



## Análisis de sonidos multifónicos de base Bb<sub>3</sub> Hacia una posible sistematización

Por **Luis Federico Jaureguiberry**

Cursó las carreras de Ingeniería y Composición en la Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Fue miembro de las formaciones Del Espíritu y sus Gusanos, Mironca de la Solapa, Míster América, Traviatobosnialafortina, Chavannes, Banda Hermética y La Trenza, entre otras.

Se desempeña como docente de la cátedra Acústica Musical de la Facultad de Bellas Artes (UNLP), como profesor particular de saxo e instrumentista. Trabaja con Dirty Diamonds Big Band, Grita Quincas, Doña Prudencia, Belén Ilé, Uta-dre Arajo y colabora con La Secta, Yusa, Marcelo Katz Quinteto y El Enjambre.

En este trabajo<sup>1</sup> se presentan los resultados parciales de una investigación sobre sonidos multifónicos en un saxo alto.<sup>2</sup> Mediante la organización y la ejecución de sonidos multifónicos, el posterior análisis –tanto de digitaciones como de componentes resultantes– y la argumentación teórica basada en la ley de Young, se concluye que las componentes de un sonido multifónico en un saxo alto no son aleatorias. En realidad son armónicos desfasados y tienen correspondencia directa con la digitación necesaria para su producción por pertenecer a las series de armónicos generadas en el tubo.

Los sonidos multifónicos son parte de mi rutina de estudio de instrumento, aproximadamente, desde 1995. A su vez, son material cotidiano en mis composiciones cuando requieren saxo en su orgánico.

<sup>1</sup> Agradecimientos: Gustavo Basso, Valeria Cejas, Andrea Farina, Florencia Lloret e Ignacio Bruvera.

<sup>2</sup> Para esta investigación se utilizó un saxo alto marca Yamaha, modelo YAS 62, una boquilla Vandoren Jumbo Java y cañas Vandoren clásicas N° 3. Para corroborar datos se utilizaron saxos altos de marcas Jupiter, Knight y Palmer.



Una parte del estudio de esta técnica de ejecución consistió en la recopilación de información. En esta búsqueda encontré material que es parcialmente útil para introducir a la práctica de esta técnica, como catálogos de digitaciones y sus resultantes, listados de posibilidades de articulación y repetición, dinámicas posibles y dificultades de ejecución. Hace relativamente poco tiempo se han publicado documentos en Internet con información de carácter físico, relativos a su generación, al comportamiento de la columna de aire, etc., pero ningún dato sobre por qué, con determinada digitación, se obtienen determinados componentes.<sup>3</sup>

En un principio, mi propio catálogo de sonidos multifónicos se basaba en que lo podía encontrar “pinchando” el tubo en determinados lugares al abrir o cerrar llaves intermedias. A partir de la necesidad de organizarlos, y de hacerlo por la longitud efectiva del tubo, encontré que, más allá de las divergencias de la afinación de las componentes con respecto al sistema de temperamento igual, existe una correlación entre la digitación necesaria para la producción de un sonido multifónico y las componentes resultantes del mismo.

En este artículo confirmo dicha correlación a partir de vincular los resultados de la ejecución y el análisis de 100 multifónicos poliarmónicos con el enunciado de la ley de Young aplicado a una columna de aire. El trabajo está acotado a los saxos altos en Eb y las alturas que se indican son de escritura.

## Los sonidos multifónicos

### Definición

En el modo ordinario de ejecución de un saxo, las condiciones de contorno<sup>4</sup> en los extremos del tubo permiten que se generen ondas estacionarias<sup>5</sup> que poseen sus propios modos de vibración. Las frecuencias generadas por dichos modos de vibración en el tubo de un saxo coinciden con las de la serie de armónicos que conforman una onda diente de sierra, donde están presentes armónicos pares e impares<sup>6</sup> [Figuras 1 y 2]. En caso de ejecución ordinaria, la superposición de dichos modos de vibración se percibe como un único elemento sonoro.

Un sonido multifónico en un saxo es aquel en el que la superposición de modos de vibración se percibe como dos o más elementos sonoros simultáneos.

### Nomenclatura

Dado que existe una importante densidad de componentes por ancho de banda, para obtener un sonido multifónico en particular es necesario adaptar la embocadura a fin de “apuntar” a una o más componentes de las series que intervienen en su generación [Figura 3].

El punto a la izquierda de una cabeza de nota indica la/s altura/s *foco*,<sup>7</sup> es decir, a qué alturas se debe perfilar la embocadura para obtener dicho sonido multifónico [Figura 4].

<sup>3</sup> Por otro lado, existe un pensamiento más bien oscurantista y simplista que supone que los sonidos multifónicos son caóticos, irrepetibles de instrumento a instrumento y de instrumentista a instrumentista, e incluso, en algunos casos, dependientes de la humedad y de la temperatura del ambiente –cuando en realidad la ejecución ordinaria del instrumento depende de ambos factores.

<sup>4</sup> Se denomina condiciones de contorno a los cambios más o menos localizados en las propiedades de transmisión del medio, que originan reflexiones y dan lugar a las ondas estacionarias. En un tubo, están dadas por la presencia o no de presión atmosférica en los extremos.

<sup>5</sup> En una onda estacionaria, al contrario que en una onda que se propaga, los máximos y mínimos de presión no se transmiten por el medio sino que quedan confinados entre las condiciones de contorno.

<sup>6</sup> La fundamentación matemática con la cual se determina que las frecuencias de los modos de vibración de un instrumento cónico y la configuración abierto-cerrado coinciden con las de un espectro similar al diente de sierra excede las intenciones del presente artículo. Para ahondar en la cuestión, ver Cornelis Nederveen, *Acoustical aspects of woodwind instrument*, 1969, p. 20.

<sup>7</sup> En cierta literatura especializada se encuentra una digitación y la indicación de “pensar en tal nota” para lograr el multifónico.



La simbología que más clara me ha resultado para determinar la digitación de un sonido multifónico es la de una tablatura con la disposición de llaves abiertas o cerradas –círculo en blanco o en negro, respectivamente–, bajo un pentagrama con las componentes de altura resultantes<sup>8</sup> [Para el esquema de digitación, ver Apéndice].

### *Clasificación*

Clasifico los sonidos multifónicos en dos categorías: multifónicos de armónicos [Figura 5] y multifónicos poliarmónicos [Figura 6].

En los multifónicos de armónicos los modos de vibración pertenecen a la misma fundamental, por lo tanto, las componentes pertenecen a la serie de armónicos con base en dicha fundamental [Figura 7].

En los multifónicos poliarmónicos los modos de vibración pertenecen a fundamentales distintas [Figura 8] y las componentes son miembros de las series de armónicos con base en las fundamentales presentes [Figura 9]. Para el instrumentista es más fácil discriminarlos en función de la digitación para obtenerlos: en los armónicos se utilizan digitaciones convencionales; en los poliarmónicos, las digitaciones no son convencionales.

### **Dificultades de producción**

Una de las dificultades que se presenta en la producción de un sonido multifónico es asociar digitaciones con sonidos resultantes. Es decir, qué es lo que se debe obtener con una determinada digitación. Es necesario considerar que el instrumentista se entrena para obtener una señal acústica

compleja con una altura discreta de cada configuración digitación/embocadura.

Mientras que en los sonidos multifónicos armónicos esta correspondencia es relativamente sencilla de encontrar; en los poliarmónicos es más complicada.

Las componentes de un multifónico de armónicos son miembros de la serie de armónicos con base en la fundamental digitada. Si se tiene en cuenta cómo está compuesta la serie es relativamente sencillo asociar sonido resultante con digitación [Figura 10]. En aquellos con más de tres componentes la resultante tímbrica es más compleja, pero como la tríada mayor de la fundamental está inscrita en los primeros cinco armónicos puede servir de guía.

Los multifónicos de armónicos no son fácilmente extrapolables de una fundamental a otra,<sup>9</sup> ya que cuanto más alta es la frecuencia de la fundamental más difícil es obtener armónicos de orden alto. Por ejemplo, es factible obtener del Bb3 y B3 hasta el 10<sup>mo</sup> armónico; del C4 y C#4 hasta el 9<sup>no</sup>; de D4 y D#4 hasta el 8<sup>vo</sup>; de E4 hasta el 7<sup>mo</sup>; etc. Naturalmente, esta cuestión dependerá de la habilidad del instrumentista para obtener armónicos.

En los multifónicos poliarmónicos las digitaciones no son convencionales; los sonidos fundamentales no están necesariamente presentes al momento de la ejecución; existen desviaciones de afinación de las fundamentales y sus respectivos armónicos, debido a las digitaciones de horquilla; la afinación de los armónicos de una fundamental no es la misma que la del temperamento igual;<sup>10</sup> la densidad de armónicos por ancho de banda aumenta a partir del 3<sup>er</sup> armónico de la fundamental

<sup>8</sup> Dado que las desviaciones de afinación tienen un rango de variación de entre 1 y 100 cents respecto del sistema de afinación de temperamento igual, dichas desviaciones no están indicadas. Las componentes indicadas son para referencia de embocadura.

<sup>9</sup> El saxo alto tiene 16 fundamentales.

<sup>10</sup> A su vez, la serie de armónicos es ideal desde el punto de vista matemático: en el caso del tubo de un saxo, los orificios no suelen estar dispuestos a partir de cálculos sino en base a la experiencia del constructor y se tiene que tener en cuenta que los detalles de construcción del instrumento –por ejemplo la altura de las chimeneas– van a alterar las condiciones de la capa límite entre el tubo y el flujo de aire, condiciones que afectan las variables asociadas a éste.



con longitud efectiva más grande; las condiciones de contorno son dinámicas, por lo tanto inestables; y es fácil pasar de una componente inestable a otra más estable. Por otro lado, la presencia de sonidos de combinación, modulaciones de amplitud de las componentes y batidos generados por la interferencia de las mismas crea inconvenientes en la asociación digitación/resultante.

Los multifónicos poliarmónicos de este trabajo están organizados en función de la longitud efectiva del tubo, determinada por una digitación que denomino base y por la inserción de nodos de presión en distintas partes del tubo que parten desde la sección inferior. Los nodos de presión *inducidos* son de diferentes dimensiones porque abren más orificios contiguos. Se encontró que una base con el mismo nodo de presión inducido pero con distinta dimensión presenta ligeras diferencias de afinación. Esto se debe a que el área nodal se desplaza hacia la boquilla del instrumento a medida que aumenta la dimensión del nodo [Figura 11].

A las 16 bases correspondientes a las fundamentales presentes en el instrumento se le suman cinco digitaciones más, alternativas de distintas bases. Las llaves de palma, al ser articuladas sin portavoz, generan fundamentales entre el C#5 y el E5 y podrían considerarse también como bases, resultando cinco bases más.

## Principios de funcionamiento

Con cambios en la embocadura –entiéndase por embocadura al sistema boquilla/caña/ boca/ cavidad bucal/ diafragma–, se puede debilitar o anular la fundamental y destacar un armónico en particular de la serie. En el caso de debilitar la fundamental, se logra la coexistencia de los armónicos

como objetos sonoros separados y se obtiene un multifónico de armónicos. En estos es muy común encontrar modulaciones de amplitud de los armónicos.

Dada una fundamental generada en el tubo y su serie de armónicos correspondiente, la función del portavoz del instrumento, al generar una pequeña abertura en el tubo, es anular la fundamental para permitir que se estabilice y destaque, en nuestro caso, el 2<sup>do</sup> armónico, la octava. En los multifónicos poliarmónicos, al inducir un nodo de presión cuando se abre una llave intermedia se obtiene, por un lado, un resultado análogo al del portavoz, al anular la fundamental presente y permitir que otro miembro de la serie se destaque, por otro, como este nuevo portavoz es más grande de lo usual, el nodo de presión inducido tiene las dimensiones suficientes como para generar una nueva fundamental, una “fundamental inducida” y su serie de armónicos correspondiente.

A partir de las dificultades enumeradas anteriormente, si al momento de producir un sonido multifónico se conocen las fundamentales presentes [Figuras 12, 14 y 16] se puede deducir qué componentes va a tener: existe una correlación entre la digitación y las componentes del sonido multifónico [Figuras 13, 15 y 17]. En algunos casos, la composición del multifónico poliarmónico es fácilmente deducible; en otros, como en el caso de las “llaves de palma”, la fundamental inducida está lejos de corresponder a la fundamental en ejecución ordinaria.<sup>11</sup>

Algunos casos permiten la ejecución de multifónicos de armónicos que son difíciles o inaccesibles si se los articula desde la fundamental de dicho multifónico. Cuando las series de armónicos comparten una nota, esta componente en el multifónico es más estable.

<sup>11</sup> Por ejemplo, las correspondencias entre digitación sin portavoz y fundamental resultante en el saxo alto utilizado para el trabajo son las siguientes: D6 genera C#5; D#6: D; E6: D#5; F6: D#5; F#6: E5. Ante otro tipo de combinaciones de llaves de palma abiertas y cerradas es necesario investigar qué fundamental se obtiene.



## Justificación a partir de la ley de Young

Aplicada en una cuerda, la ley de Young supone que "no se puede establecer un modo de vibración si su nodo de presión (punto estacionario) se encuentra en el punto donde se excita la misma".<sup>12</sup> Aplicada a una columna de aire, puede expresarse: si se genera un nodo de presión en un punto de la columna de aire no se generan los modos de vibración que tienen vientres en dicho punto. Esto sucede cuando se utiliza el portavoz del instrumento [Figuras 18 a 22].

Si se realiza un pequeño orificio en el tubo se genera un nodo de presión donde se encuentra el vientre de presión de dicho modo [Figura 19]. Este orificio permite el contacto con la presión atmosférica, por lo que es imposible que en esa zona del tubo se establezca un máximo de presión. De esta manera, se anula el primer modo de vibración y se obtiene el segundo modo de vibración del tubo [Figura 20].

El proceso de hacer un orificio se repite para generar un nodo de presión sobre el vientre del segundo modo; éste se anula y se obtiene el cuarto modo de vibración del tubo [Figuras 21 y 22].

En el caso de un multifónico poliarmónico, cuando un nodo de presión que permite el anclaje de un modo de vibración de fundamental A se superpone sobre un vientre de presión de otro de fundamental B este último se anula. En los casos en que nodos o vientres de presión estén aproximados entre sí, nodo con nodo o vientre con vientre, se produce un desplazamiento del área nodal (o ventral) que afecta las longitudes de onda de los modos de vibración que se encuentran cercanos a dicha área. Por lo tanto, se modifica la altura percibida [Figura 23].


A partir de saber qué fundamentales están interactuando es posible estimar qué componentes se pueden encontrar en el sonido multifónico [Figura 24].

Por otro lado, al conocer el funcionamiento acústico del tubo en estas condiciones sería factible desarrollar multifónicos poliarmónicos a demanda dentro de los límites que imponen estas condiciones de contorno más dinámicas. Esta cuestión aún se sigue estudiando.

## Conclusión

Se establece el concepto de *foco* para permitir la ejecución de un multifónico en particular con componentes de las series de armónicos presentes. A partir de adoptar el Bb3 como base, se identificó la "fundamental inducida" y las series de armónicos que se originan a partir de ambas fundamentales para examinar qué componentes eran factibles de ser articuladas. Luego, se focalizó en determinadas componentes de las series.

De la ejecución y el análisis de 100 sonidos multifónicos poliarmónicos de base Bb3, se constató que la correlación entre digitación y componentes existe. Los ábacos armados en función de aplicar la ley de Young a una columna de aire confinada en un tubo, superponiendo gráficos de modos de vibración de las series de armónicos correspondientes a la base y la fundamental inducida, muestran correspondencia con los multifónicos obtenidos. La organización por medio de los conceptos *base* y *nodo inducido* es viable y práctica.

Está en estudio la posibilidad de desarrollar un software que permita determinar qué componentes son posibles en un multifónico poliarmónico con determinada digitación y la posibilidad de generar multifónicos a demanda. 

<sup>12</sup> "No mode of vibration can be set up that has (stationary point) at the position at which the disturbance is applied". Benade, Arthur. *Horns, Strings and Harmony*, 1960, p. 118 [Traducción del autor].



## Apéndice

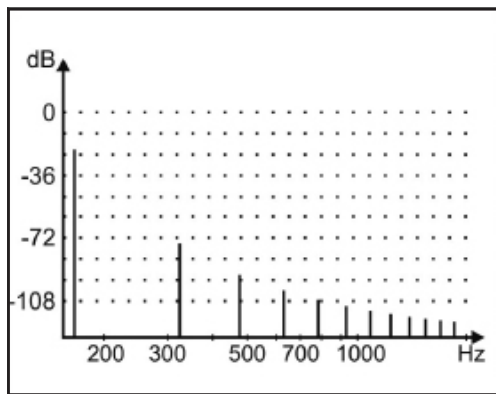


Figura 1. Gráfico espectral de una onda diente de sierra (fundamental C<sub>4</sub>)

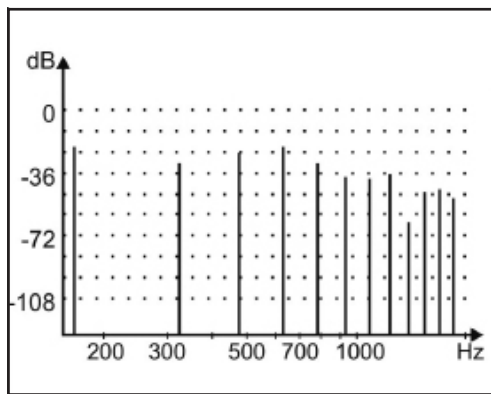


Figura 2. Gráfico espectral de un C<sub>4</sub> en un saxo alto

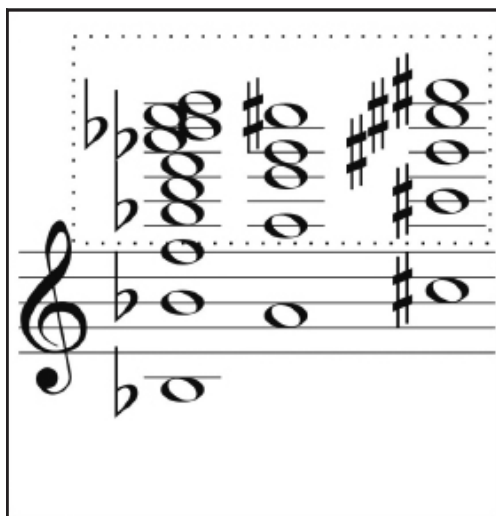


Figura 3. Serie de armónicos. Densidad de armónicos por ancho de banda

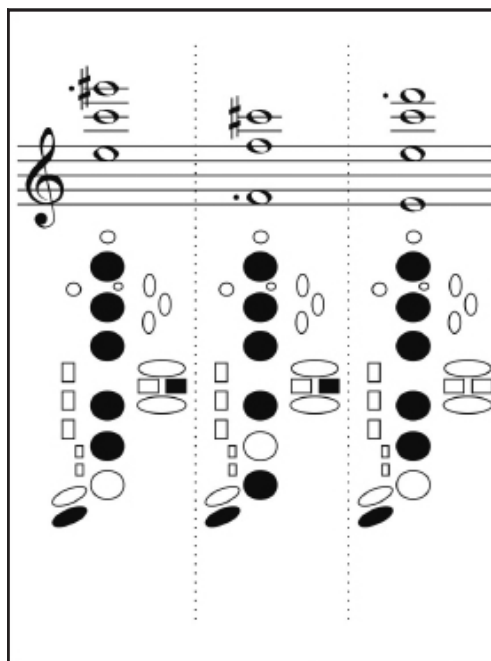


Figura 4. Tablatura con la digitación de multifónicos y algunas resultantes posibles. Nótese el punto indicando la altura *foco* para obtener un sonido multifónico en particular



C4 primeros cinco armónicos

multifónico armónico resultante posible

Figura 5. Digitación ordinaria y un multifónico de armónicos resultante

C4 E4

resultante posible

Figura 6. Sonidos en modo de ejecución ordinaria y un multifónico de armónicos resultante de combinar ambas fundamentales

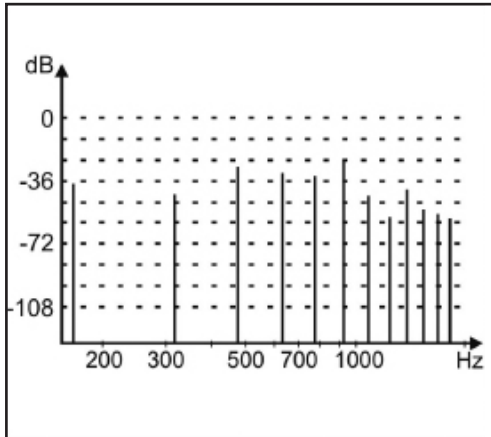


Figura 7. Gráfico espectral correspondiente al multifónico armónico de la Figura 5. Nótese los niveles de intensidad del 3<sup>er</sup>, 6<sup>to</sup> y 9<sup>no</sup> armónicos, más altos que en el modo ordinario [Figura 2]

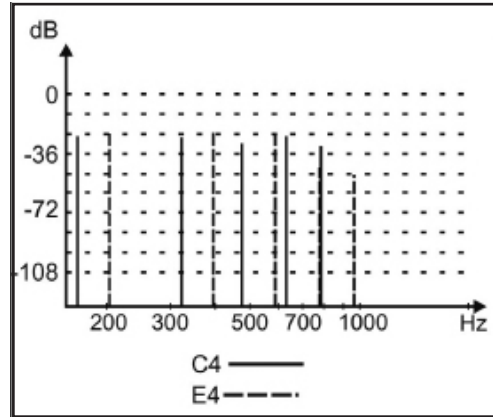


Figura 8. Superposición de gráficos espectrales de fundamentales C<sub>4</sub> y E<sub>4</sub>. Primeros cinco armónicos

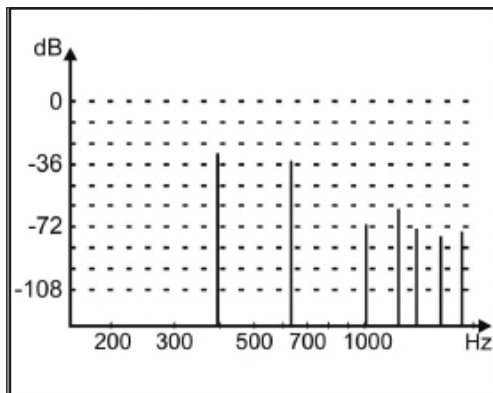


Figura 9. Gráfico espectral del multifónico poliarmónico de base C<sub>4</sub> y nodo inducido en E<sub>4</sub>, correspondiente al multifónico de la Figura 6

Modo de ejecución ordinario: resultante

Serie de la fundamental

Algunos multifónicos posibles

Figura 10. Posibles multifónicos de armónicos a partir de una fundamental





**Nodo inducido de 1 orificio**  
Variación: - 17 cents

Configuración del tubo

**Nodo inducido de 2 orificios**  
Variación: - 6 cents

**Nodo inducido de 3 orificios**  
Variación: + 4 cents

Figura 11. Misma base distinto tamaño del nodo

Figura 12. Multifónicos posibles de base Bb<sub>3</sub> y fundamental inducida D<sub>4</sub>



→ armónico real  
 --> armónico desplazado

Figura 13. Relación entre las componentes de los sonidos multifónicos de la Figura 12 y las series de armónicos presentes

Figure 14 illustrates the possible multifonics of base Bb3 and fundamental F4. It shows a sequence of notes on a staff, with arrows indicating the direction of movement. The notes are arranged in a way that suggests a relationship between the real and displaced harmonics. The diagram includes a plus sign and arrows indicating the combination and resulting notes.

Figura 14. Multifónicos posibles de base Bb3 y fundamental inducida F4



Figura 15. Relación entre las componentes de los sonidos multifónicos de la Figura 14 y las series de armónicos presentes

Figura 16. Multifónicos posibles de base Bb3 y fundamental inducida A4



Figura 17. Relación entre las componentes de los sonidos multifónicos de la Figura 16 y las series de armónicos presentes

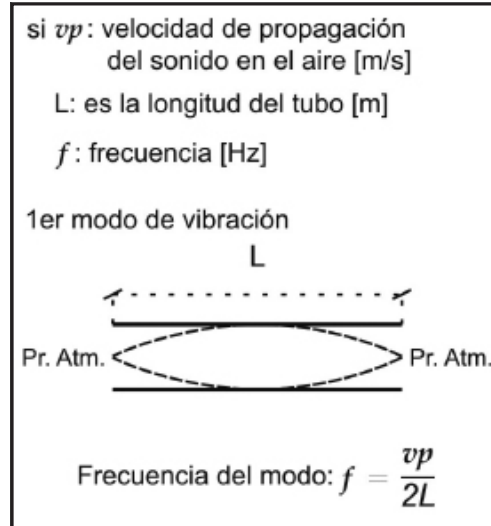


Figura 18. Primer modo de vibración en un tubo abierto en ambos extremos

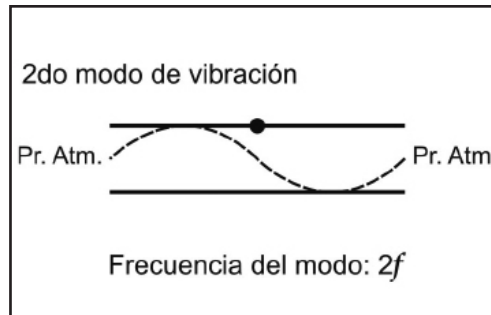


Figura 20. Segundo modo de vibración del tubo

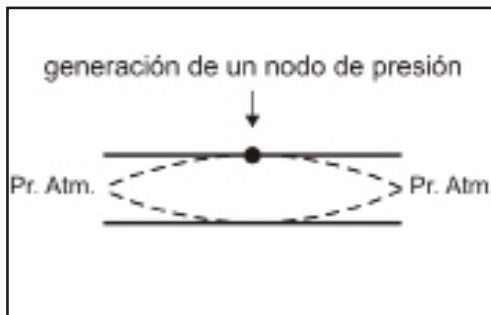


Figura 19. Generación de un nodo de presión en el primer modo de vibración

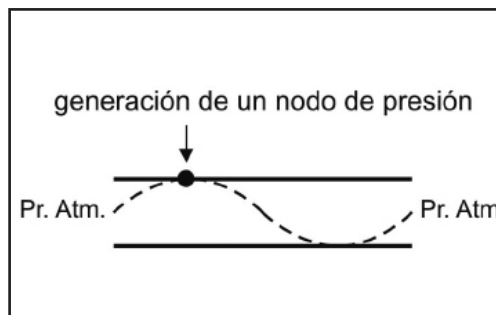


Figura 21. Generación de un nodo de presión en el segundo modo de vibración

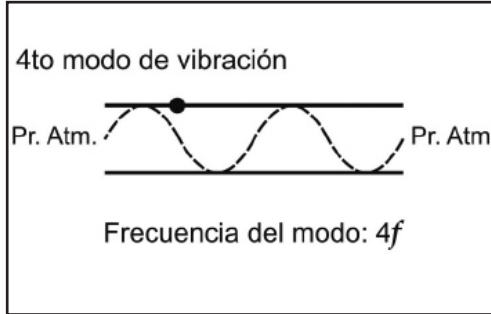


Figura 22. Cuarto modo de vibración del tubo

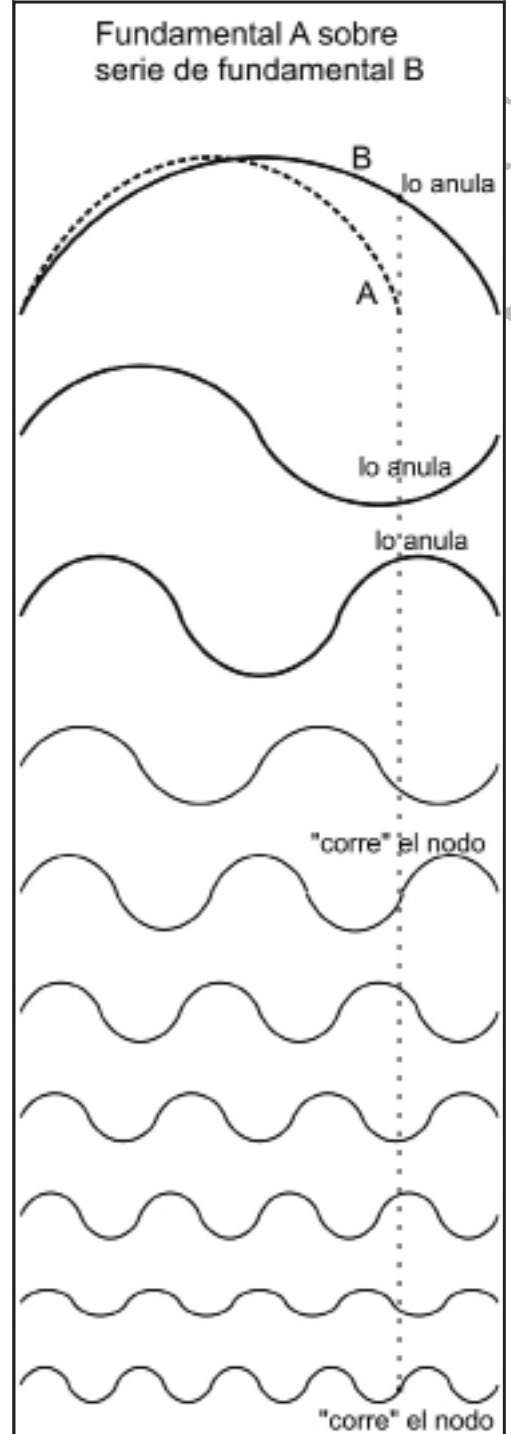


Figura 23. Superposición de modos de vibración de A sobre B y viceversa

ARTÍCULOS

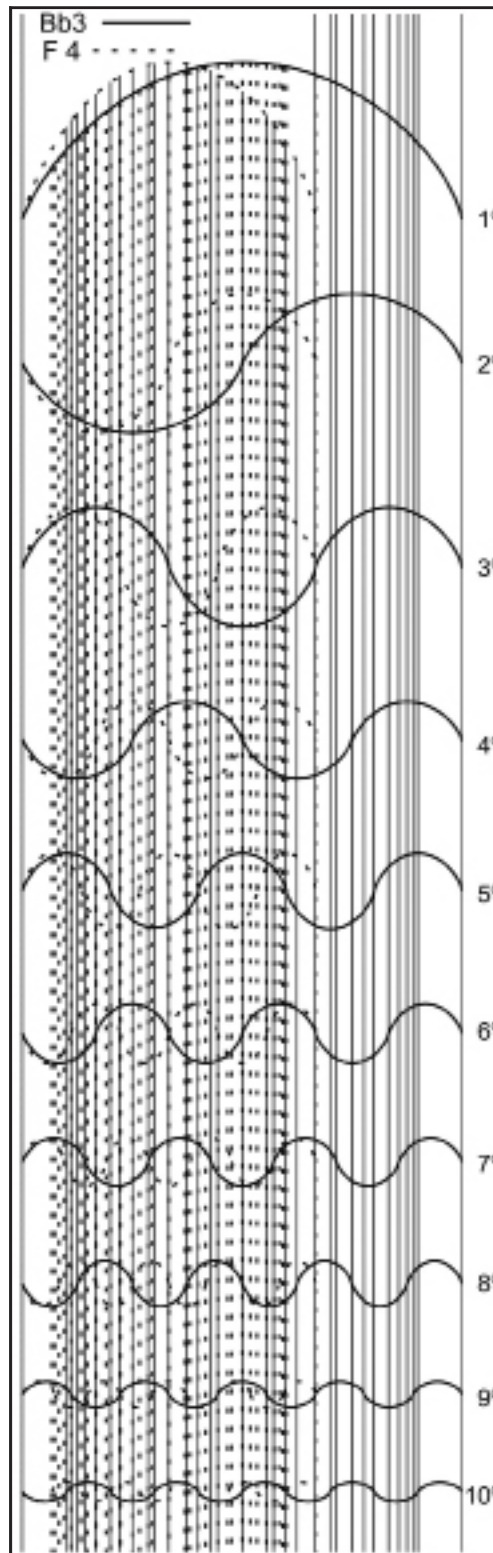
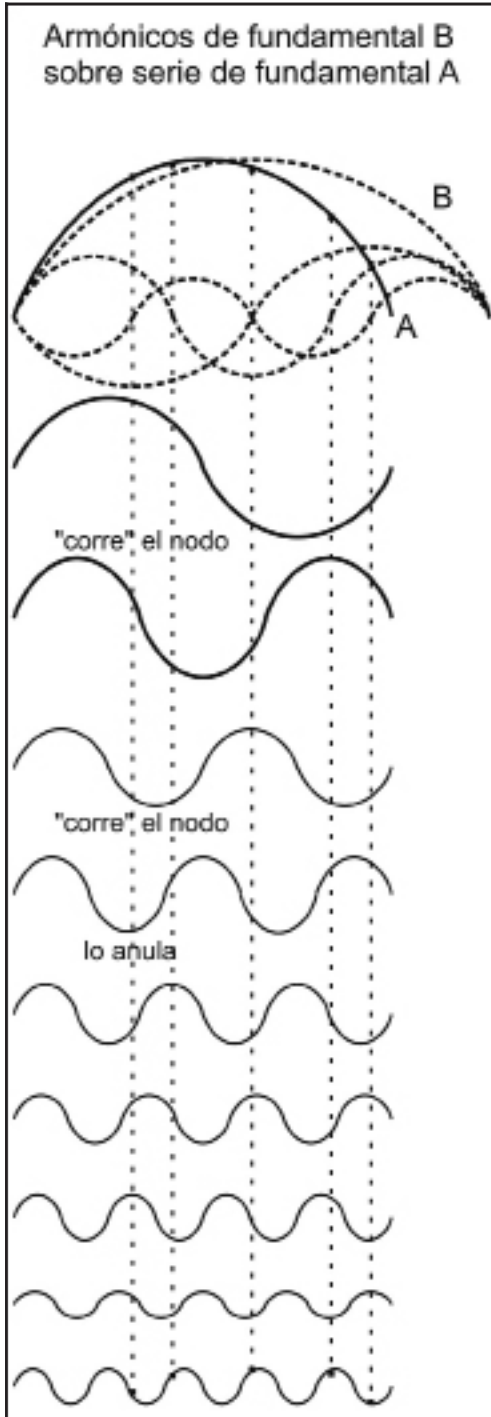


Figura 24. Ábaco de superposición de 10 modos de vibración de fundamentales Bb<sub>4</sub> y F<sub>4</sub> correspondiente al multifónico poliarmónico de la Figura 14

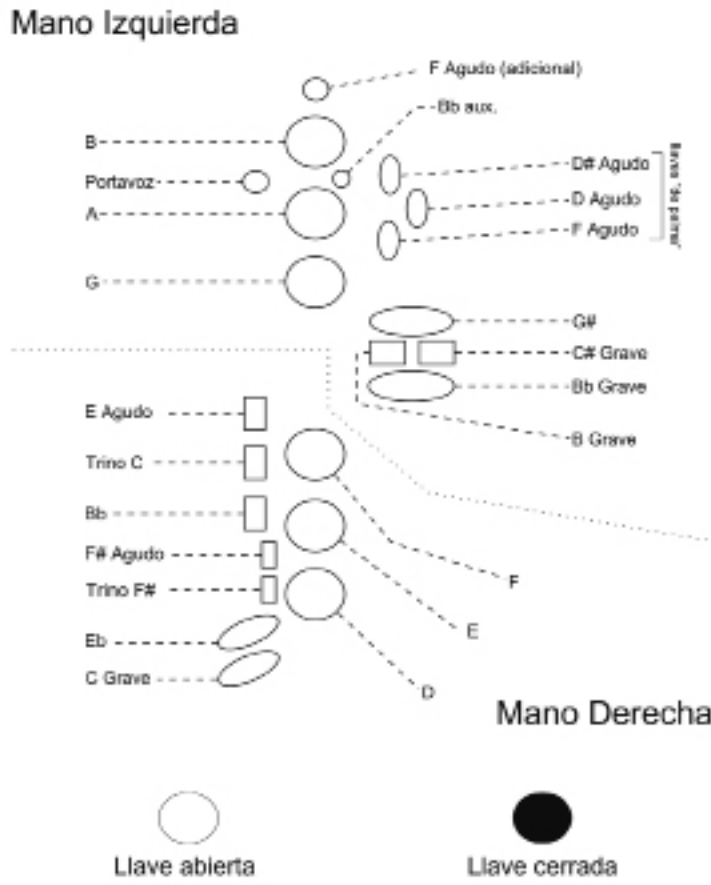


Figura 25. Esquema de digitación de un saxo .

### Bibliografía

BASSO, Gustavo: *Análisis espectral. La transformada de Fourier en la música*, La Plata, EDULP, 1999.

\_\_\_\_\_. *Percepción auditiva*, Quilmes, Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes, 2006.

BENADE, Arthur H.: *Horns, Strings and Harmony*, New York, Anchor Books, 1960.

FLETCHER, Neville H. & ROSSING, Thomas D.: *The Physics of Musical Instruments*, New York, Springer Verlag, 1991.

JAUREGUIBERRY, Luis Federico: "Técnicas extendidas en el saxofón: multifónicos, hacia una

posible sistematización. Estado de la cuestión", en *Primera Jornada de Divulgación sobre Investigación en Acústica*, La Plata, UNLP, 2009.

NEDERVEEN, Cornelius J.: *Acoustical aspects of woodwind instruments*, Northern Illinois University Press, 1969.

ROEDERER, Juan G.: *Acústica y psicoacústica de la música*, Buenos Aires, Ricordi Americana, 1997.

SCAVONE, Gary; LEFEBVRE, Antoine & DA SILVA, Andrey: "Measurement of vocal-tract influence during saxophone performance", en *The Journal of the Acoustical Society of America*, American Institute of Physics, New York, Vol. 123, N° 4, April 2008.