

# PRIMERAS JORNADAS REGIONALES DE ACÚSTICA AdAA 2009

19 y 20 de noviembre de 2009, Rosario, Argentina



AdAA2009-A052R

## Análisis cualitativo y cuantitativo del timbre de aerófonos de madera

Alejo di Risio <sup>(a)</sup>,  
Alejandro Bidondo <sup>(b)</sup>.

(a) Estudiante de Ingeniería de Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero, Valentín Gómez 4752, Provincia de Buenos Aires, Argentina E-mail: alejo.dirisio@gmail.com

(b) Ingeniero Electrónico UBA, Coordinador de la carrera de Ingeniería en Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero Valentín Gómez 4752, Provincia de Buenos Aires Argentina.

### Abstract

The distinctive timbre of handcrafted single reed wind instruments born in the last few decades is analyzed in this work. Taking as a specific case two wooden straight cylinders, which simulate the underlying physical principles of the clarinet.

This instruments' timbre is very similar to that of the saxophone and the clarinet, and a parallelism is made with their acoustical principles. These two wind instruments were recorded, along with two traditional saxophones and a clarinet, under controlled conditions. Their timbre and spectrum was analyzed taking into account the harmonic presence and spectral content. Quantitative analysis was made thru the microscopic auto-correlation parameters of each recorded sample. In the research and recordings, their acoustics is proven to be analogous to both of the single reed instruments which can be found on any orchestra.

### Resumen

En este trabajo se analiza el timbre característico que tienen los instrumentos de viento de lengüeta simple que han surgido en las últimas décadas tomando como ejemplo específico dos cilindros rectos de madera, funcionamiento análogo del clarinete.

El timbre de estos instrumentos se asemeja al saxofón y al clarinete y se hace una analogía con el funcionamiento acústico de ellos. Fueron grabados (junto a dos saxofones y un clarinete) bajo condiciones controladas. El análisis cualitativo se efectuó comparando el espectro y las componentes armónicas de ellos. El análisis cuantitativo se realizó utilizando los parámetros microscópicos de la función auto-correlación de cada muestra. En la investigación y las grabaciones se demuestra que su funcionamiento es análogo a los instrumentos de viento de lengüeta simple que se pueden encontrar en una orquesta hoy en día.

## 1 Parte I: Análisis cualitativo

### 1.1 Introducción

El llamado “saxo andino” es un instrumento cilíndrico hecho de bambú o algún otro tipo de madera tallada. No se sabe con certeza su origen, pero a pesar de su nombre sugerente, se tiene la certeza de que no es un instrumento que se origine en los andes, y no está emparentado con aerófonos auténticos como ser el siku o la quena. Su primera aparición data de Jamaica alrededor de 1950, pero se han encontrado diferentes versiones del mismo principio en diversos lugares del globo. Su diseño y construcción varían según su fabricante, pero el común denominador del instrumento es su forma cilíndrica, lengüeta simple y generalmente poseen digitación de flauta dulce. En la Figura 1.1 tenemos un ejemplo de estos, el llamado Xaphoon con origen en Hawai.



**Figura 1.1.** Instrumento de viento llamado Xaphoon

Tanto las afinaciones como los registros varían, pero lo más usual es encontrar pentatónicas o escalas mayores (en los casos de afinaciones temperadas<sup>1</sup>) y registros de alrededor de 2 octavas, según la longitud de cada instrumento.

En este trabajo, los dos objetos de estudio analizados son aerófonos de aproximadamente 50cm. de largo y 2.5cm de diámetro externo. Ambos poseen la misma digitación, pero mientras el aerófono 1, tiene afinación propia de una pentatónica menor de E, el aerófono 2 posee la afinación de un modo jónico de Bb. Mientras que el sonido de ambos posee un nivel de potencia y registros similares, sus timbres son algo diferentes, siendo el primero de ellos (A1 a partir de ahora) más parecido al de un saxo y el segundo (A2) posee un timbre más redondo, suave y profundo pareciéndose así a un clarinete.

El hecho de que sus principios de funcionamiento físicos y acústicos sean los mismos, pero sin embargo la diferencia tímbrica sea tan notable al oído suscita este trabajo y la investigación sobre la influencia que tienen las distintas características de estos instrumentos sobre él.

Se investiga primero sobre el funcionamiento de los aerófonos en general de lengüeta simple, especialmente la familia de los saxófonos y los clarinetes. Los diferentes principios y funcionamiento de estas familias, y cuales son sus principales similitudes y diferencias. La influencia sobre estas características en el timbre es el principal factor tenido en cuenta.

<sup>1</sup> Muchos luthiers y fabricantes los han fabricado atemperados, sin duda resultado de la prueba y error o la búsqueda de sonidos distintivos.

Como experiencia empírica se graba bajo exactamente las mismas condiciones un saxo alto, un saxo soprano, un clarinete y los dos aerófonos en cuestión. Sus espectros son analizados y comparados de forma de poder corroborar experimentalmente las hipótesis tomadas en cuenta durante la investigación. También se corroboraron otras hipótesis realizando ciertas modificaciones espectrales sobre las grabaciones.

## 1.2 Fundamentos Acústicos

### 1.2.1 Tubos Rectos

En el caso específico de los clarinetes y los saxos, se considerará el extremo del tubo en donde está la lengüeta (y por donde sopla el ejecutante) un extremo cerrado, lo que causa que hallemos en él, un nodo de desplazamiento y un antinodo de presión. Esto es debido a que en el extremo cerrado nos encontramos con un obstáculo rígido y por ende el desplazamiento en este punto será nulo. La velocidad en este punto será máxima debido a que es donde se origina la variación de presión

El otro extremo es abierto, y por ende se lo considera bajo presión atmosférica, convirtiéndolo así en un nodo de presión. Esto es debido a que la presión en él será nula en comparación con la que encontraremos a lo largo de la columna de aire. A pesar de que se modela como un antinodo de desplazamiento, cabe destacar (para no caer en frecuentes errores) que el mismo se relocaliza fuera del tubo, considerándose así, un factor de corrección (al igual que se hace para la abertura de los resonadores de Helmholtz). Este factor de corrección es generalmente una distancia de  $0.6r$ , siendo  $r$  el radio del tubo interno.<sup>2</sup> Por ende se considera en realidad a la longitud efectiva o “virtual” de la columna ligeramente más larga que la longitud real del tubo o de la cavidad de aire.<sup>3</sup>[1]

Ahora, esta cavidad al modelarse como un tubo cerrado-abierto, hace que el modo fundamental se extienda desde un nodo en el extremo cerrado hasta un antinodo en el extremo abierto, formando así, un cuarto de longitud de onda. Las ondas más altas que también satisfacen estas condiciones en los extremos son aquellas que son múltiplos enteros impares de la frecuencia fundamental ( $3f_1$ ,  $5f_1$ , etc.) Matemáticamente:

$$f_n = n V/4L. \quad \text{Con } n = 1, 3, 5... \quad (1)$$

Así sabemos que estos instrumentos tienen sus frecuencias naturales de resonancia localizadas en sus modos impares. Ahora, ya que el extremo donde se encuentra posicionada la lengüeta opera con variación de presión máxima y flujo de aire mínimo, la impedancia acústica será máxima en las frecuencias naturales de resonancia del tubo.

### 1.2.2 Tubos Cónicos

Ahora bien, todas estas premisas se cumplen para tubos rectos como el clarinete. Pero al encontrarnos con tubos cónicos, como el saxo, vemos que debido a la pendiente que estos llevan, los principios acústicos que generan el sonido difieren en algunas cosas. Esto es debido a la diferencia que hay en el volumen del aire entre secciones de los tubos, y a la variación de impedancias en el mismo debido a la creciente área del mismo. Vemos así como los nodos van siendo desplazados hacia el extremo creciente del tubo. Esto es siempre que la

<sup>2</sup> Solo para tubos cilíndricos

<sup>3</sup> En los casos de abierto-abierto se ha de aplicar un factor de corrección de ambos lados, lo cual es complejo ya que este cambiará según la posición del ejecutante sobre el extremo donde se origina el sonido.

pendiente sea constante y no exponencial o parabólica. En estos casos veremos cómo los modos reforzados no serán múltiplos enteros de la fundamental, causando que el instrumento desafine, o como se dice comúnmente que “mienta” en las frecuencias que estén sobre la fundamental. Una columna de aire de forma cónica producirá la misma frecuencia fundamental que un tubo abierto a ambos extremos, y su primer armónico será la octava, a diferencia del sistema cerrado abierto donde el primer armónico en aparecer es la duodécima ( $1,5 f_1$ ). Así las frecuencias de resonancia de una columna de aire cónica están dadas en todos los armónicos. Correspondiendo con la siguiente fórmula

$$f_n = n V_{/2L}. \quad \text{Con } n = 1, 2, 3... \quad (2)$$

Ahora en los instrumentos cónicos, se tiene que considerar que los armónicos pares si serán estimulados tanto como los impares. Debido a esto el saxo y su familia, posee el timbre distintivo que lo hace tan fácilmente diferenciable de un clarinete o de otro instrumento de cilindro recto.

Esto también es fácil de ver si tenemos en cuenta que en el caso de los tubos rectos, la onda propagada a lo largo del cuerpo es plana y si no tenemos en cuenta pérdidas térmoviscosas, vibraciones y rozamiento, la misma se podría propagar infinitamente ya que su área efectiva no crece. Ahora bien en el caso de los cilindros cónicos, tenemos que son frecuentemente modelados como secciones de una esfera<sup>4</sup>. Así, no solo obtendremos los modos impares como solución a la ecuación de onda, sino que se expresarán como armónicos esféricos. [7]

Debido al creciente valor de el área en los cortes transversales del instrumento, tenemos que tanto el instrumento en su totalidad, y más específicamente la campana, funcionan adaptando impedancias progresivamente, lo que hace que la impedancia acústica dentro del tubo sea menor a la de un tubo cilíndrico recto. La geometría de la campana y su adaptación progresiva causa que el sonido se propague con mayor facilidad cuando llega al final del tubo. A mayor porcentaje de sonido propagado, menos será la cantidad de este que se reflejará para formar parte de la onda estacionaria, por lo que la misma tendrá menos energía y por lo tanto se impondrá menos sobre la lengüeta.

### 1.2.3 Vibraciones de una lengüeta

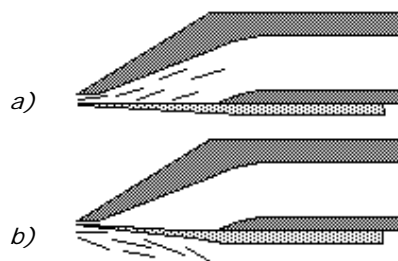
La lengüeta de los clarinetes y saxos produce una vibración errática, que es activada por el ejecutante cuando sopla a través de la cavidad de aire que se mantiene entre la lengüeta y la punta del instrumento. Como la lengüeta es flexible y solo se mantiene rígida en la parte que está pegada al instrumento, esta vibra dando así origen al sonido. Cabe destacar que a medida que la lengüeta que usemos sea menos rígida, la longitud virtual de la columna de aire se alargará agregando así otro factor de corrección.

Al pasar un flujo de aire por esta cavidad (Figura 1.2.a), la presión en ella disminuye, lo que causa que por un efecto de vacío, esta se cierre de nuevo pegándose al cuerpo del instrumento. Al pasar esto y mantenerse el flujo de aire producido por el ejecutante, este vuelve a reducir la presión pero esta vez del lado de afuera de la lengüeta (Figura 1.2.b), lo que causa que la lengüeta vuelva a separarse del instrumento. Al estar la lengüeta de nuevo separada del instrumento y el flujo de aire mantenerse, esto causa que el ciclo se vuelva a repetir estableciendo así una oscilación propia de la lengüeta rica, la cual será

---

<sup>4</sup> A la manera de un esterradian.

instantáneamente alineada con las frecuencias naturales del tubo para que ambos vibren en un régimen por acoplamiento.



**Figura 1.2:** Esquema de la mecánica de la lengüeta.

La fuerza con la que el ejecutante sopla el instrumento y la presión de los labios sobre la lengüeta determinan la velocidad con la que el flujo de aire pasara y por ende la frecuencia a la que vibrara la lengüeta. Cuanto más fuerte sopla el ejecutante, el recorrido de la lengüeta será más amplio. Si el ejecutante toca muy fuerte, generalmente la lengüeta tocara el cuerpo del instrumento produciendo así un sonido más sucio lo que en la jerga de los saxofonistas se conoce como “*growl*”. Al soplar más fuerte se excitarán también los parciales más agudos dando no solo un tono brillante y estridente, sino también una mayor potencia sonora por la mayor percepción del oído en frecuencias altas. Cuando la lengüeta vibra más lento y con menos recorrido, se consiguen sonidos más oscuros y suaves, predominando la fundamental y sus primeros modos. Esto también nos explica porque las lengüetas más suaves y flexibles crean sonidos más agudos y brillantes. Al vibrar a mayor velocidad con la misma presión, estimulan la aparición de componentes agudas en el espectro.

Ahora bien, no solo es de importancia crítica la vibración de la lengüeta, su geometría y el volumen contenido por la misma también es de gran importancia. Este volumen es inversamente proporcional a la presencia de modos más agudos en el sonido final producido por la columna de aire. Así, con cavidades más pequeñas obtendremos sonidos más brillantes y por ende con más potencia sonora debido al a aparición de estos parciales más agudos. Estos volúmenes también alargan a la longitud virtual de la columna resonante, siendo este efecto más notable en tubos cónicos.

La lengüeta y el tipo de material usado en la misma sin embargo, tendrá una gran influencia sobre el timbre final. Esto es debido a que es sabido que el timbre está muy relacionado también con la envolvente, y el ataque propio de estos instrumentos está dado por el instante en que la lengüeta pasa de vibrar caóticamente al momento en que es alineada con la frecuencia natural de la columna de aire<sup>5</sup>. Esta transiente es fundamental para el sonido propio de cada instrumento.

#### 1.2.4 Radio interno del tubo

A pesar de que el radio, hasta ahora no ha sido tenido en cuenta, su influencia no tiene que ser despreciada a la hora de hacer un análisis más detallado. Su importancia rige en dos factores principales. La frecuencia de corte y la velocidad del sonido dentro del tubo.

<sup>5</sup> En acoplamiento mecánico

Ahora bien, según lo antes detallado, se podría suponer que en la serie de armónicos de la frecuencia fundamental a la que resuena el tubo, se encuentran presentes todos los modos posibles. Pero esto no es así. Existe la denominada frecuencia de corte, frecuencia a la cual los parciales dejan de aparecer. Esto se debe a que cuando las ondas de sonido llegan tanto a los agujeros con los que se varía al digitación o bien al fin del instrumento, se produce un cambio en el *distintivo* del medio, y eso ocasiona la reflexión. Sin embargo, esto depende de la frecuencia, ya que estos cambios en el distintivo operan como filtros pasa altos, así apareciendo la “frecuencia de corte”, sobre la cual las ondas no serán reflejadas y seguirán su camino. Encontramos que dependiendo del radio del tubo, este cambio en el distintivo es más o menos brusco, siendo el radio inversamente proporcional a la frecuencia de corte. Es así que con radios más pequeños alzaremos la presencia de modos más agudos en nuestra columna resonante, y con radios muy grandes tendremos preponderancia de la fundamental y sus primeros modos. Correspondiendo así a la siguiente fórmula

$$f_n = \frac{c}{2\pi} * \frac{2b}{2a} * \frac{1}{(t * 2s)^{0.5}} \quad (3)$$

Siendo  $C$ ,  $a$ ,  $b$ , y  $s$  la velocidad del sonido, el radio de la columna de aire,  $b$  el radio del agujero,  $2s$  la distancia entre el último agujero y este.  $t$  es la longitud de aire que vibra aproximadamente el ancho del tubo sumado a  $1,5b$ . Esta fórmula sirve tanto para los agujeros que acortaran la longitud efectiva del tubo como para el fin del mismo o en defecto su campana. En la construcción de instrumentos se tiene en cuenta que esta frecuencia de corte se tiene que mantener pareja entre todos los agujeros para mantener un timbre coherente y constante en todo el registro del instrumento.

La importancia también del radio del tubo es en la reducción de la velocidad del sonido dentro del tubo. La velocidad del sonido en el tubo, es afectada por la fricción, quedando así modificada por un factor que depende tanto del radio del tubo como de la frecuencia. La velocidad del sonido dependiendo del tubo y la frecuencia entonces está dada por la siguiente fórmula:

$$c(a, f) = c * \frac{1 - 1.65}{a * \sqrt{f}} \quad (4)$$

siendo  $a$  el radio en milímetros y  $f$  la frecuencia. Esto le da un distintivo único a cada instrumento, ya que al ser afinado para las notas fundamentales de su registro, se encontrará que sus modos más agudos estarán ligeramente corridos de ser múltiplos completamente enteros. Esto le dará al sonido un timbre muy diferente, pero sin embargo afinado.<sup>6</sup>

### 1.2.5 Influencia de los Materiales

Las explicaciones anteriormente expuestas hablan específicamente de geometría y aire. Por lo tanto se podría asumir que el material no tiene ningún tipo de influencia. Pero entonces seguramente surgirá la pregunta, ¿Por qué la mayoría de los aerófonos tradicionales de orquesta están fabricados con metales?

<sup>6</sup> Similar al efecto “detune” de los sintetizadores

Como dice John Coltman en “*Effect of material on Flute tone quality*”[6] se puede afirmar que debido a que el principal emisor del sonido es la columna de aire, el material del que esté construido el instrumento se puede despreciar siempre en cuando este cumpla con tres condiciones:

- El tubo ha de ser rígido. (no deformable)
- El interior del tubo ha de ser liso, uniforme y continuo.
- El material debe ser impermeable.(sin pérdidas)

Ahora bien, en el caso del bambú u otras maderas tenemos que el material no se puede considerar impermeable debido a pequeñas células de aire encerradas entre los filamentos de la madera. Sin embargo, si podemos asumir que es liso uniforme y continuo (en caso de no serlo, los tubos pueden ser internamente lijados y pulidos), Esto sin embargo es fácilmente tratable si la madera es tratada con aceites, resinas y laqueada para sellarla de manera impermeable. Si la madera es suficientemente pulida y luego tratada de esta manera, actuara de la misma manera que la misma forma geométrica hecha en plata.<sup>7</sup> De esta manera, si podemos afirmar que un material tendrá distinto sonido dependiendo de la homogeneidad y cuan pulido este en la cara que esta en contacto con la columna de aire. [8]

Cabe destacar sin embargo, que el material si tendrá influencia sobre la columna de aire, al crearse entre la columna de aire y las paredes rígidas lo que en termodinámica se conoce como “capa límite” o “capa fronteriza” lo que hace que el rozamiento entre el material y el fluido haga un pequeño retardo en la velocidad del movimiento del fluido en cuestión (aire en nuestro caso) en las zonas linderas a las paredes internas del aerófono. El espesor de esta capa es proporcional a la porosidad del material contra el que se está moviendo el aire. De esta manera, tenemos que esta capa de aire amortiguará un poco la presencia de frecuencias agudas. De esta manera, cuanto más poroso sea el material, tendremos que más apagado y oscuro será el sonido final.

Algunos argumentan también que los músicos insisten tanto en el material de sus instrumentos debido a la comodidad que cada uno de estos les genera y las vibraciones que se transmiten por medio óseo hasta sus oídos. Generando así un factor psicoacústico a tener en cuenta al momento de analizar la influencia del “material” en el timbre.

## 1.3 Experiencia

### 1.3.1 Aplicación de los conceptos y resultados esperados

Para realizar todo lo anterior empíricamente, primero lo aplicamos a los dos aerófonos mencionados. De esta manera se toma en cuenta su forma cilíndrica y que su comportamiento será el de un clarinete en lo que nos concierne a su composición armónica y por ende timbre. Son de algún tipo de madera rígida que evidentemente esta pulida y tratada por lo que tomaremos en cuenta las tres condiciones que pone Coltman para despreciar el material. Sus lengüetas son las mismas que se usan para saxos y clarinetes por lo sabemos que el funcionamiento será el mismo. Sin embargo, su unión con el instrumento esta hecho de diferentes maneras. El radio efectivo<sup>8</sup> de ambos es diferente, por lo que se espera algún cambio tímbrico acorde con lo mencionado concerniendo a la influencia del radio. Es también

---

<sup>7</sup> Así lo halló Coltman en su trabajo, y lo comprueba el Luthier argentino David Slomka que fabrica biseles de madera para flauta transversa con resultados asombrosos.

<sup>8</sup> A pesar de que el radio exterior de ambos es el mismo, el radio interior es menor en A2 debido al espesor de la madera

marcada la diferencia en el volumen contenido por la lengüeta, siendo este mucho mayor en A1.

Se graba también para comparar, los timbres y corroborar resultados dos saxos, un soprano y un alto, y un clarinete. Se hacen dos tomas de cada instrumento tocando siempre efectuando el primer armónico que puede producir el tubo. La fundamental elegida fue 194 Hz (G3), ya que era una nota que todos los instrumentos tenían<sup>9</sup> y que más esencialmente, se encontraba relativamente en una longitud mediana en todos los instrumentos. Se busco esto ya que el timbre de todos los aerófonos cambia marcadamente según en qué parte del instrumento se encuentra la llave o agujero que permite cortar la longitud virtual del tubo para producir dicha nota. Esto es debido a lo anteriormente mencionado de la frecuencia de corte según el área del agujero final. En todos los instrumentos el G3 era una nota que se producía un timbre propio, muy característico de ellos, y en donde la influencia de la campana (en los saxofones y el clarinete) era relativamente escasa.

### 1.3.2 Grabación

La primera toma se hizo en la posición recomendada para este tipo de instrumentos con el patrón polar del micrófono apuntando hacia el cuerpo de la columna de aire. Esto se hizo de forma de poder captar con mayor claridad y nitidez las vibraciones de la misma. La segunda toma se realizó con el mismo posicionamiento del micrófono, pero con el ejecutante adelantado un paso respecto al a posición anterior, quedando el micrófono muy cerca de la lengüeta y tratando de captar un poco el espectro producido por la misma. En el caso del saxo alto, esta toma se realizó con el ejecutante ensuciando el sonido más todavía con la lengüeta en un intento de ver el efecto de “*growl*”.<sup>10</sup>

Dado que las tomas fueron tomadas en un campo cercano y se estaba considerando el espectro armónico, se despreció el efecto de la sala. De todas maneras las grabaciones mostraron que una vez dejada de tocar la nota se mantenía un cierto nivel por menos de 0.7 segundos. Se tomo lejos del centro de la sala y lejos de las paredes para evitar lo mayor posible el efecto de las reflexiones. El espectro fue analizado también en los mismos períodos temporales y sin tener en cuenta la cola reverberante.

El material usado fue un micrófono plano a condensador Behringer B-2. Se uso su patrón polar cardióide (Ver Anexo II), para reducir efectos de la sala y tomar más directamente el instrumento. Este se posiciono sobre su correspondiente pie y jaula. A través de él se grabo con el Steinberg Nuendo y más tarde, se usó el analizador de espectro Isotope RX v1.06 con un tamaño de Transformada Rápida de Fourier de 32768 y ventana de tipo Hanning. Se utilizó una consola Mackie como preamplificador y para regular los distintos volúmenes y tener un nivel sonoro parejo en todas las muestras.

Cabe destacar que se presentó una dificultad durante la grabación ya que la afinación de los dos aerófonos A1 y A2 se desconocía. Por lo que hubo que encontrar sus respectivas notas, las cuales debido a la falta de práctica de los ejecutantes iban variando en el rango del semitono<sup>11</sup> para la misma posición. A pesar de tener un oído entrenado musicalmente, esto fue difícil ya que se realizo una primer serie de equivocadamente, efectuando una quinta sobre el G3 que se habían previamente grabado los saxófonos y el clarinete. La consonancia del D4

<sup>9</sup> Mientras los saxos y el clarinete son cromáticos, los aerófonos de madera analizados están afinados en una pentatónica menor de E y un modo Jónico de Bb. Haciendo que el G sea el tercer grado menor en el primer caso y la sexta mayor en el segundo.

<sup>10</sup> Ya que es muy difícil mantener este efecto periódicamente en el tiempo se hicieron varias tomas de períodos cortos de tiempo.

<sup>11</sup> Debido a la distinta presión aplicada sobre la lengüeta por el ejecutante.

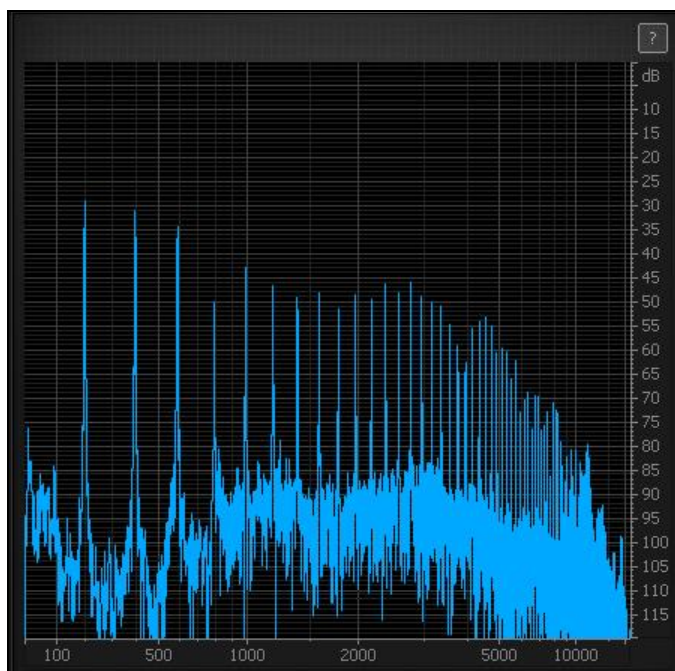


con el G3 ocasionó esta confusión, la cual fue remediada ya que se volvieron a efectuar las múltiples grabaciones pertinentes, esta vez si hasta lograr unas que estuvieran perfectamente afinadas con el G3 que se buscaba.

### 1.3.3 Resultados

Los resultados fueron muy acorde con los esperados. Los análisis espectrales eran exactamente los esperados. Destacando una mayor presencia de los armónicos pares en los tubos rectos que la esperada y notando una considerable similitud entre el espectro de ambos aerófonos y el del clarinete.

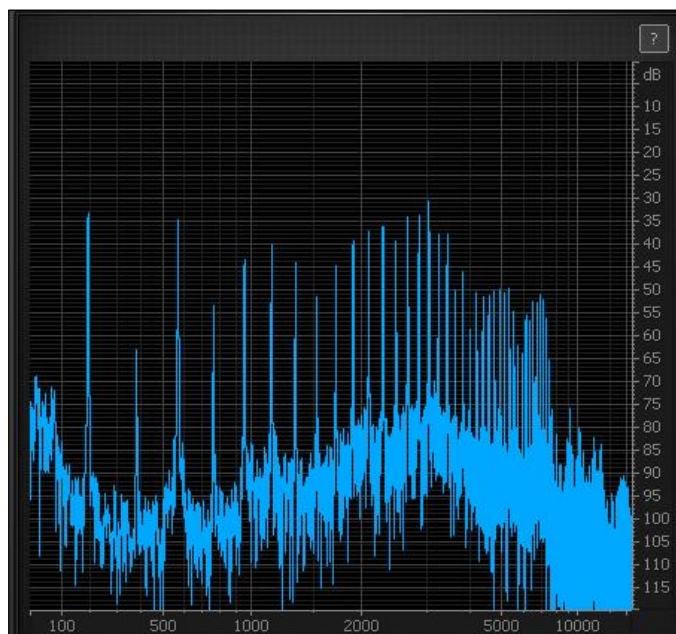
Tanto del saxo alto como del soprano se encontró un espectro parejo con picos en todos los modos del tubo, acentuando especialmente en la fundamental. (Figura 1.3)



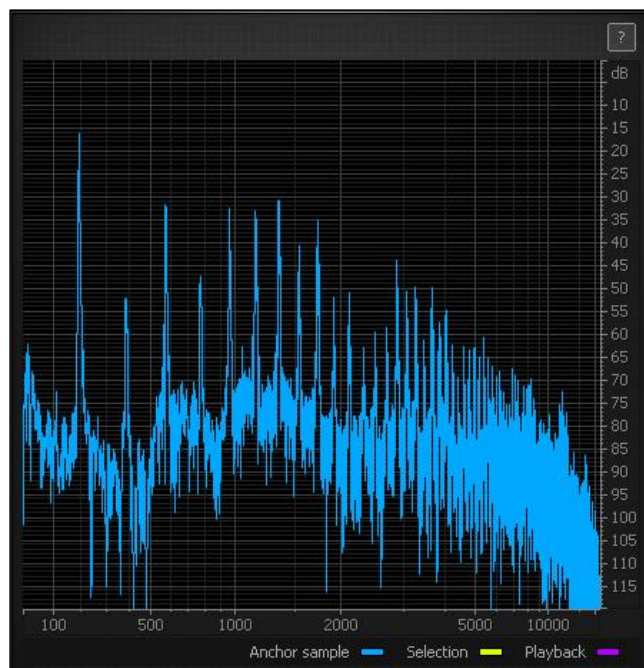
**Figura 1.3.** Espectro en frecuencias del Saxo Alto.

Si lo comparamos con el espectro del clarinete, notamos como en este ultimo baja considerablemente el nivel de los armónicos pares de la fundamental. También notamos un mayor nivel en las componentes más agudas. La pendiente entre los 2000hz y los 5000hz es más elevada en el clarinete.

Ahora, en el aerófono A1 (Figura 1.5), notamos una componente más similar a la del clarinete, con este mismo bajo nivel en los múltiplos pares enteros de la fundamental. Vemos también que las componentes entre los 1000Hz y los 2000Hz tienen más presencia que en el clarinete, así otorgándole un timbre con más presencia. Se ve también una diferencia mayor entre la fundamental y su segundo armónico.

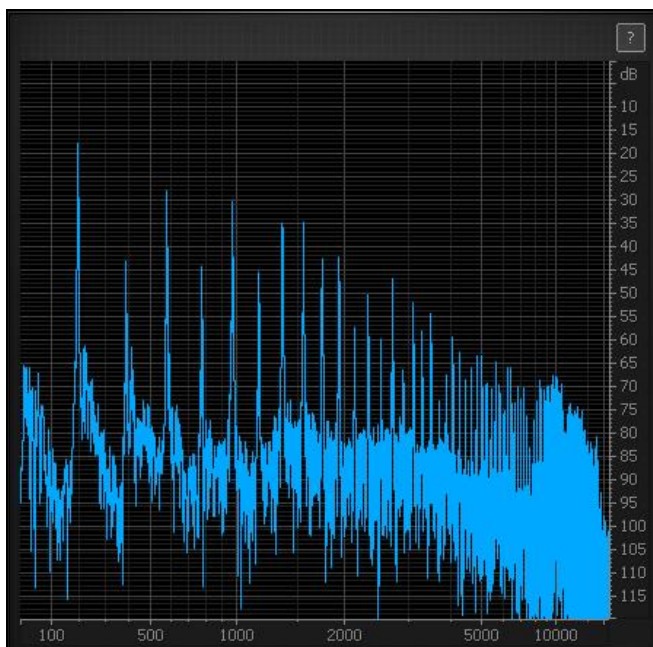


**Figura 1.4.** Espectro en frecuencias del Clarinete.



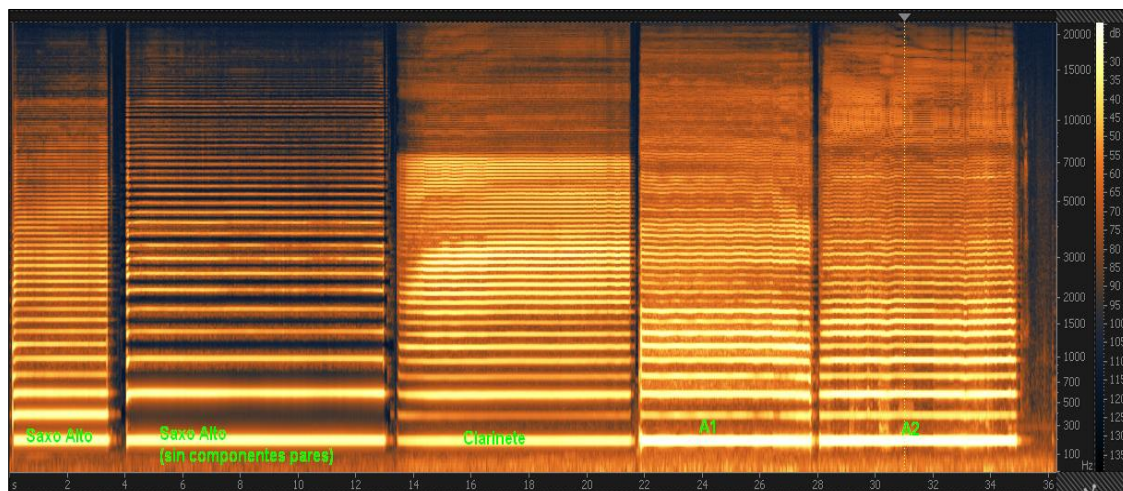
**Figura 1.5.** Espectro del A1.

En el aerófono A2 (Figura 1.6) vemos que este incremento en los medios no sucede, otorgándole un sonido más hueco.



**Figura 1.6.** Espectro en frecuencias del A2.

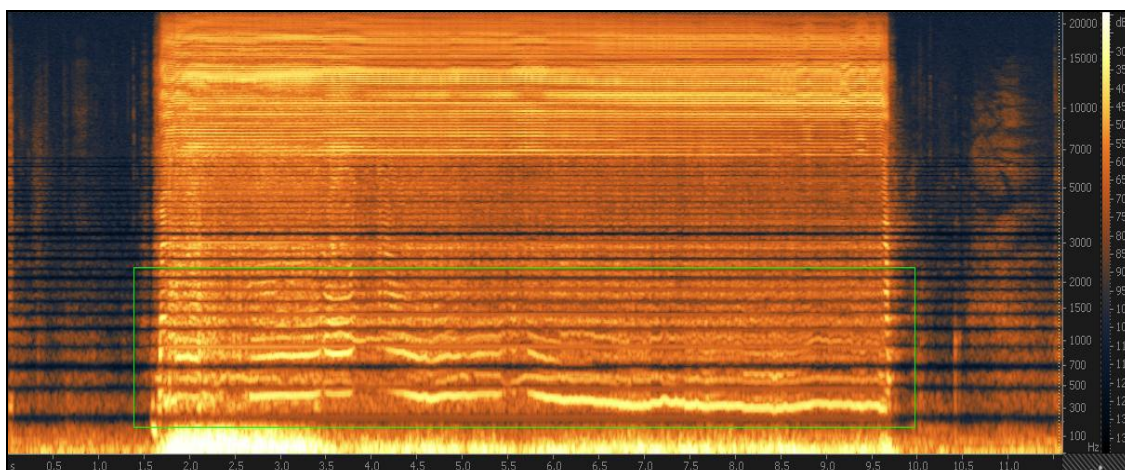
Por último, cabe destacar que de la grabación del saxo alto, se pudo eliminar luego los armónicos pares, haciendo el sonido muy similar al de una onda cuadrada. Esto fue hecho seleccionando en un analizador de espectro la banda de frecuencias que correspondía a los armónicos pares y eliminándolas completamente de nuestra muestra de sonido. A pesar de que se llegó a asemejar más a un clarinete que el mismo saxo o los aerófonos, se sigue notando una diferencia tímbrica importante. Esto se debería a que los armónicos pares fueron eliminados totalmente mientras que en el clarinete los mismos sí tienen una presencia significativa (aunque no protagonista). En la figura 1.7, tenemos así una comparación espectral entre todas las tomas hechas (exceptuando la del soprano que es casi idéntica a la del alto y por ende no se incluye).



**Figura 1.7.** Comparación entre los espectrogramas de todos los Aerófonos.



Se intentó también eliminar la componente tonal de una de las muestras eliminando la fundamental y todos sus armónicos en un intento de aislar el sonido de la lengüeta vibrando, con un éxito parcial. Al escuchar el audio se puede claramente diferenciar el sonido vibratorio causado por la lengüeta, que se ve en el espectrograma temporal en el recuadro en verde. (Figura 1.8)<sup>12</sup>.



**Figura 1.8.** Espectrograma del sonido de la lengüeta.

#### 1.4 Conclusiones

A juzgar por los resultados, podemos deducir que el timbre de estos aerófonos de madera, se asemeja mucho más al de un clarinete que al de un saxo. Esto se debe principalmente debido a su forma cilíndrica recta y la consecuencia directa que esto ocasiona: el bajo nivel que encontramos en sus armónicos pares. Por ende su escucha al oído entrenado lo identificará más rápidamente con un clarinete. Sin embargo a la escucha general, sonará más similar a un saxo. Esto es debido al mayor conocimiento que tiene el público general, al estar este muy familiarizado con los saxos debido a su frecuente uso en la música popular y al relativo poco uso del clarinete en la misma. El timbre único ocasionado por la lengüeta y el ataque propio de esta, hará que la mayoría de los oyentes lo asocie con el saxo, mientras que un músico entrenado tal vez lo identifique más cercano a un clarinete. De esta manera ha recibido su errónea denominación de “Saxo Andino”. Ya que sabemos que, ni funciona como un saxo, ni tiene sus orígenes en el folklore andino.

Al momento de la escucha, la principal diferencia tímbrica entre A1 y A2, se caracteriza en que A1 posee un sonido mucho más brillante y con más componentes de los modos agudos y A2 a su vez, posee un sonido más redondeado y sinusoidal. A pesar de que en las grabaciones, esto no se hace visible, el factor principal que sustenta esto, es el volumen contenido por la lengüeta, que es mucho menor en A1, por lo tanto favoreciendo la aparición de modos agudos. Sin embargo un factor menos importante pero no despreciable, es que el radio de A1 es mucho mayor por lo que tendría que tener menos aparición de estos modos. Se deduce entonces que la influencia del volumen contenido por la lengüeta es mucho mayor que

<sup>12</sup> Es posible que se note sin embargo, que el tono eliminado no es el G3 hasta ahora analizado si no el D4 mencionado antes. Se usó esta muestra debido a que en ella se notaba mejor la presencia de la lengüeta y su variación en el tiempo en comparación con el resto del espectro.

el radio interno de la columna. Se requeriría un mayor análisis para poder afirmar dicha conclusión.

Se pudo mostrar también que es más exacto grabar estos instrumentos desde aproximadamente la mitad de su longitud y no desde su campana, si la hay. Ya que en todas las grabaciones se encontró también que el mayor nivel sonoro y claridad se registraba al grabar con el micrófono diseccionado hacia el cuerpo del instrumento.. De esta manera también tendremos los tonos más claros y menor influencia del espectro irregular de la lengüeta vibrante.

Cabría destacar también que estas mediciones podrían realizarse de nuevo (idealmente en una cámara anecóica) construyendo este tipo de aerófonos y usando distintos materiales para exactamente la misma geometría, de modo de poder observar cuanta relevancia tendría la absorción de frecuencias muy agudas debido al efecto de la capa límite. El problema recae en que al estar trabajando con objetos de madera (más específicamente de bambú o caña debido a la ventaja de que ya vienen huecos), es muy difícil encontrar dos piezas totalmente iguales y que la distribución de masa y rugosidad sea homogénea en toda la pieza.

También habría que compararlos con los saxos hechos a base de cilindros escalonados, que se comportan como conos para buscar algún patrón que rijan a los mismos. Las variaciones de material para geometría idéntica deberían ser buscada también en estos instrumentos de modo de encontrar las variaciones de la capa límite según la progresiva adaptación de impedancias.

## 2 Parte II: Análisis Cuantitativo

### 2.1 Introducción

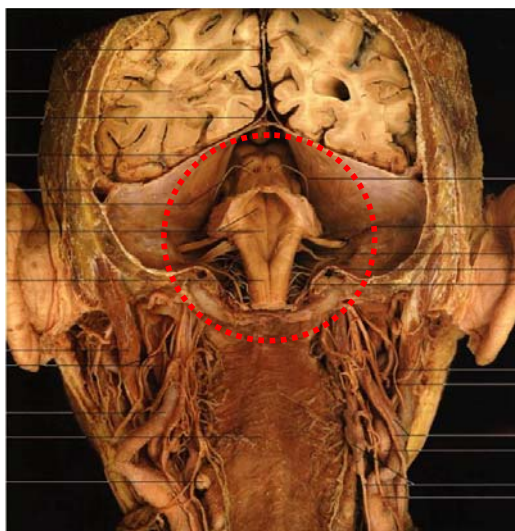
Al presente, la definición de timbre es difusa, y hasta incierta, imposibilitando esto la comparación tímbrica numérica entre diversas fuentes sonoras. Se ensaya en el texto que sigue una técnica que logra cuantificar el timbre partiendo de noveles modelos de la audición, hasta el punto de poder comparar fuentes sonoras. Los valores numéricos obtenidos se contrastaron con encuestas las que dan sustento a la técnica presentada.

En [9] se presentan los procesamientos matemáticos superiores del sistema auditivo, las funciones de Autocorrelación (ACF) y correlación cruzada (CCF), producidas en el complejo olivar superior y en el lemnisco lateral del tronco cerebral, visible en la figura 2.1; conjuntamente con estudios realizados con estímulos sonoros ortogonales es posible afirmar la existencia de la especialización de cada uno de los hemisferios cerebrales: el izquierdo procesa mayoritariamente la información temporal y el derecho la información espacial, incluyendo el nivel sonoro.

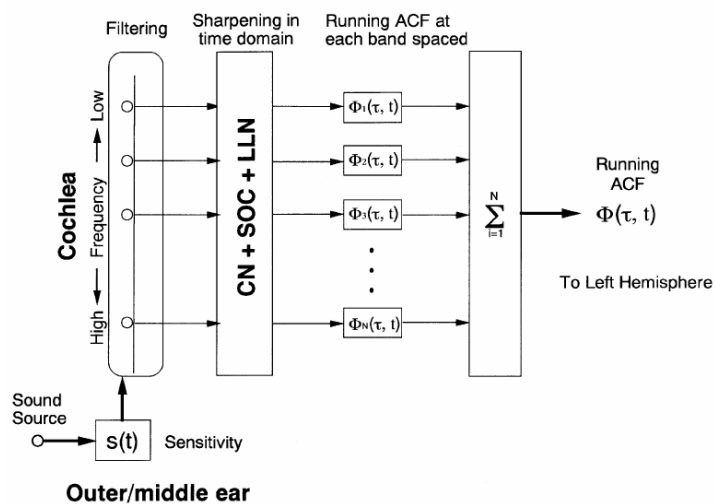
El diagrama en bloques equivalente a lo antedicho es el expuesto en la figura 2.2.

En [9] y [11] también se demuestra que la atención auditiva se produce en aquellos momentos en que la pendiente de la envolvente de la ACF es mínima, o sea en la parte más activa de la señal sonora. Dicho momento representa el de menor memoria o “reverberación interna” de la señal y su descriptor es el  $\tau_{emin}$ .

Además del anterior descriptor, es posible definir otros, llamados “parámetros microscópicos” de la función autocorrelación (ACF), correspondientes a las magnitudes ( $\phi_n$ ) e instantes ( $\tau_n$ ) de los  $n$  picos positivos de la ACF normalizada, a contar desde  $t=0$  y siguientes.



**Figura 2.1.** Fotografía de un Tronco cerebral (dentro de la elipse punteada color rojo), lugar físico donde se realizan las funciones matemáticas del sistema auditivo superior.



**Figura 2.2.** Diagrama en bloques de los procesamientos matemáticos del sistema auditivo superior.

La función autocorrelación normalizada es:

$$\Phi_{pN} = \frac{\Phi_p(\tau)}{\Phi_p(0)} \tag{2.1}$$

siendo:

$$\Phi_p(0) = \sqrt{\Phi_{ll}(0) \cdot \Phi_{rr}(0)} \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 también es el nivel sonoro de la señal, obtenido con el tiempo de integración de la ACF apropiado según el tipo de señal percibida (lo que presentará mayor exactitud que la utilización de uno fijo para toda fuente sonora) [13].

A partir de esto se plantean cuatro parámetros acústicos basados en lo arriba expuesto, dependientes de los valores extraídos de la ACF y la CCF [11]:

- Tiempo de reverberación (en función del  $\tau_{emin}$ ).
- Pre delay, en función del  $\tau_{emin}$  local de la señal percibida y de la energía de las reflexiones sucesivas (tempranas).
- Nivel sonoro subjetivo, en función del tiempo de integración de la ACF y por consiguiente de la señal sonora percibida.
- Decorrelación binaural subjetiva, en función del tiempo de integración de la CCF.

La información subyacente a este descubrimiento es que tanto los parámetros acústicos como los resultados de los procesamientos matemáticos dependen, además, de la señal sonora a percibir, pues de ella dependen las características microscópicas de la ACF, particularmente en los instantes en que se presentan los  $\tau_{emin}$  locales.

## 2.2 Análisis de fuentes sonoras

Las sensaciones primarias relacionadas directamente con la ACF son:

- Altura tonal (*pitch*).
- Nivel sonoro.
- Timbre.
- Duración.

El timbre, clásicamente, se define como una cualidad sonora independiente del nivel sonoro subjetivo, la altura tonal y la duración. Es aquel conjunto de características del sonido que el cerebro reconoce y le permite identificarlo de forma unívoca.

Además, por lo general, la literatura específica tradicional agrega que:

La identificación de fuentes sonoras está mayormente relacionada con las características físicas “envolvente” y “espectro en frecuencias” de las señales acústicas.

En este sentido, la envolvente es la magnitud de la energía instantánea de una señal acústica, lo que incluye el transitorio de inicio o ataque, la porción estacionaria y el decaimiento, como finalización del mismo. Esta propiedad aporta mucha información al intentar establecer o definir el timbre de un sonido cualquiera.

En particular el ataque o transitorio es el intervalo de mayor importancia donde el cerebro realiza las operaciones de corroboración de los datos percibidos (ingresantes) con otros almacenados en la memoria.

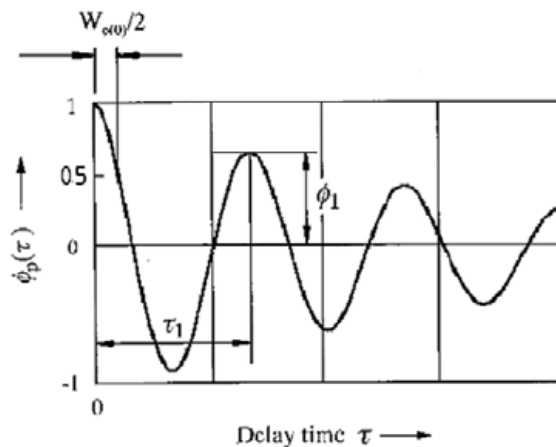
Se presume que como resultado de esta comparación de la señal de entrada con la base de datos existente en la memoria se identifica una fuente sonora en función de la mínima distancia vectorial hallada entre la primera y alguno de los registros.

De lo anterior se destaca que, dada una señal compleja y de gran dinámica, no queda claro en qué momento el cerebro extraería la información de la fuente sonora bajo análisis, pero pareciera seguro el modelo de comparación de datos ingresantes con otros almacenados en memoria.

Por medio de la ACF y ciertos parámetros microscópicos de ésta es posible identificar toda fuente sonora [10]. Éstos son:

- El nivel sonoro promedio,  $\Phi(0)$ . Expresa el nivel sonoro en el punto de medición. Existe una fuerte relación entre  $\Phi(0)$  y la escala subjetiva de nivel sonoro.
- La duración efectiva de la ACF,  $\tau_e$ . Se define como el tiempo que tarda la envolvente de la ACF en ir desde su punto máximo en  $t=0$  hasta la décima parte de su valor. Este valor expresa la reverberación contenida en la señal.
- El retraso del primer pico de la ACF,  $\tau_1$ . Corresponde a la altura tonal (*pitch*) del sonido.
- La amplitud del primer pico de la ACF,  $\phi_1$ . Corresponde a la magnitud de la altura tonal (*pitch strength*).

Es posible agregar como (otro descriptor microscópico) del timbre al primer tiempo de retraso (*delay*) al cual la envolvente normalizada de la ACF,  $\phi(t)$  tiene una amplitud de 0.5 [12], según se observa en la figura 2.3.



**Figura 2.3.** Descripción de los parámetros microscópicos  $W_{\phi(0)}/2$ ,  $\tau_1$  y  $\phi_1$ .

En [12] se comprueba, a partir de 2 experimentos, que el factor determinante del timbre más efectivo extraído de la ACF continua de la señal percibida es  $W_{\phi(0)}$ , el que también está relacionado con las componentes de frecuencias de la fuente sonora.

En particular, los parámetros microscópicos de la ACF obtenidos en  $\tau_{emin}$  han demostrado ser buenos indicadores de diferencias en la evaluación subjetiva de fuentes de ruido y del campo sonoro. Si bien hasta el momento se ha realizado el estudio sólo con las anteriormente mencionadas fuentes sonoras, se plantea aquí el análisis a partir de la ACF de instrumentos musicales de viento con diferencias espectrales sutiles.



Según se muestra también en la figura 2.3,  $\tau_l$  y  $\phi_l$  son, respectivamente, el retraso y la amplitud del primer pico de la ACF normalizada. Este primer máximo debe ser determinado como el pico principal, evitando picos menores locales. Los factores  $\tau_n$  y  $\phi_n$  (para  $n \geq 2$ ) en los estudios sobre ruidos son generalmente excluidos porque están relacionados con  $\tau_l$  y  $\phi_l$ . En este caso de estudio se generaron vectores representativos del timbre de cada aerófono y luego se compararon las distancias entre cada uno.

La parte más activa de la señal es aquella que presenta el valor mínimo de  $\tau_e$ ,  $\tau_{emin}$ , dentro del histograma de éstos durante la porción de señal a analizar. Dado que el hemisferio humano izquierdo es especialmente sensible a los movimientos más rápidos de las señales, los valores locales de  $\tau_{emin}$  de éstas serán los instantes en que el cerebro percibe y extrae los datos de identificación de fuentes (“cues”). Para fuentes sonoras puras o simples (ejemplo: sonidos monotonaes y ruidos), los diferentes valores mínimos locales tomarán valores similares y los mencionados “cues” será el vector compuesto por los valores  $\phi(0)$ ,  $\tau_{emin}$ ,  $\tau_l$  y  $\phi_l$ , según [10].

Por lo anterior, cada instante en que existe un  $\tau_{emin}$  el cerebro recoge datos para identificar la fuente sonora y/o el entorno, teoría que en este caso particular es utilizada para establecer el timbre de aerófonos.

### 2.3 Comparación entre timbres

Dado que el objetivo es cuantificar los timbres particulares, se propone hallar las distancias entre los vectores representativos de cada fuente sonora, donde la menor significará mayor similitud entre los componentes del par evaluado.

Es posible definir esta distancia, “D”, como la norma entre vectores, aplicándose para esto la distancia “Euclidiana” ( $D_{Euclidean}$ ), la “Norma 1” ( $D_{taxicab}$ ) y la “Norma p” ( $D_p$ ), según se observa en las siguientes ecuaciones.

$$D_{Euclidean} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V1_i - V2_i)^2} \quad (2.3)$$

$$D_{Taxicab} = \sum_{i=1}^n |V1_i - V2_i| \quad (2.4)$$

$$D_p = \left( \sum_{i=1}^p (V1_i - V2_i)^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (2.5)$$

Cada conjunto de datos correspondientes a los instantes de “cue” ( $\tau_{emin}$ ) de cada instrumento analizado conforma un “vector sonoro”, llamados A (Andino Claro), B (Andino oscuro), C (Clarinete), D (Saxo alto), E (Saxo sin componentes espectrales pares) y F (Saxo soprano).

Se calcularon los vectores diferenciales como resultado de todas sus combinatorias, siendo éstos los valores absolutos de las diferencias entre sus correspondientes componentes microscópicos.

Luego se calcularon las distancias que representaban cada vector diferencial según las ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.5, teniendo en cuenta de uniformizar previamente las unidades [s, dB].

También se calcularon las mismas distancias pero teniendo en cuenta sólo los parámetros más importantes:  $W_{\phi}(0)$ ,  $\tau_{emin}$ ,  $\phi_0$ ,  $\phi_l$  y  $\tau_l$ .

Lo anterior también se realizó primeramente considerando el nivel sonoro y luego sin tomarlo en cuenta (para conocer si la cuantificación del timbre era independiente del nivel sonoro o no), todo ello para comparar luego los resultados numéricos con otros de una encuesta subjetiva.

La encuesta subjetiva fue realizada sobre 22 personas normoyentes, a quienes se les reprodujo los 15 pares resultado de la combinatoria entre fuentes sonoras (A ~ F), en un estudio de grabación. Luego se les preguntó “¿Qué par de fuentes sonoras posee mayor similitud tímbrica?”. La valoración se realizó sobre una escala de 1 a 10 para cada uno de los pares.

## 2.4 Trabajo a futuro

Se deberá verificar la validez del método numérico sobre otras fuentes sonoras, así como también refinar el protocolo de evaluación subjetivo de comparación de timbres.

Además se deberá ensayar la aplicación de factores de ponderación sobre cada componente microscópico de la ACF para que la escala objetiva tienda a coincidir con la escala de valoración subjetiva de los timbres de las diversas fuentes sonoras.

## 2.5 Conclusiones

Teniendo en cuenta que el procesamiento matemático de la información es prácticamente más importante que el proceso de la audición mismo (vista su imprescindibilidad para la confección de la memoria sonora y posterior reconocimiento de fuentes), se concluye que:

- Se pudo confeccionar diferentes “vectores sonoros” correspondientes a las características propias de un sonido a partir de los parámetros microscópicos de la ACF de los mismos.
- Tanto el nivel sonoro como la totalidad de los parámetros microscópicos (en este caso  $W_{\phi}(0)$ ,  $\tau_{emin}$ , 10 valores de amplitud positiva de la ACF y sus respectivos tiempos) deben ser tenidos en cuenta para obtener resultados coincidentes con aquellos de las encuestas subjetivas.
- El nivel sonoro demostró no ser un atributo independiente del timbre al deber estar inmerso en los “vectores sonoros” para que éstos reflejen la mayor similitud entre fuentes sonoras.
- El menor resultado (“D”) que describe el par de instrumentos con mayor similitud subjetiva demostró ser coherente al aplicar las tres ecuaciones, 2.3, 2.4 y 2.5.
- Ensayando un modelo de proceso de reconocimiento de similitud de timbres se podría afirmar que: Los vectores sonoros equivaldrían a la información almacenada por el cerebro humano al identificar una fuente sonora por primera vez ( $t=0$ ). Luego, para reconocer una fuente sonora en  $t>0$ , compara el vector ingresante con los diversos vectores sonoros almacenados calculando la distancia entre los mismos. Al hallar la menor distancia, establece la relación cognitiva entre lo históricamente ingresado y el nuevo estímulo de entrada. Si la distancia entre éste y aquellos almacenados no es determinante, el cerebro almacena un “nuevo vector sonoro” asociándolo con un nuevo concepto o imagen sonora.
- Se presentó un método numérico para establecer la distancia efectiva entre un vector sonoro y otro. Comparando los resultados numéricos objetivos con los subjetivos, el presente método parece ser eficiente sólo para reconocer la mayor similitud tímbrica entre fuentes sonoras.

**Referencias**

- [1] Fletcher, Rossing “The physics of Musical Instruments”. Springer. 2005
- [2] Rossing, Springer “Springer Handbook of Acoustics” 2007
- [3] A. H. Benade (1976) Fundamentals of musical acoustics, Oxford Univ. Press, NY, 1976
- [4] Lipkens, Ilinski “Energy losses in an acoustical resonator”. i J. Acoustic. Soc. Am., Vol. 109, No. 5, Pt. 1, May 2001
- [5] “The Acoustical Boundary Layer” (2006) Organización de Tecnología e investigación de la OTAN. Anexo C
- [6] Coltman, John “Material Effect on Tone Quality”,. Journal. Acoustical Society America. Volumen 49, Edición 2B, páginas. 520-523 (Febrero 1971)
- [7] J. Wolfe (2004) ‘Clarinet acoustics: an introduction’  
<http://www.phys.unsw.edu.au/jw/clarinetacoustics.html>  
J. Wolfe (2004) ‘Saxophone acoustics: an introduction’  
[www.phys.unsw.edu.au/jw/saxacoustics.html](http://www.phys.unsw.edu.au/jw/saxacoustics.html)  
Área de acústica musical. Departamento de Física. University New South Wales
- [8] ”Instrumentos de Viento Artesanales. Diseño y Evolución”. Ángel Sampedro del Río. Ponencia en el Teatro colón.1997 <http://www.unmundodebambu.com.ar/acustica.htm>  
Página personal de Ángel Sampedro del Río. Luthier y principal investigador y constructor de Saxos de Bambú en Argentina.
- [9] Ando, Yoichi, “Architectural Acoustics. Blending sound sources, sound fields, and listeners”. Ch. 3, page 8 - 23. Modern Acoustics and Signal Processing, AIP Press, 1998.
- [10] M. Sakurai, H. Sakai, Y. Ando. “A computational software for noise measurement and toward its identification”. Journal of Sound and Vibration, Vol. 241, No. 1, Mar 2001, pp. 19-27.
- [11] Ando, Yoichi. “Correlation factors describing primary and spatial sensations of sound fields”. Journal of Sound and Vibration (2002) 258(3), pp. 405 – 417.
- [12] Ando, Yoichi. “Theory of Auditory Temporal and Spatial Primary Sensations”. Journal of time design in Architecture and the environment. December 2008. Pp. 8 – 26.
- [13] Bidondo, Alejandro. “Re-descubriendo la ventana de integración temporal del sistema auditivo: consecuencias en la ciencia Acústica”. Jornadas de Acústica de la AdAA, Rosario, Argentina. 2009.