



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

ESCUELA DE INGENIERÍA EN SONIDO Y ACÚSTICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INSTRUMENTO MUSICAL AERÓFONO
POLIFÓNICO BASADO EN LA RESONANCIA DE TUBOS DE BAMBÚ

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de

Ingeniero de Sonido y Acústica

Profesor Guía

Ing. Marcelo Darío Lazzati Corellano

Autor

Raúl Fernando Escobar Bustamante

Año

2013

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos para un adecuado desarrollo del tema escogido, y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Marcelo Darío Lazzati Corellano

Ingeniero en Ejecución de Sonido

CI: 171163573-8

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Raúl Fernando Escobar Bustamante

CI: 100368004-6

AGRADECIMIENTO

Un profundo reconocimiento a todos quienes apoyaron desinteresadamente este proyecto, en especial a César Muñoz, Gustavo Navas, Marcelo Lazzati, Félix Castañeda y a mis padres. Aprecio mucho su apoyo.

DEDICATORIA

A todos quienes imaginan y crean desde el corazón, a la música, a la vida. Al amor de mi familia, a la sabiduría de la creación, a mi cristal.

RESUMEN

El presente trabajo describe el proceso metodológico experimental sobre el cual se diseñó y construyó un instrumento musical polifónico cuyo principio de funcionamiento está basado en la resonancia de la columna de aire contenida en cada uno de los 25 tubos sonoros construidos con entrenudos de bambú de la especie bambusa tuldooides. Para excitar dichos aerófonos, el ejecutante insufla de aire una manguera dispuesta en su boca, a través de la cual el fluido entrante será distribuido a los tubos seleccionados mediante un teclado cromático.

Un diseño compacto y funcional se moldeó gracias a la simplicidad del sistema mecánico, el cual está basado en la compresión de mangueras de látex destinadas desde el sistema de distribución de aire hacia cada tubo sonoro. Finalmente, su unicidad se ve complementada con la libertad de interpretación que tiene el ejecutante al momento de desafinar o modular el sonido emitido a través de la variación de presión del aire soplado o de la gesticulación con la boca.

ABSTRACT

This work describes the methodological process on which was designed and built a polyphonic musical instrument whose operating principle is based on the resonance of the air column contained inside each of the 25 sound pipes built with internodes of the bamboo specie bambusa tuldoides; for which purpose, the performer insufflates with air a hose disposed in his mouth, through which the incoming fluid will be distributed toward the selected pipes through a chromatic keyboard.

A compact and functional design was molded thanks to the simplicity of the mechanical system, which is based on the compression of latex hoses connected from the distribution system to each sound pipe. Finally, its uniqueness is complemented by the interpretation freedom that the performer has when detuning or modulating the produced sound though the variation of the blown air pressure or the gesticulation with his mouth.

ÍNDICE

Introducción	1
CAPITULO I	5
1. Marco teórico	5
1.1. Acústica musical	5
1.1.1. Escalas musicales	5
1.1.1.1. Escala temperada	6
1.1.2. Instrumentos musicales	7
1.1.2.1. Instrumentos musicales aerófonos	10
1.2. Fundamentos de Neumática	17
1.3. El bambú	19
1.3.1. Bambusa tuldoides	21
CAPITULO II	22
2. Desarrollo	22
2.1. Metodología propuesta	22
2.2. Primer bosquejo del instrumento	22
2.3. Experimentación	26
2.3.1. Tubos	26
2.3.1.1. Percusión directa sobre el tubo	33
2.3.2. Sistema Neumático	33
2.4. Prototipo final	37
2.4.1. Diseño	37
2.4.1.1. Diseño neumático	46
2.4.2. Construcción	48
2.4.2.1. Tubos	48
2.4.2.2. Teclado y placas metálicas	56
2.4.2.3. Estructura	58
2.4.2.4. Sistema neumático	59
CAPITULO III	64
3. Presentación y análisis de resultados	64
CAPITULO IV	72
4. Análisis económico	72
4.1. Etapa experimental	72
4.2. Construcción	73

CAPITULO V	76
5. Proyecciones	76
CAPITULO VI.....	77
6. Conclusiones y recomendaciones	77
6.1. Conclusiones.....	77
6.2. Recomendaciones	79
Referencias.....	81
Anexos	84

Introducción

Antecedentes

El instrumento a desarrollar se basa fuertemente en el principio del órgano de tubos. Éste es un instrumento musical de viento ejecutado a través de un teclado. Es el sucesor del primer órgano diseñado, denominado *Hydraulis* que data del año 250 A.C. (Constellations Development Corporation, 2010)

En la sonoridad de un órgano influyen básicamente las características ligadas a los tubos sonoros, incluyéndose dentro de éstas, el material del que están contruidos por supuesto. La mayoría de los tubos son de estaño y plomo en diferentes aleaciones (Merklin, 1924, p.30), aunque también se los construye de madera.

En referencia a este ultimo punto, el bambú será la materia prima para la construcción de este instrumento. Esta especie vegetal ha sido utilizada en Ecuador desde hace más de 10.000 años. Así lo prueban hallazgos de construcciones primitivas basadas en *Guadua angustifolia*. (Proyecto bambú, 2003).

Entre las innumerables áreas de producción en las que se emplea el bambú, la construcción de instrumentos musicales, es un sector en el que se ven aprovechadas las propiedades acústicas de éste vegetal. Entre los instrumentos más conocidos están flautas, marimbas y didgeridoos; los mismos que sirvieron de inspiración para este tema de desarrollo.

Análisis de la situación actual

El bambú es sin duda un material grandioso para la elaboración de instrumentos musicales, especialmente para instrumentos de viento como es el caso de este proyecto. Sus propiedades físicas y acústicas facultan la fabricación de tubos sonoros para aerófonos característicos de cada cultura.

Actualmente, en la región andina de América del Sur se evidencia la tradición de lutería que siglos atrás fue instaurada. Flautas, quenas, zampoñas, rondadores, antaras, tarkas y moceños son los más representativos instrumentos de viento andinos, basados en tubos sonoros fabricados de *carrizo*.

Décadas atrás, gracias a la introducción de algunas especies asiáticas de bambú en el Ecuador, se han podido conseguir nuevos timbres y además, variaciones de éstos instrumentos, que se encontraban limitados por las características del carrizo (dimensiones y propiedades acústicas).

Una muestra representativa de este desarrollo se manifiesta en 21 instrumentos cordófonos, 13 membranófonos, 10 percusivos y 50 aerófonos fabricados de algunas variedades de bambú como el dendrocalamus o la tunda, los cuales conviven bajo la mano de un mismo lutier, y se interpretan bajo las manos de una misma orquesta. En Ecuador, Schuberth Ganchozo es el fundador de “Macolla Orquesta master de bambú”, que desde el 2005 apuesta al desarrollo de la construcción de instrumentos musicales basados en las muchas variedades de bambusáceas introducidas en el Ecuador.

Justificación

Definir nuevas vías para adaptar una idea basada en las múltiples posibilidades que brinda la construcción de instrumentos musicales, conlleva tener el privilegio de escuchar por primera vez un sonido que tal vez nunca antes fue imaginado. La música no tiene límites, es un mundo abierto a experimentar nuevas sensaciones que deleiten al oído humano; es por eso que, explorar nuevos caminos en cuanto a sonoridad y experimentar con nuevos materiales de construcción es una necesidad constante que deriva en la investigación científica pero que parte de la imaginación.

La utilización de tubos de bambú en un instrumento aerófono, asociado con la versatilidad de ejecución que brinda el teclado cromático, y con la expresividad que se le puede entregar a los tubos variando el ritmo y la presión de aire;

aseguran en éste instrumento un sonido único, en un modo de interpretación conjugado.

Alcance

Se pretende diseñar y construir un prototipo de un instrumento de teclado cromático de 25 semitonos. La base para su funcionamiento será el diseño del sistema mecánico ideal para que el aire soplado por una manguera alimente los tubos de bambú seleccionados mediante la pulsación del teclado.

Se involucran en éste proyecto áreas de la física como la acústica musical y la mecánica principalmente.

Hipótesis

- Con un adecuado sistema mecánico y un eficiente sistema de distribución de aire, el ejecutante estará en la capacidad de alimentar con suficiente aire a cuatro o más tubos seleccionados simultáneamente para que entren en resonancia, es decir, lograr una polifonía de al menos cuatro voces.
- Se podrá modular el sonido producido por el instrumento al gesticular con la boca en la ejecución, es decir variando la presión de aire.
- El sistema mecánico responderá instantáneamente al presionar una o varias teclas, dirigiendo al mismo tiempo el aire hacia los tubos de bambú cuando el ejecutante está soplando.
- Cualquier impulso de aire entregado en la boquilla de la manguera de alimentación principal responderá instantáneamente en la boquilla del tubo seleccionado mediante el teclado.
- Se podrá diseñar y construir un sistema mecánico cuyos materiales sean de fácil acceso y bajo costo.

Objetivos

- **Objetivo General**

Diseñar y construir un instrumento aerófono polifónico basado en la resonancia de tubos de bambú alimentados por viento con una manguera cilíndrica dispuesta en la boca del ejecutante por medio de la cuál las variaciones de presión del aire generado se destinan a los tubos seleccionados mediante un sistema mecánico asociado a la ejecución de un teclado cromático, traduciéndose finalmente en variaciones de presión sonora.

- **Objetivos Específicos**

- Elaborar 25 tubos sonoros de bambú en base a la determinación experimental de sus dimensiones y características para que éstos emitan tonos relacionados a las frecuencias fundamentales requeridas.
- Diseñar y construir un sistema mecánico para que, a través de la ejecución de un teclado cromático, el aire que ingresa a la manguera principal alimente a los tubos seleccionados.
- Diseñar y construir conductos y cámaras de aire que cumplan con la funcionalidad requerida.
- Integrar todos los elementos en un instrumento musical estéticamente agradable.
- Experimentar con la percusión directa sobre las paredes externas de los tubos sonoros de bambú elaborados para determinar la posibilidad de obtener sonidos definidos cuya frecuencia fundamental se relacione con la obtenida mediante la excitación de la columna de aire contenida; y en caso de que sea realizable, diseñar e implementar un sistema mecánico para percutir dichos tubos a través de otro teclado.

CAPITULO I

1. Marco teórico

1.1. Acústica musical

Se define como una rama de la Acústica que estudia los principios físicos que dictaminan las sensaciones y percepciones producidas por la interrelación entre sonidos, así como el funcionamiento y comportamiento de los instrumentos musicales.

En cuanto a la percepción hay muchos conceptos derivados de las propiedades físicas del sonido (amplitud, frecuencia, fase) y de sus relaciones, así como el comportamiento de éstos en el sistema auditivo humano. (Miyara, 2006, p. 31). Dentro de dichas percepciones se considera relevante abordar las escalas musicales.

Por otro lado, en cuanto a los instrumentos musicales, resulta esencial para el presente proyecto ahondar en su teoría, enfatizando en los instrumentos musicales aerófonos, familia a la cual pertenece el prototipo a desarrollar.

1.1.1. Escalas musicales

Una escala musical se define como la sucesión (ascendente o descendente) de sonidos de determinada *altura tonal*, seleccionados generalmente en función de dos principios: de reproducibilidad (capacidad del instrumento de emitir sonidos de altura definida) y de funcionalidad (criterio estético en función del uso).

En el devenir de la historia se han ido desarrollando y perfeccionando un sinnúmero de escalas musicales consecuentes a diversos factores (manifestaciones musicales, propiedades de los instrumentos, entre otras) inherentes a cada cultura.

Es por eso que en el sistema musical hindú por ejemplo se a dividido a la octava en 22 *microtonos* con los cuales se han estructurado innumerables escalas. Por otro lado, en cuanto a los factores culturales antes mencionados, dentro de la música hindú las manifestaciones musicales se enlazan a la música religiosa o a la música profana, y en cuanto a los instrumentos musicales de la India, existen una gran variedad de cordófonos diseñados para producir intervalos microtonales. (Sachs, p.87).

Así se pueden citar un gran número de escalas ligadas a sistemas musicales propios de cada cultura, por ejemplo: escala Hirajoshi (Japón), escala de Lü (China), escala Rikprāṭisakhya (India), escala Hiġāz (Península Árabe), entre muchas otras.(Sachs, pp. 62, 91, 123, 164). Como se aprecia, todas estas escalas surgen de la necesidad de crear patrones musicales en función de las posibilidades y de la funcionalidad.

En un ámbito occidental contemporáneo, se han generalizado ciertos parámetros como la afinación y los intervalos para moldear estándares de composición musical. Surge entonces la escala temperada, en la que cada *octava* está dividida en 12 sonidos elegidos por un tercer principio: economía. En este caso aunque sus intervalos no son perfectos, son elegidos por la necesidad de simplificar la cantidad de sonidos en función de las amplias necesidades de la música contemporánea. (Miyara, 2006, pp. 33-34).

1.1.1.1. Escala temperada

La escala temperada o cromática surge en el siglo XVI de la mano de Bartolomé Ramos de Pareja. (Zaragoza, 2007). Este matemático y musicólogo español unificó los criterios y necesidades que se venían manejando hasta la época (posibilidad de *transposición* y de *modulación*). Se propuso entonces una escala con 12 sonidos en cada octava, cuya relación está dada por la siguiente expresión:

$$f_{n+1} = 2^{1/12} \times f_n \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde $f_{i,n,p}$ se refiere al tono superior, el cual se halla multiplicando $f_{i,n,r}$ (frecuencia raíz) por la constante dada. Dicha constante $2^{1/12}$, proporciona la división de la octava en 12 partes exactamente iguales (temperamento uniforme). A cada parte se la denomina semitono (medio tono o medio intervalo de tono).

Como parte de la estandarización de la música occidental, todos los tonos de la escala temperada se afinan en función de una nota raíz ($f_{i,n,r}$), siendo esta la nota "LA" de frecuencia 440 Hz. (Miyara, 2006, pp. 36-37).

La mayoría de los instrumentos comúnmente conocidos parten de dicha estandarización; es decir están contruidos en función de la escala temperada, y usualmente afinados a "LA" (440Hz). Es por eso que el proyecto desarrollado se basa en dichos principios, posibilitando su ejecución como cualquier instrumento de teclado cromático y de ensamble con los instrumentos occidentales contemporáneos.

1.1.2. Instrumentos musicales

Se puede definir como cualquier objeto ejecutado por una persona para la composición o interpretación de una pieza musical. Dentro de un marco más delimitado y acorde a nuestra cultura, se involucran mecanismos básicos que posibilitan la producción del sonido a través de su adecuada excitación. En función de naturaleza de dichos mecanismos, se los clasifica y define de la siguiente manera:

- Instrumentos musicales electrónicos.- Emplean elementos electrónicos analógicos o digitales para la síntesis de sonido. El precepto fundamental es generar una señal eléctrica (o la representación numérica de ésta) que será traducida finalmente en una onda sonora. En este proceso, la fácil manipulación (en comparación con la generada a través de un instrumento acústico) de dicha onda, posibilita la creación de nuevos sonidos que no pueden ser generados acústicamente. (Miyara, 2006, pp. 40,163).

- Instrumentos musicales acústicos.- Emplean mecanismos de resonancia acústica para la producción de sonido. Para entender más claramente dichos mecanismos, se presenta la siguiente clasificación:
 - Cordófonos.- Básicamente utilizan una cuerda (mecanismo para la producción de sonido) que es excitada bajo métodos de percusión, punteo o frotado, para generar un sonido con espectro armónico y de altura definida.



Figura 1. Ilustración de varios instrumentos cordófonos.

Tomado de: Merino, 2006, p. 160.

- Membranófonos.- Producen sonido a través de una o varias membranas excitadas mediante la percusión sobre estas.



Figura 2. Ejemplos de Instrumentos Membranófonos.

Tomado de: Galerie Sonore d'Angers, 2013.

- Idiófonos.- Poseen un cuerpo rígido naturalmente sonoro, que al ser percutido, raspado, sacudido o frotado, se excita produciendo un sonido de espectro no-armónico.



Figura 3. Metalófono (instrumento idiófono percutido).

Tomado de: Galerie Sonore d'Angers, 2013.

- Aerófonos.- Se basan en la vibración de una columna de aire contenida por un cuerpo hueco tubular, obteniendo así un sonido de altura definida por el largo de dicho tubo.



Figura 4. Flautas de pan (aerófonos).

Tomado de: Galerie Sonore d'Angers, 2013.

1.1.2.1. Instrumentos musicales aerófonos

Como se mencionó anteriormente, los instrumentos aerófonos o de viento producen un determinado sonido debido a la excitación de una columna de aire, es decir, por la vibración del aire contenido en el interior de un tubo sonoro.

Un tubo sonoro es el componente físico que encierra y define la forma de una columna de aire que al ser convenientemente excitada produce los sonidos relacionados a las características físicas y acústicas del tubo. Se los puede clasificar de la siguiente manera:

- Por su forma interior, básicamente pueden ser: cilíndricos (ej. flauta), cónicos (ej. trompeta) o prismáticos (ej. tubos de ciertos órganos).
- Por su modo de excitación, pueden ser: de boquilla (ej. trompeta), de embocadura (ej. flauta) y de lengüeta (ej. clarinete).

A su vez los instrumentos de embocadura se subdividen en: de embocadura directa (ej. quena), y de embocadura indirecta (ej. tubos de órganos). Y los instrumentos de lengüeta en: de lengüeta simple (ej. clarinete), y de lengüeta doble (ej. fagot).

Generalmente, los aerófonos poseen solo un tubo sonoro para emitir una gama de sonidos; esto es posible gracias a los métodos de variación de la longitud del tubo, propios de cada instrumento. Dicho esto, conviene aclarar la relación fundamental entre frecuencia emitida (*altura tonal*) y la longitud del tubo sonoro, la cual señala que la frecuencia obtenida decrece inversamente al aumento de longitud de dicho tubo.

Existen básicamente dos métodos de variación de la longitud del tubo, estos son:

- Orificios convenientemente perforados en la paredes el tubo, de tal manera que puedan ser tapados con los dedos (ej. quena) o con llaves (ej. clarinete).

- Porciones de tubos conectadas al tubo principal a través de tubos deslizantes (ej. trombón) o pistones (ej. trompeta).



Sin embargo, existen instrumentos exentos de dicha generalización (variación de la longitud), siendo este el caso del órgano, el cual posee un tubo sonoro específico para cada sonido. (Merino, 2006, pp. 195-196).

- **Instrumentos musicales aerófonos de embocadura**

La embocadura es un orificio pequeño localizado a unos centímetros del extremo del tubo por donde el ejecutante sopla. El borde inferior de dicho orificio tiene un corte oblicuo llamado bisel cuya función es dividir en dos corrientes (una de estas ingresa y excita la columna gaseosa) al aire que sobre este incide.

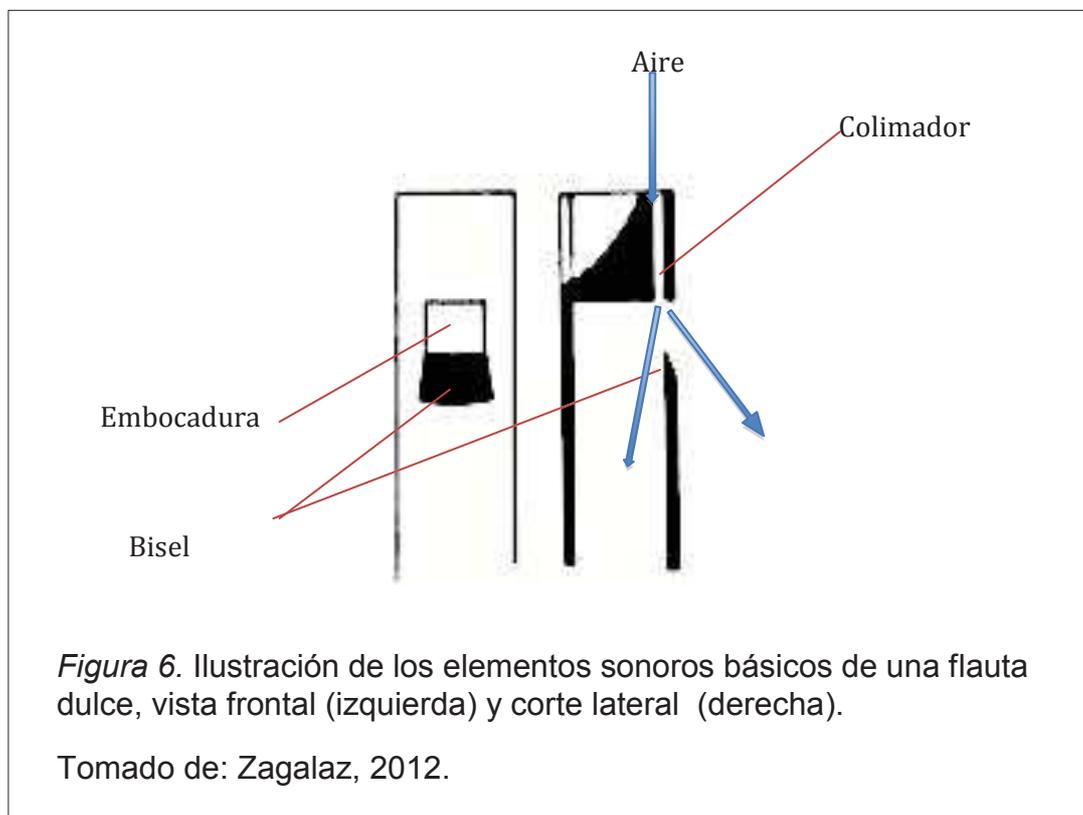
Existen dos tipos de embocaduras:

- Embocadura directa

Está diseñada para que los labios del ejecutante incidan directamente sobre el orificio (ej. flauta traversa).

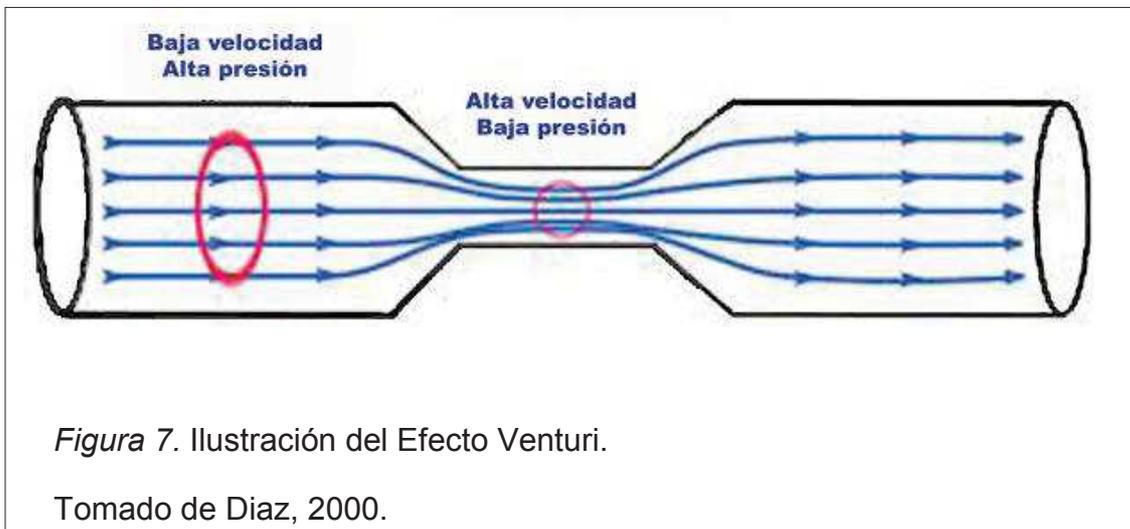
- Embocadura indirecta

Posee un pequeño ducto de aire llamado colimador o aeroducto por el que ingresa la corriente de aire hacia el bisel (ej. flauta dulce). A ésta clasificación pertenecen principalmente las flautas dulces y los tubos de algunos órganos en los cuales el aire producido mecánicamente (ej. fuelle en un órgano) o por el soplo del ejecutante comienza el proceso de excitación de la columna gaseosa.



Dicho proceso se ve explicado por un fenómeno físico denominado “Efecto Venturi”, el cual determina que el fluido (aire en este caso) que circula por un tubo, cambiará su velocidad y presión al pasar por una sección de tubo de mayor o menor diámetro. Es decir, un fluido en movimiento aumenta su

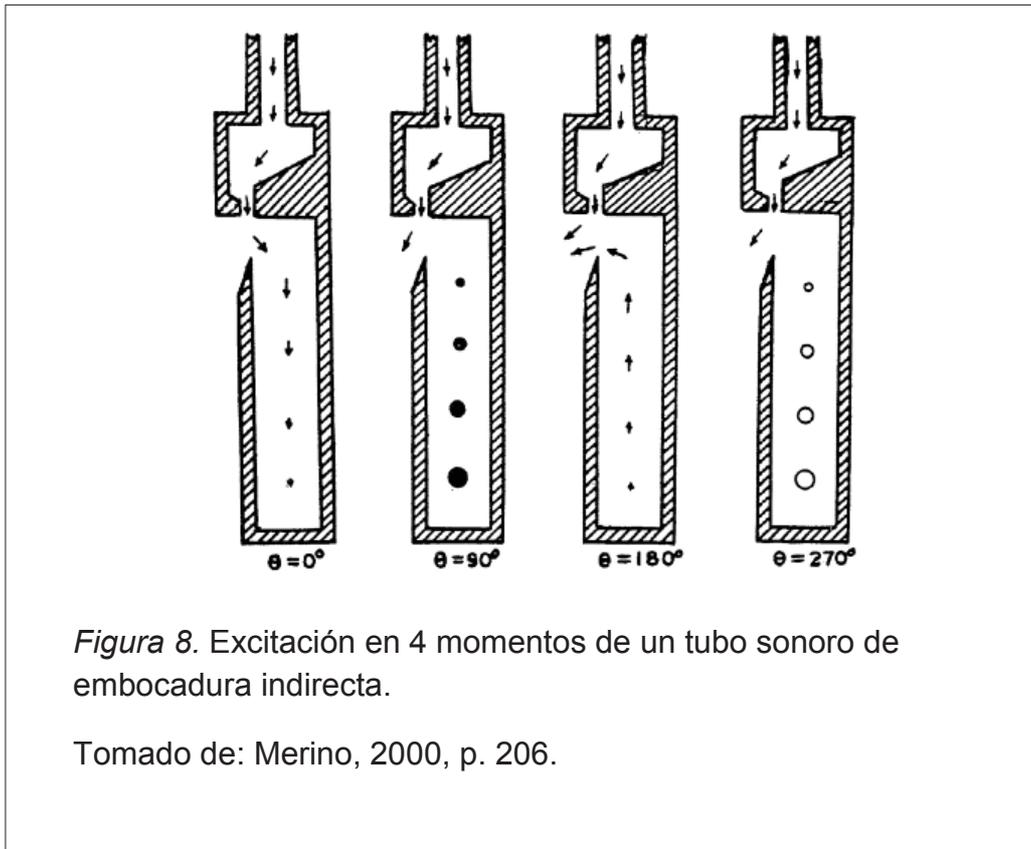
velocidad y disminuye su presión, si la sección del tubo en cuestión se estrecha.



En el caso del aerófono de embocadura indirecta, el proceso se ve descrito en 4 momentos que completan un periodo cíclico que se acopla a la frecuencia de resonancia del tubo.

- 0° , el aire producido pasa por el colimador. Al ser una sección reducida, el aire que atraviesa por esta aumenta su velocidad y su presión disminuye (siendo menor que la del aire en reposo contenida en el tubo).
- 90° , la diferencia de presiones hace que el aire ingrese al tubo.
- 180° , el aire que ha ingresado comprime las moléculas de aire contenidas, pero tras un corto intervalo, el aire se ve obligado a salir debido a que atraviesa una sección mayor, lo que significa un aumento de presión, que a su vez implica una diferencia con la presión exterior.
- 270° , el aire al ser expulsado provoca una descompresión; además de otra diferencia de presiones entre el aire en reposo y el aire en movimiento, lo que obliga nuevamente a dicho fluido a ingresar al tubo.

Se hace rítmico este proceso de entrada y salida del aire que pasa por el colimador, de esta manera la columna de aire contenida es excitada, existiendo zonas de compresión y descompresión viajando a lo largo del tubo, y reflejándose (en caso de que el tubo esté cerrado) en el otro extremo formando por consiguiente una onda estacionaria. (Merino, 2006, pg. 208).

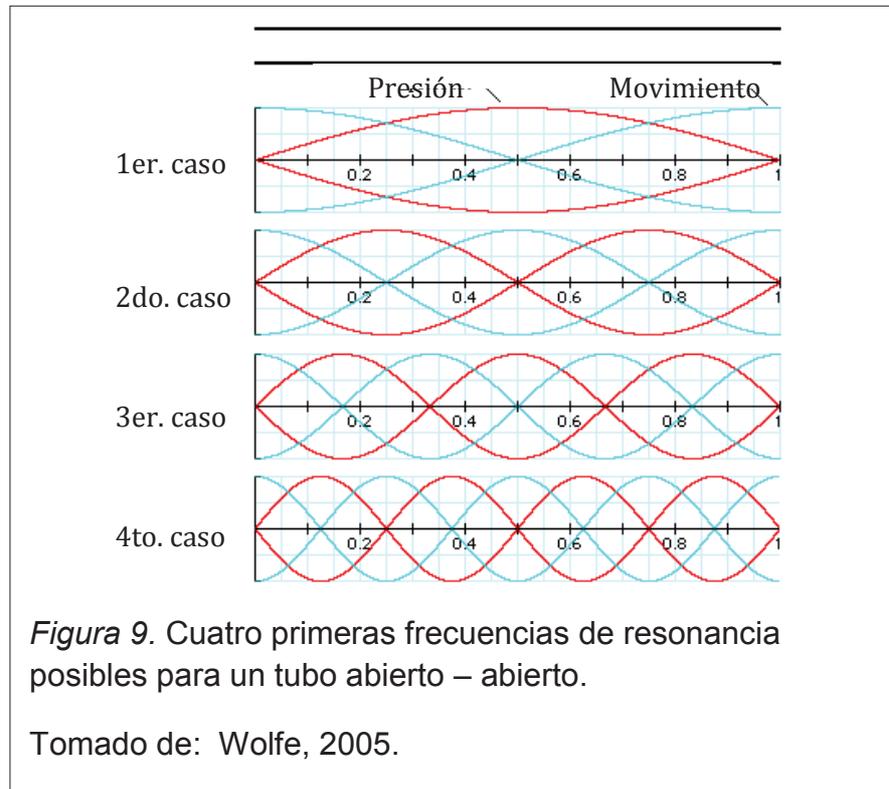


Dicho esto, en ésta familia de instrumentos existen dos casos de análisis en función de las condiciones del tubo. Dado que un extremo (embocadura) siempre estará abierto para producir el sonido, el otro extremo puede o no estarlo; bajo estas condiciones se establecen parámetros de análisis y explicación del timbre y altura tonal resultantes.

- Tubo abierto – abierto

Un tubo abierto en ambos extremos implica que la presión total en dichas aberturas será aproximadamente cercana a la presión atmosférica, es decir la presión acústica será cero. Por otro lado, la amplitud de la variación del flujo en

los extremos abiertos será máxima, debido a que en estos puntos el aire puede correr libremente sin obstáculos. Estos parámetros se los denominan condiciones de frontera, en función de las cuales las *ondas estacionarias* se ajustan.



En función de dichas condiciones de frontera, la onda senoidal más larga (frecuencia más baja) que puede ser ajustada en un tubo abierto - abierto, corresponde a aquella del doble de largo del tubo. Como se puede apreciar en el primer caso de la Figura 3, una onda de dichas características satisface las condiciones de presión cero (línea roja) y máxima amplitud de movimiento (línea celeste) en los extremos del tubo.

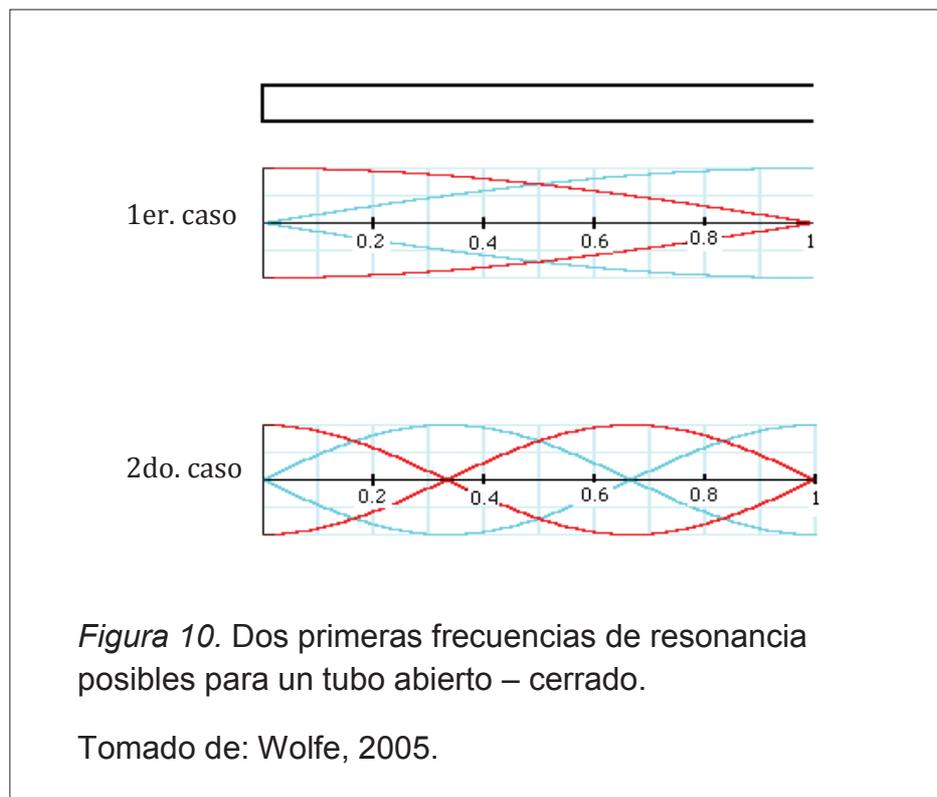
Además se puede encajar una longitud de onda del largo del tubo (2do. Caso), $2/3$ de la longitud del tubo (3er. Caso), $1/2$ longitud del tubo (4to. Caso), y así continúan las frecuencias posibles que un tubo bajo estas condiciones puede reproducir. Tomando en cuenta dicha longitud de onda y la velocidad del sonido, se puede calcular asimismo la frecuencia con la siguiente ecuación,

$$f = c/\lambda \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde f representa la frecuencia, c la velocidad del sonido y λ la longitud de onda que para el primer caso será $2L$ (dos veces la longitud del tubo), para el segundo caso será L , para el tercero $2/3L$ y para el cuarto $1/2L$.

- Tubo abierto - cerrado

Las condiciones para un extremo cerrado difieren totalmente de las de un extremo abierto, en este caso, la presión será máxima y la amplitud del desplazamiento cero.



En un tubo abierto – cerrado, bajo las condiciones de frontera establecidas, la longitud de onda más larga que puede ser ajustada será de cuatro veces la longitud del tubo, lo que implica que en comparación a un tubo abierto en ambos extremos, la frecuencia del tubo cerrado será una octava más baja. El siguiente caso (*sobretono* que satisface dichas condiciones de frontera), será

una onda de longitud $3/4 L$, por lo que se puede comprobar que el registro de un tubo abierto – cerrado, es más limitado.

1.2. Fundamentos de Neumática

La neumática es una rama de la física que en esencia estudia el aire en movimiento. Su aplicación en procesos industriales ha establecido, desde hace más de 60 años cuando empezó a explotarse, una herramienta de producción indispensable en función de las múltiples ventajas que ofrece el aire comprimido como forma de transmisión de energía.

Los elementos básicos dentro de cualquier circuito neumático son los siguientes:

- **Compresor:** es el elemento que produce el aire comprimido, generalmente lo hace a través de un motor eléctrico. Éste determina el caudal (cantidad de aire) y la presión (fuerza en función del área).
- **Tuberías,** conductos de transporte y comunicación del aire.
- **Válvulas:** dispositivos que distribuyen y regulan, el caudal y la presión del aire.
- **Filtros,** separan el aire de cualquier fluido líquido.

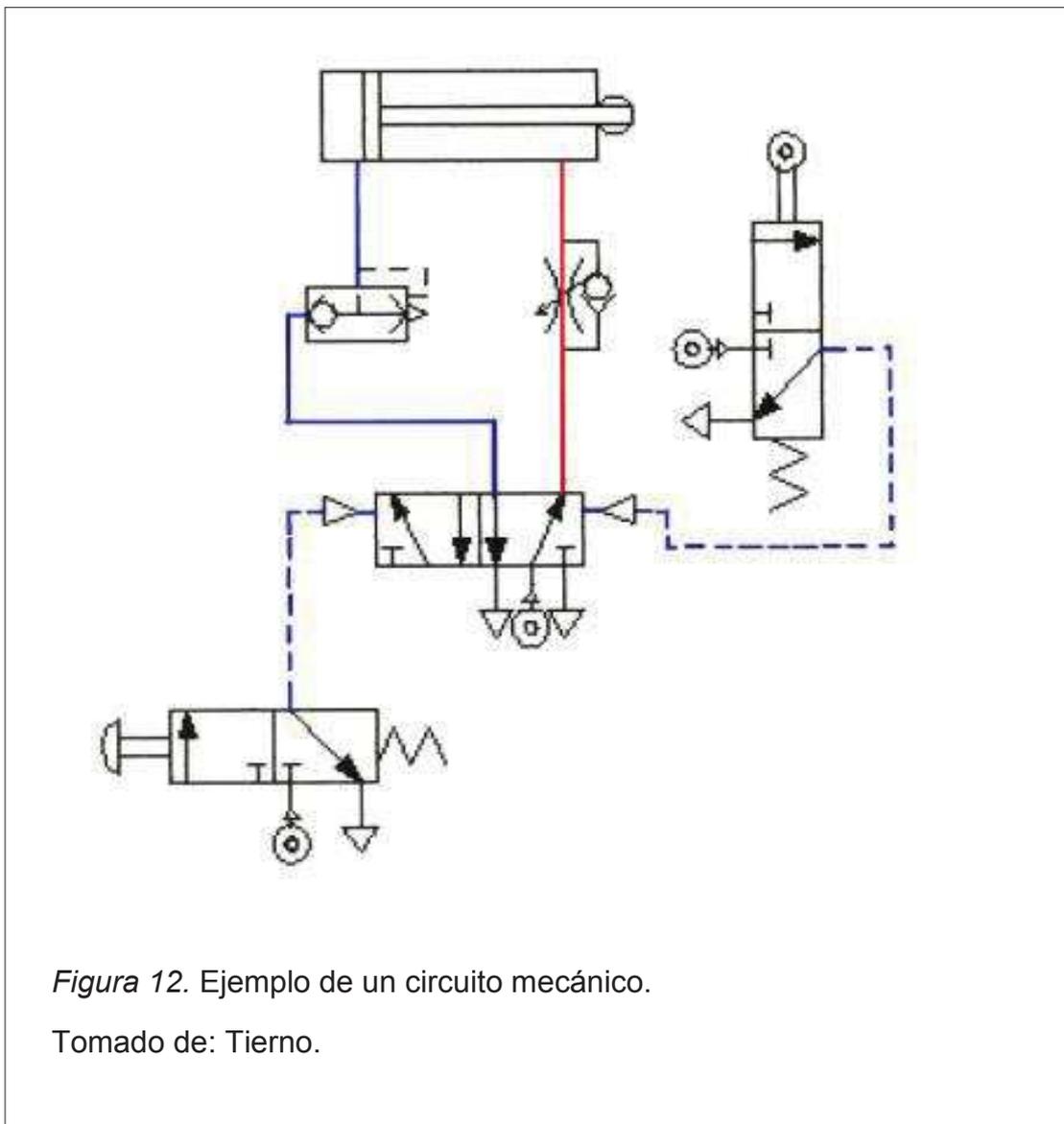
En la neumática se utiliza una simbología adecuada que representa los elementos del circuito. Los símbolos utilizados se encuentran normalizados por Organismos Internacionales como la ISO (Organización Internacional de Estandarización) y el CETOP (Comité Europeo de Transmisiones Oleodinámicas y Neumáticas).

Bomba de caudal constante	Bomba de caudal regulable	Motor de caudal constante	Motor de caudal variable	eje rotativo con sentido de giro indicado	Eje rotativo con dos sentidos de giro
Línea de presión	Línea de pilotaje	Purga de aire	Enclavamiento	Acoplamiento directo	Acoplamiento con válvula antirretorno
Depósito a presión	Depósito con carga	Válvula de aislamiento 2 vías	Purga de aire sin conexión	Purga de aire con conexión roscada	Conducto cerrado por antirretorno
Acumulador hidráulico	Válvula de aislamiento 3 vías	Manómetro	Caudalímetro	Contador	Termómetro
Motor oscilante	Calentador	Refrigerador	refrigerador con fluido refrigerante	Filtro	Filtro con purga
Limitador de presión	Válvula de escape rápido	Reductor de presión	Reductor de presión regulable	Válvula de seguridad	Válvula limitadora de presión
Cilindro de simple efecto	Cilindro de doble efecto	Cilindro D.E. amortiguado	Cilindro D.E. amortiguación variable	Cilindro S.E. Telescópico	Motor térmico
Accionamiento mecánico	Accionamiento por roldana	Accionamiento por resorte	Accionamiento por electroimán	Accionamiento por presión	Accionamiento por depresión
Accionamiento manual	Accionamiento por pulsador	Accionamiento por palanca	Accionamiento por pedal	Accionamiento por electroimán y presión	Accionamiento por motor monofásico

Figura 11. Simbología neumática.

Tomado de: E-DUCATIVA CATEDU

En función de la complejidad del circuito neumático, existe una gran cantidad de elementos y dispositivos involucrados en los procesos. Dichos circuitos se los esquematiza gráficamente a través de diagramas de flujo neumáticos en los que cada elemento tiene un símbolo específico.



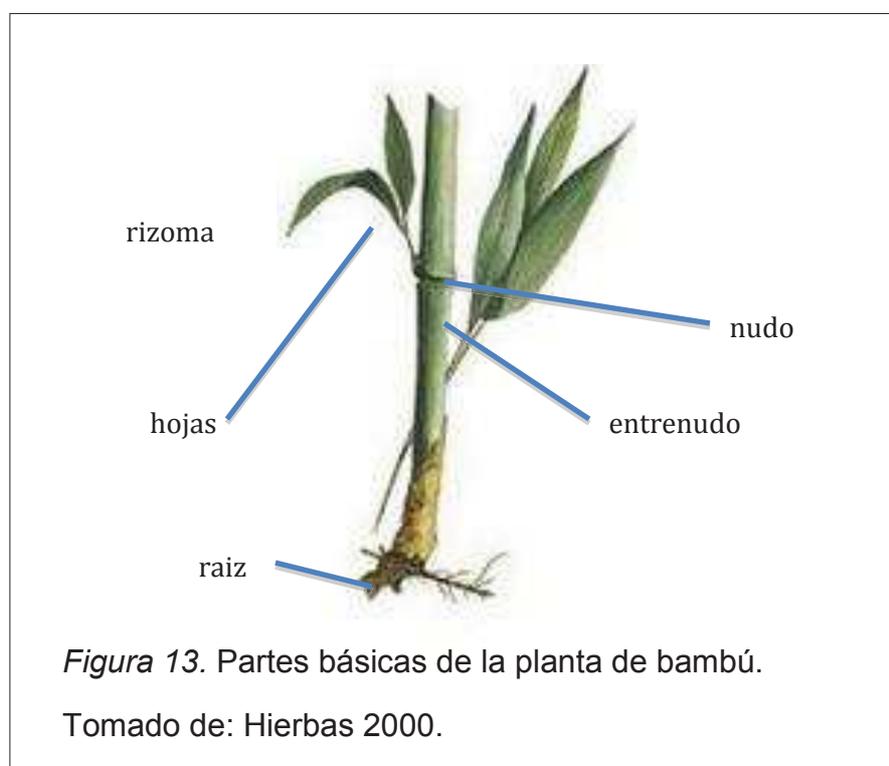
1.3. El bambú

La palabra bambú ha sido tradicionalmente el nombre común de la subfamilia de plantas (bambusoideae) pertenecientes a la familia de las gramíneas. Esta planta fue descubierta y utilizada por el hombre por primera vez en China desde la dinastía Shang (siglo 17 A.C), convirtiéndose en un elemento simbólico de la cultura Oriental. (Bambooki, 2011).

Muchas especies de bambú han sido introducidas en todo el mundo, en climas templados y tropicales, donde su corto tiempo de crecimiento y maduración es

una característica muy significativa en las áreas de aprovechamiento y producción de este noble material.

El tronco del bambú denominado rizoma, es en sí, la parte que se utiliza como materia prima en las múltiples aplicaciones que se le puede dar. Dicho tronco es hueco, ligero, recto, leñoso y muy resistente. Lo conforman nudos (sección divisoria) y entrenudos (distancia entre un nudo y el siguiente). Posee hojas alargadas y puntiagudas, y ramificaciones complejas que nacen en los nudos.



Existen alrededor de 1300 variedades de bambú dispersas por todo el mundo, asimismo existe una infinidad de usos para este material, especialmente en el área de construcción y diseño. Es increíble todo lo que se puede hacer con este material, desde instrumentos musicales o artesanías, hasta bicicletas o automóviles. Se pueden enlistar miles de usos que se le puede dar debido a su versatilidad y resistencia; depende solamente de la imaginación del hombre inventar y emplear este material en función de sus necesidades.

De entre el gran número de variedades mencionadas, se empleó la especie *Bambusa tuldoides* para la ejecución del presente proyecto.

1.3.1. *Bambusa tuldoides*

Es una especie de bambú nativa del sur de China, pero ampliamente cultivada en el sur-este de Asia, Japón, Estados Unidos, Puerto Rico y Brasil. Es una planta relativamente grande; puede medir hasta 10 metros de alto, y hasta 5cm (centímetros) de diámetro interno.

Las paredes externas de los entrenudos suelen estar ligeramente cubiertas por una cera blanca, además poseen diminutos espinos, por lo que resulta conveniente lavar o pelar los entrenudos antes de trabajarlos.



Figura 14. Fotografía de un grupo de bambusas tuldoides.

Tomado de: Sampedro.

CAPITULO II

2. Desarrollo

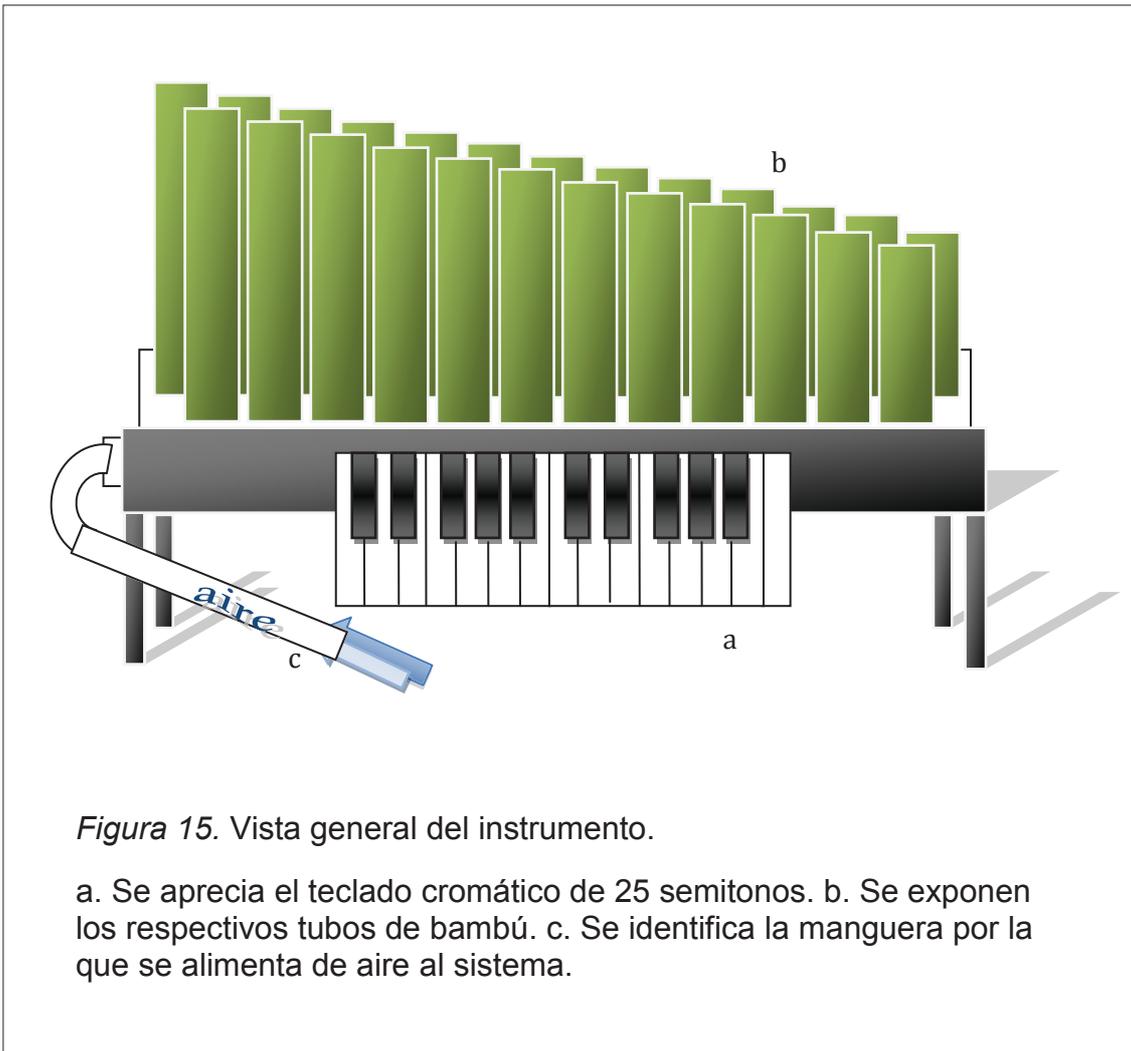
2.1. Metodología propuesta

Se emplea la inducción como el procedimiento metodológico fundamental, y al experimento como el punto de partida para la elaboración de la teoría explicativa de los fenómenos físicos implícitos en el desarrollo de éste instrumento musical.

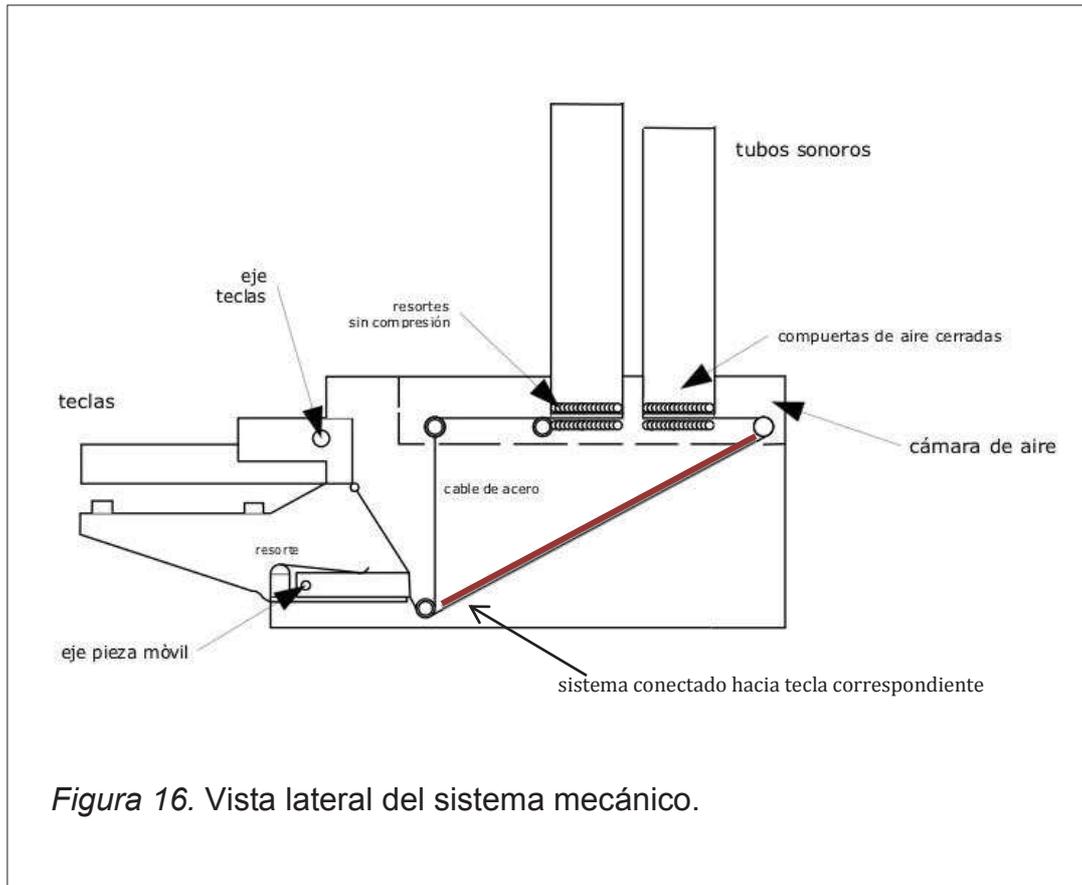
En base a un bosquejo general y poco profundo en cuanto a su análisis, pero consistente en función a la base teórica generada por científicos, investigadores y lutieres durante décadas de investigación y desarrollo de los elementos constitutivos del presente trabajo, se inicia un camino de experimentación e invención hasta definir un diseño funcional, eficiente y de bajo costo.

2.2. Primer bosquejo del instrumento

La Figura 15 muestra la estructura general del instrumento, conformada por los dos elementos básicos: el sistema mecánico y los tubos sonoros. De esta concepción general partió el primer diseño.



Un corte lateral ilustrado en la Figura 16, muestra un sistema mecánico que hipotéticamente cumpliría con la funcionalidad requerida. En este bosquejo se muestran las piezas implementadas, configuradas e interconectadas, basadas en una tecla blanca y una negra sin pulsar.



Considerando que ingresa aire por la manguera principal y que la tecla blanca de la figura antes presentada ha sido presionada, se presenta la Figura 17; ilustración en la que se esquematiza numéricamente los siguientes procesos:

1. Se pulsa la tecla blanca.
2. Al estar tensionada dicha tecla en su extremo, hace que gire la pieza móvil, comprimiendo el resorte asociado a ésta.
3. La tensión y el desplazamiento del cable atado a la válvula del tubo de bambú, permiten que el viento contenido en la cámara de aire se dirija hacia dicho tubo, y que el resorte asociado a la válvula se comprima.
4. Se produce sonido por la vibración de la columna de aire presente en el tubo abierto de bambú.

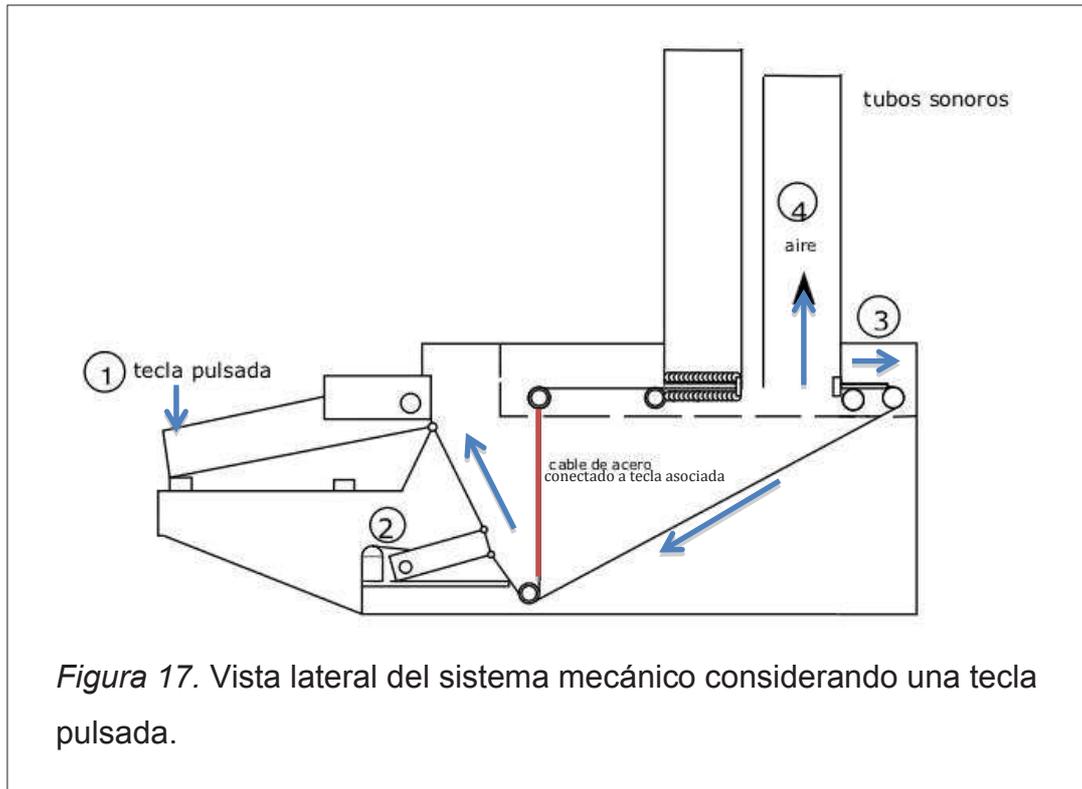


Figura 17. Vista lateral del sistema mecánico considerando una tecla pulsada.

En base a este primer acercamiento se identifican 3 elementos esenciales que deben ser analizados, cuestionados y definidos para continuar con el proceso. Las válvulas, el sistema de distribución de aire y los tubos, son los puntos clave para el proyecto.

Las válvulas son el primer punto a considerar. En base al bosquejo general se plantea una válvula con conexión directa al tubo, que se desplaza longitudinalmente abriendo o cerrando el flujo de aire gracias a un sistema de polea conectado directamente a la tecla, y dos resortes que se comprimen y se expanden al abrir o cerrar la válvula. En cuanto al sistema de distribución de aire, se planteó una cámara en forma de un poliedro rectangular que conecta el sistema de alimentación de aire con todas las válvulas.

Al contemplar la importancia de diseñar una cámara de aire separada totalmente de elementos mecánicos (en el diseño planteado 2 poleas por cada tubo se encontrarían dentro de la cámara, así como 25 cuerdas tensoras que atravesarían la misma), se lo ve poco conveniente debido a que se busca una

cámara de aire lo más pequeña posible y totalmente independiente, en función de satisfacer las necesidades de funcionalidad y eficiencia.

Finalmente, en relación a los tubos, no se planteó alguna característica especial hasta que se tuviese resuelto el sistema mecánico.

2.3. Experimentación

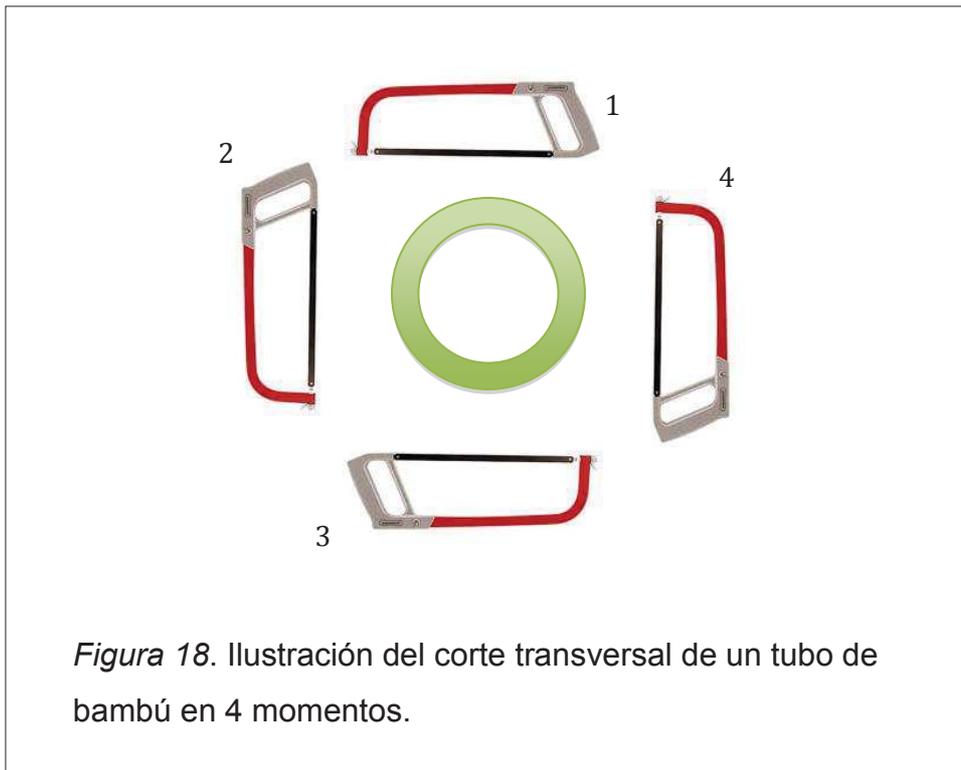
Luego de identificar las falencias en el diseño inicial, se plantearon alternativas más convenientes en cuanto a los elementos mencionados, y finalmente se definieron los elementos constitutivos del prototipo.

2.3.1. Tubos

Para iniciar cualquier prueba en cuanto al sistema neumático, fue imperativo primero definir y construir tubos sonoros de prueba. Para dicho propósito se necesitó contactar al Lutier Félix Castañeda, quien ha trabajado por algunos años en la construcción de instrumentos aerófonos de bambú; su experiencia y conocimientos impartidos fueron vitales para el proyecto.

Como primer punto, fue necesario definir el mecanismo para la producción del sonido, aunque debido a que el tubo no es alimentado directamente por la boca del ejecutante, las posibilidades se redujeron a una sola: embocadura indirecta.

Para construir un aerófono de embocadura indirecta, primero se debe cortar (a la longitud requerida) un entrenudo de bambú con una sierra mediana o pequeña, esto dependerá de la variedad del bambú (la tunda por ejemplo, cuyas paredes son delgadas, podrían fracturarse al usar una sierra de dientes muy grandes). Se debe cortar girando el tubo, es decir que luego de cortar una sección de la circunferencia, tomar la sección adyacente y repetir el corte; de no hacer esto, el tubo necesariamente se astillara en la sección opuesta por donde se inicio el corte.



Luego se procede a realizar la embocadura. Se decidió experimentar con una embocadura de forma de una semicircunferencia alargada, muy usada en los tubos de órganos, aunque también se pudo optar por formas de embocaduras típicas de flautas, como media luna o rectangular; en todo caso todas éstas formas funcionan. (Payno, 2002). Volviendo a la forma escogida, las dimensiones de la misma son proporcionales al tamaño del tubo. Particularmente se eligió usar la *proporción aurea* (0.618 : 1 : 1.618) en función del diámetro interno del tubo. Esta no fue una recomendación adquirida externamente (se la intuyó), pero al experimentar con diversas dimensiones de tubos, estas proporciones funcionaron para todas, desde tubos de 7cm hasta tubos de 60cm de largo.

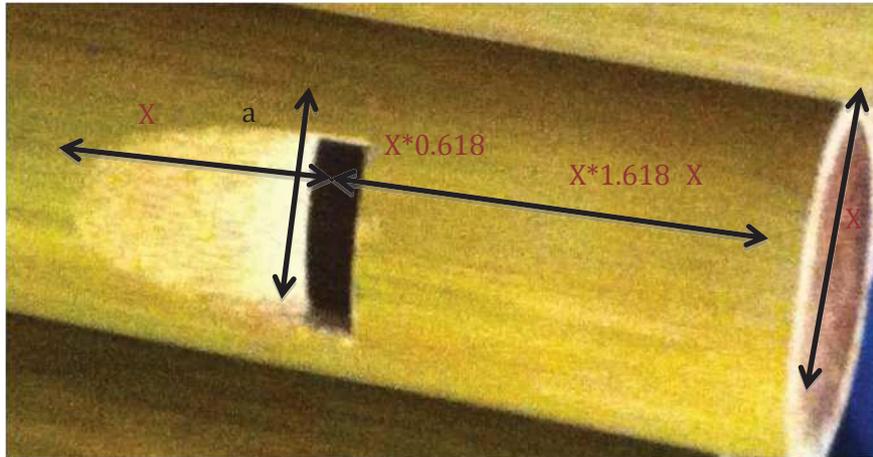


Figura 19. Proporciones de la embocadura en función del diámetro interno del tubo.

a. Se da la forma y posición de una embocadura semicircular alargada en proporción de X (diámetro interno)

Dicha forma debe ser primero dibujada en el tubo, para luego ser moldeada con un cincel o formón para madera; en este caso se usó un formón de madera Pretul de 9.5mm. Antes de comenzar a moldear, es necesario hacer un corte con una sierra en el borde recto de la embocadura, luego con mucho cuidado comenzar a rebajar dicha sección del tubo para conseguir el bisel (corte oblicuo). Posteriormente hacer un corte rectangular con una cuchilla de hoja pequeña en la parte más delgada de dicha pared (cerca del borde), cuya dimensión sea proporcional a la embocadura (no se precisa una dimensión exacta).



Figura 20. Fotografía que ilustra la construcción de la embocadura de un tubo de bambú.

Luego de tener la embocadura lista, se necesita crear el ducto de aire denominado colimador o aeroducto. Esto se lo realiza insertando un cilindro de madera cortado transversalmente de tal manera que se cree un ducto semicilíndrico cuyas dimensiones estén dadas por el tamaño y ubicación de la embocadura. El semicilindro de madera debe calzar exactamente en el tubo, y su largo no debe exceder la distancia entre el borde del tubo y la sección transversal recta de la embocadura. Se recomienda también no forzar el ingreso del semicilindro dentro del tubo porque corre el riesgo de fractura de la pared del tubo, es necesario lijarlo hasta que ingrese sin mucho esfuerzo.



Figura 21. Fotografía de un tubo de embocadura indirecta junto al semicilindro de madera (eucalipto).

El trabajar con un tubo semi-abierto en el otro extremo facilita el proceso de afinación, por lo cual se decidió usar tapones cilíndricos de madera perforados en el centro. La variación del área de dicho orificio se traduce en variación de altura tonal; mientras más grande el orificio, más alta la frecuencia fundamental emitida.

Para realizar los orificios se utilizó un taladro Skil 6462, y tres brocas para madera de 3, 8 y 10mm (milímetros) de diámetro. Además, para agrandar levemente el área del orificio, se utilizó una lima cilíndrica Truper de 3mm de diámetro. De igual manera se recomienda no forzar el ingreso del tapón, porque las posibilidades de fractura de la pared del tubo son muy altas; es necesario rebajar las dimensiones del tapón utilizando una lija para madera.

Una recomendación muy importante es sellar completamente los bordes entre el tapón y el tubo, para esto se puede utilizar un pegamento fuerte (particularmente se utilizó un pegamento Abro Super Glue) esparcido en el borde de la circunferencia, y seguidamente colocar un material pulverizado como la harina de maíz tostado (máchica). Esta se adhiere al pegamento,

sellando todos los puntos posibles de fuga de aire; además su color se camufla perfectamente en la madera.



Figura 22. Fotografía de un tubo de bambú junto al tapón perforado de madera (eucalipto).

Como recomendaciones finales en este aprendizaje impartido por parte del instructor Félix Castañeda, se citan:

- No exponer al sol ni a la lluvia (condiciones de intemperie) a los tubos de bambú. El calor hace que el bambú tienda a expandirse de adentro hacia fuera, dando paso a fracturas; además la impregnación de agua u otro líquido por un tiempo considerable conducen al tubo a un estado de pudrición.
- Los cambios de temperatura hacen que los tubos cambien su afinación.
- Tener mucho cuidado al trabajar con materiales corto-punzantes (sierra, cincel, cuchilla).
- Utilizar Maderol (insecticida y fungicida) para preservar los tubos.

- En función de un criterio estético, pelar o desprender al tubo de la cascara externa, para poder darle un acabado.
- Utilizar una laca mate o semi-mate para darle un acabado a los tubos.

En función del conocimiento adquirido, se procedió a experimentar en la construcción de 6 tubos de embocadura indirecta, de diferentes dimensiones y de diferentes especies de bambú (tunda, bambú gigante y tulda). Se lo realizó para adquirir destreza en la construcción de estos instrumentos, y además para definir objetivamente cual especie es la más conveniente en función de 2 factores considerados: disponibilidad y timbre.

En cuanto a la disponibilidad, se pudieron encontrar en la ciudad de Quito a 2 proveedores de bambú relacionados con la venta de entrenudos para instrumentos, por lo que impactó en gran medida el hecho de que fueran ofrecidos según los requerimientos, (25 tubos de diámetros externos decrecientes desde aproximadamente 5cm hasta 2cm) entrenudos de la especie tulda o de bambú gigante. Por otro lado, aunque el segundo factor citado puede ser considerado como subjetivo, no se hallaron diferencias tímbricas tan significativas comparando los sonidos obtenidos de dichas especies de bambú, sin embargo el sonido producido por la tulda poseía cierta calidez distintiva, por lo que se decidió trabajar con esta especie.



Figura 23. Fotografía de los seis tubos de bambú construidos en la fase de experimentación.

2.3.1.1. Percusión directa sobre el tubo

Uno de los objetivos específicos del presente proyecto busca determinar otra alternativa de obtener sonidos de un entrenudo de bambú. Percutir directamente sobre una pared externa para obtener un sonido definido y de frecuencia relacionada con la obtenida mediante la excitación a través de aire, fue una inquietud en el planteamiento inicial, de modo que en esta etapa se buscó despejar esa duda.

Se utilizó un mazo percutor casero, elaborado con una baqueta, en cuyo extremo se acopla una pelota de hule, con la cual fueron golpeados los seis tubos elaborados en la etapa de experimentación. Se los percutió en diferentes partes de su superficie y con distintas intensidades, pero no se obtuvo un resultado satisfactorio.

Se obtuvo un sonido de espectro no-armónico y de altura indefinida, lo cual no permitió continuar con el proceso planteado para esa etapa debido a que no cumple con las premisas del objetivo específico relacionado con este punto, el cual señala el diseño e implementación de un sistema de percusión de dichos tubos en el caso de que el sonido producido por estos al percutirlos sea definido, y cuya frecuencia fundamental se relacione con la obtenida mediante la excitación de la columna aérea contenida.

2.3.2. Sistema Neumático

Luego de considerar que las válvulas del bosquejo inicial no satisfacen las necesidades del proyecto, surge la idea de construir válvulas caseras a partir de jeringuillas. Limando el pistón de hule sintético de 2cm de diámetro, perforando 5mm de diámetro de la pared del cilindro y añadiéndole un resorte en el interior, se fabricaron seis válvulas de prueba. El funcionamiento general se basa en la conexión del pistón a una polea accionada por la tecla; esto hace que se comprima el resorte fijado en la base (anillo de retención). La válvula se abre y da paso a que la manguera de alimentación conecte con el tubo sonoro. Al dejar de accionar la tecla, el resorte se expande nuevamente cerrando el paso de aire.



Figura 24. Fotografía de las válvulas caseras integradas a una manguera plástica.

a. Orificio que conecta el aire de la manguera principal a la válvula. b. Orificio que conecta la válvula con el tubo sonoro. c. Pistón móvil en posición de cerrado. d. Resorte metálico comprimido (posición de abierto).

Dichas válvulas fueron conectadas a una manguera plástica de 1cm de diámetro interno y 1m (metro) de largo (manguera de alimentación directa), y además se integraron con cinta adhesiva 4 tubos sonoros a las salidas de 4 válvulas.



Figura 25. Fotografía de sistema de válvulas conectadas a los tubos sonoros.

Se determinaron algunos inconvenientes con las válvulas caseras, siendo el principal el pistón. Para que este llegase a funcionar dentro de los requerimientos de esta válvula, fue necesario limarlo para reducir la fricción con el cilindro, pero al hacer esto las posibilidades de fuga se acrecentaban hasta el punto en el que dicha filtración fue considerable cuando la fricción era ideal. El uso de un lubricante ayudó considerablemente, sin embargo el desgaste de los componentes sería inevitable al corto tiempo.

Por otro lado, esta experiencia permitió comprobar los siguientes puntos esenciales para el continuar con el proyecto:

- Es posible alimentar hasta 4 tubos simultáneamente a través de un soplo de presión normal por así decirlo (sin mucho esfuerzo).
- La saliva producto del soplo ingresa al sistema, y finalmente a los tubos, mojándolos considerablemente, lo que representa un enorme riesgo.
- La distribución equitativa del aire permite excitar con una presión adecuada a los tubos cuando estos forman un acorde.

- Existe una respuesta instantánea desde que el aire ingresa por la manguera, hasta que este excita el tubo. Es decir cualquier modulación o impulso al ejecutar responderá en tiempo real.

Después de determinar la invalidez de la válvula casera, se considera adquirir válvulas especializadas tipo interruptor, lo cual facilitaría mucho el trabajo y aseguraría gran eficiencia y durabilidad; aunque el principal problema fue el precio. Se cotizaron válvulas de este tipo, cuyo costo oscilaba entre 50 y 80 dólares cada una, lo cual representaba un gasto extremadamente grande considerando las 25 válvulas requeridas.

Una opción en válvulas de menor precio fue la GT 18274A, que a pesar de ser una válvula tipo *pull* (presionar y halar manualmente un accionamiento), se pensó que con un resorte en la base, funcionaría como una válvula tipo interruptor, para lo cual se decide comprar una para probar.

El resultado no fue el esperado, debido a que se requería mucha fuerza para accionar dicha válvula; y aunque se probó desengrasando los pistones, no cumplió con los requerimientos básicos para el prototipo.



Figura 26. Fotografía de la válvula GT 18274A adquirida para la prueba.

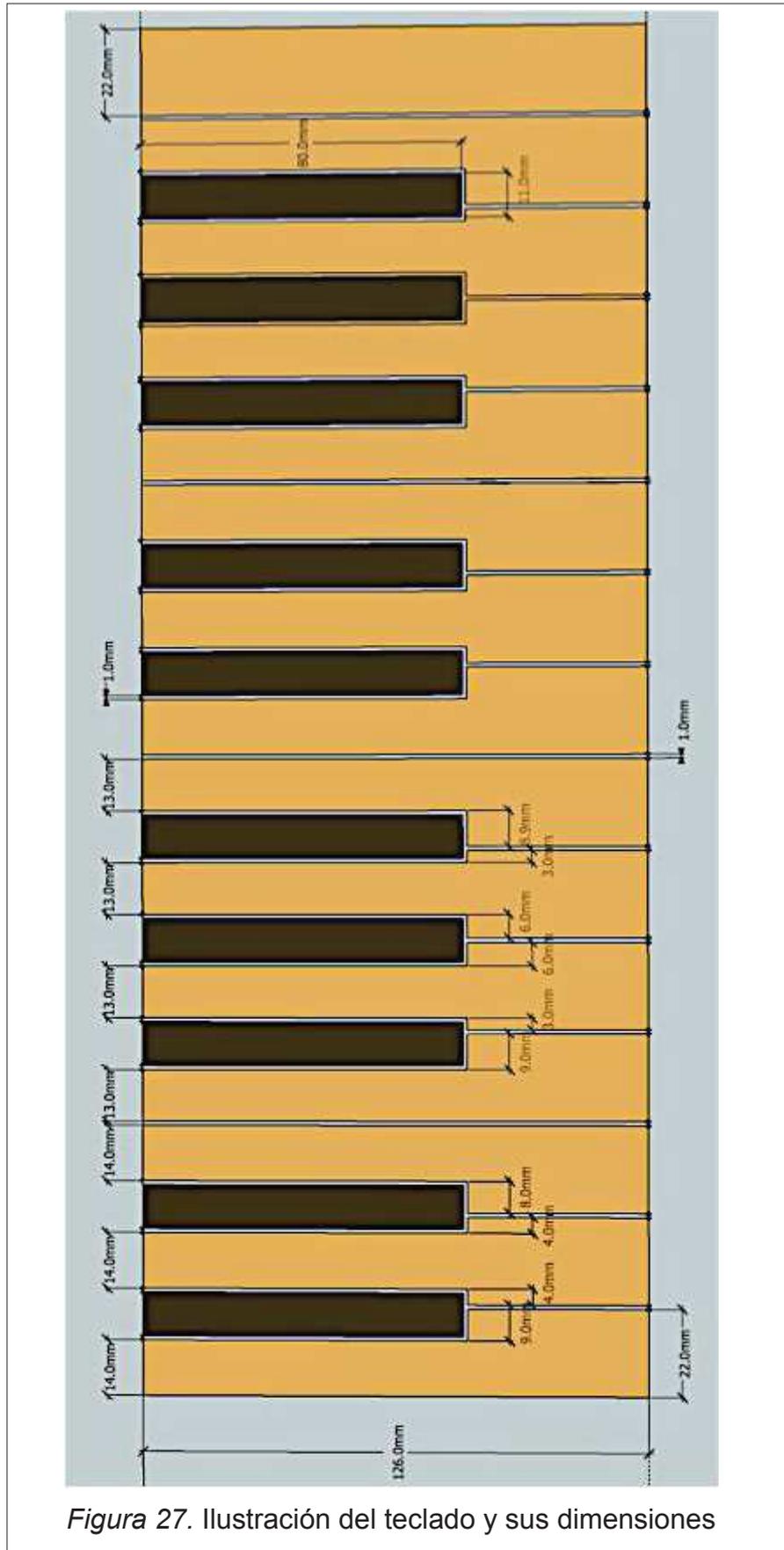
Finalmente, fue planteado un sistema mucho más simple y de menor costo, aparentemente sin limitaciones considerables, y por el contrario, con un gran potencial. Mangueras de látex y resortes cilíndricos de compresión fueron necesarios para solucionar un problema que parecía no tener una solución económica y efectiva, por lo que se decide diseñar un sistema con estos elementos considerando además el teclado cromático por medio del cual se ejecutaría el sistema neumático.

2.4. Prototipo final

En base a un profundo análisis de la etapa experimental, se decide plantear un diseño final obedeciendo las características físicas de los elementos constitutivos del proyecto. El diseño debería cumplir criterios estéticos y de funcionalidad, en función de lograr además, un prototipo compacto y durable.

2.4.1. Diseño

Se partió considerando las dimensiones reales de las teclas de un órgano de tubos convencional, las cuales se plasmaron en el software de modelamiento tridimensional SketchUp.



Como se aprecia en la Figura 28, se modeló una perforación a través de todo el teclado, de manera que una varilla de 4mm de diámetro pudiese atravesarlo permitiendo la movilidad en el eje vertical. Para no afectar las dimensiones reales del teclado, se hizo una prolongación de 15mm en todas las teclas. Se aprecia además un corte en esta sección adicional, el cual permitiría soportar una placa metálica (Figura 29) sobre la que reposaría un resorte cilíndrico de compresión, y además sería la encargada de cortar el paso el aire de la manguera de látex que bajo este se ubicaría.

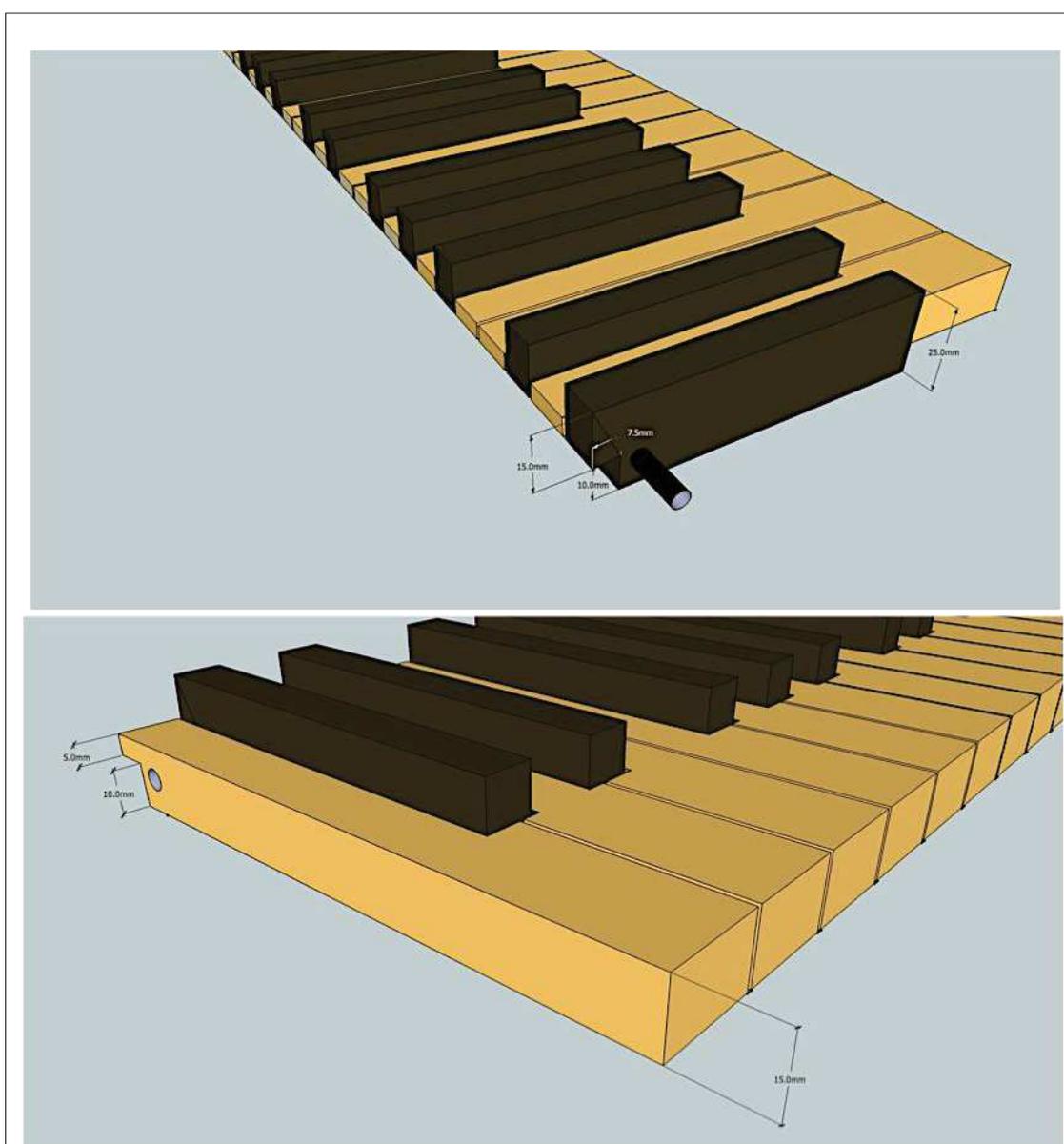


Figura 28. Imágenes del teclado y sus dimensiones.

Dicha placa se ve dimensionada en la Figura 29. El agujero cilíndrico de 9mm de diámetro en el extremo permite que la manguera se conecte con el tubo destinado luego de ser o no comprimida, mientras que el agujero de 2mm permite la sujeción a la tecla mediante un tornillo. La sección transversal en el extremo donde se sitúa el agujero de 9mm permitirá el corte del flujo de aire de la manguera que bajo este se situará. Los 2mm de diferencia entre las longitudes de ambas secciones transversales se relacionan con dicha manguera de látex comprimida, que el ser situada en la mencionada posición nivela esta relación.

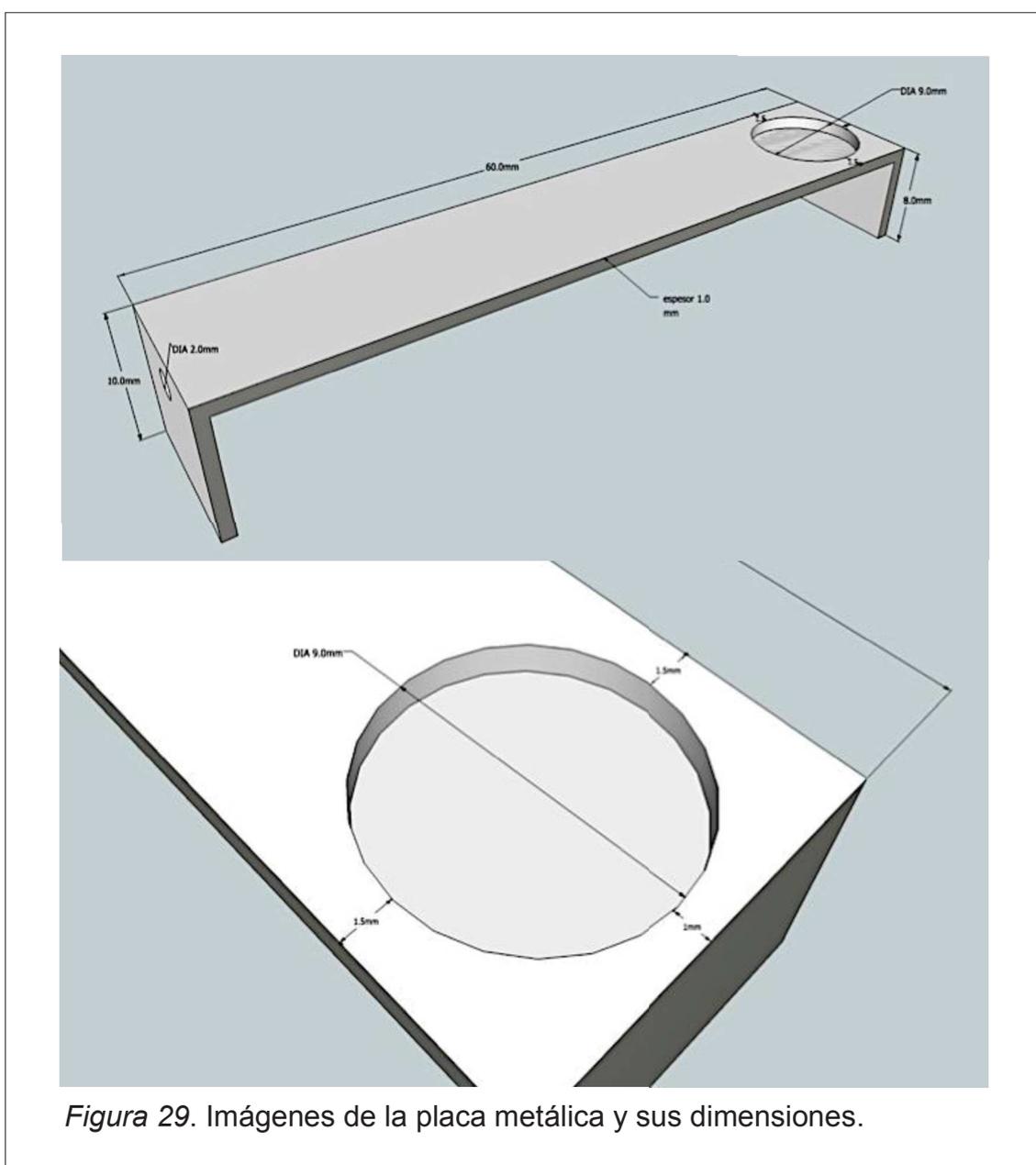


Figura 29. Imágenes de la placa metálica y sus dimensiones.

Ambos elementos integrados (teclas y placa metálicas) pueden ser apreciados en la Figura 30. La relación de dimensiones obedece a la necesidad de un desplazamiento vertical de 6mm en el extremo opuesto a la tecla. En este punto la manguera comprimida debe expandirse, siendo 8mm el diámetro externo de la manguera en esta condición. Por otro lado el desplazamiento vertical promedio de una tecla de un órgano es de 10mm; en función de dichas condiciones se calculó una longitud de 60mm de largo de la placa metálica, para que, dependiendo de la fuerza de compresión del resorte se ubicase en una posición adecuada a lo largo de la placa metálica.

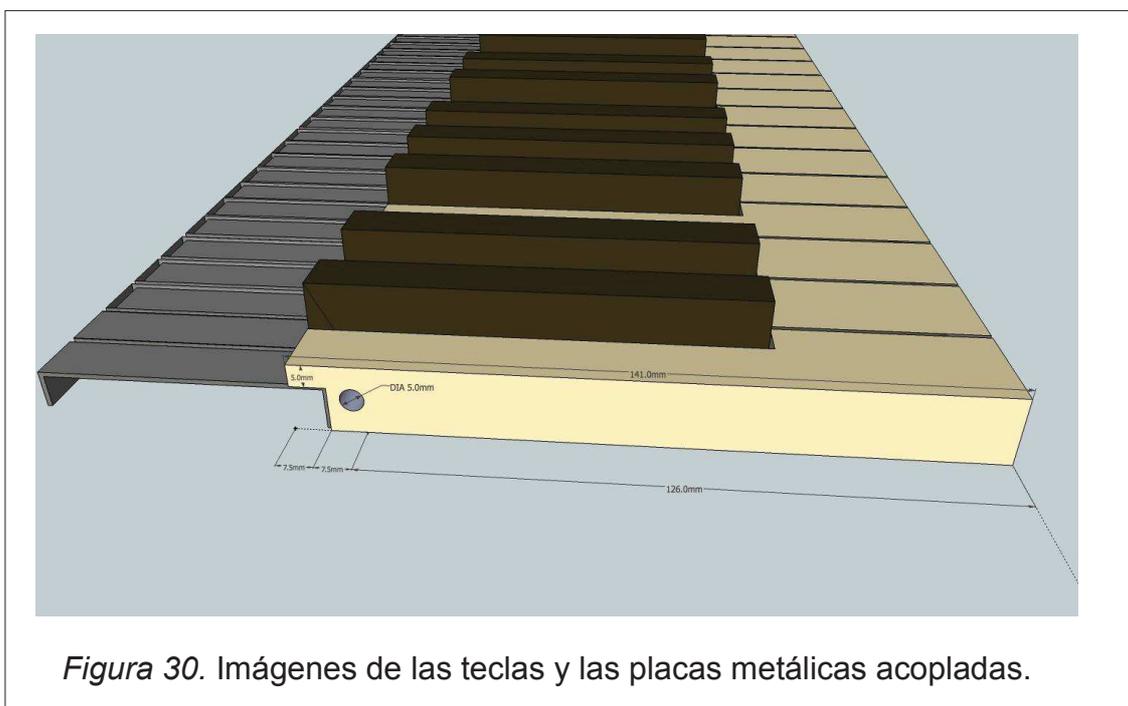


Figura 30. Imágenes de las teclas y las placas metálicas acopladas.

En cuanto al sistema de distribución de aire, se pensó en un tubo cilíndrico perforado con 25 agujeros hacia el cual se conectan los 25 segmentos de manguera de látex. En la Figura 31 se aprecia además los resortes cilíndricos de compresión de 11mm de diámetro y 23mm de altura, los cuales están acoplados a las placas metálicas. Se observan además las mangueras de látex conectadas a un tubo cilíndrico de 16mm de diámetro, y cuyo largo estará en función de las dimensiones de la estructura del instrumento. Dichas piezas están asentadas sobre las placas (se pensó en planchas de madera) que forman parte de la base y estructura del prototipo.

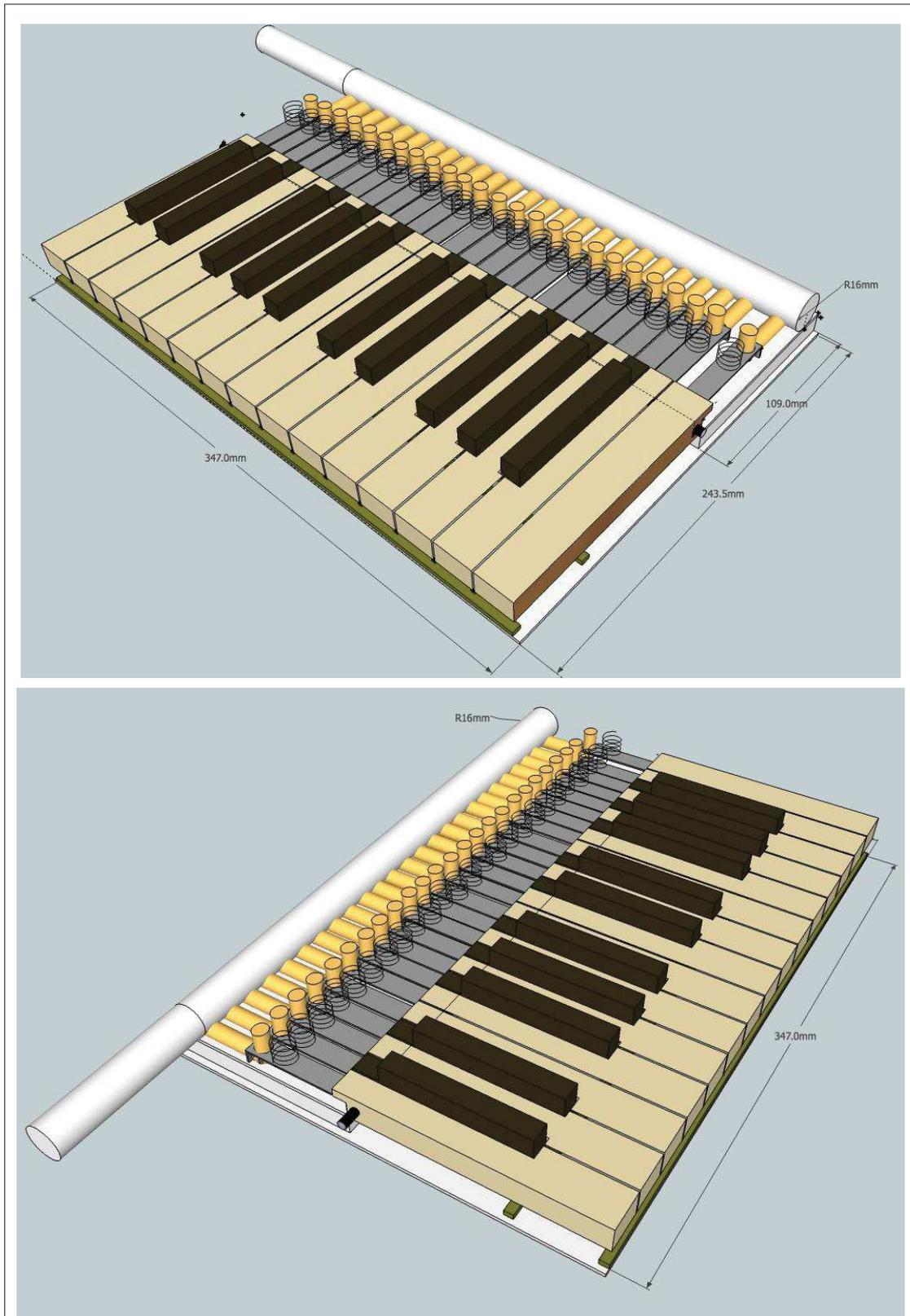


Figura 31. Imágenes de la estructura interna básica del prototipo.

En este punto, se tomó en cuenta el grosor y la distribución de los 25 tubos sonoros de bambú, en función de dimensionar la estructura externa del prototipo. Tomando en cuenta que se pretendió diseñarlo tan compacto como sea posible, se plantearon las dimensiones mostradas en la Figura 32. Se observa además una placa metálica de 3mm de espesor, cuya función es posibilitar un tope superior inmóvil para comprimir los resortes cuando una tecla sea presionada.

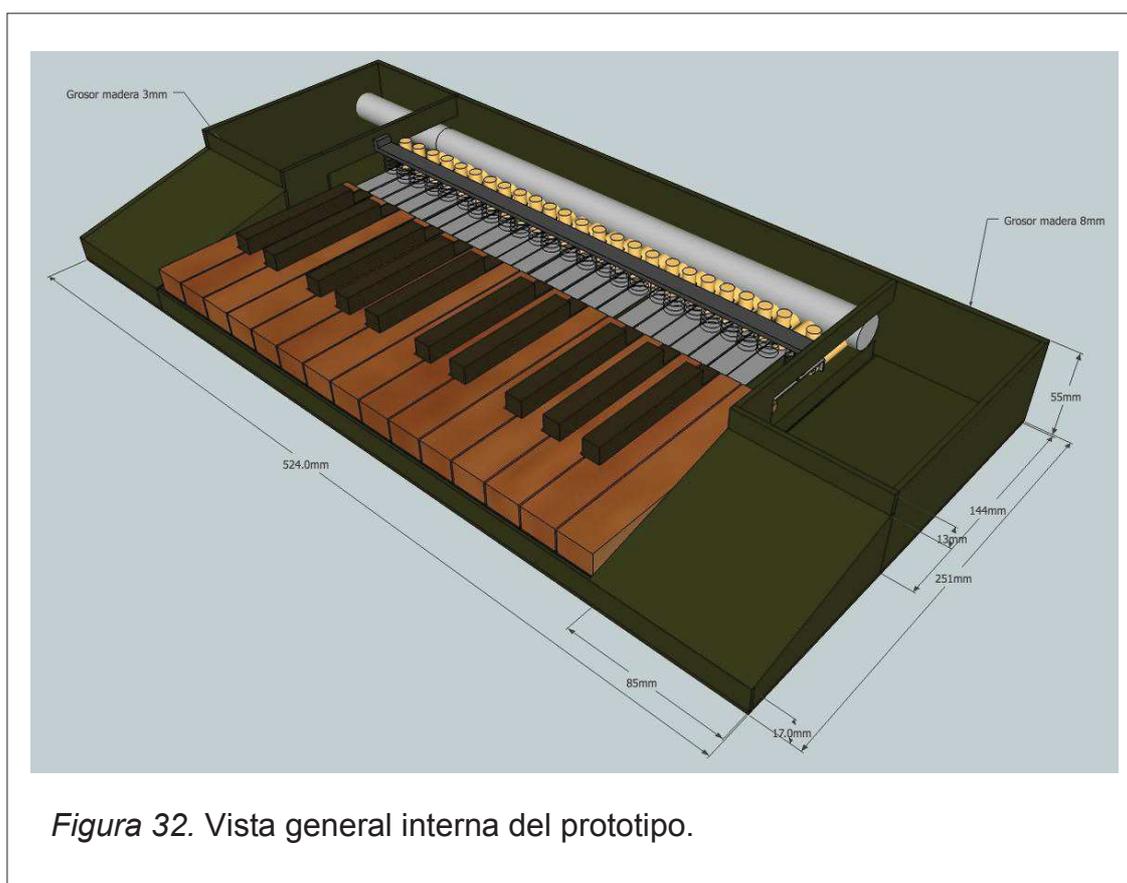


Figura 32. Vista general interna del prototipo.

La alimentación de aire por medio de soplo se realiza a través de una manguera de 15mm de diámetro, conectada directamente al sistema de distribución de aire. Las mangueras de látex se conectan desde el sistema de distribución hasta cada tubo sonoro directamente mediante perforaciones en la placa superior que cubre el prototipo. En la Figura 33 se muestra el diseño casi terminado, faltando solamente acoplar los tubos sonoros al sistema.

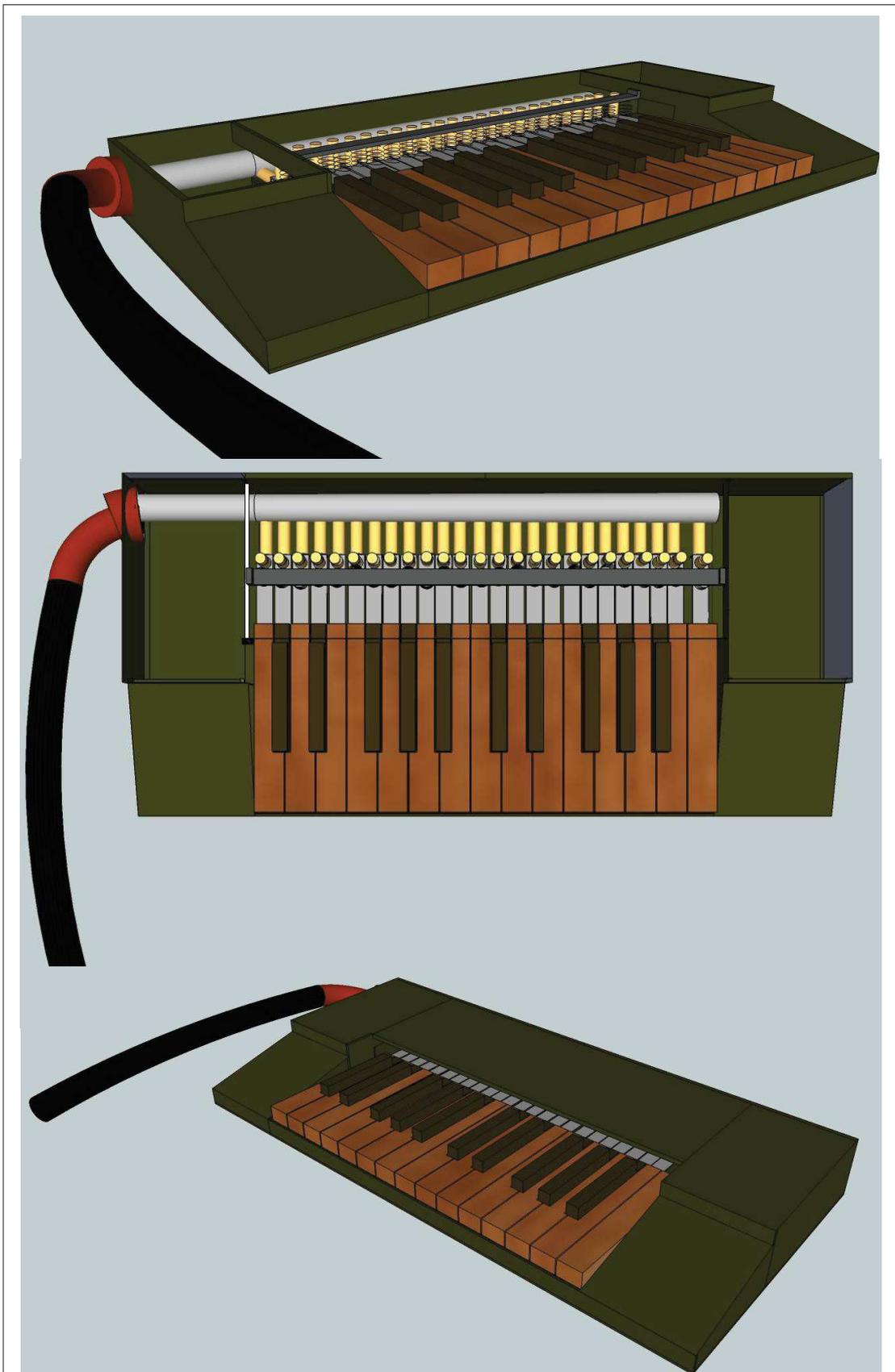


Figura 33. Vista general del diseño del prototipo terminado.

Finalmente, se distribuyeron los 25 tubos en la placa superior del prototipo; tratando de que cada tubo sea identificable fácilmente, se los distribuyó en el mismo orden cromático que el teclado. Se pensó además en una segunda placa superior para sostener a los tubos, perforada en función del diámetro de cada uno; dejando la primera placa para ser perforada en correspondencia con el diámetro de la manguera de látex. La vista general del prototipo terminado se aprecia en las figuras 34 y 35.

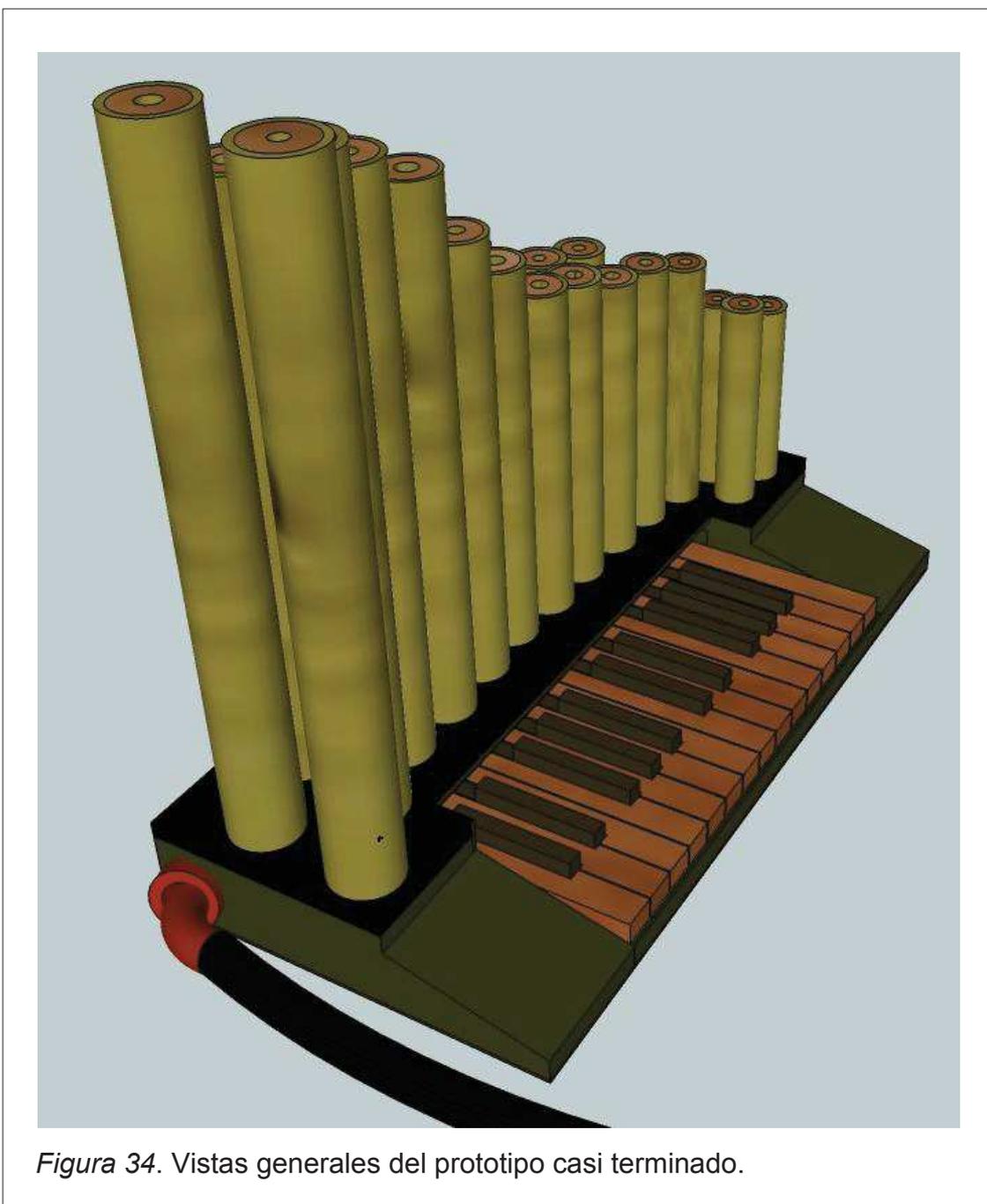


Figura 34. Vistas generales del prototipo casi terminado.

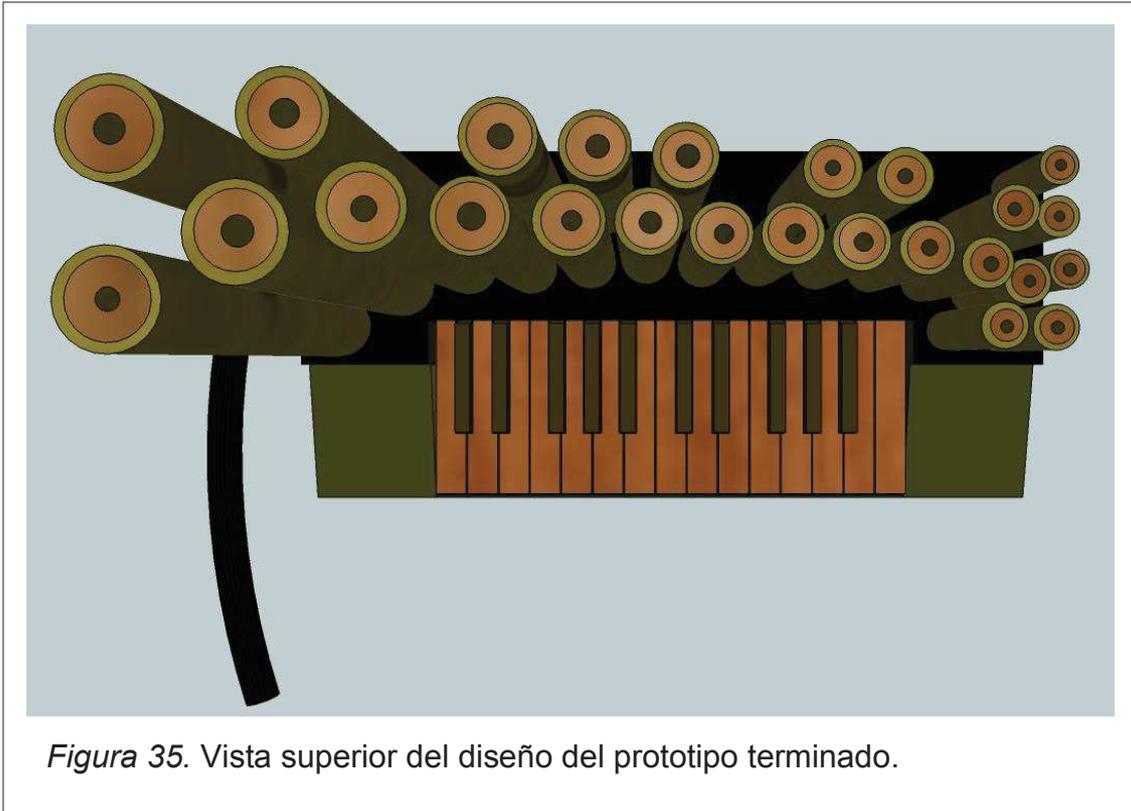


Figura 35. Vista superior del diseño del prototipo terminado.

2.4.1.1. Diseño neumático

En función de plasmar el flujo del aire durante todo el proceso, se entrega a continuación un diagrama del circuito neumático. Dicho esquema resume el diseño explicado anteriormente desde un punto de vista técnico considerando los elementos constitutivos del prototipo, siendo estos:

- Compresor (aire soplado), representado por una circunferencia con un triángulo en su interior.
- Líneas de flujo, camino que recorre el aire (mangueras y tubos).
- Bifurcación, representada por puntos que indican división.
- Válvula de dos vías, es un rectángulo dividido en la mitad, dibujado en su interior un segmento interrumpido de recta y una flecha.
- Accionamiento por pulsador, dibujado sobre la válvula indica la manera en que esta se ejecuta.
- Escape de aire, en este circuito abierto, el aire vuelve al medio después de excitar el tubo seleccionado.

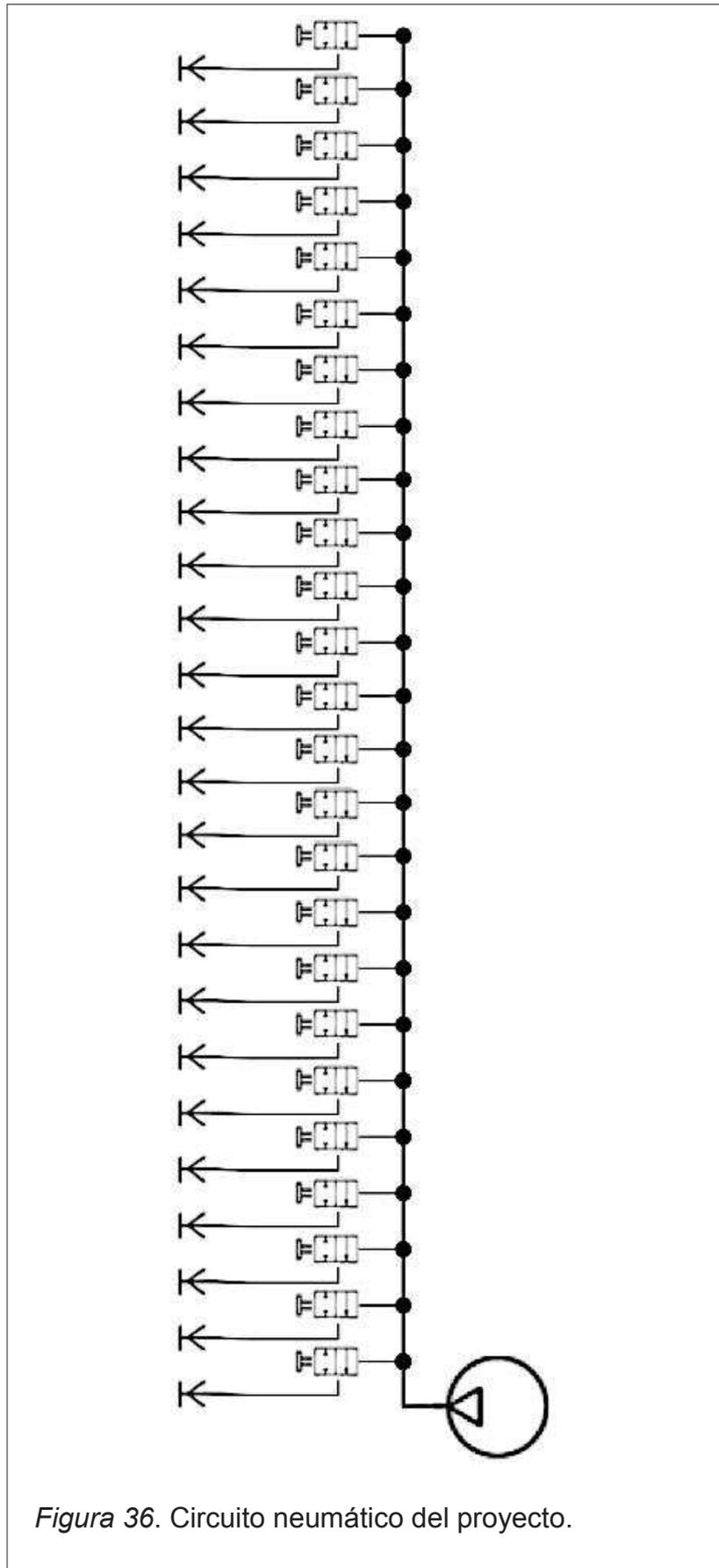


Figura 36. Circuito neumático del proyecto.

2.4.2. Construcción

2.4.2.1. Tubos

Para este proceso se adquirieron 28 tubos de la especie *Bambusa Tuldoides*, de diferentes diámetros externos que decrecían desde los 45mm hasta los 26mm.

El primer paso para trabajarlos fue el proceso de pelado o descascarado, en el cual se buscó desprenderlos de su capa exterior debido a que esta no permite darle un acabado a la superficie de los tubos, además de poseer pequeñas espinas y manchas blancas. Para esto se utilizó una cuchilla de hoja delgada, con la cual se desprendió fácilmente esta corteza externa.



Figura 37. Fotografía de un entrenudo de bambú semi-pelado.

Después se necesitó cortar los tubos en los puntos más próximos a los nudos, de modo que se consigan tubos abiertos en ambos extremos del mayor largo posible, para luego poder definir la altura exacta en función del tubo de mayor grosor y por ende más largo (generalmente los entrenudos más gruesos son

los más largos); así fue como se ordenaron los tubos, siendo el más grueso el destinado a ser afinado en el DO de frecuencia más baja posible (no se definió todavía la octava del límite inferior).

Posteriormente, con una lima cilíndrica se pulieron las paredes interiores de los tubos. Luego se trabajaron las embocaduras de cada uno, proporcionales a sus dimensiones como ya se indicó en la sección 2.3.1. En un siguiente paso, se consiguieron segmentos cilíndricos de madera para realizar los tapones; en el caso del tapón inferior, el largo considerado fue de 20mm para todos los tubos, con un orificio de prueba en el centro de 3mm de diámetro.

Una vez conseguidos los elementos del tubo sonoro, se dio un tratamiento a la madera con Maderol (insecticida y fungicida), sumergiendo por 5 minutos tanto los tubos como los tapones dentro de este producto. El proceso de secado dura 24 horas, por lo que se recomienda dejarlos en la sombra durante ese tiempo.



Figura 38. Fotografía de un entrenudo de bambú sumergido en Maderol.

Una vez que secaron los tubos, se procedió a colocar los tapones, y a sellarlos temporalmente utilizando silicona. Esto permite probar que los tubos están funcionando, considerando que una mínima fuga puede provocar que el tubo no funcione. El sellado temporal es indispensable en el proceso de afinación, donde se va a requerir variar la altura cortando al tubo (se sellara temporalmente varias veces) en función de la frecuencia requerida.

Se realizó primero un análisis de los tubos sin ser cortados, los cuales fueron excitados en su primer y segundo modo de resonancia, variando la presión del sople. La medición de frecuencia se realizó con la aplicación para iPhone denominada *n-Track Tuner*, la cual entrega el modo fundamental de la frecuencia a la que está resonando el tubo, y la relaciona con la escala temperada afinada en LA de 440Hz con un intervalo de $\pm 3\%$ de proximidad a la nota exacta.

Se determinó una relación aproximada entre el primer y segundo modo de vibración, de un intervalo de quinta con relación a la octava superior (19 semitonos). Se comprueba además que la fórmula aproximada para el cálculo de la frecuencia en función del largo del tubo (Ecuación 2), dista mucho del resultado medido (tubo cerrado), además que en el proceso definitivo de afinación se involucra una variante no contemplada en dicha ecuación (diámetro del orificio del tapón inferior); por lo que se decide dejar de lado esta ecuación y afinar con variaciones experimentales del largo.

Como se mencionó en 2.3.1, se trabajará con tubos semi-abiertos, por lo que se decide hacer una perforación de mayor diámetro (8mm) en el tapón inferior del primer tubo (así se denominará al tubo de mayor grosor y largo), debido a que este no suena en su primer modo de vibración con el orificio de 3mm inicialmente planteado para todos los tubos; además tomando en cuenta que tapar el orificio parcial o totalmente y por determinados intervalos en la ejecución, genera un efecto agradable de cambio de frecuencia. Si el orificio es mayor, el rango de frecuencias para este efecto será mayor.

No obstante, dicho tubo no resuena de su primer modo de vibración, por lo que se decide afinar los tubos en función de su segundo modo de vibración (los tubos suenan perfectamente en este modo). Se afinaron los 5 primeros tubos bajo esta condición, acortando su largo con un método aproximado en función del primer tubo, y posteriormente limando ligeramente el orificio inferior para una afinación más exacta como se muestra en la Figura 39.



Figura 39. Proceso de afinación aumentando el diámetro del orificio inferior del tubo.

Pero, sorprendentemente a partir del sexto tubo, estos comenzaron a resonar perfectamente en su primer modo, por lo que se decide replantear el proceso de afinación debido a que se prefirió un registro bajo de frecuencias, además del hecho que excitar el segundo modo de vibración requiere de mayor presión

de aire, que se traduce en mayor esfuerzo al soplar. La única razón en cuanto a la imposibilidad de hacer resonar estos cinco primeros tubos pareció ser su largo, el cual no funciona bajo esta condición (tubo abierto), es por eso que se volvió a cortar el primer tubo esperando que resuene en su primer modo con una frecuencia fundamental cercana al DO.

Con un largo de 39mm y un orificio de 9mm se consiguió una frecuencia fundamental de 261Hz (correspondiente a un DO de la cuarta octava) en su primer modo de vibración. A partir de este tubo, se fueron trabajando sucesivamente los siguientes, cortando prudentemente algunos centímetros en su extremo, sellándolo, midiendo su frecuencia fundamental, y volviendo a repetir el proceso en caso de que se necesite aproximarse más. En caso de estar cerca de la frecuencia requerida, se pudo realizar ajustes de afinación variando ligeramente el orificio inferior del tubo que partió siendo de 8mm para el primer tubo, y fue disminuyendo proporcionalmente para los siguientes diámetros.

Hubieron casos en los que los tubos no sonaron con el resultado esperado, y esto se debió principalmente a los siguientes problemas:

- El segmento del corte transversal del tapón superior no coincidía exactamente con el ancho de la embocadura (cuando este es muy grande es imposible que suene bien).
- Fugas de aire en ambos extremos.
- Fracturas en las paredes de los tubos.
- Orificios muy grandes en función del diámetro interno del tubo (fue necesario cambiar el tapón o añadir silicona en la circunferencia interior del orificio).

Se reemplazaron los tubos o los tapones dependiendo del caso, pero al final se obtuvo un resultado satisfactorio, aunque ciertamente algunos tubos sonaban mejor que otros. Se asocia este fenómeno a la geometría interna de los entrenudos, la regularidad de las paredes internas de los tubos es un factor determinante en el timbre final del instrumento, por lo que la calidad del sonido

obtenido dependerá de esta característica física del tubo. (Asociación musical fuera de tono, 2009, p. 146)

Es así como se obtuvieron los siguientes tubos presentados en siguiente tabla.

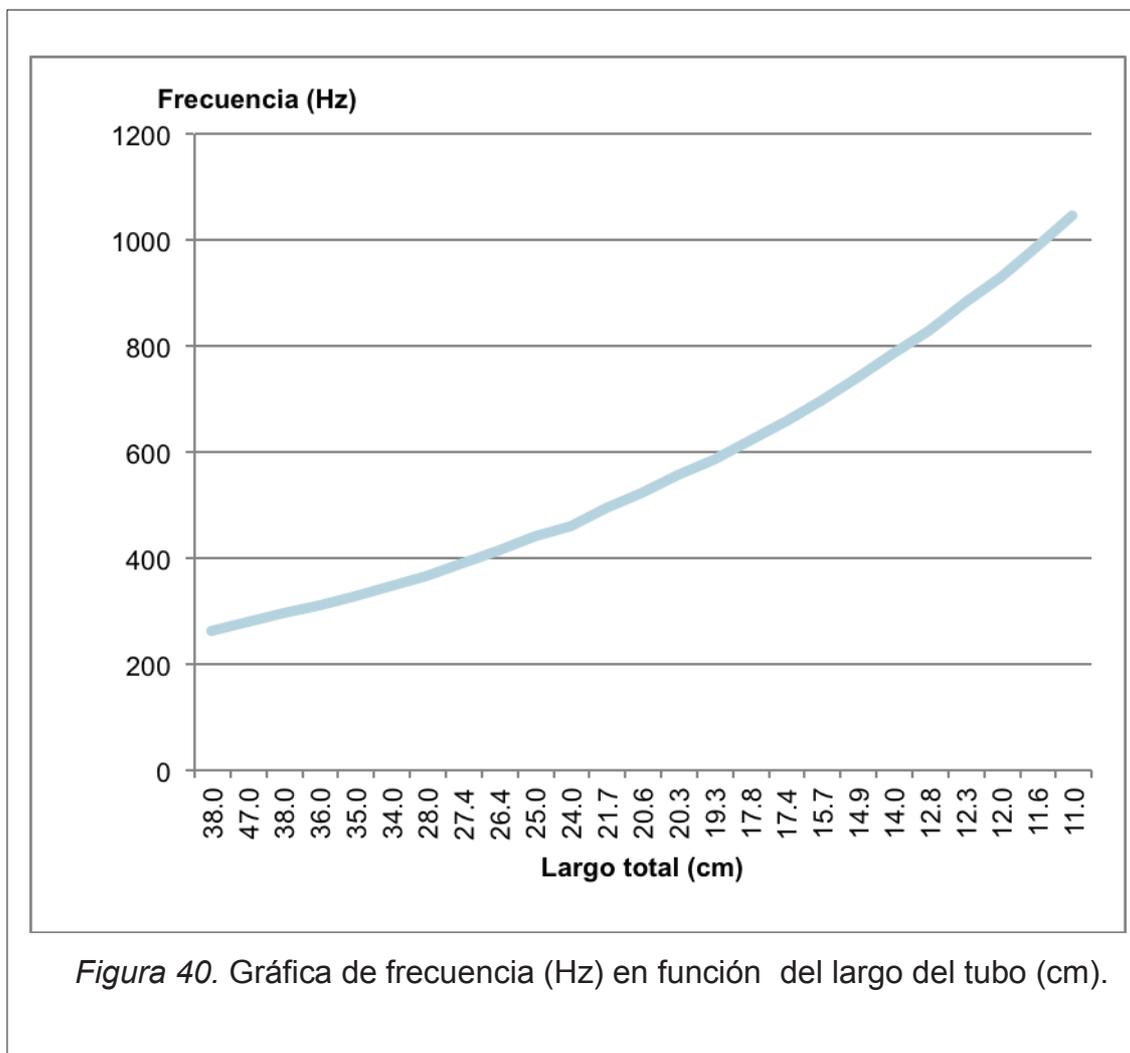
Tabla 1. Dimensiones de los tubos definitivos y su respectiva frecuencia fundamental en su primer modo de vibración.

No.	Largo total (cm)	Diámetro interno (cm)	Diámetro del orificio (mm)	Frecuencia (Hz)
1	38,0	3,60	9,0	262
2	47,0	3,50	8,5	278
3	38,0	3,80	8,5	294
4	36,0	3,40	10,0	310
5	35,0	3,30	10,0	328
6	34,0	3,00	10,0	347
7	28,0	3,00	9,0	367
8	27,4	2,90	8,0	390
9	26,4	2,90	8,0	415
10	25,0	2,90	8,0	440
11	24,0	2,80	9,5	460
12	21,7	2,70	9,0	494
13	20,6	2,80	10,0	522
14	20,3	2,50	9,0	555
15	19,3	2,50	9,0	586
16	17,8	2,45	9,0	622
17	17,4	2,45	9,0	658
18	15,7	2,35	9,0	697
19	14,9	2,10	7,0	740
20	14,0	2,10	7,0	784
21	12,8	2,10	6,0	829
22	12,3	2,10	7,0	881
23	12,0	1,90	5,0	930
24	11,6	1,90	6,0	986
25	11,0	1,80	5,0	1045

Como se puede apreciar, el segundo tubo es el único que no se sujeta a la tendencia en cuanto a su largo, el cual es de longitud mayor al primero (debido al diámetro del orificio inferior).

Observando las dimensiones de los orificios, se observa una marcada fluctuación, aunque de cierta manera guarda proporción dentro de los márgenes aceptables en función del diámetro interno del tubo.

Como punto importante, se aprecia el crecimiento exponencial de la frecuencia en función del decremento de la longitud del tubo. En la figura 40 se graficó la frecuencia fundamental del primer modo de vibración del tubo en función del largo.



La afinación final a la que corresponden los tubos de la tabla, fueron medidos con la aplicación *n-Track tuner* como se mencionó anteriormente. Se procuró una afinación lo más cercana posible (aproximadamente $\pm 0.5\%$ de desviación estándar) a la frecuencia exacta (presión de soplo continuo promedio), aunque ciertamente varía en función de la presión del soplo del ejecutante, mismo que debe ejercer una presión relativamente constante en función de cada tubo. Existe un rango de desviación en función de la presión de aire entregada en relación a la excitación del primer modo de vibración, la cual es de aproximadamente ± 90 centésimas de semitono.

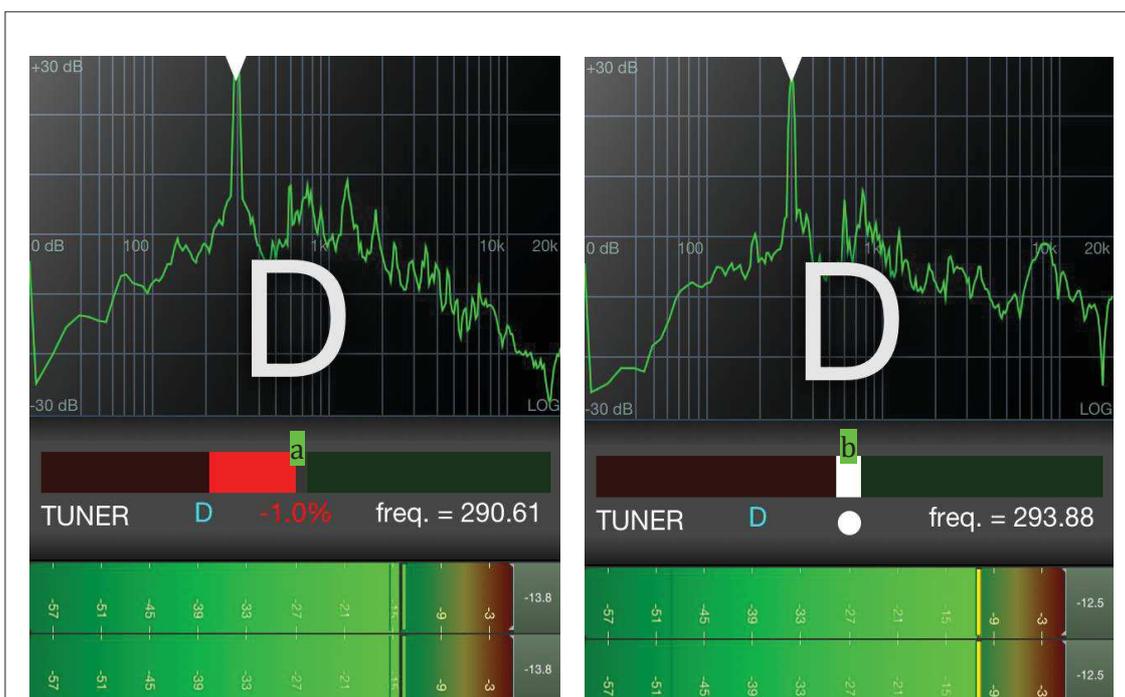


Figura 41. Captura de pantalla de la del proceso de afinación del tubo No. 3 correspondiente a la nota “Re”.

a. Se aprecia una desviación de aproximadamente 3.3Hz por debajo de la nota exacta. b. Luego de limar el orificio inferior se aprecia como se encuentra afinado a la frecuencia correspondiente.

Finalmente luego de hacer un sellado definitivo con pegamento y harina de maíz tostado, y de igualar los extremos con un esmeril; se necesitó integrar una boquilla de silicona al extremo de alimentación de cada tubo. El propósito fue

acoplar las mangueras de látex a cada tubo de una manera eficiente y sin pérdidas de aire.



Figura 42. Boquilla de silicona acoplada al tubo.

2.4.2.2. Teclado y placas metálicas

Las teclas fueron construidas por un carpintero, siguiendo las especificaciones del diseño. Se las construyó en eucalipto, dándole un acabado final con tinte para madera en un tono café claro para las teclas blancas (notas naturales), y en café oscuro para las teclas negras (notas alteradas).



Figura 43. Fotografía de las teclas en el proceso de corte.

En cuanto a las placas metálicas, también fueron realizadas por un profesional en un taller de metalmecánica. Dichas placas fueron acopladas a las teclas con un pegamento fuerte en primer lugar (ABRO Super Glue), y luego del secado se procedió a atornillar la tecla a través del orificio destinado. En el extremo opuesto de la placa, se necesitó integrar otro elemento (cinta adhesiva de espuma), cuyo propósito fue crear una sección suave y no cortante entre la placa y la manguera (el extremo de la placa podría cortar dicha manguera).



Figura 44. Fotografía de una placa metálica acoplada a una tecla.

Finalmente en cuanto a estos elementos, las teclas fueron atravesadas por una varilla metálica de 4mm de diámetro y 355mm de largo, a través de la perforación destinada para este propósito (movilidad en su eje). Se contempló además incluir separadores entre tecla y tecla, para lo cual se utilizó una cartulina plástica cortada en círculos.

2.4.2.3. Estructura

En base al diseño planteado, fueron entregadas a un carpintero las especificaciones y dimensiones de cada pieza constitutiva de la estructura del prototipo. Dicha estructura está conformada con piezas elaboradas en tableros contrachapados triplex; mismas piezas que fueron acopladas en sus uniones con pegamento blanco para madera y clavos. La pieza superior que cubre la estructura fue integrada con 2 bisagras, las mismas que facilitan el proceso posterior de ensamble, reparación o cambio de piezas en algún punto en el que se necesite. Finalmente se le dio un acabado con pintura mate color verde oscuro.



Figura 45. Fotografía de la estructura del prototipo en el proceso de ensamble.

2.4.2.4. Sistema neumático

Se utilizó un tubo de PVC de ½ pulgada como sistema de distribución de aire. Para lograr este propósito fue necesario perforar 25 agujeros alineados a las teclas, dentro de los cuales se integraron segmentos de manguera rígida de 8mm de diámetro externo y 12mm de largo, gracias a las cuales se logra acoplar eficientemente las mangueras de látex.

A continuación, se acopló al tubo de distribución de aire, un codo de PVC de 90° y ½ pulgada, el cual a su vez se enroscó a un adaptador para insertar una manguera de caucho de 60cm de largo y 1.2cm de diámetro interno. En el interior de cada unión se adhirió una porción de cinta absorbente para tuberías; esto ayudó a disminuir el paso de saliva hacia el sistema mecánico.



Figura 46. Sistema de distribución de aire del prototipo.

- a. Se aprecia segmentos de manguera acopladas al tubo de PVC.

Los elementos mecánicos que intervienen en el proceso neumático son el resorte de compresión y la manguera de látex, que junto con la sección transversal de la placa metálica conforman una válvula de dos vías. La placa metálica grande que funciona como tope para el resorte fue acoplada a la estructura a través de dos pernos de 2mm de diámetro con su respectiva tuerca para la sujeción. En la Figura 47 se puede apreciar uno de los 25 grupos de elementos (tecla, placa, manguera y resorte) acoplados a la estructura. Esto se realizó para comprobar la eficiencia del sistema en un entorno más real y definitivo.

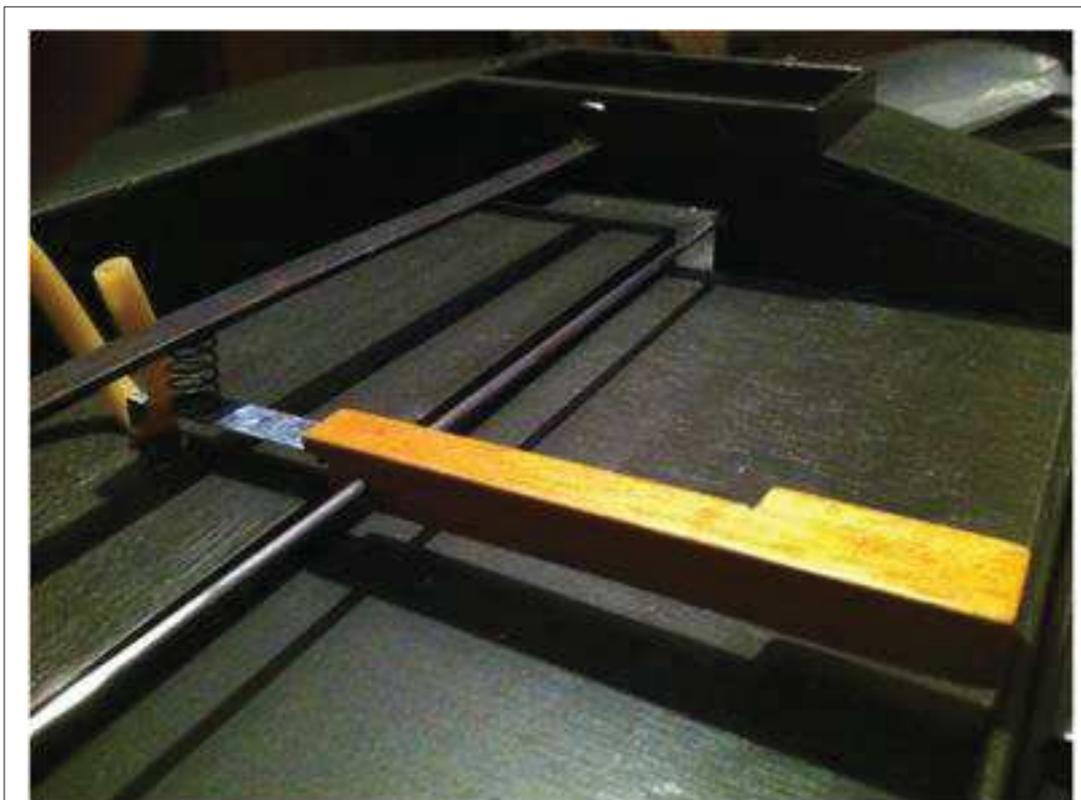


Figura 47. Fotografía de una tecla de prueba acoplada al resorte y a la manguera.

La varilla que atraviesa las teclas fue acoplada mediante dos orificios hechos en la estructura como se aprecia en la Figura 47, y se encuentra fijada con silicona, lo que facilita que pueda ser extraída posteriormente (en caso de

cambio de piezas). Los resortes también fueron integrados a las placas con silicona y las mangueras de látex montadas en las mangueras rígidas sobre una capa de pegamento Abro Super Glue.

Posteriormente, se integraron todos los elementos del prototipo. Primero el sistema de distribución de aire, luego el teclado, y como se muestra en la Figura 48, se acoplaron una por una las mangueras de látex. Los resortes y la placa metálica fijada sobre estos, fueron integrados luego de este proceso.



Figura 48. Proceso de ensamblado final del sistema mecánico.

a. Se aprecia una ligera deformación en el punto central la placa rígida.

En esta etapa de ensamblado final del sistema mecánico se presentó un inconveniente referente a la placa metálica bajo la cual se comprimen los resortes. Este elemento presentó una deformación en el centro debido a la fuerza de compresión contenida (como se puede observar en la figura 48). Esto ocasionó que las teclas centrales (desde LA hasta FA) no trabajen

eficientemente, ocasionando fugas de aire. La solución más práctica fue crear una fuerza opuesta a la de los resortes, a través de segmentos de madera adheridos en cuatro puntos centrales de la placa, y a su vez contenidos por la tapa de madera de la estructura del prototipo, la cual fue atornillada en los bordes de la estructura en 7 puntos de sujeción.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del sistema neumático, fue necesario acoplar los tubos; para lo cual se requirió cortar y perforar con sacabocados de diferentes diámetros, una plancha de madera de 1,5 cm de espesor. Las perforaciones correspondieron a la posición y diámetro de cada uno de los tubos sonoros. Estas placas fueron acopladas a la estructura principal con silicona.



Figura 49. Plancha de madera perforada en función de la distribución de los tubos sonoros.

Los tubos fueron los últimos elementos en integrarse al sistema, completando así el proceso de construcción del prototipo. La Figura 50 muestra las fotografías correspondientes al producto terminado.



Figura 50. Vista superior y trasera del prototipo construido.

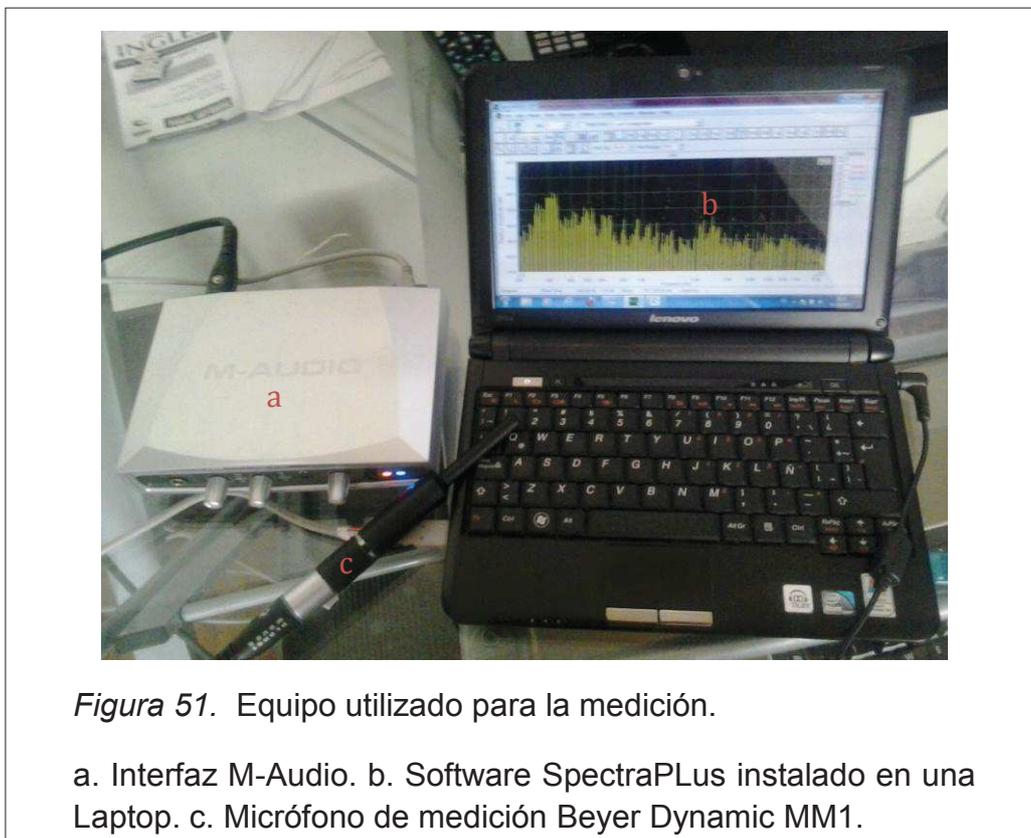
CAPITULO III

3. Presentación y análisis de resultados

Como se puede apreciar en el capítulo anterior, el resultado que avala los planteamientos establecidos para este proyecto es el prototipo construido, el cual en esta etapa final, será ejecutado para comprobar su funcionalidad y determinar además, los aspectos fundamentales de su sonoridad.

Primeramente con un soplo moderado, se presionó en orden ascendente tecla por tecla, es decir se fue excitando un tubo a la vez, de tal manera que se pudiese determinar el comportamiento de cada sonido. Esta información fue grabada y procesada para un posterior análisis espectral.

Para realizar este proceso, se empleó el software SpectraPLus 5.0 instalado en una Laptop, además de una interface de audio M-audio Mobile Pre Usb, un micrófono de medición Beyer Dynamic MM1, un cable XLR Planet Waves y un pedestal para micrófono.



El proceso consistió en grabar 5 segundos (tiempo suficiente debido a la poca fluctuación de la señal recibida) el sonido producido por cada tubo sonoro, para luego (etapa post-procesamiento) identificar sus respectivas frecuencias fundamentales, así como los sobretonos. Observando la Figura 52 se aprecia el espectro del primer tubo correspondiente a la nota Do de la cuarta octava, donde se evidencia el comportamiento y la distribución de los sobretonos, que son los que finalmente determinan el timbre del instrumento.



Figura 52. Espectro correspondiente a la nota Do de la cuarta octava.

En base a las mediciones obtenidas, se plantea la tabla 2 que describe el comportamiento espectral de los 25 tubos, mientras que en el Anexo 2 se muestran todas las gráficas del espectro.

Tabla 2. Frecuencia fundamental y principales sobretonos de los tubos analizados (frecuencias características de nivel considerable).

Tubo correspondiente a nota:	Frecuencia fundamental (Hz)	Primer sobretono (Hz)	Segundo sobretono (Hz)	Tercer sobretono (Hz)
Do 4	262,6	696,12	793,12	1607,17
Do# 4	277,68	688,02	1105,67	1677,37
Re 4	290,02	728,78	860,32	1881,74
Re# 4	311,48	773,13	944,73	2406,66
Mi 4	329,36	658,29	780,87	1333,87
Fa 4	349,24	775,25	870,07	1437,11
Fa# 4	370,68	740,84	953,84	1565,66
Sol 4	388,12	785,71	1258,32	1720,12
Sol # 4	415,04	825,28	1209,45	1801,21
La 4	439,64	878,71	1305,65	2699,61
La# 4	466,40	929,12	1391,12	2336,62
Si 4	493,16	985,16	1528,24	2470,68
Do 5	523,16	1042,22	1508,12	2176,24
Do# 5	555,02	1105,65	1612,05	2209,15
Re 5	586,86	1172,93	1727,22	2367,67
Re# 5	622,56	1244,37	1767,57	2511,56
Mi 5	662,26	1315,7	1875,12	2621,53

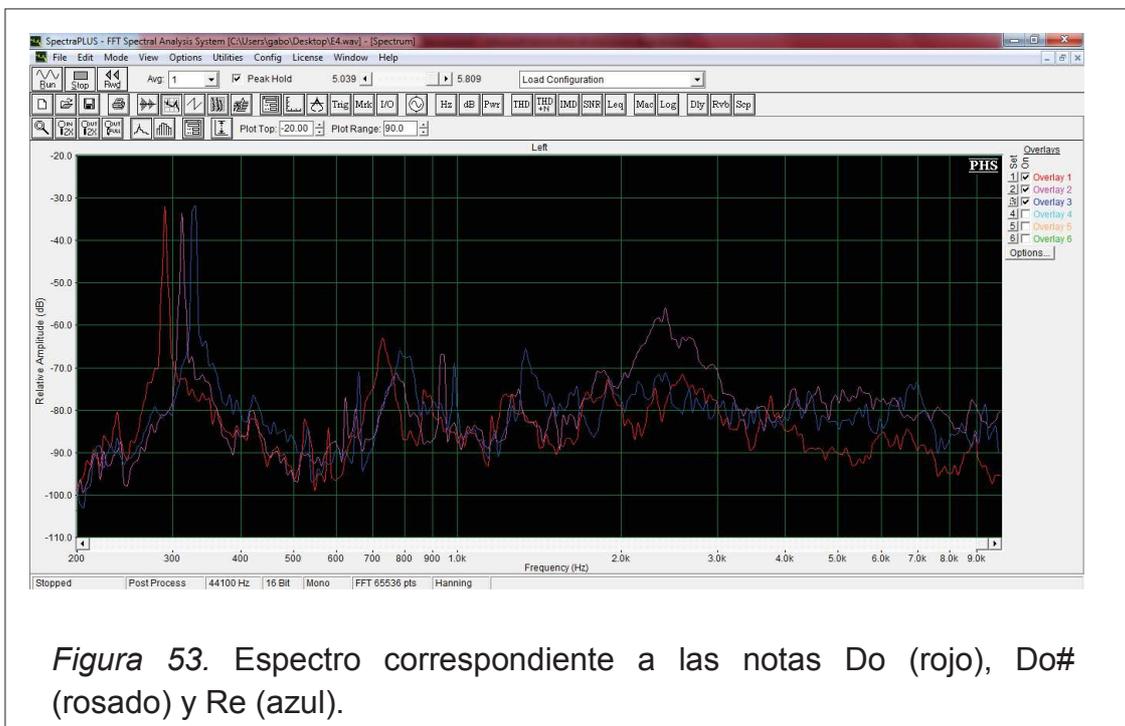
Tabla 2. Continuación

Fa 5	698,35	1386,22	2112,52	2812,32
Fa# 5	740,84	1475,85	2239,17	2920,56
Sol 5	780,98	1560,54	2328,96	3115,23
Sol# 5	828,30	1668,50	2503,35	3340,82
La 5	878,82	1756,24	2621,13	3560,69
La# 5	928,08	1857,12	2780,24	3711,24
Si 5	985,66	1963,24	2940,28	3924,82
Do 6	1042,32	2083,12	3118,32	4001,28

Aunque la relación entre sobretonos es bastante pareja y se manifiestan como múltiplos pares de la fundamental (armónicos), ciertamente no todos los sonidos tuvieron el mismo comportamiento, por lo que es indispensable considerar el impacto que tiene el ruido producido por las mangueras (excitan una frecuencia en particular en función de su largo) sumado al sonido emitido por los tubos; además como se mencionó anteriormente, influye en el timbre la geometría interna de los entrenudos. De todas maneras el timbre final incluye todos estos factores, por lo que el análisis espectral de basó en la ejecución del instrumento como tal.

Esta fluctuación es visible en los primeros tubos, en los que la relación del primer sobretono (frecuencia superior de amplitud considerable) en función de la fundamental es de 2,6:1, pero desde el quinto tubo esta relación se regulariza a 2:1; lo mismo sucede para los siguientes sobretonos. Por otro lado, de debe considerar que para presentar la tabla, se tomaron en cuenta las frecuencias superiores de mayor amplitud, sin influir el hecho de que sean o no múltiplos pares exactos de la fundamental, ayudó mucho seleccionar estas

frecuencias el contraste realizado entre algunos espectros sobrepuestos como se muestra en la Figura 53.



Aunque el sonido general de los tubos presenta el mismo timbre, difieren en cuanto a definición y facilidad de excitación. A pesar de que la mayoría emita un sonido limpio y definido, se pudo notar por ejemplo que tubos correspondientes a las notas FA (349Hz) y FA# (369Hz), generaban sonidos relativamente de menor calidad o pureza por así decirlo (se muestra cierta irregularidad, comparado con el resto de tubos; no obstante son aceptables debido a que su altura tonal es definida y su sonido claro).

En general, el nivel de presión sonora que emite cada tubo acoplado al prototipo disminuye en aproximadamente 6dB en comparación al tubo excitado directamente. Por otro lado el rango de frecuencias que abarcan los tubos en su primer modo de vibración va desde los 260Hz hasta los 1045Hz, y en cuanto a los armónicos el rango se amplía y se muestra desde los 696Hz hasta los 6000Hz (donde se presenta una caída significativa de nivel).

Se nota además, que el instrumento emite un ruido proveniente de las mangueras, cuyo nivel se encuentra aproximadamente 20dB por debajo del nivel nominal al que se encuentra un tubo cuando es excitado (medición de nivel de tubos excitado directamente contrastado con tubos acoplados al instrumento).

Se determinó además cómo difiere la presión de aire necesaria para excitar cada tubo, en algunos se requiere soplar con un poco más de esfuerzo que otros. Este fenómeno se relaciona con la resistencia producida por el largo de las mangueras de distribución, dichas dimensiones varían para cada uno de los tubos como se puede apreciar en la figura 48. Mientras mayor es la distancia entre la manguera de alimentación principal y la boquilla del tubo, mayor será la presión necesaria para excitar a dicho tubo.

Se toma en cuenta en función a lo observado, que dicha fluctuación de presión de aire, se traduce en fluctuación de frecuencia, por lo que se debe tener en cuenta al momento de interpretar, que la desviación máxima en cuanto a frecuencia es de aproximadamente ± 10 centésimas de semitono; por sobre el valor positivo de este número, el segundo modo de vibración de tubo será excitado.

Por otro lado, se nota una mayor dificultad para presionar las teclas correspondientes a las notas alteradas (sostenido y bemol), lo cual se explica tomando en cuenta la longitud de dichas teclas. Mientras más cerca del eje central se realice la presión, mayor fuerza será requerida para esta acción. De todas maneras la diferencia no es tan considerable, y dichas teclas pueden ser presionadas sin mucho esfuerzo.

Se observa además, que a pesar de adherir cinta absorbente en cuatro puntos previos al sistema de distribución de aire, la saliva producida es considerable luego de un periodo de soplo extendido, lo que provoca que dichas gotas ingresen a las mangueras de látex, por lo que se recomienda extraer constantemente la saliva acumulada de la manguera principal.

A pesar de que se buscó ser lo más preciso en la construcción de cada pieza como teclas y placas, esa mínima inexactitud con la que se fabricaron (debido a que no se utilizaron instrumentos de alta precisión), impacta en el prototipo final. Es por eso que las teclas no se encuentran totalmente rectas, espaciadas a la misma distancia, y a la misma altura.

Se procedió posteriormente a probar la polifonía del instrumento. En función de que la presión de aire requerida para excitar correctamente un tubo varía, como se mencionó anteriormente; se comprenderá la inexactitud en las notas que conforman un acorde. De todas maneras, aunque el acorde es inestable en ciertos casos (dependiendo de las notas usadas), es bastante agradable. Se comprobó una polifonía de tres voces, aunque con algo de esfuerzo (mayor presión se traduce en mayor ruido) y en función de la facilidad de la mayoría de tubos para entrar en resonancia, dicha polifonía se extiende hasta cuatro voces, lo cual fue predicho en la fase experimental, y que además fue planteado en la hipótesis.

Por otro lado, en cuanto a la interpretación, el prototipo permite modular el sonido mediante la gesticulación con la boca, además cualquier impulso de aire entregado se traduce instantáneamente en un impulso sonoro. Adicionalmente, es posible variar la altura tonal (hasta aproximadamente cinco semitonos bajo el tono para el que fue diseñado) de cada tubo tapando parcial o totalmente el orificio superior con un dedo mientras se está interpretando, esto produce un efecto agradable y llamativo.

En comparación a otros órganos de tubos, se puede destacar lo siguiente:

- La duración de la interpretación está ligada al esfuerzo físico del ejecutante.
- El ruido producido por la circulación de aire a través de las mangueras durante la ejecución es considerable en cuanto a nivel.
- La irregularidad en cuanto a espaciamiento entre teclas así como la pequeña pero existente movilidad en el eje horizontal de ciertas teclas

dificultan limitan la libertad de ejecución (no permite realizar *glissandos* por ejemplo).

- La altura tonal de cada sonido varía en función de la presión de aire entregada por el ejecutante, lo que permite ligeras desafinaciones.

CAPITULO IV

4. Análisis económico

4.1. Etapa experimental

En este cuadro se detallan todos los gastos realizados en cuanto a los procesos experimentales previos a la etapa de diseño y construcción definitivos del prototipo. Dichos materiales usados en los experimentos fueron esenciales para llegar al prototipo construido, de igual manera impactan en el costo final del proyecto

Tabla 3. Costos realizados en la etapa de experimentación del proyecto.

Cantidad	Descripción	Costo unidad (dólares)	Costo total (dólares)
7	Jeringuillas plásticas desechables de 20ml.	\$0,50	\$3,50
1	Metro de manguera plástica de 12mm de diámetro.	\$0,70	\$0,70
2	Tubos de pegamento Abro Super Glue.	\$1,20	\$2,40
7	Tubos de bambú para pruebas.	\$2,00	\$14,00
1	Equipo de materiales de trabajo para madera de corte y moldeado.	\$45,00	\$45,00
1	Válvula GT 18274 ^a .	\$17,00	\$17,00
1	Pistola y barras de silicona	\$6,50	\$6,50
	Transporte	-	\$10,00
	SUBTOTAL:		\$99,10

Se excluye en la presente tabla el valor de dos sesiones de aprendizaje impartidas por el maestro Félix Castañeda, sobre técnicas de lutería para la construcción de aerófonos basados en bambú; debido a razones de amistad, no se pudo estimar un valor monetario. Pero para referencia en el análisis económico, se calcula en \$70 dólares.

En cuanto el equipo de materiales de corte y moldeado se detalla lo siguiente:

- Formón para madera.
- Limas cilíndricas.
- Cuchillas.
- Estilete.
- Lijas.
- Sierra.

Sumando estos valores (incluidas las sesiones de aprendizaje), sumaría un total de \$169,10 dólares americanos.

4.2. Construcción

En la siguiente tabla se presentan los gastos correspondientes a la etapa de construcción del prototipo.

Tabla 4. Costos realizados en la etapa de construcción del prototipo.

Cantidad	Descripción	Costo unidad (dólares)	Costo total (dólares)
27	Entrenudos de bambú tulda.	\$2,00	\$54,00
50	Cilindros de madera.	\$0,60	\$30,00
1	Envase pequeño de Maderol. Preparado	\$4,90	\$4,90

Tabla 4. Continuación.

1	Tubo de silicona líquida.	\$0,95	\$0,95
2	Tubos de pegamento Abro Super Glue.	\$1,20	\$2,40
5	Metros de manguera de látex de 9mm.	\$8,00	\$40,00
	Construcción de teclas de madera.	-	\$80,00
	Construcción de estructura de madera.	-	\$80,00
	Construcción de placas metálicas	-	\$30,00
1	Metro de tubo de PVC de ½ pulgada.	\$1,10	\$1,10
1	Codo de PVC de ½ pulgada, y adaptador de manguera.	\$1,60	\$1,60
1	Metro de manguera de caucho de 1cm de diámetro.	\$1,17	\$1,17
25	Tornillos pequeños para madera.	\$0,03	\$0,75
25	Resortes cilíndricos de compresión.	\$0,70	\$17,50
1	Masilla epóxica Rally.	\$2,40	\$2,40
2	Paquete de barras de silicona.	\$2,90	\$5,80
1	Paquete de tablas de madera. Balsa.	\$4,30	\$4,30
	Alquiler de taladro y esmeril		\$20,00
1	Libra de maíz tostado.	\$1	\$1,00
	Brocas de 3, 8 y 10mm.	-	\$4,30
	Transporte.		\$30,00
	SUBTOTAL		\$412,17

Se excluye en la tabla 4 el valor de la mano de obra para el diseño y construcción del proyecto, estimándose un trabajo total de 200 horas, con un costo promedio de \$6 dólares por hora; lo cual sumado al subtotal resulta \$1612,17.

Sumando los costos totales, tanto en el proceso de experimentación, como de construcción, se estima un valor final de \$1781,27.

Tabla 5. Resumen de valores totales.

	Valor real invertido	Valor referencial que incluye gastos necesarios pero no realizados en este caso.
Valor etapa de experimentos.	\$99,10	\$169,10
Valor etapa de construcción.	\$412,17	\$1612,17
TOTAL	\$411,27	\$1781,27

CAPITULO V

5. Proyecciones

Por un lado, debido a la facilidad para intercambiar los tubos sonoros, se podrían construirlos de diferentes variedades de bambú, incluso de otros materiales como el PVC por ejemplo. Es un instrumento que no se encuentra limitado en ese aspecto, más bien cualquier tubo sonoro de embocadura puede ser acoplado. Además dichos tubos construidos pueden ser afinados en cualquier frecuencia, dejando de lado la limitante de interpretar música occidental afinada en “LA” de 440Hz.

Se podría además acoplar un generador de aire (compresor silencioso o un fuelle), de manera que el ejecutante pueda interpretar el instrumento por largos periodos de tiempo, independientemente del esfuerzo requerido al soplar.

Por otro lado, queda abierta la posibilidad de construir un instrumento de este tipo con un mayor número de tubos, además no tiene que ser necesariamente cromático el diseño, sino que se puede experimentar con tendencias musicales del mundo, disponiendo teclas que ejecuten tubos afinados en cuartas de tono o intervalos mayores al semitono por ejemplo.

En base al diseño digital realizado, la mayoría de componentes del instrumento podrían ser impresos a través de una impresora 3D, facilitando en gran medida el trabajo mencionado para la elaboración de cada pieza del prototipo.

En cuanto al área de la producción musical como tal, este prototipo vería su máximo potencial de utilización. La elaboración de un material discográfico que incluya este instrumento, o una ejecución para un espectáculo en vivo son solo las pautas de inicio para la explotación de este instrumento musical en el medio al que pertenece.

CAPITULO VI

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Luego de un largo proceso experimental, se puede concluir que es posible construir un instrumento musical funcional en base a las características planteadas al inicio del proyecto, cuyos componentes no involucran un alto costo y que además son de fácil acceso. El prototipo construido avala el diseño de dicho aerófono polifónico basado en la excitación de tubos de bambú, los cuales son ejecutados a través de un teclado cromático y alimentados a través del soplo del ejecutante.

Un adecuado diseño en cuanto al sistema mecánico, además de un eficiente sistema de distribución de aire, posibilitan que el soplo de una persona promedio logre excitar simultáneamente hasta cuatro tubos, evitando de esta manera depender de fuentes de alimentación de aire externas; además que permite la modulación del sonido producido a través de la gesticulación con la boca.

Se concluye además que el sistema mecánico diseñado y construido responde instantáneamente al presionar una o varias teclas al unísono, permitiendo una respuesta instantánea de cualquier impulso de aire producido, la cual se traduce finalmente en sonido.

Luego de analizar el diseño del prototipo, se puede apreciar que se logró un instrumento compacto, funcional y estéticamente agradable, similar a un órgano de tubos convencional, con la particularidad de su pequeño tamaño y la simplicidad de su diseño debido a que no se requiere mantener el aire a presión constante, porque esta función depende exclusivamente del ejecutante.

Se puede acotar que aunque el prototipo construido tenga cierta similitud con otros instrumentos ya conocidos, éste conjuga algunos de sus elementos en un instrumento único, cuya interpretación difiere de cualquier otro aerófono,

debido a la mencionada posibilidad de modular varios sonidos al unísono con la boca y de variar la altura tonal de cada tubo presionando parcial o totalmente sus orificios.

Es necesario concluir que el instrumento tiene problemas y limitantes, entre las que se pueden citar la duración de la interpretación del instrumento, la cual está ligada al esfuerzo físico debido al soplo por parte del ejecutante, además del control necesario que debe tener en la presión de aire entregado de tal manera que el sonido producido no desafine. La variación de presión de aire implica una variación de la frecuencia emitida, siendo esta en el primer modo de vibración, aproximadamente ± 90 centésimas de semitono. En caso de excederse en la presión que origina un desplazamiento de 90 centésimas de semitono, el tubo será excitado en su segundo modo de vibración. Por otro lado, la posición irregular de las teclas no permite un desenvolvimiento normal como se esperaría en otro instrumento de teclado, reduciendo así, técnicas de interpretación como el *glissando* por ejemplo.

Se puede añadir además a los problemas citados en el párrafo anterior, el ruido que presenta el prototipo producto de la presión del aire circundante a través de las mangueras, aunque el sonido producido por el tubo sonoro enmascare en gran medida este problema.

Debido a que utiliza componentes comunes y de fácil obtención, su costo es bajo si se lo construye uno mismo, es decir que se concluye que el prototipo diseñado está al alcance de muchas personas interesadas en la construcción de instrumentos. No obstante involucra un esfuerzo considerable debido al gran número de componentes del prototipo, tomando como referencia por ejemplo que elaborar un tubo sonoro afinado a una frecuencia determinada, puede tardar al menos seis horas.

En relación a las experiencias previas al diseño del prototipo final, se pudo dimensionar la gran dificultad de construir válvulas caseras eficientes, y por otro lado el alto costo que representa adquirir válvulas industriales; por lo que se puede concluir que el sistema neumático usado en el diseño empleado es

una excelente opción en la relación costo/beneficio al emprender en un proyecto de este tipo.

Por otro lado, se concluye que no se puede implementar un sistema de percusión directa sobre cada tubo, debido a su imposibilidad de emitir a través de este método, sonidos de altura definida y espectro armónico.

6.2. Recomendaciones

Es necesario tener un conocimiento completo al manipular y modificar físicamente la forma de un material natural como por ejemplo el bambú. Familiarizarse y experimentar con el material a trabajar es de gran ayuda para evitar daños como rompimiento o pudrición. Estos elementos naturales deben ser usados con mucho respeto y conocimiento.

Al trabajar una serie de tubos sonoros de embocadura de distinta altura tonal, se recomienda conservar el mayor largo posible hasta que experimentalmente en una etapa final, se consiga el largo exacto correspondiente a una frecuencia determinada. Debido al comportamiento algo impredecible de dichos tubos, no existe una fórmula exacta que prediga dicha dimensión.

Continuando con los tubos sonoros, al diseñar una embocadura se recomienda usar la proporción aurea en función del diámetro interno del tubo. Dichas dimensiones funcionaron perfectamente para cualquier dimensión de los tubos sonoros construidos.

Sellar totalmente los tubos es indispensable para su correcto funcionamiento. Una mínima fuga puede ocasionar que afecte en gran medida el resultado que se pretende obtener. En este caso es muy recomendable usar silicona caliente en la etapa de experimentación, y un pegamento líquido junto con un material pulverizado para su sellado definitivo.

Darle un tratamiento con Maderol (insecticida y fungicida) permite evitar cualquier riesgo de termitas, polilla y moho en un futuro, permitiendo que los entrenudos se conserven por mucho más tiempo. En cuanto a este proceso, es necesario sumergir los tubos por 5 minutos en este producto, posteriormente

dejarlos secar en la sombra por 24 horas. Finalmente un acabado con laca o aceite de linaza, permite impermeabilizar los tubos, asegurando así un prolongado tiempo de vida para el instrumento.

En general, es necesario construir cada pieza con el mayor nivel de precisión posible, apegándose tanto como se pueda al diseño original planteado. Cualquier variación por mínima que parezca, puede traducirse en un problema al final.

Por otro lado, antes de aceptar o rechazar los resultados obtenidos en un experimento, es necesario asegurarse con la mayor cantidad de pruebas posibles hasta que dicha teoría experimentalmente aceptada, sea irrefutable para el tamaño del experimento.

En cuanto a precauciones, se debe tener un especial cuidado cuando se utilice sustancias tóxicas. Es necesario leer las instrucciones y usar el equipo de protección adecuado antes de emplear estos químicos que usualmente son muy fuertes y pueden ocasionar problemas en la vías respiratorias, o en la piel (que es lo mas común) al entrar en contacto con estos.

Finalmente, utilizar las herramientas adecuadas en el proceso de construcción (corte, moldeado, acople) permite ahorrar mucho tiempo. Aunque la inversión sea mayor, los resultados son mucho mejores en comparación.

Referencias

- Asociación musical “fuera de tono”. (2009). *Arundo Donax* (1a. ed.). Aragón, España: Centro de estudio del bajo Martín.
- Bamboo Organ Museum. (2011). *The bamboo Organ*. Recuperado el 16 de Noviembre del 2012 de <http://bambooorgan.org/museum.html>
- Bambooki. (2011). *The history of bamboo*. Recuperado el 12 de Mayo del 2013 de <http://www.bambooki.com/blog/the-history-of-bamboo/>
- Blog clásico. *Instrumentos Andinos en la Música Clásica*. Recuperado el 16 de Febrero del 2013 de <http://blogclasico.blogspot.com/2010/03/instrumentos-andinos-en-la-musica.html>
- Constellations Development Corporation. (2010). *The story of ancient Hydraulis*. Recuperado el 16 de Septiembre del 2013 de http://www.constellationsdevelopment.com/index.php?option=com_content&view=article&id=172:the-story-of-the-ancient-hydraulis&catid=44:how-it-works&Itemid=116
- Cortés, G. *El bambú en México*. Recuperado el 12 de Mayo del 2013 de <http://www.bambumex.org/>
- Doktorski, H. *Taxonomy of musical instruments*. Recuperado el 08 de Marzo del 2013 de <http://www.ksanti.net/free-reed/description/taxonomy.html>
- Ecocyber. (2012). *Bamboos*. Recuperado el 12 de Diciembre del 2012 de <http://www.earthcare.com.au/bamboo.htm>
- E-DUCATIVA CATEDU. *Sistemas Hidráulicos*. Recuperado el 03 de Marzo del 2013 de http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4918/html/6_simbologa.html
- Galerie Sonore d'Angers. (2013). *Aérophone + Cordophone + Idiophone + Membranophone*. Recuperado el 20 de Septiembre del 2013 de <http://www.galeriesonore.fr/taxonomy/term/3%202%204%201>

- García, M. (2011). *La orquesta sinfónica*. Recuperado el 20 de Septiembre del 2013 de http://friomusical.blogspot.com/2011_03_01_archive.html
- GLOBinMED. *Bambusa tuldooides munro*. Recuperado el 21 de Mayo del 2013 de http://www.globinmed.com/index.php?option=com_content&view=article&id=79492:bambusa
- Merino, J. (2006). *Las vibraciones de la música*. (1a. ed.). Alicante, España: Editorial Club Universitario.
- Merklin, A. (1924). *Organología: Exposición científica y gráfica del órgano en todos sus elementos y recursos antiguos y modernos*. (Ed. Año 2003). Valladolid, España: Editorial Maxtor.
- Miyara, F. (2006). *Acústica y Sistemas de Sonido* (4a. ed.). Rosario, Argentina: Universidad Nacional de Rosario Editorial.
- Payno, L. *Construcción de Instrumentos Tradicionales*. Recuperado el 22 de Noviembre del 2012 de <http://www.luispayno.es/arti/lenguetas.htm>
- Proyecto bambú. (2003). *El bambú en Ecuador*. Recuperado el 16 de Septiembre del 2013 de http://www.probambu.com.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=34:el-bambu-en-el-ecuador&catid=2:antecedentes-historicos&Itemid=4
- REEA. (2001). *Accionamientos neumáticos*. Recuperado el 03 de Marzo del 2013 de <http://olmo.pntic.mec.es/jmarti50/neumatica/accionamientos.html>
- Rossing, T. y Neville, F. (2004). *Principles of Vibration and Sound*. (2a. ed.). Nueva York, Estados Unidos: Springer-Verlag.
- Sachs, C. *La música en el mundo antiguo*. Recuperado el 08 de Mayo de 2013 de http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7c/LA_MÚSICA_EN_EL_MUNDO_ANTIGUO._Oriente_y Occidente._Curt_Sachs..pdf

- Sanpedro A. (2012). *Un mundo de bambú*. Recuperado el 12 de Noviembre del 2012 de <http://www.unmundodebambu.com.ar/bambu.htm>
- Sapiensman. *Neumática e Hidráulica*. Recuperado el 03 de Marzo del 2013 de <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica6.htm>
- Tierno, M. *Simulación neumática en las asignaturas de Tecnología Industrial*. Recuperado el 8 de Marzo del 2013 de <http://www.sociedadelainformacion.com/20011204/neumatica/neumatica.htm>
- Wolfe, J. (2005). *Open vs Closed pipes (Flutes vs Clarinets)*. Recuperado el 12 de Octubre del 2013 de <http://www.phys.unsw.edu.au/jw/flutes.v.clarinets.html>
- Zagalaz, B. (2012). *Física de los tubos sonoros*. Recuperado el 27 de Noviembre del 2012 de <http://www.csmcordoba.com/revistamusicalia/musicalia-numero-3/198-fisica-de-los-tubos-sonoros>
- Zaragoza, R. (2007). *Bartolomé Ramos de Pareja*. Recuperado el 16 de Marzo del 2013 de <http://www.rafazaragoza.com/musica/bartolome-ramos-de-pareja/>

Anexos

Anexo 1. Glosario

Altura tonal: Percepción psicoacústica de la frecuencia.

Carrizo: “Arundo Donax” es su nombre científico. Es una gramínea semejante al bambú, cuya diferencia es que de cada nudo florece únicamente una hoja, la misma que envaina al tallo.

dB: Abreviatura correspondiente a decibel, el cual es una medida de nivel de presión sonora obtenida de la expresión logarítmica de una magnitud medida en función de una magnitud de referencia.

Glissando: Efecto sonoro que consiste en un desplazamiento rápido entre dos notas (una grave y una aguda) pasando por las notas intermedias.

Guadua angustifolia: Especie vegetal nativa del noreste de Sudamérica, considerada como una de la especies de bambú más idóneas para la construcción.

Hidraulos: Instrumento musical aerófono nacido en Grecia, cuyo principio de funcionamiento hidrostático permitía la estabilidad en la presión de aire que ingresaba a los tubos sonoros.

Microtono: Intervalo musical inferior a una doceava parte de una octava.

Modulación: Cambio de tonalidad.

N-track tuner: Aplicación de afinación automática y analizador de espectro para dispositivos móviles, disponible en <http://ntrack.com/ios-tuner.php>.

Onda estacionaria: Movimiento ondulatorio reflejante, cuyos nodos permanecen en el mismo punto a lo largo de la perturbación.

Proporción aurea: Relación geométrica expresada numéricamente por el valor 1.61803.

Pull: Palabra inglesa que significa halar o tirar.

Sobretono: Componente frecuencial superior a la frecuencia fundamental.

Tono: Se refiere a un intervalo en cuanto a frecuencia, dado por el sistema musical empleado.

Transposición: Subir o bajar la altura tonal de las notas de una melodía.

Anexo 2. Gráficas de espectro de los 25 tubos sonoros.

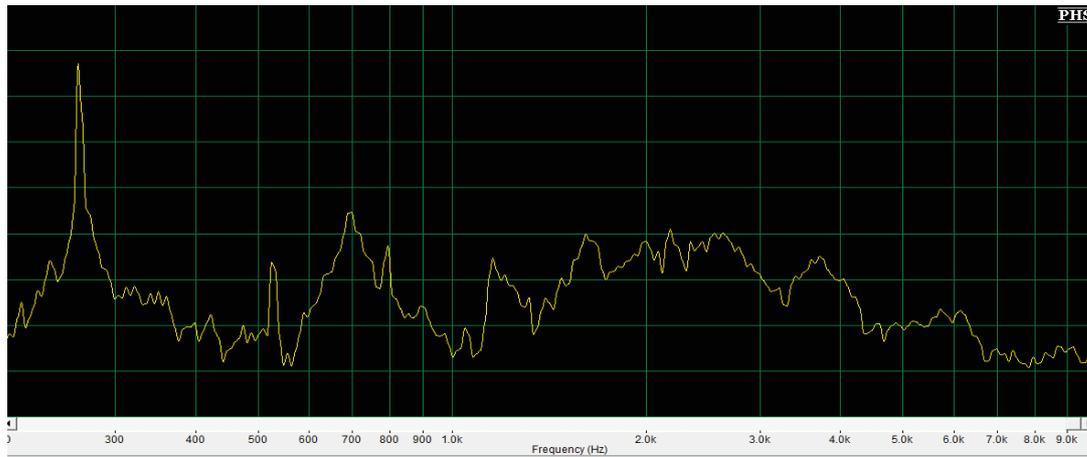


Figura 54. Do 4 (cuarta octava)

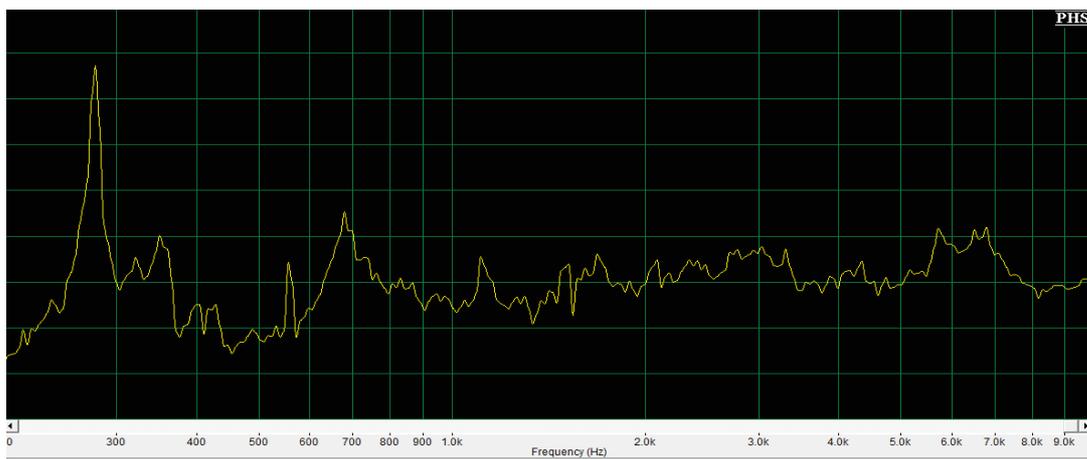


Figura 55. Do sostenido 4 (cuarta octava)

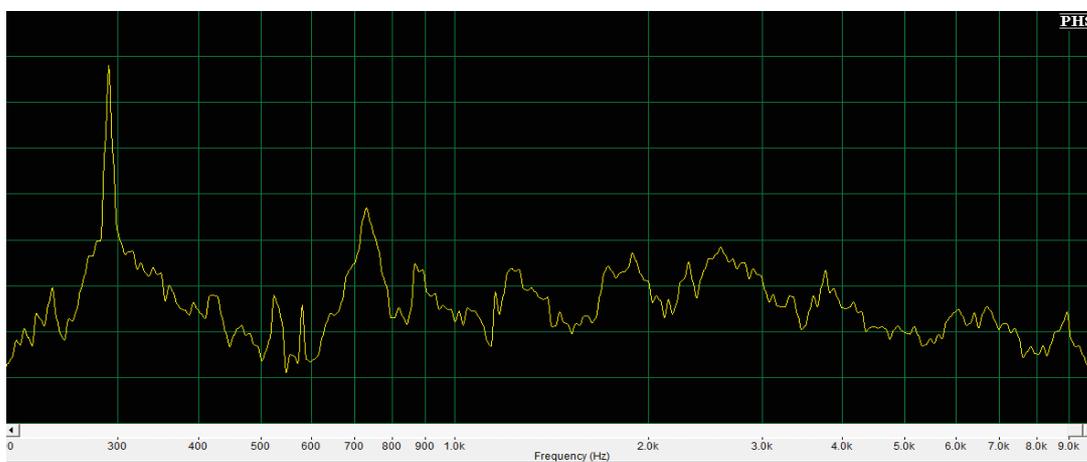


Figura 56. Re 4 (cuarta octava)

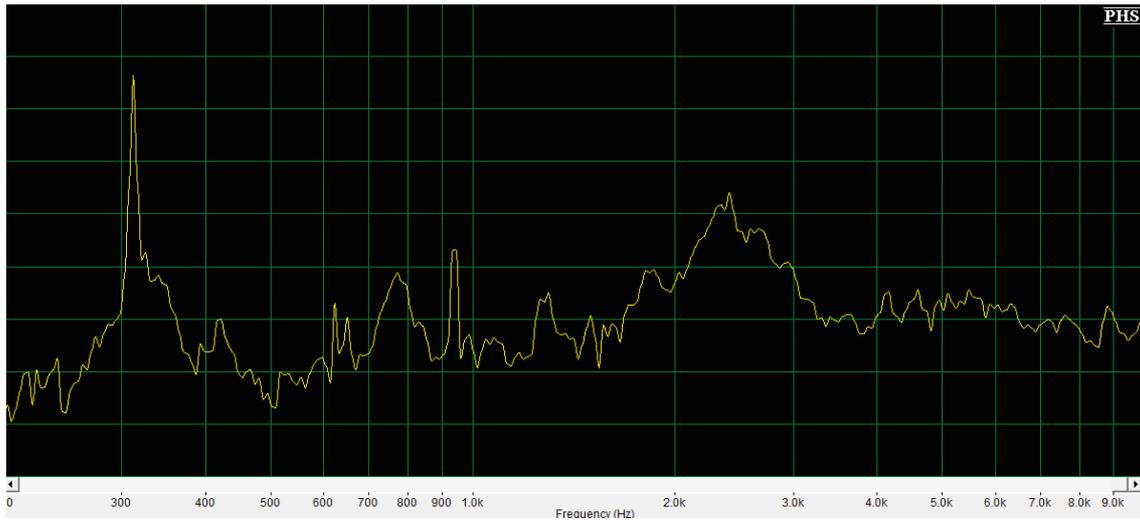


Figura 57. Re sostenido 4 (cuarta octava)

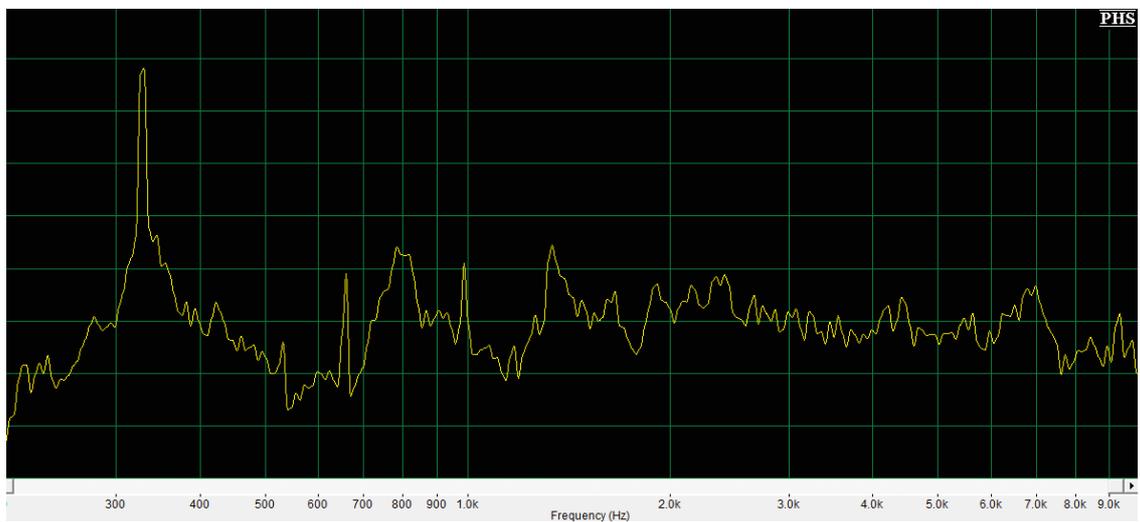


Figura 58. Mi 4 (cuarta octava)

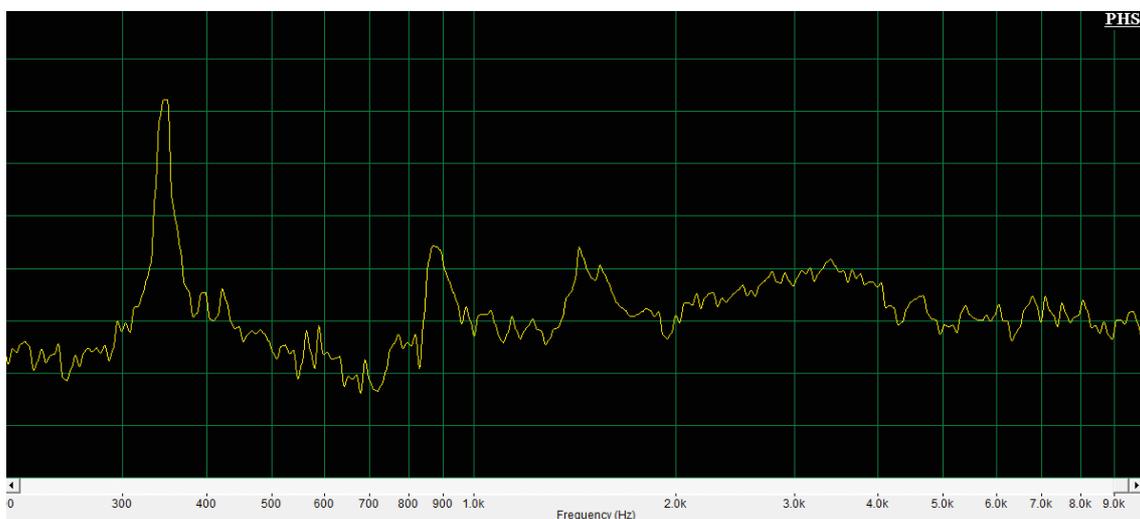


Figura 59. Fa 4 (cuarta octava)

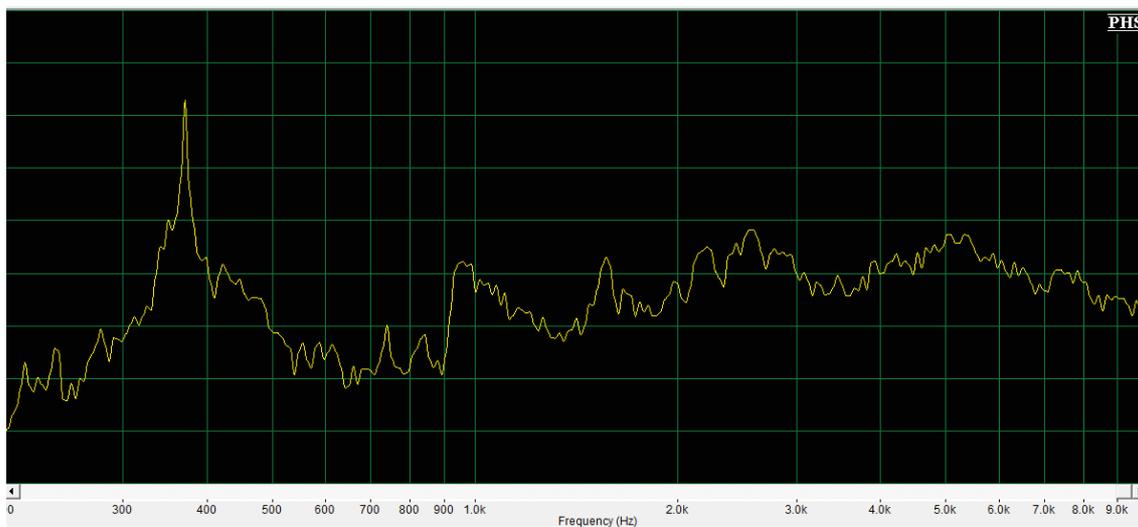


Figura 60. Fa sostenido 4 (cuarta octava)

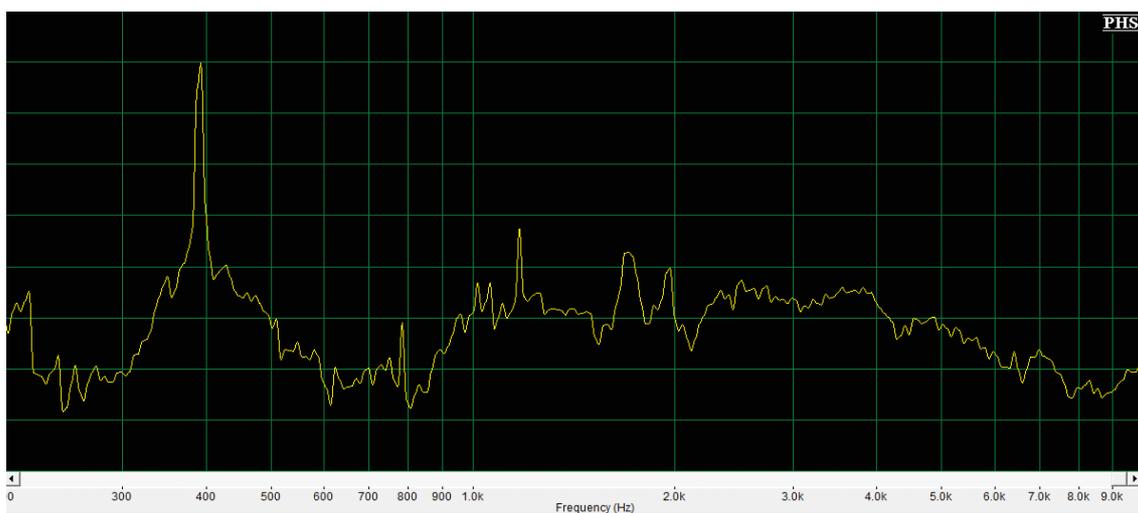


Figura 61. Sol 4 (cuarta octava)

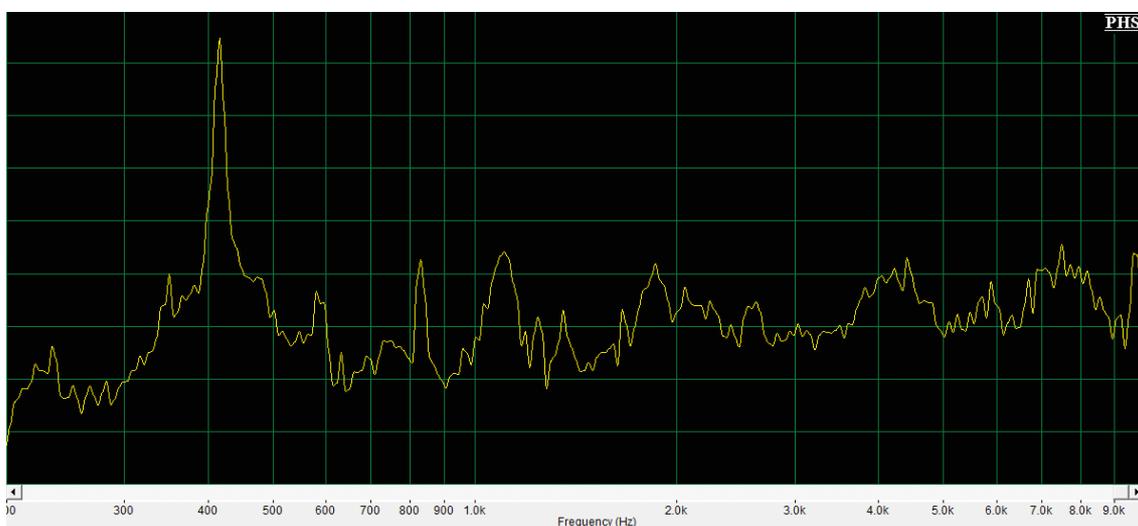


Figura 62. Sol sostenido 4 (cuarta octava)

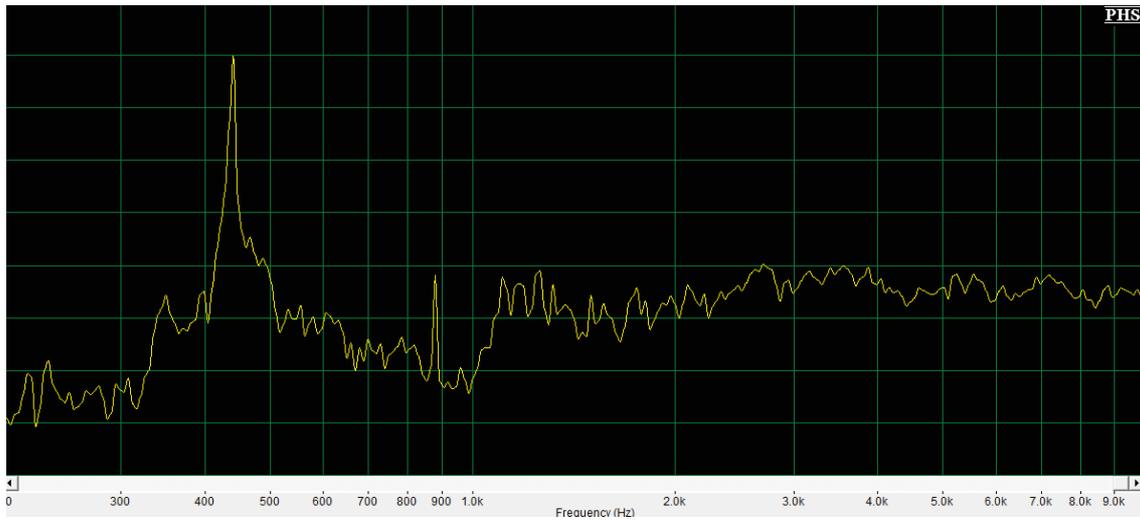


Figura 63. La 4 (cuarta octava)

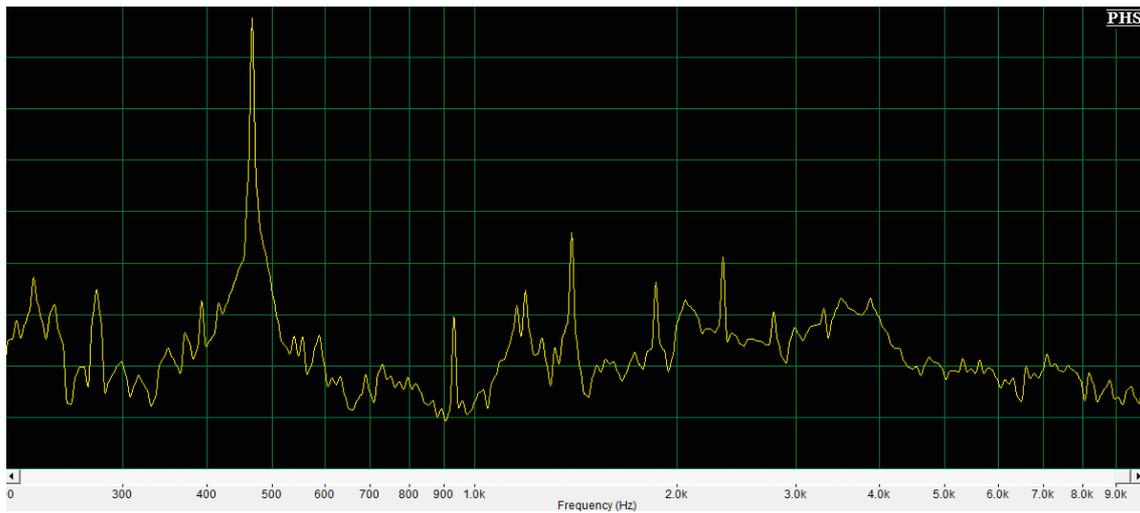


Figura 64. La sostenido 4 (cuarta octava)

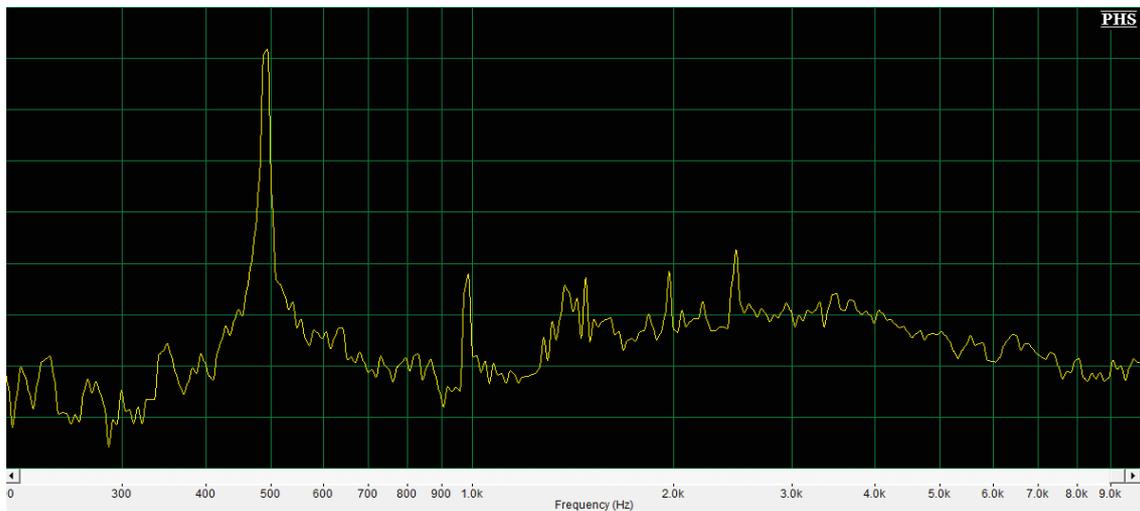


Figura 65. Si 4 (cuarta octava)

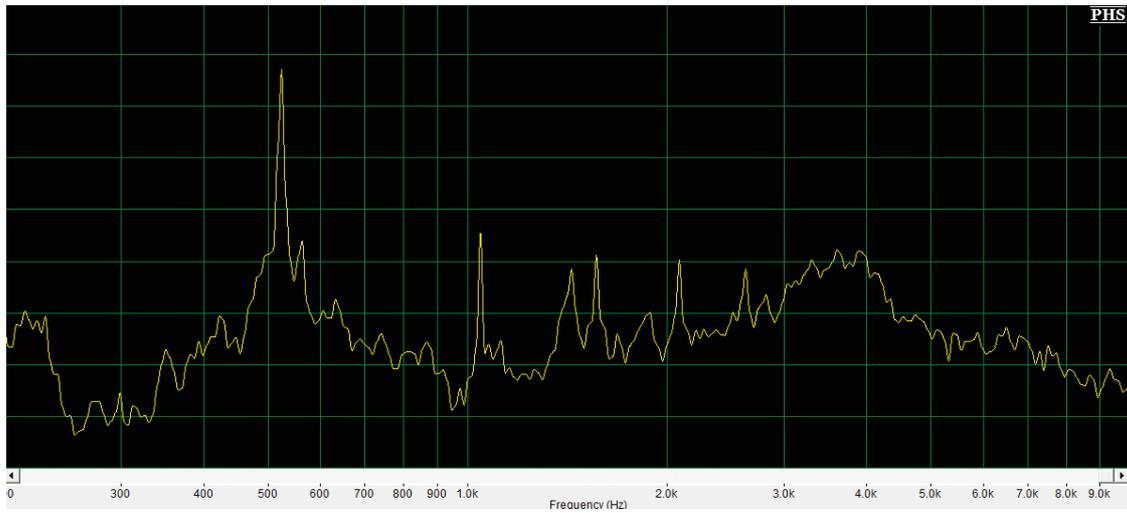


Figura 66. Do 5 (quinta octava)

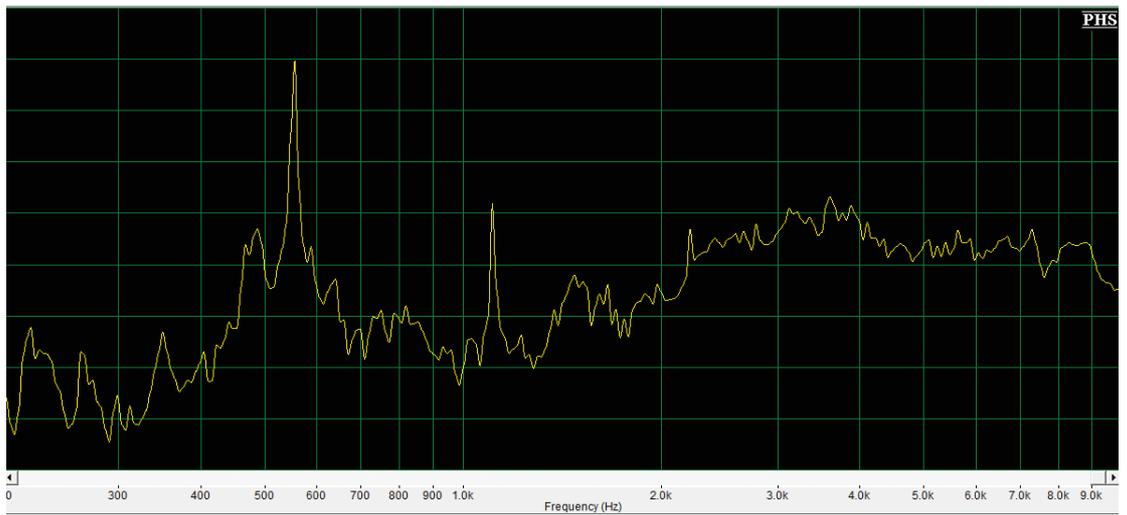


Figura 67. Do sostenido 5 (quinta octava)

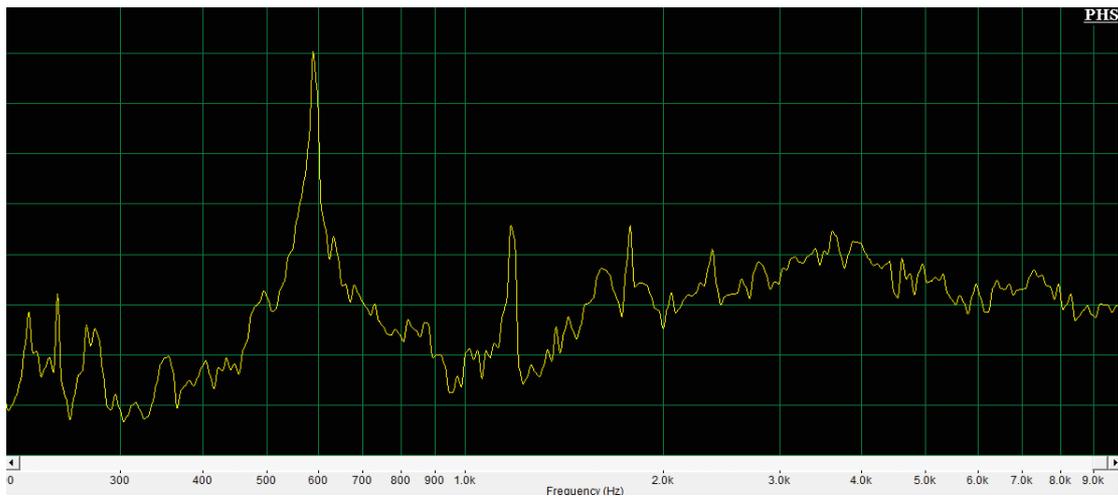


Figura 68. Re 5 (quinta octava)

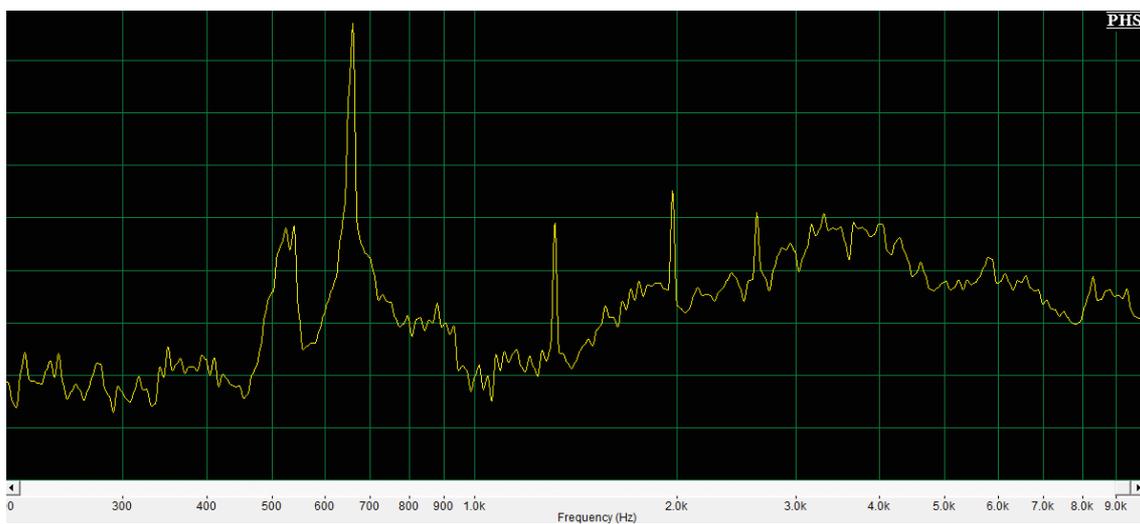


Figura 69. Mi 5 (quinta octava)

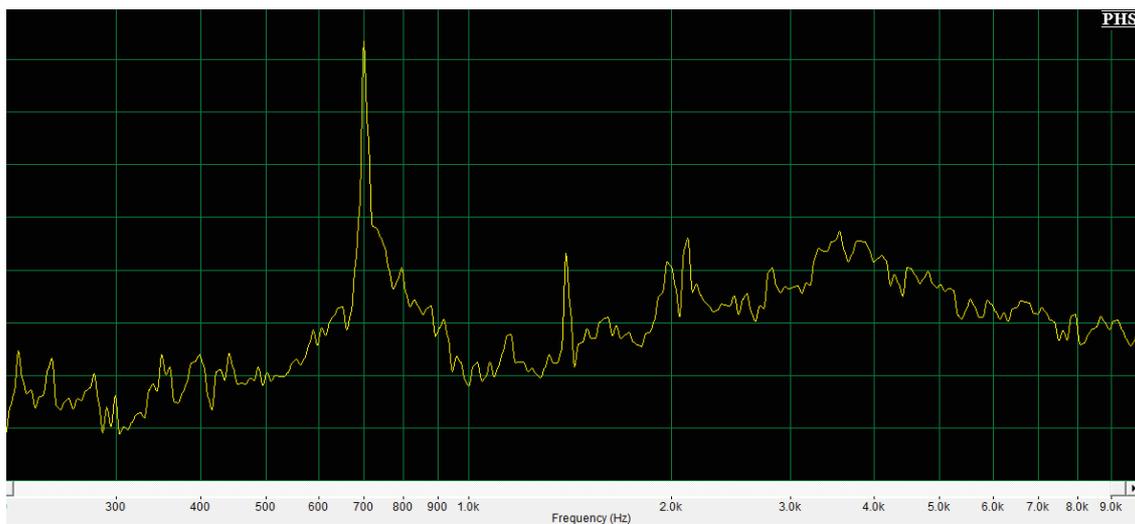


Figura 70. Fa 5(quinta octava)

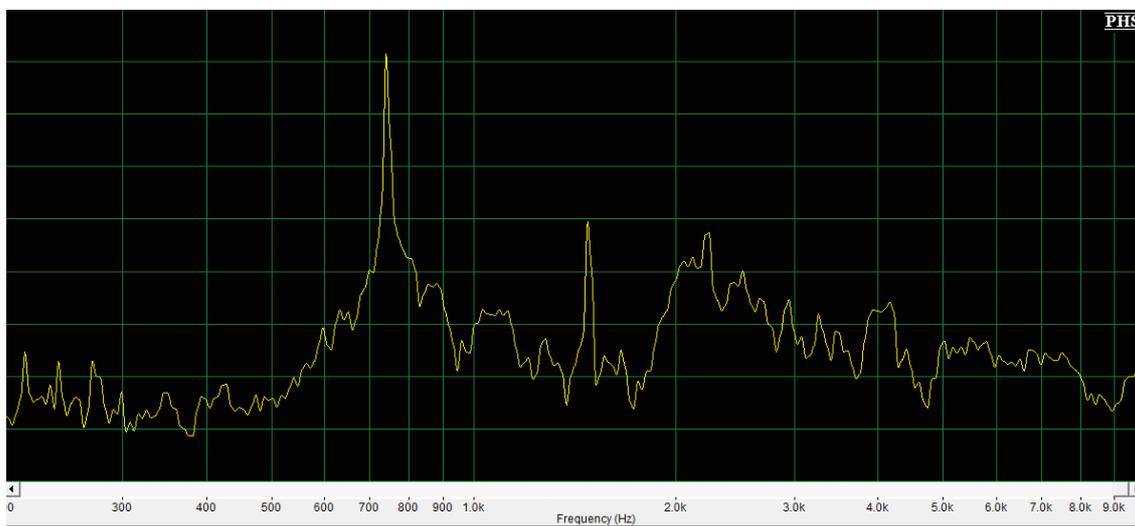


Figura 71. Fa sostenido 5 (quinta octava)

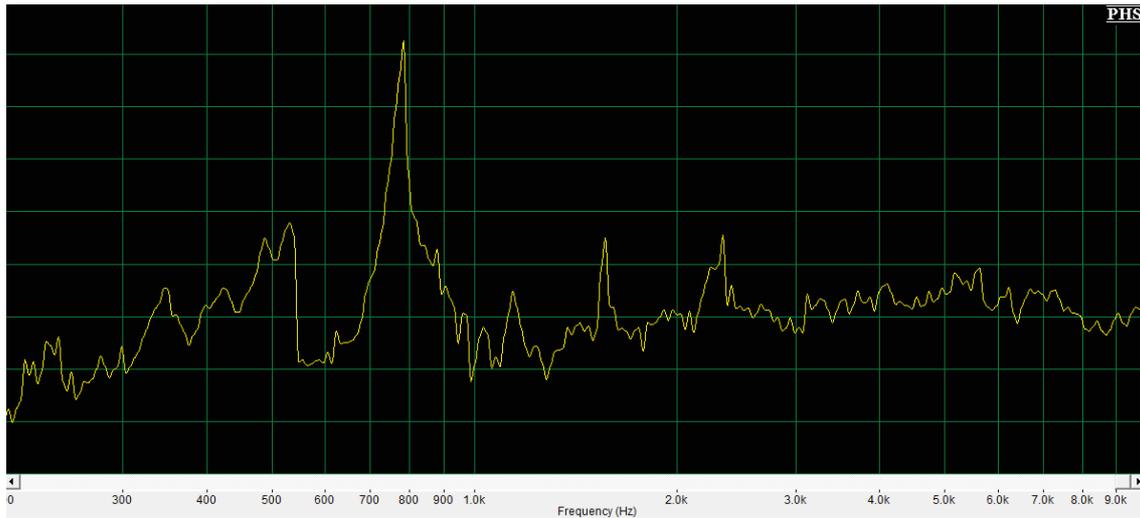


Figura 72. Sol 5 (quinta octava)

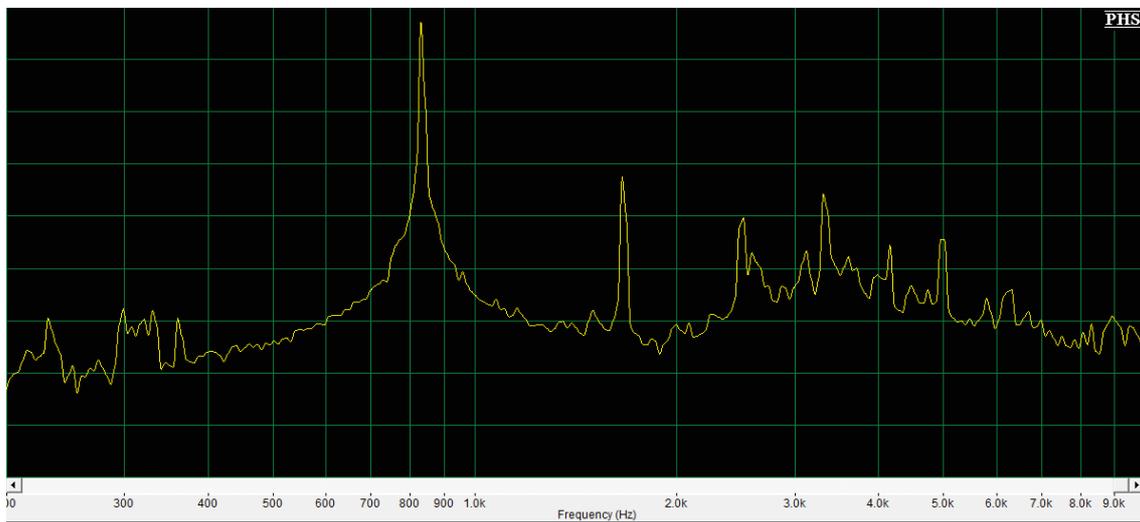


Figura 73. Sol sostenido 5 (quinta octava)

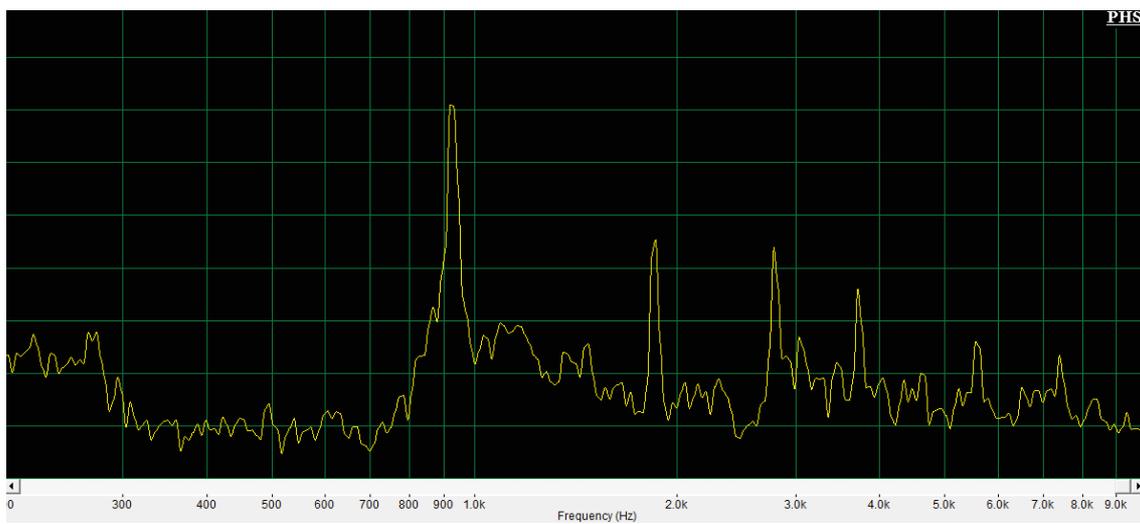


Figura 74. La sostenido 5 (quinta octava)

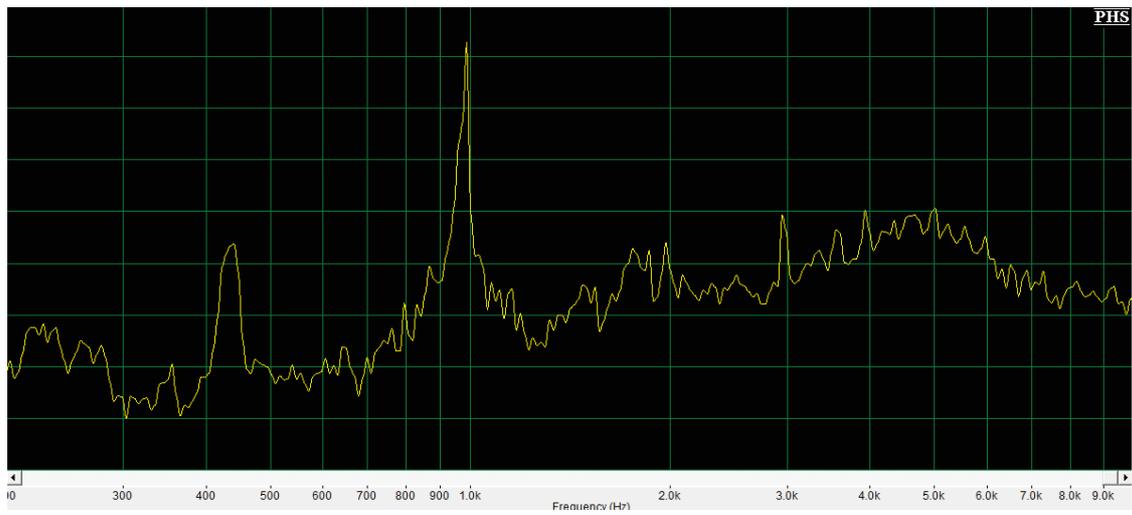


Figura 75. Si 5 (quinta octava)

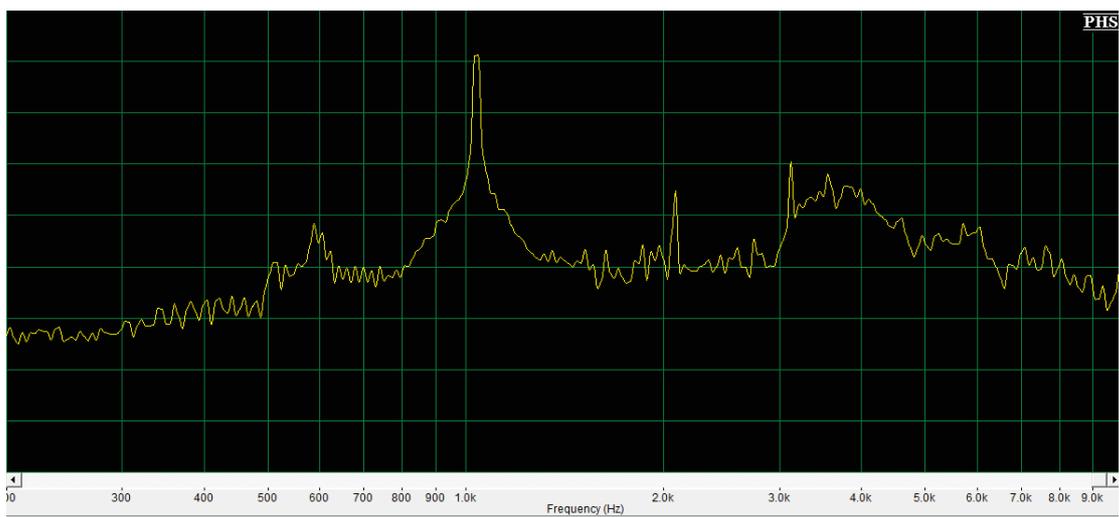


Figura 76. Do 6 (sexta octava)