Re# ₅ (7)	3 -	Mi ₅ (12)	3 -
La# ₄ (2)	1 -	Do# ₅ (7)	3 -	Re# ₅ (8)	3 -	Fa ₅ (1)	1 +
La# ₄ (3)	3 +	Re ₅ (1)	2 +	Re# ₅ (9)	3 +	Fa ₅ (2)	3 -
La# ₄ (4)	3 +	Re ₅ (2)	2 -	Re# ₅ (10)	3 -	Fa ₅ (3)	3 -
La# ₄ (5)	3 +	Re ₅ (3)	3 -	Re# ₅ (11)	3 -	Fa ₅ (4)	3 -
Si ₄ (1)	2 +	Re ₅ (4)	1 -	Re# ₅ (12)	3 -	Fa ₅ (5)	1 +
Si ₄ (2)	3 +	Re ₅ (5)	3 +	Re# ₅ (13)	3 -	Fa ₅ (6)	-----
Si ₄ (3)	1 +	Re ₅ (6)	3 -	Re# ₅ (14)	3 -	Fa ₅ (7)	3 -
Si ₄ (4)	3 +	Re ₅ (7)	1 +	Mi ₅ (1)	1 +	Fa ₅ (8)	3 +
Si ₄ (5)	3 -	Re ₅ (8)	3 -	Mi ₅ (2)	3 -	Fa ₅ (9)	3 +
Do ₅ (1)	2 +	Re ₅ (9)	3 -	Mi ₅ (3)	3 -	Fa ₅ (10)	3 -
Do ₅ (2)	3 -	Re ₅ (10)	1 +	Mi ₅ (4)	2 -	Fa ₅ (11)	2 -
Do ₅ (3)	2 +	Re ₅ (11)	3 +	Mi ₅ (5)	3 -	Fa# ₅ (1)	3 -

Mst.	Valor.	Mst.	Valor.	Mst.	Valor.	Mst.	Valor.
Fa# ₅ (2)	3 +	Sol ₅ (3)	2 +	Sol# ₅ (2)	3 +	Sol# ₅ (21)	3 -
Fa# ₅ (3)	3 +	Sol ₅ (4)	3 +	Sol# ₅ (3)	2 +	Sol# ₅ (22)	3 -
Fa# ₅ (4)	3 -	Sol ₅ (5)	2 +	Sol# ₅ (4)	3 +	Sol# ₅ (23)	2 +
Fa# ₅ (5)	3 +	Sol ₅ (6)	2 -	Sol# ₅ (5)	2 +	La ₅ (1)	2 -
Fa# ₅ (6)	1 +	Sol ₅ (7)	3 -	Sol# ₅ (6)	3 -	La ₅ (2)	3 -
Fa# ₅ (7)	3 -	Sol ₅ (8)	-----	Sol# ₅ (7)	3 -	La ₅ (3)	3 -
Fa# ₅ (8)	3 -	Sol ₅ (9)	1 +	Sol# ₅ (8)	3 -	La ₅ (4)	2 +
Fa# ₅ (9)	3 -	Sol ₅ (10)	3 +	Sol# ₅ (9)	3 -	La ₅ (5)	1 +
Fa# ₅ (10)	3 -	Sol ₅ (11)	3 -	Sol# ₅ (10)	3 -	La ₅ (6)	3 -
Fa# ₅ (11)	2 +	Sol ₅ (12)	3 -	Sol# ₅ (11)	1 +	La ₅ (7)	3 -
Fa# ₅ (12)	3 -	Sol ₅ (13)	3 -	Sol# ₅ (12)	3 -	La ₅ (8)	3 -
Fa# ₅ (13)	3 +	Sol ₅ (14)	3 +	Sol# ₅ (13)	3 -	La ₅ (9)	3 -
Fa# ₅ (14)	2 +	Sol ₅ (15)	3 -	Sol# ₅ (14)	3 -	La ₅ (10)	3 +
Fa# ₅ (15)	2 +	Sol ₅ (16)	3 -	Sol# ₅ (15)	2 +	La ₅ (11)	3 -
Fa# ₅ (16)	3 +	Sol ₅ (17)	3 -	Sol# ₅ (16)	3 +	La ₅ (12)	3 -
Fa# ₅ (17)	3 +	Sol ₅ (18)	3 -	Sol# ₅ (17)	3 -	La# ₅ (1)	3 -
Fa# ₅ (18)	3 -	Sol ₅ (19)	3 -	Sol# ₅ (18)	3 -	La# ₅ (2)	3 -
Sol ₅ (1)	3 +	Sol ₅ (20)	3 +	Sol# ₅ (19)	3 -	La# ₅ (3)	3 -
Sol ₅ (2)	3 +	Sol# ₅ (1)	3 -	Sol# ₅ (20)	3 -	La# ₅ (4)	3 -

Mst.	Valor.	Mst.	Valor.	Mst.	Valor.
La#₅(5)	3 -	Si₅(8)	1 +	Do₆(11)	3 -
La#₅(6)	3 -	Si₅(9)	2 -	Do₆(12)	3 -
La#₅(7)	3 -	Si₅(10)	3 -	Do₆(13)	1 -
La#₅(8)	3 -	Si₅(11)	3 -		
La#₅(9)	3 -	Si₅(12)	3 -		
La#₅(10)	3 -	Si₅(13)	3 -		
La#₅(11)	3 -	Si₅(14)	3 -		
La#₅(12)	3 -	Si₅(15)	3 -		
La#₅(13)	2 -	Si₅(16)	3 -		
La#₅(14)	3 -	Do₆(1)	2 -		
La#₅(15)	3 +	Do₆(2)	3 -		
La#₅(16)	3 -	Do₆(3)	2 -		
Si₅(1)	3 +	Do₆(4)	3 -		
Si₅(2)	3 -	Do₆(5)	3 -		
Si₅(3)	3 -	Do₆(6)	2 -		
Si₅(4)	3 -	Do₆(7)	3 -		
Si₅(5)	3 -	Do₆(8)	3 -		
Si₅(6)	3 -	Do₆(9)	3 -		
Si₅(7)	3 -	Do₆(10)	3 -		

11.3 LONGITUDES DE ONDA Y DE TUBO

11.3.1 Medidas preliminares

La medida calculada de la longitud de onda de cada muestra se expresa en centímetros con dos decimales tomando como referencia la semilongitud de onda que corresponde a la distancia entre dos vientres o nodos. Ya sabemos que la longitud de onda en el tubo del clarinete en las fundamentales equivale a $\lambda/4$ -cuatro longitudes de tubo- dado que funciona como tubo cerrado. Para el cálculo se emplea la ecuación que relaciona la velocidad de propagación de la onda -calculada a una temperatura ordinaria de 15 °C resulta a 340 m/sg- con la frecuencia. El resultado de la operación equivale, en el caso que nos ocupa, a cuatro veces la longitud del tubo en las fundamentales, 1/3 de esta última en los terceros armónicos, 1/5 en los quintos armónicos y 1/7 en los séptimos, esto es, únicamente las fracciones impares.

Por supuesto, en función de la velocidad de propagación que consideremos, variará esta magnitud y, por tanto, colateralmente la longitud del tubo. Este parámetro es fundamental para determinar la naturaleza del sonido objeto de análisis, puesto que nos revela si su procedencia corresponde a un tubo cerrado o abierto. Por tanto, en función de la índole del complejo sonoro obtendremos una medida u otra.

Por lo que respecta a la longitud de tubo, se consigna la *longitud operativa o real* del mismo, la cual nos refiere la porción de tubo cuya columna gaseosa se halla en vibración, con la corrección final aplicada. Recuérdese que esta medida se aplica a la longitud teórica del tubo la cual, a su vez, se obtiene como resultado de dividir la longitud de onda por cuatro. A partir de las fundamentales, las longitudes de tubo en los armónicos sucesivos equivalen a aplicar la fracción del número que designa su orden. Por consiguiente, se aplica en cada sonido la fórmula preceptiva para los tubos cilíndricos cerrados ($L_f = L_o - 2'r$). Para ello se considera para el cálculo del radio un valor medio de la sección cruzada del tubo, dado que el tubo no es perfectamente cilíndrico. Aunque sabemos que la corrección aumenta a medida que se incrementa la frecuencia, en aras de una mayor comprensión para el músico, se ha optado por utilizar la misma medida para todos los sonidos, por lo que los valores obtenidos se pueden considerar como relativos o aproximativos. Esta magnitud también se expresa en centímetros con dos decimales.

Por otra parte, esta longitud viene determinada por la digitación utilizada en cada sonido, de tal suerte que la longitud operativa del tubo, en la mayoría de los casos, comprende desde la boquilla hasta el primer orificio desactivado. Esto nos indica, además, la naturaleza del sonido, dado que en función de su longitud de tubo sabremos si se trata de un armónico u otro.

11.3.2 Resultados experimentales obtenidos

Tabla 11.4 Longitudes de onda y de tubo real de las muestras analizadas

Mst.	λ	L_r	Mst.	λ	L_r	Mst.	λ	L_r
Mi ₂	229'69	55'39	Do ₃ (3)	144'03	33'98	Fa# ₃ (2)	105'49	24'34
Fa ₂	217'62	52'37	Do# ₃ (1)	135'76	31'91	Fa# ₃ (3)	101'32	23'30
Fa# ₂	205'83	49'42	Do# ₃ (2)	135'36	31'81	Fa# ₃ (4)	102'50	23'60
Sol ₂	191'85	45'93	Do# ₃ (3)	136'01	31'97	Sol ₃ (1)	95'55	21'86
Sol# ₂	179'12	42'75	Re ₃ (1)	127'89	29'94	Sol ₃ (2)	95'96	22'05
La ₂ (1)	1169'44	40'33	Re ₃ (2)	128'24	30'03	Sol ₃ (3)	96'30	22'05
La ₂ (2)	168'63	40'13	Re ₃ (3)	128'71	30'15	Sol ₃ (4)	96'16	22'01
La ₂ (3)	171'76	40'91	Re# ₃ (1)	121'85	28'43	Sol# ₃ (1)	90'58	20'62
La ₂ (4)	171'65	40'88	Re# ₃ (2)	121'41	28'32	Sol# ₃ (2)	90'90	20'70
La# ₂ (1)	160'64	38'13	Re# ₃ (3)	119'50	27'85	Sol# ₃ (3)	91'03	20'73
La# ₂ (2)	160'54	38'11	Re# ₃ (4)	119'57	27'86	Sol# ₃ (4)	90'71	20'65
La# ₂ (3)	162'72	38'66	Re# ₃ (5)	119'70	27'90	La ₃ (1)	85'16	19'26
La# ₂ (4)	161'23	38'28	Re# ₃ (6)	121'48	28'34	La ₃ (2)	85'69	19'39
Si ₂ (1)	151'93	35'95	Mi ₃ (1)	114'40	26'57	La ₃ (3)	85'44	19'33
Si ₂ (2)	151'52	35'85	Mi ₃ (2)	113'73	26'40	La# ₃ (1)	80'45	18'08
Si ₂ (3)	152'05	35'98	Fa ₃ (1)	107'53	24'85	La# ₃ (2)	80'87	18'19
Si ₂ (4)	152'80	36'17	Fa ₃ (2)	107'68	24'89	La# ₃ (3)	80'76	18'16
Do ₃ (1)	143'72	33'90	Fa ₃ (3)	-----	-----	La# ₃ (4)	80'62	18'13
Do ₃ (2)	142'23	33'53	Fa# ₃ (1)	101'17	23'26	Si ₃ (1)	76'40	55'27

Mst.	λ	L_r	Mst.	λ	L_r	Mst.	λ	L_r
Si₃ (2)	77'44	56'04	Sol#₄(1)	45'38	32'01	Do₅ (4)	36'00	42'97
Do₄ (1)	72'04	52'00	Sol#₄(2)	45'26	31'92	Do#₅(1)	34'03	42'01
Do₄ (2)	71'90	51'90	Sol#₄(3)	45'41	32'03	Do#₅(2)	35'07	43'83
Do#₄	68'30	49'20	La₄ (1)	42'97	31'70	Do#₅(3)	34'22	42'25
Re₄	64'05	46'01	La₄ (2)	43'12	30'31	Do#₅(4)	34'78	25'56
Re#₄	63'38	45'51	La₄ (3)	42'95	31'68	Do#₅(5)	34'28	25'18
Mi₄(1)	57'00	40'72	La#₄(1)	40'50	28'35	Do#₅(6)	34'03	23'49
Mi₄(2)	56'48	40'33	La#₄(2)	40'48	28'33	Do#₅(7)	34'28	25'18
Mi₄(3)	57'46	43'32	La#₄(3)	40'37	28'25	Re₅ (1)	32'04	39'52
Fa₄ (1)	53'89	39'89	La#₄(4)	40'24	28'15	Re₅ (2)	32'21	39'73
Fa₄ (2)	54'11	38'55	La#₄(5)	40'26	28'17	Re₅ (3)	31'96	37'92
Fa₄ (3)	53'78	37'66	Si₄ (1)	38'17	26'60	Re₅ (4)	32'13	39'63
Fa#₄(1)	50'92	36'16	Si₄ (2)	38'13	26'57	Re₅ (5)	31'99	39'46
Fa#₄(2)	50'85	37'61	Si₄ (3)	38'19	26'61	Re₅ (6)	33'00	40'72
Fa#₄(3)	51'11	37'80	Si₄ (4)	38'10	26'55	Re₅ (7)	32'10	39'60
Fa#₄(4)	50'87	37'62	Si₄ (5)	38'40	26'77	Re₅ (8)	32'50	23'85
Sol₄(1)	48'05	35'51	Do₅ (1)	36'01	24'98	Re₅ (9)	32'54	23'88
Sol₄(2)	47'82	33'84	Do₅ (2)	36'14	25'08	Re₅(10)	32'11	23'55
Sol₄(3)	48'09	35'54	Do₅ (3)	36'01	24'98	Re₅(11)	32'37	23'75

Mst.	λ	L_r	Mst.	λ	L_r	Mst.	λ	L_r
Re# ₅ (1)	30'41	37'48	Mi ₅ (6)	28'56	33'67	Fa# ₅ (2)	25'16	30'92
Re# ₅ (2)	30'68	37'82	Mi ₅ (7)	28'55	35'16	Fa# ₅ (3)	25'38	31'20
Re# ₅ (3)	30'53	37'63	Mi ₅ (8)	28'59	35'21	Fa# ₅ (4)	25'71	31'61
Re# ₅ (4)	30'56	36'17	Mi ₅ (9)	28'79	35'46	Fa# ₅ (5)	25'34	29'65
Re# ₅ (5)	30'64	37'77	Mi ₅ (10)	28'91	21'15	Fa# ₅ (6)	25'48	29'82
Re# ₅ (6)	30'50	37'60	Mi ₅ (11)	29'02	21'15	Fa# ₅ (7)	25'82	30'25
Re# ₅ (7)	30'76	36'42	Mi ₅ (12)	29'17	49'02	Fa# ₅ (8)	26'31	32'33
Re# ₅ (8)	29'81	36'73	Fa ₅ (1)	27'00	31'72	Fa# ₅ (9)	25'75	39'81
Re# ₅ (9)	31'51	38'86	Fa ₅ (2)	27'14	31'90	Fa# ₅ (10)	25'24	29'52
Re# ₅ (10)	30'47	37'56	Fa ₅ (3)	27'14	31'90	Fa# ₅ (11)	25'15	41'98
Re# ₅ (11)	30'46	37'55	Fa ₅ (4)	27'35	32'16	Fa# ₅ (12)	25'91	44'81
Re# ₅ (12)	30'78	22'56	Fa ₅ (5)	26'98	31'70	Fa# ₅ (13)	25'04	41'79
Re# ₅ (13)	30'53	22'37	Fa ₅ (6)	-----	-----	Fa# ₅ (14)	25'40	42'42
Re# ₅ (14)	31'71	23'25	Fa ₅ (7)	27'46	32'30	Fa# ₅ (15)	25'44	42'49
Mi ₅ (1)	28'61	33'73	Fa ₅ (8)	26'91	45'06	Fa# ₅ (16)	25'37	42'17
Mi ₅ (2)	28'81	33'98	Fa ₅ (9)	26'83	44'92	Fa# ₅ (17)	25'19	42'05
Mi ₅ (3)	28'83	35'51	Fa ₅ (10)	26'60	20'17	Fa# ₅ (18)	25'89	23'92
Mi ₅ (4)	28'73	35'38	Fa ₅ (11)	27'05	18'26	Sol ₅ (1)	23'71	39'46
Mi ₅ (5)	28'89	34'08	Fa# ₅ (1)	25'59	31'46	Sol ₅ (2)	23'90	39'80

Mst.	λ	L_r	Mst.	λ	L_r	Mst.	λ	L_r
Sol ₅ (3)	22'98	39'94	Sol# ₅ (2)	22'46	37'28	Sol# ₅ (21)	23'04	49'81
Sol ₅ (4)	23'95	41'91	Sol# ₅ (3)	22'63	37'57	Sol# ₅ (22)	23'13	50'01
Sol ₅ (5)	23'98	39'94	Sol# ₅ (4)	22'61	37'54	Sol# ₅ (23)	22'62	48'87
Sol ₅ (6)	24'14	40'22	Sol# ₅ (5)	22'65	39'11	La ₅ (1)	21'49	35'58
Sol ₅ (7)	24'39	40'65	Sol# ₅ (6)	22'92	38'08	La ₅ (2)	21'32	35'28
Sol ₅ (8)	-----	-----	Sol# ₅ (7)	22'85	37'96	La ₅ (3)	21'30	35'25
Sol ₅ (9)	24'03	40'02	Sol# ₅ (8)	22'92	38'08	La ₅ (4)	21'37	35'37
Sol ₅ (10)	24'19	40'30	Sol# ₅ (9)	22'93	38'10	La ₅ (5)	21'41	35'44
Sol ₅ (11)	24'45	40'76	Sol# ₅ (10)	22'94	39'02	La ₅ (6)	21'74	37'52
Sol ₅ (12)	24'15	52'53	Sol# ₅ (11)	22'69	39'18	La ₅ (7)	21'85	26'78
Sol ₅ (13)	24'33	52'71	Sol# ₅ (12)	22'88	39'91	La ₅ (8)	21'78	25'20
Sol ₅ (14)	23'26	15'42	Sol# ₅ (13)	22'77	39'32	La ₅ (9)	22'40	49'87
Sol ₅ (15)	24'42	28'50	Sol# ₅ (14)	22'81	26'48	La ₅ (10)	21'26	45'81
Sol ₅ (16)	24'48	20'52	Sol# ₅ (15)	22'63	26'26	La ₅ (11)	21'72	37'48
Sol ₅ (17)	25'52	29'87	Sol# ₅ (16)	22'59	26'21	La ₅ (12)	21'76	36'05
Sol ₅ (18)	25'25	29'53	Sol# ₅ (17)	23'54	27'40	La# ₅ (1)	20'57	35'47
Sol ₅ (19)	24'34	20'12	Sol# ₅ (18)	23'39	27'21	La# ₅ (2)	20'44	35'24
Sol ₅ (20)	23'39	50'60	Sol# ₅ (19)	23'35	27'16	La# ₅ (3)	21'27	36'69
Sol# ₅ (1)	23'19	40'05	Sol# ₅ (20)	23'42	50'67	La# ₅ (4)	21'19	35'05

Mst.	λ	L_r	Mst.	λ	L_r	Mst.	λ	L_r
La#₅(5)	21'19	35'05	Si₅(8)	19'61	43'59	Do₆(11)	18'79	32'35
La#₅(6)	21'26	35'18	Si₅(9)	19'17	41'10	Do₆(12)	18'26	29'93
La#₅(7)	21'33	36'80	Si₅(10)	19'20	41'17	Do₆(13)	19'08	42'40
La#₅(8)	21'13	24'38	Si₅(11)	19'42	41'67			
La#₅(9)	21'18	35'04	Si₅(12)	19'25	31'16			
La#₅(10)	20'44	33'74	Si₅(13)	19'26	22'05			
La#₅(11)	21'31	45'92	Si₅(14)	19'27	22'06			
La#₅(12)	20'34	43'74	Si₅(15)	19'55	51'73			
La#₅(13)	20'31	35'01	Si₅(16)	19'35	51'18			
La#₅(14)	20'36	43'78	Do₆(1)	18'11	38'72			
La#₅(15)	20'10	23'90	Do₆(2)	18'37	39'30			
La#₅(16)	20'95	24'16	Do₆(3)	18'09	38'67			
Si₅(1)	18'64	41'41	Do₆(4)	18'55	39'71			
Si₅(2)	19'73	43'86	Do₆(5)	18'37	39'30			
Si₅(3)	19'48	43'30	Do₆(6)	18'11	38'72			
Si₅(4)	19'27	41'33	Do₆(7)	18'18	38'88			
Si₅(5)	19'22	41'22	Do₆(8)	18'52	39'63			
Si₅(6)	19'21	41'19	Do₆(9)	18'41	40'89			
Si₅(7)	19'61	42'09	Do₆(10)	18'23	38'99			

11.3.3 Análisis y discusión de los resultados experimentales obtenidos

Lo primero que llama la atención es que las longitudes de onda equivalen a cuatro longitudes de tubo con la corrección final aplicada, lo cual nos revela el funcionamiento cerrado de su tubo, como no podía ser de otra forma. En el registro agudo, un tercio de esta medida, dado que se trata de terceros armónicos; en el registro sobreagudo, un quinto, séptimo, noveno y undécimo, según se trate de un tramo u otro.

Las longitudes de tubo se pueden verificar midiendo la distancia existente entre el límite superior del instrumento –la boquilla- y el primer orificio abierto por debajo de la columna vibrante.

Se advierte, por otra parte, que la proporcionalidad de ambas longitudes a medida que se asciende por la escala se quiebra en determinados sonidos. En efecto, en muchos casos la medida consignada no coincide en los sonidos de una misma nota. Las derivaciones que se obtienen por digitación cruzada no respetan esta regla ya que el orificio abierto no segmenta la columna en ese punto sino que actúa como un filtro de paso⁷³. Especialmente en el registro agudo muchos sonidos se obtienen con armónicos diferentes que presentan distinta digitación y, por consiguiente, desigual longitud de onda.

Se observa también que determinadas longitudes de tubo coinciden en algunos sonidos de diferentes registros. Esto resulta ordinario, pues se trata de armónicos que utilizan la misma longitud de onda y tubo que sus fundamentales, ya que de otro modo sería imposible obtener todos los sonidos mediante pequeñas subdivisiones dadas las limitaciones físicas del tubo.

Por último, se aprecia cómo las longitudes de tubo de las frecuencias más altas de cada registro o tramo exceden milimétricamente el orificio donde se refleja la onda. Ello es debido al fenómeno de la corrección final del tubo sobradamente tratado.

- *Aplicaciones prácticas de interés musical.* Las longitudes de onda nos revelan el funcionamiento acústico del tubo y, por tanto, nos aporta la razón de la diferencia en el ámbito sonoro y en su tesitura respecto de sus homólogos. En cuanto a las longitudes de tubo, son útiles para comprender y optimizar la afinación del instrumento. Veamos algunos principios que deberán considerarse en la ejecución musical:

- A partir de un punto determinado, la longitud de tubo afecta serios problemas para emitir frecuencias precisas, debido al fenómeno de la corrección del extremo final. Estas medidas, que se presentan a continuación, deben tenerse en cuenta en la afinación del instrumento, y el uso de los sonidos emitibles, por consiguiente, deberá moderarse: en las fundamentales no es aconsejable usar sonidos que utilicen menos de 26 cm de tubo; en los terceros armónicos < 24 cm; en los quintos, < 31 cm; en los séptimos < 36 cm.
- Las longitudes de tubo más largas aportan una afinación más precisa y un timbre más homogéneo dado que el efecto de la corrección del extremo final queda invalidado y, por otra parte, se dispone de cierto margen espacial para que se verifiquen las resonancias, por lo que se recomienda su uso para notas importantes del discurso musical que precisen un especial relieve.

⁷³ Véase el subapartado 16.2.2.

- Al contrario que las ondas con una longitud considerable, las ondas con una corta longitud y de frecuencia elevada no se reflejan en el primer orificio abierto sino que se transmiten por el enrejado de orificios tonales abiertos irradiándose al exterior y debilitando, por tanto, las ondas estacionarias. Por consiguiente, es preceptivo limitar el uso de estos sonidos a pasajes rápidos o notas de adorno y utilizar el armónico superior para notas importantes.

11.4 ESPECTROGRAMAS Y COMPOSICION ARMONICA

11.4.1 Medidas preliminares

Para obtener el contenido espectral de todas las muestras se ha utilizado el mismo software que en las frecuencias. Los espectrogramas se han capturado optimizados para una mejor visualización de su contenido, esto es, solo se muestra la porción de gráfico donde figuran componentes armónicos. Cada uno de estos diagramas nos muestra los armónicos presentes con sus diferentes intensidades medidas en el eje de coordenadas y sus frecuencias mensuradas en el eje de abscisas. Cada línea vertical representa un armónico dispuestos por número de orden. Nótese que cuando existe un espacio entre las líneas, éste corresponderá a la ausencia del armónico que debería estar dispuesto en él, y por tanto el siguiente componente deberá numerarse considerando esta ausencia.

Se ha considerado un rango de amplitud de 50 dB, dado que es ésta la amplitud máxima, aproximadamente, que da el clarinete, y un grado de ponderación tomando como referencia -10 db, para de este modo captar el ámbito de formantes -en torno a los 16 primeros en las fundamentales-. Veámos, a modo de ejemplo, el modelo de espectrograma que se ha utilizado y su optimización:

Fig. 11.1 Espectrograma del Mi_2

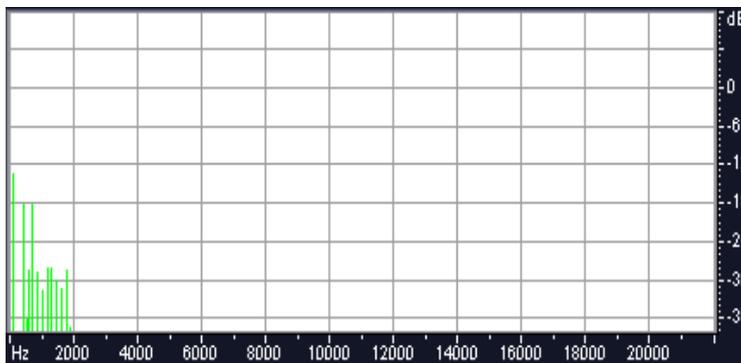
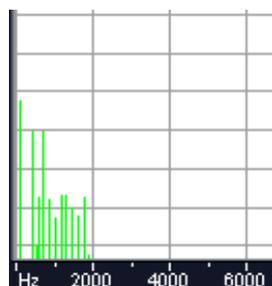


Fig. 11.2 Espectrograma optimizado del Mi_2 

Conviene recordar en relación con este parámetro, que el contenido espectral o número de componentes viene determinado por el modo de excitación de la columna gaseosa, esto es, por la forma de la embocadura y por la forma interior del tubo. Además, de forma secundaria, por otros factores adicionales como son los formantes del instrumento, la forma de embocar del instrumentista junto con su cavidad bucal y su respiración diafragmática, la intensidad del sonido, la lengüeta, etc. Por consiguiente debemos considerar estos valores como aproximativos y relativos que pueden sufrir ligeras alteraciones como consecuencia de la influencia de estos factores.

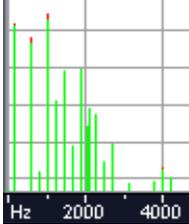
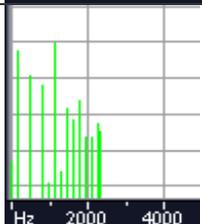
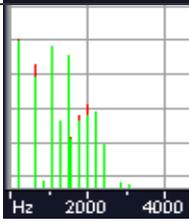
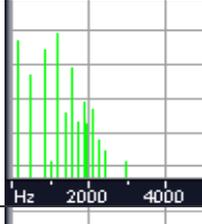
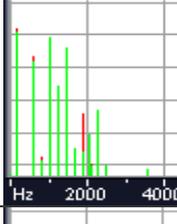
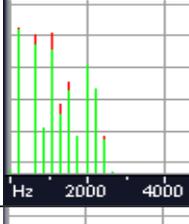
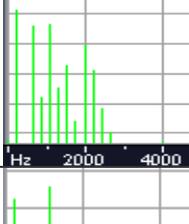
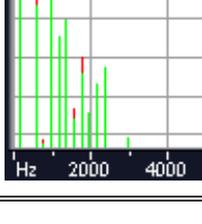
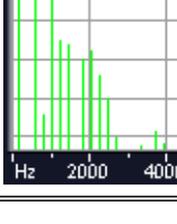
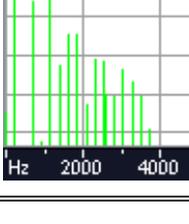
Una vez obtenidos los espectrogramas, se ha considerado útil incluir un subparámetro que recoja los componentes armónicos presentes en cada muestra de forma más clara. Para ello, se han contabilizado y numerado todos sus componentes -que deberán asociarse con las notas de cada serie armónica para su identificación- y se han dispuesto en las tablas correspondientes. Los números que figuran en **negrita** corresponden a los armónicos más prominentes.

Este parámetro resulta fundamental para definir y comprender el color del instrumento. Efectivamente, en ocasiones cuando hablamos de timbre nos referimos al color del sonido. Este es un modo de definir el timbre en base a una impresión o sensación subjetiva que percibimos auditivamente y que asociamos gráfica y metafóricamente a una gradación de colores. Así un sonido determinado que presente escasos componentes armónicos presentará un timbre dulce pero a la vez nítido, mientras que un complejo sonoro prolífico en armónicos arrojará un color rico y brillante. Por su parte, una ausencia de armónicos pares en un sonido dado -supuesto en el que se halla incluido parcialmente el clarinete-, comportará un color aterciopelado y un tanto hueco.

La sensación del color del sonido siempre va asociada, además, a su frecuencia, de tal suerte que a medida que se asciende en la escala el sonido presentará un timbre más agudo que interpretaremos como un color más brillante y ligeramente chillón.

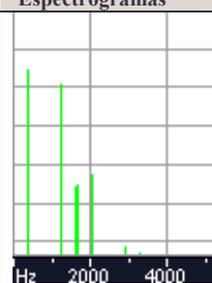
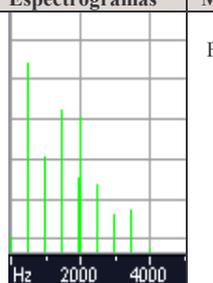
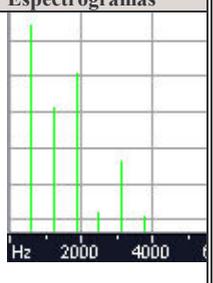
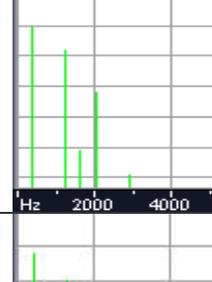
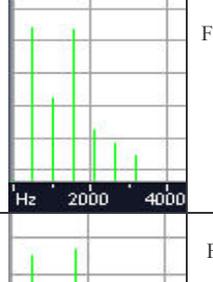
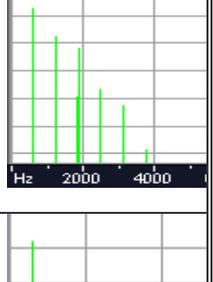
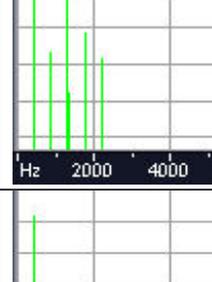
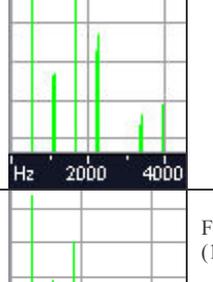
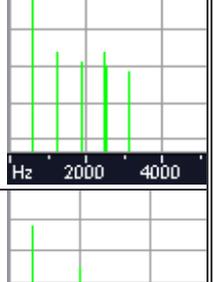
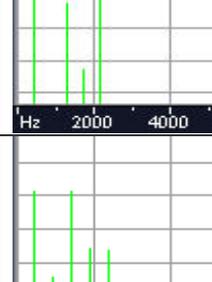
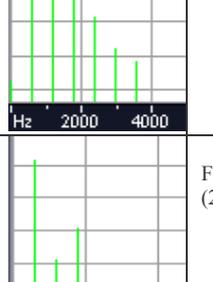
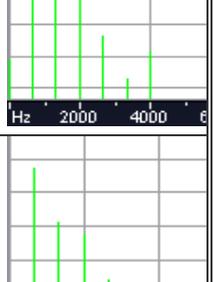
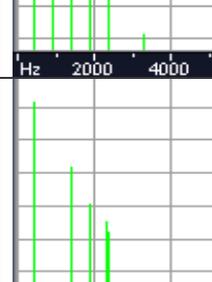
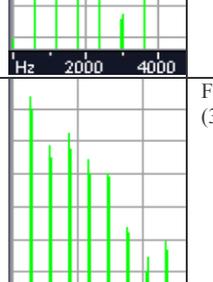
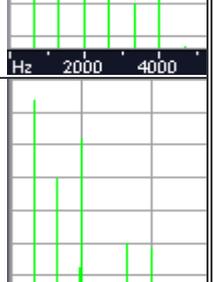
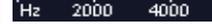
11.4.2 Resultados experimentales obtenidos

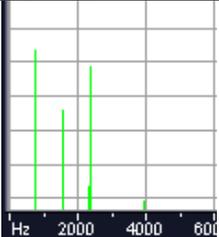
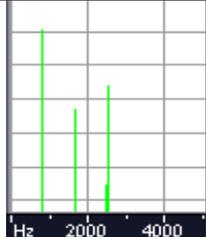
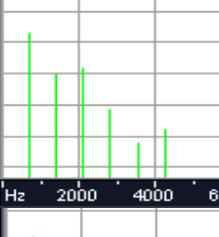
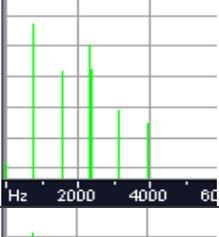
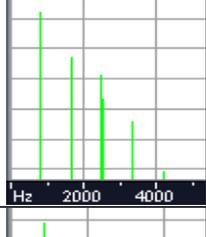
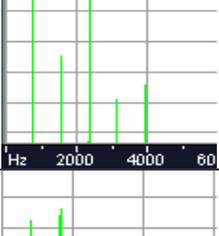
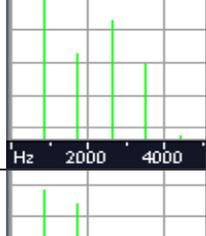
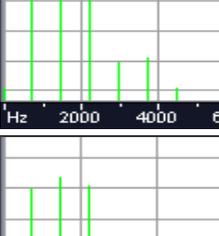
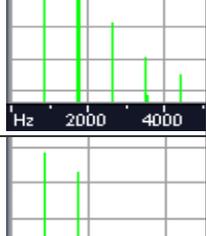
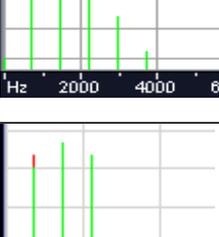
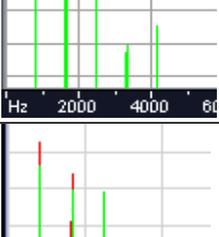
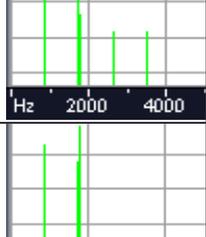
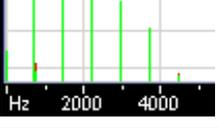
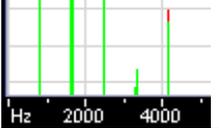
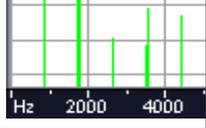
Tabla. 11.5 Espectrogramas de las muestras analizadas

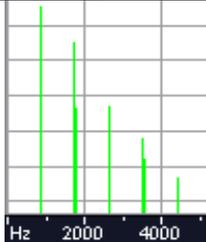
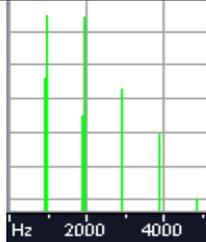
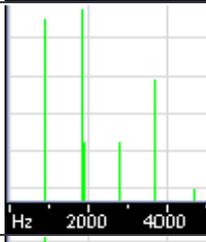
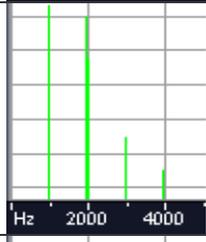
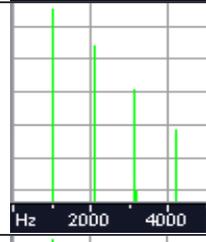
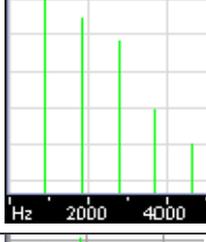
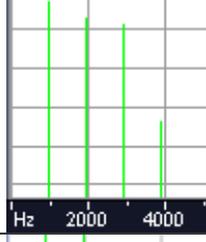
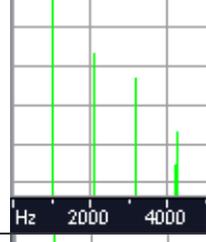
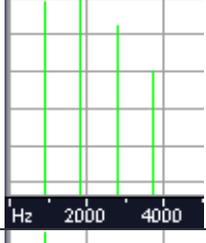
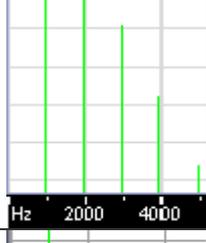
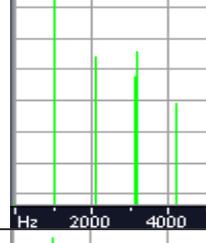
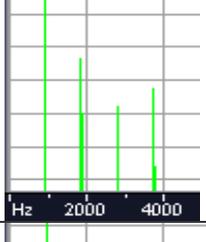
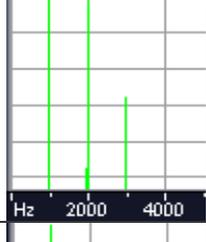
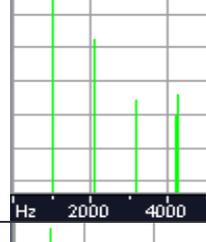
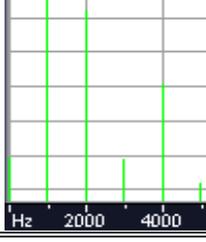
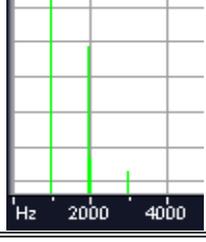
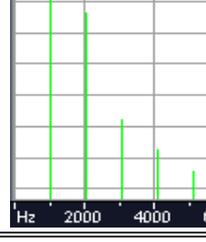
Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
Mi ₂		La ₂ (2)		La# ₂ (4)	
Fa ₂		La ₂ (3)		Si ₂ (1)	
Fa# ₂		La ₂ (4)		Si ₂ (2)	
Sol ₂		La# ₂ (1)		Si ₂ (3)	
Sol# ₂		La# ₂ (2)		Si ₂ (4)	
La ₂ (1)		La# ₂ (3)		Do ₃ (1)	

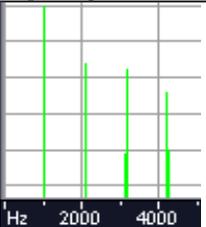
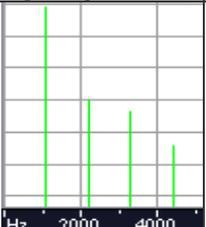
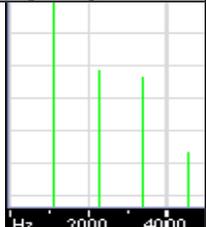
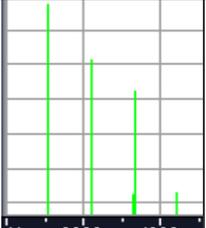
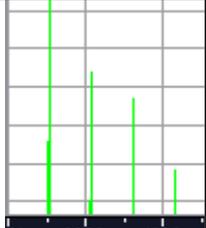
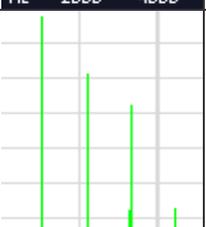
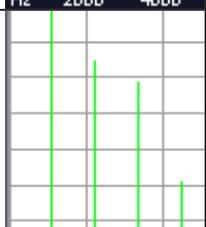
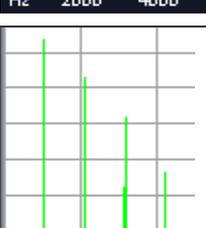
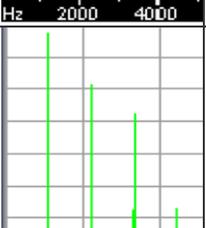
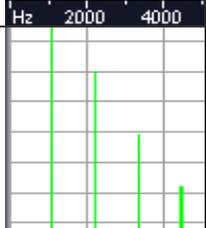
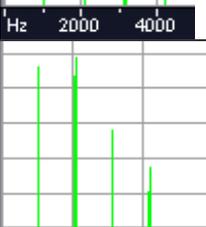
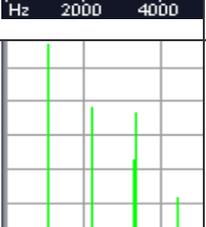
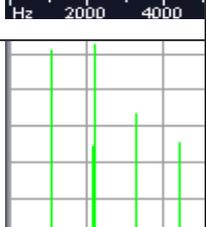
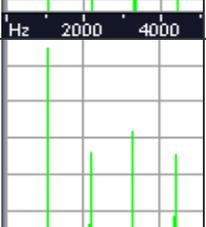
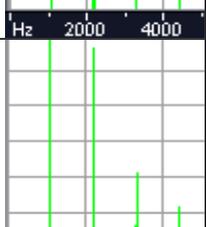
Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
Do ₃ (2)		Re ₃ (2)		Re# ₃ (5)	
Do ₃ (3)		Re ₃ (3)		Re# ₃ (6)	
Do# ₃ (1)		Re# ₃ (1)		Mi ₃ (1)	
Do# ₃ (2)		Re# ₃ (2)		Mi ₃ (2)	
Do# ₃ (3)		Re# ₃ (3)		Fa ₃ (1)	
Re ₃ (1)		Re# ₃ (4)		Fa ₃ (2)	

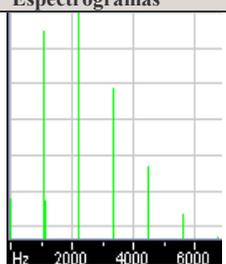
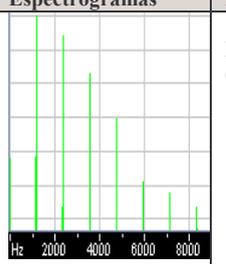
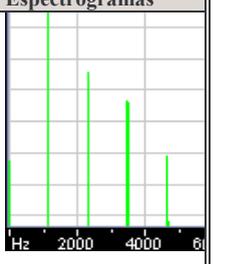
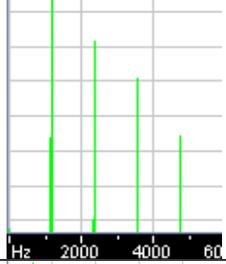
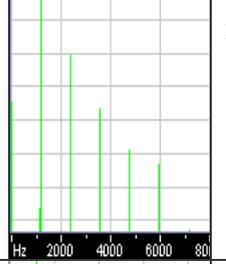
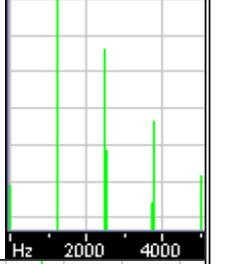
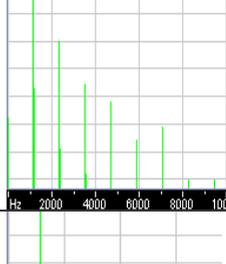
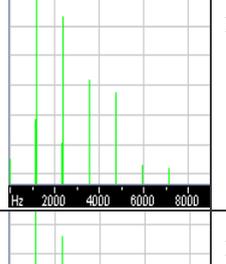
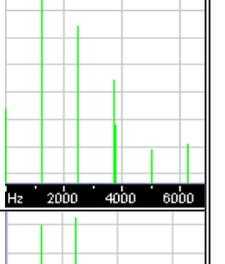
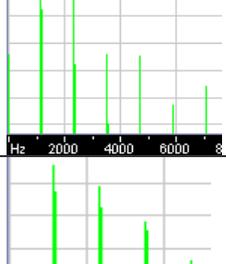
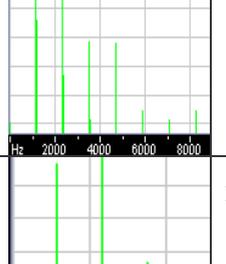
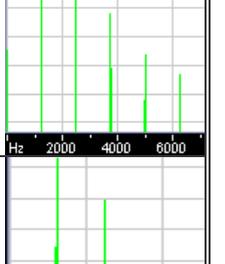
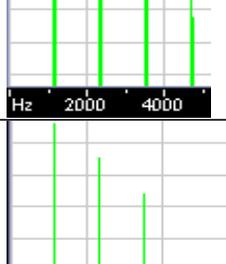
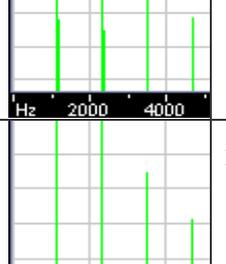
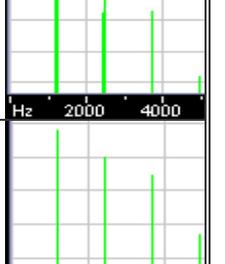
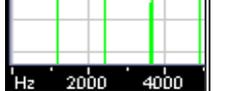
Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
Fa ₃ (3)		Sol ₃ (2)		Sol# ₃ (4)	
Fa# ₃ (1)		Sol ₃ (3)		La ₃ (1)	
Fa# ₃ (2)		Sol ₃ (4)		La ₃ (2)	
Fa# ₃ (3)		Sol# ₃ (1)		La ₃ (3)	
Fa# ₃ (4)		Sol# ₃ (2)		La# ₃ (1)	
Sol ₃ (1)		Sol# ₃ (3)		La# ₃ (2)	

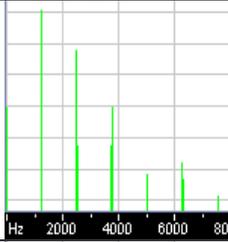
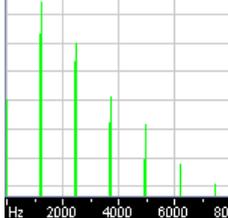
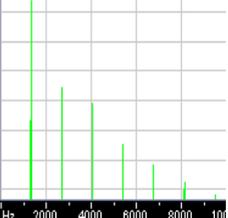
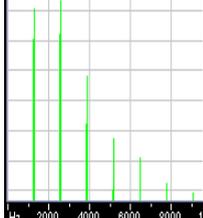
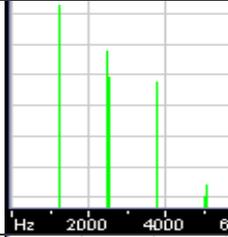
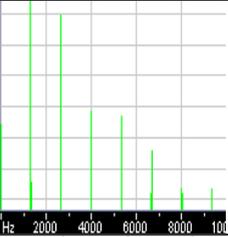
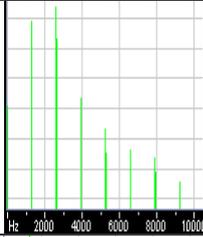
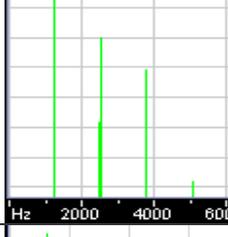
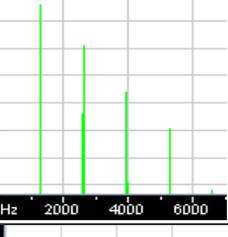
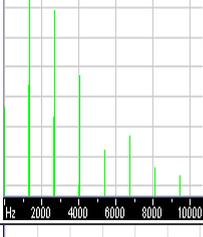
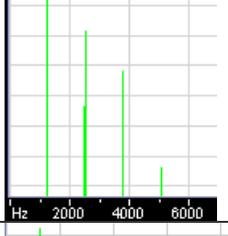
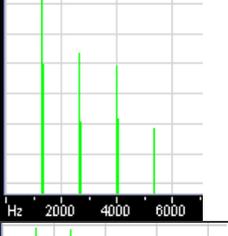
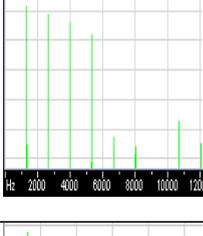
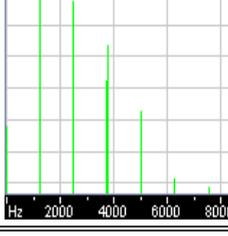
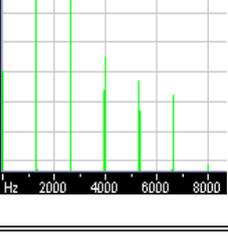
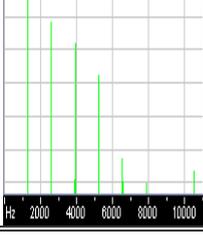
Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
La# ₃ (3)		Do# ₄		Fa ₄ (1)	
La# ₃ (4)		Re ₄		Fa ₄ (2)	
Si ₃ (1)		Re# ₄		Fa ₄ (3)	
Si ₃ (2)		Mi ₄ (1)		Fa# ₄ (1)	
Do ₄ (1)		Mi ₄ (2)		Fa# ₄ (2)	
Do ₄ (2)		Mi ₄ (3)		Fa# ₄ (3)	

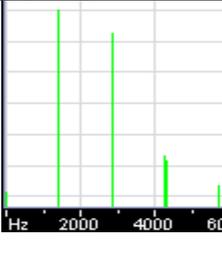
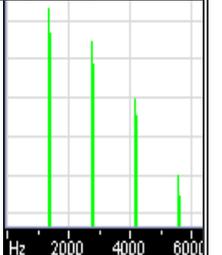
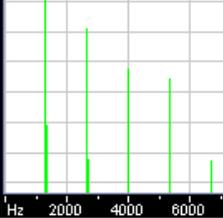
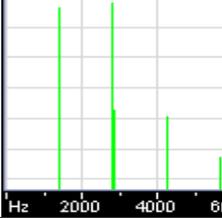
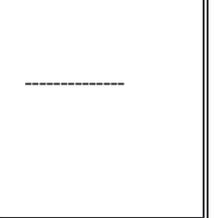
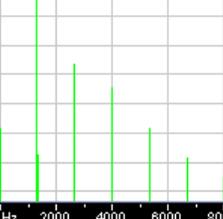
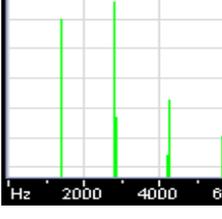
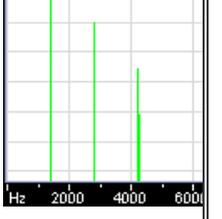
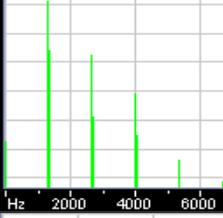
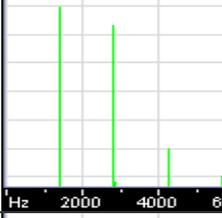
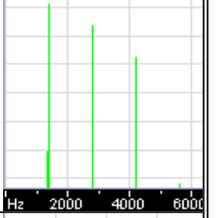
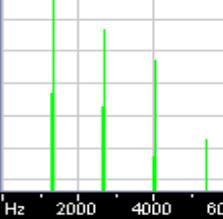
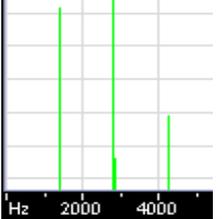
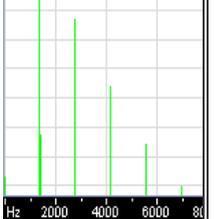
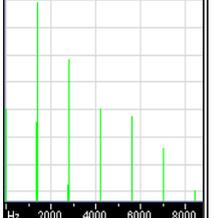
Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
Sol ₄ (1)		La ₄ (1)		La# ₄ (4)	
Sol ₄ (2)		La ₄ (2)		La# ₄ (5)	
Sol ₄ (3)		La ₄ (3)		Si ₄ (1)	
Sol# ₄ (1)		La# ₄ (1)		Si ₄ (2)	
Sol# ₄ (2)		La# ₄ (2)		Si ₄ (3)	
Sol# ₄ (3)		La# ₄ (3)		Si ₄ (4)	

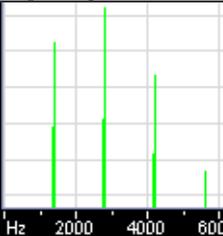
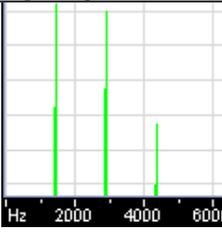
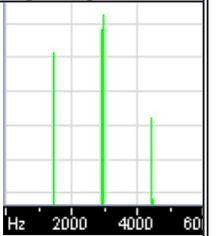
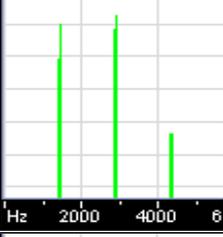
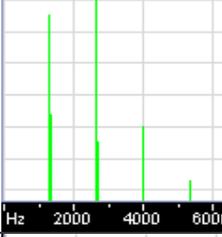
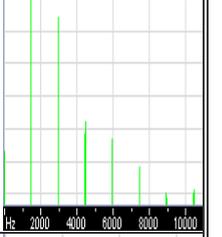
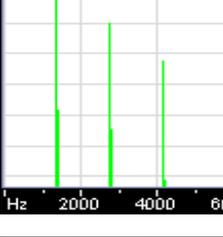
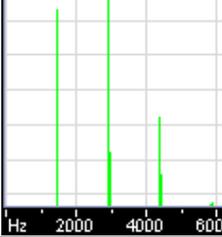
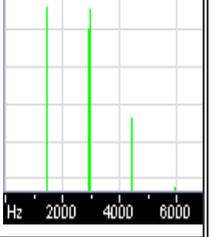
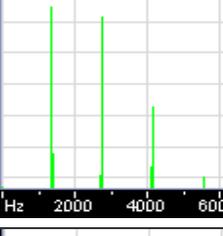
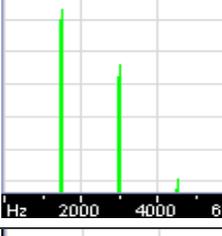
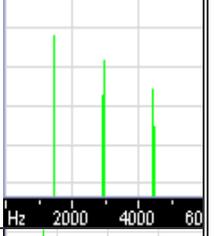
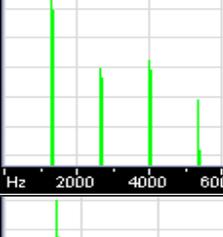
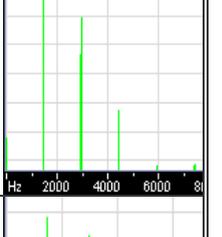
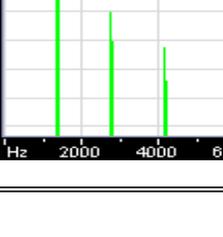
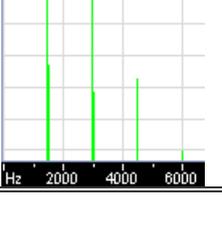
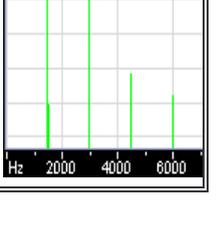
Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
Si ₄ (5)		Do# ₅ (2)		Re ₅ (1)	
Do ₅ (1)		Do# ₅ (3)		Re ₅ (2)	
Do ₅ (2)		Do# ₅ (4)		Re ₅ (3)	
Do ₅ (3)		Do# ₅ (5)		Re ₅ (4)	
Do ₅ (4)		Do# ₅ (6)		Re ₅ (5)	
Do# ₅ (1)		Do# ₅ (7)		Re ₅ (6)	

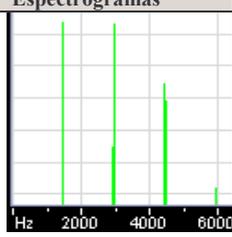
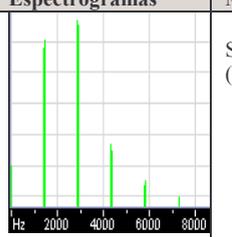
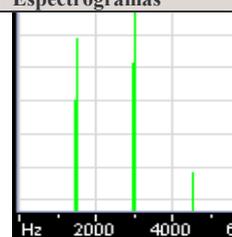
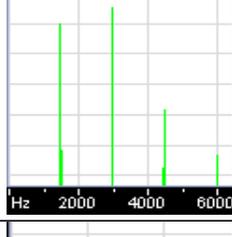
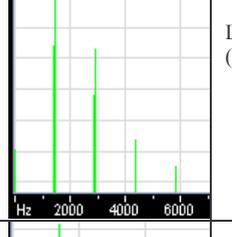
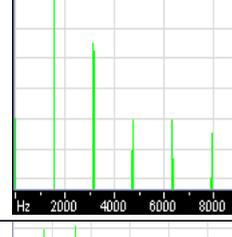
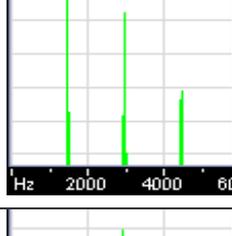
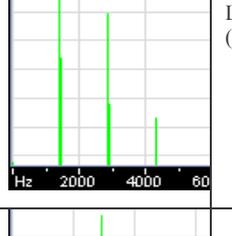
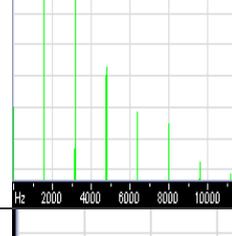
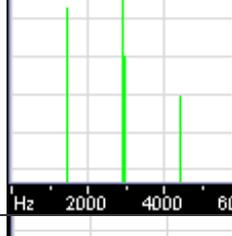
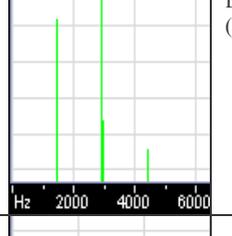
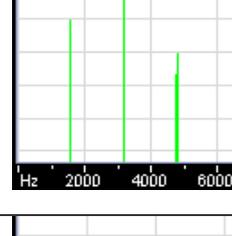
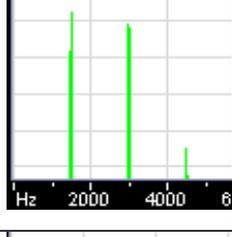
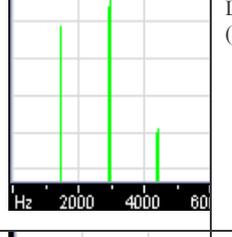
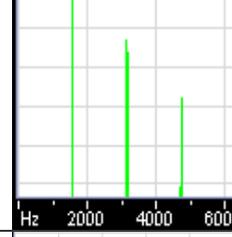
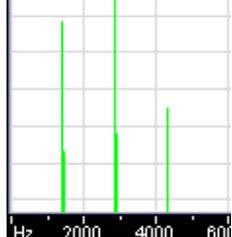
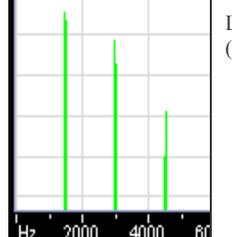
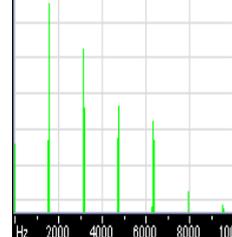
Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
Re ₅ (7)		Re# ₅ (2)		Re# ₅ (8)	
Re ₅ (8)		Re# ₅ (3)		Re# ₅ (9)	
Re ₅ (9)		Re# ₅ (4)		Re# ₅ (10)	
Re ₅ (10)		Re# ₅ (5)		Re# ₅ (11)	
Re ₅ (11)		Re# ₅ (6)		Re# ₅ (12)	
Re# ₅ (1)		Re# ₅ (7)		Re# ₅ (13)	

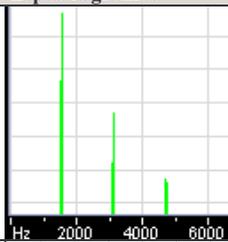
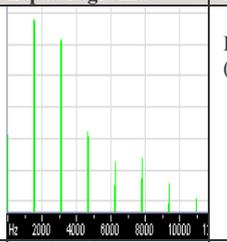
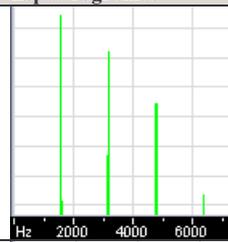
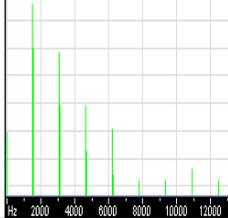
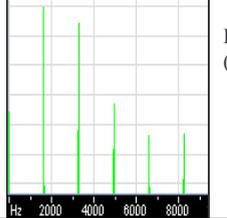
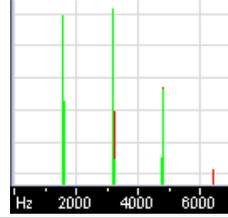
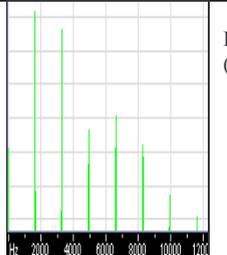
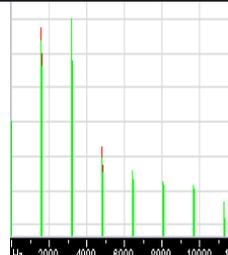
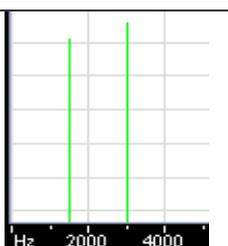
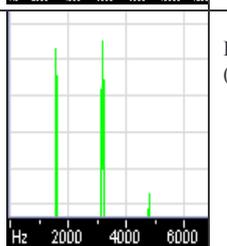
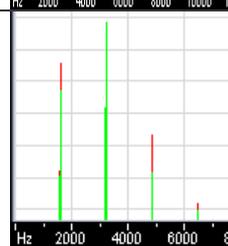
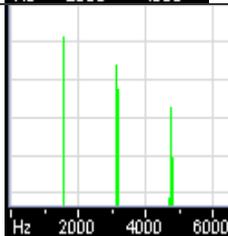
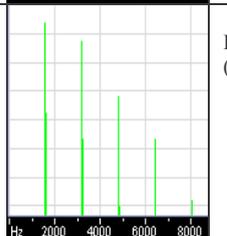
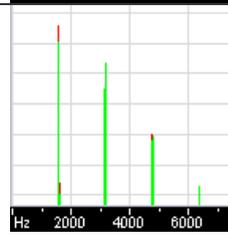
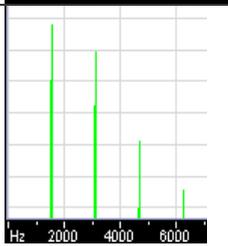
Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
Re# ₅ (14)		Mi ₅ (6)		Mi ₅ (12)	
Mi ₅ (1)		Mi ₅ (7)		Fa ₅ (1)	
Mi ₅ (2)		Mi ₅ (8)		Fa ₅ (2)	
Mi ₅ (3)		Mi ₅ (9)		Fa ₅ (3)	
Mi ₅ (4)		Mi ₅ (10)		Fa ₅ (4)	
Mi ₅ (5)		Mi ₅ (11)		Fa ₅ (5)	

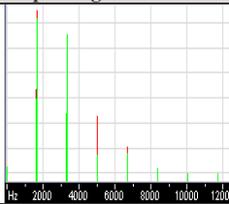
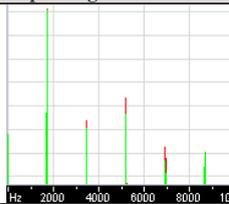
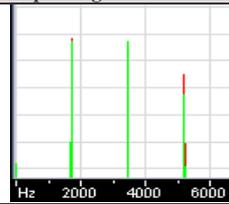
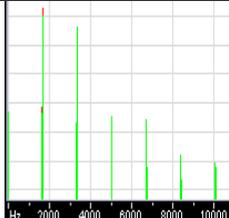
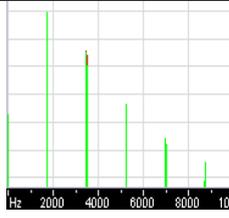
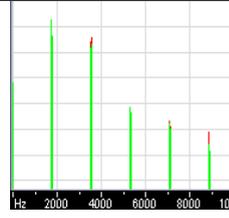
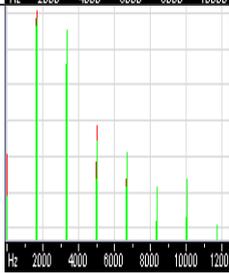
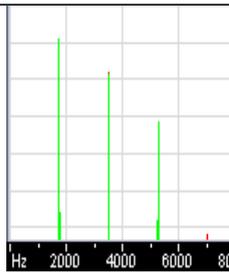
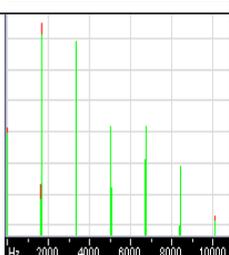
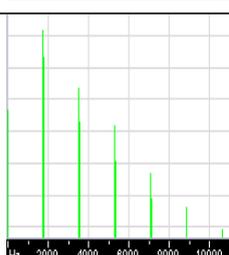
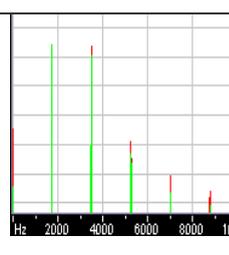
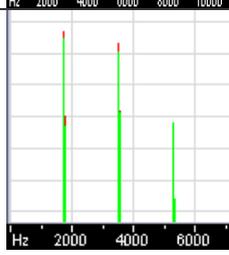
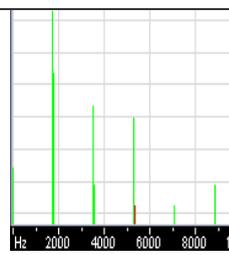
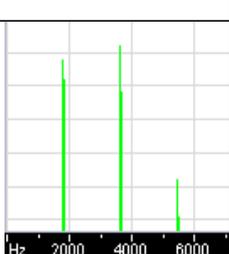
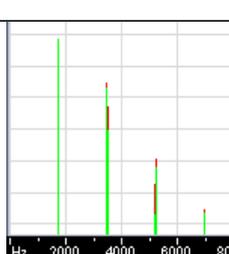
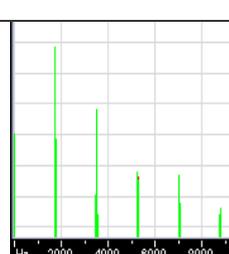
Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
Fa ₅ (6)		Fa# ₅ (1)		Fa# ₅ (7)	
Fa ₅ (7)		Fa# ₅ (2)		Fa# ₅ (8)	
Fa ₅ (8)		Fa# ₅ (3)		Fa# ₅ (9)	
Fa ₅ (9)		Fa# ₅ (4)		Fa# ₅ (10)	
Fa ₅ (10)		Fa# ₅ (5)		Fa# ₅ (11)	
Fa ₅ (11)		Fa# ₅ (6)		Fa# ₅ (12)	

Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
Fa# ₅ (13)		Sol ₅ (1)		Sol ₅ (7)	
Fa# ₅ (14)		Sol ₅ (2)		Sol ₅ (8)	
Fa# ₅ (15)		Sol ₅ (3)		Sol ₅ (9)	
Fa# ₅ (16)		Sol ₅ (4)		Sol ₅ (10)	
Fa# ₅ (17)		Sol ₅ (5)		Sol ₅ (11)	
Fa# ₅ (18)		Sol ₅ (6)		Sol ₅ (12)	

Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
Sol ₅ (13)		Sol ₅ (19)		Sol# ₅ (5)	
Sol ₅ (14)		Sol ₅ (20)		Sol# ₅ (6)	
Sol ₅ (15)		Sol# ₅ (1)		Sol# ₅ (7)	
Sol ₅ (16)		Sol# ₅ (2)		Sol# ₅ (8)	
Sol ₅ (17)		Sol# ₅ (3)		Sol# ₅ (9)	
Sol ₅ (18)		Sol# ₅ (4)		Sol# ₅ (10)	

Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
Sol# ₅ (11)		Sol# ₅ (17)		Sol# ₅ (23)	
Sol# ₅ (12)		Sol# ₅ (18)		La ₅ (1)	
Sol# ₅ (13)		Sol# ₅ (19)		La ₅ (2)	
Sol# ₅ (14)		Sol# ₅ (20)		La ₅ (3)	
Sol# ₅ (15)		Sol# ₅ (21)		La ₅ (4)	
Sol# ₅ (16)		Sol# ₅ (22)		La ₅ (5)	

Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
La ₅ (6)		La ₅ (12)		La# ₅ (6)	
La ₅ (7)		La# ₅ (1)		La# ₅ (7)	
La ₅ (8)		La# ₅ (2)		La# ₅ (8)	
La ₅ (9)		La# ₅ (3)		La# ₅ (9)	
La ₅ (10)		La# ₅ (4)		La# ₅ (10)	
La ₅ (11)		La# ₅ (5)		La# ₅ (11)	

Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
La# ₅ (12)		Si ₅ (2)		Si ₅ (8)	
La# ₅ (13)		Si ₅ (3)		Si ₅ (9)	
La# ₅ (14)		Si ₅ (4)		Si ₅ (10)	
La# ₅ (15)		Si ₅ (5)		Si ₅ (11)	
La# ₅ (16)		Si ₅ (6)		Si ₅ (12)	
Si ₅ (1)		Si ₅ (7)		Si ₅ (13)	

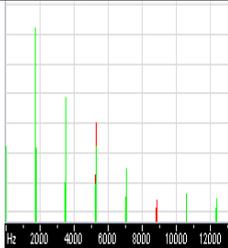
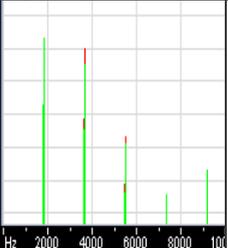
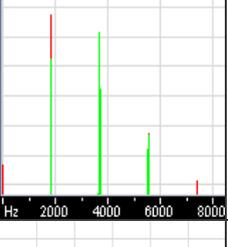
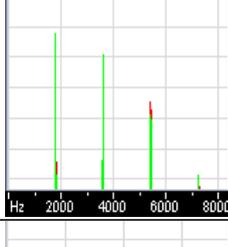
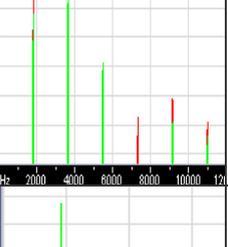
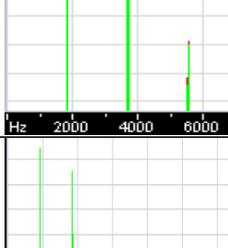
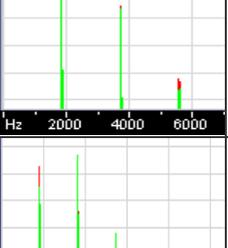
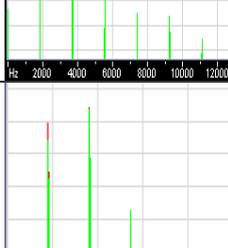
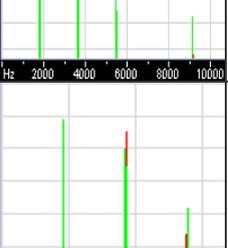
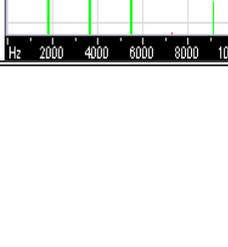
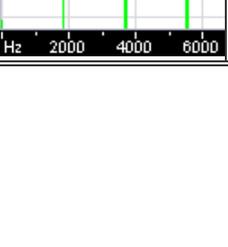
Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas	Mst.	Espectrogramas
Si ₅ (14)		Do ₆ (4)		Do ₆ (10)	
Si ₅ (15)		Do ₆ (5)		Do ₆ (11)	
Si ₅ (16)		Do ₆ (6)		Do ₆ (12)	
Do ₆ (1)		Do ₆ (7)		Do ₆ (13)	
Do ₆ (2)		Do ₆ (8)			
Do ₆ (3)		Do ₆ (9)			

Tabla 11.6 Composición armónica de las muestras analizadas

Mst.	Armónicos	Mst.	Armónicos	Mst.	Armónicos	Mst.	Armón
Mi ₂	1,3,4,5,6,7,9, 10,11,12,13.	Do ₃ (3)	1,3,5,6,7,8,9, 10,11,12,13, 17.	Fa# ₃ (2)	1,3,4,5,6,7.	Si ₃ (2)	1,3,4,5.
Fa ₂	1,3,5,6,7,9,10, 11,12,13,14.	Do# ₃ (1)	1,3,5,6,7,8,9, 10,11.	Fa# ₃ (3)	1,3,4,5,6,7, 10.	Do ₄ (1)	1,2,3,4, 5,7.
Fa# ₂	1,3,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14.	Do# ₃ (2)	1,3,5,6,8,9, 10,11,13.	Fa# ₃ (4)	1,3,4,5,6,7.	Do ₄ (2)	1,3,4,5.
Sol ₂	1,3,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14.	Do# ₃ (3)	1,3,5,6,7,8,9, 10.	Sol ₃ (1)	1,3,4,5,6,7,9, 10,11,12.	Do# ₄	1,2,3,4, 5, 6,7.
Sol# ₂	1,3,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,14, 15,16,17,18,19.	Re ₃ (1)	1,3,4,5,7,8,9.	Sol ₃ (2)	1,3,5,6.	Re ₄	1,2,3,4, 5,6.
La ₂ (1)	1,3,5,6,7,8,9, 10,11,12,15.	Re ₃ (2)	1,3,4,5,6,7,8, 9.	Sol ₃ (3)	1,3,4,5,6,7.	Re# ₄	1,2,3,4, 6,7.
La ₂ (2)	1,3,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,15, 16,17,18.	Re ₃ (3)	1,3,4,5,6,7,8, 9.	Sol ₃ (4)	1,3,4,5,6,7,8, 9,10,11.	Mi ₄ (1)	1,2,3,4, 5,6.
La ₂ (3)	1,3,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,15.	Re# ₃ (1)	1,3,4,5,6,7,8, 9.	Sol# ₃ (1)	1,3,4,5,6,7.	Mi ₄ (2)	1,2,3,4, 5,6.
La ₂ (4)	1,3,4,5,7,8,9,10, 11,12,13,14,15.	Re# ₃ (2)	1,3,5,6,7,8, 9.	Sol# ₃ (2)	1,3,4,5,6,7.	Mi ₄ (3)	1,2,3,4, 5,6,7,8.
La# ₂ (1)	1,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12.	Re# ₃ (3)	1,3,4,5,6,7,8, 11,12,15.	Sol# ₃ (3)	1,3,4,5,6,7,9.	Fa ₄ (1)	1,2,3,4, 5,6.
La# ₂ (2)	1,3,5,6,7,8,9,10,11 12,13,15,16,17,18.	Re# ₃ (4)	1,3,4,5,6,7,8, 9,11,14.	Sol# ₃ (4)	1,3,5,6,7.	Fa ₄ (2)	1,2,3,4, 5,6.
La# ₂ (3)	1,3,4,5,6,7,9,10, 11,12,13,14,18.	Re# ₃ (5)	1,3,4,5,6,7,9, 10.	La ₃ (1)	1,3,4,5,6,7,9, 10.	Fa ₄ (3)	1,2,3,4, 5.
La# ₂ (4)	1,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,13,15, 18,19,20.	Re# ₃ (6)	1,3,4,5,6,7,8, 9.	La ₃ (2)	1,3,4,5,6,8.	Fa# ₄ (1)	1,2,3,4, 5,6.
Si ₂ (1)	1,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12,14,16,18.	Mi ₃ (1)	1,3,4,5,6,7.	La ₃ (3)	1,3,4,5,7,8, 9,10,	Fa# ₄ (2)	1,2,3,4, 5,6.
Si ₂ (2)	1,3,5,6,7,8,9,10,11	Mi ₃ (2)	1,3,4,5,6,7,9, 12.	La# ₃ (1)	1,3,5.	Fa# ₄ (3)	1,2,3,5, 6.
Si ₂ (3)	1,3,4,5,6,7,8,9, 10,11.	Fa ₃ (1)	1,3,4,5,7.	La# ₃ (2)	1,2,3,4,5.	Fa# ₄ (4)	1,2,3,4, 5,6.
Si ₂ (4)	1,3,4,5,6,7,8,9, 10,11,12.	Fa ₃ (2)	1,3,4,5,6,7,9, 12.	La# ₃ (3)	1,3,4,5,7.	Sol ₄ (1)	1,2,3,4, 6.
Do ₃ (1)	1,3,5,6,7,8,9,10, 11,12,13,14,15,16.	Fa ₃ (3)	-----	La# ₃ (4)	1,3,4,5,7.	Sol ₄ (2)	1,2,3,4, 5,6.
Do ₃ (2)	1,3,5,6,7,8,9,10, 11,12,13,16,17.	Fa# ₃ (1)	1,3,4,5,6,7, 9.	Si ₃ (1)	1,2,3,4,5.	Sol ₄ (3)	1,2,3,4, 5,6.

Mst.	Armónicos	Mst.	Armónicos	Mst.	Armónicos	Mst.	Armón.
Sol# ₄ (1)	1,2,3,4,5,6.	Do ₅ (4)	1,2,3,4.	Re# ₅ (1)	1,2,3,4.	Mi ₅ (6)	1,2,3,4.,5, 6,7,8,9.
Sol# ₄ (2)	1,2,3,4,5.	Do# ₅ (1)	1,2,3,4,5.	Re# ₅ (2)	1,2,3,4.	Mi ₅ (7)	1,2,3,4,5.
Sol# ₄ (3)	1,2,3,4,5,6.	Do# ₅ (2)	1,2,3,4,5.	Re# ₅ (3)	1,2,3,4.	Mi ₅ (8)	1,2,3,4,5,6.
La ₄ (1)	1,2,3,5.	Do# ₅ (3)	1,2,3,4.	Re# ₅ (4)	1,2,3,4.	Mi ₅ (9)	1,2,3,4,5,6, 7.
La ₄ (2)	1,2,3,4,5.	Do# ₅ (4)	1,2,3,4.	Re# ₅ (5)	1,2,3,4.	Mi ₅ (10)	1,2,3,4.
La ₄ (3)	1,2,3,4,5.	Do# ₅ (5)	1,2,3,4,5.	Re# ₅ (6)	1,2,3,4.	Mi ₅ (11)	1,2,3,4,5.
La# ₄ (1)	1,2,3,4,5.	Do# ₅ (6)	1,2,3.	Re# ₅ (7)	1,2,3,4,5.	Mi ₅ (12)	1,2,3,4,5,6.
La# ₄ (2)	1,2,3,4,5.	Do# ₅ (7)	1,2,3.	Re# ₅ (8)	1,2,3,4.	Fa ₅ (1)	1,2,3,4.
La# ₄ (3)	1,2,3.	Re ₅ (1)	1,2,3,4,5.	Re# ₅ (9)	1,2,3,4.	Fa ₅ (2)	1,2,3,4,5,6.
La# ₄ (4)	1,2,3.	Re ₅ (2)	1,2,3,4.	Re# ₅ (10)	1,2,3,4,5.	Fa ₅ (3)	1,2,3,4,5,6, 7.
La# ₄ (5)	1,2,3,4,5.	Re ₅ (3)	1,2,3,4.	Re# ₅ (11)	1,2,3,4.	Fa ₅ (4)	1,2,3,4.
Si ₄ (1)	1,2,3,4.	Re ₅ (4)	1,2,3,4,5.	Re# ₅ (12)	1,2,3,4.	Fa ₅ (5)	1,2,3,4.
Si ₄ (2)	1,2,3,4,5.	Re ₅ (5)	1,2,3,4,5.	Re# ₅ (13)	1,2,3,4.	Fa ₅ (6)	1,2,3,4,5,6.
Si ₄ (3)	1,2,3,4.	Re ₅ (6)	1,2,3,4,5.	Re# ₅ (14)	1,2,3,4	Fa ₅ (7)	1,2,3,4,5,6.
Si ₄ (4)	1,2,3,4,5.	Re ₅ (7)	1,2,3,4.	Mi ₅ (1)	1,2,3,4.	Fa ₅ (8)	1,2,3,4.
Si ₄ (5)	1,2,3,4,5.	Re ₅ (8)	1,2,3,4.	Mi ₅ (2)	1,2,3,4,5,6.	Fa ₅ (9)	1,2,3,4.
Do ₅ (1)	1,2,3,4,5.	Re ₅ (9)	1,2,3,4.	Mi ₅ (3)	1,2,3,4,5,6.	Fa ₅ (10)	1,2,3,4.
Do ₅ (2)	1,2,3,4,5.	Re ₅ (10)	1,2,3,4.	Mi ₅ (4)	1,2,3,4.	Fa ₅ (11)	1,2,3,4.
Do ₅ (3)	1,2,3,4.	Re ₅ 11)	1,2,3,4.	Mi ₅ (5)	1,2,3,4,5.	Fa# ₅ (1)	1,2.

Mst.	Armón.	Mst.	Armón.	Mst.	Armón.	Mst.	Armón.
Fa# ₅ (2)	1,2,3,4,5,6.	Sol ₅ (3)	1,2,3,4.	Sol# ₅ (2)	1,2,3.	Sol# ₅ (21)	1,2,3.
Fa# ₅ (3)	1,2,3,4,5,6, 7.	Sol ₅ (4)	1,2,3,4.	Sol# ₅ (3)	1,2,3.	Sol# ₅ (22)	1,2,3.
Fa# ₅ (4)	1,2,3,4.	Sol ₅ (5)	1,2,3.	Sol# ₅ (4)	1,2,3.	Sol# ₅ (23)	1,2,3.
Fa# ₅ (5)	1,2,3,4.	Sol ₅ (6)	1,2,3,4.	Sol# ₅ (5)	1,2,3.	La ₅ (1)	1,2,3,4,5.
Fa# ₅ (6)	1,2,3,4,5.	Sol ₅ (7)	1,2,3,4.	Sol# ₅ (6)	1,2,3,4,5, 6,7.	La ₅ (2)	1,2,3,4,5,6.
Fa# ₅ (7)	1,2,3,4.	Sol ₅ (8)	-----	Sol# ₅ (7)	1,2,3.	La ₅ (3)	1,2,3.
Fa# ₅ (8)	1,2,3,4,5,6, 7.	Sol ₅ (9)	1,2,3.	Sol# ₅ (8)	1,2,3.	La ₅ (4)	1,2,3.
Fa# ₅ (9)	1,2,3,4,5,6, 7,8.	Sol ₅ (10)	1,2,3	Sol# ₅ (9)	1,2,3.	La ₅ (5)	1,2,3,4,5,6.
Fa# ₅ (10)	1,2,3,4,5,6, 7,8.	Sol ₅ (11)	1,2,3,4,5.	Sol# ₅ (10)	1,2,3,4.	La ₅ (6)	1,2,3.
Fa# ₅ (11)	1,2,3,4.	Sol ₅ (12)	1,2,3,4,5, 6.	Sol# ₅ (11)	1,2,3,4.	La ₅ (7)	1,2,3,4,5,6, 7,8.
Fa# ₅ (12)	1,2,3,4,5,6, 8,9.	Sol ₅ (13)	1,2,3,4.	Sol# ₅ (12)	1,2,3,4.	La ₅ (8)	1,2,3.
Fa# ₅ (13)	1,2,3,4.	Sol ₅ (14)	1,2,3.	Sol# ₅ (13)	1,2,3.	La ₅ (9)	1,2.
Fa# ₅ (14)	1,2,3,4,5.	Sol ₅ (15)	1,2,3.	Sol# ₅ (14)	1,2,3.	La ₅ (10)	1,2,3.
Fa# ₅ (15)	1,2,3,4,5,6.	Sol ₅ (16)	1,2,3,4.	Sol# ₅ (15)	1,2,3.	La ₅ (11)	1,2,3,4.
Fa# ₅ (16)	1,2,3,4.	Sol ₅ (17)	1,2,3,4.	Sol# ₅ (16)	1,2,3.	La ₅ (12)	1,2,3,4,5,6, 7.
Fa# ₅ (17)	1,2,3,4.	Sol ₅ (18)	1,2,3.	Sol# ₅ (17)	1,2,3,4,5.	La# ₅ (1)	1,2,3,4,5.
Fa# ₅ (18)	1,2,3,4.	Sol ₅ (19)	1,2,3.	Sol# ₅ (18)	1,2,3,4.	La# ₅ (2)	1,2,3,4,5,6, 7.
Sol ₅ (1)	1,2,3,4.	Sol ₅ (20)	1,2,3,4.	Sol# ₅ (19)	1,2,3.	La# ₅ (3)	1,2,3.
Sol ₅ (2)	1,2,3,4.	Sol# ₅ (1)	1,2,3.	Sol# ₅ (20)	1,2,3.	La# ₅ (4)	1,2,3,4,5.

Mst.	Armónicos	Mst.	Armónicos	Mst.	Armónicos
La# ₅ (5)	1,2,3,4.	Si ₅ (8)	1,2,3,4.	Do ₆ (11)	1,2,3.
La# ₅ (6)	1,2,3,4.	Si ₅ (9)	1,2,3,4,5,6.	Do ₆ (12)	1,2,3.
La# ₅ (7)	1,2,3.	Si ₅ (10)	1,2,3,4,5.	Do ₆ (13)	1,2,3,4,5,6.
La# ₅ (8)	1,2,3,4,5,6, 7.	Si ₅ (11)	1,2,3,4,5.		
La# ₅ (9)	1,2,3,4.	Si ₅ (12)	1,2,3,4,5.		
La# ₅ (10)	1,2,3,4.	Si ₅ (13)	1,2,3,4,5.		
La# ₅ (11)	1,2,3,4,5.	Si ₅ (14)	1,2,3,4,5,6, 7.		
La# ₅ (12)	1,2,3,4,5,6, 7.	Si ₅ (15)	1,2,3.		
La# ₅ (13)	1,2,3,4,5,6.	Si ₅ (16)	1,2,3,4,5.		
La# ₅ (14)	1,2,3,4,5,6, 7.	Do ₆ (1)	1,2,3.		
La# ₅ (15)	1,2,3,4,5,6.	Do ₆ (2)	1,2,3,4,5,6.		
La# ₅ (16)	1,2,3,4.	Do ₆ (3)	1,2,3.		
Si ₅ (1)	1,2,3.	Do ₆ (4)	1,2,3,4,5.		
Si ₅ (2)	1,2,3,4,5.	Do ₆ (5)	1,2,3.		
Si ₅ (3)	1,2,3,4,5.	Do ₆ (6)	1,2,3,4,5,6.		
Si ₅ (4)	1,2,3.	Do ₆ (7)	1,2,3.		
Si ₅ (5)	1,2,3,4,5,6.	Do ₆ (8)	1,2,3.		
Si ₅ (6)	1,2,3.	Do ₆ (9)	1,2,3.		
Si ₅ (7)	1,2,3,4.	Do ₆ (10)	1,2,3.		

11.4.3 Análisis y discusión de los resultados experimentales obtenidos

- *Registro grave.* Este registro es el más fecundo en componentes armónicos dado que comprende todas las fundamentales. Los picos más altos se observan en los primeros parciales, especialmente en el tercero, quinto y séptimo, aunque también prevalece el noveno ocasionalmente. Por su parte, los valles se asocian a los componentes pares, con especial preponderancia de los segundos y cuartos armónicos -más acentuados en los primeros-. En general, las primeras resonancias son las más válidas para ser utilizadas como notas de la escala debido a que la impedancia acústica en la caña -en la entrada del tubo- es alta, y por lo tanto la variación de presión es grande. Por eso estos armónicos controlan la vibración de la caña y el instrumento solo emite frecuencias próximas a estas resonancias.

En los espectros de este registro se aprecia como los armónico impares son más prominentes que los pares. La caña produce los pares e impares⁷⁴, pero en el clarinete sólo los armónico impares son reforzados por la forma de su tubo. Aún así, ciertos armónicos pares también se sostienen, siempre con baja intensidad, reforzados por un tubo desigual en ciertas regiones y por el efecto de la lengüeta y de las resonancias del trato vocal.

El debilitamiento y nivelación de las resonancias superiores se debe a varias razones: primero, en las frecuencias altas hay una mayor pérdida de energía cuando el aire móvil está cerca de las paredes; segundo, la campana irradia mejor las frecuencias altas que las graves, de manera que hay menos reflexión de frecuencias altas y las resonancias se debilitan. Esta enarmonicidad es, por tanto, menos sensible en las frecuencias bajas: el primer máximo y el mínimo no son debilitados muchísimo, porque la campana es mucho más pequeña en relación con las longitudes de onda de frecuencia bajas y, por lo tanto, no es tan eficaz irradiando estas ondas; tercero, la elasticidad de la caña reduce las resonancias de las frecuencias altas⁷⁵; cuarto, el efecto de la corrección final del tubo también debilita las resonancias más altas. Con todo, las frecuencias de estos sonidos agudos se desvían cada vez más de los múltiplos enteros de las fundamentales.

Se observa, por otro lado, una diferencia de componentes entre el $Re\#_3$ (1) y (2) y el $Re\#_3$ (3) y (4). En estos últimos se utiliza la digitación cruzada y, por tanto, el tubo se prolonga reforzando nuevos componentes.

Asimismo, se aprecia una heterogeneidad inusual en los espectrogramas del Re_3 , Mi_3 , Fa_3 y $Fa\#_3$. Ello es debido a que el Re_3 es el primer sonido cuya onda se refleja en un orificio tonal sin anillo -el tercer orificio tonal-. Los efectos de esta particularidad se extienden a los siguientes sonidos dado que las distancias entre orificios y los diámetros de los mismos son cada vez más reducidos. Este fenómeno tiene como consecuencia un efecto mate y deslucido en el timbre que contrasta con la homogeneidad sonora de los sonidos predecesores.

Por otra parte, se observa un incremento sensible de componentes en los sonidos en los cuales se acciona la llave 4, bien sea para seccionar la columna gaseosa, bien para acortarla parcialmente. Se puede inferir que la apertura de este orificio refuerza ciertos componentes no se sabe muy bien por qué, aunque posiblemente se pueda atribuir a su ubicación.

⁷⁴ Véase los espectrogramas del apartado 14.2 para ilustrar esta cuestión.

⁷⁵ Por esta razón las cañas suaves no pueden producir los sonidos más altos igual que las duras.

- *Registro agudo.* Lo que más destaca en los espectros de este registro es que los armónicos de ambos órdenes se disponen de forma escalonada y las diferencias entre los picos y los valles quedan mitigadas por las razones ya adelantadas en el registro grave. Aun así, los valles siguen correspondiendo a los segundos y cuartos, pero de forma más moderada.

Las diferencias entre las intensidades de estos componentes, que se presentan en torno a una media de 5 o 6, vienen determinadas por la digitación empleada para cada caso, de forma que una digitación base perfeccionada con una llave auxiliar o con una digitación cruzada que varíe la columna gaseosa los refuerza o debilita, en función de la ubicación del orificio que activen o desactiven.

Los pares no son sistemáticamente más débiles como sucede en las fundamentales, sino que, salvo excepciones, siguen una pauta más o menos definida. Como consecuencia de esto, el sonido es más brillante, más lleno y, a no ser que uno sea cuidadoso, más fuerte. De hecho, cuando tocamos un pasaje y pasamos de un registro a otro, resulta complicado ocltar esta diferencia en el timbre y la intensidad. El efecto de oquedad del registro chalumeau desaparece dado que los picos están en proporciones armónicas más exactas.

Asimismo, se puede decir que el Mi_4 , Fa_4 y $Fa\#_4$ son los sonidos con un timbre más brillante, cálido y homogéneo. Tal aseveración se puede verificar observando los espectros de estos sonidos. Sus resonancias armónicas siguen una proporción y simetría cuasi perfectas. El timbre de estos sonidos han sido especialmente tratado en las composiciones clásicas y románticas por su analogía con la lírica voz de soprano.

Por lo general, los sonidos que pueden ser perfeccionadas debido a que disponen de cierto margen espacial en el tubo para ello -desde el Mi_4 al Do_5 - suelen experimentar una suerte de alteraciones en sus componentes debido a las diferentes digitaciones empleadas que modifican la columna gaseosa reforzando o debilitando ciertas resonancias. Así, apreciamos sistemáticamente un incremento en los componentes y una disposición escalonada cuasi perfecta en los sonidos en los cuales se emplea la llave 5 para perfeccionarlos. Asimismo, la llave 4 proporciona una nivelación en los picos, mientras que la 3 o C refuerza el segundo y debilita los restantes de forma acentuada. Es posible que, por lo que respecta a la llave 4, segmente los armónicos en un grado determinado por su ubicación y diámetro. La llave 5, sin embargo, destapa un orificio cuyo diámetro es sensiblemente inferior al de la llave 4, con lo cual no produce el mismo efecto en los armónicos, funcionando como un filtro de paso para determinadas frecuencias. En cuanto a la función acústica en este menester de la llave 3, podemos definirla en los mismos términos que la llave 4, con la diferencia de que su especial ubicación y diámetro potencia exclusivamente el segundo parcial.

Si se exceptúan los sonidos perfeccionados mediante llaves complementarias, el timbre de este registro resulta bastante homogéneo y brillante debido a las altas frecuencias y la presencia de todos los parciales -en mayor o menor medida-.

- *Registro sobreagudo.* Dadas las altas frecuencias generadoras de este registro, no sorprende la simetría de sus espectros. Es a partir del quinto o séptimo armónico de las fundamentales donde la serie regular de máximos y mínimos adquiere mayor simetría. Considerando que este registro se configura con estos armónicos mayoritariamente, podemos colegir la génesis de este fenómeno. Efectivamente, los máximos -y mínimos- son

más débiles en las frecuencias altas por varios motivos ya enumerados en el registro grave. Así, se observa un menor número de componentes en los sonidos que se emiten con un mayor número de orificios tonales abiertos –Fa#₅ (1), por ejemplo-, lo que facilita la transmisión de las ondas al exterior y debilita, por consiguiente, las resonancias.

Se observa, por tanto, que los componentes se reducen a un número que no excede de cuatro salvo en los casos en los que se emplea el armónico más alto, lo que invalida el efecto del enrejado de orificios tonales abiertos –dado que ahora se hallan todos o la mayoría cerrados- y se posibilita así una mejor reflexión sonora y, por tanto, un reforzamiento de las resonancias del tubo. Asimismo, se disponen de forma escalonada siguiendo una pauta consistente en una progresión aritmética cuasi perfecta. La excepción la constituyen los sonidos producidos mediante el armónico más bajo posible –generalmente el tercero, en el primer tramo, y el quinto, en el segundo- y con la mayoría de orificios tonales destapados, en los cuales, además de reducir los componentes, el segundo se refuerza de forma tal que, en determinados casos, supera en intensidad al primero. Este fenómeno se observa también en los sonidos en los cuales se abre el orificio del Fa₃ -o su duodécima el Do₅-. Posiblemente podamos atribuir este fenómeno infrecuente a la corta longitud de tubo que empujan estos sonidos que imposibilita un funcionamiento acústico ordinario. Efectivamente, la boquilla por sí sola produce todos los armónicos, por lo que se encontrará normal que dada la ausencia de tubo operativo en estos sonidos que pueda reforzarlos, se potencien especialmente los dos primeros.

Es reseñable, por último, un incremento de componentes en las muestras en cuya emisión se ha accionado algún orificio –mediante una llave o con el dedo directamente- por encima de la columna vibrante, a saber, la llave 9, 10 o el orificio 12. Análogo fenómeno se da en todas las muestras emitidas mediante el armónico más superior, debido a la larga longitud de tubo que emplean.

Como consecuencia de esta diversidad en la composición armónica derivada de la diversa naturaleza de sus sonidos, el timbre se heterogeneiza en una suerte inusual y es preceptivo contemplar ciertas normas prácticas para restablecerlo.

- Aplicaciones prácticas para la ejecución musical. Las aplicaciones que nos proporciona este parámetro están encamiadas a paliar, en la medida de lo posible, las diferencias de timbre que se dan entre los distintos registros del clarinete. Se trata de optimizar el timbre del instrumento mediante el uso priorizado de los sonidos que presentan una composición armónica más perfecta, considerando, por supuesto, sus frecuencias como primer parámetro. Conviene, pues, tener en consideración algunas normas de carácter general si queremos optimizar el timbre de nuestro instrumento, a saber:

- Cuando se deba utilizar un sonido para un pasaje expresivo importante será conveniente prolongar la longitud de tubo con digitaciones alternativas para reforzar sus componentes y homogeneizar su timbre –la llave 4 en el registro grave; la 5 en el agudo; y la 9, 10 o 12 en el sobreagudo-.
- Se cuidará especialmente los pasos entre registros en los frases expresivas empleando los sonidos con contenido espectral análogo para mitigar las discrepancias en el color sonoro, sin menoscabo de la afinación.
- En el registro sobreagudo se aconseja usar, en la medida de lo posible, armónicos del mismo número de orden para homogeneizar el timbre.

- Para los pasajes más importantes del discurso musical es recomendable hacer uso siempre de los armónicos más altos que proporcionan una mayor longitud de tubo y, por tanto, un timbre más consistente.
- En los sonidos del tramo quintante es preceptivo obturar ciertos orificios por debajo del último, para homogeneizar el precario timbre que presentan estos sonidos.

11.5 NATURALEZA SONORA

11.5.1 Medidas preliminares

Este parámetro nos va a aportar no solo la naturaleza de los sonidos que van a ser objeto de análisis, sino también su procedencia. En el caso que nos ocupa, se distinguen, según su naturaleza, dos tipos de señales acústicas, a saber: sonidos fundamentales o sonidos armónicos. Los primeros se obtienen mediante la vibración de una columna aérea completa. A esta clase corresponden todos los sonidos del registro grave, desde el Mi_2 al $La\#_3$ -también el Si_3 y Do_4 se suelen utilizar como fundamentales en determinados pasajes rápidos y notas de adorno-. Los segundos, por su parte, se producen por la vibración de una columna fragmentada en partes alícuotas. Todos los sonidos de los siguientes registros son constitutivos de esta clase.

Ambos tipos de sonidos presentan un número determinado de componentes armónicos en mayor o menor medida que dependen fundamentalmente de la forma interna del tubo, la vibración de la lengüeta y las resonancias vocales, de ahí que los consideremos complejos sonoros. Evidentemente las fundamentales, por la naturaleza de su onda estacionaria y las particularidades del tubo, son más fecundas en este menester. Pero también los sonidos armónicos procedentes de estas fundamentales conservan algunos componentes armónicos -aunque en teoría esto no es posible-, que son posibles gracias a los modos de resonancia que son reforzados por el tubo.

Para aislar, identificar y catalogar cada una de las muestras del registro sobreagudo -las del registro grave y agudo no revisten dificultad alguna dado que se obtienen todos sus sonidos con las fundamentales, en el caso del registro grave, y con terceros armónicos, en el caso del agudo-, se ha considerado especialmente la longitud de onda y de tubo, así como su digitación, que debe ser similar a la de su fundamental de origen.

Además de indicarnos si se trata de una fundamental o un armónico, el parámetro se expresa mediante siglas que designan, además de su naturaleza, el tipo de digitación que hace posible su emisión:

- (F): Fundamental
- (3f, 5f, etc.): Armónico 3^a, 5^o, etc.
- D.B.: Digitación base
- D.B.P.: Digitación Base Perfeccionada
- D.D.B.: Derivación Digitación Base

La primera modalidad nos refiere que se trata de una digitación realizada mediante el acortamiento gradual del tubo, sin llaves accionadas añadidas. Por su parte, hablamos de armónico perfeccionado cuando, teniendo en cuenta las peculiaridades de la escala de los armónicos y de las vibraciones de las columnas gaseosas -aspectos estudiados en los apartados 7.2 y 9.1, respectivamente- nos vemos obligados a utilizar mecanismos para ajustar o corregir la afinación alterando así la digitación básica de su fundamental de procedencia y perfeccionando acústicamente, por consiguiente, su armónico. Por último, nos referimos a una derivación cuando, a partir de una digitación básica, se obtienen frecuencias análogas mediante diferentes combinaciones de llaves y/o digitaciones cruzadas.

La utilidad de este parámetro consiste en aportar una valiosa información que pueda ayudar a optimizar el rendimiento del instrumento. Efectivamente, conociendo la naturaleza del sonido que vayamos a ejecutar, podremos comprender mejor el funcionamiento del instrumento y resolver algunas dudas de carácter práctico.

11.5.2 Resultados experimentales obtenidos

Tabla 11.7 Naturaleza de las muestras analizadas

Mst.	Natur.	Mst.	Natur.	Mst.	Natur.	Mst.	Natur.
Mi ₂	F. (D.B.)	Do ₃ (3)	F. (D.B.P.)	Fa# ₃ (2)	F. (D.D.B.)	Si ₃ (2)	F. (D.B.)
Fa ₂	F. (D.B.)	Do# ₃ (1)	F. (D.B.)	Fa# ₃ (3)	F. (D.B.P.)	Do ₄ (1)	3f de Fa ₂ (D.B.)
Fa# ₂	F. (D.B.)	Do# ₃ (2)	F. (D.B.P.)	Fa# ₃ (4)	F. (D.B.P.)	Do ₄ (2)	F. (D.B.)
Sol ₂	F. (D.B.)	Do# ₃ (3)	F. (D.B.P.)	Sol ₃ (1)	F. (D.B.)	Do# ₄	3f de Fa# ₂ (D.B.)
Sol# ₂	F. (D.B.)	Re ₃ (1)	F. (D.B.)	Sol ₃ (2)	F. (D.B.P.)	Re ₄	3f de Sol ₂ (D.B.)
La ₂ (1)	F. (D.B.)	Re ₃ (2)	F. (D.B.P.)	Sol ₃ (3)	F. (D.B.P.)	Re# ₄	3f de Sol# ₂ (D.B.)
La ₂ (2)	F. (D.B.P.)	Re ₃ (3)	F. (D.B.P.)	Sol ₃ (4)	F. (D.B.P.)	Mi ₄ (1)	3f de La ₂ (D.B.)
La ₂ (3)	F. (D.B.P.)	Re# ₃ (1)	F. (D.B.)	Sol# ₃ (1)	F. (D.B.)	Mi ₄ (2)	3f de La ₂ (D.B.P.)
La ₂ (4)	F. (D.B.P.)	Re# ₃ (2)	F. (D.B.)	Sol# ₃ (2)	F. (D.B.P.)	Mi ₄ (3)	3f de La ₂ (D.B.P.)
La# ₂ (1)	F. (D.B.)	Re# ₃ (3)	F. (D.D.B.)	Sol# ₃ (3)	F. (D.B.P.)	Fa ₄ (1)	3f de La# ₂ (D.B.)
La# ₂ (2)	F. (D.D.B.)	Re# ₃ (4)	t. (D.D.B.)	Sol# ₃ (4)	F. (D.B.P.)	Fa ₄ (2)	3f de La# ₂ (D.B.P.)
La# ₂ (3)	F. (D.B.P.)	Re# ₃ (5)	F. (D.D.B.)	La ₃ (1)	F. (D.B.)	Fa ₄ (3)	3f de La# ₂ (D.B.P.)
La# ₂ (4)	F. (D.B.P.)	Re# ₃ (6)	F. (D.D.B.)	La ₃ (2)	F. (D.B.P.)	Fa# ₄ (1)	3f de Si ₂ (D.B.)
Si ₂ (1)	F. (D.B.)	Mi ₃ (1)	F. (D.B.)	La ₃ (3)	F. (D.B.P.)	Fa# ₄ (2)	3f de Si ₂ (D.D.B.)
Si ₂ (2)	F. (D.D.B.)	Mi ₃ (2)	F. (D.B.P.)	La# ₃ (1)	F. (D.B.)	Fa# ₄ (3)	3f de Si ₂ (D.B.P.)
Si ₂ (3)	F. (D.B.P.)	Fa ₃ (1)	F. (D.B.)	La# ₃ (2)	F. (D.B.P.)	Fa# ₄ (4)	3f de Si ₂ (D.B.P.)
Si ₂ (4)	F. (D.B.P.)	Fa ₃ (2)	F. (D.B.P.)	La# ₃ (3)	F. (D.B.P.)	Sol ₄ (1)	3f de Do ₃ (D.B.)
Do ₃ (1)	F. (D.B.)	Fa ₃ (3)	F. (D.B.P.)	La# ₃ (4)	F. (D.B.P.)	Sol ₄ (2)	3f de Do ₃ (D.B.P.)
Do ₃ (2)	F. (D.B.P.)	Fa# ₃ (1)	F. (D.B.)	Si ₃ (1)	3f de Mi ₂ (D.B.)	Sol ₄ (3)	3f de Do ₃ (D.B.P.)

Mst.	Natur.	Mst.	Natur.	Mst.	Natur.	Mst.	Natur.
Sol#₄(1) <i>(D.B.)</i>	<i>3f de Do#₃</i>	Do₅(4) <i>(D.B.)</i>	<i>5f de Sol#₂</i>	Re#₅(1) <i>(D.B.P.)</i>	<i>5f de Si₂</i>	Mi₅(6) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do₃</i>
Sol#₄(2) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Do#₃</i>	Do#₅(1) <i>(D.B.P.)</i>	<i>5f de La₂</i>	Re#₅(2) <i>(D.B.P.)</i>	<i>5f de Si₂</i>	Mi₅(7) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do₃</i>
Sol#₄(3) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Do#₃</i>	Do#₅(2) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de La₂</i>	Re#₅(3) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Si₂</i>	Mi₅(8) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do₃</i>
La₄(1) <i>(D.B.)</i>	<i>3f de Re₃</i>	Do#₅(3) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de La₂</i>	Re#₅(4) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Si₂</i>	Mi₅(9) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do₃</i>
La₄(2) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Re₃</i>	Do#₅(4) <i>(D.D.B.)</i>	<i>3f de Fa#₃</i>	Re#₅(5) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Si₂</i>	Mi₅(10) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de La₃</i>
La₄(3) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Re₃</i>	Do#₅(5) <i>(D.B.)</i>	<i>3f de Fa#₃</i>	Re#₅(6) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Si₂</i>	Mi₅(11) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de La₃</i>
La#₄(1) <i>(D.D.B.)</i>	<i>3f de Re#₃</i>	Do#₅(6) <i>(D.D.B.)</i>	<i>3f de Fa#₃</i>	Re#₅(7) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Si₂</i>	Mi₅(11) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de La₃</i>
La#₄(2) <i>(D.B.)</i>	<i>3f de Re#₃</i>	Do#₅(7) <i>(D.D.B.)</i>	<i>3f de Fa#₃</i>	Re#₅(8) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Si₂</i>	Fa₅(1) <i>(D.B.P.)</i>	<i>5f de Do#₃</i>
La#₄(3) <i>(D.D.B.)</i>	<i>3f de Re#₃</i>	Re₅(1) <i>(D.B.P.)</i>	<i>5f de La#₂</i>	Re#₅(9) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Si₂</i>	Fa₅(2) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do#₃</i>
La#₄(4) <i>(D.D.B.)</i>	<i>3f de Re#₃</i>	Re₅(2) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de La#₂</i>	Re#₅(10) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Si₂</i>	Fa₅(3) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do#₃</i>
La#₄(5) <i>(D.D.B.)</i>	<i>3f de Re#₃</i>	Re₅(3) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de La#₂</i>	Re#₅(11) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Si₂</i>	Fa₅(4) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do#₃</i>
Si₄(1) <i>(D.B.)</i>	<i>3f de Mi₃</i>	Re₅(4) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de La#₂</i>	Re#₅(12) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Sol#₃</i>	Fa₅(5) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do#₃</i>
Si₄(2) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Mi₃</i>	Re₅(5) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de La#₂</i>	Re#₅(13) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Sol#₃</i>	Fa₅(6) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do#₃</i>
Si₄(3) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Mi₃</i>	Re₅(6) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de La#₂</i>	Re#₅(14) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Sol#₃</i>	Fa₅(7) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do#₃</i>
Si₄(4) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Mi₃</i>	Re₅(7) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de La#₂</i>	Mi₅(1) <i>(D.B.P.)</i>	<i>5f de Do₃</i>	Fa₅(8) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do#₃</i>
Si₄(5) <i>(D.B.)</i>	<i>5f de Sol₂</i>	Re₅(8) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Sol₃</i>	Mi₅(2) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do₃</i>	Fa₅(9) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do#₃</i>
Do₅(1) <i>(D.B.)</i>	<i>3f de Fa₃</i>	Re₅(9) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Sol₃</i>	Mi₅(3) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do₃</i>	Fa₅(10) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de La#₃</i>
Do₅(2) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Fa₃</i>	Re₅(10) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Si₂</i>	Mi₅(4) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do₃</i>	Fa₅(11) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de La#₃</i>
Do₅(3) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Fa₃</i>	Re₅(11) <i>(D.B.P.)</i>	<i>3f de Sol₃</i>	Mi₅(5) <i>(D.D.B.)</i>	<i>5f de Do₃</i>	Fa#₅(1) <i>(D.B.P.)</i>	<i>5f de Re₃</i>

Mst.	Natur.	Mst.	Natur.	Mst.	Natur.	Mst.	Natur.
Fa#₅ (2)	<i>5f de Re₃</i> (D.B.P.)	Sol₅ (3)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.D.B.)	Sol#₅ (2)	<i>7f de La#₂</i> (D.B.P.)	Sol#₅ (21)	<i>9f de Fa#₂</i> (D.B.P.)
Fa#₅ (3)	<i>5f de Re₃</i> (D.D.B.)	Sol₅ (4)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.D.B.)	Sol#₅ (3)	<i>7f de La#₂</i> (D.B.P.)	Sol#₅ (22)	<i>9f de Fa#₂</i> (D.D.B.)
Fa#₅ (4)	<i>5f de Re₃</i> (D.D.B.)	Sol₅ (5)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.D.B.)	Sol#₅ (4)	<i>7f de La#₂</i> (D.B.P.)	Sol#₅ (23)	<i>9f de Fa#₂</i> (D.D.B.)
Fa#₅ (5)	<i>5f de Re₃</i> (D.D.B.)	Sol₅ (6)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.D.B.)	Sol#₅ (5)	<i>7f de La#₂</i> (D.B.P.)	La₅ (1)	<i>7f de Si₂</i> (D.B.P.)
Fa#₅ (6)	<i>5f de Re₃</i> (D.D.B.)	Sol₅ (7)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.D.B.)	Sol#₅ (6)	<i>7f de La#₂</i> (D.D.B.)	La₅ (2)	<i>7f de Si₂</i> (D.B.P.)
Fa#₅ (7)	<i>5f de Re₃</i> (D.D.B.)	Sol₅ (8)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.D.B.)	Sol#₅ (7)	<i>7f de La#₂</i> (D.D.B.)	La₅ (3)	<i>7f de Si₂</i> (D.B.P.)
Fa#₅ (8)	<i>5f de Re₃</i> (D.D.B.)	Sol₅ (9)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.D.B.)	Sol#₅ (8)	<i>7f de La#₂</i> (D.D.B.)	La₅ (4)	<i>7f de Si₂</i> (D.D.B.)
Fa#₅ (9)	<i>5f de Re₃</i> (D.D.B.)	Sol₅(10)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.D.B.)	Sol#₅ (9)	<i>7f de La#₂</i> (D.D.B.)	La₅ (5)	<i>7f de Si₂</i> (D.D.B.)
Fa#₅(10)	<i>5f de Re₃</i> (D.D.B.)	Sol₅(11)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.D.B.)	Sol#₅ (10)	<i>7f de La#₂</i> (D.D.B.)	La₅ (6)	<i>7f de Si₂</i> (D.D.B.)
Fa#₅(11)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.B.P.)	Sol₅(12)	<i>9f de Fa₂</i> (D.B.P.)	Sol#₅ (11)	<i>7f de La#₂</i> (D.D.B.)	La₅ (7)	<i>5f de Fa₃</i> (D.B.P.)
Fa#₅(12)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.B.P.)	Sol₅(13)	<i>9f de Fa₂</i> (D.D.B.)	Sol#₅ (12)	<i>7f de La#₂</i> (D.D.B.)	La₅ (8)	<i>5f de Fa₃</i> (D.B.P.)
Fa#₅(13)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.D.B.)	Sol₅(14)	<i>5f de Re#₃</i> (D.B.P.)	Sol#₅ (13)	<i>7f de La#₂</i> (D.D.B.)	La₅ (9)	<i>9f de Sol₂</i> (D.B.P.)
Fa#₅(14)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.D.B.)	Sol₅(15)	<i>5f de Re#₃</i> (D.B.P.)	Sol#₅ (14)	<i>5f de Mi₃</i> (D.B.P.)	La₅ (10)	<i>9f de Sol₂</i> (D.B.P.)
Fa#₅(15)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.D.B.)	Sol₅(16)	<i>3f de Do₄</i> (D.D.B.)	Sol#₅ (15)	<i>5f de Mi₃</i> (D.B.P.)	La₅ (11)	<i>7f de Si₂</i> (D.D.B.)
Fa#₅(16)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.D.B.)	Sol₅(17)	<i>5f de Re#₃</i> (D.B.P.)	Sol#₅ (16)	<i>5f de Mi₃</i> (D.B.P.)	La₅ (12)	<i>7f de Si₂</i> (D.D.B.)
Fa#₅(17)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.D.B.)	Sol₅(18)	<i>5f de Re#₃</i> (D.B.P.)	Sol#₅ (17)	<i>5f de Mi₃</i> (D.B.P.)	La#₅ (1)	<i>7f de Do₃</i> (D.B.P.)
Fa#₅(18)	<i>3f de Si₃</i> (D.B.P.)	Sol₅(19)	<i>3f de Do₄</i> (D.D.B.)	Sol#₅ (18)	<i>5f de Mi₃</i> (D.B.P.)	La#₅ (2)	<i>7f de Do₃</i> (D.D.B.)
Sol₅ (1)	<i>7f de La₂</i> (D.B.P.)	Sol₅(20)	<i>9f de Fa₂</i> (D.B.P.)	Sol#₅ (19)	<i>5f de Mi₃</i> (D.B.P.)	La#₅ (3)	<i>7f de Do₃</i> (D.D.B.)
Sol₅ (2)	<i>7f de Sol#₂</i> (D.B.P.)	Sol#₅(1)	<i>7f de La#₂</i> (D.B.P.)	Sol#₅ (20)	<i>9f de Fa#₂</i> (D.B.P.)	La#₅ (4)	<i>7f de Do₃</i> (D.B.P.)

Mst.	Natur.	Mst.	Natur.	Mst.	Natur.
La#₅(5)	<i>7f de Do₃</i> <i>(D.B.P.)</i>	Si₅(8)	<i>9f de La₂</i> <i>(D.B.P.)</i>	Do₆(11)	<i>7f de Re₃</i> <i>(D.B.P.)</i>
La#₅(6)	<i>7f de Do₃</i> <i>(D.D.B.)</i>	Si₅(9)	<i>9f de La₂</i> <i>(D.D.B.)</i>	Do₆(12)	<i>9f de La#₂</i> <i>(D.D.B.)</i>
La#₅(7)	<i>7f de Do₃</i> <i>(D.D.B.)</i>	Si₅(10)	<i>9f de La₂</i> <i>(D.D.B.)</i>	Do₆(13)	<i>9f de La#₂</i> <i>(D.D.B.)</i>
La#₅(8)	<i>5f de Fa#₃</i> <i>(D.B.P.)</i>	Si₅(11)	<i>9f de La₂</i> <i>(D.D.B.)</i>		
La#₅(9)	<i>7f de Do₃</i> <i>(D.D.B.)</i>	Si₅(12)	<i>7f de Do#₃</i> <i>(D.D.B.)</i>		
La#₅(10)	<i>7f de Do₃</i> <i>(D.D.B.)</i>	Si₅(13)	<i>5f de Sol₃</i> <i>(D.B.P.)</i>		
La#₅(11)	<i>9f de Sol#₂</i> <i>(D.B.P.)</i>	Si₅(14)	<i>5f de Sol₃</i> <i>(D.B.P.)</i>		
La#₅(12)	<i>9f de Sol#₂</i> <i>(D.D.B.)</i>	Si₅(15)	<i>11f de Fa₂</i> <i>(D.B.P.)</i>		
La#₅(13)	<i>9f de Sol#₂</i> <i>(D.D.B.)</i>	Si₅(16)	<i>5f de Sol₃</i> <i>(D.B.P.)</i>		
La#₅(14)	<i>9f de Sol#₂</i> <i>(D.D.B.)</i>	Do₆(1)	<i>9f de La#₂</i> <i>(D.B.P.)</i>		
La#₅(15)	<i>5f de Fa#₃</i> <i>(D.D.B.)</i>	Do₆(2)	<i>9f de La#₂</i> <i>(D.D.B.)</i>		
La#₅(16)	<i>5f de Fa#₃</i> <i>(D.D.B.)</i>	Do₆(3)	<i>9f de La#₂</i> <i>(D.D.B.)</i>		
Si₅(1)	<i>9f de La₂</i> <i>(D.B.P.)</i>	Do₆(4)	<i>9f de La#₂</i> <i>(D.B.P.)</i>		
Si₅(2)	<i>9f de La₂</i> <i>(D.B.P.)</i>	Do₆(5)	<i>9f de La#₂</i> <i>(D.B.P.)</i>		
Si₅(3)	<i>9f de La₂</i> <i>(D.D.B.)</i>	Do₆(6)	<i>9f de La#₂</i> <i>(D.D.B.)</i>		
Si₅(4)	<i>9f de La₂</i> <i>(D.D.B.)</i>	Do₆(7)	<i>9f de La#₂</i> <i>(D.D.B.)</i>		
Si₅(5)	<i>9f de La₂</i> <i>(D.D.B.)</i>	Do₆(8)	<i>9f de La#₂</i> <i>(D.D.B.)</i>		
Si₅(6)	<i>9f de La₂</i> <i>(D.D.B.)</i>	Do₆(9)	<i>9f de La#₂</i> <i>(D.B.P.)</i>		
Si₅(7)	<i>9f de La₂</i> <i>(D.D.B.)</i>	Do₆(10)	<i>9f de La#₂</i> <i>(D.B.P.)</i>		

11.5.3 Análisis y discusión de los resultados experimentales obtenidos

-Registro grave. Todas las muestras de este registro son sonidos fundamentales, a saber, desde el Mi_2 al $La\#_3$. Además, se obtienen también como fundamentales acortando la columna gaseosa el Si_3 (2) y el Do_3 (2).

Se observa que todas las muestras (1) son emitidas con digitaciones base y digitaciones base perfeccionada, salvo el $Re\#_3$ donde es posible la digitación cruzada dado que se tiene un cierto margen espacial en el tubo para realizarla. Hasta el La_2 solo es posible emitir sonidos fundamentales con digitaciones base, debido a que son los primeros sonidos y la longitud del tubo no permite operar en la columna gaseosa vibrante. Es a partir de este sonido cuando es posible usar llaves por debajo del tubo operativo para modificar la longitud de la onda y, por tanto, la frecuencia.

El Si_3 (2) y el Do_3 (2) no se utilizan como notas de la escala, sino únicamente para pasajes rápidos y notas de adorno. Ello es debido a su pobre rendimiento acústico por la corta longitud de tubo resonador. Su uso ordinario como notas de la escala se adscribe, pues, como terceros armónicos en el siguiente registro.

-Registro agudo. Este registro se conforma exclusivamente con armónicos terceros. Su emisión se lleva a cabo gracias al orificio portavoz⁷⁶, el cual permite la subdivisión de la columna gaseosa en tres mitades alicuotas. Las digitaciones empleadas son las mismas que sus fundamentales de origen -salvo la llave 12-. Existe una excepción con el Do_5 (4) que es el primer quinto armónico que se puede utilizar con ciertas garantías acústicas.

La naturaleza de los sonidos de este registro produce un timbre un tanto brillante, pero al mismo tiempo cálido, dado que también conservan componentes armónicos en un número significativo.

-Registro sobreagudo. Se pueden establecer tres tramos en este registro, cada uno de los cuales se constituye mayoritariamente con armónicos del mismo número de orden, excepto casos puntuales de armónicos diferentes cuyo uso está relegado a pasajes rápidos. El primer tramo se obtiene con quintos armónicos y comprende desde el $Do\#_5$ hasta el $Fa\#_5$; el segundo, desde el Sol_5 hasta el $La\#_5$, mediante séptimos armónicos; el tercero, con novenos armónicos, desde el Si_5 hasta el Do_6 . Conservan las mismas digitaciones que sus fundamentales de procedencia pero perfeccionadas, por lo que las denominamos digitaciones base perfeccionadas. Sabemos que estos armónicos tienen una frecuencia por debajo de los valores normales, debido a las particularidades de las series armónicas y al problema que presentan las longitudes de las columnas aéreas por el problema de la corrección final del extremo⁷⁷. Es por esto por lo que, además del orificio portavoz que debilita o modifica la frecuencia de la primera resonancia, es menester usar uno o dos nuevos orificios para debilitar el tercero y quinto armónico, según se trate de un tramo u otro, forzando así al salto al armónico superior. Así pues, todos los sonidos de este primer tramo desactivan el primer orificio produciendo en ese punto un nuevo vientre de presión, lo que provoca una subida sensible de la frecuencia. La llave 4 sube también la frecuencia hasta situarla aproximadamente en los valores normales.

⁷⁶ Véase el apartado 14.4.

⁷⁷ Se analiza este fenómeno detenidamente en el apartado 14.3.

Al margen de estos armónicos cuyas digitaciones se consideran básicas, es posible usar para una misma nota hasta cuatro armónicos diferentes, dependiendo del tramo en el que nos encontremos. Obviamente, a medida que se asciende por la escala las posibilidades son mayores. Así, en el primer tramo también se usa el tercero y el séptimo armónico; en el segundo, el tercero, el quinto y el noveno; y en el tercero, el quinto, el séptimo y el onceavo. Se puede observar que existe una zona en cada tramo a partir de la cual es necesario saltar al siguiente armónico para seguir ascendiendo ya que la longitud del tubo no permite segmentar más la columna gaseosa con unas mínimas garantías acústicas. Este fenómeno depende de la frecuencia de corte del instrumento, dado que a partir de esta frecuencia los orificios tonales no reflejan la onda sino que la transmiten como si fuese un filtro de paso, lo que provoca el debilitamiento de las ondas estacionarias y su subsiguiente precariedad tímbrica y frecuencial. En el primer tramo, esta región *caliente* se sitúa en el Fa#₅, mientras que en el segundo se encuentra en el La#₅. Por consiguiente, a partir de determinada longitud de tubo y de onda, se recomienda efectuar el salto al siguiente armónico. Este salto permite aumentar la longitud del tubo y, por consiguiente, la resonancia experimenta una ganancia y con ello el timbre, dado que se refuerzan nuevos componentes y se invalida el efecto de la corrección final del extremo.

El resto de muestras se obtienen mediante derivaciones de digitación cruzada.

- Aplicaciones prácticas de interés musical. Así pues, la utilidad principal que podemos extraer de los resultados atañe a la afinación y al timbre del instrumento. Por lo que se refiere a la afinación y el timbre se deberá tener en cuenta varias normas a la hora de usar los armónicos:

- Cuando figuren dentro de un mismo registro o tramo armónicos de diferente número de serie, se usará preferentemente el armónico superior, excepto si se trata de pasajes rápidos, donde es aconsejable utilizar los inferiores.
- Se deberá emplear, en la medida de lo posible, armónicos de la misma naturaleza cuando se aborde un pasaje con sonidos susceptibles de ser emitidos mediante diferentes armónicos. De este modo se homogeneizará el desigual timbre del instrumento entre los sonidos de un mismo pasaje.
- Los armónicos de cada tramo cuyo número de orden es más bajo deben emplearse exclusivamente para pasajes rápidos, pues son los que sobrepasan esa zona peligrosa, acústicamente hablando, donde la longitud del tubo no garantiza unas mínimas prestaciones por el fenómeno de la corrección del extremo final.
- Los armónicos superiores de cada registro o tramo aportan un timbre más homogéneo y una afinación más precisa, por lo que se aconseja emplearlos en determinadas notas importantes del discurso musical.
- A partir aproximadamente de una longitud de tubo de 30 cm y una λ de 25 cm en el primer tramo, y una longitud de tubo de 35 cm y una λ de 20 cm en el segundo, se recomienda efectuar el salto al siguiente armónico para aumentar la longitud del tubo y restablecer unas condiciones mínimas que garanticen una afinación y un timbre óptimo.
- Conociendo la naturaleza de cada sonido podremos evitar los rechinamientos que se producen muy comúnmente en el registro sobreagudo. Para ello se

deberá aumentar progresivamente la presión de soplo para cada número de armónico a medida que se asciende, y viceversa. Se trata, pues, de regular la presión aérea en la boquilla para cada armónico.

- Por último, especial cuidado se deberá tener cuando se aborde un pasaje en legato entre un armónico y una fundamental dado que resulta imposible su ejecución limpia -no es posible constituir una columna gaseosa fragmentada sin que se produzca un mínimo silencio-.

11.6 ARMONICOS VALIDOS COMO NOTAS DE LA ESCALA

11.6.1 Medidas preliminares

Como ya se vimos en el apartado 7.1, no todos los armónicos de cada fundamental pueden ser utilizados como notas de la escala, sino que únicamente aquéllos que den unos mínimos niveles de calidad sonora pueden ser útiles para este fin. Los indicadores de calidad dependen del funcionamiento acústico del instrumento y de otros factores adicionales que ya han sido analizados sobradamente en el curso del trabajo. Por todo ello, aunque pueden emitirse prácticamente hasta los cinco primeros parciales de cada fundamental, algunos de ellos deben descartarse por sus bajas prestaciones acústicas.

En este indicador, por tanto, se consignan los componentes armónicos o parciales -asóciense a las notas de la escala de acuerdo con la serie armónica correspondiente⁷⁸- que, por su especial calidad, pueden usarse como notas de la escala, lo cual nos permitirá obtener el mapa acústico completo del clarinete, esto es, la secuencia completa de sonidos susceptibles de ser emitidos con ciertas garantías acústicas. Asimismo, su consulta ayudará sobremano en la resolución de algunos problemas técnicos y acústicos que presenta el clarinete y que son sobradamente conocidos por los clarinetistas.

Por otra parte, una vez completado, se podrá comprobar la correlación que existe entre varios armónicos procedentes de diferentes fundamentales.

⁷⁸ Consúltense el Anexo IV.

11.6.2 Resultados experimentales obtenidos

Tabla 11.8 Armónicos válidos como notas de la escala

Muestras	Armónicos válidos como notas de la escala	Muestras	Armónicos válidos como notas de la escala
Mi₂	3, 9 y 11	Re#₃	3, 5 y 7
Fa₂	3, 9 y 11	Mi₃	3, 5 y 7
Fa#₂	3, 9 y 11	Fa₃	3, 5 y 7
Sol₂	3, 7, 9 y 11	Fa#₃	3, 5 y 7
Sol#₂	3, 5, 7, 9 y 11	Sol₃	3, 5 y 7
La₂	3, 5, 7, 9 y 11	Sol#₃	3 y 5
La#₂	3, 5, 7, 9 y 11	La₃	3 y 5
Si₂	3, 5, 7 Y 9	La#₃	3 y 5
Do₃	3, 5, 7 Y 9	Si₃	3 y 5
Do#₃	3, 5, 7 Y 9	Do₄	3 y 5
Re₃	3, 5 y 7		

Fig. 11.3 Armónicos válidos como notas de la escala expresados musicalmente -la nota inferior corresponde a la fundamental de origen-



11.6.3 Análisis y discusión de los resultados experimentales obtenidos

Como ya hemos anticipado en las medidas preliminares, en este parámetro únicamente se consignan los armónicos que pueden ser empleados con ciertas garantías acústicas. En este sentido, el quinto solo puede usarse a partir del Sol $\#_2$ y el séptimo a partir del Sol $_2$, aunque sí pueden emitirse los inferiores, pero muy precariamente. Nótese, por tanto, que es a partir del La $_2$ cuando estos armónicos se obtienen óptimamente, pero siempre perfeccionándolos mediante digitaciones especiales.

Análogo fenómeno acontece con todos los novenos y undécimos armónicos en cuyas digitaciones se emplean llaves ubicadas por debajo de la llave 4 -la del Sol $\#_2$ -. Se infiere, pues, que una longitud de tubo más allá de la que proporciona la llave 4 invalida cualquier función acústica encaminada a perfeccionar estos armónicos, por lo que su emisión debe descartarse sistemáticamente.

En general, las primeras resonancias son las más útiles por el fenómeno de la impedancia que ya se ha discutido en el parámetro de los espectros.

Se observa que el Sol $\#_2$, Sol $_2$ y La $_2$ son las fundamentales que aportan un mayor número de armónicos válidos como notas. Por lo que respecta al límite inferior ya hemos discutido las razones. En cuanto al límite superior, el La $_2$ es la última fundamental que

puede producirlo, dado que más allá de este sonido su longitud de onda y de tubo lo imposibilita por las razones aportadas en el parámetro precedente.

Llama especialmente la atención un dato curioso, a saber: excepto el Sol_2 , todas las fundamentales siguen una pauta en este menester y es que se reduce el número de armónicos válidos cada tres fundamentales -sin considerar el Si_3 y Do_4 como fundamentales-. Este hecho demuestra que a medida que la frecuencia aumenta y la longitud de tubo se reduce, los armónicos también lo hacen, no solo los utilizables como notas sino también los configuradores del timbre.

Por otra parte, se advierte la imposibilidad de utilizar los segundos y terceros parciales como notas de los sonidos más graves, esto es, el Mi_2 , Fa_2 y $\text{Fa}\#_2$. La razón es la siguiente: estos sonidos se emiten con un tubo completo con todos sus orificios tonales cerrados, de manera que en el cuarto inferior la columna de aire sufre una ampliación que se abre hacia la campana del instrumento. Esa ampliación produce una perturbación que rompe la relación de número entero entre las frecuencias de resonancia del segundo y tercer parcial, con lo cual sólo es posible una cooperación muy pobre en el régimen de oscilación del registro grave.

Por último, se observa que el tercero es el único armónico que se mantiene de forma predominante en todas las fundamentales, lo que explica su óptima calidad.

11.7 OSCILOGRAMAS

11.7.1 Medidas preliminares

Este parámetro nos describe y representa gráficamente la onda de cada sonido en base a lo analizado en el apartado 3.5. Este indicador es esencial, junto con el de los espectrogramas, para estudiar y definir el timbre y la índole del complejo sonoro, pues en función de su diseño podemos coleccionar la composición armónica aproximada del sonido. Debido a las limitaciones espaciales y al objeto de obtener una mejor resolución, se muestra la onda en el tiempo de 1 período. Asimismo, en determinados sonidos del registro sobreagudo se ha ampliado la imagen para optimizarla, mientras que en otras se ha reducido por razones prácticas de espacio.

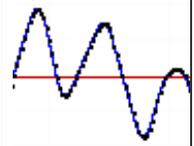
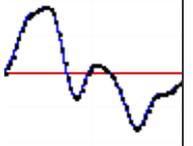
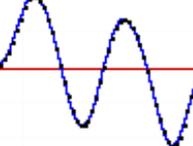
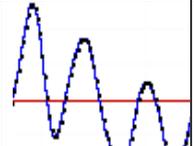
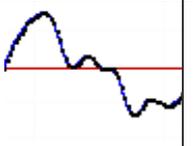
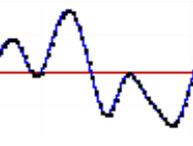
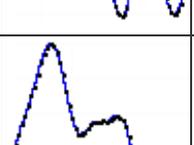
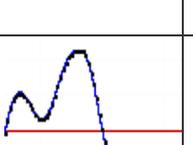
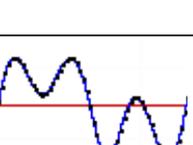
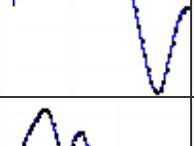
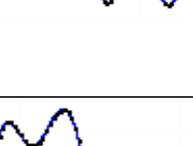
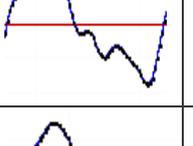
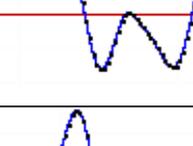
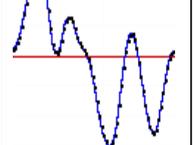
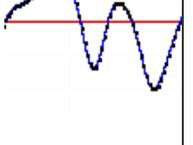
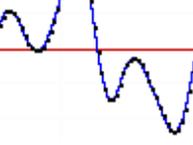
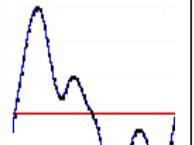
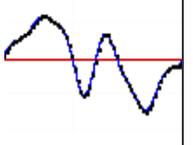
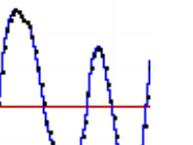
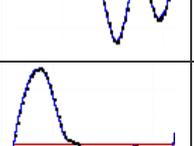
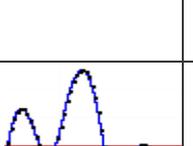
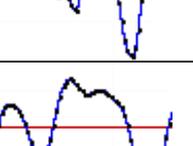
Los resultados obtenidos nos permitirán comprender las discrepancias en el timbre que se producen en los distintos registros como consecuencia de las particularidades de las vibraciones de las columnas gaseosas.

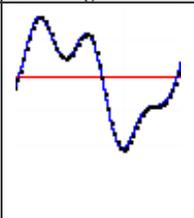
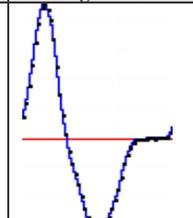
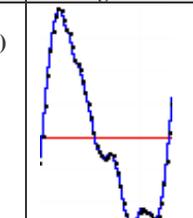
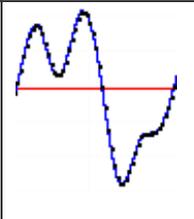
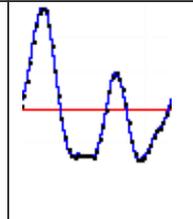
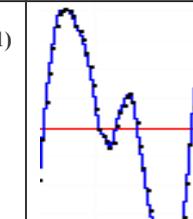
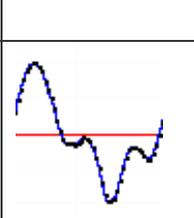
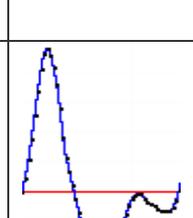
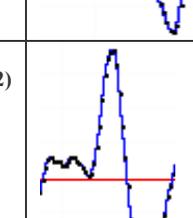
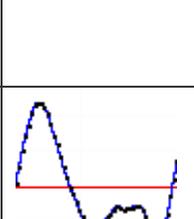
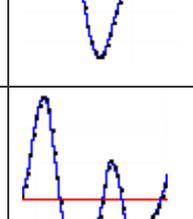
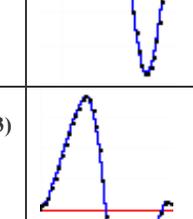
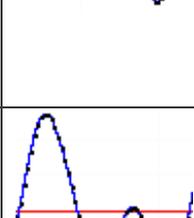
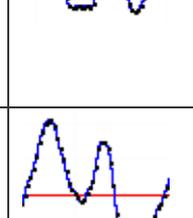
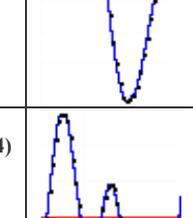
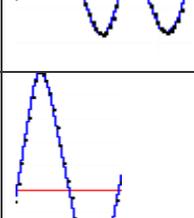
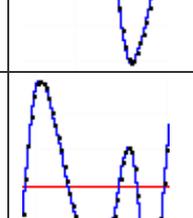
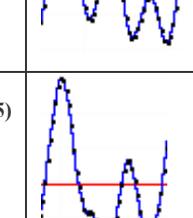
11.7.2 Resultados experimentales obtenidos

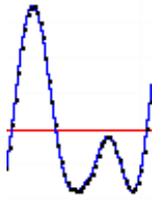
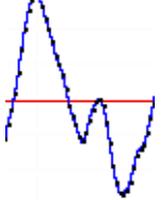
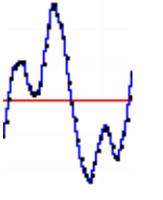
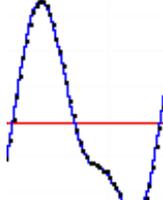
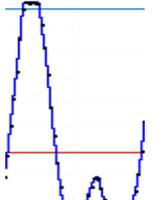
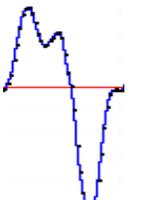
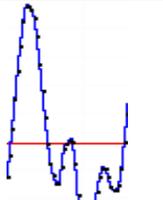
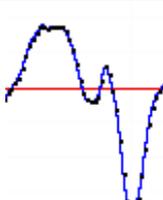
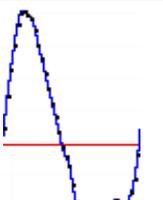
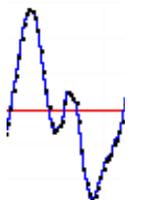
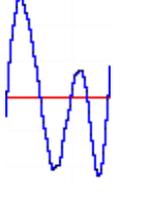
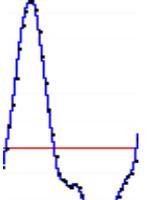
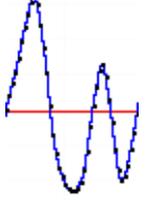
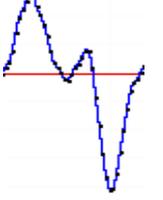
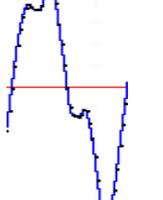
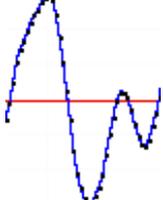
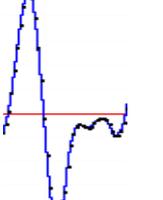
Tabla 11.9 Oscilogramas de las muestras analizadas

Mst.	Oscilogramas	Mst.	Oscilogramas	Mst.	Oscilogramas
Mi ₂		La# ₂ (2)		Do# ₃ (1)	
Fa ₂		La# ₂ (3)		Do# ₃ (2)	
Fa# ₂		La# ₂ (4)		Do# ₃ (3)	
Sol ₂		Si ₂ (1)		Re ₃ (1)	
Sol# ₂		Si ₂ (2)		Re ₃ (2)	
La ₂ (1)		Si ₂ (3)		Re ₃ (3)	
La ₂ (2)		Si ₂ (4)		Re# ₃ (1)	
La ₂ (3)		Do ₃ (1)		Re# ₃ (2)	
La ₂ (4)		Do ₃ (2)		Re# ₃ (3)	
La# ₂ (1)		Do ₃ (3)		Re# ₃ (4)	

Mst.	Oscilogramas	Mst.	Oscilogramas	Mst.	Oscilogramas
Re# ₃ (5)		Fa# ₃ (4)		La ₃ (2)	
Re# ₃ (6)		Sol ₃ (1)		La ₃ (3)	
Mi ₃ (1)		Sol ₃ (2)		La# ₃ (1)	
Mi ₃ (2)		Sol ₃ (3)		La# ₃ (2)	
Fa ₃ (1)		Sol ₃ (4)		La# ₃ / ₃ (3)	
Fa ₃ (2)		Sol# ₃ (1)		La# ₃ (4)	
Fa ₃ (3)		Sol# ₃ (2)		Si ₃ (1)	
Fa# ₃ (1)		Sol# ₃ (3)		Si ₃ (2)	
Fa# ₃ (2)		Sol# ₃ (4)		Do ₄ (1)	
Fa# ₃ (3)		La ₃ (1)		Do ₄ (2)	

Mst.	Oscilogramas	Mst.	Oscilogramas	Mst.	Oscilogramas
Do# ₄		Fa ₄ (3)		Sol ₄ (4)	
Re ₄		Fa# ₄ (1)		Sol# ₄ (1)	
Re# ₄		Fa# ₄ (2)		Sol# ₄ (2)	
Mi ₄ (1)		Fa# ₄ (3)		Sol# ₄ (3)	
Mi ₄ (2)		Fa# ₄ (4)		La ₄ (1)	
Mi ₄ (3)		Sol ₄ (1)		La ₄ (2)	
Fa ₄ (1)		Sol ₄ (2)		La ₄ (3)	
Fa ₄ (2)		Sol ₄ (3)		La# ₄ (1)	

Mst.	Oscilogramas	Mst.	Oscilogramas	Mst.	Oscilogramas
La# ₄ (2)		Si ₄ (3)		Do ₅ (4)	
La# ₄ (3)		Si ₄ (4)		Do# ₅ (1)	
La# ₄ (4)		Si ₄ (5)		Do# ₅ (2)	
La# ₄ (5)		Do ₅ (1)		Do# ₅ (3)	
Si ₄ (1)		Do ₅ (2)		Do# ₅ (4)	
Si ₄ (2)		Do ₅ (3)		Do# ₅ (5)	

Mst.	Oscilogramas	Mst.	Oscilogramas	Mst.	Oscilogramas
Do# ₅ (6)		Re ₅ (5)		Re ₅ (11)	
Do# ₅ (7)		Re ₅ (6)		Re# ₅ (1)	
Re ₅ (1)		Re ₅ (7)		Re# ₅ (2)	
Re ₅ (2)		Re ₅ (8)		Re# ₅ (3)	
Re ₅ (3)		Re ₅ (9)		Re# ₅ (4)	
Re ₅ (4)		Re ₅ (10)		Re# ₅ (5)	

Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.
Re# ₅ (6)		Re# ₅ (12)		Mi ₅ (4)		Mi ₅ (10)	
Re# ₅ (7)		Re# ₅ (13)		Mi ₅ (5)		Mi ₅ (11)	
Re# ₅ (8)		Re# ₅ (14)		Mi ₅ (6)		Mi ₅ (12)	
Re# ₅ (9)		Mi ₅ (1)		Mi ₅ (7)		Fa ₅ (1)	
Re# ₅ (10)		Mi ₅ (2)		Mi ₅ (8)		Fa ₅ (2)	
Re# ₅ (11)		Mi ₅ (3)		Mi ₅ (9)		Fa ₅ (3)	

Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.
Fa ₅ (4)		Fa ₅ (10)		Fa# ₅ (5)		Fa# ₅ (11)	
Fa ₅ (5)		Fa ₅ (11)		Fa# ₅ (6)		Fa# ₅ (12)	
Fa ₅ (6)		Fa# ₅ (1)		Fa# ₅ (7)		Fa# ₅ (13)	
Fa ₅ (7)		Fa# ₅ (2)		Fa# ₅ (8)		Fa# ₅ (14)	
Fa ₅ (8)		Fa# ₅ (3)		Fa# ₅ (9)		Fa# ₅ (15)	
Fa ₅ (9)		Fa# ₅ (4)		Fa# ₅ (10)		Fa# ₅ (16)	

Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.
Fa# ₅ (17)		Sol ₅ (5)		Sol ₅ (11)		Sol ₅ (17)	
Fa# ₅ (18)		Sol ₅ (6)		Sol ₅ (12)		Sol ₅ (18)	
Sol ₅ (1)		Sol ₅ (7)		Sol ₅ (13)		Sol ₅ (19)	
Sol ₅ (2)		Sol ₅ (8)	-----	Sol ₅ (14)	-----	Sol ₅ (20)	
Sol ₅ (3)		Sol ₅ (9)		Sol ₅ (15)		Sol# ₅ (1)	
Sol ₅ (4)		Sol ₅ (10)		Sol ₅ (16)		Sol# ₅ (2)	

Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.
Sol# ₅ (3)		Sol# ₅ (9)		Sol# ₅ (15)		Sol# ₅ (21)	
Sol# ₅ (4)		Sol# ₅ (10)		Sol# ₅ (16)		Sol# ₅ (22)	
Sol# ₅ (5)		Sol# ₅ (11)		Sol# ₅ (17)		Sol# ₅ (23)	
Sol# ₅ (6)		Sol# ₅ (12)		Sol# ₅ (18)		La ₅ (1)	
Sol# ₅ (7)		Sol# ₅ (13)		Sol# ₅ (19)		La ₅ (2)	
Sol# ₅ (8)		Sol# ₅ (14)		Sol# ₅ (20)		La ₅ (3)	

Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.
La ₅ (4)		La ₅ (10)		La# ₅ (4)		La# ₅ (10)	
La ₅ (5)		La ₅ (11)		La# (5)		La# ₅ (11)	
La ₅ (6)		La ₅ (12)		La# ₅ (6)		La# ₅ (12)	
La ₅ (7)		La# ₅ (1)		La# ₅ (7)		La# ₅ (13)	
La ₅ (8)		La# ₅ (2)		La# ₅ (8)		La# ₅ (14)	
La ₅ (9)		La# ₅ (3)		La# ₅ (9)		La# ₅ (15)	

Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.	Mst.	Oscilogr.
La# ₅ (16)		Si ₅ (6)		Si ₅ (12)		Do ₆ (2)	
Si ₅ (1)		Si ₅ (7)		Si ₅ (13)		Do ₆ (3)	
Si ₅ (2)		Si ₅ (8)		Si ₅ (14)		Do ₆ (4)	
Si ₅ (3)		Si ₅ (9)		Si ₅ (15)		Do ₆ (5)	
Si ₅ (4)		Si ₅ (10)		Si ₅ (16)		Do ₆ (6)	
Si ₅ (5)		Si ₅ (11)		Do ₆ (1)		Do ₆ (7)	

Mst.	Oscilogr.
Do₆ (8)	<p>Oscilograma de la nota Do₆ (8). La onda muestra un ataque inicial, un pico principal, un valle, un segundo pico menor y un final. Una línea roja horizontal indica el nivel de amplitud.</p>
Do₆ (9)	<p>Oscilograma de la nota Do₆ (9). La onda muestra un ataque, un pico principal, un valle profundo y un final. Una línea roja horizontal indica el nivel de amplitud.</p>
Do₆ (10)	<p>Oscilograma de la nota Do₆ (10). La onda muestra un ataque, un pico principal, un valle y un final. Una línea roja horizontal indica el nivel de amplitud.</p>
Do₆ (11)	<p>Oscilograma de la nota Do₆ (11). La onda muestra un ataque, un primer pico, un valle, un segundo pico y un final. Una línea roja horizontal indica el nivel de amplitud.</p>
Do₆ (12)	<p>Oscilograma de la nota Do₆ (12). La onda muestra un ataque, un pico principal, un valle y un final. Una línea roja horizontal indica el nivel de amplitud.</p>
Do₆ (13)	<p>Oscilograma de la nota Do₆ (13). La onda muestra un ataque, un pico principal, un valle y un final. Una línea roja horizontal indica el nivel de amplitud.</p>

11.7.3 Análisis y discusión de los resultados experimentales obtenidos

Se aprecia, en una exploración inicial, que no siempre se produce una onda perfecta según la tipología dada⁷⁹, sino que, a menudo, la forma de onda constituye una suerte de combinación de varios tipos que arroja formas diversas, o bien, una derivación de aquélla. Además se puede comprobar que a medida que se asciende por la escala las crestas se reducen en grosor debido al aumento de la frecuencia, esto es, menguan los ciclos.

- *Registro grave.* Las ondas más complejas se dan en este registro por la diversa composición que presentan. En general, se trata de una onda *no senoidal* resultante de la combinación de una onda del tipo cuadrada imperfecta por combinación con una en dientes de sierra, constituida por las *ondas senoidales* derivadas de los movimientos armónicos presentes de orden impar, prevalentes, y par de baja intensidad. Efectivamente, dado que la onda en estos sonidos no solo contiene armónicos impares sino también pares, podemos hablar de una onda cuadrada, resultante de los primeros parciales impares, y de una en dientes de sierra que aporta los siguientes parciales de orden par e impar con sus amplitudes relativas.

- *Registro agudo.* Las muestras de este registro corresponden a una onda *no senoidal* del tipo de diente de sierra, constituida por las *ondas senoidales* derivadas de los movimientos armónicos presentes de orden par e impar con amplitudes decrecientes. Aunque la relación de amplitudes de los armónicos en este tipo de onda con respecto a la frecuencia fundamental $-1/2, 1/3, 1/4, \text{etc}-$ no siempre se cumple, su diseño solo puede adscribirse a este tipo de ondas.

- *Registro sobreagudo.* Al igual que que en el registro precedente, los oscilogramas representan una onda *no senoidal* del tipo de dientes de sierra, constituida por las *ondas senoidales* derivadas de los movimientos armónicos presentes de orden par e impar con amplitudes decrecientes. La diferencia con respecto al agudo, la constituye la reducción de las crestas -dado que los ciclos son más cortos- así como la de los componentes -debido al incremento de la frecuencia-. Además, aquí sí podemos hablar de una onda en dientes de sierra cuasi perfecta y simétrica por las amplitudes de sus componentes.

- *Aplicaciones prácticas para la ejecución musical.* Las únicas aplicaciones que podemos extraer de estos resultados atañen al color sonoro y son muy ilustrativas para comprender las diferencias de timbre que se dan en el clarinete, pues se observan grandes diferencias en los diseños de las ondas de los distintos registros e incluso entre sonidos de un mismo registro. En consecuencia, se deberán observar en la ejecución las siguientes normas, siempre aplicables a pasajes importantes del discurso musical:

- Deberá moderarse el uso de sonidos en un mismo registro que presenten oscilogramas distintos.

⁷⁹ Consúltase el apartado 3.5 para cualquier aclaración al respecto.

- Entre sonidos de registros distintos deberá cuidarse el desigual timbre utilizando digitaciones auxiliares que mitigen, en la medida de lo posible, esas discrepancias.

11.8 RECOMENDACIONES GENERALES DE USO PARA LA EJECUCION MUSICAL

Este último indicador es de gran importancia puesto que supone una herramienta muy útil para optimizar la práctica del instrumento, finalidad última que persigue el estudio. Aunque tiene un carácter semiobjetivo dado que depende en gran medida del criterio del intérprete, de su formación y de su técnica, se deben respetar algunas normas de ejecución de sentido común aceptadas convencionalmente que sí aportan un cariz objetivo a la investigación. Además, para su elaboración se han considerado obviamente los resultados experimentales obtenidos de los parámetros de frecuencia, naturaleza, composición armónica y, por supuesto, las digitaciones empleadas.

- *Registro grave*. Se aconseja un uso generalizado en todas las primeras muestras de cada nota, dado que son sonidos fundamentales emitidos con digitaciones base generalizadas y por tanto normalizadas. Es a partir del La₂ cuando se diversifica el uso en función de la digitación que se emplee. Así, encontramos hasta el Do₃ opciones tanto para subir como para bajar la frecuencia del sonido -como norma, una llave u orificio abierto baja la afinación en un grado determinado por la distancia comprendida entre el último orificio abierto y aquél, mientras que si se cierra acontece lo contrario-.

Desde el Do₃, hasta el La#₃ es posible tanto bajar la frecuencia como subirla. En cualquier caso esto dependerá de si el orificio u orificios que se activen para modificar la frecuencia se hallan en la zona de influencia del enrejado de orificios tonales. A menor distancia desde último orificio cerrado hasta esta zona, mayor efecto tendrá en la frecuencia, y viceversa.

En cuanto a las muestras que aportan un uso exclusivo para pasajes rápidos por su facilidad técnica de digitación, encontramos las digitaciones de horquilla del Re#₃, así como el Si₃ (2) y Do₄ (2).

Finalmente, se deben descartar las muestras cuya afinación ha sido calificada como pésima -véase el subapartado 11.2.2-.

- *Registro agudo*. Del mismo modo que sucede en el grave, en este registro todas las primeras muestras de cada nota presentan un uso generalizado. Nótese que estos sonidos utilizan idénticas digitaciones que las fundamentales, salvo la llave portavoz.

Por lo demás, el análisis hecho para el registro grave es aplicable también para este.

- *Registro sobreagudo*. Dadas las posibilidades de emisión de este registro, encontramos un amplio abanico de opciones. Hasta el Fa#₅ -los quintos armónicos-, en todas las primeras muestras de cada nota se recomienda un uso generalizado, en base a sus frecuencias, respuesta espectral y digitaciones. Actualmente estos sonidos son los más

empleados. Asimismo, en todas las muestras emitidas mediante el armónico menor -con una corta longitud de tubo y de onda- se aconseja un uso exclusivo para pasajes rápidos, dadas sus bajas prestaciones acústicas.

Por lo que respecta al uso de los sonidos emitidos con un el armónico superior, se recomienda su uso para pasajes importantes del discurso musical -dada su mayor longitud de onda y de tubo- por su rico contenido armónico y su precisa frecuencia. Algunos de estos sonidos también pueden ser utilizados de forma generalizada por sus óptimas prestaciones acústicas.

Existen discrepancias ostensibles entre las frecuencias de una misma nota. Ello es debido a la diversidad de armónicos utilizados y a los problemas de afinación que afecta este registro. Así pues, son numerosas las muestras descartadas para la ejecución musical por sus precarias frecuencias o, cuanto menos, relegadas a un uso extraordinario.

***V. ESTUDIO ORGANOLÓGICO Y ACÚSTICO
DEL CLARINETE***

CAPITULO 12

LA FAMILIA DEL CLARINETE



Trio para Clarinete, Chello y Piano, Op. 114. Brahms (1833-1897)

12.1 RESEÑA HISTORICA Y GENERALIDADES

“La fecundidad del nuevo tipo instrumental se manifestó ya temprano por la formación de una familia que abraza la mayor parte de la extensión general de los sonidos”. (Gevaert, 1887)

De este modo inicia su análisis sobre la familia del clarinete el musicólogo Gevaert en su Tratado de Instrumentación. Efectivamente, es a partir de mediados del siglo XVIII cuando comienzan a proliferar clarinetes de distintas longitudes de tubo para solventar los problemas técnicos de digitación que presentaba el clarinete tipo primitivo en Do. Estos problemas derivaban de su rudimentario sistema de llaves que imposibilitaba sobremanera la ejecución en determinados tonos. Además, su condición de tubo cerrado le impelía a octavear a la duodécima y por lo tanto debía emitir un mayor número de sonidos fundamentales -que se reproducían en los registros superiores-. De manera que el clarinete primitivo precisaba un mecanismo más complejo que cualquier otro instrumento del grupo de las maderas.

Las llaves instaladas en el tubo solo permitían obtener de forma afinada una escala diatónica. Mas para conseguir la escala cromática se tenía que recurrir a la digitación cruzada o de horquilla, con lo cual las complicaciones en la digitación del instrumento se hacían patentes. Así lo reflejaba Gevaert en su Tratado en el cual contempla una serie de

observaciones y normas que el compositor debe considerar a la hora de emplear este instrumento en sus obras. En este sentido sostiene que *los tonos mayores, sib, fa, do, sol, re, y los menores, do, sol, re, la, mi, se consideran fáciles, pero que más allá de ellos no es aconsejable utilizarlos. Asimismo, los pasajes más brillantes técnicamente no deben escribirse en tonos alejados de la tonalidad primitiva del instrumento* (Gevaert, 1887). De hecho, los compositores clásicos no solían poner más de una alteración en la armadura. Si utilizaban una tonalidad con más alteraciones colocaban éstas accidentalmente delante de las notas⁸⁰.

También afirma que son impracticables ciertos trinos y pasajes debido al rudimentario mecanismo. En efecto, los sonidos que se conseguían con digitación de horquilla u otros artificios no podían ser trinados ni ejecutados con relativa comodidad en pasajes rápidos.

No es Gevaert el único en advertir en su Tratado estas minusvalías técnicas, también Berlioz da buena cuenta de ellas. A este respecto apunta en su *Tratado de Orquestación*, publicado en su versión traducida al castellano en 1860, lo siguiente:

“Los mejores tonos del clarinete son, sobre todo, los de do, fa y sol, luego los de sib, mib, lab, re nat. y sus relativos menores; como quiera que hay clarinetes afinados en varios tonos, puede muy bien evitarse el que este instrumento toque en tonos muy cargados de sostenidos y bemoles, como por ejemplo, en la nat., mi nat., si nat., re bem. Mayores, y su relativos menores.” (Berlioz, 1844)

Del mismo modo el célebre pedagogo y clarinetista inglés Brymer, en la misma línea de los anteriores teóricos, sostiene lo siguiente:

“El clarinete en Sib toca con facilidad las tonalidades de Do, Fa, Sib, Lab y Reb, así como Sol y Re, y por supuesto sus relativos menores. Lo es mejor para LaM, MiM, SiM e incluso FaM.” (Brymer, 1976)

Se desprende de las citas referenciadas que el clarinete tipo se desenvuelve con ciertas garantías en las tonalidades que no exceden las cuatro alteraciones.

Ante la imposibilidad de tocar el instrumento en tonos alejados de los que se han referido, los constructores se vieron inducidos a experimentar por dos líneas de investigación en la búsqueda de soluciones prácticas: por una parte, se avanzó en la progresiva incorporación de llaves, lo que derivó en elaborados sistemas de llaves perfeccionados a lo largo del período romántico -se analizan en el Capítulo 13-; por otra, se trabajó en la construcción de clarinetes con diferentes longitudes de tubo y por tanto afinados en tonos diferentes, con el fin de que se pudiera interpretar con ciertas garantías en cualquier tonalidad. De esta forma se evitaban las tonalidades con exceso de alteraciones. Cada uno de estos clarinetes podía abordar con éxito sus tonos vecinos y por tanto se cubría un espectro tonal vasto.

De este modo surgieron los denominados instrumentos transpositores⁸¹, aquellos que no emiten las notas reales que el compositor ha escrito en el guión, sino que las

⁸⁰ Podemos encontrar varios ejemplos de esta norma en algunas obras de Mozart como la *Obertura de la Clemenza di Tito*.

⁸¹ Se tratan detenidamente en el apartado siguiente.

transportan para que puedan sonar igual al hallarse en distintas tonalidades, luego siempre existe un intervalo fijo entre las notas leídas por el ejecutante y los sonidos que emita el instrumento. Dado que todos los instrumentos de una misma familia requieren la misma técnica de digitación, resulta muy práctico reducir los instrumentos de una misma familia, mediante la notación, a un instrumento tipo no transpositor sobre el cual se basa la digitación.

Al tiempo que el clarinete tipo se perfeccionaba técnicamente, fueron irrumpiendo nuevos miembros de la familia propiciados por las demandas musicales y estéticas de la época. Paulatinamente se fue completando un espectro tonal amplísimo, mientras que la extensión total de la nueva familia orquestal devino en unos límites inusitados. En la siguiente tabla se muestra la relación de miembros clasificados por voces, así como la tesitura completa de la familia:

Tabla 12.1 Clasificación de la familia

GRUPOS	TONOS	GRUPOS	TONOS
<i>SOPRANO AGUDO</i> <i>(Requinto)</i>	Lab, Fa, Mib y Re	<i>CONTRALTO</i> <i>(Corno di Bassetto)</i>	Fa y Mib
<i>SOPRANO</i>	Do, Si, Sib y La	<i>BAJO</i>	Do, Sib y La
<i>ALTO (De Amor)</i>	Sol y Fa	<i>CONTRABAJO</i>	Fa, Mib, Do y Sib
<i>ALTO</i>	Fa y Mib	<i>OCTOCONTRABAJO</i>	Sib

12.2 INSTRUMENTOS TRANSPOSITORES

Se dice que un instrumento es transpositor cuando la música que ejecuta suena a una altura diferente de la que está escrita en la partitura.

Todos los miembros de una misma familia se reducen mediante la notación a un instrumento tipo -generalmente afinado en Do-, con lo cual la técnica de digitación de todos los componentes es la misma, lo que supone que un ejecutante puede tocar cualquier miembro de un mismo grupo instrumental con la misma facilidad manteniendo la digitación en todos ellos. De este modo se evitan las tonalidades cargadas de alteraciones.

La notación de las partituras de los instrumentos transpositores se sitúa a una altura distinta de la que realmente produce en el momento de la ejecución. El instrumentista lee su partitura en la clave más cómoda para él y para su instrumento, sin atenerse a la clave original en la que está escrita la composición. El instrumento, sin embargo, responde inmediatamente en la tonalidad correcta, en virtud de la transposición. Por ejemplo, la

escala de si bemol tocada en un clarinete en si bemol figura escrita en la partitura en do mayor, pero suena si bemol, es decir, un tono por debajo de la tonalidad indicada.

La transposición es especialmente útil en una composición musical cuya armadura requiera muchas alteraciones. El ejecutante de un instrumento transpositor encuentra así menos notas accidentales en la partitura. Para él no existe el problema de tener que transportar desde una tonalidad a otra; simplemente toca lo que está escrito. La dificultad la encuentra el director de orquesta o el lector de una partitura completa que tiene que saber y recordar qué instrumento o instrumentos deben ser transportados y a qué altura, para así poder ejecutar la música en el piano y/o escuchar mentalmente la altura real de las notas de cada instrumento transpositor.

En el caso del clarinete, el instrumento tipo no transpositor afinado en Do ha caído en desuso por razones prácticas relacionadas con el timbre y la afinación, correspondiendo en la actualidad esta categoría al clarinete afinado en Sib.

El intervalo al cual se transporta se forma entre la nota tipo Do y la nota en la cual se afina el instrumento transpositor, siempre en modo descendente, a excepción de los instrumentos sopraninos⁸² que se sitúan en intervalos ascendentes. Además, cuando la distancia entre dos o más instrumentos de una misma familia resulta una octava, se suele indicar también la tesitura del instrumento transpositor, a saber: Clarinete bajo en Sib, Saxofón barítono en Mib, etc.

Veamos un ejemplo: sea transportar una melodía escrita para instrumentos en Do -tono de orquesta- al clarinete en Sib y en La. La diferencia de afinación entre ambos la constituye, en el tono primero, un intervalo de 2ª mayor descendente, y en el segundo una tercera menor descendente. En tal caso se deberá transportar un tono alto la melodía escrita en Do para que la ejecute un instrumento afinado en Sib y un tono y medio para el afinado en La, para que de esta forma suene en el tono de orquesta.

Fig. 12.1 Ejemplo de transposición musical

Tono de la orquesta en Do



Tono real del clarinete en Sib



Tono real del clarinete en La



⁸² Es el caso de los clarinetes requintos en Mib y Lab.

El instrumento tipo era obviamente el que se hallaba afinado en Do, esto es, el tono de la orquesta, y por lo tanto era un instrumento no transpositor. En el caso del clarinete, en sus orígenes fue, al igual que sus homólogos del grupo de las maderas, el afinado en Do, dado que era el clarinete más primitivo. Mas debido a razones de preferencias y gustos tímbricos más refinados, este instrumento, con un timbre excesivamente brillante y una afinación más imperfecta debido a su tubo más reducido, no era del agrado de los compositores e intérpretes, por lo que fue cayendo de forma paulatina en desuso. En su lugar, tomó relevancia el afinado en Sib que se erigió como el instrumento tipo de la familia por sus mejores cualidades tímbricas.

En sus orígenes, la orquesta adoptó, junto con el clarinete tipo primitivo en Do, el clarinete en Sib y el afinado en La. Parece ser que mientras el primero se ocupaba de los tonos con bemoles, el segundo lo hacía con los tonos con sostenidos. El clarinetista de una orquesta debía, pues, disponer de estos tres instrumentos, pues en ocasiones debía cambiar de instrumento en el curso de una obra.

La elección de uno de estos tres clarinetes primitivos no siempre estaba motivada por cuestiones de complejidad técnica. En ocasiones esta elección se basaba en preferencias de timbre, dado que cada uno de estos instrumentos presentaba una sonoridad propia e inconfundible que le individualizaba.

En la siguiente figura se muestra la altura real de la escala del clarinete soprano en Sib:

Fig. 12.2 *Altura real de la escala del clarinete soprano Sib obtenida mediante digitaciones básicas*

The figure displays the real scale of the soprano clarinet in B-flat, organized into four registers. Each register is shown on a five-line staff with a treble clef. Fingerings are indicated by numbers 1-4 below the notes, and accidentals are placed above or below the notes.

- REGISTRO GRAVE (Fundamentales):** Shows the first register with notes from B-flat to B. Fingerings range from 1-2 to 1-4.
- REGISTRO AGUDO (3^{os} Armónicos):** Shows the second register with notes from B-flat to B. Fingerings range from 1-2 to 1-4.
- REGISTRO SOBREGAUDO (1) (5^{os} Armónicos):** Shows the third register with notes from B-flat to B. Fingerings range from 1-2 to 1-4.
- REGISTRO SOBREGAUDO (2) (7^{os} Armónicos):** Shows the fourth register with notes from B-flat to B. Fingerings range from 1-2 to 1-4.
- REGISTRO SOBREGAUDO (3) (9^{os} Armónicos):** Shows the fifth register with notes from B-flat to B. Fingerings range from 1-2 to 1-4.

12.3 DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y ACÚSTICAS DE LOS COMPONENTES

A medida que el clarinete fue objeto de experimentación, su mecanismo se fue perfeccionando. Esto hizo posible que los problemas técnicos de digitación se fueran superando y, con ello, que el acceso a determinadas tonalidades, antes insuperables, se hiciese factible. Paralelamente, la gran familia orquestal fue perdiendo su sitio y razón de ser ante un instrumento más perfeccionado que fue eclipsando a algunos miembros. Así, algunos de estos instrumentos fueron desapareciendo debido a que su principal función de transpositores fue suplantada por el instrumento tipo, capaz de abordar tonalidades cada vez más remotas. Así todo, solo los miembros más perfeccionados desde el punto de vista de la afinación y el timbre persistieron en la evolución del instrumento.

El primer grupo de la familia, *sopranos agudos*, engloba los clarinetes más agudos de la familia. Su sonoridad dura y chillona y su afinación imprecisa le han relegado a un uso exclusivo en las bandas militares. Únicamente los miembros afinados más graves, en especial el afinado en Mib, han sido adoptados por la orquesta.

Tanto el pequeño clarinete en Lab como el afinado en Fa, aunque están prácticamente en desuso, fueron empleados antiguamente en las bandas militares y ocasionalmente en la orquesta. Empero, su timbre excesivamente chillón desaconsejaba su uso.

La variedad más grave de esta familia, es el afinado en Re. Este es el miembro más primitivo del grupo y su uso tuvo cierta importancia en sus orígenes. Gevaert lo refiere en los siguientes términos:

“Este timbre de octava doble en el órgano, se alía a la perfección con los sonidos picados de las cuerdas altas del arpa, con las notas centelleantes lanzadas por el flautín, con los pasos de los violines que se elevan como torbellinos de llamas, con el repique del triángulo, en fin con todo un conjunto de sonoridades pintorescas que evocan ante la mente la visión de un inmenso incendio producido por un poder sobrenatural.” (Gevaert, 1887)

De todos los sopranos agudos solo ha persistido el afinado en Mib. Parece ser que este clarinete era el que cubría con más garantías el tramo que enlaza el clarinete tipo con el flautín. Su afinación más precisa, aunque requiere cierta destreza del ejecutante, y su brillante timbre, le confiere una gran personalidad que le han hecho erigirse en el miembro más importante de este grupo. Su timbre es frecuentemente usado en la orquesta para obtener determinados efectos sonoros de tintes paródicos. En este sentido, Beriloz apunta textualmente en su Tratado de Orquestación:

“Desde el La sobre el pentagrama, el requinto en mi bem., dá algunos sonidos picantes digámoslo así, faltos de gracia y delicadeza, y por cierto que en una sinfonía moderna se le ha usado para parodiar, para degradar y ridiculizar a una melodía: una situación especial requería pues esta extravagante transformación del sentido dramático de la composición.” (Berlioz, 1844)

Grandes compositores como Strauss o Stravinsky han hecho uso en algunas de sus mejores composiciones de las cualidades sonoras de este pequeño clarinete. Actualmente su uso está generalizado en las bandas de música donde se le encomienda un papel solista o

de refuerzo, doblando a la octava aguda las partes del clarinete soprano. También en la orquesta donde se le utiliza en función del repertorio.

El segundo grupo corresponde a los *sopranos* y es el que alberga al clarinete tipo. El primero de este grupo es el afinado en Do. Este instrumento es el más primitivo de la familia y en sus orígenes fue durante cierto tiempo el clarinete tipo, de ahí que aparezca en muchas partituras clásicas y románticas. Su timbre resulta un tanto estridente y por ello fue eclipsado en su condición de instrumento tipo por el afinado en Sib. No extraña, pues, que en la actualidad se halle en desuso.

A un semitono bajo se sitúa el siguiente miembro de este grupo afinado en Si. Ha sido el instrumento menos utilizado de este grupo. Al igual que el afinado en Do, su uso está descartado por las mismas razones que se han esgrimido a propósito de éste.

Dentro de este grupo, el clarinete en Sib es el más utilizado por sus mejores cualidades sonoras. Posee un timbre brillante pero también dulce y aterciopelado y una afinación que, lejos de ser perfecta, resulta más precisa. Su facilidad de emisión y su poder de expresión le han hecho insustituible en la música moderna. Berlioz lo define del siguiente modo:

“Es el clarinete por excelencia, el de los virtuosistas: su timbre realiza en un grado eminente las cualidades eximias de esta voz instrumental: la pureza y el mordente.”
(Berlioz, 1844)

Le sigue a una tercera menor descendente el clarinete soprano afinado en La. Con una sonoridad más aterciopelada, este instrumento todavía tiene una gran vigencia en la música orquestal y de cámara. Grandes compositores como Mozart lo han utilizado en su música más íntima y lírica explotando al máximo sus eximias cualidades tímbricas. Su facilidad de mecanismo le permite una gran agilidad y flexibilidad similar a la del clarinete tipo. Además, por lo que respecta a la afinación, no tiene nada que envidiar a éste. Estas cualidades han hecho que junto con el clarinete requinto Mib, el soprano en Sib y el bajo en Sib, sean los instrumentos más empleados de la familia.

Existe además una variedad denominada *clarinetes sopranos de amor* afinados en Sol y Fa que están totalmente en desuso.

El siguiente grupo lo constituyen los *altos* afinados en Fa y Mib. Su invención a finales del siglo XVIII pasó con más pena que gloria. De estos dos clarinetes altos, el afinado en Mib tuvo mayor aceptación. Debido a la longitud de su tubo, está encorvado en el pabellón y su boquilla se une al tubo por medio de un tudel. Esta estructura condiciona toda su sonoridad, menos brillante y carente de personalidad. Así todo, su función en las grandes bandas de música consiste en desempeñar el papel de las violas en las cuerdas, por lo que todavía tiene vigencia.

El grupo de los *contraltos* lo constituye el clarinete afinado en Fa, también denominado *corno di bassetto*, y el que se halla en el tono de Mib. De estos dos instrumentos solo el primero tuvo cierta importancia en la música orquestal de la época. Mozart lo utilizó en algunas de sus obras. Afinado una cuarta por debajo del clarinete soprano en Sib, este instrumento se caracteriza por su gran longitud de tubo especialmente diseñado para prolongar su extensión una tercera mayor en la región grave llegando así hasta el Do₂. Su timbre es más cálido y pastoso que el del clarinete alto. Actualmente se le puede escuchar excepcionalmente en alguna orquesta aunque su uso ordinario está derogado.

Por su parte el clarinete contralto en Mib, afinado a una quinta mayor por debajo del clarinete tipo, no se tiene conocimiento de que haya sido utilizado en la orquesta, aunque sí en las bandas de música de Inglaterra. Su tubo está curvado en la parte inferior, además utiliza un tudel más grueso, similar al empleado por el clarinete bajo, con lo cual su sonoridad resulta más cálida. Su extensión abarca desde el Mi_2 al Sol_5 .

El siguiente grupo corresponde a los clarinetes *bajos*. Existen tres variedades de este grupo afinados en los tonos de Sib, La y Do. El primero, afinado a una octava por debajo del instrumento tipo, es el más importante del grupo. Su forma actual, con el tubo doblado en la parte inferior y un tudel que une la boquilla con el tubo, se debe a Adolf Sax. En ocasiones su notación se presenta en clave de fa, aunque la notación francesa suele escribirla en sol, igual que para el soprano. Su timbre sombrío y tenebroso, en especial en sus fundamentales, es el más característico de toda la familia. No es de extrañar que en la actualidad se halle perfectamente integrado en la orquesta moderna. Además su acústica le permite obtener determinados efectos sonoros muy demandados en la música contemporánea.

El clarinete bajo en La aparece en algunas de las óperas alemanas. Su diapasón se halla a la octava inferior del clarinete soprano en La. Este instrumento quedó en desuso puesto que el clarinete bajo en Sib cubría todas las necesidades acústicas de este grupo.

Por último, existe en este grupo una variedad afinado en Do cuya denominación responde al nombre de *Glicibarifono*. Parece ser que su construcción por Buffet estuvo motivada, al igual que las otras variedades de este grupo, por la idea de poder dar la octava del clarinete soprano afinado también en Do. No tuvo mucha vigencia y, al igual que el soprano, quedó pronto en desuso.

El último grupo de la familia, denominados *contrabajos*, cubre la parte más grave de su extensión. Se conocen cuatro variedades de este grupo: en Fa, en Mib (*Guerrero*), en Do (*Pedal*) y en Sib. De todos ellos únicamente este último ha tenido cierta importancia en la literatura clarinetística. También denominado *Bordón*, su largo y grueso tubo debe doblarse dos veces para poder acceder a todo su mecanismo. Aparece excepcionalmente en algunas partituras orquestales, pero es en las bandas de música donde tiene mayor aceptación.

Las otras tres variedades de este grupo fueron experimentos que no tuvieron mayor trascendencia. Únicamente el modelo afinado en Do, también conocido como *Pedal*, ha tenido cierta relevancia.

Aunque se ignora si se ha utilizado en la música orquestal, existe un clarinete afinado una octava por debajo del clarinete bajo en Sib que se le puede denominar *octocontrabajo*. Por sus grandes dimensiones y porque su función la desempeñaba otro instrumento, su uso en la actualidad está abolido.

En la siguiente figura se muestran los miembros de la familia más utilizados a lo largo de la historia del instrumento.

Fig. 12.3 Clarinetes utilizados actualmente



1: Soprano agudo en Mib; 2: Soprano en Do; 3: **Soprano en Sib**; 4: **Soprano en La**; 5: Corno di Bassetto en Fa; 6: Alto en Mib; 7: **Bajo en Sib**; 8: Contrabajo en Sib (En negrita los más empleados en la actualidad)

En la siguiente tabla se exponen de forma sinóptica las características técnicas y acústicas más relevantes de todos los miembros de la familia:

Tabla 12.2 Características técnicas y acústicas de los componentes de la familia del clarinete

SOPRANOS AGUDOS

TONO	INVENCIÓN	EXTENSION	TIMBRE	USO	REPERTORIO	PARTICULARIDADES
LAb	2ª Mitad S. XVIII	Mi ₂ – Do ₅ Notas reales: Do ₃ – Sol# ₅	Muy chillón	-Bandas militares de Austria - <i>Los Carabinieri</i> de Roma	- <i>Baile de Måscara</i> (Verdi)	A menudo se construye con metal plateado. Actualmente se haya en desuso.
FA	2ª Mitad S. XVIII	Mi ₂ – Fa ₅ N. r.: La ₂ – Sib ₅	Muy chillón	-Bandas militares	No tiene un papel relevante en ninguna composición.	Actualmente no se utiliza.
MiB	2ª Mitad S. XVIII	Mi ₂ – Sol ₅ N. r.: Sol ₂ – Sib ₅	Brillante y estridente	-Bandas militares -Orquestas	- <i>Sinfonía Fantástica</i> (Berlioz) - <i>Till Eulenspiegel</i> (Strauss) - <i>La Consagración de la Primavera</i> (Stravinsky) - <i>Las Walquirias</i> (Wagner) - <i>La Consagración de la Primavera</i> (Stravinsky) -Cuatro Conciertos para Clarinete (Molter)	Completa el espacio tonal entre el clarinete soprano Sib y el flautín.
RE	2ª Mitad S. XVIII	Mi ₂ – Sol ₅ N. r.: Fa# ₂ – La ₅	Duro	-Bandas militares -Orquestas -Solista		Se ha empleado como solista en algunos Conciertos.

SOPRANOS

TONO	INVENCION	EXTENSION	TIMBRE	USO	REPERTORIO	PARTICULARIDADES
DO	Denner, 1770	Mi ₂ – Sol ₅	Brillante	-Orquesta -Solista	- <i>El Barbero de Sevilla</i> y <i>Guillemos Tell</i> (Rossini) - <i>La Traviatta</i> y <i>Rigoletto</i> (Verdi) - <i>Sinfonías n° 1, 5, 7 y 9</i> (Beethoven)	Muy empleado por los compositores italianos en sus óperas por sus cualidades timbricas. En sus orígenes era el instrumento tipo de la familia.
SI	Denner, 1770	Mi ₂ – Do ₆ N. r.: Re# ₂ – Si ₅	Deslucido e impersonal	-Orquesta	- <i>Idomeneo</i> - <i>Così fan tutte</i> (Mozart)	Tuvo muy poca aceptación por su sonoridad un tanto vulgar. Actualmente se haya en desuso.
SIb	Denner, 1770	Mi ₂ – Do ₆ N. r.: Re# ₂ – Si ₅	Brillante, cálido y homogéneo.	-Bandas -Orquestas -Solista -Cámara	- <i>Concierto (K. Stamitz)</i> - <i>Sonatas (Brahms)</i> - <i>Conciertos (Weber)</i> - <i>Sinfonías (Beethoven, Mozart, Brahms)</i>	Está considerado el instrumento tipo de la familia. Es el clarinete por excelencia de los virtuosistas y el más utilizado por su versatilidad y sus formidables posibilidades sonoras y timbricas.
LA	Denner, 1770	Mi ₂ – Do ₆ N. r.: Do# ₂ – La ₅	Aterciopelado y sombrío	-Bandas -Orquestas -Solista -Cámara	- <i>Concierto (Mozart)</i> - <i>Concierto (Nielsen)</i> - <i>Sinfonías (Brahms, Beethoven)</i> - <i>Quintetos y Trios (Mozart, Brahms)</i>	Mozart le tenía un especial afecto a este instrumento. Su particular sonoridad permite expresar los sentimientos más apasionados.
FA y SOL (De Amor)	Francoeur, 1772. Fabricado por Laborde, 1780	Mi ₂ – Sol ₅	Velada	-Orquesta -Cámara	- <i>Thenidtoctes</i> (Bach)	Tiene un largo tubo encorvado que lo caracteriza. En la actualidad su uso está prácticamente abolido.

ALTS		TONO	INVENCION	EXTENSION	TIMBRE	USO	REPERTORIO	PARTICULARIDADES
FA	I. Müller, finales del S. XVIII	Mi ₂ – Do ₆	Destucido	-Bandas	No tiene un papel relevante en ninguna composición	Instrumento en desuso.		
		N. r.: La ₁ – Fa ₅						
Mib	I. Müller, finales del S. XVIII	Mi ₂ – Do ₆	Mate	-Bandas -Cámara	No tiene un papel relevante en ninguna composición	Desempeña el papel de la viola en los instrumentos de viento madera.		
		N. r.: Solb ₁ – Mib ₅						

CONTRALTOS		TONO	INVENCION	EXTENSION	TIMBRE	USO	REPERTORIO	PARTICULARIDADES
FA (Corno de bassetto)	Horn, 1771	Do ₂ – Sol ₅	Pastoso y cálido	-Orquesta -Cámara -Solista	-Requiem -La Clemenza di Tito -La Gran Serenata -La Flauta Mágica (Mozart)	Aunque originalmente era un clarinete soprano con una mayor longitud de tubo, posteriormente se fabricaba con el pabellón encorvado y con un tudel en la boquilla, ambos en metal cromado. Todavía se usa en algunas obras.		
		N. r.: Fa ₁ – Do ₅						
Mib	Se desconoce	Mi ₂ – Sol ₅	Pastoso y cálido	-Bandas de Inglaterra	No tiene un papel relevante en ninguna composición	Solo se usó en bandas de música. En la actualidad no se utiliza.		
		N. r.: Sol ₁ – Sib ₄						

BAJOS

TONO	INVENCIÓN	EXTENSIÓN	TIMBRE	USO	REPERTORIO	PARTICULARIDADES
DO	Catterino-Catterini (Lo construye Buffet)	Mi ₂ – Sol ₅	Sombrio	-Orquesta de ópera	- <i>Los Hugonotes</i> (Meyerbeer)	También denominado <i>Glicibirifono</i> . No tuvo prácticamente aceptación.
Sib	A. Sax, 1836	Mi ₂ – Sol ₅	Amplio, penetrante y misterioso	-Orquesta -Bandas -Cámara	- <i>Los Hugonotes</i> (Meyerbeer) - <i>Las Walquirias</i> (Wagner) - <i>La Vals</i> (Ravel)	Se utiliza mucho en la música contemporánea explotando sus posibilidades sonoras. Empasta muy bien en la orquesta con el fagot y el chelo.
		N. r.: Re ₁ – Fa ₄				
LA	A. Sax, 1836	Mi ₂ – Sol ₅	Velado y sombrio	-Orquesta de ópera	- <i>Lohengrin</i> (Wagner)	Todavía se utiliza para obtener efectos melodramáticos.
		N. r.: Do# ₁ – Mi ₄				

CONTRABAJOS		TONO	INVENCIÓN	EXTENSIÓN	TIMBRE	USO	REPERTORIO	PARTICULARIDADES
FA	E. Skorra, 1840	Mi ₁ – Re ₃ N. r.: La ₁ – Sol ₂	Sombrio y tenebroso	-Bandas -Orquesta	No tiene un papel relevante ninguna composición	Actualmente en desuso por sus grandes dimensiones y porque su ámbito tonal lo ocupa el contrabajo de las cuerdas en la orquesta.		
Mib	Dumas, 1808	Mi ₁ – Re ₃ N. r.: Sol ₁ – Fa ₂	Sombrio y tenebroso	-Bandas -Orquesta	No tiene un papel relevante ninguna composición	También denominado <i>Guerrero</i> . Actualmente en desuso por sus grandes dimensiones y porque su ámbito tonal lo ocupa el contrabajo de las cuerdas en la orquesta.		
DO	J.F. Weprecht, 1839	Mi ₁ – Re ₃	Sombrio y tenebroso	-Bandas -Orquesta	No tiene un papel relevante ninguna composición	Se le conoce también como <i>Batyphon</i> o <i>Pedal</i> . Se utiliza en la música de cine y de vanguardia buscando efectos sonoros de tintes dramáticos.		
Sib	Principios S. XIX Perfeccionado por A. Sax	Mi ₁ – Do ₃ N. r.: Reb ₁ – Sib ₃	Sombrio y tenebroso	-Bandas -Orquesta	- <i>Fervaal</i> (D'Indy) - <i>La Leyenda de José</i> (Strauss)	Es el instrumento más perfecto acústicamente de su grupo. Se le denomina también <i>Bordón</i> .		

OCTO CONTRA BAJO		TONO	INVENCIÓN	EXTENSIÓN	TIMBRE	USO	REPERTORIO	PARTICULARIDADES
Sib	Lo construye la casa Leblanc.	Mi ₂ – Do ₃ N. r.: Reb ₂ – Sib ₃	Cavernoso	Se desconoce	No tiene un papel relevante en ninguna composición	Su longitud puede superar la del propio instrumentista.		

SISTEMAS DE LLAVES EN EL CLARINETE



Introducción, andante y danza, para Clarinete y Piano. Menéndez (1896-1975)

13.1 INTRODUCCION

A partir del período Romántico las nuevas exigencias estéticas y musicales demandaron cambios importantes en la técnica y el timbre de los instrumentos. Se exigía unos instrumentos dotados técnicamente para interpretar partituras en las tonalidades más remotas con ciertas garantías. Para ello se trabajó en dos direcciones: la construcción de clarinetes de diferentes longitudes y, por tanto, afinados en tonos distintos, y la invención de elaborados sistemas de llaves que permitiesen optimizar el rendimiento técnico-acústico del instrumento. La primera línea de investigación ya ha sido tratada en el capítulo precedente, por lo que nos ocuparemos en este capítulo de la segunda.

Los nuevos sistemas aportaron diversas mejoras y perfeccionamientos en aras de una mayor facilidad técnica, uniformidad sonora y precisión en la afinación. Algunos de ellos sufrieron un rechazo del sector por diversas razones, a saber: elevados costes en la construcción, complejidad de digitación, excesivo mecanismo, fallos de afinación, incompatibilidad con el timbre actual, etc. Otros se han consolidado a lo largo de este período por sus ventajas de tipo técnico y acústico.

Aunque se han desarrollado varios sistemas de llaves en el clarinete a lo largo de su historia, por razones obvias solo vamos a describir de forma breve los sistemas más generalizados y que más se han consolidado a lo largo de los últimos tiempos.

12.2 SISTEMAS BASE: MULLER Y BOEHM

Hasta que irrumpiera el sistema Müller (Fig. 13.2), el *Chalumeau*⁸³ inventado por Denner en 1700 fue objeto de una ímproba experimentación. Tras las primeras llaves a cargo de los hijos de Denner y Beer, el clarinete de seis llaves de Lefevre tuvo gran aceptación. Este instrumento, que permitía tocar la nota Do#₃ y su duodécima el Sol#₄, podía competir técnicamente con cualquier otro instrumento de la época y tuvo tanto éxito que su empleo permaneció vigente durante el cuarto de siglo siguiente.

Fue en 1812 cuando I. Müller (1786-1918)⁸⁴ presentó su nuevo diseño para que fuera examinado por una Comisión técnica del Conservatorio de París. Según Müller, su instrumento evitaría la necesidad que tenía los músicos de tener varios clarinetes afinados en tonalidades diferentes. El nuevo instrumento presentaba trece llaves y su novedosa disposición permitía, según su autor, tocar en cualquier tonalidad con una cierta y relativa comodidad, además de mejorar su acústica de forma considerable. Entre sus aportaciones más notables, el nuevo sistema presentaba unas zapatillas de cuero, con un relleno de lana, asentadas en una cazoleta hueca soldada al extremo de las llaves, las cuales sustituían a las viejas zapatillas planas de fieltro utilizadas hasta entonces. Además, los orificios presentaban un anillo biselado y ligeramente elevado de las zapatillas.

Este clarinete, denominado *omnitónico* por su facilidad para interpretar música en todas las tonalidades, fue no obstante rechazado por los especialistas del Conservatorio de París. Müller consideraba que este modelo, afinado en Sib, se erigiría como el único necesario para ejecutar en cualquier tonalidad por sus excelsas cualidades sonoras y sus perfectas dimensiones. No fue así. Los especialistas basaron su rechazo en la creencia de que debían existir varios modelos de clarinetes afinados en tonalidades diferentes, cada uno de los cuales poseía su propio timbre y afinación, en pocas palabras su propio carácter. Esta cualidad tenía un valor musical significativo dado que los compositores se inspiraban en cada uno de estos instrumentos por su personalidad propia.

Entre los escépticos se encontraba el clarinetista Lefevre, quien consideraba que perforar más agujeros en el cuerpo del clarinete estropearía la calidad del sonido y, posiblemente, porque su clarinete quedaría así eclipsado y relegado. También el compositor y profesor Heinrich Backofen se mostró reacio con el nuevo modelo y sostenía que un clarinete con más de seis llaves perdería su idiosincrasia. Algunos virtuosos como Ernesto Cavallini y Heinrich Baermann siguieron utilizando el modelo viejo de seis llaves, a pesar de la disponibilidad de instrumentos mecánicamente más complejos y, por tanto, con mejores prestaciones.

Así todo, el nuevo sistema fue aceptado paulatinamente con el tiempo⁸⁵ y todavía hoy está vigente con los perfeccionamientos posteriores a cargo de H.J. Baermann (1784-1847), R. Stark y O. Oehler (1858-1936), todos ellos excelentes clarinetistas con conocimientos sobre mecánica y organología.

⁸³ Véase el Capítulo 2.

⁸⁴ Parisino nacido en Rusia. Desde muy joven tuvo una gran inquietud por experimentar con el mecanismo del clarinete. Fue músico de cámara en San Petersburgo. Se especializó en solos de corno di bassetto en Berlín y Leipzig.

⁸⁵ En España fue adoptado en 1833 por A. Romero (1815-1886), clarinetista y pedagogo de la época.

Pero sin lugar a dudas el sistema de llaves que ha tenido más repercusión en los instrumentos de viento madera es el sistema *Boehm*⁸⁶ (Figs. 13.3 y 13.11). Este sistema recibe el nombre de su autor, Theobald Boehm (1794-1881), famoso flautista y compositor de la Corte de Baviera. En sus inicios este sistema no gozó de la atención e interés que merecía. Fue presentado en la Exposición de Londres de 1851 y 1862, así como en las Exposiciones de París de 1855 y 1867, con más pena que gloria. En 1867 presentó su nuevo modelo ante un jurado y tampoco obtuvo el premio que merecía. Posteriormente su sistema fue publicado en una revista especializada de Munich en 1868 sin ninguna repercusión. Finalmente, en 1871, Boehm publicó un manual que recogía todos los aspectos técnicos y acústicos de su nuevo sistema.

Este sistema consiste básicamente en una nueva disposición y diámetro de los orificios en el tubo de acuerdo con reglas y leyes matemáticas y físicas, y no, como era costumbre hasta entonces, según la distancia natural establecida por la separación de los dedos. T. Boehm lo aclara en la introducción de su manual:

“Hace ya más de sesenta años que comencé a tocar con una flauta de mi propia construcción...Pronto intenté introducir algunas variaciones en las llaves, muelles y zapatillas de mi flauta; pero, a pesar de todos mis esfuerzos, la igualdad del sonido y la perfección de la afinación fueron imposibles de lograr debido a que la distancia correcta entre una llave y otra exigía una excesiva separación de los dedos. Para conseguir que los agujeros de las llaves pudieran tener un tamaño adecuado y se pudiesen colocar en los puntos acústicamente correctos, fue necesario desarrollar un sistema completamente nuevo.” (Boehm, 1991)

Para ello, lo primero que hizo Boehm fue realizar los cálculos necesarios para determinar las nuevas posiciones de los agujeros. Una vez encontradas las proporciones teóricas de las diferentes columnas de aire y, consecuentemente, de los orificios, realizó estudios empíricos tratando de hallar las mejores posiciones acústicas que se daban en la práctica. El siguiente paso consistió en idear y adaptar un sistema de llaves y anillos que permitiese activar los orificios que se hallaban fuera del alcance de los dedos, sin tener en cuenta la disposición de éstos. Asimismo, experimentó con diferentes taladros hasta determinar cual era el diámetro preciso que más convenía desde el punto de vista acústico, el cual quedó establecido en 19 mm. Además rescató el tubo cónico, ya utilizado en el Renacimiento, para disponerlo en la parte de la embocadura, con lo cual se mejoraba sustancialmente la afinación entre armónicos al crearse una parábola de revolución. La parte restante del tubo quedaba de forma cilíndrica y gracias a esta forma los orificios podían disponerse más cerca uno de otro. Por último, se debe a este sistema la colocación del tapón de corcho, elemento fundamental para la correcta afinación y timbre del instrumento. Después de ímprobos experimentaciones, convino en colocar este tapón a 17 mm de la embocadura.

Por otra parte, Boehm consideraba que los orificios de la flauta debían ser grandes y de tamaño creciente para conseguir una óptima calidad tonal. Pero dado que la fabricación de una flauta de estas características suponía un coste extraordinario, se decantó finalmente por un término medio, esto es, un diámetro constante para los doce orificios de

⁸⁶ Para ampliar información consultar el manual *La flauta y la interpretación flautística*, Ed. Mundimúsica, 1991, Madrid.

sonora y facilidad técnica de ejecución en muchos pasajes. Por otra parte, se doblaron algunas llaves que podían ser accionadas con cualquiera de los dedos meñiques, lo cual aportó mayores posibilidades técnicas al instrumento. Ahora se podía ejecutar pasajes antes impracticables con este sistema, ya que se evitaba la acción de resbalar de una llave a otra con el mismo dedo. Además se facilitaba sobremanera la ejecución de muchos trinos e intervalos antes imposibles.

El sistema Boehm no solo estaba perfeccionado desde el punto de vista técnico y acústico, sino que estéticamente también experimentó una notable mejoría. Se prescindieron de los rebordes donde se colocaban las llaves, para colocarlas ahora sobre sus ejes en sus extremos, en largos rodillos tubulares; las llaves de palanca fueron sustituidas por otras articuladas que se accionaban lateralmente. Además añadió al cuerpo superior una pieza denominada barrilete que hacía las veces de corrector de la afinación.

Con el nuevo sistema los ejecutantes se vieron obligados a cambiar el sistema de digitación y emplearse a fondo en ejercicios técnicos para llegar a dominar las nuevas digitaciones, lo cual supuso un nuevo punto de inflexión en la historia del clarinete.

Los dos sistemas tratados son los que más se utilizan en la actualidad en el clarinete. Cada uno de ellos ha contribuido a crear una escuela clarinetística propia. El sistema Boehm, por su origen, se asocia a la escuela francesa; mientras que el sistema Müller, de nacionalidad alemana, a la bávara. Cada uno de estos sistemas se ha ido perfeccionando en aras de encontrar una sonoridad que se halle en consonancia con el gusto musical de cada escuela. Mientras que la francesa con el sistema Boehm ha optado por una sonoridad más brillante y refinada gracias al uso de una boquilla con una tabla más curvada y una caña más larga y delgada -sonoridad que le va como anillo al dedo a la música de Debussy o Poulenc-, la alemana, con el sistema Müller perfeccionado, es partidaria, de acuerdo con su idiosincrasia, de una sonoridad más sobria y aterciopelada -que casa mejor con la música de Brahms, Weber o Mozart-. Estas cualidades sonoras se obtienen merced a un taladro mayor y una boquilla más estrecha y larga que utiliza cañas más gruesas y resistentes⁸⁹.

13.3 SISTEMAS O MEJORAS POSTERIORES MAS RELEVANTES

Todos los sistemas posteriores se han nutrido de las ideas o mejoras de los sistemas Müller y Boehm. Mientras que el clarinete sistema Boehm ha permanecido prácticamente inalterado con el paso del tiempo, el clarinete de Ivan Müller sí ha experimentado muchas modificaciones. Algunos de estos cambios han llegado a consolidarse como nuevos sistemas, mientras que otros solo han supuesto mejoras puntuales en el mecanismo.

Entre las mejoras más relevantes que ha experimentado el sistema Müller, encontramos los perfeccionamientos de Baermann y Stark. El primero de ellos, amplió el número de llaves para que pudieran ser accionadas por distintos dedos, esto es, las duplicó

⁸⁹ Un taladro estrecho favorece la producción de más componentes armónicos que uno amplio; a un contenido espectral generoso con prevalencia de componentes impares se le asocia un timbre oscuro, mientras que a uno reducido, un timbre brillante. Por otra parte, los clarinetes del sistema alemán tienen por lo general una frecuencia de corte más baja que los franceses lo que oscurece su timbre.

para permitir su accionamiento con los dedos de la otra mano. Además corrigió por medio de anillos la afinación de algunas notas. R. Stark, por su parte, aportó ventajas del sistema Boehm en el sistema Müller dando como resultado un instrumento híbrido que no tuvo excesivo éxito.

F. Beer y C. Jaussen también perfeccionaron el clarinete de Müller. El primero, además, introdujo en Francia la técnica de tocar con la caña situada en la parte inferior de la boquilla. C. Jaussen, por su parte, presentó un clarinete con unos rodillos corredizos en las llaves para facilitar el legato de ciertos sonidos.

Otros fabricantes y músicos han intentado mejorar la doble función de la llave del Sib₃. Además de producir este sonido, esta es la llave de octava. Esta dualidad comporta serios inconvenientes de tipo acústico dado que la llave de octava debe ser más pequeña y debe situarse más cerca de la boquilla, mientras que el orificio del Sib₃ debería ser más grande y ubicarse más abajo. Además, esta modificación lleva aparejada cambios en la digitación. Entre estos, encontramos a Ernest Schmidt de Manheim quien, junto con el fabricante Louis Kolbe, desarrolló un clarinete basado en el sistema Boehm en 1912. La novedad consistía en separar ambas funciones en dos llaves diferentes. Actualmente es conocido como *Reforma Schmidt del Sistema Boehm* (Fig. 13.12) y todavía se fabrica. Posteriormente Wilhelm Heckel de Biebrich -conocido por su reforma en el fagot-, perfeccionó esta innovación y añadió una boquilla con el propósito de mejorar la equalización. También Hans Berninger, músico de Leipzig, propuso una solución que consistía en abrir las llaves de trinos para reforzar la resonancia de este sonido.

Más recientemente, el americano William Stubbins solucionó el problema de la forma siguiente: el Sib₃ se tocaba con la digitación convencional, pero además de abrir la llave de doceava, abría otro orificio grande que proporciona una mejor calidad tonal.

El clarinete alemán *Normal*, desarrollado por el clarinetista Hermann Kunze y por el fabricante de instrumentos Thomas Mollenhauer, también aplicó algunas ideas del sistema Boehm con anterioridad a la reforma de Schmidt aunque tampoco logró consolidarse.

En cuanto a los modelos o sistemas más importantes de clarinetes conocidos como *no Boehm*, se encuentra el sistema *Albert* (Figs. 13.4 y 13.6), el modelo *Clinton* (Figs. 13.5 y 13.7) y el de *Oehler* (Figs. 13.8 y 13.9). Cada uno de estos sistemas es un descendiente directo del clarinete de Ivan Müller.

El sistema *Albert* es obra de J. B. Albert, fabricante de instrumento de Bruselas. Su aportación consistió en remodelar el clarinete de Müller a mediados del siglo XIX. Aunque descende, por tanto, del sistema alemán, no se desarrolló en Alemania y sí en Bélgica, dado el origen de su autor.

Por su parte, el clarinete modelo *Clinton*, desarrollado por James Clinton y construido por Boosey Hawkes en Inglaterra en 1885, fue otra remodelación del clarinete de Müller. Su contribución consistió en aplicar al clarinete la innovación del oboísta francés Apollon Barret que ya había experimentado en el oboe, consistente en colocar un anillo con un muelle contra una sencilla espátula lateral para emitir las notas Mib₂ y Fa₂ y sus duodécimas, lo que mejoraba considerablemente la ejecución de trinos e intervalos.

No cesó en sus investigaciones James Clinton, y a principios de siglo presentó un nuevo modelo que conjugaba la principal innovación del sistema Boehm -las llaves alternas de la junta de palancas- y las mejoras de Barret, con un clarinete sistema Müller, al que denominó clarinete *Clinton-Boehm* (Fig. 13.10).

Sin embargo, el clarinete alemán más perfecto y el que todavía se emplea por la mayoría de clarinetistas alemanes y de la Europa del Este, es el modelo Oehler. Su autor, Oskar Oehler, fue un célebre clarinetista de Berlín que dedicó gran parte de su vida a la investigación del mecanismo y la construcción de clarinetes. Su instrumento, basado en el clarinete de Müller, constaba de veintidós llaves y cinco anillos. Entre sus innovaciones, Oehler modificó la disposición y forma de casi todas las llaves y añadió un orificio de aireado. Además colocó unas extensiones en algunas llaves para mejorar algunos trinos y legatos, cuya novedad consistía en que podían ser activadas o desactivadas a conveniencia del ejecutante. Las notas de horquilla utilizadas hasta entonces fueron sustituidas y/o mejoradas gracias a la colocación de una llave complementaria que abría un orificio lateral. El instrumento así renovado presentaba, en general, un mecanismo más complejo y sólido.

Otro modelo digno de mención es el ideado por J. Marchi (Fig. 13.13). Basado en el sistema Boehm, su aportación más notable radica en la adición de una segunda llave de octava situada en el barrilete que permite obtener una nueva octava y mejorar algunas digitaciones de los sonidos sobreagudos.

Otros modelos de clarinetes menos relevantes, aunque no por ello dignos de mención, son el de F. Lefèvre de 1845; el modelo omnitónico de Blancou fabricado en 1845; el clarinete multifónico de Triebert de 1847; el modelo de Gyssens de 1852; el clarinete de Charles Mahillon de 16 llaves construido a mediados del siglo XIX; el sistema Romero del clarinetista y profesor español Antonio Romero de 1853; el sistema Mazzeo a mediados del siglo XX.

Actualmente, excepto el sistema Boehm y el de Müller-Oehler utilizados masivamente, la mayoría de estos modelos o sistemas de clarinetes están en desuso o se utilizan de forma minoritaria. Por otra parte, se tiende también a unificar los susodichos sistemas dando como resultado un instrumento híbrido. Veamos de forma gráfica los más relevantes:

Fig. 13.2 Clarinete Sistema Muller (1812)



Fig. 13.3 Clarinete Sistema Boehm (1850)



Fig. 13.4 Clarinete Modelo Albert (1865)



Fig. 13.5 Clarinete Modelo Clinton (1871)



Fig. 13.6 Clarinete Modelo Albert (1875)



Fig. 13.7 Clarinete Modelo Clinton (1899)



Fig. 13.8 Clarinete Sistema Muller-Oehler (1900)

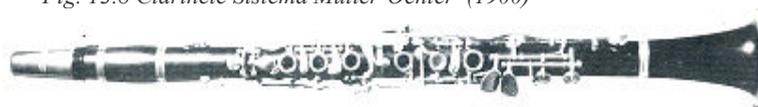


Fig. 13.9 Clarinete Sistema Oehler (1902)



Fig. 13.10 Clarinete Modelo Cilnton-Boehm (1905)



Fig. 13.11 Clarinete Sistema Boehm Buffet (1910)



Fig. 13.12 Clarinete Modelo Schmidt (1912)



Fig. 13.13 Clarinete Modelo Marchi (1960)



DESCRIPCION Y FUNCION ACUSTICA DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA ACUSTICO DEL CLARINETE



Introducción, Tema y Variaciones para Clarinete y Orquesta. Rossini (1792-1868)

14.1 EL TUBO

Ya vimos en el apartado 9.1 que los tubos se clasifican en orden a su forma interior, sus aberturas y su forma de embocadura. Bien, pues vamos a proceder a la descripción del tubo del clarinete de acuerdo con esta clasificación.

El clarinete utiliza un tubo de sección predominantemente cilíndrica con un diámetro aproximado de 15 mm, cerrado acústicamente en uno de sus extremos. Sus frecuencias de resonancia, por tanto, corresponden a las relaciones 1: 3: 5: 7:..., estos es, solo pueden utilizar como notas los armónicos impares.

Sin embargo, su sección cruzada cilíndrica no se mantiene en todo su tubo. Se producen variaciones ligeras en el cuerpo superior y en el inferior, antes de comenzar el cono en la segunda mitad del cuerpo inferior. Así todo, en mi opinión debemos considerar el tubo del clarinete como cilíndrico a efectos puramente acústicos. No olvidemos que es esta cualidad junto con su forma de embocadura la que determina su peculiar comportamiento acústico de tubo cerrado. Otra cuestión es la influencia que pueda tener esta forma un tanto *sui generis* en el contenido armónico de un determinado sonido. Efectivamente, las bandas de resonancia o formantes de un sonido pueden verse afectados en cierta medida por las zonas cónicas del tubo. Es cierto que los armónicos pares de determinados sonidos ven reforzada su intensidad debido a esta cualidad física del tubo y a la acción de la caña. Por tanto, las zonas cónicas del tubo podrán influir en la resonancia superior de un determinado sonido, reforzando la intensidad de ciertos componentes

armónicos de orden par, pero en ningún caso influirán en el funcionamiento acústico de su tubo desde el punto de vista de la naturaleza y origen de sus sonidos -siempre que exista una predominancia de la sección cilíndrica-.

Varios clarinetistas y teóricos han descrito de forma desigual el tubo del clarinete. Veamos algunas definiciones:

“El instrumento está uniformemente compactado, y la razón es que su grosor es el mismo en la mayor parte de su longitud. En otras palabras, es un largo cilindro, lo que lo hace único entre los instrumentos de lengüeta...”...*La columna de aire de un clarinete, casi en toda su longitud, es cilíndrica...”*...*el clarinete es único al presentar una cavidad cilíndrica...*” (Brymer, 1976)

(En relación con el cuerpo superior e inferior,) *“De forma cilíndrica y cónica a la vez...”* *“Como el cuerpo de arriba, sucesión de cilindros y conos, el cuerpo de abajo va ensanchándose hacia la campana...”* (Dangain, 1978)

“El clarinete es un tubo cilíndrico donde las frecuencias propias de resonancia corresponden al tercero, quinto, séptimo, etc. armónicos de la fundamental” (Helmholtz, 1896)

“...un clarinete (nuestra aproximación orquestal más cercana a un cilindro cerrado)...” (Donington, 1982)

“El clarinete es un instrumento de tubo cilíndrico excitado por una lengüeta simple, generalmente de caña” (De Olazábal, 1954).

“...Se aproxima al tubo cerrado, y no lo es en realidad; en gran medida se acerca a un tubo cilíndrico, y tiene bastantes partes cónicas; por tanto es un tubo muy irregular y bastante complicado físicamente...” (Vercher, 1983)

Observamos de las definiciones aportadas que, en general, todas coinciden en considerar el tubo del clarinete como cilíndrico, aunque se observan algunas discrepancias. Brymer, notable clarinetista y pedagogo, lo define como un largo cilindro, mientras que los otros dos clarinetistas y pedagogos referidos, esto es, Dangain y Vercher, aluden a un tubo de sección híbrida donde el cilindro predomina sobre el cono. Por su parte, el resto de teóricos referenciados no dudan en definirlo como un cilindro.

En mi opinión, la definición de Donington es la más acertada dado que, en realidad, el tubo del clarinete se aproxima más a un cilindro y considerando que desde el punto de vista de su funcionamiento acústico solo cabe establecer una clasificación como cilindro o cono, podemos concluir que debe adscribir a la primera categoría. Otra cuestión será su forma interna desde el punto de vista físico, en cuyo caso debemos considerarlo como un tubo cilíndrico con regiones ligeramente cónicas.

Por lo que respecta a sus aberturas, ya hemos incidido en esta cuestión en capítulos precedentes. No obstante, de modo resumido, podemos decir que el tubo del clarinete presenta dos aberturas desde el punto de vista físico y una desde el punto de vista acústico, pues se comporta como cerrado. Las demás aberturas que se disponen a lo largo del tubo tienen la finalidad de dividir la columna gaseosa en segmentos con frecuencias propias.

Fig. 14.1 Clarinete con indicación de sus aberturas acústicas de su tubo

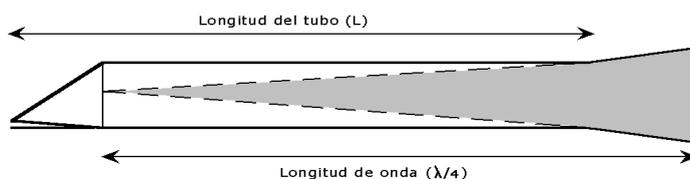


En cuanto a su función acústica, el tubo es el encargado de generar los sonidos en cooperación con la lengüeta. El tubo del instrumento sigue unos modos resonantes que dependen de su forma interior. Cuando las ondas sonoras viajan a través del aire del tubo ciertos modos o modelos de vibración del aire son factibles, o en otros términos, ciertas frecuencias son reforzadas por las ondas sonoras cuando viajan de un extremo a otro de la cavidad debido a la reflexión, lo que se conoce por las frecuencias de resonancia del tubo. Estas dependerán, por tanto, de la velocidad de sonido en el aire así como de la longitud y geometría del tubo, y en general puede estar en cualquier relación numérica. Estos modos de vibración es lo que se conoce también como ondas estacionarias.

Por último, la forma de embocadura del tubo es de lengüeta simple. Su descripción y función acústica se trata en el siguiente apartado.

Veamos, ahora, sus modos vibracionales. De conformidad con el funcionamiento de tubo cerrado, el clarinete solo puede hacer uso de los armónicos impares para constituir su escala. Dado que uno de los extremos de su tubo se halla cerrado acústicamente, invariablemente deberá constituirse en las fundamentales un nodo de desplazamiento –o un vientre de presión- en el extremo cerrado -la boquilla- y un vientre en el abierto -la campana-. Así se obtiene el registro grave que transcurre desde el Mi_2 hasta el $La\#_3$ (Fig. 14.2), aunque también es posible obtener el Si_3 y el Do_4 como fundamentales. Las longitudes de onda de estos sonidos serán igual a $4L/1$, mientras que sus frecuencias corresponderán, teniendo en cuenta la fórmula que relaciona la frecuencia con la velocidad de propagación⁹⁰ y la longitud de onda, a: $f=c/\lambda = c/4L$.

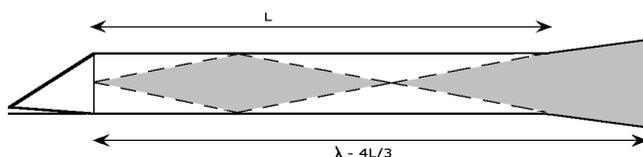
Fig. 14.2 Primer modo vibracional del tubo del clarinete



⁹⁰ Se suele considerar la velocidad de propagación a una temperatura media de 15 °C, esto es, 340 m/sg.

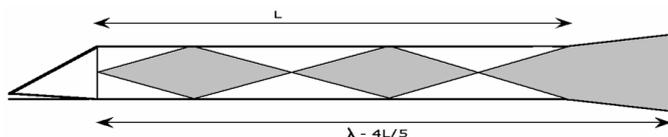
Dado que la mitad de la longitud de onda completa que produce el segundo armónico a la octava aguda está ausente, el segundo armónico o parcial en estos tubos será el tercero, esto es, la doceava. Esta vibración se produce requiriendo un nodo en un extremo, un vientre en el primer tercio del tubo, un nodo en el siguiente tercio y un vientre en el extremo opuesto (Fig. 14.3). Con este modo, se obtiene el segundo parcial que corresponde al tercero de la serie armónica, y se consiguen los sonidos del registro agudo comprendidos desde el Si_3 al Do_5 . Sus longitudes de onda corresponden a $4L/3$, y sus frecuencias a $3c/4L$.

Fig. 14.3 Segundo modo vibracional del tubo del clarinete



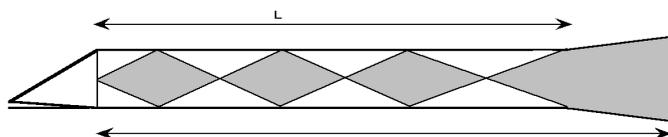
El siguiente modo vibracional que corresponde al tercer parcial y quinto de la serie, se produce con una onda estacionaria que presenta un vientre y un nodo más respecto del modo predecesor, dispuestos por quintos (Fig. 14.4). Así se obtienen algunos sonidos del registro sobreagudo. Los más óptimos para ser empleados como notas de la escala están comprendidos entre el $Do\#_5$ y el Fa_5 . Procediendo del mismo modo que sus predecesores, sus longitudes de onda serán $4L/5$, y sus frecuencias $5c/4L$.

Fig. 14.4 Tercer modo vibracional del tubo del clarinete



Con una columna gaseosa subdividida en siete partes alícuotas, sobreviene el séptimo armónico, cuarto modo vibracional (Fig. 14.5). La onda estacionaria presenta un nuevo vientre y un nodo. Los sonidos comprendidos entre el $Fa\#_5$ y el La_5 y/o el $La\#_5$ se obtienen con este modo de forma relativamente afinada y su uso está bastante generalizado. Sus longitudes de onda serán $4L/7$ y sus frecuencias $7c/4L$.

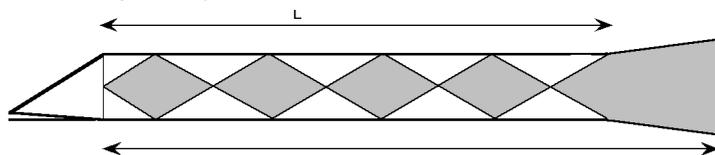
Fig. 14.5 Cuarto modo vibracional del tubo del clarinete



El quinto modo corresponde al noveno armónico, cuya onda estacionaria se configura con un nuevo vientre y un nodo, dispuestos en el tubo por novenos (Fig. 14.6). Con este armónico se consiguen varios sonidos del registro sobreagudo, pero lo más

utilizados con este modo suelen ser el Si_5 y el Do_6 . Sus longitudes de onda corresponden a $4L/9$ y sus frecuencias a $9c/4L$

Fig. 14.6 Quinto modo vibracional del tubo del clarinete



Excepcionalmente se puede utilizar el undécimo armónico, sexto modo, en ciertos sonidos del registro sobreagudo y en determinados pasajes, en especial en los sonidos $La\#_5$, Si_5 y Do_6 .

La columna aérea no permite más subdivisiones a partir del undécimo armónico, con lo cual no es posible obtener sonidos con este modo.

Se observa que la forma de los armónicos o de la onda es siempre de tipo asimétrico, a diferencia de los modos de un tubo abierto que lo es de tipo simétrico debido a la presencia de todos los armónicos.

Naturalmente, es posible obtener algunos sonidos del registro agudo y la mayoría del sobreagudo con armónicos de diferentes fundamentales como se comprobará en la parte experimental del estudio. No obstante, en el presente apartado se ha considerado para observar las diferentes ondas estacionarias el uso únicamente de digitaciones básicas, entendidas éstas como las más generalizadas en los métodos de aprendizaje y estudio de clarinete.

14.2 LA EMBOCADURA DE LENGÜETA SIMPLE

La embocadura de lengüeta (Fig. 14.7) constituye el otro elemento básico, junto con el tubo, del sistema acústico del clarinete. Su función es la de generar las vibraciones que serán comunicadas a las moléculas del tubo para que se engendre el sonido por resonancia.

Las cañas más óptimas están hechas de un tipo de bastón, un material parecido al bambú. El bastón de la caña proviene de la planta conocida como *Arundo donax*. La mayor parte de esta planta se cultiva en las áreas de Fréjus y Cannes de Francia, aunque una parte también se cultiva en el norte de España. Por su parte, las cañas que se usan en América vienen de las áreas montañosas de México central.

Actualmente las cañas de clarinete miden aproximadamente 68 mm de largo. Su forma no es exactamente rectangular dado que en la punta miden aproximadamente 13 mm de ancho y en la parte inferior alrededor de 11 mm. En su punto más grueso, en la parte central, la caña tienen por lo general 1 mm de grosor, y en la punta, donde comienzan las vibraciones, $1/200$ de una pulgada, aunque esto sea por lo general $1/100$ de una pulgada de grueso.

La exigente demanda ha propiciado que se reduzca el proceso de fabricación y secado con la subsiguiente repercusión en la calidad de las lengüetas. Esta situación ha

inducido a muchos profesionales a fabricar sus cañas de forma artesanal y doméstica. Además del ahorro económico, esta práctica permite una personalización de la caña que no es posible con las lengüetas comerciales.

Las primeras descripciones de la acción de la caña fueron realizadas por Helmholtz, Rayleigh y Rockstro, y más recientemente por Das, entre otros físicos.

Los primeros experimentos sobre la acción de las cañas de órgano se llevaron a cabo en 1830 por el físico alemán Wilhelm Weber. Su teoría establecía la influencia en la impedancia de entrada de una columna de aire de la estructura flexible de la caña.

Bouasse también amplió la teoría de Weber a las cañas de los instrumentos de viento, mientras que John Backus, de la Universidad de California del Sur, desarrolló en 1963 una serie de experimentos muy rigurosos sobre el comportamiento de las cañas del clarinete.

Más recientemente el ingeniero holandés Cornelis Nederveen ha revisado y ha ampliado el trabajo de Backus. Los estudios de Nederveen sobre los instrumentos de viento madera figuran detallados en su excelente libro *Aspectos Acústicos de los Instrumentos de viento madera*.

Por su parte, Benade resume formidablemente la influencia total de la elasticidad de la caña sobre las frecuencias naturales de una columna de aire en tres puntos ⁹¹.

Una de las contribuciones más importantes hechas por Backus y Nederveen tiene que ver con la medida de las características del control de flujo real de varias clases de caña y cómo se interpretan conjuntamente por dos clases diferentes de presión: por una parte, la presión mantenida por el clarinetista en su propia boca; por otra, la presión existente dentro de la boquilla del instrumento.

Las oscilaciones de la caña se hallan fuertemente influenciadas por las oscilaciones dentro de la columna de aire, a diferencia de las cañas usadas en un acordeón o el órgano donde cada caña vibra esencialmente en su propia frecuencia natural. La caña de un instrumento de viento madera siempre sigue las variaciones de presión entre la boca del instrumentista y la cavidad de la boquilla, con tal de que las frecuencias de oscilación sean inferiores a su propia frecuencia natural resonante. Sin embargo, si la caña se pone a vibrar sin la humectación necesaria, puede hacerlo en su propia frecuencia resonante, pero es muy posible que surja el temido pitido que tantos problemas causa a los clarinetistas (Campbell y Greated, 1987).

El procedimiento vibratorio de la lengüeta simple consiste en la resistencia inicial que ofrece a la corriente incidente, de modo que cuando recibe dicha corriente se inclina por el empuje del impacto. Debido a su cualidad elástica, supera ese empuje y oscila súbitamente. Si la energía persiste, la reiteración de impulsos se torna periódica y la vibración resultante puede excitar una columna aérea adyacente, que en caso del clarinete estará alojada en el tubo.

La escasa abertura que deja la lengüeta instalada en la boquilla del instrumento es suficiente para cerrarlo en ese extremo y producir ahí la reflexión de la onda. La consecuencia más directa es que, además de coadyuvar a una mayor producción de componentes armónicos en el tubo, lo cual tiene su influencia directa en el timbre, constituye la principal causa de su funcionamiento acústico.

⁹¹ Se enuncian en el subapartado 16.1.4.

Las ondas sonoras en el clarinete son generadas por la caña que pega y vibra contra la boquilla a una cierta frecuencia que se controla principalmente por la resonancia del aire contenido en el cuerpo y secundariamente por la embocadura del clarinetista. Así, un tono se produce cuando el juego de frecuencias generada por el sistema caña-boquilla y el juego de frecuencias de resonancia del aire dentro del tubo se alinea; la frecuencia de la vibración de la caña es impuesta por la resonancia dominante del cuerpo, y los armónicos de la vibración de la caña intentan encontrar las frecuencias de resonancia para excitarlas. De cómo tenga lugar esa colaboración -en otros términos, cómo son para esa nota las frecuencias de resonancia- determinará la fuerza, estabilidad, claridad y facilidad de respuesta de la nota. Nótese que el aire encerrado en el tubo tiene una masa apreciable y por lo tanto es capaz de obligar a la caña que vibra a cerrarse sobre la frecuencia natural de la columna de aire. De manera que la caña en un instrumento de viento madera no influye demasiado sobre la selección de la frecuencia en la que el sistema vibrará, al menos comparado con los instrumentos de metal, donde los labios que vibran del instrumentista tienen una masa considerable, permitiéndole una cantidad sustancial de control sobre la frecuencia.

Fig. 14.7 Embocadura del clarinete

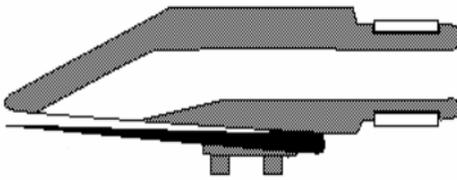


Fig. 14.8 Partes integrantes de la embocadura

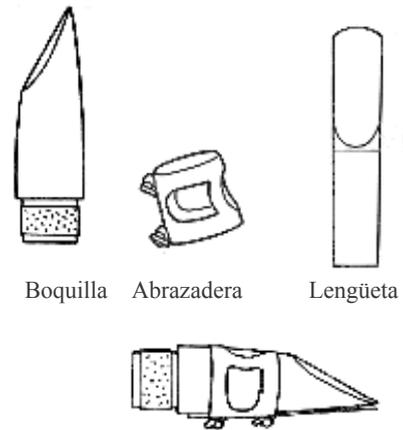
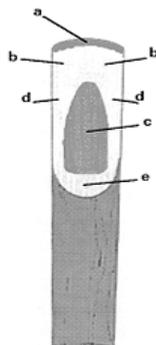


Fig. 14.9 Estructura de una lengüeta



- a: Punta
- b: Hombros
- c: Corazón
- d: Laterales
- e: Lomo

El proceso de vibración de una caña durante un ciclo se puede describir de la siguiente forma: imaginemos una boquilla de clarinete adosada a un tubo cilíndrico cuya longitud total acústica del tubo más la boquilla es L . Si se aplica una presión de soplo por el instrumentista, la válvula de caña en posición inicial de 0° permite fluir un soplo de aire en el instrumento abriéndose la caña (Figs. 14.10 y 14.11). Al mismo tiempo la caña comienza su balanceo cerrándose hacia la boquilla hasta alcanzar la posición de 90° completando $\frac{1}{4}$ de ciclo (Fig. 14.12). El soplo de aire -o el pulso de presión positiva- produce una compresión que viaja hacia abajo del tubo, donde la presión bruscamente se pone a cero. Esto provoca que una pulsación de presión negativa se propague hacia la boquilla -o lo que es lo mismo, que la onda se refleje y retorne en sentido contrario-. Cuando esto llega, la caña completa su oscilación hacia la boquilla, y la pulsación de presión negativa obliga a la caña a cerrarse en posición de 180° , completando medio ciclo (Fig. 14.13). Ya que la lengüeta se halla ahora cerrada o casi cerrada, muy poco aire puede penetrar en la boquilla, con lo cual la pulsación de presión negativa -o la onda- se propaga de nuevo por el tubo hacia el final abierto. Ahora se invierte la cadena de acontecimientos. La pulsación de presión negativa llega al final abierto en posición de 270° - $\frac{3}{4}$ de ciclo-, la presión de repente se eleva al cero -en realidad, a la presión atmosférica normal-, y una pulsación de presión positiva comienza su viaje hacia la boquilla -la onda se refleja de nuevo- (Fig. 14.14). Cuando llega, la caña se abre de súbito en posición de 360° y la pulsación de presión la empuja a la posición abierta más lejana de la boquilla para que un soplo nuevo de la boca del clarinetista pueda introducirse y comenzar un nuevo ciclo (Fig. 14.15).

Huelga decir que el proceso descrito acontece en milésimas de segundo. Piénsese, por ejemplo, que en el Si_3 se producen en un segundo 440 ciclos, de manera que un ciclo se llevará a cabo en $0'0022727$ seg.

Dado que la compresión se refleja en el final abierto del tubo, una onda estacionaria queda establecida en el tubo. Asimismo, ya que la caña y la boquilla se comportan como un final cerrado, el modo fundamental tiene un antinodo de presión en la boquilla. Durante la mitad del período de un sonido fundamental, la presión en la boquilla es alta y para la otra mitad es baja. Esta variación de la presión de la columna de aire en la boquilla controla con eficacia la vibración de la caña.⁹²

La presión en la cavidad -o la boca del clarinetista- es siempre más alta que la presión en boquilla. Así, cuando hay un máximo de presión en la boquilla y la apertura de caña tiene también un máximo, el aire que entra en la boquilla produce la energía de reabastecimiento que ha sido perdida por la producción de sonido. De este modo, una onda estacionaria de amplitud constante es sostenida en el interior del tubo (Ridgen, 1977).

⁹² Esto se puede verificar emitiendo un sonido con la boquilla. El diapasón es bastante diferente que el diapasón producido cuando la columna de aire tiene el control.

Fig. 14.10 Posición inicial de la caña 0°

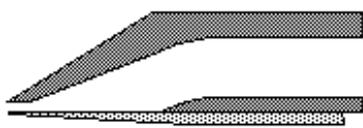


Fig. 14.11 Posición de entrada de aire

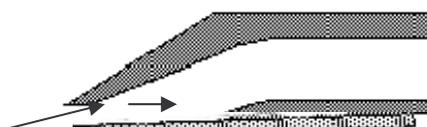


Fig. 14.12 Posición de 90° -1/4 ciclo- Reflexión en el extremo abierto

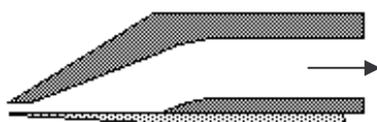


Fig. 14.13 Posición de 180° -1/2 ciclo- Reflexión en el extremo cerrado

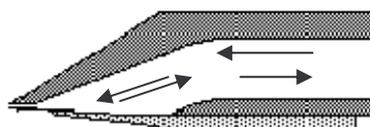


Fig. 14.14 Posición de 270° -3/4 de ciclo- Reflexión en el extremo abierto

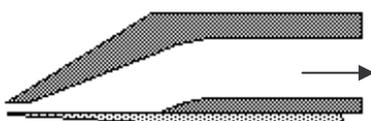
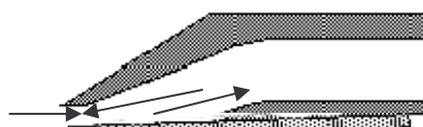


Fig. 14.15 Posición de 360° -1 ciclo-



El siguiente modo en el que la caña podría cerrar la columna de aire es vibrando tres veces tan rápido como en el modo descrito. En este caso, la caña cerraría, abriría, y cerraría otra vez durante un viaje de ida y vuelta de la pulsación de presión para que estuviese de nuevo listo para recibir un tirón cuando el pulso negativo hubiese regresado. Si la presión en la embocadura es grande, hay una tendencia a saltar a este modo, que tiene una frecuencia triple respecto del modo fundamental. Normalmente, los instrumentos de caña cambian en este modo de frecuencia más alta con el uso de la llave de registro.

Por tanto, la vibración de la caña controla el flujo aéreo en el clarinete. Este flujo depende de la diferencia en la presión entre la boca del clarinetista y la boquilla. Si se aumenta esta diferencia de presión, fluiría más aire a través del hueco que hay entre la punta de la caña y la punta de la boquilla. Sin embargo, cuando la presión se incrementa bastante para doblar la caña, actúa en el extremo delgado de la caña y tiende a empujarlo para cerrar la abertura a través del aire que está entrando. De hecho, si el incremento es excesivo se cierra completamente y el flujo se anula.

En el caso del clarinete, el flujo máximo de aire externo debe coincidir con el desplazamiento máximo de la caña hacia adentro (Helmholtz, 1877).

Olson describe el procedimiento antes descrito estableciendo una analogía con un sistema eléctrico:

“El clarinetista trabaja para proporcionar un flujo de aire con una presión superior a la atmosférica: esta es la fuente de energía más o menos estable. Lo que convierte la energía estable -la corriente continua- en energía acústica -la corriente alterna- es la caña. La frecuencia del flujo de aire en y del tubo es determinada por las frecuencias resonantes del tubo. En la analogía eléctrica, la corriente del flujo en el circuito resonante está determinada por el voltaje de desviación. La frecuencia del voltaje de desviación, a su vez, está determinada por las frecuencias resonantes de los circuitos resonantes. Si existe una relación de fase apropiada entre la presión de desviación y la corriente de volumen en el sistema resonante, ésta será transformada en una corriente de volumen alternadora. En el clarinete, esta resistencia de la corriente alterna negativa es lo que proporciona la energía que se pierde en el resto del instrumento. En efecto, la mayor parte de la energía se pierde dentro del tubo en pérdidas viscosas y termales de las paredes, y una pequeña fracción es emitida como el sonido irradiado.” (Olson 1967)

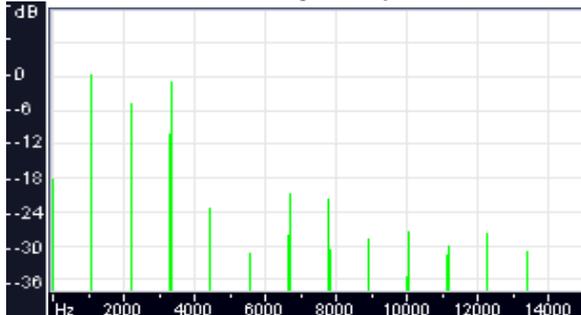
El tubo del clarinete tiene varias resonancias que están aproximadamente en las proporciones del armónico impar 1:3:5. La caña también tiene su propia resonancia -que es aproximadamente lo que oímos cuando se produce un rechinamiento-. Cuando el clarinetista coloca sus labios en la caña y oprime insuflando aire al instrumento, las resonancias de la caña se reducen considerablemente. Esto permite que las resonancias del taladro tomen el control. Simplificando un poco, el clarinete emite normalmente más fuerte las resonancias del tubo cuyas frecuencias son inferiores a las de la caña.

Cuando el clarinete está emitiendo un determinado sonido, la caña está vibrando a una frecuencia particular. Si la vibración es grande, como cuando tocamos en una dinámica de *forte*, se genera el armónico debido a que esa vibración se comunica a la columna aérea del tubo generando la resonancia. La vibración de la caña tiende a tener el armónico impar y par igual. Sin embargo, en los registros bajos sólo los armónicos impares predominan y se refuerzan, a su vez, por las ondas estacionarias inherentes a los tubos cerrados. Por consiguiente, el espectro sonoro en los registros bajos tiene muy bien el primero y tercer armónico, pero débil el segundo y el cuarto. En las siguientes figuras se puede observar la presencia de todos los armónicos, pares e impares, en el espectro de dos sonidos emitidos únicamente con la boquilla, uno en una dinámica de *piano* y otro en *forte*.

Fig. 14.16 Espectrograma de un sonido emitido con la boquilla en *piano*



Fig. 14.17 Espectrograma de un sonido emitido con la boquilla en *forte*

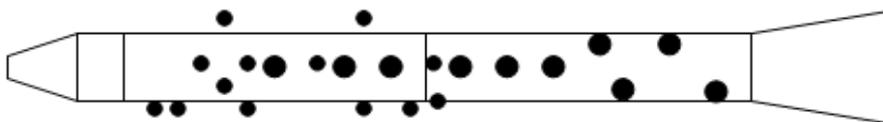


Podíamos decir, por ende, que la caña constituye la llave del sonido en el clarinete, además de determinar su comportamiento acústico. No olvidemos que cierra el tubo por el extremo donde se ubica propiciando el funcionamiento de tubo cerrado en el clarinete.

14.3 LOS ORIFICIOS TONALES

Las frecuencias de resonancia del clarinete -o de cualquier instrumento de viento madera-, están determinadas por la forma del taladro y por los agujeros tonales, los cuales se abren y cierran convenientemente para emitir la escala del instrumento.

Fig. 14.18 Ubicación aproximada de los orificios tonales en el clarinete sistema Boehm



Para dar las frecuencias de las resonancias armónicas, el tubo del clarinete funciona aproximadamente como un cilindro con el extremo de la caña cerrado y el opuesto abierto. En una aproximación simple, las frecuencias resonantes deben ser los números impares de una serie armónica -por ejemplo, 100 Hz, 300 Hz, 500 Hz...-. A menudo el orificio tonal, así como los efectos del extremo final, modifican las frecuencias de resonancia considerablemente. Este fenómeno se compensa con ligeras alteraciones en la forma del taladro.

Los orificios tonales tienen, por tanto, la función de determinar las diferentes alturas que puede producir el clarinete modificando la columna aérea del tubo según se abran o cierren. En este sentido, cuando se abre un orificio tonal se constituye el nodo de presión del tubo más cerca de la boquilla, esto es, el tubo se reduce. Si comenzamos desde la campana a abrir orificios, cada vez que se destapa uno aumenta el diapasón un semitono, lo cual requiere un tubo un 6% más corto, aproximadamente.

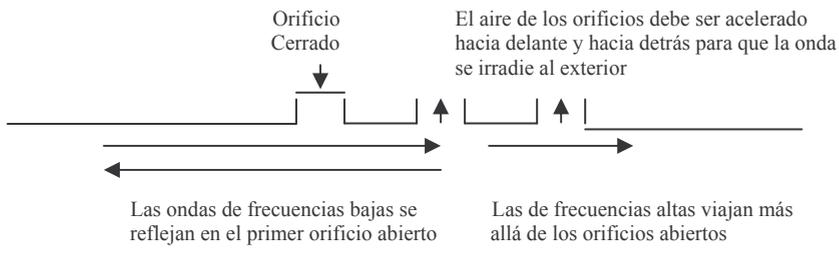
Se puede decir que un orificio tonal abierto corta el circuito o columna aérea al aire externo. Así, el primer agujero tonal abierto actúa aproximadamente como si el clarinete se seccionara en ese punto. Esta aproximación es un tanto ruda, ya que en la práctica la onda se extiende un poco más allá del primer agujero abierto: lo que se denomina *el efecto del extremo final*.

Para clarificar este fenómeno, se puede pensar, estableciendo una analogía con la electricidad, que el aire libre del orificio tonal tiene cierta inercia y, por consiguiente, una inductancia con un valor bajo. La impedancia de un inductor en electricidad, o la inercia en la acústica, es proporcional a la frecuencia. Así que el agujero del tono se comporta más como un *cortocircuito* a las frecuencias bajas que a las altas. Esto lleva a la posibilidad de la digitación cruzada, tan socorrida en ciertos pasajes, y la única posible en los instrumentos antiguos para obtener una escala cromática.

Efectivamente este efecto se manifiesta más en las frecuencias agudas que en las graves. Si el clarinete realmente fuera un cilindro perfecto, entonces los registros estarían desafinados: los intervalos serían demasiado anchos. Pero, obviamente, este efecto se corrige por variaciones o perturbaciones de la forma cilíndrica del taladro, incluso en la forma de la boquilla⁹³.

Habría que matizar, por tanto, la definición de orificio tonal. Si bien es cierto que para las frecuencias bajas el orificio tonal abre el taladro al aire externo acortando la longitud eficaz del tubo, para las frecuencias altas, sin embargo, esto más complejo. Efectivamente, en las frecuencias bajas la onda se refleja cerca de este punto porque el agujero proporciona una impedancia baja al aire externo para el *cortocircuito*. El aire que alberga el orificio tonal tiene cierta masa que la onda sonora tiene que acelerar para atravesar el agujero tonal, y la aceleración requerida aumenta con el cuadrado de la frecuencia: para una onda de frecuencia alta hay poco tiempo en medio ciclo para moverla. Por consiguiente, las ondas de frecuencias altas son impedidas por el aire en el agujero tonal, esto es, el orificio no funciona igual que con las frecuencias bajas: las de frecuencias bajas se reflejan en el primer orificio tonal abierto; las frecuencias altas viajan un poco más allá -lo que permite la digitación de horquilla-; y las suficientemente altas van más allá de los agujeros abiertos. Así, ciertos orificios tonales abiertos funcionan como un filtro alto de paso (Wolfe, 2002). Este fenómeno es uno de los causantes de las dificultades que comporta tocar afinadamente las notas más altas del clarinete.

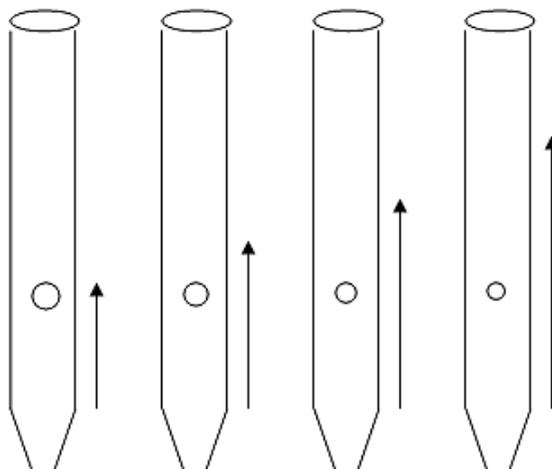
Fig. 14.19 Ilustración de la corrección del extremo final



Una de las funciones principales de los orificios tonales es cambiar la longitud eficaz o acústica del clarinete. En el caso de un solo orificio tonal, cuanto más grande sea su diámetro, más acortará la longitud eficaz, como se muestra en la figura 14.20. Cuando el diámetro del orificio es similar al del tubo, éste se secciona exactamente en ese punto. Abriendo y cerrando los orificios tonales el clarinetista puede modificar, por tanto, el diapason de su instrumento.

⁹³ Véase el subapartado 16.1.3.

Fig. 14.20 Longitud de onda efectiva para diferentes diámetros de orificio en un cilindro



Cuando un tubo tiene más de un agujero abierto -como sucede en los instrumentos de viento madera-, su comportamiento acústico expone varios rasgos interesantes. Si los agujeros abiertos están espaciados con regularidad, se constituye una red o enrejado de orificios tonales que cuando están abiertos actúan como un filtro que transmite las ondas de frecuencia alta, pero refleja los de frecuencia baja (Benade, 1976). En este sentido, hablamos de *frecuencia de corte* como el punto en el cual las ondas sonoras pueden propagarse por un enrejado de orificios tonales. Este frecuencia de corte constituye un factor importante en la determinación del timbre y la afinación de cualquier instrumento de viento madera.

La frecuencia de corte de una red de orificios tonales depende de su tamaño, forma, y el espaciado. La fórmula para calcular esta frecuencia la aporta Benade (1976):

$$F_c = 0.110 \left(\frac{b}{a} \right) c \sqrt{\frac{1}{st_e}}$$

Donde c es la velocidad del sonido (345 m/sg) en el espacio libre, y t_e es la longitud de un cilindro lleno de aire cuya inercia es idéntica que la del aire que fluye por un orificio tonal taladrado en una pared de un grosor t .

Si se amplía la relación entre el tamaño del orificio tonal con el tamaño del tubo, se elevará la frecuencia de corte, mientras que un aumento del espaciado entre los orificios la bajará. En el clarinete la frecuencia de corte se fija en 1500 Hz aproximadamente.

En su magnífico manual *Fundamentos de Acústica Musical*, Benade afirma que medió las frecuencias de corte, mediante sus curvas de impedancia, de varios clarinetes, oboes y fagotes construidos en diferentes épocas, utilizados por músicos prestigiosos.

Asimismo, relata que se hallaban en perfecto estado y que habían sido construidos por lo mejores artesanos de la época. Las conclusiones principales las resumen en los siguientes puntos:

1. *En la mayor parte de los instrumentos de viento madera estándar, la frecuencia de corte se mantiene aproximadamente igual cuando los orificios tonales se abren progresivamente para tocar los tonos de la escala del registro grave.*

2. *Esto demuestra que es posible correlacionar los adjetivos del color del tono usados por los músicos para describir el tono total de un instrumento (por ejemplo, oscuro o brillante) con el valor de su frecuencia de corte media.*

3. *Las tendencias en la f_c sobre un instrumento dado, controlan paralelamente las tendencias en el timbre descrito; además, las anomalías de ciertos tonos sobre un instrumento dado pueden ser relacionadas directamente con anomalías locales en la frecuencia de corte.* (Benade, 1976)

El segundo principio nos sirve para comprender las diferencias tímbricas de los dos sistemas base. Ordinariamente suele asociarse un timbre más oscuro al sistema alemán. Esto es debido a que su frecuencia de corte es sensiblemente inferior a la del sistema francés⁹⁴.

El orificio tonal cerrado también afecta a la acústica de una columna de aire de un instrumento de viento de madera. El aumento del volumen de aire en cada orificio tonal cerrado reduce la velocidad de la onda sonora en la parte baja del tubo y, por consiguiente, baja las frecuencias de resonancia ligeramente.

Una vez tratada la relación del enrejado de orificios tonales con la frecuencia de corte, es menester ahora analizar detenidamente lo que se denomina *la corrección del extremo final*. Nederveen da una idea de lo complejo de este asunto:

“Mientras las dimensiones de la sección cruzada del tubo son suficientemente pequeñas en lo que concierne a la longitud de onda, la corrección final es un constante, que no es dependiente de la frecuencia, y que viene determinada por la geometría del entorno del agujero. Esto significa que este fenómeno es un asunto puramente geométrico. Para hallar su magnitud, se presenta un problema práctico que eventualmente puede ser solucionado a medias, dado que el entorno del orificio no siempre se presenta de forma simple, sino que la geometría se complica cuando existen llaves que cuelgan encima de un agujero o cuando un determinado reborde puede ser finito.” (Nederveen, 1969)

Las correcciones del extremo final se expresan corrigiendo la longitud Δl , la cual es proporcional al radio a del tubo:

$$\Delta l = E \times a$$

donde E es un factor geométrico dependiente de la geometría del extremo final del tubo.

La corrección se aplica a un agujero con una longitud geométrica l_H y un radio a , o un área cruzada S_H . Estas cantidades se definen en función de la forma de los orificios, dado que la forma del extremo final varía bastante (Nederveen, 1969).

⁹⁴ Su relación entre el tamaño del orificio tonal con el tamaño del tubo es más estrecho que en el francés.

Estas medidas han sido calculadas por Benade, y los resultados oscilan entre $0.613 \leq E_f \leq 0.821$ para un orificio o tubo de radio a , con o sin reborde del radio externo $a + w$.

Cambell y Greated fijan la medida de la corrección del extremo final del tubo en una distancia de aproximadamente $D/3$ del final, donde D es el diámetro de tubo. Esto supone una longitud de tubo que vibra $D/3$ más largo que la longitud de tubo real para un tubo cerrado y $2D/3$ más largo para un tubo abierto.

Por su parte, Calvo-Manzano en su manual de acústica físico-musical sitúa la medida en 3'3 cm para los tubos cilíndricos abiertos, y de 2'7 cm para los cerrados⁹⁵.

Benade ilustra esta cuestión en un gráfico donde se puede observar cómo la corrección final aumenta de forma proporcional a la frecuencia. De acuerdo con su teoría, en cualquier conducto provisto de una secuencia de orificios tonales abiertos, las ondas sonoras de frecuencias bajas no son capaces de viajar abajo del tubo a lo largo del enrejado, y por consiguiente se reflejan en el primer punto del enrejado que encuentra la columna de aire. Sin embargo, en frecuencias encima de un cierto valor crítico determinado por los tamaños de los agujeros y su espaciado, el sistema de agujeros abiertos transmite las ondas al final inferior de la columna de aire donde se reflejan, tal y como lo harían si estuviesen en un tubo ordinario que tiene el mismo diámetro ampliable. Es este punto lo que determina la frecuencia de corte de un instrumento de viento madera, a partir de la cual no es posible emitir frecuencias agudas de forma afinada.

Las frecuencias de corte de un clarinete experimental fueron calculadas por Benade cotejando las curvas de impedancia obtenidas en un tubo similar al clarinete, sin ningún orificio tonal, de 61 cm aproximadamente, y en otro tubo similar con una larga fila de orificios tonales uniformemente espaciados. En el gráfico obtenido del primer tubo se observaban una serie de picos decrecientes, mientras que en el segundo solo figuraban cuatro picos. El punto donde desaparecían los puntos correspondía a la frecuencia de corte. Los resultados permitieron reconocer claramente que, cuando se aumenta la frecuencia de excitación, el sonido se filtran cada vez más por los orificios. Esto reduce las amplitudes de las ondas reflejadas, lo que se traduce en una reducción de los picos de resonancia y un aumento de los valles. Por encima de la frecuencia de corte, los orificios tonales irradian mejor la energía sonora y, por lo tanto, menos energía se refleja. De modo que las ondas estacionarias no pueden sostenerse eficazmente y la frecuencia difícilmente se obtiene de forma precisa.

Este fenómeno explica por qué el cierre de un orificio tonal en algún punto por debajo del tubo después de una serie de agujeros abiertos tiene muy poco efecto sobre el tono del primer modo natural de vibración. En las frecuencias bajas la onda estacionaria no llega a entrar en la región de influencia del enrejado de orificios, de forma que no es perturbado por ella. Los modos de frecuencia más altos sí se sitúan, cada vez más, bajo la influencia de esta zona y por lo tanto el efecto que tiene sobre ellos es el de bajar la frecuencia natural. Por otra parte, la influencia en la frecuencia de un agujero cerrado que se halle alejado en la parte baja del tubo es considerable porque la intensidad de la onda estacionaria es grande.

⁹⁵ En el análisis de la parte experimental se ha optado por estas medidas para calcular la longitud efectiva del tubo.

Este fenómeno tiene una aplicación práctica: *la digitación cruzada*⁹⁶. El clarinetista puede obtener un descenso de la frecuencia según las complejidades de la situación descrita anteriormente.

Otro efecto derivado de la perturbación de las proporciones armónicas es que el armónico que aparece cuando tocamos una nota baja no es reforzado por las resonancias del tubo del instrumento. El taladro no mantiene la regeneración de la caña a esa frecuencia, ni proporciona la impedancia igual, con lo cual menos armónicos altos están presentes en el movimiento de la caña. Como resultado, las digitaciones cruzadas son en general menos fuertes y tienen el timbre más oscuro.

Finalmente, se debe considerar el diámetro de los orificios para obtener las frecuencias precisas del tubo. A menor diámetro, la reflexión de la onda se lleva a cabo más allá del orificio abierto dado que la eualización de medios requiere un mayor tiempo, mientras que si el diámetro es mayor, la reflexión se produce en el mismo extremo del orificio abierto.

14.4 EL ORIFICIO DE REGISTRO

Todos los instrumentos de viento madera tocan, al menos, en dos registros diferentes. En un clarinete los dos registros inferiores comprenden un intervalo de duodécima, mientras que en otros instrumentos de viento madera la diferencia entre ambos registros constituye una octava. Si se observa la curva de impedancia de una nota del registro grave el pico más alto corresponde a la primera resonancia. Sin embargo, para cambiar a un registro alto es necesario reducir la fuerza de esta resonancia o modificar su frecuencia de forma que no pueda cooperar con otros modos.

El método más fácil de reducir la fuerza de una resonancia consiste en liberar una cantidad mínima de aire en un punto donde el modo fundamental tiene una presión máxima y de esta forma prevenir la acumulación de fluctuaciones de presión y favorecer la formación de un nodo de presión. Esta acción es la que se lleva a cabo mediante el orificio de registro, también denominada llave portavoz (Fig. 14.21).

Este orificio se sitúa aproximadamente en el primer tercio del tubo -considerando también la boquilla del instrumento- y su diámetro es reducido comparado con el de los orificios tonales. Cuando se abre, se produce una oscilación que provoca el salto a la siguiente resonancia posible, que en el caso del clarinete es el tercer armónico, a la doceava de la fundamental. Un orificio similar ubicado en una quinta parte del tubo provocaría el salto una sexta por encima, al quinto armónico, dado que este modo de oscilación tiene un nodo de presión en este punto, mientras que los dos modos inferiores no.

Sin embargo, surge una dificultad práctica cuando consideramos un registro completo. Sería preciso colocar un orificio de registro cerca de un nodo de presión para cada nota del registro, con lo cual se necesitaría un gran número de orificios. Un oboe tiene tres orificios de registro; un saxofón tiene dos; pero un clarinete solo tiene un orificio de registro para hacer la transición entre los dos primeros registros. Este orificio, pues, se

⁹⁶ Se analiza este fenómeno en el subapartado 16.2.2.

diseña en el clarinete de forma que pueda funcionar óptimamente en todas partes del registro -aunque ciertos efectos colaterales resulten ineluctables-.

Fig. 14.21 Llave portavoz (n° 12)



Si, por ejemplo, tocamos el La_3 y accionamos la llave de registro, estamos abriendo un agujero en el primer tercio cerrado del tubo del instrumento. Este agujero rompe el modo fundamental produciendo un nodo de presión en ese punto, obligando así a saltar el siguiente armónico. Sin embargo, esto puede inducir a error dado que no siempre se constituye el nodo de presión en ese punto, para eso necesitaríamos múltiples orificios de registro, de modo que su ubicación y diseño debe facilitar el salto al siguiente armónico. De hecho, si observamos la onda estacionaria de los sonidos en los gráficos que siguen, comprobaremos que el nodo se produce en puntos cercanos pero no en el mismo punto: para el Do_4 (Fig. 14.22) el nodo está más abajo del orificio; para el Fa_4 (Fig. 14.23), se sitúa en el mismo punto; para el Do_5 (Fig. 14.24), por encima del orificio de registro. Podríamos decir, entonces, que el agujero abierto produce un nodo de presión en un punto donde el modo fundamental produce una variación de presión importante para que el modo vibracional más bajo no pueda sostenerse. Esto, sin embargo, no es un problema importante en la práctica. El agujero de registro es pequeño para producir el cortocircuito, excepto para frecuencias bajas. Así que no afecta demasiado al armónico tercero y superiores. (Wolfe, 2002).

Fig. 14.22 Onda estacionaria para el Do_4 ,

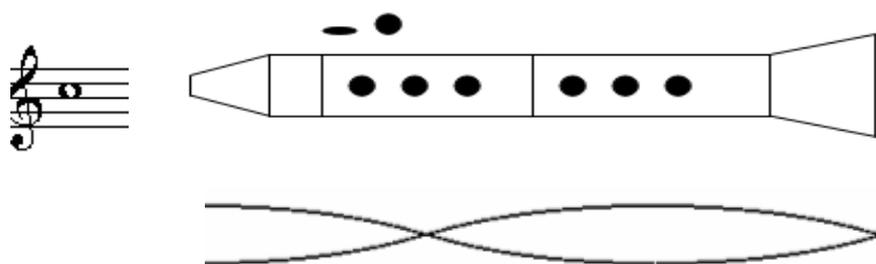
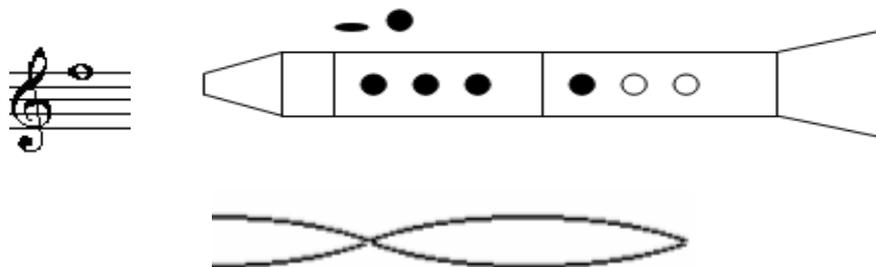
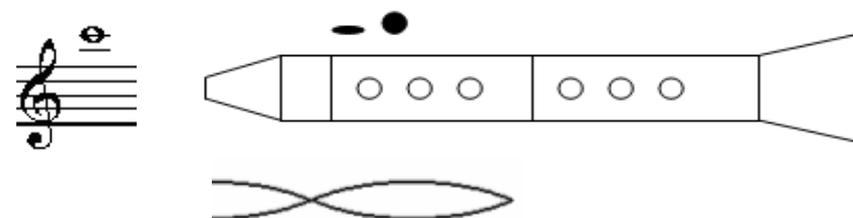


Fig. 14.23 Onda estacionaria para el Fa_4 Fig. 14.24 Onda estacionaria para el Do_5 

La llave portavoz se utiliza, por tanto, para obtener el segundo registro en el clarinete. En el registro más alto, se usan otros agujeros tonales como portavoces. En este caso, el orificio que desempeña la función de portavoz es generalmente el que obtura el dedo índice de la mano izquierda. Este agujero se diseña principalmente como un agujero tonal, por lo que es más grande de lo que debe ser un agujero de registro ideal. Esta inconveniencia, sin embargo, no es tan importante porque sólo se usa para frecuencias altas donde la impedancia es considerable. De este modo, para obtener los armónicos quintos del registro sobreagudo, se constituyen dos nodos de presión, uno en o cerca del orificio portavoz y otro en o cerca del orificio abierto por el dedo índice de la mano izquierda.

En el clarinete se ha experimentado con una segunda llave de registro⁹⁷ para obtener el segundo armónico -el quinto de la serie armónica- con las mismas digitaciones de las fundamentales, pero no ha tenido suficiente aceptación por los efectos secundarios que comporta.

En suma, la función del agujero o llave portavoz es perturbar la fuerza y frecuencia del modo fundamental para una nota particular en un punto donde no puede cooperar con otras resonancias y, por tanto, donde no puede formar la base de un tono musical, dejándolo

⁹⁷ El sistema Marchi lo incluye en su mecanismo ubicándolo en el barrilete del instrumento.

inalterado. El orificio de registro deberá ubicarse para obtener el segundo modo vibracional en el clarinete en el primer tercio del tubo del instrumento, dado que este modo es en realidad el tercer armónico en el clarinete y, por tanto, la columna debe dividirse en tres mitades alícuotas.

14.5 EL BARRILETE

La función acústica de esta pieza (Fig. 14.25) no es otra que la de constituir un dispositivo de afinación. De hecho, su existencia es producto de la evolución del instrumento ya que en sus orígenes carecía de ella o, mejor dicho, no existía como parte independiente del mecanismo pero sí estaba integrada en él. Se puede considerar, por consiguiente, una prolongación del cuerpo superior o de la boquilla a la que antaño estaba unida. Su independización responde a razones prácticas dado que estando separadas ambas piezas es posible extraer de su ensamblaje el barrilete prolongando así la longitud operativa del tubo y, por tanto, su columna aérea. Este es uno de los métodos de ajuste de la afinación más comunes entre los intérpretes por su flexibilidad y practicidad, aunque no el más certero. Efectivamente su efecto consiste en alterar la afinación interna del instrumento de forma global, pero en la práctica no afecta igual a todos los sonidos. Las notas que se emiten con los orificios más próximos a esta pieza, cuando se altera, sufren problemas serios de afinación, mientras que las más lejanas no les afecta en demasía. La razón de este fenómeno hay que buscarla en la perturbación que sufre la columna vibrante como consecuencia de la alteración en el interior del tubo al separar ambas piezas. Esta alteración produce un leve ensanchamiento en esa zona que reduce la elasticidad del sistema y baja la frecuencia. De acuerdo con los principios del Sr. Rayleigh (1894) -véase subapartado 16.1.3-, *en una columna de aire cilíndrica el cambio de porcentaje máximo de la frecuencia es igual al cambio de porcentaje del volumen total de aire que es producido por la perturbación*. Además, este cambio se produce *cuando la perturbación se extiende sobre un segmento muy corto de la columna de aire localizada en el centro de un vientre ascendente o descendente*. Dado que el punto donde se produce la perturbación se ubica en el centro aproximado del vientre de presión, no es de extrañar que esos sonidos se queden bajos cuando se extrae el barrilete para ajustar la afinación.

Veamos el efecto que tiene en las frecuencias en la siguiente tabla:

Tabla 14.1 Frecuencias experimentales -y teóricas- de las notas Sol₃, Sol#₃, La₃ y La#₃, Si₄ y Do₅ (a 445 Hz) extrayendo y sin extraer el barrilete

Notas	F _e (1)	F _e (2)	F _t (3)
Sol ₃ (1)	351'02	355'80	353'18
Sol# ₃ (1)	370'34	375'34	374'17
La ₃ (1)	393'24	399'24	396'42
La# ₃ (1)	417'61	422'61	419'19
Si ₄ (1)	884'70	890'70	890'00
Do ₄ (1)	938'25	944'05	942'91

- (1) Frecuencias experimentales extrayendo el barrilete parcialmente
 (2) Frecuencias experimentales sin extraer barrilete parcialmente
 (3) Frecuencias teóricas

Podemos observar que mientras la tendencia ordinaria en las frecuencias de estas notas es alcista -véase las frecuencias experimentales sin la extracción- por su particular funcionamiento acústico y por el fenómeno de la corrección del extremo final, cuando se extrae esta pieza, aunque se ajusta la afinación de los restantes sonidos de la escala, las susodichas notas quedan por debajo de sus valores teóricos debido a que la prolongación del tubo se produce en una región donde sus longitudes de onda se ven considerablemente influenciadas.

Actualmente se construye esta pieza en diferentes longitudes para la reafinación del instrumento según las necesidades. En la actualidad, cualquier intérprete que se precie suele llevar tres barriletes: de 65, 66 y 67 mm.

Por lo que se refiere al material con el que se construye, solo afecta muy ligeramente a la calidad del sonido, o si se quiere, a su timbre. Efectivamente, esta influencia puede modificar las frecuencias de la columna aérea. En este sentido, ésta aumentará si la frecuencia natural de la pared del barrilete está por encima del modo de aire que lo conduce y disminuirá cuando acontezca lo contrario. En cualquier caso, este efecto será mínimo y apenas perceptible dado que la influencia se extenderá en una parte corta de la columna vibrante y, por tanto, la tendencia natural de ésta será a vibrar de acuerdo con la frecuencia natural promedia de la parte mayoritaria del tubo. A mayor grosor del material el timbre tiende a oscurecerse, mientras que acontece lo contrario si el material es ligero, esto es, el sonido se torna más claro y fácil.

Fig. 14.25 Barrilete



14.6 EL PABELLON

Esta es la única pieza del instrumento aparentemente de forma cónica, aunque no debe confundirse con su definición correcta de bocina exponencial⁹⁸.

Fig. 14.26 Pabellón



Entre sus funciones principales está la de nivelar el sonido en su conjunto y reforzar los sonidos más graves proporcionándoles una mejor reflexión y una afinación más precisa. Además las ondas con este elemento son irradiadas al exterior de forma esférica y su audición se produce más óptimamente.

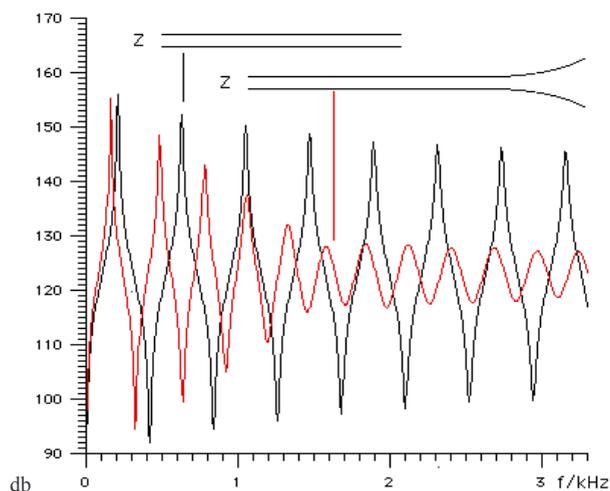
Sin embargo, esta función de irradiación de las ondas comporta otro efecto, y es que cuanto más sonido se irradia menos sonido queda reflejado. Como consecuencia de ello se produce cierta inarmonicidad en las frecuencias más altas con los orificios tonales abiertos. Las resonancias son más débiles ya que la campana ayuda a las ondas sonoras a su irradiación al aire externo. Dado que las ondas estacionarias se constituyen con la interferencia de una onda y su reflejo, cuanto menos reflexión se produzca más débiles serán aquéllas. Este efecto resulta menos sensible en las frecuencias bajas: el primer máximo y el mínimo no se debilitan mucho porque la campana es mucho más pequeña que las longitudes de onda de las ondas de frecuencia bajas y, por tanto, no es muy eficaz en la radiación de estas ondas.

Se puede decir que esta función acústica que desempeña la campana es la de constituir un filtro de paso alto dado que produce análogo efecto que el de una frecuencia de corte de un orificio tonal abierto. De hecho, el objetivo de la campana del clarinete debe principalmente proporcionar un filtro de paso alto para los tonos más bajos, para que tengan una frecuencia de corte y se comporte de modo más similar a los tonos producidos con varios orificios tonales abiertos. Este efecto, se puede observar en la curva de impedancia para dos tubos, uno de los cuales lleva adosado una campana (Fig. 14.27). Se aprecia que el segundo el tubo se prolonga por la campana y los picos se nivelan a partir del sexto parcial debido a que la campana ayuda a la radiación de las ondas sonoras al exterior -novenno armónico en el clarinete-. Es en este punto donde se sitúa la frecuencia de

⁹⁸ Véase el apartado 5.8.

corte, a partir de la cual no es posible emitir sonidos con una calidad tonal mínima dado que las ondas se irradian por los orificios.

Fig. 14.27 Curva de impedancia para dos tubos, uno de ellos con pabellón (Wolfe, 2002)



La forma abocinada de este elemento produce otro efecto que es preciso analizar. La función más importante de la forma convencional del clarinete debe corregir los errores de afinación causados por un solo orificio de registro que eleva la frecuencia del segundo modo en ambos finales de la escala del segundo registro. Si el tubo fuese perfectamente cilíndrico los diferentes registros estarían desafinados. Para evitar estas discrepancias -en torno a 30 o 40 cents-, se ensancha la parte final del instrumento, produciendo en esa región una perturbación de la columna de aire que levanta la frecuencia natural del modo fundamental -sin afectar prácticamente al segundo y tercer modo-, dado que ahí tiene un nodo de presión y por lo tanto un flujo grande⁹⁹. Por otra parte, se practica una contracción en la boquilla -donde se sitúa un antinodo de presión- lo que provoca un aumento de la elasticidad del sistema dando lugar a un subida de la frecuencia de ese modo. De este forma se logra atenuar estas discrepancias entre los dos registros.

Por tanto, la campana no sólo afecta a la eficacia de radiación del tubo, sino que también modifica las frecuencias de resonancia dentro del mismo. En las siguientes figuras se puede comprobar cómo afecta al espectro sonoro la adición de esta pieza. En la fig. 14.28 se aprecian los componentes armónicos o las resonancias para el Mi_2 emitido con la adición de la campana, mientras que en la fig. 14.29 se ha emitido sin utilizar esta pieza. Se observa que las amplitudes de algunos componentes en la segunda figura se incrementan como consecuencia de una mayor reflexión de las ondas. Por su parte, en la primera figura

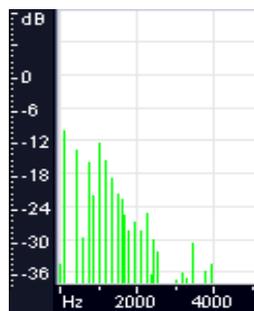
⁹⁹ Véase los principios del Sr. Rayleigh (1954) a propósito del efecto de las alteraciones en un tubo (subapartado 16.1.3).

la campana favorece la radiación sonora de las ondas y por tanto menos ondas se reflejan y más débiles son las resonancias o componentes armónicos.

Fig. 14.28 Espectrograma del Mi_2 obtenido con la adición de la campana



Fig. 14.29 Espectrograma del Mi_2 obtenido sin la adición de la campana



CAPITULO 15

FUNCIONAMIENTO ACUSTICO DEL CLARINETE



Concierto n° 3 para Clarinete y Orquesta. Stamitz (1746-1801)

15.1 INTRODUCCION Y CONSIDERACIONES

Antes de entrar en materia conviene hacer una aclaración previa sobre el tema que nos ocupa. Frecuentemente se explica en los escasos manuales sobre el clarinete que el tubo del clarinete funciona como cerrado y abierto dado que produce armónicos pares e impares. Habría que matizar esto ya que suele inducir a error. Efectivamente el sistema acústico del clarinete produce también armónicos pares pero éstos nos son válidos como notas de la escala sino solo como configuradores del timbre. Por consiguiente, habrá que distinguir el funcionamiento acústico del clarinete desde el punto de vista de la altura y obtención de sus sonidos, y también desde la resonancia de un sonido o su espectro -o lo que es lo mismo, su timbre-. En el primer supuesto el clarinete funciona como cerrado, y en el segundo, como abierto o semiabierto. En mi opinión, la definición correcta sería la de considerar el funcionamiento acústico del clarinete como tubo cerrado y, de forma colateral, como semiabierto y abierto.

La creencia por parte de algunos clarinetistas de que el clarinete es el único instrumento de la orquesta cuyo funcionamiento acústico no se manifiesta de acuerdo con la teoría es totalmente errónea. La confusión subyace porque el saxofón, el oboe y el fagot funcionan como tubos abiertos debido a su conicidad. Piénsese, por ejemplo, en el saxofón, el cual con unas características análogas a las del clarinete funciona de forma diferente. La cuestión radica, en la forma del tubo.

Esta situación coadyuva a generar cierta controversia entre la comunidad clarinetística, dado que no se ha profundizado lo suficiente en esta materia y la información a propósito de ello es vaga y poco rigurosa.

Para introducir el tema, y antes de entrar en materia, es preceptivo describir de un modo sucinto la naturaleza acústica del clarinete. Pues bien, el clarinete es un instrumento aerófono de tubo predominantemente cilíndrico y lengüeta simple, cuyo funcionamiento acústico se basa en la vibración de las columnas de aire contenidas en su tubo. Sin embargo presenta un rasgo peculiar que le singulariza sobremanera del resto de los instrumentos de la orquesta y es que actúa como un resonador de tubo cerrado de un modo *sui generis*. En efecto, su comportamiento acústico, según las leyes de vibración de los tubos sonoros, se adscribe a los tubos cerrados, si bien, en realidad no lo es, dado que en ambos extremos presenta aberturas. La lengüeta ubicada en un extremo permite, además de estimular la columna aérea, cerrar el tubo en ese extremo cuando está funcionando, lo cual provoca que las ondas se comporten como si estuviesen en un tubo cerrado. Esa característica, junto con su perforación cilíndrica en su mayor parte favorece unos modelos de resonancia donde sólo los armónicos impares son posibles para obtener sus sonidos. Sin embargo, sí es capaz de producir ciertos armónicos pares dado que, en rigor, el clarinete no es completamente cilíndrico en la boquilla, y lo es menos en la parte baja del cuerpo inferior, hacia el pabellón o campana. En estas partes la forma del tubo se torna en una suerte de conicidad muy peculiar. Esta singularidad, junto con la acción de su lengüeta simple y de la influencia de las resonancias del tracto vocal, son las razones por las cuales el clarinete produce algunos armónicos pares.

Por otra parte, a fuer de comportarse acústicamente como tubo cerrado, el clarinete suena una octava más baja de lo que cabría esperar en relación con otros instrumentos de análogas dimensiones pero con tubo abierto. Así como estos instrumentos octavean gracias al concurso del segundo armónico de su serie armónica, el clarinete lo hace a la doceava en virtud de su tercer armónico dado que su segundo armónico o parcial es en realidad el tercero de la serie armónica -el segundo está ausente al ser par-, lo cual comporta serias dificultades para obtener de forma afinada su escala. No olvidemos que los nueve dedos disponibles para accionar el mecanismo deben gobernar diecinueve semitonos en lugar de, por ejemplo, los once de la flauta.

Conviene, en este punto, contextualizar a modo de exordio el asunto que nos ocupa mediante una breve reseña histórica y evolutiva acerca de la base acústica del instrumento. El clarinete y la mayoría de los instrumentos de viento madera fueron diseñados originariamente de modo que obtuviesen sus sonidos fundamentales mediante el acortamiento gradual de sus columnas gaseosas gracias a los orificios practicados convenientemente a este efecto. Obviamente, esos orificios no podían exceder obviamente en número a los dedos disponibles, por lo que el abanico de sonidos era exiguo. Posteriormente resolvieron, mediante la aplicación del principio acústico de vibración de los tubos sonoros enunciado por Bernoulli¹⁰⁰, que accionando un orificio dispuesto convenientemente en el tubo se podía dividir la columna gaseosa fundamental en dos o tres mitades alicuotas, según funcionase como tubo abierto o cerrado, con lo cual se conseguía duplicar el abanico de sonidos por mor de segundos o terceros armónicos, respectivamente,

¹⁰⁰ Bernoulli enunció en el siglo XVIII las leyes de vibración de los tubos sonoros mediante la observación de su mecánica vibracional, con lo cual el Chalumeau aparecido en el siglo XVII, si bien ya presentaba esta característica acústica de octavear a la doceava, se desconocía su teoría matemática.

utilizando las digitaciones de los sonidos fundamentales y activando un orificio denominado *portavoz* (llave 12) -el procedimiento era análogo al que se produce cuando se pulsa una cuerda-. Pero además, aumentando la presión de sople con el orificio *portavoz* activado se podía conseguir una nueva serie de sonidos obtenidos fraccionando de nuevo la columna gaseosa. De esta guisa, la extensión acústica del instrumento se clasificaba en tres registros: grave, agudo y sobreagudo. Este es el origen acústico del clarinete y el de sus homólogos de la orquesta.

15.2 FUNCIONAMIENTO ACUSTICO

Para determinar si el clarinete funciona como tubo cerrado podemos considerar ciertas normas. En principio, de conformidad con una de las leyes que rigen los tubos sonoros, el clarinete debe sonar una octava más grave que lo haría otro instrumento con análogas dimensiones cuyo tubo funcionase como abierto. Efectivamente, esto sucede aproximadamente así en el caso de la flauta o el oboe cuyos tubos funcionan como abiertos. Pero podemos concretar más esta cuestión si determinamos la longitud de onda de cualquier sonido fundamental analizado. Observamos que aplicando la ecuación que relaciona la velocidad de propagación con la frecuencia del sonido se obtiene su longitud de onda que corresponde a cuatro veces la longitud operativa del tubo considerando un margen de error atribuible a la corrección final del tubo. Procediendo del mismo modo en los sonidos del registro medio, dado que se trata de terceros armónicos, su longitud de onda equivale a un tercio de la longitud de onda del sonido fundamental, los armónicos quintos, un quinto de la fundamental, etc. Si procedemos a la inversa calculando la frecuencia dividiendo la velocidad de propagación por la longitud de onda -calculada cuatro veces la longitud operativa del tubo-, observaremos que el resultado es coincidente con el funcionamiento de los tubos cerrados, puesto que en los sonidos del registro agudo las frecuencias se multiplican por tres en relación con la fundamental y en el sobreagudo por cinco, siete y nueve, dependiendo del tramo, lo cual nos revela la identidad del sonido en cada registro, esto es, terceros, quintos, séptimos y novenos armónicos respectivamente. En consecuencia, si consideramos este parámetro, es evidente que el clarinete se comporta como tubo cerrado puesto que solo utiliza a este fin armónicos impares inherentes a los tubos cerrados. Por otra parte, desde el punto de vista de la obtención de sus sonidos y sus diferentes longitudes de onda, el tubo sólo puede funcionar bien como cerrado, bien como abierto, no hay un término medio. Pensemos que la longitud de onda, en las fundamentales, sólo puede corresponder a dos veces la longitud operativa del tubo en los tubos abiertos, o a cuatro veces en los cerrados. Ahora bien, si consideramos, como así debe ser, que los tubos cerrados solo producen los armónicos impares y los abiertos los impares y pares, es evidente que el clarinete funciona ora como tubo cerrado, ora como abierto, pues produce armónicos de ambos órdenes, si bien en intensidades dispares, ya que predominan en intensidades los impares, pero solo en el registro grave. En el registro agudo se obtienen todos los armónicos con amplitud decreciente. Desde este punto de vista, es decir, considerados los armónicos como la resonancia superior de un sonido fundamental, podemos hablar en los términos de afirmar que el clarinete funciona como tubo semiabierto en el registro grave y como abierto en el agudo y sobreagudo, dado que produce los

armónicos propios de sendos tubos en proporciones diversas. No podemos, por ende, adscribir el tubo del clarinete a los tubos abiertos, en la segunda acepción, dado que éstos producen armónicos pares e impares en proporciones similares. Tampoco a los cerrados *sensu estricto*, puesto que la actividad de éstos es producir solo armónicos impares y esto tampoco acontece en el tubo del clarinete tal cual. En consecuencia, si no cabe la adscripción en ninguna de las categorías descritas y, considerando su producción predominante de armónicos impares y algunos pares, la definición correcta sería considerarlo como tubo semiabierto. Pero, por otra parte, si tenemos en cuenta que la presencia de algunos armónicos pares constituye bandas flexibles de resonancia y no respuestas circunscritas con precisión, también podemos hablar de tubo cerrado en modo *sui generis*, esto es, cuya actividad produce colateralmente algunos armónicos pares de modo aleatorio. En fin, el asunto es espinoso y en función de cómo lo enfoquemos, podremos resolverlo.

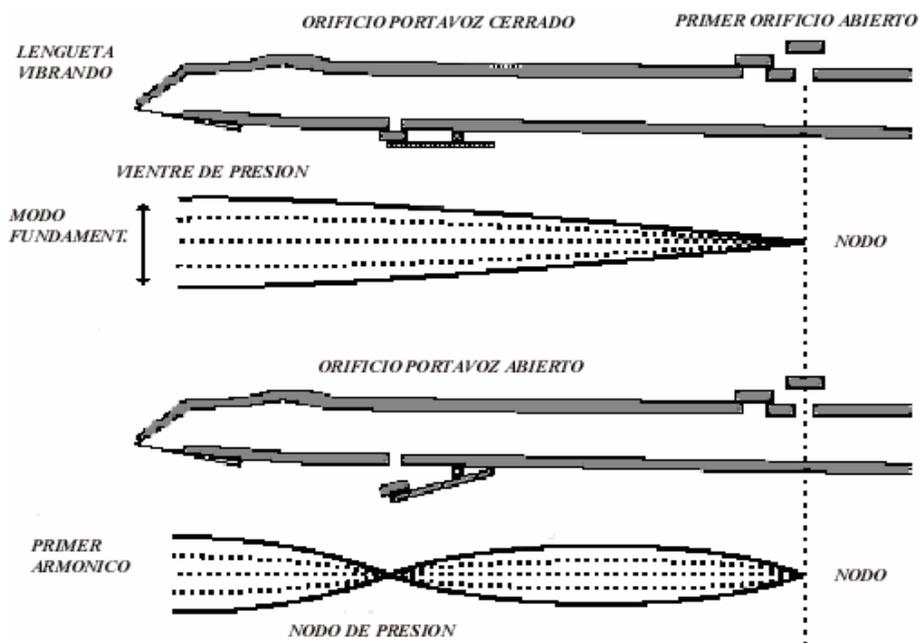
Procedamos, pues, a analizar la mecánica y génesis del proceso sonoro en el clarinete. Cuando se insufla aire en el interior del tubo del clarinete se producen múltiples movimientos vibratorios periódicos de las moléculas como consecuencia de la perturbación a la que se ve sometida la columna gaseosa por el efecto de la lengüeta. La vibración de la lengüeta comunica su frecuencia a la columna gaseosa, la cual trata de encontrar sus frecuencias resonantes para imponerlas, provocando así su oscilación forzada por simpatía -se trata, pues, de un generador, la lengüeta, asociado a un resonador, el tubo-. Esta perturbación se propaga longitudinalmente a través del aire contenido en el tubo que actúa como medio transmisor. Si la vibración es periódica se origina una onda longitudinal que no es otra cosa que el tren continuo de perturbaciones resultante. Esa onda longitudinal, en su trayecto por el medio elástico, queda reflejada fuera del extremo del tubo, mientras que parte de la energía queda absorbida en este medio, transformándose en calor. Pero otra porción importante de energía, debido al fenómeno de la reflexión, se propaga de nuevo en el medio primitivo con sentido diferente al anterior pero en concordancia de fase. Pues bien, la onda vuelve al extremo superior y dado que la lengüeta se halla en ese momento cerrada en su proceso de vibración $-1/2$ ciclo-, se vuelve a reflejar repitiendo el proceso de nuevo pero en oposición de fase de 180° , es decir, la onda se refleja dos veces y, por ende, se proyecta cuatro veces en el tubo, de ahí que se diga que su longitud de onda es cuatro veces la longitud operativa del tubo. Además este fenómeno se ve favorecido por la estrechez del tubo en comparación con la longitud de onda. Las interferencias producidas por ambas ondas, la incidente y la refleja, adoptan la forma de ondas estacionarias puesto que no varían de posición, simulando inmovilidad. Se engendra así el sonido en el interior del tubo del clarinete traducido en las diferentes fundamentales.

Ya que la caña y la boquilla se comportan como un final cerrado, la onda estacionaria presenta un vientre de presión cerca de la boquilla dado que la presión en ese punto es máxima, y un nodo hacia el extremo donde se ubica la campana o bien la abertura u orificio en uso más inferior. La zona comprendida entre el vientre y el nodo es de amplitud variable, esto es, la actividad de las partículas decrece paulatinamente desde el vientre hasta el nodo -el nodo queda configurado, en la práctica, fuera del tubo debido al efecto de la corrección del extremo final-. En el final del tubo y en la boquilla, la compresión es reflejada y una onda estacionaria se establece en el tubo. Durante la mitad del período de la fundamental la presión en la boquilla es alta y para la otra mitad es baja.

Esta variación de la presión de la columna de aire en la boquilla controla con eficacia la frecuencia de vibración de la caña.

A partir de las fundamentales, el funcionamiento acústico del tubo consiste en propiciar los armónicos superiores de orden impar para obtener los sonidos que abarcan la extensión del instrumento. Así, mediante la activación del orificio portavoz se consigue el tercer armónico dividiendo la columna gaseosa fundamental en tres mitades alicuotas. Este es el registro agudo, y la onda estacionaria, de acuerdo con el funcionamiento de los tubos cerrados, presenta dos nodos y dos vientres. El siguiente estadio, el registro sobreagudo (1), lo proporciona el quinto armónico activado mediante digitaciones especiales que promocionan un nuevo vientre, quedando por tanto configurada la onda estacionaria en tres nodos y tres vientres. El séptimo armónico sobreviene manteniendo las mismas digitaciones de los terceros -con ligeras modificaciones- y aumentando sensiblemente la presión de sople, seccionando así la columna gaseosa en siete mitades y obteniendo el segundo tramo de este registro. Por último, el noveno armónico se obtiene mediante digitaciones especiales que favorecen el nuevo diseño de la onda, completando así el abanico de sonidos con el tercer tramo de este registro.

Fig. 15.1 Simulación virtual del funcionamiento acústico del clarinete emitiendo un sonido fundamental y su tercer armónico



En la práctica, sin embargo, los instrumentistas utilizan para obtener los sonidos del registro sobreagudo una gran diversidad de armónicos en función de su criterio. Ya sea para ajustar la afinación, homogeneizar el timbre o por razones de dificultad técnica, no existe uniformidad en el uso de estos armónicos, aunque el procedimiento descrito es el más generalizado.

15.3 ALGUNAS CUESTIONES DE INTERES PRACTICO

Su comportamiento especial de tubo cerrado y abierto, o mejor dicho semiabierto, se atribuye a la acción conjunta de su lengüeta simple y su tubo, puesto que en teoría debería funcionar como tubo abierto, al igual que sucede con la flauta, el oboe o el saxofón, puesto que en ambos extremos presenta aberturas. Si analizamos el funcionamiento acústico del saxofón soprano -lo más parecido a un clarinete-, observamos que funciona como abierto, pues obtiene su segundo registro a la octava mediante el uso del segundo armónico, inviable en los tubos cerrados. Si atendemos a la forma de su embocadura, vemos que utiliza una lengüeta simple batiente análoga a la del clarinete. Asimismo, su tubo es de sección cónica, mientras que el del clarinete lo es de forma cilíndrica en su mayor parte. Podemos colegir que el motivo del funcionamiento de tubo cerrado del clarinete se debe, principalmente a la forma de su tubo, de sección cilíndrica.

Por otra parte, el especial funcionamiento acústico del clarinete lleva implícito ciertas ventajas e inconvenientes de tipo práctico que cabe analizar detenidamente.

Las ventajas más importantes en relación con sus homólogos de la orquesta son las que siguen: su gran versatilidad que le permite moverse con especial soltura en sus diferentes registros y obtener efectos sonoros muy considerados actualmente por los compositores; su vasta extensión que supera la de otros instrumentos análogos, a saber, el oboe o la flauta; su timbre cálido, muy socorrido para obtener determinados efectos expresivos; su ámbito dinámico que aventaja con creces el de sus homólogos del grupo de instrumentos de viento; asimismo, su color que empasta formidablemente con las cuerdas.

Su singularidad acústica de tubo cerrado, desde el punto de vista de la génesis de sus sonidos, le permite sonar una octava más grave que si estuviese abierto o si su tubo fuese más reducido en relación con el diámetro. Esto le otorga cierta ventaja sobre otros instrumentos como son la flauta o el oboe en relación con la altura de un sonido que puede emitir. Efectivamente, el clarinete puede emitir ciertos sonidos con la mitad de longitud de tubo que precisaría el oboe. De ahí que el clarinete aventaje a estos instrumentos por su amplia tesitura. La cuestión es la siguiente: si la distancia entre dos vientres o nodos constituye media longitud de onda ($\lambda/2$), la distancia entre un nodo y un vientre será de un cuarto de onda ($\lambda/4$). Dada la disposición de la onda estacionaria en un tubo cerrado con un solo nodo en un extremo y un vientre en el otro, tendremos que la longitud de onda en el tubo del clarinete será $\lambda/4$, y la frecuencia $f_1 = c/4L$, mientras que en un tubo abierto de la misma longitud, la longitud de onda será $\lambda/2$ y la frecuencia $f_1 = c/2$. De manera que en un tubo abierto la longitud de onda y su frecuencia se dobla en relación con uno cerrado, lo cual nos proporciona -siguiendo la serie armónica- el segundo armónico, esto es, la octava

del sonido fundamental. Esta es una de las leyes de los tubos sonoros que ya formulamos en el apartado 4.3.4.

Una cualidad intrínseca del clarinete la constituye su timbre característico, en el que la mayoría de armónicos pares están ausentes en el registro grave, o dicho de otro modo, están presentes pero en intensidades nimias. Esta singularidad, amén de individualizarle con respecto a los demás instrumentos de la orquesta, le confiere cierta oquedad al timbre en este registro por la prevalencia de los armónicos impares y brillantéz en los sonidos agudos, puesto que en estos sonidos los componentes armónicos son escasos y, por otra parte, están presentes los armónicos pares en intensidades análogas a los impares.

Empero, ya hemos dicho que en la práctica se obtienen algunos armónicos pares que acompañan al sonido fundamental. Esta cuestión es la más delicada del funcionamiento acústico del clarinete y también se la plantean muchos clarinetistas: si su tubo funciona como cerrado ¿por qué produce también algunos armónicos pares que en teoría sería imposible de acuerdo con una de las leyes de estos tubos? La respuesta hay que buscarla en la acción de la lengüeta, el efecto de las resonancias del tracto vocal y las alteraciones del taladro¹⁰¹. Efectivamente, se admite que el motivo de este fenómeno se debe en mayor medida a la acción de la lengüeta simple en conjunción con su perforación cilíndrica y cónica así como la resonancia de las paredes de su tubo. La lengüeta por sí sola es capaz de generar armónicos pares e impares con intensidades análogas, de modo que cuando las resonancias del tubo toman el control, ciertos armónicos pares pueden reforzarse por esas ligeras alteraciones del tubo. Por supuesto estos armónicos no pueden utilizarse como notas de la escala, sino sólo para obtener determinados efectos sonoros -demandados en la música contemporánea-, así como para configurar el timbre característico del instrumento. En cualquier caso la presencia de estos parciales podremos observarla en los espectros acústicos de los sonidos analizados en la parte experimental del estudio.

En cuanto a la razón de su amplia tesitura en relación con otros instrumentos análogos, tiene una sencilla explicación. Pensemos que al no octavear por la ausencia de sus segundos armónicos, el salto para la obtención de su segundo registro se lleva a cabo a la doceava por mor de terceros armónicos. Por consiguiente, el intervalo comprendido entre los sonidos fundamentales del primer registro debe contener once sonidos diatónicos antes de efectuar el salto al siguiente registro -el cual también contendrá once sonidos- por siete de los instrumentos que octavean -léase la flauta o el oboe-. La consecuencia es, por tanto, un registro de sonidos más amplio.

Por lo que respecta a los inconvenientes, dada su amplia tesitura y su tubo relativamente corto, debe obtener su escala mediante pequeñas subdivisiones. Los doce semitonos correspondientes al primer registro o al segundo deben ser gobernados por nueve dedos mediante un sistema de llaves -sistema Boehm- que proporciona unas prestaciones notables, aunque no perfectas. En este sentido, el sistema de cálculo en la fabricación del instrumento para la obtención de las diferentes fundamentales es complejo y un mínimo error es muy contraproducente. Además, ya sabemos que la afinación perfecta en el clarinete es pura teoría por sus particularidades físico-acústicas¹⁰². La consecuencia de esto son ligeras diferencias de afinación y homogeneidad entre algunos sonidos que deben

¹⁰¹ Se analizan estas cuestiones en el apartado 16.1.

¹⁰² Véase el Capítulo 16 para ampliar la información.

ser corregidas mediante digitaciones auxiliares que han sido estandarizadas empíricamente por los intérpretes. Estos problemas acústicos se potencian debido a su funcionamiento de tubo cerrado que le hace octavear a la doceava dejando un intervalo de quinta entre ambos registros que debe ser cubierto mediante artificios poco satisfactorios desde el punto de vista acústico. A este respecto, muchos sonidos se optimizan en relación con su afinación y timbre con la ayuda de la resonancia del tubo. Algunos mediante armónicos superiores y otros perfeccionándolos desde su ubicación armónica. Para ello es indispensable conocer numerosas digitaciones, especialmente las que se llevan a cabo activando determinados orificios que coadyuvan a la resonancia y por ende al ajuste de la afinación y el color del sonido. Mas este método comporta ciertas dificultades de carácter técnico para obtener óptimos resultados en determinados pasajes por su complejidad de digitación. Además, en ocasiones este recurso no es suficiente y se debe complementar con el uso de la presión labial y diafragmática para homogeneizar el sonido y ajustar la afinación.

15.4 METODOS PARA LA OBTENCION DE SONIDOS EN EL CLARINETE

Desde sus orígenes hasta la actualidad, el método para la obtención de la escala en el clarinete ha ido variando en función de los avances e innovaciones que se implantaban en el mecanismo. Además, el afán experimentador del intérprete alentado por las continuas exigencias técnicas y estéticas que demanda la música y los avances de la ciencia acústica, ha posibilitado una mejora continua de las prestaciones acústicas del instrumento. Efectivamente, muchos sonidos han ido modificando su digitación y, por consiguiente, su método de obtención conforme se ha ido experimentando. Esto ha permitido que muchas de estas digitaciones se hayan normalizado por los intérpretes.

Aún así, cada intérprete utiliza los armónicos según su criterio, por lo que existe cierta heterogeneidad en este sentido. De cualquier modo, se suele distinguir entre digitaciones *básicas y complementarias* a la hora de obtener los sonidos armónicos: las primeras las asociamos con los sonidos más ricos desde el punto de vista acústico y, por tanto, son las más utilizadas; las complementarias, por su parte, quedan relegadas a un uso extraordinario condicionado a determinados pasajes rápidos donde el intérprete busca la limpieza técnica en detrimento de la pureza sonora. De manera que la clasificación como digitación básica o complementaria atenderá siempre a la prioridad desde el punto de vista de su rendimiento acústico.

Debido a que los instrumentos de viento solo disponen, a diferencia del órgano, de un tubo sonoro, los instrumentistas deben agudizar el ingenio para variar la longitud de la columna aérea que contiene y obtener así varias columnas aéreas que les permitan constituir su escala con las fundamentales y sus armónicos. Para ello se recurre a dos procedimientos básicos: alterar la longitud de la columna aérea que está operando o hacer uso de uno de los armónicos superiores obtenibles como la altura final de la nota.

El primer método se lleva a cabo perforando en las paredes del tubo orificios de diámetro adecuado y dispuestos convenientemente de acuerdo con un estudio acústico previo. Su activación mediante digitación apropiada variará la longitud de la columna aérea y determinará, por consiguiente, la altura del sonido que se busca. De este modo la columna gaseosa vibra en toda la longitud efectiva del tubo, bien hasta el extremo donde se ubica la

campana, bien hasta el orificio en uso más grave. En este caso la onda estacionaria que se origina en el interior del tubo ofrece un vientre en la boquilla y un nodo hacia la campana u orificio destapado más grave, con una longitud de onda de 4λ . Se consiguen de esta forma las diferentes fundamentales del registro chalumeau o grave, comprendido entre el Mi_2 y el Sib_3 . También pueden obtenerse el Si_3 y Do_4 como fundamentales con las llaves 10b y 11 -digitaciones complementarias-, respectivamente, continuando con el acortamiento gradual del tubo, pero el rendimiento acústico no es nada plausible, por lo que su obtención mejorada se adscribe a terceros armónicos. No obstante su uso es muy socorrido para pasajes rápidos. Los sonidos fundamentales hasta el Do_3 son bastante homogéneos en sonoridad y afinación, y presentan un timbre penetrante y aterciopelado con cierta oquedad por la prevalencia de armónicos impares sobre los pares. Este registro ha sido utilizado por los compositores para buscar efectos sombríos y cavernosos. Desde el Re_3 hasta el Fa_3 se aprecian ligeras diferencias de afinación y timbre que deben ser corregidas mediante digitaciones auxiliares. El Sol_3 , $Sol\#_3$, La_3 y Sib_3 son los más imperfectos del clarinete en cuanto a afinación y timbre se refiere. Esto es debido a la corta longitud del tubo que se halla operando en esos sonidos, unido a la baja presión generadora. Es la consecuencia de no octavear, puesto que de hacerlo estos sonidos ganarían en homogeneidad tímbrica y afinación al utilizarse como segundos armónicos. Por consiguiente, el timbre de estos sonidos es un tanto indeterminado, pobre y desigual en relación con los demás registros del instrumento y comportan problemas en la afinación provocados por frecuencias que suelen ser más elevadas de lo que cabría esperar entre los diferentes sonidos de la escala diatónica. Estos desequilibrios se corrigen por los instrumentistas con el uso de digitaciones auxiliares mediante las cuales se ajusta la afinación y se homogeneiza el timbre por la acción resonadora del tubo. Además se utiliza la presión labial en algunos sonidos para hallar la afinación correcta.

El segundo método, más impreciso en lo que a afinación se refiere por las particularidades de las series armónicas y de las vibraciones de los tubos, consiste en impedir que suene el sonido fundamental obligando así a que suene el armónico deseado y se perciba como la altura final. Para llevarlo a cabo se debe incrementar la presión de sople, en los instrumentos de embocadura libre, o bien hacer uso de un orificio, denominado portavoz, que activándolo genera un nodo de presión en la columna, dividiéndola en partes alícuotas por su natural disposición a dividirse en partes cocientes, forzando así al armónico superior a hacer acto de presencia. Este agujero abierto destruye, por tanto, el modo fundamental y fuerza la columna aérea a su próxima resonancia que, en el caso del clarinete, es el tercer armónico. Además, este método requiere un incremento gradual de la presión de sople dado que las partículas vibran ahora a una frecuencia triple, quintuple, etc., con respecto al modo fundamental y, por tanto, se necesita más energía para moverlas. También es preceptivo, en ocasiones, el uso de digitaciones complementarias. Este procedimiento es el que utilizan los instrumentos de embocadura de lengüeta, el clarinete, aunque también pueden obtener armónicos, de forma más dificultosa, únicamente con el incremento de la presión de sople. Los siguientes armónicos son posibles con digitaciones especiales que posibilitan nuevos orificios portavoces capaces de practicar en la columna gaseosa nuevas subdivisiones. Huelga decir que este procedimiento está condicionado en alguna medida por la forma de la embocadura y el tubo y requiere cierta destreza del ejecutante.

Este segundo procedimiento se usa para obtener los sonidos del registro agudo y del sobreagudo, -desde el Si₃ hasta el sonido Do₅ y desde el Do#₅ al Do₆, respectivamente-. En el primer caso, los sonidos se obtienen por mor de terceros armónicos -una doceava por encima- de los sonidos fundamentales. En efecto, con el uso de un orificio portavoz, se divide la longitud de onda en la tercera parte de la fundamental obligando al tercer armónico a hacer acto de presencia. Este agujero se activa con la llave nº 12 -también conocida como de doceava- y como su nombre indica, proporciona las doceavas o duodécimas del sonido fundamental de referencia.

Este registro ha sido el más utilizado a lo largo de la historia musical por la mayoría de los compositores, tanto a nivel solista como en la orquesta. En este sentido se han buscado efectos líricos y *cantables* en muchas composiciones por el color cálido y ligeramente similar a la voz humana. Pensemos, por ejemplo, en el *Adagio del Concierto para Clarinete y Orquesta* de Mozart, en el del *Quinteto*, en los tempos lentos de los *Conciertos para Clarinete* de Weber, en las *Sonatas* de Brahms, etc. Asimismo gracias a su versatilidad, puede ser utilizado para obtener determinados efectos sonoros como el *glissando*, los cuartos de tono, *vibrato*, etc., muy demandados actualmente, o bien otros efectos coloristas. A este respecto, este registro es el más apto para efectuar estos efectos.

Debido a la imposibilidad de obtener más columnas gaseosas por las limitaciones físicas del tubo -si bien ya hemos argumentado que se puede seguir ascendiendo pero el resultado no es nada plausible-, el siguiente salto armónico utilizado para la obtención de la escala en el clarinete se lleva a cabo practicando una nueva subdivisión por medio del quinto armónico -una sexta por encima del tercer armónico-. Efectivamente, en este registro los sonidos se obtienen mediante el uso del quinto armónico a partir del Do#₅ -quinto armónico de la fundamental La₂- hasta el Fa#₅, obtenidos con las mismas digitaciones de sus fundamentales, desactivando el orificio 2 que actúa como portavoz, y añadiendo alguna llave complementaria para ajustar la afinación. Este último también se emplea como tercero y séptimo, con digitaciones complementarias, según el efecto que se busque. De esta suerte, la columna gaseosa se parte en cinco segmentos iguales, gracias a la desactivación de un orificio intermedio que genera un nuevo vientre en la onda estacionaria -el generado por el orificio portavoz y este nuevo-, y la longitud de onda queda establecida en una quinta parte de la fundamental. Este es el primer tramo, acústicamente hablando, del *registro sobreagudo* y su timbre se caracteriza por ser ligeramente áspero y chillón dadas las altas frecuencias que lo originan y su escasa composición armónica. En este sentido, la frecuencia de cada sonido puro se quintuplica en relación con el sonido fundamental. La afinación en este registro es harta compleja por su modo de obtención y requiere el uso de métodos correctores¹⁰³. De la misma forma, debido a las altas presiones que se originan, la homogeneización de estos sonidos se lleva a cabo mediante numerosas digitaciones que los instrumentistas han ido estandarizando sobre la base de su experiencia, la mayoría de las cuales consisten en facilitar la resonancia de las ondas -utilizando armónicos superiores en algunos casos- en el interior del tubo modificando así la afinación y el color del sonido.

En el caso de quintos armónicos, se presenta el mismo problema que aludíamos en los terceros, ya no es posible ascender por las limitaciones físicas de las columnas gaseosas y por el fenómeno de la corrección final. Por esta razón, el segundo tramo de este registro debe transcurrir desde el Sol₅ hasta el La#₅ gracias a un método consistente en aumentar la

¹⁰³ Véase el apartado 16.2.

presión de sople sensiblemente manteniendo las mismas digitaciones que utiliza el primer tramo de este registro. De esta guisa, con la digitación del $Do\#_5$ y aumentando la presión se obtiene el Sol_5 ; con la digitación del Re_5 , el $Sol\#_5$, etc. Huelga decir, a colación de este procedimiento, que estas digitaciones, en la mayoría de los casos, son básicas y deben ser complementadas con la activación de otras llaves u orificios que coadyuven a nivelar la afinación y homogenizar el timbre, puesto que de lo contrario la frecuencia suele tener tendencia a descender. Pues bien, como decíamos, aumentando la presión de sople obligamos al séptimo armónico a hacer acto de presencia, puesto que la columna queda establecida ahora en siete subdivisiones iguales, esto es, un vientre más en relación con sus vecinos del primer tramo. Entonces, la frecuencia se septuplica en relación con la fundamental, mientras la longitud de onda sobreviene en una séptima parte de ésta. El timbre, en este tramo, es ligeramente estridente y chillón dadas las altas frecuencias generadoras.

En este tramo no es recomendable abusar de sus sonidos más allá del La_5 -se recomienda utilizar, en este sentido, el $La\#_5$ como undécimo armónico en sonidos importantes del discurso musical- puesto que el resultado tímbrico no es nada plausible. Además la afinación se torna más compleja a medida que se asciende. Así todo, los compositores lo han empleado en muchas obras tratando de buscar cierta aspereza en el color y determinados efectos sonoros.

El último tramo -ampliable- lo constituye el Si_5 y el Do_6 , obtenidos mediante novenos armónicos -también como undécimos- que utilizan un orificio desactivado como portavoz para dividir la columna en nueve mitades. También pueden obtenerse como séptimos, pero el resultado es muy pobre por la corta longitud de la columna.

A partir del Re_6 , los restantes sonidos que pueden obtenerse con el clarinete se consiguen también con el concurso de novenos o undécimos armónicos, si bien su utilización es ínfima, debido a su timbre chillón y estridente. Para obtenerlos precisamos aumentar sensiblemente la presión tanto labial como diafragmática y aún así su emisión es extremadamente complicada.

A continuación se presenta la escala cromática del clarinete obtenida mediante digitaciones básicas y generalizadas, con expresión de la naturaleza de sus sonidos, esto es, si corresponden a fundamentales o armónicos, así como su vinculación armónica. Las notas que figuran entre paréntesis corresponden a sonidos de bajo rendimiento acústico por las cortas longitudes de tubo operativo y por el fenómeno de la corrección final, con lo cual su obtención mejorada se adscribe al armónico superior.

Fig. 15.2 Escala cromática del clarinete obtenida con digitaciones básicas y generalizadas con expresión de la naturaleza de sus sonidos y su vinculación armónica

FUNDAMENTALES (Registro Chalumeau o Grave)

TERCEROS ARMÓNICOS (Registro Clarín o Agudo)

FUNDAMENTALES (Registro Chalumeau o Grave)

TERCEROS ARMÓNICOS (Registro Clarín o Agudo)

FUNDAMENTALES (Registro Chalumeau o Grave)

QUINTOS ARMÓNICOS (Registro Sobreagudo (1))

SÉPTIMOS ARMÓNICOS (Registro Sobreagudo (2))

NOVENOS ARMÓNICOS (Registro Sobreagudo (3))

CAPITULO 16

LA AFINACION EN EL CLARINETE



Concierto para Clarinete y Orquesta de cuerda (con arpa y piano). Copland (1900-1990)

16.1 ANALISIS Y DESCRIPCION

16.1.1 Introducción

En este punto del estudio queda claro que el clarinete presenta, debido a su funcionamiento de tubo cerrado, la característica acústica de octavear a la doceava y no a la octava como lo hacen el resto de sus homólogos de la orquesta. Esta característica le otorga ciertas ventajas pero también inconvenientes serios. Las ventajas se analizan en el capítulo donde se trata el funcionamiento acústico del instrumento. Sin embargo, aquí vamos a incidir en los inconvenientes, pues guardan una relación directa con los problemas de afinación que presenta nuestro instrumento.

Todos los estudios que se han practicado y se practican en el clarinete tienen como finalidad básica perfeccionar la afinación del instrumento y homogeneizar el desigual timbre de sus diferentes registros. Si hacemos un repaso en la evolución del clarinete observamos que todas sus innovaciones han ido encaminadas a conseguir este fin. Denner experimentó con las primeras llaves en relación con su ubicación y el diámetro del orificio que obturaban. La colocación de la llave de octava fue objeto de numerosos estudios experimentales cuya finalidad no era otra que ampliar las posibilidades sonoras del clarinete y, por ende, su afinación. Análoga finalidad buscaban las llaves que se fueron instalando en el mecanismo del instrumento en el curso de su evolución técnica. La llave del Si₃, ausente en el clarinete de Denner, también fue objeto de una experimentación ímproba antes de su definitiva ubicación. Posteriormente, en 1812 Müller con su clarinete

de trece llaves perfeccionó considerablemente la afinación del instrumento con una serie de innovaciones técnicas muy plausibles en la época: el diseño y material de las llaves y zapatillas, el biselado de los orificios, la disposición de las llaves. Por último, Klosé, con su sistema inspirado en el sistema de T. Boehm, perseguía el ideal de un sonido puro y de afinación perfecta. El diámetro y colocación de los orificios, de acuerdo con los estudios experimentales llevados a cabo por T. Boehm, y un nuevo diseño y colocación de las llaves en los orificios practicados en el tubo, permitieron perfeccionar la acústica del instrumento en orden a su afinación y timbre.

En la actualidad los estudios científicos de Bouasse, Richardson, Benade y Nederveen, acerca de las posiciones idóneas de los orificios tonales para el diseño del clarinete perfecto desde el punto de vista de su afinación, han supuesto un gran avance, sin embargo sus resultados todavía no han sido aplicados al instrumento por diversas causas ya analizadas en la contextualización del estudio.

Los fabricantes de instrumentos, por su parte, deben aplicar las innovaciones para conseguir la afinación más precisa en sus instrumentos. Para ello deben conocer perfectamente su funcionamiento acústico y el temperamento igual. Así todo, en el caso del clarinete, por sus particularidades organológicas, la afinación correcta es pura teoría y, por lo tanto, el papel que juega el instrumentista en este menester es más determinante que en otros instrumentos.

La afinación en los instrumentos de viento madera se ve afectada por factores de muy diversa índole, tales como la presión atmosférica, la temperatura ambiental, errores de fabricación en el instrumento, etc. En realidad estos factores no actúan directamente sobre nuestra afinación sino sobre nuestro instrumento, o mejor dicho, sobre el material con el que está construido.

Nosotros vamos a considerar los fenómenos y factores que tienen una influencia considerable en la afinación del instrumento y que pueden corregirse bien sea por el propio instrumentista, bien por el fabricante en el proceso de diseño, a saber: la corrección del extremo final, la influencia de las alteraciones del tubo en la columna aérea, el efecto de las cañas y, por último, el efecto del tracto vocal.

16.1.2 El efecto de la corrección del extremo final

En relación con este primer fenómeno¹⁰⁴, su influencia se extiende a los sonidos del intervalo de quinta que enlaza el registro grave y el agudo y, especialmente, a los sonidos del registro sobreagudo. En cuanto a los primeros, ya sabemos que la columna vibrante no se secciona exactamente en el primer orificio destapado, aunque la teoría así lo establezca, sino que se prolonga parcialmente, a modo de apéndice, en el tubo, debido a que la diferencia de presión no puede quedar compensada exactamente en el punto en que éste desemboca en la atmósfera envolvente. A medida que esta diferencia de presión y densidad entre el aire encerrado en el tubo y el aire envolvente se incrementa, la compensación deberá efectuarse en un mayor espacio, con lo cual la columna vibrante se prolongará haciendo descender la frecuencia. Por lo tanto, la columna aérea vibrante es de mayor longitud que la del tubo que la encierra. La porción sobrante será más reducida cuanto

¹⁰⁴ Véase el apartado 16.2.

mayor sea el diámetro de los orificios y su espaciado y menor esa diferencia de presiones, dado que ésta quedará ecualizada más fácilmente. Es por esta razón que los orificios de mayor diámetro producen una afinación más precisa puesto que favorecen una mejor compensación, al contrario que los de diámetro más reducido, cuya compensación se efectuará de forma más imprecisa y, por consiguiente, tanto mayor será el apéndice sobrante, lo que se traducirá en un sonido más grave. Los constructores conocen este problema y tratan de solucionarlo de modo que el diámetro de los orificios practicados en el tubo guarde una proporcionalidad con la longitud acústica del tubo. De esta forma se consigue controlar este fenómeno y se precisa mejor la frecuencia.

T. Boehm refiere este fenómeno en su manual donde describe y analiza los fundamentos básicos de la construcción de su flauta:

“La columna de aire debe ser considerada como desconectada por estos agujeros en un grado determinado por el radio entre los diámetros de los agujeros y el tubo.”

“La columna de aire resultante, de todas formas, no se acorta tanto por un agujero como lo haría por el corte del tubo en el mismo punto. Incluso aunque el tamaño del agujero sea igual al diámetro del tubo, las oscilaciones del aire no saldrán del agujero con un ángulo adecuado como lo harían libremente a través del eje.” (Boehm, 1991)

Queda claro que Boehm advirtió este fenómeno, aunque su fundamentación científica no fue establecida hasta el siglo XX por los acústicos más destacados en este asunto -léase Benade y Nederveen-.

Entiéndase también este fenómeno, entre los clarinetistas, como una acción resonadora secundaria de la porción de tubo que queda entre el orificio destapado más grave y la zona de aquél donde se verifica la susodicha compensación, cuya función acústica, aparte de la descrita, es la de homogeneizar el desigual timbre de sus diferentes registros. Este suceso acontece invariablemente en el tramo quintante debido al pequeño diámetro de los orificios que se disponen en esta zona, unido a la corta longitud de tubo que posibilita un generoso margen de maniobrabilidad para practicar el método analizado.

Este intervalo de quinta comprendido desde la octava o segundo armónico hasta la duodécima o tercer armónico es, pues, el causante de los problemas de equilibrar la escala. Hasta llegar a esos sonidos la afinación suele ajustarse a los valores reales salvo excepciones, pero es a partir de ahí cuando la escala se resiente. El problema es que si se altera la ubicación y diámetro de esos orificios para ajustar la afinación de esos sonidos, se corre el peligro de que afecte globalmente a la balanza cromática. Otra solución sería ampliar el extremo superior del tubo donde se sitúa el centro del vientre de presión -el barrilete- para reducir la elasticidad y bajar la frecuencia¹⁰⁵. Sin embargo, la perturbación no afecta por igual a todos los modos y, por tanto, el régimen de cooperación de las resonancias se vería afectado y no sería posible emitir estos sonidos de forma estable y afinada.

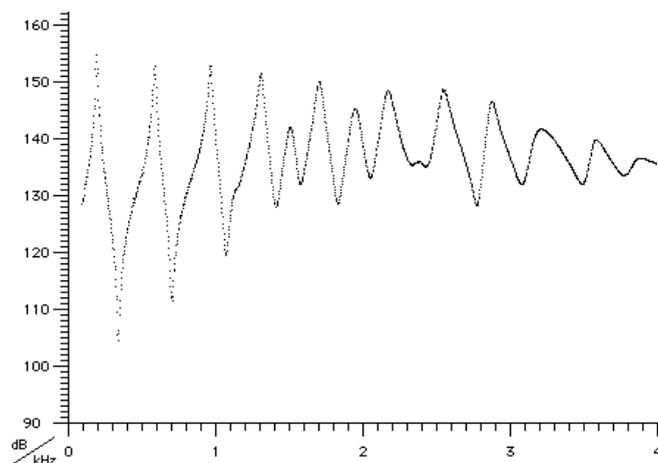
Por lo que respecta a los sonidos sobreagudos, el problema es el siguiente: el espaciado y el diámetro de orificios tonales abiertos al que aludíamos en el apartado 14.3 del estudio -el enrejado-, determina la frecuencia de corte del instrumento, estimada en 1500 Hz aproximadamente. Cuando se excede esta frecuencia -la denominada frecuencia crítica-, la onda no se refleja en el primer orificio tonal abierto, sino que viaja más allá de

¹⁰⁵ Se analiza este aspecto en el siguiente subapartado.

éste, de forma que el enrejado de orificios abiertos actúan como un filtro radiando las ondas al exterior. Como la mayor parte de la energía sonora es irradiada en lugar de reflejarse, la onda estacionaria no puede establecerse y mantenerse de forma normal, de manera que la frecuencia desciende ligeramente en estos sonidos, a no ser que se modifique la columna aérea mediante digitaciones auxiliares. Nótese que este problema afecta a los sonidos que se emiten con un número considerable de orificios tonales abiertos -en el tercer armónico, a partir de $\text{Do}\#_5$; en el quinto, a partir del $\text{Fa}\#_5$; en el séptimo, a partir del La_5 -¹⁰⁶. Se puede concluir, por tanto, que existe una relación directa entre las deficiencias de determinados sonidos con las anomalías locales de la frecuencia de corte.

Las curvas de impedancia¹⁰⁷ para los sonidos fundamentales permiten observar que sonidos sobreagudos pueden ser emitidos de forma regular. En la siguiente figura se muestra a modo de ejemplo la curva de impedancia para el La_2 . Se observa que los primeros cinco picos corresponden a los parciales 1, 2, 3, 4, y 5. El primero es el más prominente y corresponde a la fundamental, mientras que los siguientes corresponden al tercero (Mi_4), quinto ($\text{Do}\#_5$) y séptimo (Sol_5). Estos armónicos pueden ser utilizados como notas de forma relativamente afinada dado que no superan los 1500 Hz. A partir de este punto la frecuencia de corte se excede y los siguientes parciales difícilmente pueden ser tocados de forma clara y afinada, a no ser que se emitan con varios orificios tonales cerrados que invaliden este fenómeno. Así, el noveno (Si_5) solo es posible emitirlo corrigiendo la digitación.

Fig. 16.1 Curva de impedancia del La_2 (Wolfe, 2002)



¹⁰⁶ Exactamente en el punto donde se debe saltar al armónico superior siguiente para restablecer las condiciones normales, dado que se obturan todos los orificios tonales de nuevo.

¹⁰⁷ Véase el apartado 6.3.

Asimismo, se pueden verificar las discrepancias analizadas en los dos párrafos precedentes, observando los espectros y frecuencias experimentales, obtenidos en la parte experimental del estudio, de los sonidos del tramo quintante y los del registro sobreagudo que cumplan las condiciones descritas a propósito de los efectos de la corrección del extremo final del tubo.

16.1.3 Influencia de las alteraciones en el tubo sobre la afinación

Con respecto a este segundo factor, es preciso considerar ciertos principios. En primer lugar, el tubo del clarinete no es en realidad un cilindro liso. Efectivamente, las almohadillas no cierran ajustándose al cilindro sino que dejan una pequeña cavidad debajo; también hay a menudo una cavidad abandonada cuando el barrilete o la boquilla se extraen para ajustar la afinación. Estas pequeñas perturbaciones modifican las frecuencias y amplitudes de los componentes armónicos de cada sonido.

Por otra parte, el ajuste de las frecuencias en un instrumento de viento madera también depende en gran medida de las alteraciones que puedan efectuarse en su tubo, dado que de esta forma se modificará la vibración de la columna de aire. Este procedimiento es importante no sólo por los cambios en la frecuencia al modificar la cantidad de masa móvil en un sistema, sino también por los cambios asociados con las modificaciones de sus coeficientes de rigidez (Benade, 1976). Se sabe, en este sentido, que un aumento local de masa en un sistema vibrante siempre baja sus frecuencias, mientras que un aumento de la rigidez siempre las levanta. La cuestión radica en qué puntos se deben introducir esas alteraciones. Efectivamente, una alteración practicada cerca de un nodo vibracional de presión produce efectos menos acusados que si se realiza en medio de un vientre.

Sabemos que en una columna de aire existen puntos de variación de la presión máxima y, equidistantes, nodos de presión donde hay un flujo máximo longitudinal de aire. De acuerdo con Benade (1976), si contraemos el diámetro de una columna de aire en un punto donde la amplitud de presión es grande y seguimos enviando el mismo flujo de aire en este segmento de la columna de aire, la corriente de aire será impedida parcialmente lo que generará una subida más grande de la presión local acústica. En otras palabras, la reducción de la sección cruzada producirá un aumento local del coeficiente de elasticidad del aire dentro de ella. Este aumento de la elasticidad de un sistema levanta sus frecuencias, con lo cual tal contracción producirá un aumento de la frecuencia de vibración del modo en cuestión¹⁰⁸. Si la contracción se aplica en la posición de un nodo de presión, no tendrá ninguna efecto sobre la frecuencia natural. Por otra parte, la diferencia de presión en un tubo producirá ligeramente menos flujo si el tubo se contrae -el mismo efecto se obtiene aumentando la densidad del aire y así su inercia-, de dónde se infiere que las constricciones en un punto donde el flujo oscilatorio es considerable bajan la frecuencia natural de vibración. Nótese que si la constricción se localiza en un nodo de desplazamiento, no tendrá ningún efecto sobre las propiedades de inercia del aire y, consecuentemente, no se podrá modificar la frecuencia de vibración.

El célebre físico inglés Rayleigh (1894) resume este fenómeno en cuatro principios fundamentales:

¹⁰⁸ Este fenómeno es análogo al caso de una masa que vibra sobre un muelle. Si la rigidez del muelle se aumenta, entonces la frecuencia de oscilación también se eleva.

1. Un ensanchamiento localizado de la sección cruzada de una columna de aire produce los siguientes efectos: (a) baja la frecuencia natural de cualquier modo que tiene una amplitud de presión grande -y el por lo tanto un flujo pequeño- en la posición de la ampliación; (b) levanta la frecuencia natural de cualquier modo que tiene un nodo de presión -y por lo tanto un flujo grande- en la posición de la ampliación.

2. En cualquier columna de aire, la frecuencia natural de un modo dado puede ser levantada o bajada por una perturbación dada, según donde se aplique. En una columna de aire cilíndrica, el cambio de porcentaje máximo de la frecuencia -por arriba o por debajo- es igual al cambio de porcentaje del volumen total de aire que es producido por la perturbación, si esto es una ampliación o una contracción. Los tubos cónicos son más sensible al efecto de pequeñas perturbaciones.

3. Los cambios de frecuencia máximos descritos en el principio 2 ocurren cuando la perturbación se extiende sobre un segmento muy corto de la columna de aire localizada en el centro de un vientre ascendente o descendente de la función peso. Un ejemplo de tal perturbación es la cavidad corta producida cuando dos secciones de un instrumento de viento de madera se separan ligeramente en el punto donde se unen. Una perturbación compacta puede tener consecuencias muy irregulares sobre la escala que produce un instrumento.

4. El efecto de la perturbación se distribuye más ampliamente sobre los modos inferiores que sobre los más altos, cuyas funciones de peso W pueden oscilar considerablemente a través de la envergadura de la perturbación y así se tienda a hacer un promedio. La acción de perturbaciones amplias y estrechas aplicadas en varios puntos a lo largo de una función de peso es una analogía exacta al efecto de excitar el martillo estrecho o ancho en varios puntos sobre una cuerda.

De forma resumida, el efecto de una contracción o ampliación del tubo dependerá de si se practica en un nodo de presión o un antinodo para algún modo particular de oscilación: una contracción en un antinodo de presión aumentará la elasticidad del sistema dando lugar a un aumento de la frecuencia, mientras que si se practica cerca de un nodo de presión causará una bajada de la frecuencia para el modo en cuestión. Por su parte, una ampliación del tubo cerca de un antinodo de presión reduce la elasticidad y baja la frecuencia, mientras que si se sitúa cerca de un nodo de presión, sube la frecuencia. Asimismo, el tercer principio hace alusión al efecto que tiene en las frecuencias de la escala la cavidad que se produce cuando se separan dos secciones -un buen ejemplo de esto sucede cuando se extrae el barrilete del cuerpo superior¹⁰⁹. El efecto que tiene en las frecuencias de los sonidos de la parte alta del tubo es más acentuado que en el resto de sonidos-.

Estos principios permiten deducir ciertas cuestiones relativas a la afinación del instrumento que nos ocupa, y que Benade (1976) aplica de forma muy ilustrativa a tres sonidos del clarinete: el Mi_2 , el Fa_2 y el Do_3 .

El primer sonido se produce con un tubo con todos sus orificios tonales cerrados. Encontramos en este supuesto que en el cuarto inferior la columna de aire sufre una ampliación que se abre hacia la campana del instrumento. Esta alteración produce una perturbación en la columna de aire en el final inferior del tubo que levanta el primer modo -dado que en ese punto se constituye un nodo de presión-, levanta el segundo modo ligeramente, y no tiene casi ningún efecto sobre el tercer modo, de acuerdo con el primer

¹⁰⁹ Obsérvese las frecuencias experimentales a propósito de esta cuestión en el apartado 14.5.

principio enunciado por el Sr. Rayleigh. Este fenómeno afecta, pues, directamente a las notas bajas que emite el clarinete. Efectivamente, de acuerdo con Benade, la relación de las frecuencias entre el primer y segundo pico de resonancia es menos de 3 a 1, el valor que pertenece a un tubo directo -la discrepancia asciende a 30 o 40 cent-. El tercer pico presenta un valor aproximadamente similar por debajo de la relación de cinco veces la frecuencia del primer modo. Como la perturbación rompe la relación de número entero entre las frecuencias de resonancia, sólo es posible una cooperación muy pobre en el régimen de oscilación del registro grave, y la afinación de los tonos del registro grave dependerá considerablemente de la intensidad con la que se emitan. Esta es la razón por la cual no es posible utilizar el segundo y tercero parcial como notas de la escala de las tres primeras fundamentales del registro grave - Mi_2 , Fa_2 y $Fa\#_2$ -.

En el segundo sonido se abre un orificio tonal en el final inferior de nuestro clarinete. En este supuesto la onda estacionaria se prolonga hasta la parte ensanchada del tubo. De esta forma el primer modo es levantado ligeramente debido a la perturbación corta en su final inferior. El segundo modo es levantado por en una proporción casi igual, porque la perturbación se extiende considerablemente sólo sobre el medio vientre de W_2 . El tercer modo, también se levanta, pero sólo ligeramente. Las consecuencias musicales para esta nota son que la frecuencia del segundo pico se levanta casi tanto como el de primer pico, la relación de frecuencia entre ellos se queda casi en 3 a 1, la relación perfecta para la producción de un tono bueno. En este caso la discrepancia puede ser tan pequeña como 10 o 15 cent en un clarinete que tiene un registro grave bueno.

Por último, en el caso del Do_3 , estamos destapando varios orificios tonales en la parte inferior del tubo, de forma que la columna de aire que se halla operando no alcanza la zona dilatada del instrumento y, por tanto, no existe ninguna perturbación que impida que las cooperaciones puedan ser perfectas. Mientras muchos clarinetes tienen una relación de frecuencia entre el primer y segundo modo de 20 o 30 cent -por debajo del valor deseado para una buena cooperación-, en la actualidad es perfectamente posible conseguir un instrumento en el que el error en la cooperación no exceda los 5 cent para esta zona de la escala.

Se puede inferir del análisis efectuado en los párrafos precedentes la dificultad que entraña el diseño de un clarinete en la zona alta y baja del tubo debido, en buena parte, al empleo de un solo orificio de registro que eleva ligeramente la afinación de los sonidos del registro grave y, en menor medida, del agudo en ambos extremos del tubo. Al fabricante de instrumentos se le presenta el dilema de tener que alinear los picos para conseguir unos sonidos óptimos en el registro grave, o bien situarlos los orificios más cerca dejando inalienados los picos para poder emitir unas duodécimas precisas, en detrimento de aquéllos. Se entiende así, por qué se ensancha la parte final del tubo del clarinete -la campana- y se contrae el final superior -la boquilla-. Si el tubo del clarinete fuese un cilindro perfecto, sus diferentes registros estarían desafinados dado que, como hemos dicho, el orificio de registro eleva ligeramente la frecuencia del segundo modo en ambos extremos de la escala. La solución parcial para corregir esta discrepancia consiste en ensanchar la parte final y contraer ligeramente el extremo superior lo que permite subir la frecuencia en ambos extremos y ajustar la balanza global. Sin embargo, con este procedimiento los sonidos de ambos extremos de la escala del registro grave siempre se quedarán ligeramente altos.

Benade resuelve esta cuestión de forma muy ilustrativa:

“Como los efectos de las cooperaciones no son bien entendidos y dado que la afinación es muy importante para el músico, los instrumentos se construyen normalmente para sacrificar el tono del registro grave. Sin embargo, cada uno se queja del problema a su manera. Un instrumento en el que se alcanza un compromiso intermedio demuestra por lo general que resulta muy satisfactorio en las manos de un buen clarinetista, el cual suele notar las virtudes del arreglo, pero desconoce los problemas causados por ello. Es poco probable que sea consciente de los cambios en la afinación, ya que él ya ha aprendido a hacer las correcciones en la afinación de forma rutinaria en otras partes de la escala. Él no tiene que aprender los hábitos nuevos de la corrección de la afinación: bastante hace con adaptar sus hábitos viejos a las circunstancias nuevas.” (Benade, 1976)

Se pueden extraer de esta breve disertación cuatro conclusiones, a saber:

1. El aspecto más importante en el diseño de un clarinete se centra en corregir las discrepancias en la afinación causados por un solo orificio de registro que sube la frecuencia del segundo modo en ambos finales de la escala del segundo registro. Este aspecto ha sido estudiado y desarrollado desde el siglo XIX con el fin de obtener unas duodécimas afinadas, pero esto debe practicarse sacrificando la estabilidad de la afinación, la facilidad de emisión y la claridad del tono en el registro grave.
2. Es posible erradicar el problema construyendo un clarinete con dos orificios de registro -ya ha habido algunos intentos-.
3. Es preciso alcanzar un punto intermedio entre los dos problemas descritos para corregirlos y satisfacer a los clarinetistas.
4. El desconocimiento del músico sobre los problemas en la afinación de su instrumento y su resolución.

16.1.4 El efecto de la caña sobre la afinación

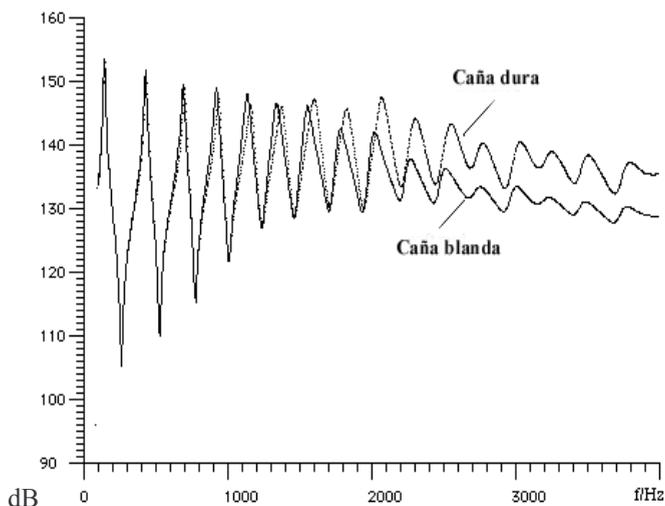
Otro factor a considerar en el comportamiento de las columnas aéreas, y por tanto en el resultado tímbrico y en la afinación del instrumento, es el efecto de la caña.

La caña por sí sola también puede afectar a la entonación del instrumento. En efecto, además de controlar el flujo de aire, la caña desempeña un papel pasivo en la acústica del clarinete. Cuando la presión dentro de la boquilla sube, la caña es empujada hacia afuera. Recíprocamente, la succión atrae la caña hacia el taladro. De este modo, la caña aumenta y disminuye el volumen de aire de la boquilla con la presión alta o baja. De hecho, se comporta como un volumen extra de aire que también puede comprimirse y extenderse cambiando la presión en la boquilla. Este fenómeno tiene el efecto de bajar ligeramente la frecuencia de cada resonancia. Dado que las cañas flojas se mueven más que las duras, aquéllas bajan la frecuencia más que las duras. Así, las cañas suaves tienden a reducir los intervalos, mientras que las duras los amplían. Este efecto de la elasticidad de la caña de reducir las resonancias se manifiesta más en las notas altas que en las bajas y es importante tenerlo en cuenta, dado que, en ocasiones, es la caña la causante de los

problemas de afinación en los sonidos más agudos. Además, por esta razón, las cañas más suaves no pueden emitir las notas altas de forma óptima.

En la siguiente figura se puede observar este efecto. La línea continua muestra la curva de impedancia para una caña blanda, y la discontinua la de una caña dura. En las frecuencias bajas no hay mucha diferencia, pero se observa que los picos de las frecuencias más altas son más bajos en la curva de la caña blanda, lo que se traduce en una afinación más baja de estas notas. Los picos más altos son más difíciles de tocar, de manera que la caña dura los emitirá más fácilmente que la blanda.

Fig. 16.2 Curva de impedancia para el Mi_2 emitido con una caña dura y una blanda (Wolfe, 2002)



A continuación se muestran los espectros del Sol_5 emitidos con una caña blanda y con una dura. Se aprecia como los componentes en el sonido emitido con una caña blanda se debilitan como consecuencia del fenómeno descrito anteriormente.

Fig. 16.3 Espectrograma del $Sol_5(1)$ emitido con una caña dura

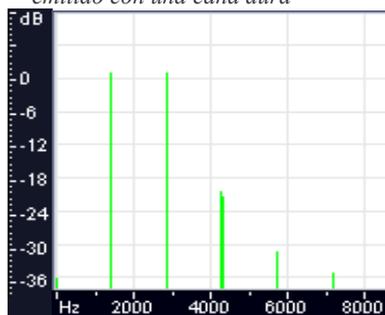
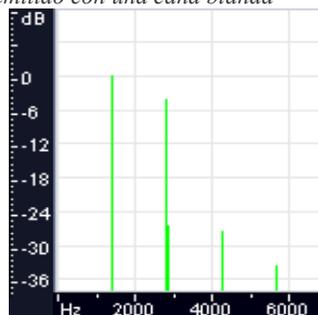


Fig. 16.4 Espectrograma del $Sol_5(1)$ emitido con una caña blanda



Siguiendo con el acústico antes referido, Benade, la influencia total de la elasticidad de la caña sobre las frecuencias naturales de una columna de aire las resume en tres principios muy clarificadores:

1. Las frecuencias de resonancia de una columna de aire cerrada en un extremo por una caña siempre disminuyen por la presencia de la caña, y nunca superan la frecuencia natural a la que vibraría la caña sin el tubo acoplado.

2. Los cambios de la frecuencia natural de la caña -producido por ejemplo por cambios en la forma en la que se presiona la boquilla por el clarinetista- producen pequeños cambios en la columna de aire de los modos cuyas frecuencias están lejos de la frecuencia natural de la caña. Estos cambios son cada vez más significativos para los modos más altos que están más cerca de la frecuencia de la caña.

3. La caña humedecida por los labios del clarinetista sirve entre otras cosas para reducir la magnitud de los cambios descritos en los puntos 1 y 2, aunque musicalmente resulten importantes. (Benade, 1976)

En cuanto al efecto de la caña sobre la calidad del tono, parece claro que su influencia está más que demostrada. Se admite que las resonancias de la caña contribuyen al formante del sonido¹¹⁰. Thompson (1979) pudo observar como un instrumentista experimentado tiende a ajustar la resonancia de la caña a uno de los armónicos de la señal acústica para facilitar la emisión.

También Rossing (1990), de la Universidad del Norte de Illionis, ha realizado medidas experimentales durante el proceso de soplo en un clarinete. De esta forma pudo demostrar que con una amplitud de la caña de aproximadamente 100 μm , la punta de la boquilla vibra cerca de los dientes con una amplitud de 3 μm . Esto se corresponde a 30 db de diferencia. Asimismo se encontró que la frecuencia de la vibración del tubo podría diferir sobre la de la caña. En algunos casos la boquilla vibró en una frecuencia dos veces la de la caña.

Por otra parte, es conocida la capacidad de los clarinetistas para modificar ligeramente las frecuencias y así ajustar la afinación de una determinada nota mediante la reducción o el incremento de la presión efectuada por la boca del instrumentista contra la caña. Es posible con este procedimiento efectuar fluctuaciones de la frecuencia en torno a un cuarto de tono aproximadamente.

Se evidencia, pues, la influencia de la caña en la afinación del instrumento y cómo depende también de la capacidad del clarinetista para modelarla.

16.1.5 El efecto del tracto vocal sobre la afinación

Nos resta analizar un último factor que incide directamente en la afinación del clarinete: las resonancias que se generan en el tracto vocal -la boca- del instrumentista. El tracto vocal no es una cámara con una presión constante, sino que también constituye un resonador. Nederveen describe del siguiente modo este fenómeno:

¹¹⁰ Se entiende como un área en el espectro de frecuencias donde los parciales o armónicos son especialmente fuertes.

“En el modo normal de funcionamiento, las vibraciones de la columna de aire están excitadas por el flujo que le suministra el clarinetista por la boquilla y son controladas por las resonancias que refuerza la forma interna del tubo. Sin embargo, otras resonancias también puede estar implicadas en este proceso, como son las que se generan en el tracto vocal, por la acción de la caña o por la influencia de la pared del tubo. Estas resonancias se pueden acoplar a la excitación o vibraciones de la columna aérea y tener una contribución positiva o negativa. Sus efectos pueden ser inaudibles al oyente, pero el clarinetista sí puede tener cierta percepción sobre ellos. Sus efectos no deberían ser demasiado prominentes para interferir en el funcionamiento normal del instrumento, aunque ciertamente se sumen al carácter del instrumento para singularizarlo” (Nedervenn, 1969).

La vibración de una columna aérea en el clarinete genera principalmente los armónicos impares en el modo fundamental. Sin embargo en el registro alto también están presentes los armónicos pares. Se puede pensar que para apoyar estas resonancias se tenga la ayuda de otras resonancias, aunque sea desempeñando un papel transitorio.

Varios físicos y acústicos han estudiado los efectos de este fenómeno en el comportamiento de la columna aérea. Backus (1985) concluyó que la influencia sobre el tono del instrumento de este fenómeno es insignificante. Coltman (1973), sin embargo, observó que la frecuencia cambia y se incrementan las pérdidas en las flautas debido a las resonancias de la boca. Clinch, Troup y Harris también encontraron influencias de las resonancias del tracto vocal sobre el clarinete y el sonido del saxofón. Hoekje (1986) y después Sommerfeldt y Strong (1988) en su estudio sobre simulación de un sistema de clarinete-clarinetista publicado en la revista de la *Sociedad Americana de Acústica*, han demostrado como una resonancia bucal puede apoyar el movimiento de la caña, a pesar de que no existe apenas diferencia en el espectro de frecuencia del sonido irradiado, con lo cual el oyente no aprecia la diferencia. El clarinetista, sin embargo, puede apreciar esta diferencia cuando está tocando con su instrumento. Johnston, Cinch y Troup (1987) llevaron a cabo un estudio realizando simulaciones de computadora para un clarinete y pudieron comprobar como el tracto vocal puede asumir la función resonadora del instrumento, a condición de que la humectación fuese bastante baja. La frecuencia así se puede bajar de forma considerablemente. Los clarinetistas pueden confirmar esto: por la modificación del labio/boca la frecuencia se puede bajar varios tonos por debajo del tubo. Este fenómeno fue confirmado por Wilson (1996) mediante medidas experimentales.

Más recientemente, Fritz, Wolfe, Kergomard, y Caussé (2003), en una Conferencia celebrada en Estocolmo, presentaron un estudio sobre la interacción del clarinetista y su cavidad bucal en la modificación de las frecuencias. Concluyeron que, efectivamente, la frecuencia que se toca puede ser modificada por cambios en la geometría del tracto vocal.

En cualquier caso, se sabe que un cambio brusco del espectro de la presión de la boca solo produce un cambio sutil del espectro de la boquilla de un instrumento de viento madera, debido a la resistencia media-alta de la apertura de caña. El efecto es probablemente más significativo en el régimen bajo de afinación de los instrumentos de metal, donde la boca y la boquilla tienen casi la misma presión para un ciclo. También es muy importante el papel que puede jugar una resonancia fuerte de la cavidad bucal para crear o estabilizar un régimen de oscilación. El instrumentista tiene en su mando un pico alto de impedancia de aire adicional que puede ser ajustado armónicamente a la afinación del sistema del instrumento. Dado que la vibración labial se controla por la diferencia de

presión entre la boca y la boquilla, una resonancia fuerte sobre el lado de la boca contribuye a la estabilidad del régimen cooperativo de la misma forma que lo hacen las resonancias del instrumento. Para maximizar la diferencia de presión a través de los labios, es desde luego necesario que las fluctuaciones de presión de la boca se hallen 180° desfasadas con respecto a las fluctuaciones de presión de la boquilla (Campbell y Greated, 1987).

Los clarinetistas sabemos que la cavidad bucal juega un papel secundario en la calidad del tono. En realidad, el método óptimo para variar el color del sonido y su afinación consiste en utilizar las resonancias bucales mediante la modificación de la embocadura. Con este procedimiento se puede variar el espectro sonoro de un sonido y por tanto su timbre y afinación. En este sentido, una relajación de las paredes de la cavidad bucal provoca un descenso de la presión que tiende a bajar la frecuencia.

Para finalizar el apartado, podemos decir a modo de corolario que la afinación del clarinete está sometida a diversos factores que derivan de su condición de octaveador a la doceava y de su principio acústico de vibración de las columnas aéreas. En esencia, podemos resumir los factores a considerar en la afinación del clarinete en siete puntos:

1. El efecto modificador que produce en la longitud acústica del tubo el enrejado de orificios tonales abiertos y el fenómeno al que va asociado de la corrección del extremo final.
2. Las condiciones atmosféricas que afectan por igual a todo el sistema.
3. Los problemas de equilibrar la afinación de dieciocho sonidos en un tubo de 67 cm por efectuar el sobresoplado a la doceava en lugar de a la octava como sus homólogos de la orquesta.
4. El efecto modulador de la caña y la embocadura sobre las frecuencias resonantes.
5. La influencia de las alteraciones del tubo y de su material sobre la columna de aire que entra en vibración.
6. La importancia de un óptimo régimen de cooperación entre las frecuencias resonantes.
7. El efecto del tracto vocal sobre las frecuencias.

16.2 METODOS CORRECTORES DE LA AFINACION EN EL CLARINETE

16.2.1 Introducción

Del estudio efectuado en el apartado precedente se infiere que el clarinete actual no puede estar perfectamente afinado en ningún caso. Es posible que en un tiempo razonable los constructores de instrumentos comiencen a aplicar los últimos avances experimentados por diversos acústicos. Pero como todavía debemos manipular los instrumentos actuales, es menester para corregir la afinación del instrumento el concurso ineludible del clarinetista. En este sentido, podemos hablar de dos métodos correctores de la afinación: *métodos exógenos* y *métodos endógenos*. Los primeros consisten en corregir la afinación por el propio ejecutante de manera inmediata, esto es, sobre la marcha. El uso de

digitaciones auxiliares o corregidas, la digitación cruzada y la modificación de la embocadura son constitutivos de este tipo de método. El segundo método hace referencia a la corrección de la afinación de modo implícito, esto es, impuesta por el instrumento¹¹¹ o por las condiciones atmosféricas. Ya habíamos analizado en el apartado anterior que este tipo de afinación viene predeterminada por la construcción del instrumento. En este sentido, puede jugar un papel importante en este tipo de afinación las alteraciones del taladro y la forma de los orificios, así como su espaciado. También el uso de barriletes de distintas dimensiones o la extracción de éste del cuerpo superior, aunque este método no afecta por igual a todos los sonidos y por tanto no es muy efectivo.

16.2.2 Métodos exógenos

En relación con este método cabe hacer las siguientes observaciones. Su uso es preceptivo cuando se quiera corregir la afinación de determinados sonidos que por ser emitidos en tonalidades diferentes del discurso musical o por instrumentos con sistemas de afinación distintos, presenten ligeras discrepancias. La modificación de la embocadura es un procedimiento de este tipo que puede ser efectiva cuando la frecuencia del sonido se quiera alterar sobre la marcha. La regulación de la presión de emboque también puede proporcionarnos el paso por todos los microtonos frecuenciales de un sonido. Un incremento de esta presión ejercida sobre la caña o lengüeta acorta la longitud vibrante de ésta e incrementa, por consiguiente, su frecuencia vibratoria que comunica por simpatía a la columna gaseosa elevando la afinación del sonido. Por el contrario, una disminución de esa presión puede producir el efecto contrario que se ha descrito. El resultado puede ser válido en determinados casos puntuales, pero, por otra parte, su ajuste perfecto suele ser más impreciso que el otro método, pues depende en gran medida de la capacidad técnica y auditiva para este menester del ejecutante.

Por su parte, si queremos alterar la frecuencia de un sonido determinado por exigencias musicales podemos recurrir a las siguientes opciones: destapar un orificio dispuesto en una zona intermedia o por debajo de la columna vibrante para incrementarla, o bien, obturar un agujero situado por debajo de la columna, si queremos disminuirla.

El primer supuesto, preceptivo en casi todos los sonidos del registro sobreagudo por las causas ya analizadas con anterioridad -la corrección del extremo final-, y de forma puntual en determinados sonidos, permite acortar artificialmente la columna vibrante, y consecuentemente elevar su frecuencia vibratoria, al permitir la salida al aire envolvente de algunas pulsaciones. En los sonidos del registro sobreagudo la llave 4 desarrolla formidablemente esta función incrementando la frecuencia en torno a un cuarto de tono. Su activación posibilita el fenómeno antes descrito, elevando, por consiguiente, la afinación. No produce el mismo efecto cualquier llave activada, sea del registro que fuere, dado que la zona de influencia del enrejado de orificios tonales es mayor en los sonidos agudos que en los graves donde las ondas se reflejan en el primer orificio abierto. Dependerá, por tanto, del grado de influencia de esa región respecto del orificio activado.

En cuanto al segundo supuesto -obturar un agujero situado por debajo de la columna-, consiste éste en prolongar artificialmente la columna vibrante, para disminuir su frecuencia vibratoria y, por consiguiente, la afinación. Con este procedimiento la frecuencia

¹¹¹ Para ello se debe aplicar las innovaciones.

se puede descender hasta un semitono proporcionando una alternativa cromática, o bien, los espacios microtonales comprendidos en este intervalo. Efectivamente, cuando se toca un sonido con este procedimiento la regularidad del enrejado de orificios tonales abiertos¹¹² queda interrumpida al cerrar uno o más orificios por debajo del tubo. El orificio tonal abierto conecta el tubo con el exterior, cuya presión acústica es aproximadamente cero. Sin embargo, esta conexión no es exactamente un *cortocircuito* dado que el aire en y cerca de ese agujero tiene una masa que debe moverse. Así que la presión dentro del tubo bajo un agujero de tono no está en el cero de la presión acústica, y la onda estacionaria, por tanto, se extiende un poco más allá del primer agujero tonal abierto. Cerrando un agujero del tubo más abajo, incluso se prolonga más allá, lo cual provoca que la frecuencia resonante baje y se obtenga el tono que se persigue. Este procedimiento se conoce con el nombre de *digitación cruzada o de horquilla* (Figs. 16.5, 16.6, 16.7 y 16.8) y es muy utilizado por los músicos, bien para ajustar la afinación de un determinado sonido aportándole al mismo tiempo resonancia, bien para obtener la frecuencia de una determinada nota.

El efecto de la digitación cruzada depende de la frecuencia. La extensión de la onda estacionaria aumenta proporcionalmente con la frecuencia más allá del agujero abierto, en especial para los agujeros pequeños, porque requiere más energía en frecuencias altas para mover el aire en el agujero tonal. Este fenómeno tiene, empero, el efecto de aumentar la longitud eficaz del tubo con la frecuencia creciente. Como resultado, las resonancias de las frecuencias más altas tienden a ser más bajas que las proporciones armónicas estrictas. Por este motivo, no es posible utilizar las mismas digitaciones de horquilla en dos registros diferentes en determinados sonidos. Huelga decir que el método analizado requiere un conocimiento previo de todas las digitaciones posibles que permite cada sonido¹¹³. Conociendo las frecuencias que produce cada una de estas digitaciones, podremos hacer uso *ad hoc* de ellas según las necesidades que se planteen en la interpretación. El ajuste es más preciso, en este tipo de método, pues las posibilidades de digitación son vastas y permiten un generoso margen de operatividad frecuencial, en especial en los sonidos más precarios del tramo quintante, por la corta longitud de tubo operativo, y del registro sobreagudo.

Fig. 16.5 Digitación normal (Do_3)Fig. 16.6 Digitación cruzada (Si_2)Fig. 16.7 Digitación normal (Mi_5)Fig. 16.8 Digitación cruzada (Mib_5)

¹¹² Se analiza este asunto con detenimiento en el apartado 14.2.

¹¹³ Véase el apartado 10.1.

Se observa en las figuras representadas que así como en los sonidos más graves la digitación cruzada para bajar un semitono solo es posible destapando un orificio intermedio, en los agudos es posible destapando dos o más debido a que la onda en estos sonidos viaja más allá del primer orificio destapado.

Por tanto, este método resulta menos efectivo en los sonidos del registro grave. Recuérdese que la onda de estos sonidos se refleja en el primer orificio tonal abierto, con lo cual la región de influencia del enrejado de orificios tonales -que es la que permite practicar la digitación cruzada- queda reducida al mínimo.

Obviamente, la disposición del orificio obturado en relación con el último del tubo operativo determinará esta frecuencia, esto es, cuanto menor sea la distancia comprendida entre el último orificio obturado y el que se pretende obturar para disminuir la frecuencia, mayor será la frecuencia correctora, y viceversa, a mayor distancia, menor frecuencia correctora. Es decir, se trata de afectar, con el orificio obturado, la presión y densidad del tubo en cuyo radio de acción se halle el enrejado de orificios abiertos. En la medida en que esa incidencia sea mayor, la corrección también lo será, y viceversa. En este sentido, este método puede dejar de ser efectivo si el orificio que se obtura no se encuentra en el radio de acción del enrejado de orificios tonales abiertos de la columna y, por ende, su función acústica resulta estéril. Este método también es utilizado frecuentemente por los clarinetistas en determinados pasajes cuya dificultad técnica es insuperable.

Su uso está indicado ordinariamente en los sonidos del tramo quintante, cuyas frecuencias generalmente se sitúa por encima de los valores normales. También en determinados sonidos de los registros grave y agudo y en cualquier sonido que cuya frecuencia se quiera bajar. Obviamente, su aplicación será más efectiva cuanto menor sea la longitud de tubo operativo y, por tanto, mayor el margen de operatividad para alterar la columna aérea.

En cuanto a las notas del tramo quintante, no hay que olvidar que estos sonidos se producen con una menor densidad y presión del aire contenido en el tubo por la reducida longitud acústica del mismo, con lo cual la frecuencia en estas condiciones aumenta. Además, la contracción de la boquilla para ajustar los sonidos del extremo superior del registro agudo sube ligeramente las frecuencias de estos sonidos. De ahí que para corregir la afinación de estos sonidos se obturen determinados orificios por debajo del último destapado para que la presión y densidad del aire que queda por debajo de la columna aérea aumente, con lo cual se incrementa la diferencia de presión y densidad de medios cuya ecuilibración precisará un mayor margen espacial, con la subsiguiente prolongación del apéndice de la columna y, por ende, del descenso de la frecuencia vibratoria.

Este fenómeno se acentúa en el registro sobreagudo debido a la presión que necesitan los sonidos de este registro para su emisión. No olvidemos que se utilizan quintos, séptimos, novenos y undécimos armónicos, cada uno de los cuales precisa una nueva subdivisión en la columna aérea. La diferencia de medios, pues, se incrementa sensiblemente y se precisa un mayor espacio para su ecuilibración, lo que provoca la prolongación de la columna vibrante. Así, la aceleración que se requiere para mover la mayor cantidad de masa aérea que requieren estos sonidos aumenta con el cuadrado de la frecuencia. Si a esto añadimos la afinación real de cada uno de ellos en la serie armónica¹¹⁴,

¹¹⁴ Véase el apartado 7.2.

se entiende el motivo de la deficiente afinación de los sonidos de este registro y la necesidad ineluctable de corregirla con los métodos al uso.

El problema deriva de su condición de octaveador a la doceava en lugar de la octava. El constructor debe balancear la afinación del clarinete en un tubo de 67 cm que debe producir los sonidos comprendidos en una doceava. En tal caso, llegados a la parte alta del tubo el diámetro de los orificios y la longitud acústica del mismo se han reducido de tal forma que la afinación se resiente indefectiblemente dado que la frecuencia de la columna vibrante no se puede precisar de forma óptima en estas condiciones. Este problema ya lo advirtió T. Boehm en su manual ya referenciado antes, donde además aporta los factores que determinan la altura del sonido:

“Las notas más agudas de la primera octava se obtienen acortando la longitud de la columna de aire, para lo que se han perforado agujeros en el tubo. Estos agujeros deberían ser lo más grandes posibles, puesto que el acortamiento real del tubo es proporcional al radio del tamaño del orificio al diámetro del calibre del tubo.”

“La afinación correcta de una nota depende, consecuentemente, no solo de la distancia del agujero al lugar de producción de la columna de aire, sino también del tamaño de éste y, por supuesto, el lugar exacto donde ha de ser colocado el orificio debe ser determinado por cálculos precisos.” (Boehm, 1991)

Por consiguiente, el diámetro de los orificios deberá guardar una proporcionalidad con la longitud acústica del tubo. En el caso del clarinete, dos son los aspectos a considerar en este asunto. Por una parte se debe dividir la longitud acústica del tubo en diecinueve orificios correspondientes a los diecinueve semitonos que comprende la doceava. En segundo lugar, el diámetro de estos orificios debe calcularse en esta longitud acústica, teniendo en cuenta que no debe superar el diámetro de la yema de los dedos que deben obturarlos. Así, el problema se presenta porque la longitud acústica del tubo no permite practicar tantos orificios con un mayor diámetro, de tal suerte que llegados a la parte alta del tubo los orificios deben concentrarse en distancias cortas con diámetros reducidos y ubicándolos, en algunos casos, en los lados del tubo. Si a esto añadimos el problema de la corrección del extremo final, se entiende la dificultad que entraña precisar la frecuencia.

La solución a este problema pasa por ampliar ligeramente el diámetro de estos orificios y ubicarlos un poco más abajo del tubo para que la compensación se produzca mejor y, por tanto, la frecuencia sea más precisa. Pero esto lógicamente no es posible dado que el tubo no permite más perforaciones. En el caso del Sib₃ su orificio presenta un diámetro extremadamente pequeño para lo que debería ser un orificio tonal cromático. Además tiene la función acústica de ser el orificio portavoz. El mismo problema presenta el La₃. Estos orificios deberían estar dispuestos donde se encuentra la llave 10b, utilizada para pasajes rápidos y notas de adorno. Pero en tal caso las dificultades de digitación se amplificarían y, consecuentemente, las posibilidades técnicas se reducirían. De nuevo subyace aquí el problema de ponderar la afinación con las posibilidades técnicas del instrumento y su timbre.

Otra solución sería reducir el diámetro de los orificios para que disminuyese la frecuencia de estos sonidos, o bien reducir su espaciado. La primera posibilidad, empero, debe descartarse —a no ser que se reduzca proporcionalmente el calibre del tubo, lo que modificaría sensiblemente el timbre del instrumento— dado que los orificios tonales o semitonales deben guardar unas medidas mínimas en sus diámetros para poder tener ciertas

garantías acústicas. En tal caso, una reducción excesiva del diámetro provocaría un timbre desigual y deslucido, fenómeno que ya acontece en cierta medida en los sonidos referidos. Por otra parte, se ha comprobado que un orificio pequeño actúa en ocasiones como si estuviese cerrado¹¹⁵. Veamos lo que arguye a este respecto Boehm:

“Si los agujeros son pequeños y se trasladan considerablemente desde sus lugares cercanos, la formación de los nudos de vibración se turba y se vuelve incierta; el sonido se produce con dificultad y a menudo se rompe en otras notas correspondientes a las parte alicuotas de la columna de aire¹¹⁶.”

“Los agujeros más pequeños son los que más distorsionan las ondas sonoras, dando como resultado un sonido débil y de poca calida.” (Boehm, 1991)

La segunda opción -reducir el espaciado de los orificios tonales- soluciona el problema en las duodécimas, pero desajusta la afinación de los sonidos del registro grave.

Por último, se podría practicar una alteración en esa zona del tubo pero dado que la perturbación no afecta por igual a todos los modos, el régimen de cooperación entre ellos se vería afectado.

No cabe, por tanto, esta opción, y de nuevo nos vemos abocados al problema de las discrepancias en la afinación que deben ser corregidas por el ejecutante.

También R. Donington toma conciencia de este problema y lo apunta del siguiente modo:

“No es indiferente el diámetro de los orificios que se perforan sobre un tubo sonoro; para una misma longitud acústica, un orificio de diámetro grande producirá un sonido de frecuencia algo mayor que uno de diámetro más pequeño. Este hecho se utiliza para corregir la entonación de instrumentos defectuosos y para facilitar en algunos casos su digitación” (Donington, 1986)

Luego, de acuerdo con este aserto un orificio pequeño produce un sonido más bajo que uno grande, siempre con la misma longitud acústica, por los motivos sobradamente analizados en el curso de este apartado.

En mi opinión, la solución pasa por diseñar un segundo orificio de registro o modificar toda la disposición de los orificios y su diámetro, lo que supondría, previsiblemente, modificar las dimensiones del clarinete actual.

En cualquier caso, es posible sacar las curvas de impedancia por separado para cada modo que muestran el efecto que tiene sobre la frecuencia los cambios en el diámetro del tubo y de los orificios en cualquier punto a lo largo del tubo resonador. Estos gráficos son fundamentales en la fase de diseño y en la regulación final de un instrumento.

¹¹⁵ Este fenómeno acontece frecuentemente cuando se tocan dos sonidos del registro agudo ligados y el más agudo no llega a emitirse –suele suceder con el orificio que activa la llave 6–.

¹¹⁶ Este fenómeno es el que sucede cuando salta un armónico superior en los sonidos fundamentales La₃ o La#₃ a modo de pitido estridente.

16.2.3 Métodos endógenos

Por su parte el método endógeno permite la corrección global de la afinación impuesta o predeterminada por la construcción del instrumento o por las condiciones atmosféricas. Este método es efectivo en los casos en los que la afinación implícita del clarinete difiera con la de los instrumentos con los que se halle tocando, bien porque la velocidad de propagación de la onda se incremente, por un ascenso o descenso de la temperatura, produciendo así un aumento o descenso de la frecuencia vibratoria de la columna aérea, bien porque la afinación impuesta por el fabricante no coincida con la de aquéllos.

En el primer supuesto enunciado, dado que la influencia de la temperatura en las columnas aéreas vibrantes es mayor que en las cuerdas vibrantes, este método se usa invariablemente cuando se toca con un instrumento de teclado o de cuerda. La corrección en estos casos pasa por prolongar la longitud del tubo y, por consiguiente, de la columna aérea vibrante, haciendo descender la afinación implícita del instrumento. El procedimiento consiste en extraer parcialmente alguna pieza del instrumento, generalmente el barrilete, para prolongar artificialmente el tubo, o bien, mediante el uso de unos aros correctores. Aunque es más efectivo utilizar barriletes de diferentes longitudes¹¹⁷ por los problemas que comporta las alteraciones en los sonidos de esa zona del tubo¹¹⁸.

En el caso en el que la afinación se quiera subir -supuesto más infrecuente por las razones analizadas en el apartado anterior-, se suele realizar un período de precalentamiento del instrumento para elevar ligeramente la temperatura del mismo y elevar así su afinación. Lógicamente, es más fácil y preciso bajar la afinación en este tipo de método que subirla. Pensemos que, en el supuesto de hallarnos tocando con uno o varios instrumentos cuya afinación se sitúe por encima de la de nuestro instrumento, solo podemos intentar subirla mediante este procedimiento. En caso negativo, la solución pasa por bajar la afinación de los otros instrumentos, si es que es posible.

En relación con el segundo supuesto, es más frecuente que el clarinete se quede alto cuando se toca con un instrumento de teclado o de cuerda, pensemos que aquél suele estar afinado a 442 Hz mientras que éstos lo están, generalmente, a 440 Hz¹¹⁹. Además, se debe considerar siempre que los factores ambientales suelen afectar más a la frecuencia vibratoria de las columnas aéreas que a la de las cuerdas y, por tanto, en las mismas condiciones atmosféricas la afinación del clarinete en relación con la de estos instrumentos puede sufrir alteraciones más ostensibles.

No obstante, para solucionar los problemas derivados de esta situación y teniendo en cuenta las discrepancias de afinación que presenta el clarinete, en la actualidad se fabrican modelos afinados a 440 y 442 Hz. El uso de los primeros suele estar indicado para los casos de ejecución con orquesta, considerando que los instrumentos componentes deben estar afinados de acuerdo con un patrón universal. Los segundos, por su parte, se utilizan para la interpretación de cámara, bien sea con instrumentos diferentes, bien con instrumentos de su misma familia, en cuyo caso solo cabe ajustes puntuales. En estos casos, dados los escasos miembros implicados en la ejecución, es más fácil el ajuste, en especial,

¹¹⁷ En la actualidad se construyen de 65, 66 y 67 mm.

¹¹⁸ Véase el análisis a propósito de esta cuestión en el apartado 14.5.

¹¹⁹ Recuérdese que, generalmente, los instrumentos se afinan según la frecuencia patrón establecida en 440 Hz y los modelos de clarinetes más utilizados suelen estar afinados a 442 Hz.

si se tiene que bajar la afinación. Pensemos, además, que en el caso de tocar con instrumentos de viento, todos se verán influidos por igual por las condiciones atmosféricas y, por consiguiente, la afinación global del conjunto no sufrirá discrepancias.

Por las características acústicas que presenta el clarinete, su afinación nunca será precisa y deberá ser objeto de continuos ajustes mediante los métodos correctores analizados. Aún dándose las mismas condiciones, dos clarinetes iguales, con la misma boquilla y caña, nunca darán los mismos valores frecuenciales en todos sus sonidos y esto es así porque entra en juego un factor decisivo y que no hay que olvidar: el intérprete, su temperamento y su morfología física. No estamos ante sonidos generados mediante mecanismos electrónicos, sino ante sonidos creados merced a la asociación del instrumento y el instrumentista. Es por esto que la aportación del instrumentista en este menester es un factor decisivo y primordial en los instrumentos de entonación variable y libre -especialmente en el clarinete-. En este sentido, podemos concluir diciendo que una afinación óptima en el clarinete se conseguirá conjugando una serie de factores fundamentales de orden práctico y teórico, a saber: un oído bien educado, una embocadura flexible, un prolijo mapa de digitaciones, un hondo conocimiento del funcionamiento acústico del instrumento y de sus problemas de afinación, así como de sus posibilidades sonoras y de los sistemas de afinación que rigen en las familias orquestales, y, finalmente, un instrumento bien construido. En cualquier caso, el estudio experimental del trabajo desvela algunos de los interrogantes relacionados con este tema -y que tanto preocupan a los intérpretes- y aporta soluciones prácticas¹²⁰.

¹²⁰ Véase apartado referente al análisis y discusión de las frecuencias experimentales obtenidas.

EL TIMBRE Y LA CALIDAD TONAL DEL CLARINETE



Concierto para Clarinete y Orquesta. Shaw (1910-2004)

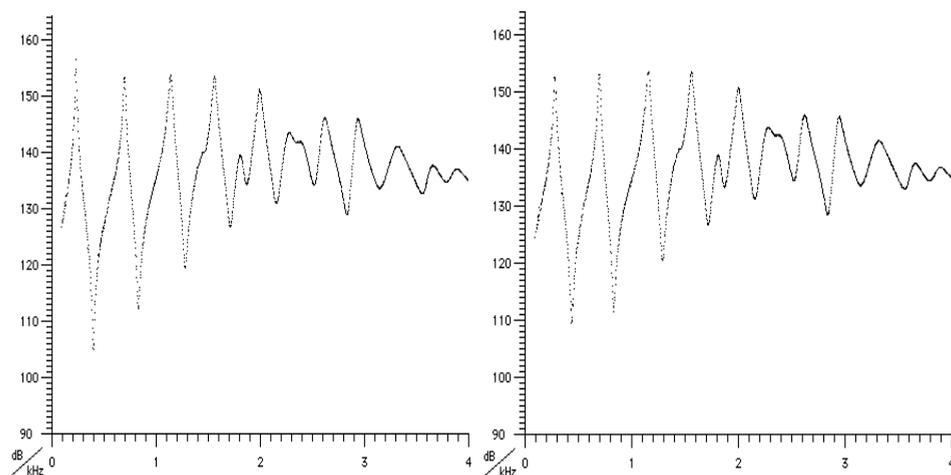
17.1 INTRODUCCION Y CONSIDERACIONES

En el clarinete las vibraciones de caña son controladas por las resonancias del tubo y estas, a su vez, determinan la afinación y la composición espectral del sonido. La respuesta del tubo a las distintas frecuencias de excitación puede ser cuantificada midiendo la impedancia del aire del instrumento en el final de la boquilla. Ya vimos en el apartado 6.3 que la impedancia acústica es igual a la fluctuación de presión dividida por la velocidad del volumen de fluido. Para una onda progresiva que se propaga hacia la parte baja de un largo tubo esta cantidad es independiente de la posición a lo largo del tubo y de la frecuencia. Sin embargo, en el caso del clarinete, el modelo de onda estacionaria está formado por ciertas frecuencias resonantes. Las resonancias en el final de la boquilla están caracterizadas por fluctuaciones de presión grandes y velocidades muy pequeñas de las partículas. La impedancia de aire entonces será muy grande, de forma que si se traza la curva de impedancia, las resonancias resaltarán como una serie de picos agudos.

En la fig. 17.1 se muestra la curva de impedancia para la nota Do_3 del clarinete. Dos rasgos destacan de su observación: solo figuran los picos que se corresponden con los impares; a partir de 2000 Hz los picos se aplanan. Estos dos rasgos pueden ser explicados por la presencia de una longitud de tubo por debajo del primer agujero abierto. Esto quiere decir que los parciales superiores serán emitidos con una frecuencia ligeramente inferior a los valores teóricos dado que los orificios tonales abiertos actuarán como un filtro de paso alto para las ondas sonoras. Así, las ondas de frecuencia alta pueden viajar debajo de esta

sección del tubo, pero las de frecuencia baja no pueden ya que su energía se filtra por los agujeros a la atmósfera circundante. El resultado de esto es que estas ondas son fuertemente reflejadas en el primer agujero abierto y producen ondas estacionarias de amplitud significativa. Esta frecuencia baja, sin embargo, se amplía más y más lejos del agujero abierto conforme aumenta la frecuencia, con lo cual la longitud de onda de los parciales más altos es cada vez más y más larga y la frecuencia, consecuentemente, baja.

Fig. 17.1 Curva de impedancia del Do_3 (Wolfe, 2002) Fig. 17.2 Curva de impedancia del Sol_4 (Wolfe, 2002)



La frecuencia en la cual se produce una atenuación del modo más alto de las ondas estacionarias se conoce como la frecuencia de corte¹²¹.

Si accionamos ahora la llave portavoz con la misma digitación, obtendremos el Sol_4 , una duodécima más alta. La curva de impedancia ahora es similar a la del Do_3 , excepto que el pico de la fundamental se sube un tono y medio aproximadamente y se debilita, como se observa en la fig. 17.2. Dado que los componentes más bajos no siguen ahora la serie armónica, el diapasón salta una duodécima por encima.

Cuando el clarinete emite una nota sostenida de afinación constante, el tubo está excitado por la caña en un gran número de frecuencias simultáneamente que forman una serie armónica dado que la forma de onda compleja es periódica. La cantidad de amplificación dada a cualquier armónico por la resonancia del tubo está determinada por la altura de la curva de impedancia para esa frecuencia. Así, si la frecuencia de un pico de impedancia determinado coincide con un múltiplo entero del fundamental este armónico será reforzado fuertemente dentro del tubo y su emisión se llevará a cabo de forma óptima. Así, si observamos la curva de impedancia de cualquier sonido del registro grave (Fig. 17.1), están presentes muchos armónicos, predominantemente impares, debido a la condición del final cerrado en la boquilla. En los registros superiores sólo aparecen unos

¹²¹ Véase el apartado 14.3.

pocos armónicos, pero los pares son ahora más significativos dado que las resonancias del tubo se desvían cada vez más lejos de los múltiplos enteros de las fundamentales.

Aunque el espectro del sonido medido dentro del instrumento -con un micrófono sonda- muestre una atenuación fuerte por encima de la frecuencia de corte, el sonido que se irradia fuera del tubo no se comporta igual debido a que estas frecuencias más altas son irradiadas de forma más eficiente. Sin embargo, se ha demostrado que los instrumentos con frecuencias de corte altas presentan un timbre más brillante -por lo menos así lo consideran los músicos-, mientras que los de frecuencias de corte bajas tienden a oscurecer el timbre (Benade, 1976). En efecto, un clarinete con una frecuencia de corte alta presentará más componentes armónicos y, por tanto, su timbre se abrillantarán, al contrario que sucede cuando esta frecuencia es baja.

Benade midió las frecuencias de corte de varios clarinetes de sistemas diferentes y pudo constatar que las ligeras diferencias tímbricas entre estos instrumentos se deben a que presentan variaciones en sus frecuencias de corte. Efectivamente, el sistema alemán presentaba una frecuencia de corte más baja en relación con el sistema francés, lo que explicaría su timbre más oscuro.

Dado que la frecuencia de corte puede ser levantada aumentando el diámetro de los orificios, los clarinetes con unos orificios ladeados de mayor diámetro tienen un timbre más brillante que los que tiene estos orificios más pequeños. El sonido irradiado es en realidad de sólo un uno por ciento de la energía sonora total dentro del instrumento. La mayor parte del sonido es irradiado por el primer agujero abierto, mientras que el resto atraviesa el segundo agujero (Campbell y Greated, 1987).

Las fuerzas relativas de los armónicos dependen no sólo de su curva de impedancia, sino también del nivel dinámico con el cual se está tocando el instrumento. Para los tonos emitidos en *piano* (Figs. 17.3 y 17.5) la presión en la boquilla es muy pequeña y los armónicos más altos no hacen acto de presencia. Pero cuando se incrementa el volumen (Figs. 17.4 y 17.6) y, por tanto, la presión, los armónicos superiores crecen más rápidamente que el fundamental, y el timbre se torna más rico.

Fig. 17.3 Espectrograma del Mi_2 emitido en dinámica de piano



Fig. 17.4 Espectrograma del Mi_2 emitido en dinámica de forte

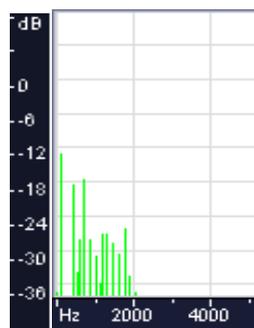
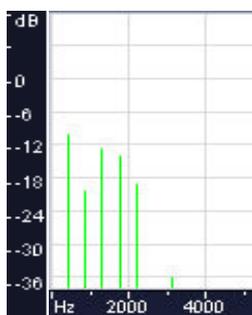


Fig. 17.5 Espectrograma del Si_3 emitido en dinámica de piano



Fig. 17.6 Espectrograma del Si_3 emitido en dinámica de forte



17.2 DESCRIPCIÓN Y ANALISIS

"La redondez y la claridad del registro superior, la cavidad misteriosa del registro medio y el oscuro y moderado registro chalumeau".

De esta forma tan acertada definía Brahms el timbre del clarinete. En mi opinión, la sensación que sugiere el timbre del clarinete bien puede asemejarse a una voz humana con cierta afonía. Esta sensación de oquedad, de algo que falta acústicamente, es consecuencia de la ausencia parcial de los armónicos pares, inducida por su funcionamiento acústico. Empero, lejos de resultar una deficiencia acústica, constituye la particular excelencia del instrumento.

El timbre lo definíamos como el color de una determinada sustancia sonora. Su percepción subjetiva nos permite asociarlo a su origen e identificarlo con un emisor o instrumento determinado. En principio, el timbre de una señal sonora viene determinado, de acuerdo con el Teorema de Fourier, por su grado de complejidad, esto es, según el número e intensidad de cada uno de sus movimientos armónicos constitutivos¹²². Ahora bien, este grado de complejidad lo determina, en el caso que nos ocupa, varios factores que cabe analizar detenidamente. En primer lugar, dado que el principio acústico que nos interesa consiste en la vibración de la columna gaseosa del tubo, se debe considerar su modo de excitación. En los instrumentos de viento madera es la forma de la embocadura y del tubo lo que determina principalmente el timbre del instrumento. Una embocadura directa, como en el caso de la flauta, donde la presión insuflada apenas sufre resistencia y la perturbación de su columna aérea se produce de forma más simple y precisa por el denominado tono de corte, produce sonidos con escasos componentes armónicos, de ahí que su timbre sea suave y dulce en el registro grave, y brillante y puro en los sucesivos. Las embocaduras de lengüeta, por su parte, son una fuente rica de armónicos por su modo de excitación. El

¹²² Un espectro acústico reducido con componentes impares prevalentes se asocia a un sonido con timbre oscuro, mientras que si el espectro es prolífico con componentes de ambos órdenes, el sonido resultante arroja un timbre rico y brillante.

procedimiento para obtener los sonidos en este tipo de embocaduras consiste en la perturbación compleja que sufre la columna gaseosa por la acción periódica vibratoria de la lengüeta. En este caso, debido a la alta impedancia en la boquilla, se generan varios movimientos armónicos cuyo número depende de la altura del sonido. Los sonidos más graves contienen más componentes armónicos por su mayor longitud de tubo y porque las ondas se reflejan de forma más óptima que en los sonidos agudos -en los cuales se irradia más el sonido y se refleja menos-, con lo cual las resonancias se refuerzan más. A medida que se reduce esta longitud y se incrementa la frecuencia, también lo hacen los componentes. Se puede decir, por consiguiente, que la longitud de tubo y la frecuencia es directamente proporcional al número de componentes armónicos.

El siguiente factor a considerar es la forma interna del tubo donde se aloja la columna gaseosa. Aunque esta cuestión ya ha sido tratada en el apartado 9.1, el funcionamiento acústico del tubo de un instrumento de viento madera depende de la acción conjunta de su generador -embocadura- y su resonador -el tubo-. Una embocadura de lengüeta, simple o doble, asociada a un tubo de sección cónica y/o cilíndrica registra una ingente producción de movimientos armónicos. La pregunta que habría que plantearse en este sentido sería, ¿qué tubos son los más prolíficos en este menester? Pues bien, la diferencia entre ambos tubos estriba en la función acústica que desarrollan cada uno de ellos con este tipo de embocaduras. Mientras los cónicos funcionan como abiertos y, por consiguiente, pueden producir todos los armónicos de la serie -pares e impares-, los cilíndricos lo hacen como cerrados produciendo, de acuerdo con una de las leyes enunciadas por Bernoulli, solo los armónicos impares. Atendiendo a este planteamiento es fácilmente deducible que los primeros, como el caso del oboe o el saxofón, sean más prolíficos en este menester que los segundos, en los que incluimos el clarinete. Ahora bien, esto debe ser matizado pues no se manifiesta uniformemente en los instrumentos musicales. Efectivamente, esta cualidad acústica solo se puede aplicar tal cual a los tubos sonoros perfectamente diseñados¹²³, desprovistos de cualquier elemento que pueda modificar su actividad acústica. No sucede esto con los tubos de los instrumentos de viento madera. Analizando el tubo del clarinete observamos que en la cara externa se dispone todo el mecanismo técnico con sus elementos constitutivos, a saber: llaves, orificios, muelles, pivotes, etc. Asimismo, en su interior aloja alguna que otra protuberancia, además de la cara interna de los orificios. Además, se observa una sección cilíndrica *sui generis*, pues en ciertas zonas se rompe a favor de una ligera conicidad. Todo ello, además, aderezado con la especial acción de su lengüeta. La consecuencia, pues, es su producción de armónicos impares por su funcionamiento de tubo cerrado, pero también por las causas aducidas, de algún que otro armónico de orden par, por lo general, de baja o inapreciable intensidad.

Por tanto, la influencia en el espectro acústico y, por ende, en el timbre, de estos elementos es cuanto menos, ostensible. En este sentido, se aprecian en los espectrogramas de las fundamentales que figuran en la parte experimental del estudio, la presencia no siempre débil de los armónicos 4, 6 y 8, en especial el 6 y el 8. A partir del 8, se observan también, en algunos casos, el 10, 12 y 14. Concluimos, según este argumento, que si bien atendiendo a la teoría el oboe debería producir más armónicos que el clarinete por el funcionamiento de su tubo, la realidad es que ambos instrumentos están a la par en este menester, puesto que el oboe o el saxofón no siempre producen todos los pares como en

¹²³ Los tubos de los órganos son un buen ejemplo.

realidad debería acontecer. Sus morfologías, amén del funcionamiento acústico de su tubo así lo motivan.

No debemos olvidar, por otra parte, en que medida afecta al timbre la campana o pabellón del instrumento -véase apartado 14.1-. Su forma abocinada ayuda a irradiar las frecuencias más altas en detrimento de las más bajas. Este efecto es debido a que la campana es mucho más pequeña en relación con las longitudes de onda de las frecuencia bajas y, por consiguiente, no es muy eficaz en irradiar estas ondas. Se puede decir que actúa como una frecuencia de corte al igual que los orificios tonales. De hecho si se comparan los espectros de los primeros sonidos fundamentales con y sin la adición de esta pieza, se comprobará que, en contra de lo que se piensa, la intensidad de ciertos componentes se refuerzan cuando no se utiliza la campana porque las ondas se reflejan más óptimamente¹²⁴.

Nos resta analizar un nuevo factor cuya influencia en el resultado tímbrico no pasa desapercibida. Nos referimos a las distintas fases que experimenta un sonido en su proceso vital. Exceptuando el sonido generado electrónicamente en un laboratorio, ningún sonido se inicia con un régimen estacionario, esto es, no comienza ni termina bruscamente, sino que en su proceso vital experimenta tres fases: *ataque, estacionaria, caída*.

En la fase inicial de ataque el sonido pasa de un estado de reposo al estado de máximo régimen. Esta fase suele incluir ruidos mecánicos derivados de la acción de embocar e insuflar que se le imprime al instrumento. El ruido es una vibración irregular, sin embargo este elemento también interviene en el proceso sonoro y su concurso deviene en algo necesario para el reconocimiento de un timbre determinado. Se dice, en este sentido, que el timbre resultante de estos ruidos es transitorio y de duración variable, pero el papel que desempeñan en las sensaciones auditivas es fundamental. La identificación del timbre de un instrumento cuando se suprime el ataque inicial se torna difícil. Robert Donington, en su magnífico estudio sobre los instrumentos, ilustra esta cuestión en los términos siguientes:

“Si se corta el comienzo de una nota grabada en una cinta y se reproduce más tarde privada de este modo su ataque inicial, la dificultad de reconocer el instrumento que está sonando puede ser muy considerable. En estas condiciones, un oboe ha sido confundido con un clarinete, un violonchelo con un fagot, una trompa con una flauta y otras confusiones de este estilo, tan extrañas en apariencia”. (Donington, 1986)

Tras esta fase inicial, el ruido disminuye y, si se transmite la energía necesaria y el sonido es suficientemente largo, se consigue un régimen estable y permanente que permanece inalterable en tanto en cuanto se mantengan las condiciones que lo originaron. En estos momentos es donde se verifican en toda su intensidad sus componentes armónicos que constituyen la *banda de resonancia natural* o el denominado *formante del sonido*.

Finalmente, se produce el proceso de extinción sonora que definimos como caída. Este declive del sonido comienza tan pronto como cese la energía generadora. Puede suceder tras el momento en el que el sonido ha alcanzado su régimen máximo, o bien, de persistir la energía necesaria, hasta que ésta se extinga.

No hay que olvidar, por otra parte, en la percepción tímbrica el papel secundario que juega un cierto ruido marginal producido por los dedos o juegos de llaves. Su

¹²⁴ Véase los espectros del apartado 14.6.

influencia en este proceso es nimia, pero sí puede coadyuvar de una forma subliminal a reconocer un determinado timbre instrumental.

La reflexión hecha en los párrafos precedentes nos sirve para explicar o argumentar las diferencias de timbre que se dan entre los instrumentos musicales de nuestra familia orquestal y que constituyen una de las riquezas sonoras de la orquesta.

Si atendemos por tanto a su espectro acústico, el timbre del clarinete se muestra un tanto heterogéneo analizado en su conjunto. En efecto, cada uno de sus registros se conforma con sonidos de naturaleza diversa lo cual posibilita un timbre con ligeras divergencias que, sin embargo, pueden corregirse parcialmente con el uso de digitaciones auxiliares.

El peculiar timbre del clarinete, en cada uno de sus registros, es capaz de expresar los sentimientos más profundos: ternura, pasión, alegría, tristeza... Berlioz refiere las cualidades de este singular timbre en su Tratado de Instrumentación de una forma metafórica, además de apuntar ciertas recomendaciones de uso:

“El sonido del clarinete (cuando está emitido por un hábil profesor) lleno de gracia y armonía es émulo de la voz, la belleza, se hermana con todos los instrumentos de aire, y á todos los hermosea.”

“... el registro alto era el mejor usado en el fortissimo de la orquesta; el registro medio el más conveniente para melodías cantabile y arpeggios, mientras el registro bajo podía expresar mejor el frío y efectos amenazantes.” (Berlioz, 1844)

El registro grave o chalumeau, a cargo de las fundamentales desde el Mi_2 hasta el Mi_3 , es el más rico tímbricamente hablando, dado que sus sonidos presentan un contenido espectral generoso (Fig. 17.7), en especial desde el Mi_2 hasta el Sol_3 ¹²⁵. Varias han sido y son las definiciones, un tanto idealizadas, que se dan al timbre de este registro denominado también *chalumeau*: hueco, mordente, dramático, aterciopelado, misterioso, etc. Dado que la percepción del timbre acontece de modo subjetivo, cada uno de nosotros puede definirlo como le dicte su sentido auditivo. En cualquier caso, la prominencia de componentes impares y la casi ausencia de los pares, debido a su funcionamiento de tubo cerrado, determina un timbre cuya definición más aproximada sería la de misterioso, aterciopelado y un tanto hueco. Este timbre conviene y así lo han sabido aplicar los compositores más relevantes de la historia musical a motivos arpegiados, armonías cromáticas, determinadas melodías de carácter tenebroso y, en general, a cualquier tipo de acompañamiento. También le son propicios los diseños con notas tenidas para obtener determinados efectos melodramáticos. Además, por las razones acústicas de su funcionamiento, permite un ámbito dinámico exquisito, difícilmente realizable en otro instrumento homólogo, lo cual le confiere una formidable posibilidad expresiva. En resumen, tenemos en este registro un timbre homogéneo que únicamente presenta alguna fisura en los sonidos de la parte más alta del tubo, lo cual puede corregirse con el uso de digitaciones auxiliares.

El timbre de los sonidos del tramo de las fundamentales comprendido entre el Mi_3 y el $La\#_3$ es el más pobre y deslucido del clarinete. Su razón es consecuencia de los modos vibracionales que su tubo, cerrado acústicamente, permite. De acuerdo con el principio acústico de estos tubos, solo es posible obtener los armónicos impares, con lo cual el segundo armónico utilizado para formar la escala es el tercero, a la doceava de la

¹²⁵ Recuérdese que a mayor tubo operativo y taladro más estrecho, mayor número de componentes armónicos.

fundamental, según la serie armónica. Es por esto, que desde la octava de la primera fundamental hasta alcanzar las duodécimas a partir del Si_3 , se deben obtener los sonidos comprendidos en ese intervalo de quinta¹²⁶ con una porción de tubo exigüa. La distancia entre los orificios cromáticos así como su diámetro es muy reducida, de tal suerte que sus cortas longitudes de onda, unido a la nula resonancia de su tubo posibilitan un contenido espectral más reducido (Fig. 17.8), lo que se traduce en un timbre inconsistente y un tanto sordo.

En su *Tratado de Instrumentación General* Gevaert hace alusión al timbre de este registro en los siguientes términos:

“Menos viva, menos simpática es la sonoridad de los dos otros registros. El medio, transición entre el chalumeau y el clarín es deslucido y débil; sol#₃, la₃, sib₃ son las notas peores del clarinete; se tratará en tanto que sea posible, de no servirse de ellas sino de paso, sobre todo en un canto ó pasaje á solo.” (Gevaert, 1887)

Siguiendo sus recomendaciones, su uso orquestal, así como solista, se limita a fragmentos pasajeros del discurso musical, aunque bien es verdad que en ocasiones los motivos especialmente expresivos o apasionados gustan de utilizar el timbre de este registro. Compositores como Mozart, Beethoven o Brahms han aplicado frecuentemente este uso en algunas de sus composiciones sinfónicas y también en las que emplea el clarinete como solista. No olvidemos, por otra parte, la dificultad técnica añadida que entraña la digitación de este tramo. En cualquier caso, en última instancia se sitúa la capacidad técnica del intérprete para superar estas dificultades de orden técnico y acústico. En relación con las segundas siempre cabe la posibilidad de prolongar la resonancia del tubo obturando determinados orificios, con lo cual se homogeneiza el timbre parcialmente y se mitigan las diferencias tímbricas respecto de los otros registros.

El timbre del registro agudo a cargo de las duodécimas que producen los terceros armónicos, es el más apreciado del clarinete por sus excelsas cualidades. Se ha dicho, en multitud de ocasiones, que este timbre sugiere la voz de una soprano. Es cierto, las analogías acústicas son, en este sentido, manifiestas. Así lo describe Gevaert en su *Tratado*:

“Su timbre tiene afinidad con el oboe y la flauta: posee el acento vibrante de la voz humana, pero más suave, idealizado. Expresa el sentido femenino en sus manifestaciones afectivas y serias; amor, ternura, abnegación, pudor, sentimiento; solo la nota alegre parece faltarle.” (Gevaert, 1887)

No cabe duda que la suave brillantez y pureza sonora que imprime este registro a su timbre es consecuencia de la naturaleza de sus sonidos. A pesar de tratarse de sonidos armónicos, presentan en proporciones análogas componentes armónicos pares e impares, en torno a una media de cinco o seis (Fig. 17.9), debido a que las resonancias del tubo se desvían cada vez más lejos de los múltiplos enteros de las fundamentales. Nótese que todos los sonidos de este registro -doceavas- utilizan el mismo tubo operativo que los del registro grave -fundamentales-, con lo cual la reducción de componentes armónicos se debe, por una parte, a que la campana es más eficaz en irradiar las ondas de frecuencias altas, y por otra, al efecto de elasticidad de la caña que debilita estas resonancias altas.

¹²⁶ De ahí que se conozca al clarinete también como instrumento *quintoyano*.

Ha sido sin duda este registro el más empleado por los compositores clásicos y románticos por la dulzura mordente de su timbre. Mozart en su *Concierto* y en su *Quinteto con cuerdas para clarinete en La* exprime al máximo sus cualidades líricas. También Brahms, en su música donde otorga al clarinete el papel solista, gusta explotar estas cualidades. Además, cualquier compositor que se precie sabe que en sus obras debe confiar al clarinete los solos en ese registro si quiere obtener el máximo nivel de expresión sonora y musical.

Por lo que respecta al timbre del registro sobreagudo (Figs. 17.10, 17.11 y 17.12), podemos decir que, junto con los sonidos del tramo quintante, se trata del más heterogéneo e inestable. Heterogéneo por el uso de diferentes armónicos para la obtención de sus sonidos. Nótese, a este respecto, que se utilizan para este registro el armónico 3, 5, 7, 9 y muy pocas veces el 11. Cada uno de estos armónicos modifica ligeramente el timbre por su naturaleza, con lo que hay que extremar las medidas para su corrección. Se aconseja, en este sentido, el uso de un solo armónico para la ejecución de un determinado pasaje musical. Además si a eso añadimos la alta presión generadora y su frecuencia elevada, tenemos un resultado tímbrico un tanto chillón y estridente más allá del Sol₅. Empero, hasta este sonido, el uso de armónicos quintos proporciona un timbre con brillantéz intensa que algunos compositores han sabido sacarle partido. Strauss, Mahler, Bruckner o Stravinsky hacen uso de este registro en busca de un timbre que les permita obtener determinados efectos expresivos. En cuanto a su inestabilidad, es consecuencia directa de la reducida longitud de onda y, en la mayoría de ellos, de tubo operativo. Además, en estos sonidos se excede la frecuencia de corte y consecuentemente las resonancias son más débiles porque la onda estacionaria no puede formarse debido a la escasa reflexión de las ondas –recuérdese que las ondas de frecuencia alta son transmitidas por el enrejado de orificios tonales abiertos e irradiadas al exterior en mayor medida que las de frecuencias bajas-. Más allá del La₅ el timbre se torna chillón por escasa presencia de componentes armónicos unido a la sensación estridente de su altura.

En las siguientes figuras se muestra el timbre analizado mediante espectrograma optimizado de los primeros sonidos de cada registro o tramo, emitidos por el clarinete soprano en Sib.

Fig. 17.7 Espectrograma del Mi₂

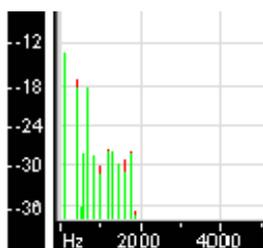


Fig. 17.8 Espectrograma del Sib₃₍₁₎

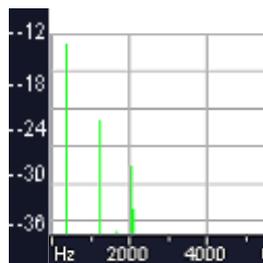
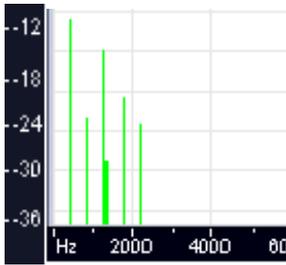
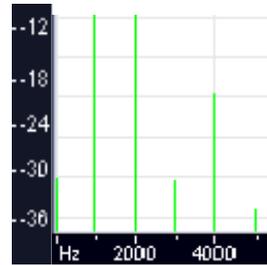
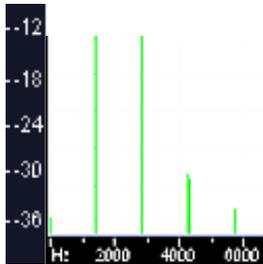
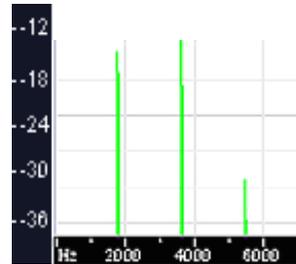


Fig. 17.9 Espectrograma del Si₃(1)Fig. 17.10 Espectrograma del Do#₅(1)Fig. 17.11 Espectrograma del Sol₅(1)Fig. 17.12 Espectrograma del Si₅(1)

CAPITULO 18

NOCIONES BASICAS PARA EL DISEÑO Y FABRICACION DE UN CLARINETE



Preludios y Danza para Clarinete y Orquesta. Lutoslawsky (1913-1994)

Para el diseño de cualquier instrumento de viento madera lo primero que debe considerarse es la forma de su resonador -el tubo- y la de su generador -la boquilla-. En el caso del clarinete nos encontramos con un tubo cilíndrico adosado a una boquilla de lengüeta simple. Dado que el clarinete funciona como un tubo cerrado, los orificios que deben practicarse en el tubo deben ser diecinueve. Varias cuestiones se plantean en este sentido: primero, las dimensiones del instrumento no permiten perforar los orificios tonales en el mismo plano, de manera que algunos de ellos deben disponerse ladeados; segundo, el espaciado entre los agujeros aumenta proporcionalmente a la distancia de la boquilla. Esto quiere decir que si tocamos una nota con una longitud L de tubo y obturamos un nuevo orificio tonal para bajar el diapasón un semitono, este agujero añade un incremento de longitud aproximadamente igual a un 6% de L -o lo que es lo mismo, $0.06 L$ -. Cada vez que bajamos el diapasón cubriendo un agujero adicional, la L aumenta y el incremento siguiente es de 0'06 más grande que el incremento anterior; tercero, el diámetro del orificio aumenta como la distancia de la boquilla. Efectivamente, dado que la sección cruzada de cualquier instrumento de viento madera varía, el agujero también tiene que variar -a mayor diámetro de tubo, mayor orificio-. Sin embargo, en el clarinete debido a que uno de sus finales se halla cerrado, el tamaño de los orificios no es uniforme como sucede con la flauta sino que es constante.

Las posiciones de los orificios tonales se calculan utilizando el modelo acústico lineal basado en establecer ciertas hipótesis para obtener las ecuaciones de las ondas.

Efectivamente, esta linealización toma como hipótesis de partida que el incremento de presión, densidad y velocidad de las partículas es pequeño frente a su valor medio o de equilibrio. La solución de estas ecuaciones se aborda en el dominio de la frecuencia -ecuación de Helmholtz-, de manera que se trabaja con amplitudes de presión complejas y no con valores instantáneos. En este sentido, se supone que el fluido en el que se propaga la onda es ideal -no viscoso-, en concreto, gas perfecto. También, que el proceso se considera adiabático, esto es, suele haber intercambio de calor entre el gas y las paredes en el curso de la propagación de la onda. Se trata, en definitiva, de que el cálculo mediante la función de suma para los orificios practicados en el tubo se aproxime lo máximo a las frecuencias nominales de cada nota. Para ello hay que considerar, además, las posibles desviaciones que se producen y compararlas tocando el instrumento varias veces para reducir el margen de error.

La prueba definitiva debe efectuarse mediante la impedancia de entrada en el instrumento -en la boquilla-. Para ello es necesario calcular la impedancia del aire de entrada en la boquilla como una función de la frecuencia y ser capaz de medir los efectos de los orificios tonales abiertos y de otras perturbaciones. Para hacer esto se necesita una fuente de flujo con una impedancia de aire más alta que la que se va a medir en la boquilla, esto es, algún mecanismo controlado de forma automática para mantener un flujo constante ante el cambio de la impedancia de la boquilla¹²⁷.

Esta prueba nos permitirá observar las resonancias, en forma de picos, que deberán estar en relación de número entero -1: 3: 5:, etc.- con la fundamental, para poder ser emitidas de forma estable y afinada. Además, nos proporcionará la medida de los coeficientes de absorción de los distintos materiales que pueden ser utilizados para su fabricación. A partir de aquí deben efectuarse todas las posibles correcciones debido a las alteraciones del tubo. Estas consisten básicamente en alterar el diámetro y ubicación de los orificios tonales, o bien, practicar algún reborde o alguna ligera alteración en el tubo. Además, la forma final de la campana y de la boquilla servirá para ajustar la afinación de los sonidos de ambos extremos del tubo. Esta cuestión es de especial relevancia porque si el tubo fuese un cilindro perfecto los sonidos de los extremos estarían desafinados.

Otra cuestión es la de fijar la frecuencia de corte del instrumento que debe determinar, por una parte, el timbre del instrumento, y por otra, el límite superior para emitir sonidos afinados. Para ello, si se quiere subir esa frecuencia debe ampliarse la relación entre el tamaño del orificio tonal con el tamaño del tubo, mientras que para bajarla se deberá aumentar el espaciado entre los orificios.

Por su parte, el orificio de registro debe ubicarse en el primer tercio del tubo, dado que su función es romper el modo fundamental en tres mitades alicuotas -debido a su funcionamiento de tubo cerrado- para debilitar las resonancias más graves y que el armónico superior pueda sostenerse. El punto idóneo se sitúa donde la presión es máxima, de modo que pueda prevenir la acumulación de fluctuaciones de presión y favorecer la formación de un nodo de presión. Para poder desarrollar su principal función y que los armónicos más altos puedan sostenerse para ser utilizados como notas, la activación de la llave portavoz debe reducir la fuerza de la primera resonancia -la fundamental- o modificar su frecuencia de forma que no pueda cooperar con otros modos. De manera que su ubicación debe calcularse en el punto exacto, teniendo en cuenta, además, que su diámetro

¹²⁷ Véase el apartado 6.3 para ampliar la información.

preciso debe facilitar, por una parte, el sobresoplado, y por otra, funcionar como orificio tonal en el registro grave.

Finalmente debe instalarse todo el mecanismo de llaves que permitirá a los dedos mantener el control sobre todos los orificios.

CONCLUSIONES

I. CONCLUSIONES

La presente Memoria resume un Trabajo Doctoral en el que se ha desarrollado una línea de trabajo dentro de la Acústica Musical. En concreto, se ha realizado un estudio de la acústica y organología del clarinete, con especial atención a su afinación y a su timbre, en orden a su optimización en la ejecución musical.

En los últimos treinta años la investigación sobre el funcionamiento acústico de los instrumentos musicales ha experimentado un notable auge. El afán que tiene la ciencia de fundamentar todos los fenómenos físicos, así como los sofisticados equipos de medida y programas de simulación existentes, han propiciado el estudio de muchos fenómenos intervinientes en el proceso sonoro de los instrumentos musicales, antes desconocidos para la mayor parte de la comunidad musical.

En el caso del clarinete, el objetivo de estas investigaciones científicas se centra en el diseño de un clarinete ideal, de afinación perfecta y timbre homogéneo. Para ello es menester estudiar y analizar la acústica del instrumento para encontrar un método que permita calcular las posiciones idóneas y el tamaño y espaciado de los orificios tonales.

En relación con la afinación del instrumento, estos estudios persiguen corregir, por una parte, las anomalías que se producen en ciertos tonos por su especial funcionamiento acústico y su principio acústico basado en la vibración de las columnas aéreas y, por otra, las discrepancias causadas por un solo orificio de registro -debido a su funcionamiento de tubo cerrado- que sube la frecuencia del segundo modo en ambos extremos de la escala del segundo registro. Existe, en este sentido, una necesidad perentoria de precisar con exactitud las frecuencias del modelo geométrico ideal. El modelo acústico lineal ha resultado útil para optimizar la afinación del instrumento, pero solo en niveles sonoros bajos. En niveles

sonoros altos se han detectado pérdidas importantes cuya magnitud se desconoce. Asimismo, aunque los aspectos de simulación matemática están bien definidos, se desconoce de qué parámetros dependen estas pérdidas. Además, la descripción lineal se aplica para un modelo geométrico ideal y por la forma irregular del tubo del clarinete deben determinarse todas las correcciones debido a esas desviaciones del modelo ideal, lo que supone un estudio de mayor complejidad. Por otra parte, se sabe que las imperfecciones de algunos tonos se hallan relacionadas directamente con anomalías locales de la frecuencia de corte del instrumento, lo que puede ser de gran utilidad para perfeccionar ciertos tonos.

Por lo que se refiere al estudio y optimización del timbre y, en definitiva, de la calidad tonal, en los últimos años se ha experimentado un considerable avance con el uso de la impedancia de entrada en el instrumento. Este método ha resultado fundamental para el diseño de un clarinete cada vez más perfeccionado. En este sentido, nociones básicas como la función de suma han sido y son muy útiles para predecir la afinación y el contenido armónico de los sonidos.

Por otro lado, se sabe que la calidad tonal o el timbre dependen de la forma del tubo y del tamaño y espaciado de los orificios tonales, lo que se halla directamente relacionado con la frecuencia de corte del instrumento. En este sentido, si esta frecuencia es alta el timbre se abrillanta, mientras que si es baja el timbre tiende a oscurecerse, lo que explica las diferencias de timbre entre clarinetes de sistemas diferentes o, incluso, del mismo sistema. Sabiendo que aumentando el espaciado de los orificios tonales o su diámetro se baja la frecuencia de corte y que aumentando la relación entre el tamaño del orificio con el tamaño del tubo se sube, es posible diseñar un clarinete a la carta que tenga el timbre que busca el clarinetista y, de esta forma, diferenciar las dos escuelas clarinetísticas principales -aunque los problemas locales de afinación persistan-.

Para alcanzar este objetivo ya se ha efectuado algún estudio de simulación consistente en utilizar las leyes de la acústica para obtener las ecuaciones de las frecuencias deseadas. Además, se necesitan todos los datos necesarios para calcular el diámetro de los orificios y las propiedades mecánicas de las cañas. Con todo ello, se calculan las frecuencias de cada nota mediante varias posibilidades de digitación. Los resultados obtenidos son cotejados con las frecuencias nominales según la nota emitida y las posibles desviaciones respecto de esas frecuencias se especifican en un diagrama para cada nota. Estas desviaciones se comparan con las que se producen cuando el instrumento se está tocando. Dado que el músico tiene cierto control sobre la frecuencia, este experimento de soplar debe repetirse varias veces para reducir los resultados posibles.

La pregunta que se plantea es la siguiente: si ya se han realizado estudios de esta índole, ¿por qué no se aplican estas innovaciones al instrumento si ello va a redundar en su optimización técnica y acústica? La respuesta, preñada de razones, nos sirve como conclusión general. Por un lado encontramos las multinacionales fabricantes de instrumentos: ¿por qué introducir cambios en el instrumento si la demanda va *in crescendo* y los usuarios no solicitan reclamación alguna? Estas empresas no van a arriesgar su negocio ni a realizar una cuantiosa inversión porque un puñado de científicos les presenten determinados resultados experimentales cuya aplicación en el instrumento no está exenta de cierta complejidad y riesgo. Además, el músico tampoco demanda masivamente cambios en su instrumento, entre otras cosas porque no está dispuesto a arriesgar su técnica con cambios radicales en el mecanismo de su instrumento. Piénsese que la comunidad clarinetística -como cualquier otra comunidad- constituye una pirámide, en la cúspide de la

cual se sitúa la élite, esto es, los profesionales. Pero la base de la misma, mucho más numerosa, la conforman los estudiantes, aficionados, etc. Esto quiere decir que si bien una minoría -los profesionales- demandan un clarinete más perfeccionado -aunque ello suponga alguna modificación en su técnica-, el grueso de clientes se alimenta con lo que el mercado le suministra, permaneciendo pasivo a esas demandas. Como consecuencia, no es de extrañar las reservas de estas empresas a la hora de su fabricación y comercialización.

Analicemos otro motivo que puede justificar esta situación. Se ha podido comprobar en el curso del estudio la enorme complejidad que comporta la aplicación de estos estudios en el clarinete actual debido a tres razones fundamentales: su especial funcionamiento de tubo cerrado que le impele al octaveo a la doceava en lugar de a la octava como el resto de sus homólogos; ciertos factores y fenómenos influyentes en la afinación y la calidad tonal -algunos de ellos sin clarificar-; por último, los efectos colaterales o secundarios que producen las correcciones de ciertos tonos anómalos.

En relación con la primera razón enunciada, han quedado suficientemente claros los problemas que comporta ajustar la balanza cromática global al tener que perforar el tubo -con las dimensiones actuales- con los orificios necesarios para obtener los diecinueve semitonos, antes de efectuar el salto a los siguientes registros, mediante un solo orificio de registro.

En cuanto a los fenómenos implicados en la calidad tonal y a sus efectos secundarios, ya se ha dicho en su momento cómo, en ocasiones, determinados orificios actúan como si estuviesen cerrados, o la dificultad que entraña el fenómeno de la corrección del extremo final. Además, del estudio efectuado se concluye que la corrección de determinados tonos anómalos debe efectuarse mediante dos métodos: practicar alteraciones en ciertos puntos del tubo para ajustar la frecuencia del tono -véase el subapartado 16.1.3-; o bien, reducir o ampliar el diámetro de los orificios tonales y su espaciado -véanse los apartados 14.6, 16.1.2 y el subapartado 16.2.2-. El primer procedimiento comporta un serio inconveniente y es que las alteraciones en el tubo no perturban por igual a todos los modos. Dado que esta perturbación rompe la relación de número entero entre las frecuencias resonantes, la cooperación en el régimen de oscilación del registro grave será muy pobre, lo cual afectará directamente a la afinación y, por tanto, a la calidad tonal de los sonidos implicados -supuesto que ya acontece en los sonidos del tramo quintante, por la constricción de la boquilla, y en las primeras fundamentales, por la ampliación del tubo en esa región-. Además, solo tienen efecto en los sonidos de la zona en la cual se practica, de manera que tampoco sería posible usar este método para establecer una afinación endógena general. Esto nos explica, por tanto, que resulta *cuasi* imposible perfeccionar ciertos tonos sin perjudicar a otros. Por lo que respecta al segundo método, no es posible reducir el diámetro de los orificios debido a que, como ya se ha dicho, determinados agujeros no funcionarían como es debido, a no ser que la reducción se practique proporcionalmente con la del diámetro del tubo, lo cual modificaría sensiblemente el timbre del instrumento -supuesto que ya ha sido experimentado en algunos modelos actuales-. Tampoco es recomendable aumentarlo reduciendo así el espaciado dado que esto llevaría aparejado un descenso de la frecuencia de corte del instrumento y, por ende, el timbre se oscurecería en demasía resintiéndose la calidad tonal y desvirtuando, por consiguiente, el personal carácter del instrumento -además de todas las correcciones que deberían practicarse por el fenómeno de la corrección del extremo final-. De lo que se deduce que la obtención de las frecuencias para el clarinete ideal deviene en pura teoría dado que en la práctica se producen ligeras

desviaciones debido a esos factores y fenómenos, lo cual dificulta enormemente la caracterización y modelado del instrumento ideal. De lo contrario, ¿cómo se explica que en dos siglos y medio y con la tecnología actual se haya avanzado tan poco en este tema? -compárese con cualquier otra disciplina técnica y se observará la diferencia abismal que existe-.

De manera que solo es posible, según la tesis sustentada, perfeccionar la acústica del instrumento mediante soluciones locales o a medias -sacrificando unos tonos en beneficio de otros-. Para una solución óptima debe llevarse a cabo en el instrumento un estudio integral que modifique todo el diseño actual, lo cual lleva aparejado cambios radicales en la técnica y en el timbre del instrumento. Nos encontraríamos, así, en una nueva era -tercer punto de inflexión en la historia del clarinete después del clarinete sistema Müller y del sistema Boehm- donde se impondría un nuevo concepto de instrumento que eclipsaría al actual, lo que supondría, por una parte, una adaptación por parte de los clarinetistas a la técnica del nuevo instrumento perfeccionado -tal y como sucedió con el sistema Müller y Boehm-, y por otra, la modificación del actual timbre que haría replantearse la ejecución de las composiciones concebidas para el clarinete actual con el nuevo instrumento y el rol del clarinete en la orquesta y en la música de cámara. Además, las nuevas composiciones deberían adaptarse a las nuevas características del instrumento. ¿Vale la pena llevar a cabo un proceso de este tipo para perfeccionar el clarinete actual, o por el contrario es preferible adaptarnos al instrumento actual y tratar de optimizarlo técnica y acústicamente?

En fin, se entiende así que, con este panorama y en espera del advenimiento de esa nueva era -si es que llega-, se postule en esta tesis por una optimización de las prestaciones del instrumento donde el concurso del clarinetista deviene en un elemento fundamental y donde es menester conocer el funcionamiento acústico del instrumento y todos los fenómenos implicados para obtener el mejor rendimiento que garantice el éxito en la interpretación musical.

Así todo, es posible que el clarinetista haya asumido la idiosincrasia del instrumento como tal, con sus carencias e imperfecciones, y que haya aprendido a convivir con ellas sin darles mayor importancia. Es evidente que el clarinetista manipula y consume el instrumento que le suministran y se adapta formidablemente a sus características. El músico es, ante todo, intérprete y sabe, por tanto, cómo sacar el máximo rendimiento técnico a su instrumento. Si el instrumento fuese perfecto -acústicamente hablando- el concurso del clarinetista devendría en mero manipulador o ejecutante del mismo y, posiblemente, sus capacidades y habilidades técnicas no se desarrollarían normalmente sino que quedarían anquilosadas -piénsese en un violín perfectamente afinado de fábrica y que, mediante el accionamiento de un pulsor, se ajustara a cualquier diapasón-.

Subyace de esta última reflexión o, si se quiere, conclusión, dos cuestiones de indudable interés: por una parte, el dilema a propósito de la interpretación con instrumentos de la época y, por otra, la compleja relación que se establece entre ciencia y arte. En relación con la primera, piénsese que la mayoría de la literatura clarinetística ha sido concebida para el instrumento actual. La controversia acerca de la interpretación de instrumentos de la época quedaría aquí patente si el instrumento fuese modificado de forma drástica. Esto permitiría, efectivamente, optimizar la ejecución musical, pero, por otra parte, desvirtuaría la esencia propia de la música que emana de una concepción particular. En cuanto a la segunda cuestión, se podrá tachar la tesis aquí sustentada de involucionista

desde el sector científico dado que cercena de algún modo su actividad en aras de un mejor desarrollo integral del músico. Mas considero que ambas disciplinas deben complementarse para que los cambios que resulten de las investigaciones se apliquen de forma moderada para que no comporten modificaciones severas en la técnica ni desvirtúen el particular carácter del instrumento al que compositores como Mozart o Brahms dedicaron tantas obras geniales.

A continuación se presentan las conclusiones específicas más relevantes del análisis experimental y del estudio de campo efectuado:

1.- En lo que concierne al funcionamiento acústico del clarinete **se ha constatado su funcionamiento de tubo cerrado desde el punto de vista de la génesis y obtención de sus sonidos.** La evidencia de este fenómeno la proporciona la longitud de onda de los sonidos fundamentales. Efectivamente, calculando esta magnitud relacionando la velocidad de propagación con la frecuencia se ha observado que ésta corresponde a cuatro veces la longitud del tubo, esto es, la fundamental en un tubo cerrado, con una onda estacionaria que presenta un nodo próximo a la lengüeta y un vientre hacia el pabellón. Procediendo del mismo modo en el registro agudo y sobreagudo, corresponde a un tercio de la longitud de onda fundamental al registro agudo -terceros armónicos-, un quinto al sobreagudo (1) -quintos armónicos-, un séptimo al sobreagudo (2) -séptimos armónicos- y un noveno al sobreagudo (3) -novenos armónicos-. Del mismo modo, si determinamos la frecuencia invirtiendo la relación antes descrita, observamos que en los sonidos agudos la frecuencia es $3f$, en los sobreagudos (1) $5f$, en los sobreagudos (2) $7f$ y en los sobreagudos (3) $9f$, resolviendo, en este sentido, que se tratan de armónicos impares cuyas frecuencias son múltiplas enteras de la fundamental. Por consiguiente, únicamente utiliza para obtener su escala completa los armónicos de orden impar, inherentes a los tubos cerrados, por lo que desde el punto de vista del origen y obtención de sus sonidos actúa como cerrado.

Este particular funcionamiento se puede resumir brevemente del siguiente modo: en el tubo del clarinete la onda se propaga cuatro veces como consecuencia de su sección cruzada predominantemente cilíndrica, lo cual permite la propagación de ondas planas -la intensidad no varía-, mientras que en el resto de instrumentos de viento madera -excepto en la flauta- la propagación tiene una solución esférica debido a la conicidad de su tubo -la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud-, de manera que en el tiempo de un ciclo la onda solo recorre dos longitudes de tubo. Así, mientras que el clarinete la onda cuando regresa al extremo de la boquilla encuentra la caña cerrada en su proceso vibratorio, lo que facilita una nueva reflexión, en los demás instrumentos referidos la caña ha completado su ciclo y se halla abierta, lo que permite una nueva entrada de aire, finalizando así su ciclo.

En los gráficos de impedancia del apartado 6.3 se observa como los parciales corresponden a los armónicos impares. Asimismo, este particular funcionamiento acústico ha sido analizado en profundidad en el apartado 15.2 del Trabajo, en el cual se describe el proceso sonoro que acontece en el clarinete durante un ciclo. Se ha concluido, en este sentido, que la lengüeta asociada al tubo cuasi cilíndrico constituye la principal causa del funcionamiento de tubo cerrado.

Sin embargo, **considerando la naturaleza de sus sonidos, esto es, su resonancia superior o sus componentes armónicos, se ha comprobado que el clarinete funciona como un tubo semiabierto en el registro grave, y como abierto en el agudo y**

sobreagudo. Dado que en el registro grave el clarinete produce mayoritariamente armónicos impares y algunos pares de baja intensidad, no podemos considerar *sensu stricto* que funciona como cerrado, puesto que este comportamiento es inviable en estos tubos. Tampoco como abierto ya que, en este supuesto, debería generar armónicos pares e impares en intensidades y proporciones análogas. Luego parece lo más acertado concluir que su tubo funciona en este registro como *semiabierto*, nueva categoría establecida que designa, por tanto, el comportamiento antes descrito. En este sentido, se han analizado las razones de este funcionamiento en el apartado 15.2 y se ha concluido que responden a la acción conjunta de varios factores, a saber, en mayor medida la lengüeta, junto con las alteraciones del tubo y las resonancias del tracto vocal. En el registro agudo y sobreagudo el funcionamiento del tubo se torna abierto, dado que produce los armónicos de ambos órdenes en proporciones análogas. Los motivos de este comportamiento son los mismos que hemos enunciado en el registro grave, pero además hay que sumar el incremento de la frecuencia, que lleva asociado el efecto de la corrección del extremo final, el efecto de elasticidad de la caña y que estas frecuencias son irradiadas de forma más óptima por la campana. Todo ello debilita las resonancias más altas debido a que la reflexión de las ondas se lleva a cabo de forma más precaria. Además, las resonancias del tubo en estas frecuencias se desvían cada vez más de los múltiplos enteros de las fundamentales.

2.- Respecto de la obtención de los diferentes sonidos en el clarinete, se han analizado los dos procedimientos que lo hacen posible; el primero consiste en alterar la columna gaseosa natural -sin subdivisiones- activando los orificios dispuestos convenientemente. Así se obtienen las diferentes fundamentales, desde el Mi_2 hasta el $La\#_3$, que constituyen el registro grave, con una longitud de onda que corresponde a cuatro longitudes del tubo, ya que la onda se propaga en el tubo cuatro veces mediante el proceso de reflexión; **el segundo método se lleva a cabo practicando subdivisiones en la columna gaseosa fundamental.** Para ello se utilizan varios procedimientos. El primero consiste en dividir la columna mediante la activación de un orificio, denominado portavoz -llave 12-, cuya función consiste en debilitar o modificar la frecuencia de la resonancia fundamental liberando una cantidad mínima de aire en un punto donde el modo fundamental tenga una presión máxima para que no pueda cooperar con las frecuencias altas, dejándolo inalterado. De esta forma los componentes más bajos no siguen la serie armónica y el diapasón salta una duodécima por encima. Se previene, así, la acumulación de fluctuaciones de presión y se favorece la formación de un nodo de presión. Es el caso de los sonidos del registro agudo, desde el Si_3 hasta el Do_5 . El siguiente procedimiento consiste en obtener sonidos mediante digitaciones especiales que presentan nuevos orificios tonales que actúan también como portavoces debilitando o destruyendo las resonancias más graves. De esta forma se obtiene el primer tramo del registro sobreagudo -una sexta por encima de los terceros- que transcurre desde el $Do\#_5$ hasta el $Fa\#_5$ -también terceros descartados por su bajo rendimiento-; el segundo tramo de este registro, a partir del Sol_5 hasta el $La\#_5$, como séptimos -también como novenos y undécimos-; finalmente, el tercer tramo, del Si_5 al Do_6 como novenos y/o undécimos. Huelga decir que este procedimiento debe complementarse en estos sonidos con el incremento gradual de la presión de sople.

Se dan, por tanto, en este registro algunas variantes dado que las posibilidades de emisión con diferentes armónicos son vastas, aunque de forma general se sigue el procedimiento descrito en el párrafo precedente. Estas variantes se dan especialmente en los

sonidos que se emiten con una red de orificios tonales abiertos -léase el Fa#₅ y el La#₅-. El bajo rendimiento acústico se debe al efecto del fenómeno de la corrección del extremo final que debilita las resonancias.

3.- Se ha observado, por otra parte, que los sonidos del registro agudo y sobregado, a pesar de ser sonidos armónicos y en tal caso estar constituidos teóricamente por un solo movimiento armónico simple, constituyen complejos sonoros puesto que presentan determinados componentes armónicos -en función de la digitación empleada ciertos armónicos se refuerzan o debilitan- derivados de varios movimientos armónicos simples. Si bien la teoría establece como norma que los sonidos armónicos derivan de un solo movimiento armónico simple, en los sonidos del registro agudo del clarinete -y de la mayoría de los instrumentos- se advierte la presencia de determinados componentes armónicos como consecuencia de las causas aducidas a propósito de su funcionamiento de tubo semiabierto. En consecuencia, estos sonidos pueden considerarse como armónicos de una fundamental desde el punto de vista de su génesis y obtención, pero también como complejos, si atendemos a su naturaleza.

4.- Las medidas experimentales efectuadas a propósito del pabellón del instrumento han permitido constatar cómo este elemento refuerza las resonancias de los sonidos más graves del clarinete, dado que favorece la reflexión de las ondas de frecuencias graves y, por consiguiente, refuerza estas resonancias. Además, **su forma abocinada está diseñada con el fin de nivelar la afinación,** no solo de los sonidos más graves, sino también de los sonidos del registro agudo que utilizan esta parte del tubo. Efectivamente, el orificio portavoz levanta ligeramente las frecuencias de los sonidos agudos que se localizan en ambos extremos del tubo. Si el clarinete fuese un cilindro perfecto los registros estarían desafinados en los sonidos de ambos extremos del tubo. Para corregir esta discrepancia, se practica una ampliación en el tubo cerca de un nodo de presión -en la campana-, lo que aumenta la elasticidad del sistema y sube la frecuencia vibratoria de la columna aérea en los sonidos de este extremo -en mayor medida en las fundamentales que en las duodécimas-, lo que equilibra relativamente la balanza global. El problema surge debido a que la perturbación provocada por esta alteración no afecta por igual a todos los modos y, por tanto, deben sacrificarse ciertos tonos para que otros queden afinados. Normalmente se suelen favorecer las duodécimas en detrimento de las fundamentales.

5.- Se ha efectuado un estudio de campo y un análisis experimental de la boquilla del clarinete. En este sentido, **se ha podido constatar que la lengüeta del instrumento es la causa fundamental de su comportamiento acústico.** Mediante la respuesta espectral aleatoria **se ha comprobado que la boquilla por sí sola produce armónicos de ambos órdenes de modo que, en conjunción con el tubo del instrumento, no extraña que refuerce ciertos armónicos pares** -inviabiles en este tipo de tubos- además de los impares propios de los tubos cerrados. Pero, por otra parte, el funcionamiento de tubo cerrado al efecto de conseguir sus sonidos, es posible también gracias a la acción de la lengüeta, puesto que **permite cerrar el tubo por ese extremo** favoreciendo, en consecuencia, la constitución en esa zona de un nodo de desplazamiento en la onda estacionaria, inherente a los extremos cerrados. Asimismo, su especial forma interna responde a razones prácticas de ajuste de la afinación dado que su contracción produce un aumento local del coeficiente de elasticidad del aire interno, lo que levanta las frecuencias

de los sonidos de esa parte del tubo en las fundamentales y sus duodécimas –en menor proporción en estas últimas- equilibrando la balanza global. Sin embargo, resulta prácticamente imposible evitar que estos sonidos queden ligeramente altos.

Finalmente, **se ha analizado la función acústica que desempeña la lengüeta y su incidencia en la afinación y el timbre del instrumento, y se ha descrito su proceso vibratorio** mediante los resultados experimentales y el estudio de campo. En este sentido se ha observado como el efecto de elasticidad de la caña debilita las resonancias de las frecuencias altas. Respecto al estudio de campo, se han detectado ciertas discrepancias en la descripción del proceso vibratorio que han efectuado algunos teóricos. Asimismo, **se han podido fundamentar algunas disfunciones acústicas del instrumento cuya causa reside en este elemento.**

6.- La afinación perfecta en el clarinete es pura teoría debido a su especial funcionamiento acústico de tubo cerrado y a la influencia de determinados factores y fenómenos que contaminan la cooperación entre las frecuencias resonantes. Los parámetros obtenidos de las frecuencias y pulsaciones de todas las muestras, así como el de valoración de la afinación, han permitido estudiar y analizar la afinación del instrumento en orden a su optimización, evidenciando las discrepancias que se dan en este asunto. En este sentido, además de los factores ambientales, **se han analizado los principales factores que afectan directamente a la afinación del instrumento mediante el estudio experimental y el análisis de los trabajos más recientes, a saber: los efectos de las vibraciones de la caña, la influencia de las alteraciones del tubo, el efecto de la corrección del extremo final y la incidencia de las resonancias del tracto vocal** -véase el apartado 16.1-. Así, se ha constatado la precaria afinación del instrumento y cómo se ve influida por un gran número de elementos y factores de todo tipo que deben ser especialmente considerados para su ajuste. Con un tubo relativamente corto, el clarinete debe producir, por su funcionamiento acústico de tubo cerrado, un amplio abanico de sonidos utilizando armónicos impares mediante un orificio altavoz o generando una mayor presión de sople, en los sonidos del segundo tramo del registro sobreagudo. Además, la vibración de las columnas aéreas se halla influida por las condiciones atmosféricas y el diámetro y espaciado de los orificios tonales, lo que conlleva el problema de la corrección del extremo final del tubo, especialmente en las frecuencias altas. El estudio de este último fenómeno ha permitido determinar la razón por la cual los sonidos agudos que utilizan una corta longitud de tubo y que, por tanto, se emiten con una serie de orificios tonales abiertos, presentan frecuencias por debajo de los valores teóricos y un precario timbre, de lo cual se deduce que es menester saltar al siguiente armónico con una larga longitud de tubo y un gran número de orificios tonales cerrados para restablecer unas condiciones que permitan seguir ascendiendo por la escala con ciertas garantías acústicas. Además, como se ha dicho anteriormente, este fenómeno está directamente relacionado con algunas anomalías locales de la frecuencia de corte del instrumento.

Estas minusvalías, consecuencia de su particular funcionamiento acústico, se pueden corregir mediante diversos métodos utilizados por los instrumentistas. En este sentido, **se han analizado distintos procedimientos de control y ajuste de la afinación que dependen en gran medida de la habilidad del ejecutante** -véase el apartado 16.2-. Es preceptivo, por ende, utilizar digitaciones complementarias que están normalizadas sobre la base de la experiencia adquirida por los clarinetistas, así como otros

procedimientos de variación de la frecuencia, como la presión labial o la prolongación del tubo. Estos métodos son de capital importancia en determinados sonidos del registro grave y agudo, en especial en los sonidos del tramo quintante y en los sonidos de la parte más baja del tubo debido a su funcionamiento de tubo cerrado y a la doble función que desempeña el orificio portavoz. También en la práctica totalidad del sobreagudo, debido al efecto de la corrección del extremo final.

7.- En cuanto al parámetro de longitud de onda, se ha comprobado que son inversamente proporcionales a las frecuencias, esto es, decrecen proporcionalmente conforme se asciende por la escala, mientras que las frecuencias aumentan. Luego a mayor longitud operativa de tubo menor frecuencia, y viceversa, a menor longitud de tubo operativo mayor frecuencia. La razón es sencilla. A mayor longitud de tubo, aumentamos la cantidad de masa que debe vibrar y por tanto ésta vibrará mas despacio y la frecuencia descenderá, y al contrario, a menor longitud de tubo, menos masa vibrante y mayor frecuencia. Asimismo, se hallan directamente relacionadas con el fenómeno de la corrección del extremo final y, por consiguiente, con la afinación dado que en la medida en que la onda entre en la zona de influencia del enrejado de orificios tonales se podrá alterar la frecuencia vibratoria.

En relación con las longitudes de tubo, se han establecido las medidas a partir de las cuales el clarinete afecta problemas serios para emitir frecuencias precisas y que, por tanto, deben tenerse en cuenta en la ejecución musical. Por otro lado, **se ha observado que los sonidos más ricos desde el punto de vista de la afinación y el timbre son los que utilizan mayor longitud de tubo y, por tanto, columnas gaseosas más largas, o lo que es lo mismo, que la riqueza tímbrica y de afinación es proporcional a la longitud del tubo operativo,** esto es, a mayor longitud de tubo mejor calidad tonal y frecuencia más precisa, y viceversa, a menor longitud de tubo peor calidad tonal y afinación. Efectivamente, se ha podido constatar que la resonancia del tubo favorece un incremento de componentes armónicos, lo que aporta al timbre una mayor homogeneidad. En cuanto a la afinación, se complica a medida que se reduce el tubo y se incrementa la frecuencia porque las ondas se reflejan cada vez más debajo de éste por el fenómeno de la corrección del extremo final.

8.- Por lo que respecta al timbre del clarinete, se ha observado una heterogeneidad inusual -si se compara con cualquier otro instrumento homólogo-, de sobra conocida por la comunidad clarinetística. La respuesta espectral de cada muestra acústica analizada ha permitido identificar los componentes armónicos de cada una de ellas. Estos resultados han servido para estudiar y analizar el timbre del instrumento en orden a corregir las diferencias de color que se dan entre sus registros y proceder a su optimización mediante la aportación de algunas aplicaciones prácticas para la ejecución musical. Estas discrepancias derivan, fundamentalmente, de su especial funcionamiento acústico, de la naturaleza de los sonidos de cada registro y, por tanto, de los modos de vibración de las columnas aéreas que refuerza la forma del tubo.

Se han estudiado todos los factores y fenómenos que afectan al timbre del clarinete. En este sentido, se ha estudiado **la incidencia de la forma del tubo y de la embocadura; la influencia de la frecuencia de corte del instrumento; el efecto de la caña; la influencia de la campana; la influencia de las resonancias del tracto vocal; las**

distintas fases que experimenta un sonido -a saber: ataque, estacionaria y caída-; el ruido marginal producido por los dedos o juegos de llaves. Asimismo, se ha analizado y descrito el timbre de cada uno de los registros del clarinete.

En relación con la forma del tubo, se ha constatado la influencia en el contenido espectral de un sonido de las alteraciones del tubo y del tamaño y espaciado de los orificios tonales, lo que está directamente relacionado con la frecuencia de corte.

En cuanto al efecto de la caña, el análisis de los trabajos más recientes, así como el análisis experimental, han permitido clarificar la influencia total de la elasticidad de la caña sobre las frecuencias naturales de una columna de aire y cómo contribuye al formante del sonido y, por consiguiente, a su calidad tonal.

Por lo que respecta a la influencia de la campana en la calidad tonal, ha quedado sobradamente demostrado cómo afecta la función acústica que desempeña este elemento en el resultado tímbrico.

Por último, aunque no está del todo claro en qué medida influyen las resonancias del tracto vocal en el timbre, parece claro que éstas explicarían en alguna medida las diferencias tímbricas entre un mismo instrumento manipulado por diferentes instrumentistas.

En cuanto al análisis, en el registro grave se ha observado un timbre más rico porque el complejo sonoro contiene más componentes armónicos y, por otra parte, presenta un color sombrío y aterciopelado con cierta oquedad por la prevalencia de armónicos de orden impar en detrimento de los pares. La razón de la abundancia armónica en los sonidos más graves se debe a varias causas: la lengüeta, la larga longitud de tubo que favorece la resonancia, la forma cónica de la parte inferior del instrumento que refuerza ciertos componentes pares, y otros factores secundarios -léase las resonancias del tracto vocal, por ejemplo-. En el siguiente registro, el agudo, el timbre se torna más puro y brillante por la naturaleza armónica del sonido y la presencia menguante de armónicos pares e impares en amplitudes análogas decrecientes. Esta reducción de los componentes es posible gracias a que la campana ayuda a irradiar las ondas de frecuencias altas al aire exterior, lo que debilita, por consiguiente, las resonancias. Este efecto es menos sensible en las frecuencias bajas porque la campana es mucho más pequeña en relación con las longitudes de onda de las frecuencias bajas y, por lo tanto, no es tan eficaz irradiando estas ondas. No hay que olvidar, también, el efecto que tiene la elasticidad de la caña y las pérdidas de energía que se produce en las paredes en el debilitamiento de las resonancias más altas. Además, la nivelación de componentes impares y pares se debe también a que las resonancias del tubo se desvían cada vez más de los múltiplos enteros de las fundamentales. Por lo que respecta al registro sobreagudo, se ha observado una reducción más ostensible de los componentes debido fundamentalmente a los efectos de la corrección del extremo final, lo cual se acentúa además por las altas frecuencias generadoras, presentando un timbre vivo y ligeramente chillón. Además en este registro se observan diferencias tímbricas ostensibles debido a la diversa naturaleza de sus sonidos constitutivos.

Se puede concluir, por tanto, que **el clarinete presenta un timbre desigual característico que difiere sensiblemente entre sus registros y que, lejos de comportar un ligero inconveniente, le confiere una suerte de singularidad que le individualiza sobremedida respecto de sus homólogos de la orquesta.**

Para corregir y prevenir estas discrepancias tímbricas observadas en los espectrogramas, se han aportado ciertas normas prácticas en el subapartado 11.4.3.

9.- En relación con la forma de onda, **se han obtenido los oscilogramas de todas las muestras analizadas para complementar el estudio del timbre.** En este sentido, **se ha comprobado que la forma de onda se torna más regular y simétrica a medida que se asciende por la escala.** Efectivamente, en los sonidos graves, debido a la disposición y proporción de sus componentes de orden impar, prevalentes, y par de baja intensidad, la forma de onda resultante corresponde a una onda no senoidal, dado que contiene varios movimientos armónicos simples, del tipo cuadrada imperfecta -puesto que para ser perfecta únicamente debe contener los impares- por la combinación con una en dientes de sierra portadora de escasos armónicos pares de baja intensidad. En los agudos y sobreagudos, debido a su naturaleza armónica y sus escasos componentes armónicos, la forma de onda es cuasi senoidal. Mas la configuración de sus espectros presenta una onda en dientes de sierra. En consecuencia, la forma de onda en las fundamentales, por su riqueza armónica, presenta una orografía irregular y asimétrica, mientras que en los sonidos agudos y sobreagudos, como consecuencia de la reducción armónica, se torna más simétrica e irregular.

10.- **Se ha efectuado una clasificación de las naturalezas de todos los sonidos susceptibles de ser emitidos por el clarinete con unas mínimas garantías acústicas.** Así, se han aislado e identificado estos sonidos, considerando sus longitudes de onda y de tubo, sus frecuencias y sus series armónicas. Se ha podido constatar la diversidad de armónicos utilizados en el registro sobreagudo, lo que enriquece formidablemente la técnica del instrumento actual. **Esto ha permitido aportar una serie de medidas encaminadas a optimizar la acústica del instrumento, así como a fundamentar y prevenir ciertos accidentes acústicos frecuentes en la interpretación** -léase el subapartado 11.1.3-.

11.- **Se ha establecido una clasificación de los armónicos que pueden ser utilizados como notas de la escala.** Dos aspectos destacan sobremanera: por una parte, la imposibilidad de emisión del segundo y tercer parcial -quinto y séptimo armónico- de las primeras fundamentales - Mi_2 , Fa_2 y $Fa\#_2$ - como notas de la escala. La ampliación practicada en el final del tubo -a partir de la segunda mitad del cuerpo inferior- produce una perturbación en la columna vibrante. Recuérdese, a este respecto, que esta perturbación no tiene el mismo efecto en todos los modos: en las fundamentales baja ligeramente la frecuencia; en el primer parcial las baja en menor proporción; a partir del segundo parcial, no tienen ningún efecto en las resonancias -véase el subapartado 16.1.3-. De esta forma, se rompe la relación de número entero entre las frecuencias de resonancia, con lo cual sólo es posible una cooperación muy pobre en el régimen de oscilación de estos primeros sonidos del registro grave con sus resonancias más agudas y, por tanto, se imposibilita la emisión de estas últimas.

Por lo que respecta a los armónicos más altos, no es posible emitirlos como notas de la escala cuando superan la frecuencia de corte del instrumento emitidos con un tubo que presenta excesivos orificios tonales abiertos. Más allá de este límite las ondas se transmiten por los orificios tonales abiertos debido a que no disponen de suficiente tiempo para acelerar la masa aérea que se halla en estos orificios, con lo cual la reflexión se reduce, lo que debilita las resonancias y, por tanto, invalida las condiciones idóneas para la emisión sonora.

12. Finalmente, de los resultados experimentales obtenidos **se ha podido establecer una serie de normas y recomendaciones generales para la ejecución musical.** Se ha considerado para este menester especialmente los parámetros de frecuencias y pulsaciones, la valoración de la afinación, los espectrogramas y composición armónica y la naturaleza sonora de cada muestra analizada. **Se ha tratado, en suma, de aplicar los resultados experimentales a la interpretación para facilitar el trabajo del clarinetista y optimizar, por tanto, las prestaciones de su instrumento.**

En suma, en el presente Trabajo se ha tratado de analizar y estudiar la acústica del clarinete, fundamentado todos los fenómenos sonoros implicados en la producción sonora y que afectan directamente a la afinación y a la calidad tonal del instrumento, mediante el análisis experimental y el estudio de los trabajos más recientes en este tema. En este sentido, se ha obtenido el mapa acústico del clarinete como una herramienta que pueda optimizar el trabajo de los clarinetistas y, por otra parte, se han aportado una serie de normas prácticas para la ejecución musical que se espera resulten útiles para desarrollar la principal función del músico: la interpretación.

II. LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACION

Aunque los avances en un campo que se antoja vasto han sido notables, varias preguntas permanecen todavía sin respuesta. Se admite que la cuestión fundamental en el perfeccionamiento de los instrumentos de viento madera radica en el diámetro y espaciado de los orificios tonales y en determinar todas las correcciones posibles debido a las desviaciones del modelo geométrico ideal. Especialmente en el clarinete esta cuestión es más ostensible debido, por una parte, a su particular funcionamiento de tubo cerrado, y por otra, a las alteraciones de su tubo. En este instrumento se necesitan diecinueve orificios antes de efectuar el salto por sobresoplado al siguiente registro, lo que conlleva un estudio más exhaustivo y complejo de las posiciones idóneas. Se ha comprobado, asimismo, que a partir de un cierto tamaño de orificio tonal los instrumentos no pueden emitir frecuencias precisas debidas, por lo visto, a las pérdidas que se producen. Asimismo, también se ha observado que, en ocasiones, un orificio pequeño actúa como si estuviese cerrado.

Se han constatado las discrepancias en la afinación causados por un solo orificio de registro, por lo que resulta primordial para la optimización del instrumento trabajar en el diseño de un segundo orificio de registro.

Por lo que respecta al timbre, no está del todo claro en qué medida afecta al color sonoro las resonancias del tracto vocal, así como los diferentes materiales utilizados para fabricar el tubo. En este sentido, aunque se ha podido comprobar del análisis de los trabajos más recientes la influencia de las resonancias del tracto vocal en el resultado tímbrico, no se ha podido definir con precisión cuáles son los parámetros de estudio. Además no existe uniformidad en los resultados obtenidos de los diferentes estudios efectuados mediante simulación a propósito de esta cuestión.

Por otra parte, parece clara la influencia de la boca, la caña y las vibraciones de la pared sobre el funcionamiento acústico del clarinete, pero todavía se desconoce con precisión su magnitud e influencia en el proceso sonoro, en especial, la de este último

fenómeno. En este sentido, del análisis de los estudios que han analizado el proceso de vibración de las cañas y de las vibraciones de la pared se ha observado algunas divergencias en sus resultados experimentales.

Resulta interesante, asimismo, estudiar el fenómeno de la humectación en los orificios y su influencia en la calidad tonal. Es frecuente que en el curso de una interpretación se produzcan ciertos accidentes debido a la acumulación de agua en determinados orificios -el de la llave 7, 8, 9, 10 y 10b, especialmente-, por lo que sería recomendable un estudio en esta línea que pudiese subsanar estas anomalías locales.

Dado que actualmente se demanda por un sector de la comunidad clarinetística la unificación de los dos sistemas de llaves principales, resulta necesario llevar a cabo un estudio comparado de los dos sistemas con el fin de analizar la acústica de cada uno y poder diseñar un instrumento híbrido con las aportaciones más relevantes de cada uno.

Finalmente, no se ha podido determinar en qué medida influye la humectación de la caña en la calidad del tono y la afinación. Aunque se ha constatado el efecto que tiene este fenómeno en las frecuencias, no se ha fundamentado científicamente sus causas.

A continuación, se presentan de forma resumida las propuestas de investigación que se consideran más relevantes para profundizar y avanzar en el estudio de la acústica del clarinete y su optimización:

1.- Estudiar y determinar las pérdidas de energía que se producen en los orificios con un determinado tamaño y las razones de las disfunciones que se producen en los orificios de diámetro pequeño.

2.- Analizar experimentalmente la influencia de las resonancias del tracto vocal en el timbre del clarinete y, en definitiva, en su calidad tonal. Establecer los parámetros que permitan cuantificar la magnitud de la influencia, obteniendo los espectros y las frecuencias.

3.- Determinar las posiciones ideales para un clarinete con dos orificios de registro. Validarlo experimentalmente con un estudio de simulación.

4.- Verificar experimentalmente la incidencia del material del instrumento en el resultado tímbrico.

5.- Determinar todas las posibles correcciones del tubo del clarinete debido a las desviaciones que se producen del modelo ideal geométrico.

6.- Profundizar en el estudio de las propiedades acústicas de las lengüetas y su incidencia en el funcionamiento acústico del instrumento.

7.- Estudiar experimentalmente la influencia de la humectación de la caña en la afinación y determinar científicamente las causas.

8.- Determinar empíricamente la influencia que tiene en el timbre la humectación en los orificios tonales y estudiar el diseño de un mecanismo que permita evitar la condensación de agua en estos orificios sin que ello afecte a la calidad tonal y a la afinación del instrumento.

9.- Realizar un estudio comparado de los dos sistemas base utilizados en el clarinete, analizando sus frecuencias de corte, afinación y calidad tonal, en aras de diseñar un clarinete moderno que aglutine lo mejor de cada sistema. Verificarlo experimentalmente con estudios de simulación.

VII. ANEXOS

FUNDAMENTOS DE ACUSTICA FISIOLÓGICA

La tarea principal del oído (Fig. I.I) consiste en detectar y analizar los ruidos mediante el proceso de transducción. Otra función muy importante del oído es la de mantener el sentido del equilibrio.

La percepción e interpretación del sonido se lleva a cabo subjetivamente por nuestro cerebro, pero antes de que llegue a ese órgano, la sensación sonora experimenta un complejo proceso que se desarrolla en tres fases: captación y procesamiento mecánico de las ondas sonoras, conversión mecánica de la señal acústica en impulsos nerviosos, y transmisión de dichos impulsos hasta los centros sensoriales del cerebro.

La primera y segunda fase se llevan a cabo en el oído propiamente dicho, mientras que la tercera fase, en la cual se producen las diversas sensaciones auditivas, se desarrolla en el cerebro. Así pues, se pueden distinguir dos regiones o partes del sistema auditivo: *la región periférica*, en la cual los estímulos sonoros conservan su carácter original de ondas mecánicas hasta el momento de su conversión en señales electroquímicas, y *la región central*, en la cual se transforman dichas señales en sensaciones.

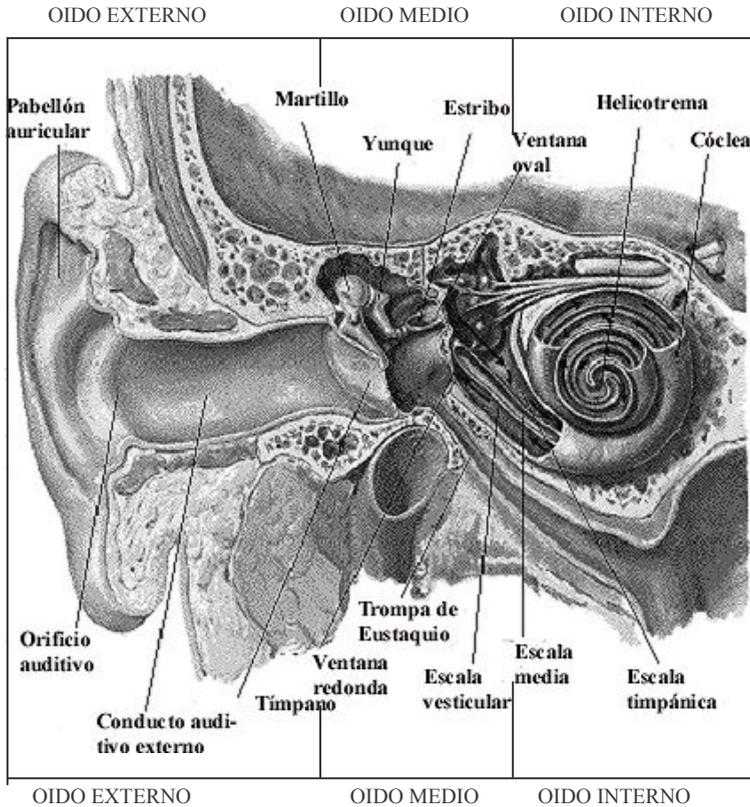
En la región central también intervienen procesos cognitivos, mediante los cuales se asigna un contexto y un significado a los sonidos; es decir, permiten reconocer una palabra o determinar que un sonido dado corresponde a un violín o a un clarinete.

La región periférica u oído se divide usualmente en tres zona: *oído externo*, *oído medio* y *oído interno*.

Los estímulos sonoros se propagan a través de estas zonas por medio de distintas cavidades y conductos, sufriendo diversas transformaciones hasta su conversión final en impulsos nerviosos. Tanto el procesamiento mecánico de las ondas sonoras como la

conversión de éstas en señales electroquímicas son procesos no lineales, lo cual dificulta la caracterización y modelado de los fenómenos perceptuales.

Fig. 1.1 Anatomía del oído humano



Veamos la anatomía y funcionamiento de estas tres zonas del oído, así como la propagación y procesamiento del sonido a través de las mismas.

El oído externo está formado por el *pabellón auricular u oreja*, el cual dirige las ondas sonoras hacia el conducto auditivo externo a través del orificio auditivo. El otro extremo del *conducto auditivo* se encuentra cubierto por la *membrana timpánica o tímpano*, la cual constituye la entrada al oído medio. El *tímpano* está formado por una membrana elástica de unos 10 mm de diámetro, orientada oblicuamente de arriba abajo y cóncava hacia el exterior.

El *conducto auditivo* es un canal de unos 22 mm de longitud, el cual influye en la respuesta en frecuencia del sistema auditivo. Dada la velocidad de propagación del sonido en el aire -aproximadamente 334 m/sg-, dicha longitud corresponde a 1/4 de la longitud de

onda de una señal sonora de unos 4 kHz. Este es uno de los motivos por los cuales el aparato auditivo presenta una mayor sensibilidad a las frecuencias cercanas a los 4 kHz.

La función del oído externo es la de recolectar las ondas sonoras y encauzarlas hacia el oído medio. Asimismo, el conducto auditivo tiene otras funciones adicionales: proteger las delicadas estructuras del oído medio contra daños; minimizar la distancia del oído interno al cerebro, reduciendo el tiempo de propagación de los impulsos nerviosos; reforzar la presión sonora sobre el *tímpano* debido al efecto de resonancia que se produce en este conducto especialmente en las frecuencias comprendidas entre 1000 y 4000 Hz.

Adicionalmente, el pabellón auricular, junto con la cabeza y los hombros, contribuye a modificar el espectro de la señal sonora. Las señales sonoras que entran al conducto auditivo externo sufren efectos de difracción debidos a la forma del pabellón auricular y la cabeza, y estos efectos varían según la dirección de incidencia y el contenido espectral de la señal; así, se altera el espectro sonoro debido a la difracción.

El oído medio está constituido por una cavidad llena de aire, dentro de la cual se alojan tres huesecillos unidos entre sí en forma articulada, denominados *martillo*, *yunque* y *estribo* (Fig. I.II). Uno de los extremos del martillo se encuentra adherido al tímpano, mientras que la base del estribo está unida mediante un anillo flexible a las paredes de la *ventana oval*, orificio que constituye la vía de entrada del sonido al oído interno.

Finalmente, la cavidad del oído medio se comunica con el exterior del cuerpo a través de un conducto, denominado la *trompa de Eustaquio*, que llega hasta las vías respiratorias y que permite igualar la presión del aire a ambos lados del tímpano.

Los sonidos, formados por oscilaciones de las moléculas del aire, son conducidos a través del conducto auditivo hasta el tímpano. Los cambios de presión en la pared externa de la membrana timpánica, asociados a la señal sonora, hacen que dicha membrana vibre siguiendo las oscilaciones de dicha señal. Las vibraciones del tímpano se transmiten a lo largo de la cadena de huesecillos, la cual opera como un sistema de palancas, de forma tal que la base del estribo vibra en la ventana oval. Este huesecillo se encuentra en contacto con uno de los fluidos contenidos en el oído interno; por lo tanto, el tímpano y la cadena de huesecillos actúan como un mecanismo para transformar las vibraciones del aire en vibraciones del fluido.

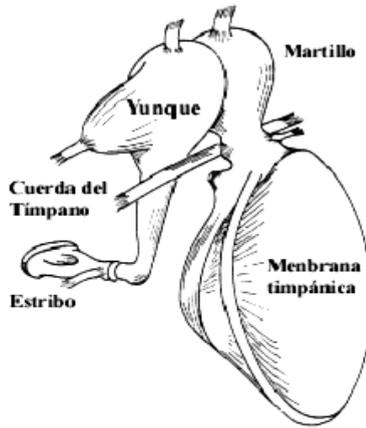
Ahora bien, para lograr que la transferencia de potencia del aire al fluido sea máxima, debe efectuarse un acoplamiento entre la impedancia mecánica característica del aire y la del fluido, puesto que esta última es mucho mayor que la primera. La cadena de huesecillos actúa como acoplador de impedancias. Además, la relación entre las superficies del tímpano y de la base del estribo -en la ventana oval- introduce un efecto de acoplamiento adicional, lográndose una transformación de impedancias del orden de 1:20, con lo cual se minimizan las pérdidas por reflexión. El máximo acoplamiento se obtiene en el rango de frecuencias medias, en torno a 1 kHz.

Cuando se aplican sonidos de gran intensidad (> 90 dB SPL) al tímpano, los músculos tensores del tímpano y el estribo se contraen de forma automática, modificando la característica de transferencia del oído medio y disminuyendo la cantidad de energía entregada al oído interno.

Este *control de ganancia* se denomina reflejo timpánico o auditivo, y tiene como propósito proteger a las células receptoras del oído interno frente a sobrecargas que puedan llegar a destruirlas. Este reflejo no es instantáneo, sino que tarda de 40 a 160 m/sg en producirse.

El reflejo timpánico debe ser tomado en cuenta en cualquier modelo matemático de procesamiento del sonido en el aparato auditivo, siempre que se trabaje con sonidos de gran intensidad, puesto que es un mecanismo no lineal que introduce un término cuadrático en la relación entrada-salida del oído medio.

Fig. I.II Estructura de los huesecillos del oído medio



El oído interno representa el final de la cadena de procesamiento mecánico del sonido y en él se llevan a cabo tres funciones primordiales: filtraje de la señal sonora, transducción y generación probabilística de impulsos nerviosos.

En el oído interno se encuentra un conducto rígido, en forma de espiral, de unos 35 mm de longitud, lleno con dos fluidos de distinta composición, denominado *cóclea o caracol* -Fig. I.III-. El interior del conducto está dividido en sentido longitudinal por la *membrana basilar* y la *membrana de Reissner*, las cuales forman tres compartimientos o escalas. La *escala vestibular* y la *escala timpánica* contienen un mismo fluido -*perilinf*- puesto que se interconectan por una pequeña abertura situada en el vértice del caracol, llamada *helicotrema*. Por el contrario, la escala media se encuentra aislada de las otras dos escalas, y contiene un líquido de distinta composición a la *perilinf* -*endolinf*-.

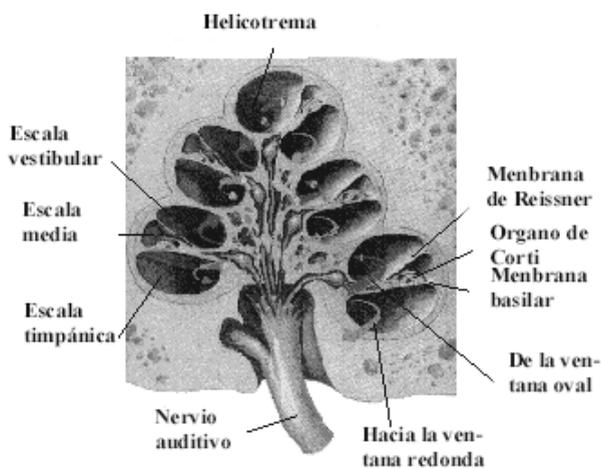
La base del estribo, a través de la *ventana oval*, está en contacto con el fluido de la escala vestibular, mientras que la escala timpánica desemboca en la cavidad del oído medio a través de otra abertura denominada *ventana redonda* que se halla sellada por una membrana flexible llamada *membrana timpánica secundaria*. En la zona más próxima a la ventana oval se encuentra la zona sensible a las altas frecuencias, mientras que en el extremo final de la misma se halla la región más sensible a las frecuencias bajas.

Sobre la membrana basilar y en el interior de la escala media se encuentra el *órgano de Corti*, el cual se extiende desde el vértice hasta la base de la *cóclea* y contiene las *células ciliares* que actúan como transductores de señales sonoras a impulsos nerviosos.

Sobre las células ciliares se ubica la *membrana tectorial* que aloja las prolongaciones o cilios de las *células ciliares externas*.

Dependiendo de su ubicación en el órgano de Corti, se pueden distinguir dos tipos de *células ciliares*: *internas* y *externas*. Existen alrededor de 3500 *células ciliares internas* y unas 20000 *células externas*. Ambos tipos de células presentan conexiones o sinapsis con las fibras nerviosas *aférentes* que transportan impulsos hacia el cerebro, y *eferentes*, que transportan impulsos provenientes del cerebro, las cuales conforman el nervio auditivo. Sin embargo, la distribución de las fibras es muy desigual: más del 90% de las fibras *aférentes* inervan a las *células ciliares internas*, mientras que la mayoría de las 500 fibras *eferentes* inervan a las *células ciliares externas*.

Fig. I.III Corte transversal de la cóclea o caracol



Las oscilaciones del estribo provocan oscilaciones en el fluido de la escala vestibular *-perilíngfa-*. La *membrana de Reissner*, que separa los fluidos de la escala vestibular y la escala media, es sumamente delgada y, en consecuencia, los líquidos en ambas escalas pueden tratarse como uno solo desde el punto de vista de la dinámica de los fluidos. Así, las oscilaciones en la perilíngfa de la escala vestibular se transmiten a la endolíngfa y de ésta a la membrana basilar; la membrana basilar, a su vez, provoca oscilaciones en el fluido de la escala timpánica.

La propagación de las oscilaciones del fluido en la escala vestibular a la timpánica no sólo se lleva a cabo a través de la membrana basilar; para sonidos de muy baja frecuencia, las vibraciones se transmiten a través de la abertura situada en el vértice de la cóclea *-helicotrema-*.

Las señales en la cóclea son codificadas y transformadas en impulsos electroquímicos *-por medio de tres neuronas-* por el *órgano de Corti*, y se propagan por el nervio acústico hasta llegar a nuestro cerebro y convertirse en sonido.

En conclusión, las ondas sonoras se introducen por el pabellón auricular y el canal auditivo para luego impresionar la membrana timpánica donde experimenta la primera transformación. A partir de aquí la onda recorre una serie de conductos y cavidades para sufrir una nueva transducción en la cóclea, donde las oscilaciones en los fluidos hacen vibrar a la membrana basilar y a todas las estructuras que ésta soporta, para finalmente llegar al nervio acústico.

ANEXO II

FRECUENCIAS NOMINALES DE LA ESCALA DEL CLARINETE

Tabla II.1 Frecuencias nominales de la escala del clarinete a 440, 442 y 445 Hz

Notas	440	442	445	Notas	440	442	445
Mi₂	146'83	147'49	148'37	Sol#₃	370'00	371'66	374'16
Fa₂	155'56	156'26	157'32	La₃	392'00	393'76	396'42
Fa#₂	164'81	165'55	166'67	La#₃	415'30	417'16	419'99
Sol₂	174'61	175'40	176'58	Si₃	440'00	442'00	445'00
Sol#₂	185'00	185'83	187'08	Do₄	466'16	468'26	471'45
La₂	196'00	196'88	198'21	Do#₄	493'88	496'10	499'49
La#₂	207'65	208'58	209'99	Re₄	523'26	525'60	529'18
Si₂	220'00	221'00	222'50	Re#₄	554'36	556'84	560'64
Do₃	233'08	234'13	235'72	Mi₄	587'32	589'96	593'48
Do#₃	246'94	246'94	249'74	Fa₄	622'25	625'04	629'29
Re₃	261'63	261'63	264'59	Fa#₄	659'94	662'20	666'71
Re#₃	277'18	277'18	280'32	Sol₄	698'44	701'60	706'35
Mi₃	293'66	294'98	296'74	Sol#₄	740'00	746'32	748'35
Fa₃	311'12	312'52	314'16	La₄	784'00	787'52	782'84
Fa#₃	329'62	331'10	333'35	La#₄	830'60	834'32	839'98
Sol₃	349'22	350'80	353'18	Si₄	880'00	884'00	890'00

Notas	440	442	445
Do₅	832'33	836'52	942'91
Do#₅	987'70	992'20	998'98
Re₅	1046'52	1051'20	1058'36
Re#₅	1108'73	113'68	1121'29
Mi₅	1174'05	1179'92	1186'96
Fa₅	1244'50	1250'08	1258'58
Fa#₅	1318'48	1324'40	1333'42
Sol₅	1396'88	1403'20	1412'70
Sol#₅	1480'00	1486'64	1496'60
La₅	1568'00	1575'04	1585'68
La#₅	1661'20	1668'64	1679'96
Si₅	1760'00	1768'00	1780'00
Do₆	1664'64	1873'04	1885'80
Do#₆	1975'52	1984'40	1997'96
Re₆	2093'04	2102'40	2116'72
Re#₆	2217'46	2227'36	2242'58

ANEXO III

INDICES ACUSTICO-MUSICALES

Los índices acústico-musicales fueron inventados con el fin de expresar y ordenar los sonidos en sentido ascendente y fijar su altura dentro de la escala general (Fig. III.I). De este modo se atribuye a cada sonido un número situado en la parte inferior derecha de éste, a modo de subíndice, que designa a qué octava pertenece. La escala general -diez octavas- queda así dividida en series de siete notas, cada una de las cuales comprende una octava. Es, por tanto, una forma de expresión de los sonidos numerando las diferentes octavas de la escala general, y de diferenciar los sonidos homónimos, esto es, del mismo nombre pero con diferentes alturas. La extensión del índice viene determinada obviamente por la cualidad audible de cada sonido. En este sentido, los índices agrupan diez octavas susceptibles de ser audibles por el oído humano. La primera octava comienza en los 16 Hz, que es el umbral inferior de audición, y la última alcanza los 20000 Hz, umbral superior de audición. Sin embargo se deben matizar estos límites dado que en la práctica esto no sucede de este modo. Efectivamente debemos diferenciar los límites de percepción establecidos anteriormente y los de identificación sonora, los cuales nos permiten precisar e identificar un sonido en base a su altura. En tal caso, estos límites quedan establecidos entre las 27 y las 4716 vibraciones por segundo aproximadamente. Podemos obtener una aproximación de estos límites observando el teclado o la extensión de un piano, puesto que ambos son equivalentes.

Existe una gran variedad de índices, cada uno de los cuales comienza la numeración de un modo diferente, pero el más generalizado en España y que más se utiliza por los clarinetistas es el franco belga (Fig. III.I), el cual comienza la primera octava en -2,

la segunda en -1, la tercera en 1, la cuarta en 2, y así sucesivamente hasta la décima octava. Dado que la escala del clarinete tipo en Sib se inicia en la cuarta octava, el primer sonido -el Mi grave- se numera con el 2. Por su parte, el índice más utilizado por los americanos y parte de Europa inicia la escala general en 0.

Fig. III.I Extensión de la escala general

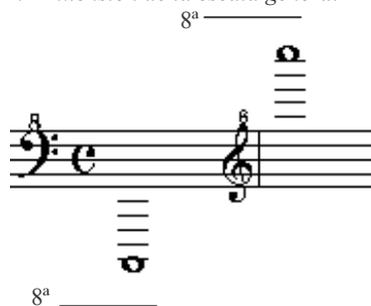
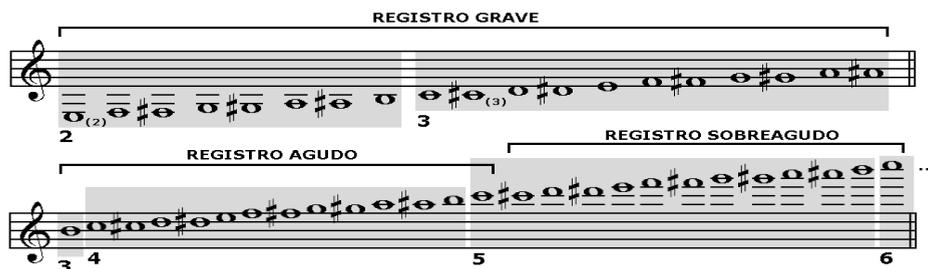


Tabla III.I Índices acústico musicales más empleados

OCTAVA	INDICES MAS USADOS	
primera	Do ₀	Do ₋₀
segunda	Do ₁	Do ₋₁
tercera	Do ₂	Do ₁
cuarta	Do ₃	Do ₂
quinta	Do ₄	Do ₃
sexta	Do ₅	Do ₄
séptima	Do ₆	Do ₅
octava	Do ₇	Do ₆
novena	Do ₈	Do ₇
décima	Do ₉	Do ₈
	Do ₁₀	Do ₉

A continuación se muestra la escala general del clarinete de acuerdo con el índice franco belga:

Fig. III.II Notación musical de la escala cromática del clarinete según el índice musical franco belga



SERIES ARMONICAS

En este apéndice se aportan las series armónicas de cada nota fundamental. Cada gama comprende únicamente los 16 primeros armónicos, dado que son estos los que hemos estudiado en el capítulo 7 y, por otra parte, en los espectrogramas no figuran armónicos más allá del número 16, salvo excepciones. Su concurso va a coadyuvar a la localización de cualquier armónico para conocer su naturaleza y/o origen en el menor tiempo posible solo con consultar una serie determinada. En fin, será necesario para asociar los armónicos que figuran numerados en algunos parámetros o indicadores con las notas de la escala.

Hay que señalar en relación con este asunto, que de acuerdo con lo que se expuso en el capítulo donde estudiamos los armónicos, cualquier sonido del registro agudo o sobregado puede considerarse bien como armónico de una determinada fundamental desde el punto de vista de su origen, bien como complejos sonoros -pues contienen componentes armónicos- y/o fundamentales desde la óptica de su naturaleza armónica, a partir de las cuales se puede construir su propia serie armónica. No obstante, en el caso que nos ocupa, solo los armónicos de las fundamentales pueden utilizarse como notas de la escala. Los componentes armónicos de los sonidos del registro agudo y sobregado solo tienen una función configuradora del timbre.

Las notas subrayadas corresponden a los sonidos útiles como notas de la escala, esto es, que pueden ser utilizados en la ejecución musical por sus óptimas prestaciones acústicas. Además, los sonidos 7, 11, 13 y 14 figuran en negrita debido a que su tésitura se diferencia considerablemente de la real, esto es, su afinación queda por debajo de los valores normales¹²⁸. En suma, su consulta nos aportará una información formidable a la hora de estudiar y comprender la afinación del instrumento.

¹²⁸ Véase apartado 7.2.

Tabla IV.1 Series armónicas de los sonidos de la escala del clarinete

Notas	Series armónicas	Notas	Series armónicas
Mi₂	<u>Mi₂</u> , Mi ₃ , <u>Si₃</u> , Mi ₄ , Sol# ₄ , Si ₄ , Re₅ , Mi ₅ , <u>Fa#₅</u> , Sol# ₅ , <u>La#₅</u> , Si ₆ , Do₆ , Re₆ , Re# ₆ y Mi ₆ .	Fa₃	<u>Fa₃</u> , Fa ₄ , <u>Do₅</u> , Fa ₅ , <u>La₅</u> , Do ₆ , Re#₆ , Fa ₆ , Sol ₆ , La ₆ , Si₆ , Si# ₆ , Do#₇ , Re#₇ , Mi ₇ y Fa ₇ .
Fa₂	<u>Fa₂</u> , Fa ₃ , <u>Do₃</u> , Fa ₄ , La ₄ , Do ₄ , Re#₅ , Fa ₅ , <u>Sol₅</u> , La ₅ , <u>Si₅</u> , Do ₆ , Do#₆ , Re#₆ , Mi ₆ y Fa ₆ .	Fa#₃	<u>Fa#₃</u> , Fa# ₄ , <u>Do#₅</u> , Fa# ₅ , <u>La#₅</u> , Do# ₆ , <u>Mi₆</u> , Fa# ₆ , Sol# ₆ , La# ₆ , Do#₇ , Re ₇ , Re#₇ , Mi₇ , Mi# ₇ y Fa# ₇ .
Fa#₂	<u>Fa#₂</u> , Fa# ₃ , <u>Do#₃</u> , Fa# ₄ , La# ₄ , Do# ₄ , Mi₅ , Fa# ₅ , <u>Sol#₅</u> , Fa# ₅ , Do₆ , Do# ₆ , Re₆ , Mi₆ , Fa ₆ y Fa# ₆ .	Sol₃	<u>Sol₃</u> , Sol ₄ , <u>Re₅</u> , Sol ₅ , <u>Si₅</u> , Re ₆ , Fa₆ , Sol ₆ , La ₆ , Si ₆ , Do#₇ , Re ₇ , Re#₇ , Mi₇ , Fa# ₇ y Sol ₇ .
Sol₂	<u>Sol₂</u> , Sol ₃ , Re ₃ , Sol ₄ , <u>Si₄</u> , Re ₄ , Fa₅ , Sol ₅ , <u>La₅</u> , Si ₅ , Do#₆ , Re ₆ , Re#₆ , Mi#₆ , Fa# ₆ y Sol ₆ .	Sol#₃	<u>Sol#₃</u> , Sol# ₄ , <u>Re#₅</u> , Sol# ₅ , <u>Si#₅</u> , Re# ₆ , Fa#₆ , Sol# ₆ , La# ₆ , Si# ₆ , Re₇ , Re# ₇ , Mi₇ , Fa#₇ , Sol ₇ y Sol# ₇ .
Sol#₂	<u>Sol#₂</u> , Sol# ₃ , <u>Re#₃</u> , Sol# ₄ , <u>Do₄</u> , Re# ₄ , Fa#₅ , Sol# ₅ , <u>La#₅</u> , Si# ₅ , Re₆ , Re# ₆ , Mi₆ , Fa#₆ , Sol ₆ y Sol# ₆ .	La₃	<u>La₃</u> , La ₄ , <u>Mi₅</u> , La ₅ , <u>Do#₅</u> , Mi# ₆ , Sol₆ , La ₆ , Si ₆ , Do# ₇ , Re#₇ , Mi ₇ , Fa₇ , Sol₇ , Sol# ₇ y La ₇ .
La₂	<u>La₂</u> , La ₃ , <u>Mi₃</u> , La ₄ , <u>Do#₄</u> , Mi ₄ , <u>Sol₅</u> , La ₅ , <u>Si₅</u> , Do# ₅ , Re#₆ , Mi ₆ , Fa₆ , Sol₆ , Sol# ₆ y La ₆ .	La#₃	<u>La#₃</u> , La# ₄ , <u>Mi#₅</u> , La# ₅ , <u>Re₅</u> , Fa# ₆ , Sol#₆ , La# ₆ , Si# ₆ , Re ₇ , Mi₇ , Mi# ₇ , Fa#₇ , Sol#₇ , La ₇ y La# ₇ .
La#₂	<u>La#₂</u> , La# ₃ , <u>Mi#₃</u> , La# ₄ , <u>Re₄</u> , Mi# ₄ , <u>Sol#₅</u> , La# ₅ , <u>Si#₅</u> , Re ₅ , Mi₆ , Mi# ₆ , Fa#₆ , Sol#₆ , La ₆ y La# ₆ .	Si₃	Si ₃ , Si ₄ , Fa# ₅ , Si ₅ , Re# ₅ , Sol ₆ , La₆ , Si ₆ , Do# ₇ , Re# ₇ , Mi#₇ , Fa# ₇ , Sol₇ , La ₇ , La# ₇ y Si ₇ .
Si₂	<u>Si₂</u> , Si ₃ , <u>Fa#₃</u> , Si ₄ , <u>Re#₄</u> , Fa# ₄ , <u>La₅</u> , Si ₅ , <u>Do#₆</u> , Re# ₅ , Mi#₆ , Fa# ₆ , Sol₆ , La₆ , La# ₆ y Si ₆ .	Do₄	Do ₄ , Do ₅ , Sol ₅ , Do ₆ , Mi ₆ , Sol# ₆ , La₆ , Do ₇ , Re ₇ , Mi ₇ , Sol₇ , Sol# ₇ , La₇ , La#₇ , Si ₇ y Do ₈ .
Do₃	<u>Do₃</u> , Do ₄ , <u>Sol₄</u> , Do ₅ , <u>Mi₅</u> , Sol ₅ , <u>La#₅</u> , Do ₆ , <u>Re₆</u> , Mi ₆ , Fa#₆ , Sol ₆ , Sol#₆ , La#₆ , Si ₆ y Do ₇ .	Do#₄	Do# ₄ , Do# ₅ , Sol# ₅ , Do# ₆ , Mi# ₆ , La ₆ , La#₆ , Do# ₇ , Re# ₇ , Mi# ₇ , Sol#₇ , La ₇ , La#₇ , Si₇ , Si# ₇ y Do# ₈ .
Do#₃	<u>Do#₃</u> , Do# ₄ , <u>Sol#₄</u> , Do# ₅ , <u>Mi#₅</u> , Sol# ₅ , <u>Si₅</u> , Do# ₆ , <u>Re#₆</u> , Mi# ₆ , Sol₆ , Sol# ₆ , La₆ , Si₆ , Si# ₆ y Do# ₇ .	Re₄	Re ₄ , Re ₅ , La ₅ , Re ₆ , Fa# ₆ , La# ₆ , Si₆ , Re ₇ , Mi ₇ , Fa# ₇ , La₇ , La# ₇ , Si₇ , Si#₇ , Do ₈ y Re ₈ .
Re₃	<u>Re₃</u> , Re ₄ , <u>La₄</u> , Re ₅ , <u>Fa#₅</u> , La ₅ , <u>Do₅</u> , Re ₆ , <u>Mi₆</u> , Fa# ₆ , Sol#₆ , La ₆ , La#₆ , Si#₆ , Do# ₇ y Re ₇ .	Re#₄	Re# ₄ , Re# ₅ , La# ₅ , Re# ₆ , Sol ₆ , Si ₆ , Do₇ , Re# ₇ , Fa ₇ , Sol ₇ , La#₇ , Si ₇ , Si#₇ , Do#₈ , Re ₈ y Re# ₈ .
Re#₃	<u>Re#₃</u> , Re# ₄ , <u>La#₄</u> , Re# ₅ , <u>Sol₅</u> , La# ₅ , <u>Do#₆</u> , Re# ₆ , Mi# ₆ , Sol ₆ , La₆ , La# ₆ , Si₆ , Do#₇ , Re ₇ y Re# ₇ .	Mi₄	Mi ₄ , Mi ₅ , Si ₅ , Mi ₆ , Sol# ₆ , Do ₇ , Do#₇ , Mi ₇ , Fa# ₇ , Sol# ₇ , Si₇ , Do ₈ , Do#₈ , Re₈ , Re# ₈ y Mi ₈ .
Mi₃	<u>Mi₃</u> , Mi ₄ , <u>Si₄</u> , Mi ₅ , <u>Sol#₅</u> , Si ₅ , Re₆ , Mi ₆ , Fa# ₆ , Sol# ₆ , La#₆ , Si ₆ , Si#₆ , Re₇ , Re# ₇ y Mi ₇ .	Fa₄	Fa ₄ , Fa ₅ , Do ₆ , Fa ₆ , La# ₆ , Do# ₇ , Re₇ , Fa ₇ , Sol ₇ , La# ₇ , Do₈ , Do# ₈ , Re₈ , Re#₈ , Mi ₈ y Fa ₈ .

Notas	Series armónicas	Notas	Series armónicas
Fa#₄	<i>Fa#4, Fa#5, Do#6, Fa#6, Si6, Re7, Re#7, Fa#7, Sol#7, Si7, Do#8, Re8, Re#8, Mi8, Mi#8 y Fa#8.</i>	Mi₅	<i>Mi5, Mi6, Si6, Mi7, La7, Do8, Do#8, Mi8, Fa#8, La8, Si8, Do9, Do#9, Re9, Re#9 y Mi9.</i>
Sol₄	<i>Sol4, Sol5, Re6, Sol6, Do7, Re#7, Mi7, Sol7, La7, Do8, Re8, Re#8, Mi8, Mi#8, Fa#8 y Sol8.</i>	Fa₅	<i>Fa5, Fa6, Do7, Fa7, Si7, Do#8, Re8, Fa8, Sol8, La#8, Do9, Do#9, Re9, Re#9, Mi9 y Fa9.</i>
Sol#₄	<i>Sol#4, Sol#5, Re#6, Sol#6, Do#7, Mi7, Mi#7, Sol#7, La#7, Do#8, Re#8, Mi8, Mi#8, Fa8, Sol8 y Sol#8.</i>	Fa#₅	<i>Fa#5, Fa#6, Do#7, Fa#7, Si#7, Re8, Re#8, Fa#8, Sol#8, Si8, Do#9, Re9, Re#9, Mi9, Fa9 y Fa#9.</i>
La₄	<i>La4, La5, Mi6, La6, Re7, Fa7, Fa#7, La7, Si7, Re#8, Mi8, Fa8, Fa#8, Fa#8, Sol#8 y La8.</i>	Sol₅	<i>Sol5, Sol6, Re7, Sol7, Do#8, Re#8, Mi8, Sol8, La8, Si#8, Re9, Re#9, Mi9, Fa9, Fa#9 y Sol9.</i>
La#₄	<i>La#4, La#5, Mi#6, La#6, Re#7, Fa#7, Sol7, La#7, Si#7, Mi8, Mi#8, Fa#8, Sol8, Sol#8, La8 y La#8.</i>	Sol#₅	<i>Sol#5, Sol#6, Re#7, Sol#7, Re8, Mi8, Mi#8, Sol#8, La#8, Do#9, Re#9, Mi9, Mi#9, Fa#9, Sol9 y Sol#9.</i>
Si₄	<i>Si4, Si5, Fa#6, Si6, Mi7, Sol7, Sol#7, Si7, Do#7, Mi#8, Fa#8, Sol8, Sol#8, La8, La#8 y Si8.</i>	La₅	<i>La5, La6, Mi7, La7, Re#8, Mi#8, Fa#8, La8, Si8, Re9, Mi9, Mi#9, Fa#9, Sol#9, Sol#9 y La9.</i>
Do₅	<i>Do5, Do6, Sol6, Do7, Fa7, Sol#7, La7, Do8, Re8, Fa8, Sol8, Sol#8, La8, La#8, Si8 y Do9.</i>	La#₅	<i>La#5, La#6, Mi#7, La#7, Mi8, Fa8, Sol8, La#8, Si#8, Re#9, Mi#9, Fa#9, Sol9, Sol#9, La9 y La#9.</i>
Do#₅	<i>Do#5, Do#6, Sol#6, Do#7, Fa#7, La7, La#7, Do#8, Re#8, Fa#8, Sol#8, La8, La#8, Si8, Do9 y Do#9.</i>	Si₅	<i>Si5, Si6, Fa#7, Si7, Mi#8, Fa#8, Sol#8, Si8, Do9, Mi9, Fa#9, Sol9, Sol#9, La9, La#9 y Si9.</i>
Re₅	<i>Re5, Re6, La6, Re7, Sol7, La#7, Si7, Re8, Mi8, Sol8, La8, La#8, Si8, Si#8, Do#9 y Re9.</i>	Do₆	<i>Do6, Do7, Sol7, Do8, Fa#8, Sol8, La8, Do9, Do#9, Mi#9, Sol9, Sol#9, La9, La#9, Si9 y Do10.</i>
Re#₅	<i>Re#5, Re#6, La#6, Re#7, Sol#7, Si7, Si#7, Re#8, Mi#8, Sol#8, La#8, Si8, Si#8, Do#9, Re9 y Re#9.</i>		

ESTRUCTURA MORFOLOGICA DEL CLARINETE

Fig. V.1 Gráfico del clarinete con indicación de sus llaves y orificios

(Las flechas rojas indican los orificios)

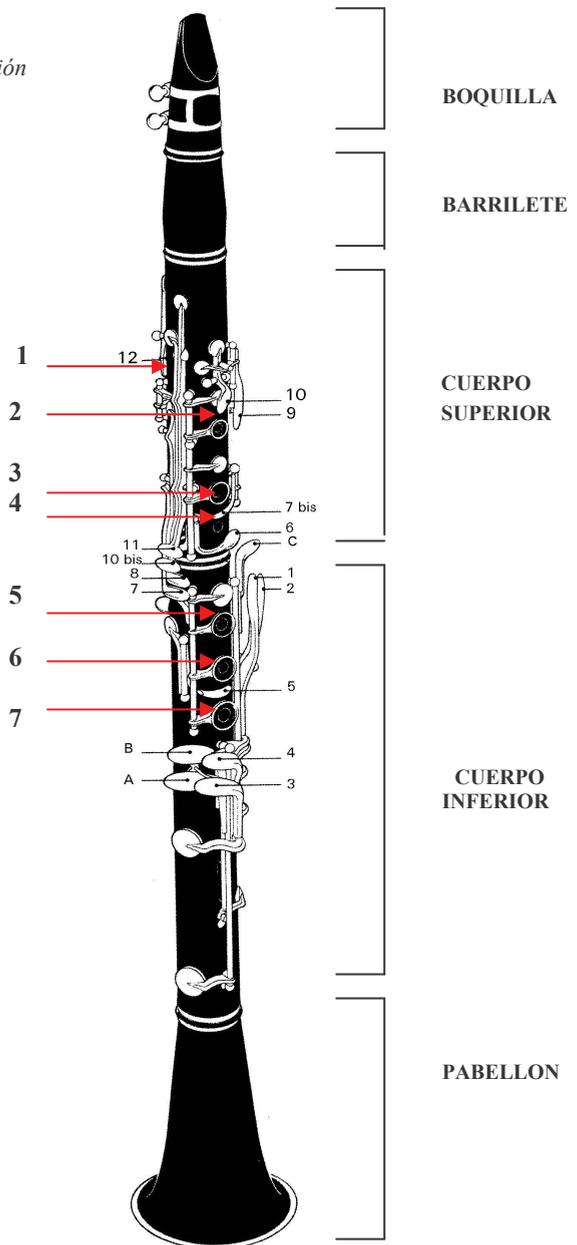
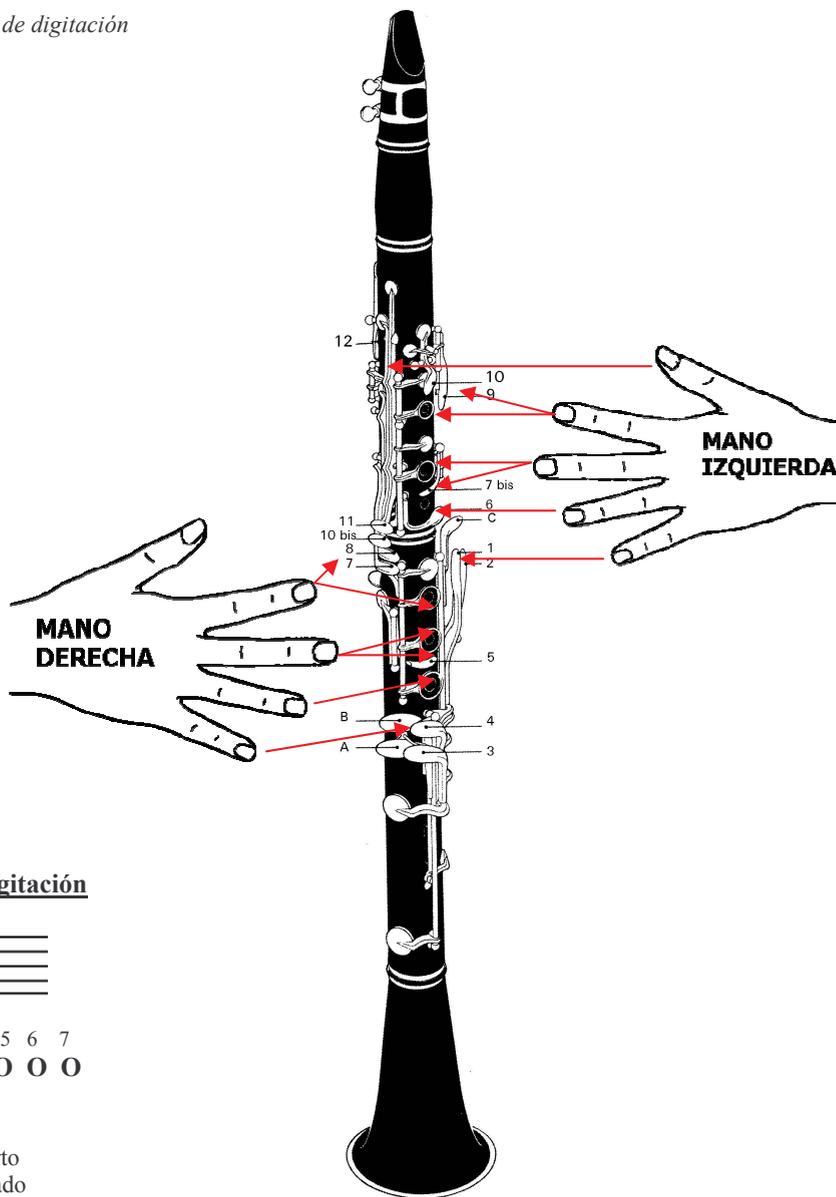
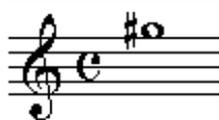


GRAFICO DE DIGITACION

Fig. VI.1 Grafico de digitación



Ejemplo de Digitación



1 2 3 4 5 6 7
 X / X X X / O O O
 12,6

X : Orificio abierto

O : Orificio cerrado

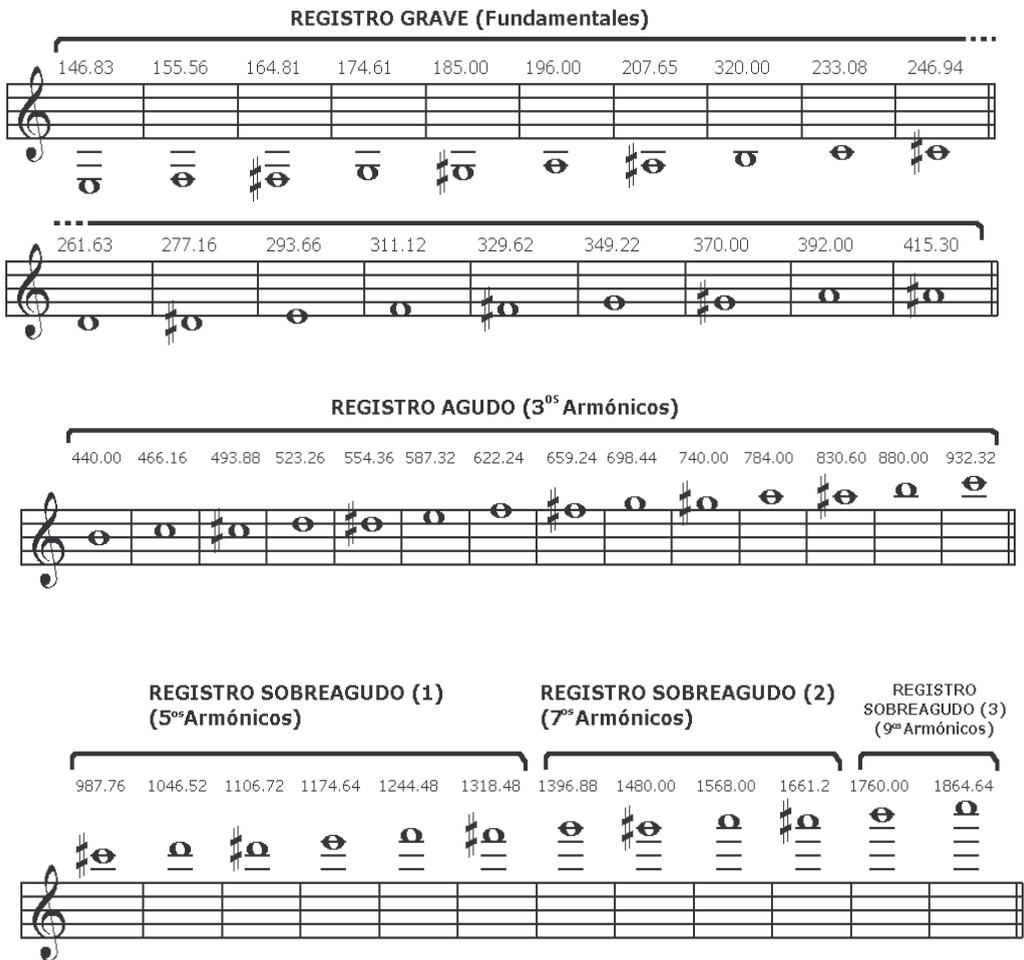
12,6: Llaves accionadas

(Los números de la parte superior indican la disposición de los orificios)

ANEXO VII

EXTENSIÓN DEL CLARINETE

Fig. VII.I Extensión del clarinete (digitaciones básicas) con expresión de sus frecuencias nominales (a 440 Hz), registros y naturaleza



CLASIFICACION DE LOS INSTRUMENTOS DE VIENTO MADERA

El principio acústico que rige el funcionamiento de los instrumentos de viento es la vibración de la masa de aire que se halla contenida en el interior del tubo. Partiendo de esta norma fundamental, la clasificación usual de los instrumentos *aerófonos*¹²⁹ se estructura en dos ramas principales: instrumentos de madera e instrumentos de metal. Esta clasificación es la más simple y general, y su criterio de ordenación esta basado en el material con el cual se construye el instrumento. Además, deriva de la composición y estructuración de la orquesta, que se divide en grandes grupos instrumentales con cualidades acústicas y musicales bastante homogéneas, a saber, timbre, versatilidad, expresividad, etc.

Es menester, no obstante, hacer la siguiente observación, pues la susodicha clasificación resulta un tanto arbitraria y poco rigurosa. En efecto, así como los instrumentos de considerados de metal -la trompeta, la trompa, la tuba y el trombón- se construyen invariablemente de metal, no sucede lo mismo en los de madera. En estos instrumentos se utiliza tanto la madera como el metal. Es el caso de la flauta travesera que aunque se construye actualmente de plata o de una aleación, antiguamente se fabricaba de madera -por no decir de las flautas verticales que son todas de madera-. Lo mismo sucede con el saxofón que se construye siempre de metal pero se le considera como instrumento de viento madera. Sin embargo existe un nexo de unión entre todos estos instrumentos que lo constituye la forma con la que obtienen los sonidos. Es, pues, esta razón la que determina en mayor medida la mencionada clasificación y no el material para su construcción, pues ya

¹²⁹ De forma genérica, se entienden incluidos en esta especie aquellos instrumentos cuyo elemento vibratorio primario lo constituye el aire.

hemos visto que el grupo es un tanto heterogéneo desde el punto de vista del material con el que se construyen y este criterio de clasificación, por tanto, parece poco riguroso.

La clasificación de instrumentos corresponde a la *organología*, considerada como una rama importante de la musicología. A lo largo de la historia musical se han establecido varios sistemas de clasificación en base a diversos criterios teóricos o prácticos. En general, todos los instrumentos se estructuran de forma que sus componentes puedan desempeñar las dos funciones principales que tienen encomendadas, a saber: por una parte, generar los tonos musicales, y por otra, amplificar y optimizar esos sonidos. Veamos de forma sintética los más relevantes en lo que atañe al instrumento que nos ocupa:

*Clasificación de F. A. Gevaert*¹³¹. Este musicólogo estableció una clasificación en tres grupos en orden a su afinación: *instrumentos de entonación libre, variable o fija*. Los instrumentos de viento madera los clasificó como instrumentos de *entonación variable*, esto es, aquellos que pueden variar ligeramente las frecuencias de sus sonidos. Dentro de esta ordenación estableció otra en base a la forma de excitación de la columna gaseosa contenida en el tubo. Así diferenciaba entre instrumentos de boca *-lateral o de bisel-*, e instrumentos *de lengüeta -batiente o doble-* con tubo cilíndrico o cónico.

*Clasificación de J. Zamacois*¹³² Esta clasificación denomina a los instrumentos de viento madera *aerófonos* y los ordena también según el modo de excitación, es decir, en base a su embocadura o modo de ataque. La ordenación queda del siguiente modo: *instrumentos de embocadura directa*, que puede ser lateral o de bisel *-la flauta recta y la flauta lateral, respectivamente-*; *instrumentos de embocadura de lengüeta*: simple batiente o doble. Dentro de los primeros tenemos instrumentos de tubo cilíndrico y cónico *-clarinete-*, e instrumentos de tubo cónico *-saxofón-*, mientras que entre los segundos se encuentran solo los de tubo cónico *-oboe y fagot-*. Además establecía una distinción entre instrumentos transpositores¹³³ *-clarinete y saxofón-* y no transpositores *-oboe, flauta y fagot-*.

*Clasificación de C. Sachs*¹³⁴ y *E. Hornbostel*¹³⁵. Estos teóricos llevaron a cabo una ordenación completa y rigurosa de los instrumentos musicales en cinco grupos que solventaba las deficiencias de la clasificación tradicional basada en el criterio del principio acústico de los instrumentos. Por lo que respecta a los instrumentos de viento, los clasificó como *aerófonos* en dos subgrupos: de columna y libres. Los de viento madera los adscribía al primer subgrupo pues constaban de un tubo sonoro cuya columna aérea constituía el cuerpo sonoro. Dentro de estos, a su vez, establecía dos géneros: instrumentos de bisel *-flautas-* e instrumentos de caña, los cuales podían dividirse en caña simple *-clarinete y saxofón-* o doble *-oboe y fagot-*.

Pues bien, de todas las clasificaciones, esta última se me antoja la más lógica y completa pues agrupa a todas las familias instrumentales y además dentro de éstas distingue

¹³¹ Compositor y musicólogo belga nacido en Huyse en 1828. Fue Director del Conservatorio de Bruselas y autor de un gran número de obras teóricas sobre musicología. Fallece en Bruselas en 1908.

¹³² Compositor y pianista español nacido en Chile. Escribió numerosas obras de teoría y musicología.

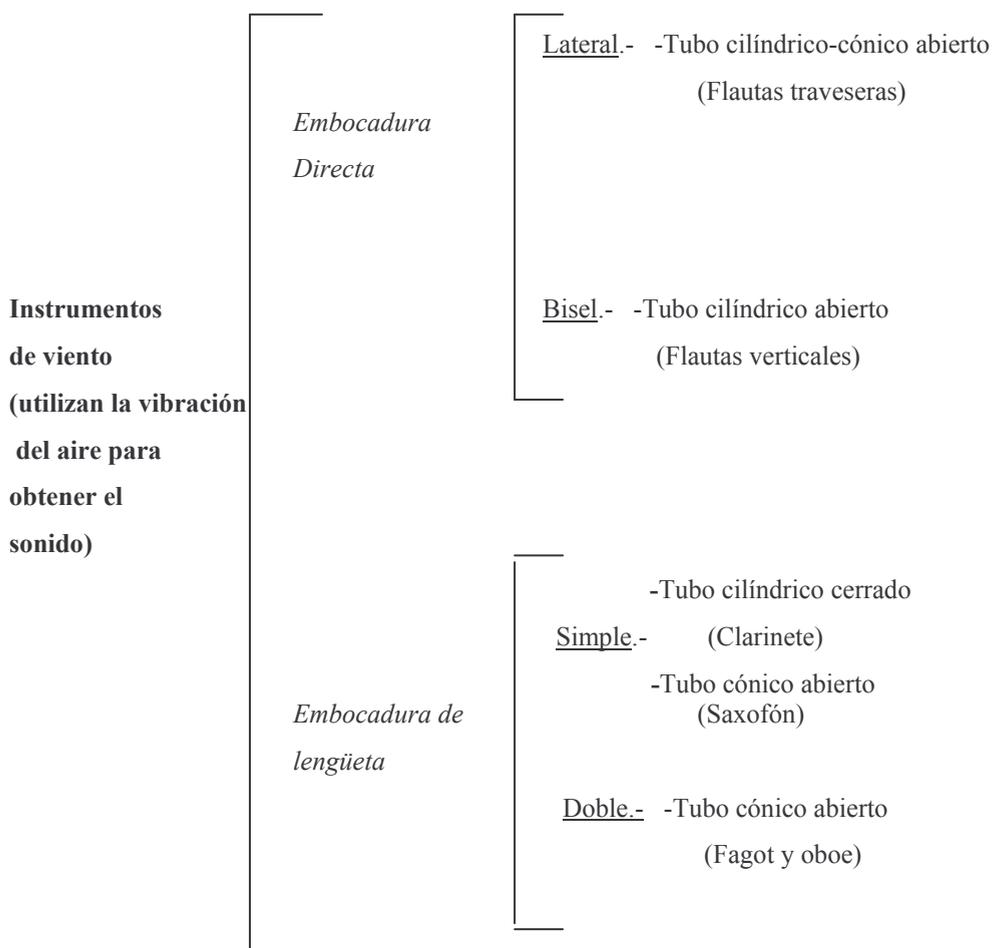
¹³³ Véase el apartado 12.2.

¹³⁴ Musicólogo nacido en Berlín en 1881. Considerado la primera autoridad en materia de instrumentos musicales, desarrolla una larga tarea investigadora sobre este campo, publicando excelentes trabajos musicológicos. Fallece en Nueva York en 1959.

¹³⁵ Teórico y musicólogo austríaco nacido en Viena en 1877. Realiza una clasificación de instrumentos completa y lógica que venía a renovar la clasificación tradicional. Fallece en Cambridge en 1935.

géneros en función de la forma con la que activan el proceso sonoro. Sin embargo, tal y como sucede con la clasificación de Zamacois, esta no hace referencia a la forma interna del tubo, característica muy relevante para el funcionamiento acústico del instrumento. En mi opinión, todas las clasificaciones descritas adolecen de cierto rigor, dado que lo que una contempla y ordena, la otra lo obvia. Luego parece lo más lógico establecer una clasificación extrayendo lo mejor de cada una, a saber: de Sachs y Hornbostel, la ordenación en cinco grandes grupos en función del principio acústico de cada uno; de Zamacois, el rigor en la clasificación en base a las características acústicas de todos y cada uno de ellos; y, por último, la lógica en la clasificación de Gevaert. Dicho esto, la clasificación ideal, en mi opinión, sería la que sigue:

Tabla VIII.1 Clasificación genérica de los instrumentos de viento madera



ANEXO IX

SINOPSIS DE LA HISTORIA Y EVOLUCION DEL CLARINETE

Tabla IX.I Sinopsis de la historia y evolución del clarinete

	AUTOR / ORIGEN	DENOMINACION, INVENCIÓN Y/O MEJORA	AÑO/ÉPOCA /SIGLO	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y ACÚSTICAS
ANTEPASADOS	<p>Egipto Griego Árabe Chino Madagascar Italiano Europa Francés</p>	<p>El Argul El Aulos La Zummara El Shackupachi La Farara La Ciaramella La Cornamusa El Caramillo</p>	<p>2700 a.C. Epoca griega Epoca egipcia Edad Media Edad Media Edad Media Edad Media S. XVII-XVII</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Antepasados más lejanos. ▪ Instrumentos rústicos del acervo popular. ▪ De forma cilíndrica y sin pabellón. ▪ Agujereados con varios orificios. ▪ No tenían boquilla, la lengüeta estaba integrada en el tubo y no estaba en contacto con los labios. ▪ Algunos como el argul y la zummara consistían en dos tubos cilíndricos paralelos atados, uno con orificios y otro que hacía la función de bordón.
ORIGEN DEL CLARINETE MODERNO (1ªS LLAVES)	Denner	El chalumeau	1700	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Antepasado más directo y cercano. ▪ Introduce la boquilla y la campana en el clarinete. ▪ Amplía y alarga el tubo cilíndrico. ▪ Tenía siete agujeros (uno de ellos doble), y dos llaves, una permitía emitir el LA₃ y la otra aumentaba los sonidos fundamentales una doceava, y accionada simultáneamente con la otra, producía el SIb₃.
	Johan y Jacob Denner (hijos de Denner). Se atribuye también a B. Fritz (1697-1766)	Clarinete de 3 llaves	1740 aprox.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Producía el MI₂ y su duodécima el SI₃, enlazando así dos registros. ▪ Alargamiento del tubo. ▪ Mejoran las características de algunos agujeros.
	Joseph Beer (1744-1811)	4ª y 5ª llave	1760 aprox.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Producía los sonidos FA#₃ Y SOL#₃ Y sus duodécimas el DO#₄ y el RE#₄.
	Xavier Lefevre (1795-1824) J. F. Simiot	6ª llave Clarinete de 7 llaves	1791 1808	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Permitía obtener el DO#₃ y su duodécima el SOL#₄. ▪ Sitúa el agujero de la llave de la duodécima en la parte superior del tubo e instala un cilindro de metal en el mismo que penetra al interior del tubo, para evitar la condensación del vapor de agua.

	Mr. Floth	Clarinete de 8 llaves	Principios del S.XIX	-----
	Griessling	Clarinete de 10 llaves	1809	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El célebre clarinetista H.S.Baermann lo utiliza en sus conciertos. ▪ B.E.Crusell lo utiliza en sus conciertos.
	-----	Clarinete de 11 llaves	Principios del S.XIX	-----
	J. F. Simiot	Clarinete de 12 llaves	Principios del S.XIX	-----
	H. J. Baermann (1784-1847)	Modifica la embocadura	-----	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coloca la caña en la parte inferior de la boquilla.
SISTEMA MÜLLER	Müller (1786-1854)	Clarinete de 13 llaves, sistema Müller	1812	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Presenta una nueva disposición de las llaves que facilita el poder tocar en cualquier tonalidad con relativa comodidad. ▪ Introduce la abrazadera metálica. ▪ Perfecciona el mecanismo. ▪ Mejora considerablemente la acústica del instrumento. ▪ Las zapatillas son de cuero con un relleno de lana asentadas en una cazoleta hueca.
SISTEMA BOEHM	H. Klosé (1808-1880) Fabricado por L. A. Buffet	Sistema Boehm	1839	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adaptación al clarinete del sistema de anillos móviles de las flautas, inventado por T.Boehm. ▪ Tenía 17 llaves, 6 anillos y 24 agujeros. ▪ Permitía a los dedos controlar más agujeros, gracias a los anillos móviles. ▪ Añade el barrilete moderno. ▪ Permite tocar en todos los tonos indistintamente.

PERFECCIONAMIENTOS DE LOS SISTEMAS MÜLLER Y BOEHM

F. Beer (1794-1828)	Mejora el clarinete de Müller	-----	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Introduce en Francia la técnica de tocar con la caña situada en la parte inferior de la boquilla.
C. Jaussen	Mejora el clarinete de Müller	1823	<ul style="list-style-type: none"> • Introduce los rodillos corredizos en las llaves, para facilitar el legato.
F. Lefevre	Sistema Lefevre	1845	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modifica el clarinete de Müller. ▪ Mejoras acústicas en la ejecución de algunos pasajes ▪ Remodela el clarinete de Müller
J. B. Albert	Sistema Albert, mejora el sistema Müller	Mediados s. XIX	
R. Stark	Mejora el clarinete de Müller	Finales s.XIX	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adapta ventajitas del sistema Boehm al clarinete de Müller.
H. J. Baermann	Mejora el clarinete de Müller	Finales s.XIX	<ul style="list-style-type: none"> • Amplía el número de llaves. • Mejora la afinación de algunas notas.
James Clinton	Sistema Clinton-Barret	1885	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Basado en el sistema Müller ▪ Coloca un anillo con un muelle contra una sencilla espátula lateral para emitir las notas Mib₂ y Fa₂ y sus duodécimas
O. Oehler	Sistema Oehler,	Finales S.XIX	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modifica la disposición de las llaves. ▪ Añade un agujero de aireado. ▪ Mejora las notas de horquilla mediante la colocación de una llave en el lateral del clarinete. ▪ Emplea la boquilla más larga y la caña más corta y gruesa, produciendo un sonido oscuro. ▪ Basado en el sistema Müller
Hermann Kunze y Thomas Mollenhauer,	Clarinete Normal Alemán	Principios s. XX	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mejora el clarinete de Müller con elementos del sistema Boehm
James Clinton	Sistema Clinton-Boehm	Principios s. XX	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Combina las mejoras de los sistemas Boehm y Müller.
Ernest Schmidt	Reforma Schmidt del Sistema Boehm	1912	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Separa las funciones de la llave portavoz.

OTROS SISTEMAS Y/O MODELOS MODERNOS			
V. Blancou	Clarinete Omnitónico	1845	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mejoras en la uniformidad del sonido. ▪ Derivado del clarinete de Müller. ▪ Mejora los sonidos Sib₂, Mib₃ y Fa₃. ▪ Apertura de la llave nº 6 por medio de dos anillos. ▪ Presenta un sistema de varias correderas para afinar el instrumento en Do, Sib y La.
Triebert	Clarinete Multifónico	1847	
A. Romero	Sistema Romero	1853	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Clarinete de 25 agujeros, 7 anillos y 17 espátulas. ▪ Añade una llave para el Mib₂. ▪ Modifica algunas digitaciones.
R. Mazzeo	Sistema Mazzeo	Mediados S.XX	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modifica la digitación del LA₃ y Sib₃. ▪ Presenta una llave articulada para obtener un ligado suave en los sonidos Do#₄ y Si₄.
J. Marchi	Sistema Marchi	Mediados S.XX	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Amplia la gama de sonidos sobreagudos añadiendo una segunda llave de 8ª, situada en el barrilete. ▪ Mejora nuevas digitaciones de los sonidos sobreagudos. ▪ Mantiene el sistema francés. ▪ Mejora los pasajes entre diferentes registros.

LA CAMARA ANECOICA

Una cámara anecoica es aquel recinto que absorbe toda la energía -según la banda energética que consideremos- que incide sobre sus paredes. Es por lo tanto un recinto totalmente libre de reverberaciones acústicas. Cualquier sonido proyectado dentro del recinto, a cualquier frecuencia, es completamente absorbido, esto es, cualquier fuente energética situada en su interior debe responder como si estuviera en el espacio libre. En el caso acústico, corresponde a una cámara con una frecuencia de corte baja, del orden de decenas de Hz, para ondas de presión.

Básicamente, hay dos tipos de cámaras anecoicas: las cámaras completamente anecoicas, con material absorbente en todas sus superficies -techo, paredes laterales y suelo- y las cámaras semianecoicas en las que el material absorbente recubre las paredes laterales y el techo.

El material absorbente utilizado para forrar las paredes suele ser una espuma de poliuretano tratada con una capa de ferrita que permite disipar la energía de microondas incidente, aunque también se emplean diversos materiales como son fibras de vidrio, lanas de roca, etc. Normalmente este material se dispone en forma de pirámides sobre una placa base cuadrada, de manera que cuando un frente de ondas acústicas o electromagnéticas incide sobre el material se divide en las puntas de las pirámides y es absorbido paulatinamente por el volumen progresivo de las pirámides hasta acabar sobre la superficie plana cuadrada donde se acaba de absorber -40 dB de absorción en incidencia normal-. El distinto tratamiento del material absorbente permite clasificarlo en dos tipos: absorbente duro, en el cual la capa de ferrita tiene un tratamiento que hace que su superficie sea más

rígida -situado en el techo de la cámara, el carrusel, el escáner y los raíles-, y absorbente blando, donde el tratamiento de la capa de ferrita le da una textura blanda, por lo tanto se presenta menos rívido -situado en las paredes laterales-.

En el diseño de las cámaras anecóicas es menester estudiar los fenómenos sonoros que experimentan las ondas sonoras al encontrarse con una superficie. Efectivamente, dichas ondas pueden comportarse de tres formas en función de la naturaleza de esta superficie. Si es reflectante, como sucede con las paredes no tratadas, cristales, espejos, etc., sufren una reflexión que sigue las leyes normales de este fenómeno físico. Si es una superficie absorbente sufren una absorción en la cual la onda reflejada sigue las leyes de la reflexión en cuanto al ángulo, pero su intensidad de salida es menor que la de llegada -la diferencia es precisamente el coeficiente de absorción del material para esa frecuencia-. Por último, en presencia de ciertos materiales, la onda sufre una difusión en la cual hay una irradiación de señales en todas direcciones de muy baja intensidad.

Las señales de estos fenómenos sonoros ya convertidas por nuestro sistema auditivo, son interpretadas en nuestra corteza cerebral auditiva de forma diferente.

Cuando los altavoces -o las membranas de las pantallas electrostáticas- emiten ondas sonoras, unas de ellas llegan directamente sin interferencias y otras sufren reflexiones en las paredes, suelo y techo de la sala. Estas reflexiones primarias son del todo indeseables ya que producen una pérdida en la definición de la escena sonora, enturbiamiento e inestabilidad de la imagen y de su foco, disminución o eliminación de los planos sonoros, etc.

Sin embargo hay otras reflexiones que por provenir de sucesivos rebotes, llegan más tarde y atenuadas en su intensidad -las secundarias, etc.- que son las encargadas de recrear las sensaciones de espacialidad y de aireación que el sistema sea capaz de entregar.

Estos tipos de reflexiones se pueden eliminar con dos procedimientos: mediante el uso de absorbentes -que eliminarán el campo reverberante-; usando conjuntamente materiales absorbentes y difusores en todas las ubicaciones adecuadas. El primero es un método útil que requiere atención en la situación de los paneles o cuñas y en su número ya que con los absorbentes es relativamente fácil pasarse en su colocación con lo que se disminuiría el tiempo de reverberación de la sala; utilizando difusores. Este último es el método más adecuado para aportar gran cantidad de reflexiones secundarias sin disminuir la presión acústica. El uso de difusores provoca un sonido mas limpio, con una imagen mucho más precisa y una escena sonora más real -siempre contando con las limitaciones del sistema de reproducción-.

Así, una sala con un tiempo de reverberación largo -donde los sonidos se atenúan con cierta lentitud- producirá un efecto de iglesia mientras que una sala con un tiempo muy corto o nulo -cámara anecóica- sonará muerta, apagada, irreal, pero fiel, es decir, la medición de la presión sonora será la que realmente entrega o capta el equipo.

Es útil construir un recinto tan grande como sea posible: la ley del inverso del cuadrado dicta que la energía sonora se disipará, de manera que cada metro cuadrado de la superficie interna tendrá menos energía que absorber. Recíprocamente, un recinto más pequeño requerirá mayor o mejor absorción del sonido para obtener el mismo efecto. Esto es particularmente cierto para las bajas frecuencias, es por ello que las cámaras más pequeñas solamente tendrán una absorción efectiva hasta un límite inferior de quizás

100 Hz más o menos. Las dimensiones idóneas de una cámara son aproximadamente 1.8 m de alto por 3 m de ancho y 8.2 m de largo

La efectividad de una cámara anecóica se mide en dB de rechazo -la relación entre el sonido directo y el sonido reflejado dentro de un recinto-. Una cámara debería proporcionar un rechazo mayor a 80 dB entre 80 Hz y 20 kHz, lo cual es excelente para una cámara de tamaño mediano. Para medir las críticas octavas medias y superiores, una cámara anecóica sigue siendo la única herramienta verdaderamente confiable para realizar mediciones precisas.

En función del material con el que se recubre sus paredes y de la forma de sus cuñas, actualmente se conocen dos tipos de salas anecóicas: sala *Cremer* (Fig. X.I) y sala *Wedge* (Fig. X.II)¹³⁶. La primera -menos común- está construida de tal modo que las cuñas están diseñadas de forma que la parte más pequeña de la cuña esté hacia el interior de la sala, y el interior de la cuña está construida de fibra de vidrio especial con una densidad muy baja. La cuña se va agrandando mientras se acerca a la pared y a la vez se aumenta su densidad. De esta forma se obtiene una muy buena impedancia de la sala que va de la mano con el material super absorbente con la que está constituido -*Principio de Cremer*-. La segunda es la que más se utiliza. Sus cuñas se construyen del mismo material en la base y la punta -*principio de Wedge*-. Este principio es análogo al diseño de un cono exponencial de un parlante, es decir, que la densidad del material es la misma en todos los puntos. Consecuentemente la sala Cremer es mucho mejor a frecuencias altas que una sala Wedge siendo las dos del mismo tamaño. A frecuencias medias las dos salas se comportan igual y en las frecuencias bajas la sala Wedge se comporta un poco mejor.

Desde el punto de vista económico se puede decir que la sala Wedge necesita más material absorbente que la otra, pero la Cremer necesita un trabajo más sofisticado para armarla, lo que significa un mayor costo de mano de obra.

Se dice que las salas Cremer son mejores puesto que se necesita trabajar a frecuencias altas -a partir de 15 kHz-, mientras que a frecuencias bajas no es tan importante puesto que la longitud de onda bajo los 300 Hz es tan larga que se pueden utilizar otros métodos¹³⁷.

A frecuencias sobre los 3kHz una sala Wedge siempre tiene unos cambios de fase que son incontrolables, puesto que las cuñas tienen superficies planas más grandes que las cuñas de las Cremer, que simulan una *selva acústica*.

La construcción de las cuñas en la Cremer es tubular, así se reduce las superficies planas, de modo que todas las reflexiones son minimizadas en todas las direcciones.

Cada cuña mide más o menos de 40 cm a 60 cm de largo y un ancho en la pared de 40 cm dependiendo del tamaño de la sala. Los tubos soportantes tienen un diámetro de 10 mm.

¹³⁶ La cámara anecóica del Departamento de Física Aplicada de la Universidad Politécnica de Valencia donde se han llevado a cabo los experimentos del presente estudio es de este tipo.

¹³⁷ Suponiendo una sala de 6x8x3 m -una sala media-, si la longitud de onda de una frecuencia de 20 Hz =17 m, la onda no alcanza a cumplir un período.

Fig. X.I Sala Cremer



Fig. X.II Sala Wedge (Sala anecóica del Dpto. de Física Aplicada de la Universidad Politécnica de Valencia)



Figs. X.III/IV Dispositivo de medición de una sala anecóica



BIBLIOGRAFIA

I. BIBLIOGRAFIA

- Andrés, R. (2001). *Diccionario de Instrumentos Musicales*. Península, Barcelona.
- Backus, J. (1961). *Vibrations of the reed and air column in the clarinet*¹³⁸. JASA, 33.
- Backus, J. (1963). *Small vibration theory of the clarinet*. JASA, 35.
- Backus, J. (1974). *Input impedance curves of the reed woodwind instruments*. JASA, 56.
- Backus, J. (1977). *The Acoustical Foundations of Music*. Norton, New York.
- Baines, A. (1967). *Woodwind Instrument and their History*, Faber and Faber, London.
- Bay, W. (1995). *About Clarinet Fingering Chart*. Mel Bay Publications, London.
- Benade, A.H. (1959). *On woodwind instrument bores*. JASA, 31.
- Benade, A.H. (1960). *On the mathematical theory of woodwind finger holes*. JASA, 32.
- Benade, A.H. (1976). *Fundamentals of Musical Acoustics*. Oxford University Press, New York.
- Benn, E. (1971). *The Clarinet: some notes upon its History and Construction*. Edición revisada y ampliada por Philip Bate. Norton, New York.
- Berlioz, H. (1844). *Tratado de Instrumentación*. Traducción al castellano en Imprenta de Manuel Muñoz, Madrid. Lemoine, París.
- Birsak, K. (1998). *The Clarinet, A Cultural History*. Traducción al inglés por Gail Schamberger. Druck und Verlag Obermayer.
- Boehm, T. (1991), *La flauta y la interpretación flautística*. Edición castellana revisada por Martínez, V. Mundimúsica, Ediciones Musicales, Madrid.

¹³⁸ Journal of the Acoustical Society of America.

- Bonade, D (2001). *Clarinetist's Compendium*. Leblanc Educational Publications, London.
- Brixel, E. (1977). *Klarinetten-Bibliographie*. Heinrichshofen, Wilhelmshaven.
- Brymer, J. (1976). *Clarinet*. McDonal-Jane's, Londres.
- Buffet-Crampon (2001). *Memoria de ébano*, Buffet Crampon SA, Mantes la Ville.
- Calvo-Manzano, A. (1991). *Acústica físico-musical*, Real Musical, Madrid.
- Campbell M. y Greated C. (1987). *The Musician's Guide to Acoustics*. Oxford University Press, New York.
- Casella, A. y Gortari, V. (1981). *La técnica de la orquestación contemporánea*. Ricordi, Buenos Aires.
- Cattoi, B. (1992). *Apuntes de acústica y escalas exóticas*. Ricordi, Buenos Aires.
- Dangain, G. (1978). *A propos de la Clarinette*. Gérard Billaudot, París.
- De Olazábal, T. (1954). *Acústica Musical y Organología*. Ricordi Americana, Buenos Aires.
- Diagram G. (1976). *Musical Instruments of the World*. Illustrated Encyclopedia, London.
- Diderot, D. y Dälembert, J. (1751). *Encyclopédie*. Lausana-Berna.
- Donington, R. (1986). *La música y sus instrumentos*. Edición castellana Alianza Editorial, Madrid.
- Drushler, P.(1978). *The Altissimo Register: A Partial Approach*. Rochester, New York.
- Estévez, F. (1990). *Acústica Musical*. Opera Tres Ediciones Musicales, Madrid.
- Ferron, E. (1996). *The Clarinet Revealed*. International Music Diffusion, London.
- Fletcher N.H. y Rossing T.D. (1998). *The Physics of Musical Instruments*. Springer-Verlag, New York.
- Flores, P. (1990). *Acústica, Ruidos y Vibraciones*. Ediciones Gyc, Barcelona.
- Fritz, C., Wolfe, J., Kergomard, J. y Caussé, R. (2003). *Playing frequency shift due to the interaction between the vocal tract of the musician and the clarinet*. Proc. Stockholm Music Acoustics Conference, R. Bresin, ed. Stockholm, Sweden.
- Gabucci, A. (1968). *Origin and History of the Clarinet*. Traducción al inglés de Frederic Lubrani. State University, Memphis.
- Garcés, A. (1991). *Primer libro del clarinetista*. Mundimúsica, Ediciones Musicales, Madrid.
- Gevaert, F.A. (1887). *Tratado General de instrumentación*. Enrique Lemoine y Cía. Leipzig.
- Gibson, L. (1998). *Clarinet Acoustics*. Indiana University Press.
- Goldáraz, J.J. (2004). *Afinación y temperamentos históricos*. Alianza Editorial, Madrid.
- Helmholtz, H. (1954). *On the Sensations of Tone*. Dover, New York.
- Hirschberg, A., Kergomard J. y Weinreich, G. (1995). *Mechanics of musical instruments*. Springer-Verlag, New York.
- Hoeplich, E. (1995). *The Earliest Paintings of the Clarinet*. Early Music, London.
- Honegger, A. (1976). *Diccionario de la Música*. Bordas, París.
- Jean, J. (1968). *Science & Music*. Dover, New York.
- Kinsler, L.E., Frey, A.R, Coppens, A.B. y Sanders, J.V. (1991). *Fundamentos de Acústica*. Editorial Limusa, México.
- Kroll, O. (1968). *The Clarinet*. Transcripción de Hilda Morris. Taplinger Publishing Co., New York.

- Latham, A. (2002). *The Oxford Companion to Music*. Oxford University Press, New York.
- Lawson, C. (1995). *The Cambridge Companion to the Clarinet*. Cambridge University Press, Cambridge London.
- Mersenne, M. (1636). *Harmonie Universelle*. París. Reedición facs., con una introducción de F. Lesure, París.
- Nederveen, C.J. (1969). *Acoustical Aspects of Woodwind Instruments*. Frits Knuf, Amsterdam.
- Olson, H.F., (1967). *Music, Physics and Engineeri*. Dover Publications, New York.
- Pastor, V. (2002). *Mi Primer Clarinete, Vol. IV*. Rivera Editores, Valencia.
- Pérez, J. (1969). *Compendio Práctico de Acústica*. Editorial Labor, Barcelona.
- Pino, D. (1980). *El Clarinete*. Dover, New York.
- Raudel, M. (1986). *The Harvard Dictionary of Music*, Belknap Press of Harvard University Press, London.
- Rayleigh, J.W.S. (1894). *The Theory of Sound*. 2ª edición, Dover, New York.
- Recuero, M. (1994). *Ingeniería Acústica*. Editorial Paraninfo, Madrid.
- Rendall, F.G. (1971). *The Clarinet*. W. W. Norton, New York.
- Rice, A.R. (1992). *The Baroque Clarinet*. Oxford University Press, New York.
- Rice, A.R. (2003). *The Clarinet in the Classical Period*. Oxford University Press, New York.
- Ridenour, T. (1986). *The Annotated Book of Altissimo Clarinet Fingerings*. Leblanc, Kenosha.
- Ridgen, J.S. (1977). *Physics and the sound of musics*. John Wiley & Sons, Inc, Canadá.
- Rossing, T. D. (1990). *The Science of sound*. Addison-Wesley Publishing Company, Canadá.
- Rutland, J. (1978). *The Clarinet*. F. Watts, London.
- Sachs, C. (1940). *A History of Musical Instruments*. Norton, New York.
- Sadie, S. (1984). *The New Grove Dictionary of Musical Instruments*. Macmillan, London.
- Sadie, S. (2000). *Diccionario Grove de la Música*. Akal Ediciones, Madrid.
- Sadie, S. (2000). *Guía Akal de la Música*, traducción de Rosa Herrera Villapalos, Akal Ediciones, Madrid.
- Sadie, S. (2003). *Classical Music Encyclopedia*. Flame Tree Publishing, London.
- Schaeffer, P. (2003). *Tratado de los objetos musicales*. Alianza Musica, 2ª reimpresión, Madrid.
- Sim, A. (1999). *Clarinet Fingerings*. Twydds Music, London.
- Sommerfeldt, S. y Strong, W. (1988). *Simulation of a player-clarinet system*. JASA 83.
- Stein, K. (1958). *El arte de tocar el clarinete*. Summy-bircharding, Miami.
- Stewart, S. y Strong, W. (1980). *Functional model of a simplifield clarinet*. JASA 68.
- Taylor, C.A. (1976). *Sounds of Music*. British Broadcasting Corporation, London.
- Thompson, S. (1979). *The effect of reed resonance on woodwind tone production*. JASA 66.
- Thurston, F. (1977). *Clarinet Technique*. Oxford University Press, London.
- Tranchefort, F-R. (2002). *Los instrumentos musicales en el mundo*. Versión castellana de Hernández, C. Alianza Música, Madrid.

- Vercher, J. (1983). *El Clarinete*. Autor-Editor, Valencia.
- Volbach, F. (1932). *La Orquesta Moderna*. Editorial Salvat, Buenos Aires
- Villarojo, J. (1975). *El Clarinete y sus posibilidades*. Alpuerto, Madrid.
- Walter, J.G. (1732). *Musikalisches Lexicon*. Leipzig.
- Weston, P. (1976). *The Clarinet Teacher's Companion*. Robert Hale, London.
- Wilson, T. (1974). *Operating modes of the clarinet*. JASA 56.
- Wood, A. (1962). *The Physics of Music*. Revisión de Bowsler, J.M. Methuen, London.
- Zamacois, J. (2002). *Teoría de la Música*. Idea Books, Barcelona.

II. REFERENCIAS Y RECURSOS ON-LINE

- Ahlgren, E. (1996). *The Clarinet Family*. www.hem.passagen.se/eriahl/clarinet
- Fox , S. (2000). Basic Clarinet Acoustics. www.sfoxclarinets.com/
- Izen, J. (1995). *Clarinet Fingering Guide*. www.metronet.com/~drjoe/clarinet
- The International Clarinet Association, (2001). www.clarinet.org/
- Wolfe,J.(2002).*Introduction to clarinet acoustics*. www.phys.unsw.edu.au/clarinetacoustics
- [http: JASA, asa.aip.org](http://JASA,asa.aip.org)
- <http://www.ia.csic.es/sea/index>
- <http://www.sc.ehu.es>
- <http://www.arrakis.es>
- <http://www.audicenter.com.ar>
- <http://www.es.wikipedia.org/Wiki/ondas>