



FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DISEÑO DE UNA CAJA DE MÚSICA Y CONSTRUCCIÓN DE UN
PROTOTIPO

Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos establecidos
para optar por el título de
Ingeniero en Sonido y Acústica

Profesor Guía
Ing. Felipe Mardones

Autora
María Emilia Bahamonde Noriega

Año
2011

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el/la 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.”

.....

Felipe Mardones

Ingeniero Acústico

172068234-1

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”

.....

María Emilia Bahamonde Noriega

172188046-4

DEDICATORIA

A mis padres y a mis hermanos...

RESUMEN

La caja musical, que todavía arrulla a muchos niños en todo el mundo, continúa siendo de gran valor para los coleccionistas de antigüedades. En Europa las cajas musicales constituyen una verdadera industria, que a pesar del desarrollo de la tecnología, no ha desaparecido del todo. En el Ecuador no existe dicha industria, únicamente se realizan importaciones con las mismas, por ende es llamativa la idea de la fabricación de cajas musicales con temas propios del país.

Se plantea el hecho de estudiar el funcionamiento mecánico y acústico de una caja musical para poder desarrollar un diseño sencillo y construir un prototipo, que potencialmente admita cambiar de cilindros y tener a disposición distintas melodías ecuatorianas.

En el estudio se requirieron textos de diseño de elementos de máquinas mecánicas y textos de acústica. Posteriormente, para tener una base de datos de los temas más populares pertenecientes al folclore ecuatoriano fue necesario realizar una encuesta. Y finalmente para el diseño de la caja musical y de los planos del prototipo se usaron los siguientes softwares: Propellerhead Reason 4.0, Finale Songwriter 2007, Autocad.

El prototipo es el resultado de una serie de estudios extensos, no sólo de la teoría de acústica de vibraciones, sino también de un campo poco conocido para el alumno de Ingeniería en Sonido y Acústica, como lo es el diseño de elementos de máquinas mecánicas. Varios factores externos, tal como la falta de tecnología en el Ecuador, influenciaron principalmente para que el modelo no funcionase como una caja de música normal.

ABSTRACT

The music box still lulls many children around the world and continues being of great value to antique collectors. In Europe music boxes, despite the development of technology has not disappeared. In Ecuador there is no such industry; just imports, so it is appealing the idea of manufacturing musical boxes with Ecuadorian songs themes.

It is necessary for designing a musical box, to know many acoustic and mechanical processes in order to develop a simple design and build a prototype, which potentially supports changing cylinders and make available various melodies.

The design's study required texts of mechanical machine elements and acoustic texts. Subsequently, to have a database of the most popular folklore Ecuadorian songs, it was required a survey. And finally for the musical box design and prototype's drawings, it was used the following softwares: Propellerhead Reason 4.0, Finale Songwriter 2007, Autocad.

The prototype is the result of a series of extensive studies, not only of the theory of acoustic vibrations, but also a little known field for students of Engineering Acoustics and Sound, such as the element's design of mechanical machines. Several external factors such as lack of technology in Ecuador, influenced so that the model does not work like a normal jukebox.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES HISTÓRICOS	1
1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	OBJETIVO	5
1.2.1	Objetivo General:.....	5
1.2.2	Objetivos Específicos:	5
1.3	JUSTIFICACIÓN	6
1.4	ALCANCE	6
2	MARCO TEÓRICO.....	7
2.1	FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA.....	7
2.1.1	Principios Básicos.....	7
2.1.1	Tipos de Osciladores	9
2.1.2	Vibración en barras.....	13
2.1.3	Vibraciones de membranas y placas.....	29
2.2	BOCINAS	29
2.2.1	Parámetros	30
2.2.2	Materiales para su construcción	30
2.2.3	Tipos de bocinas.....	31
3	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	33
3.1	BREVE HISTORIA DE LA EVOLUCIÓN DE LAS CAJAS MUSICALES	33
3.1.1	Caja	33
3.1.2	Bancada	34
3.1.3	Peine	35
3.1.4	Accesorios	37

3.1.5	Controles	39
3.1.6	Los resortes.....	40
3.1.7	La cuerda.....	41
3.1.8	Regulador	41
3.1.9	El cilindro	42
3.1.10	Cilindros cambiables.....	43
3.1.11	Cambio de melodía.....	45
3.1.12	Hojas de melodías	45
3.2	APOLOGÍA DEL DISEÑO ELEGIDO.....	46
3.3	PARTES DEL PROTOTIPO	47
3.3.1	Selección de la melodía.....	47
3.3.2	Cilindro	49
3.3.3	Peineta	51
3.3.4	Manivela	58
3.3.5	Bancada	59
3.3.6	Caja	60
3.4	COSTOS.....	65
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	66
4.1	MEDICIÓN DE RESULTADOS	66
4.2	CONCLUSIONES.....	73
4.3	RECOMENDACIONES	78
5	BIBLIOGRAFÍA	80
6	ANEXOS	85

1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES HISTÓRICOS

1.1 ANTECEDENTES

Una caja musical es un instrumento musical mecánico, creado en el siglo XIX. Estas cajas funcionan por medio de unos remaches ubicados en un cilindro giratorio o disco, que al ser tocados por un cepillo de metal, producen el sonido. Las cajas de música podían ser de cualquier tamaño, desde unas tan pequeñas que cabían en el bolsillo, hasta unas que podían ocupar un espacio considerable en el hogar.

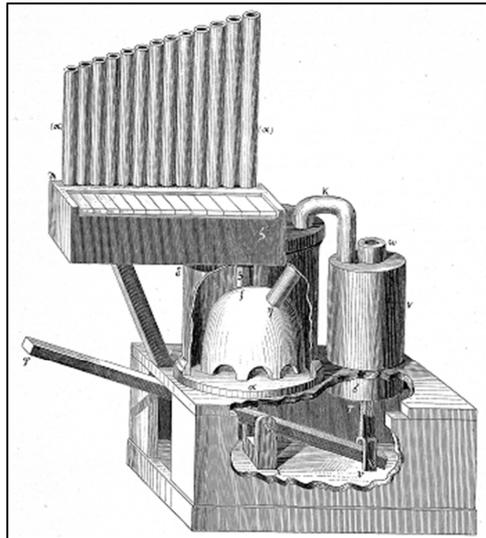
Foto 1.1: Symphonion 8, caja musical de disco, Alemania.



Fuente: Internet,
<http://www.minidisc.org/music_box.html>, 2011.

Los autómatas musicales existieron desde tiempos muy lejanos. Para las culturas antiguas era casi una obligación el hecho de que los nuevos instrumentos musicales pudieran ser ejecutados y además funcionar de forma automática, ya sea ayudados por agua o ayudados por viento. Por ejemplo en el siglo IX DC un trío de hermanos inventores persas aportaron con el desarrollo del hydraulis predecesor del órgano neumático, este consistía en un sistema hidráulico a través del cual se mantenía constante la presión del aire.

Foto 1.2: Hydraulis u órgano de agua.



**Fuente: Baumeister, August, DENKMÄLER
DES KLASSISCHEN ALTERTUMS, p. 565,
1885.**

En el siglo XIV un campanero inventó un sistema de un cilindro con pernos que operaba unas campanas. Nicolás Vallin en el siglo XVI programó las campanas de un reloj de pared mediante un barril y un sistema de pines que podían ser cambiados de posición a gusto. Luego se utilizó el mismo principio para un reloj de mesa. Durante el siglo XVIII pasaron varios eventos: en Londres James Cox utilizó un tambor que tocaba varias melodías populares en pequeñas campanas dispuestas en una pila. En 1780 los hermanos Jaquet-Droz inventaron un pájaro cantor mecánico, lo que se mejoró por Bontems Blaise.

Foto 1.3: Caja musical Polyphon.



**Fuente: Internet,
<<http://forgottenantiquities.tumblr.com/post/4964882792/polyphon-music-box-ca-1900>>, 2011.**

Oficialmente la historia de la caja musical se remonta a finales del siglo XVII cuando el relojero suizo, Antoine Favre, integró un mecanismo musical parecido a la caja musical en un reloj. Favre de Ginebra dio inicio al auge de los objetos musicales en este país. Su sistema no constaba de un peine con cuchillas en vibración, que se levantaban por pasadores, principio de la tradicional caja musical, sino que se basaba en un disco giratorio cuyos orificios implicaban placas concéntricas. Se sustituyó al disco por un cilindro erizado colocado en paralelo a series de placas individuales.

Foto 1.4: Reloj de bolsillo con movimientos musicales.



Fuente: Internet,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Musical_box>, 2011.

Posteriormente se reemplazó a las placas segmentadas por un peine con el fin de aumentar la resonancia. Además aparecieron los apagadores, que al principio utilizaban plumas de pollo, con la función de limitar las vibraciones. Gran parte de las cajas musicales durante el siglo XIX fueron hechas en Suiza, en vista de su tradición relojera, representando en un punto de la historia el 10% de las exportaciones de este país. Samuel Junod y Jérémie Recordon fueron las primeras personas encargadas de montar una fábrica de cajas musicales. Posteriormente hubo fabricantes en Alemania y en Bohemia, zona de la anterior Checoslovaquia. En Alemania se creó una caja musical con discos que permitía un cambio más fácil de las canciones. Es la época de oro de los autómatas, en Egipto se mejoró la técnica hasta convertir estos objetos en obras de arte. En Estados Unidos se abrieron fábricas de cajas musicales a

finales de siglo, la más conocida era la compañía Regina Music Box en Nueva Jersey, cuyas cajas musicales eran famosas por su tono.

Foto 1.5: Symphonion, caja musical operada con monedas.



Fuente: Internet,
<<http://www.musicboxrestorations.com/portfolio.html>>, 2011.

Las cajas musicales accionadas con monedas, que tuvieron su origen en las estaciones de tren y parques de diversiones de Suiza, fueron las precursoras de las máquinas de discos. Algunos ejemplares podían cambiar de discos automáticamente. Pero las máquinas de discos las reemplazaron pronto, en vista de su variedad de sonidos. Estas cajas sufrieron grandes maltratos físicos, ya que a veces los usuarios descontentos les propinaban patadas o bofetadas, por esta razón estas cajas musicales son muy cotizadas por los coleccionistas.

Si bien al principio la fabricación de cajas musicales era de tendencia artesanal, después se la industrializó; mejorando así los diseños, de tal manera que se abarataron los costos de su producción y se añadieron elementos como tambores y carillones, además que se redujeron los tamaños. Sin embargo con la llegada de los pianos mecánicos y los gramófonos, las cajas de música fueron desapareciendo. Hoy en día son de gran valor para coleccionistas de antigüedades.

Resulta interesante efectuar un estudio al respecto en nuestro país, ya es que es un instrumento que permanece casi olvidado. Encontrar información acerca del tema no es imposible, sólo es necesario algo de paciencia en la búsqueda, puesto que no está a simple vista. Contamos con libros de diseño en ingeniería mecánica, libros de acústica y libros que nos hablan de la historia y el funcionamiento de los autómatas musicales.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo General:

Realizar una investigación acerca del funcionamiento de una caja musical y la aplicación de dichos conocimientos en la elaboración de un prototipo.

1.2.2 Objetivos Específicos:

- Investigar acerca de la metodología para elaborar una caja musical, con la ayuda del desarme de varias cajas musicales.
- Realizar una encuesta para saber cuáles son los principales temas tradicionales ecuatorianos, que el público desearía escuchar en una caja musical.
- Diseñar un movimiento musical articulado con manivela.
- Elaborar el diseño de una caja musical con bocina, la cual contendrá al movimiento musical.
- Construir un prototipo de una caja de música con uno de los temas musicales elegidos en la encuesta.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Se espera que el desarrollo del tema sea la base para el impulso de una nueva industria en el país. Las cajas musicales con temas ecuatorianos, tales como Pasillos, San Juanitos, Yumbos y más, no sólo que son una idea innovadora, sino que además ayudan a incrementar el aprecio de quien lo compre por la cultura ecuatoriana.

1.4 ALCANCE

La caja musical es el resultado de juntar principios de la Mecánica con la Acústica. Se utilizarán principios de sistemas mecánicos para el correcto ensamble de los elementos de la caja y además se deberá hacer un estudio, para tener las mediciones de caja, las mismas que proporcionen un resultado con buenas características acústicas. La primicia de tener temas musicales ecuatorianos, hace de esta caja una propuesta distinta.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA

2.1.1 Principios Básicos

Una vibración es un movimiento periódico, que se repite con las mismas características después de un determinado intervalo de tiempo, el mismo que se denomina periodo de vibración y que se denota con el símbolo T . El movimiento armónico simple es el más sencillo movimiento periódico, donde la relación entre el desplazamiento x y el tiempo t tiene la siguiente expresión:

$$[2.1] \quad x = x_0 \sin \omega t$$

El valor máximo del desplazamiento es x_0 y se denomina amplitud de la vibración. El período T se mide en segundos, de ahí que la frecuencia de la vibración es $f = 1/T$ medida en ciclos por segundo o Hertz. El símbolo ω es conocido como frecuencia angular y se mide en radianes por segundo, recibe este nombre debido a las propiedades de la representación vectorial. Cuando ωt ha pasado a través de 360° o sea 2π radianes se da un ciclo completo de vibración, la función es sinusoidal, por ende cuando $\omega t = 2\pi$, el intervalo de tiempo t es igual al periodo T , entonces $T = \frac{2\pi}{\omega}$ seg. O es lo mismo $f = \frac{\omega}{2\pi}$ Hz.

Si la frecuencia de la vibración está dentro del rango audible (20 – 20000 Hz) el oído la percibe como un tono puro.

La velocidad se obtiene derivando el desplazamiento respecto al tiempo:

$$[2.2] \quad \frac{dx}{dt} = x_0 \omega \cos \omega t$$

Y la aceleración será la segunda derivada:

$$[2.3] \quad \frac{d^2x}{dt^2} = -x_0 \omega^2 \sin \omega t$$

Se denomina ángulo de fase o diferencia de fase entre dos vibraciones a la magnitud ϕ , la misma que solo tiene sentido si las dos vibraciones tienen la misma frecuencia.

Podemos utilizar un vector rotativo para representar el movimiento de una partícula en vibración. Sea el vector \vec{a} que gira con velocidad angular uniforme ω_0 en sentido contrario a las manecillas del reloj. Al medir el tiempo desde la posición horizontal del vector, el vector puede escribirse como $a \cos \omega_0 t$, mientras que desde la posición vertical sería $b \sin \omega_0 t$. Ambas proyecciones representan un movimiento recíproco. Esto ha dado origen al nombre de frecuencia circular o angular para ω_0 , cuya magnitud representa la velocidad angular del vector medida en radianes por segundo; y la frecuencia se medirá en revoluciones por segundo. Claramente se concluye que:

$$[2.4] \quad \omega_0 = 2\pi f$$

La solución completa sería la suma de las dos soluciones particulares, donde a y b son constantes arbitrarias determinadas por las condiciones iniciales:

$$[2.5] \quad x = a \cos \omega_0 t + b \sin \omega_0 t$$

Como seno y coseno comparten el mismo argumento se puede obtener una solución general modelada en base a única función sinusoidal.

$$[2.6] \quad x = A \cos(\omega_0 t + \phi)$$

De donde A y ϕ son constantes determinadas por las condiciones iniciales, así:

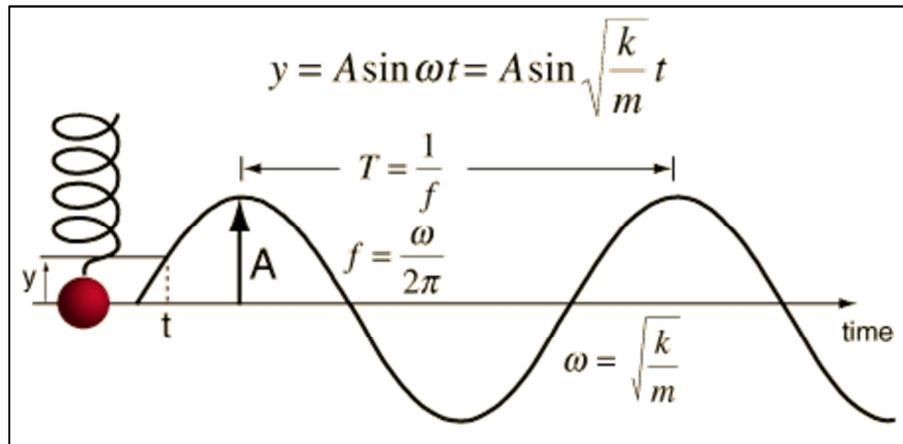
$$[2.7] \quad A = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{u_0}{\omega_0}\right)^2} \quad (\text{m})$$

$$[2.8] \quad \phi = \text{arctag}\left(-\frac{u_0}{\omega_0 x_0}\right) \quad (\text{rad})$$

2.1.2 Tipos de Osciladores

2.1.2.1 El oscilador simple

Foto 2.1: Movimiento armónico simple.



Fuente: Internet,
 <<http://katherine1107.wordpress.com/movimiento-armonico-simple-m-a-s/>>,
 2011.

El movimiento armónico simple debe cumplir con dos condiciones:

- El desplazamiento unitario que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza restauradora (Ley de Hooke).

$$[2.9] \quad f_{(REST)} = Cx(t)$$

- No debe haber roce en el sistema masa resorte para que la oscilación sea independiente de la amplitud del movimiento. Entonces:

$$[2.10] \quad f_k = -kx$$

Donde k es la constante de elasticidad del resorte y f_k la fuerza restauradora. El signo negativo representa una fuerza que se opone al movimiento de la masa.

Aplicando la segunda ley de Newton llegamos a $ma = f_k$ y reemplazando se obtiene que la ecuación de movimiento es:

$$[2.11] \quad \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$$

De donde definimos también a $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ medido en (rad/seg).

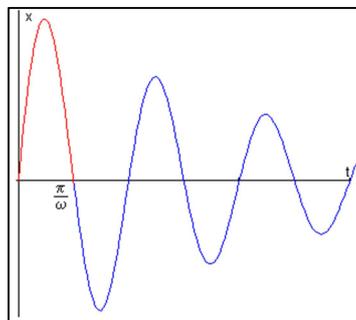
Para la representación de las vibraciones, es necesario utilizar el método de la exponencial compleja, debido a que el análisis trigonométrico hace a los resultados difíciles de visualizar. Se supone una nueva solución a la ecuación de movimiento: $x = Ae^{\gamma t}$

Reemplazando en la ecuación de movimiento:

$$[2.12] \quad x = Ae^{i\omega_0 t} + Be^{-i\omega_0 t}$$

2.1.2.2 Oscilaciones amortiguadas

Foto 2.2: Oscilación amortiguada donde π/ω es un semiperiodo.



Fuente: Internet,
<<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/oscilaciones/amortiguadas/amortiguadas.htm>>,
2011.

En la vida real, las vibraciones libres sin amortiguamiento no ocurren, por tanto se debe considerar un término de amortiguamiento viscoso al cual denotaremos f_r , esta fuerza de fricción viscosa se opone al movimiento y es proporcional a la velocidad del desplazamiento:

$$[2.13] \quad f_r = -R_m \frac{dx}{dt}$$

Donde R_m es la resistencia mecánica del sistema $[\Omega]_{\text{MEC}}$, luego el sistema amortiguado se expresa como $ma + f_r + f_k = 0$ y la nueva ecuación de movimiento sería:

$$[2.14] \quad m \frac{d^2 x}{dt^2} + \left(\frac{R_m}{m} \right) \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$$

Reemplazando $x = Ae^{\gamma t}$ en la nueva ecuación de movimiento tenemos que:

$$\gamma = -\frac{R_m}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{R_m}{2m} \right)^2 - \omega_0^2} \text{ o lo que es lo mismo:}$$

$$[2.15] \quad \gamma^2 + \frac{R_m}{m} \gamma + \omega_0^2 = 0$$

De lo que definimos a la constante $\beta = \frac{R_m}{2m}$ como coeficiente de absorción temporal. Posteriormente aparece una nueva constante $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ que representa la frecuencia angular natural del oscilador amortiguado que siempre es menor a ω_0 .

Así $\gamma = -\beta \pm i\omega_d$ es reemplazado en $x = Ae^{\gamma t}$ y entonces la solución completa es:

$$[2.16] \quad x = A_1 e^{-\beta t} e^{i\omega_d t} + A_2 e^{-\beta t} e^{-i\omega_d t}$$

Al igual que el oscilador simple la solución se puede expresar en términos de una sola función sinusoidal:

$$[2.17] \quad x = Ae^{-\beta t} e^{i(\omega_d t + \phi)}$$

De nuevo A y ϕ están determinadas por las condiciones iniciales.

El tiempo de relajación se define como: $\tau = \frac{1}{\beta} = \frac{2m}{R_m}$ (s) que es el tiempo requerido para que la amplitud del movimiento decaiga a $\frac{1}{e}$ de la amplitud inicial.

2.1.2.3 Oscilaciones forzadas

Al ser un oscilador excitado por una fuerza externa, está debe ser de tipo sinusoidal:

$$[2.18] \quad f(t) = F \cos(\omega t) = Fe^{i\omega t} ; f(t) = F \sin(\omega t) = iFe^{i\omega t}$$

Donde ω es la frecuencia angular del motor que aplica la $f(t)$ [rad/s] y en general:

$$[2.19] \quad \omega \neq \omega_d \neq \omega_0$$

Aplicando la segunda ley de Newton, para una fuerza ondulatoria de $f(t) = F \cos(\omega t)$ la ecuación de movimiento sería:

$$[2.20] \quad \frac{m d^2 x}{dt^2} + R_m \frac{dx}{dt} + kx = f(t) = Fe^{i\omega t}$$

Cuya solución completa es la suma de un término transitorio y un término estacionario. Anulamos la fuerza externa para obtener el término transitorio:

$$[2.21] \quad x_{TRANS} = Ae^{-\beta t} e^{i(\omega_d t + \phi)}$$

Pero la parte transitoria desaparece en el movimiento forzado, en la medida que $\beta t \gg 1$, quedando únicamente la parte estacionaria. Para determinar la misma se asume que ω es además la frecuencia a la que vibra la masa en su estado estacionario. Por ende suponemos que:

$$[2.22] \quad x_{EST} = Ae^{i\omega t}$$

Reemplazando en la ecuación de movimiento:

$$[2.23] \quad x_{EST} = \frac{F}{-m\omega^2 + R_m\omega i + k} e^{i\omega t}$$

Definimos la impedancia mecánica compleja $Z_m = R_m + iX_m$ $[\Omega]_{MEC}$, donde R_m es la resistencia mecánica del sistema y X_m es la reactancia mecánica del sistema cuya equivalencia es $X_m = m\omega - \frac{k}{\omega}$

Reacomodando términos tenemos que:

$$[2.24] \quad X_{EST} = \frac{F}{i\omega Z_m} e^{i\omega t}$$

2.1.3 Vibración en barras

2.1.3.1 Vibraciones longitudinales

El desplazamiento de las partículas de la barra perturbada longitudinalmente es paralelo a su eje. Se asume que cada plano de sección transversal de la barra se mueve como unidad, si las dimensiones laterales de la barra son pequeñas a comparación de su longitud. En la propagación de ondas longitudinales, frecuentemente presente en barras sólidas, se percibe que la frecuencia de vibración es inversamente proporcional a la longitud de la barra $\lambda = f^{-1}$. Para entender las ondas acústicas estudiaremos las vibraciones longitudinales en barras, cuyo comportamiento se asemeja a la transmisión de ondas acústicas planas en un fluido retenido en un tubo rígido; a menudo este fenómeno se hace presente en algunos artefactos acústicos.

En una barra de longitud L y área de sección transversal S sujeta a fuerzas longitudinales, se producirá un desplazamiento longitudinal ξ , para barras largas y delgadas este desplazamiento será el mismo en cualquier sección transversal.

$$[2.25] \quad \xi = \xi(x, t)$$

Sean los extremos izquierdo $x=0$ y derecho $x=L$ y el segmento corto dx de la barra no deformada entre x y $x+dx$. La aplicación de las fuerzas longitudinales hace que x se mueva una distancia ξ y en $x+dx$ se mueve una distancia $\xi+d\xi$ ambos hacia la derecha. Un valor positivo de ξ significa un desplazamiento hacia la derecha y un valor negativo, un desplazamiento a la izquierda. Al suponer que dx es pequeño, se puede representar mediante una expansión de Taylor el desplazamiento en $x+dx$.

$$[2.26] \quad \xi + d\xi = \xi + \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) dx$$

Y el incremento de la longitud será:

$$[2.27] \quad (\xi + d\xi) - \xi = d\xi = \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) dx$$

Definimos la deformación $\frac{\partial \xi}{\partial x}$ como el segmento que representa la proporción de un incremento de longitud con respecto a la longitud original. Puesto que ξ es función de x y t , se deben usar derivadas parciales y no totales.

Las fuerzas elásticas se producen al deformar una barra, actuando en cada plano de sección transversal y mantienen a la barra unida. Decimos que $f = f(x,t)$ representa a las fuerzas longitudinales, para las que f representa fuerzas de compresión y $-f$ fuerzas de tensión. El esfuerzo se define como $\frac{f(x,t)}{S}$. La ley de Hooke establece que si la deformación es pequeña el esfuerzo es proporcional a él, en la mayoría de materiales.

$$[2.28] \quad f = -SY \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

El módulo de Young o módulo de elasticidad Y es una propiedad de los materiales. El valor negativo indica que un esfuerzo positivo da lugar a una deformación negativa. Si f representa la fuerza interna en x , la fuerza en

$x + dx$ es representada por $f + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)dx$, la fuerza neta hacia la derecha sería la resta de la primera con la segunda. Substituyendo a df :

$$[2.29] \quad df = SY \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2 dx}$$

Aplicamos la segunda ley de Newton, $\rho_v S dx$ representa la masa del segmento, donde ρ_v es la densidad volumétrica o masa por unidad de volumen de la barra. Además la velocidad de fase es $c = \sqrt{Y/\rho}$.

$$[2.30] \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

Esta ecuación es idéntica a la del movimiento transversal en una cuerda. Lo que significa que es una ecuación de onda longitudinal unidimensional, con la siguiente solución:

$$[2.31] \quad \xi = \xi_1(ct - x) + \xi_2(ct + x)$$

Por ende la solución armónica compleja será:

$$[2.32] \quad \xi = Ae^{i(\omega t - kx)} + Be^{i(\omega t + kx)}$$

Donde A y B son amplitudes constantes complejas y $k = \omega/c$ representa al número de onda. El módulo de Young da la velocidad de fase sólo si se trata de una barra delgada.

2.1.3.1.1 Condiciones de frontera simple

Al igual que en la vibración en cuerda cuando $\xi = 0$ en el extremo $x = 0$ da como resultado $B = -A$ por lo que:

$$[2.33] \quad \xi(x, t) = -2Ae^{i\omega t} \sin kx$$

Mientras que en el extremo $x = L$ la aplicación de dicha condición da:

$$[2.34] \quad \sin kL = 0 \quad \text{Donde:} \quad k_n L = n\pi \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Igual que en cuerda fija fija, las frecuencias angulares de los modos de vibración permitidos son:

$$[2.35] \quad \omega_n = \frac{n\pi c}{L} \quad \text{o} \quad f_n = \frac{n}{2} \frac{c}{L}$$

El desplazamiento complejo del n -ésimo modo de vibración:

$$[2.36] \quad \xi_n(x, t) = -2iA_n e^{i\omega_n t} \sin k_n x$$

Y la parte real:

$$[2.37] \quad \xi_n(x, t) = (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t) \sin k_n x$$

Las constantes de amplitud reales A_n y B_n están definidas por $2A_n = B_n + iA_n$. La suma de las soluciones armónicas separadas da como resultado la solución completa:

$$[2.38] \quad \xi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t) \sin k_n x$$

Para encontrar A_n y B_n se puede utilizar el teorema de Fourier si conocemos las condiciones iniciales del desplazamiento y velocidad de la barra.

Para una barra con extremo libre no hay fuerzas elásticas internas en ese extremo, entonces $f = 0$ y además $\frac{\partial \xi}{\partial x} = 0$ en ese punto. La aplicación de esta condición en $x = 0$ resulta en $B = A$, así que:

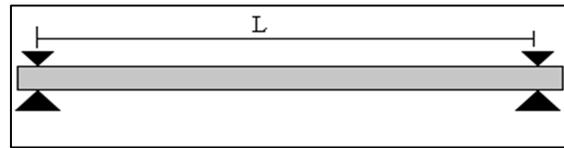
$$[2.39] \quad \xi(x, t) = A e^{i\omega t} (e^{-ikx} + e^{ikx}) = 2A e^{i\omega t} \cos kx$$

Aplicando en el otro extremo $x = L$ tenemos que:

$$[2.40] \quad \sin kL = 0 \quad \omega_n = n\pi(c/L) \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Las frecuencias de vibraciones son las mismas que para la barra fija fija. El desplazamiento complejo para n -ésimo modo de vibración es:

Foto 2.3: Barra con extremos fijos.



Fuente: Internet,
 <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/vibracion_barra/vibracion_barra.htm>, 2011.

$$[2.41] \quad \xi_n(x, t) = -2iA_n e^{i\omega_n t} \cos k_n x$$

Y la parte real:

$$[2.42] \quad \xi_n(x, t) = (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t) \cos k_n x$$

La barra libre libre tiene antinodos en cualquiera de los extremos por la presencia del término $\cos k_n x$. Siempre que ocurre un antinodo en el centro de la barra las vibraciones son simétricas en el centro, mientras que cuando hay un nodo en el centro, serán asimétricas. En barra libre libre no existe ni una posición en la que al presar la barra no se elimine ni un nodo normal.

En barra libre en $x=0$ y fija en $x=L$ tendremos que $\cos kL=0$, entonces:

$$[2.43] \quad k_n L = (2n-1)\pi/2 \quad n=1,2,3\dots \quad f_n = \frac{2n-1}{4} \frac{c}{L}$$

Esto nos indica que en estos casos sólo existen armónicos impares.

2.1.3.1.2 Barra libre con carga másica:

Considérese una barra libre en $x=0$, cargada con una masa puntual m , de forma que no haya ondas propagándose en ella, en $x=L$. Aplicando la condición de frontera $\partial \xi / \partial x = 0$ en el extremo libre tenemos:

$$[2.44] \quad \xi = 2A e^{i\omega t} \cos kx$$

En $x=L$ al aplicar la condición de frontera tenemos que el extremo de la barra y masa deben tener la misma aceleración. Entonces:

$$[2.45] \quad (f)_{x=L} = m \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right)_{x=L}$$

Si aplicamos estas condiciones de frontera a ξ :

$$[2.46] \quad kSY \sin kL = -m\omega^2 \cos kL \quad \text{Donde} \quad \tan kL = \frac{m\omega c}{SY}$$

Para una carga másica pequeña de forma que $\tan kL \approx 0$, $kL = n\pi$ es la condición para las frecuencias en una barra libre libre. Para cargas muy grandes, las frecuencias permitidas se asemejan a las de una barra libre fija. A través de medios gráficos es más fácil resolver estas incógnitas, reemplazamos Y por su expresión equivalente ρc^2 y decimos que $m_b = \rho_v SL$, representando a la masa de barra. Luego:

$$[2.47] \quad \tan kL = -\frac{m}{m_b} kL$$

Si las masas son iguales al graficar se observa que los valores de kL que satisfacen la ecuación son 2.03, 4.91, 7.98. Los nodos de vibración ocurren en:

$$[2.48] \quad \cos kx = 0$$

El modo fundamental es aquel donde $kL = 2.03$ y da un nodo en $2.03 \frac{x}{L} = \frac{\pi}{2}$ ó $x = 0.77L$. Mientras la masa sujeta sea más grande, los nodos de cada modo normal de vibración se mueven más al extremo cargado. No hay sobretonos armónicos en la barra libre con carga másica.

2.1.3.1.3 Condiciones de frontera generales

Los modos normales de vibración pueden determinarse por la impedancia mecánica en cada extremo de la barra, cuando ésta es libre vibrante y tiene cargas arbitrarias en cada extremo. La impedancia mecánica del soporte en $x=0$ es Z_{m0} , la fuerza en este extremo causa una aceleración hacia la izquierda, por ende la fuerza será:

$$[2.49] \quad f_0 = -Z_{m0}u(0,t)$$

La impedancia en el otro extremo será Z_{mL} . Una fuerza compresiva positiva en $x = L$ causa una aceleración del soporte hacia la derecha. Está fuerza entonces será:

$$[2.50] \quad f_L = +Z_{mL}u(L,t)$$

Reemplazando las mismas en $f = -SY \frac{\partial \xi}{\partial x}$ y usando $u = \partial \xi / \partial t$ tenemos que:

$$[2.51] \quad \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{Z_{m0}}{\rho_L c^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)_{x=0}$$

$$[2.52] \quad \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)_{x=L} = \frac{Z_{mL}}{\rho_L c^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)_{x=L}$$

Donde $\rho_L = \rho S$ es la densidad por unidad de longitud de la barra.

Si las cargas Z_{m0} y Z_{mL} son puramente reactivas, no hay pérdidas y por ende la onda que viaja a la derecha es igual a la que viaja a la izquierda, además las amplitudes deben ser iguales. Pero si una o ambas tienen parte resistiva, el comportamiento temporal de la barra depende de una frecuencia angular completa $\omega = \omega + iB$ cuya parte temporal es el coeficiente de absorción temporal. No hay pérdidas internas en la barra así $\omega \approx ck$ y entonces:

$$[2.53] \quad \xi(x,t) = (Ae^{-ikx} + Be^{ikx})e^{i\omega t}$$

Resolviendo y utilizando las condiciones de frontera se obtiene que:

$$[2.54] \quad B = \frac{1 + (Z_{m0} / \rho_L c)}{1 - (Z_{m0} / \rho_L c)} A$$

$$[2.55] \quad \tan kL = i \frac{(Z_{m0} / \rho_L c) + (Z_{mL} / \rho_L c)}{1 + (Z_{m0} / \rho_L c)(Z_{mL} / \rho_L c)}$$

Pero cualquier componente resistivo en alguna de las cargas hace difícil resolver esta ecuación.

2.1.3.1.4 Vibraciones forzadas de una barra

El estudio de resonancia y antirresonancia en cuerda es similar en barras. Tanto resonancia como antirresonancia corresponden a la desaparición de la reactancia de entrada.

Una barra de longitud L en un soporte con impedancia Z_{mL} es excitada en $x=0$ con una fuerza $f = F_0 e^{i\omega t}$ y termina en $x=L$. En el extremo forzado la condición será:

$$[2.56] \quad F_0 e^{i\omega t} = -\rho_L c^2 \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)_{x=0}$$

En el extremo cargado la condición de frontera $f_L = Z_{mL} u(L, t)$ da como resultado:

$$[2.57] \quad \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)_{x=L} = -\frac{Z_{mL}}{\rho_L c^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)_{x=L}$$

Para determinar A y B en $\xi(x, t) = (Ae^{-ikx} + Be^{ikx})e^{i\omega t}$ aplicamos estas condiciones de frontera. La forma generalizada de impedancia de entrada es:

$$[2.58] \quad Z_{mo} = \rho_L c \frac{(Z_{mL} / \rho_L c) + i \tan kL}{1 + (Z_{mL} / \rho_L c) i \tan kL}$$

La impedancia de carga normalizada está definida por:

$$[2.59] \quad \frac{Z_{mL}}{\rho_L c} = \frac{R_L}{\rho_L c} + i \frac{X_L}{\rho_L c} = r_L + ix_L$$

Mientras la impedancia de entrada se haga cero la amplitud de la velocidad se va haciendo infinita, lo que ocurre en resonancia mecánica. Pero si la impedancia se hace infinita la velocidad de entrada tiende a cero, condición de antirresonancia. Cuando la resistencia de carga r_L y x_L son pequeñas, la reactancia de entrada se hace cero.

$$[2.60] \quad x_L \tan^2 kL - \tan kL - x_L \approx 0$$

Ésta expresión es cuadrática y puede aproximarse de tal forma que se obtenga

$$[2.61] \quad \tan kL \approx \frac{1 \pm 81 + 2x_L^2}{2x_L} = \begin{cases} -x_L \\ 1/x_L \end{cases}$$

Eligiendo la primera respuesta tenemos que:

$$[2.62] \quad Z_{mL}/(\rho_L c) \sim 0$$

Donde las frecuencias de resonancia y antirresonancia se asemejan a las de una barra casi libre, forzada. Por ende ambas frecuencias se producen al aproximarse la reactancia de entrada a 0. Si hay pérdidas en el sistema en resonancia, la resistencia de entrada es pequeña, mientras que en antirresonancia es grande.

Cerca de $x = L$ debe haber un antinodo, por lo que la máxima amplitud de velocidad es $U_L = |u(L, t)|$, en este extremo la potencia transmitida de la barra a la carga cumple que:

$$[2.63] \quad \Pi \approx \frac{1}{2} U_L^2 R_L$$

En resonancia o antirresonancia es:

$$[2.64] \quad \Pi = \frac{1}{2} \frac{F_0^2}{R_0}$$

Se supone que la barra no tiene pérdidas y ambas potencias deben ser iguales, así tenemos que:

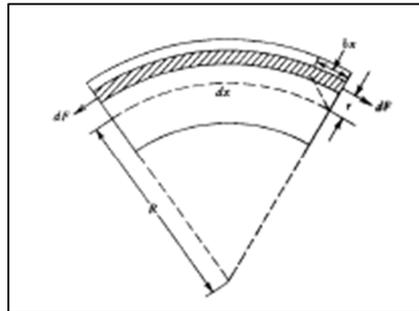
$$[2.65] \quad U_L \approx \frac{F_0}{R_L} \quad \text{En resonancia}$$

$$[2.66] \quad U_L \approx \frac{F_0}{\rho_L c} \sqrt{\frac{R_L + 2X_L}{R_L}} \quad \text{En antirresonancia}$$

2.1.3.2 Vibraciones transversales de una barra

Es difícil que en una barra la vibración longitudinal se produzca sin la transversal. Una barra de longitud L con sección transversal uniforme S es doblada como en la siguiente figura, la parte inferior se comprime mientras que la superior se estira, la coordenada x mide la ubicación a lo largo de la barra, en tanto que y mide el desplazamiento de la barra su posición normal. En el centro de la barra, debe haber un punto en que haya un eje neutro donde la longitud permanece invariable. El radio de curvatura R del eje neutro mide la flexión de la barra.

Foto 2.4: Esfuerzos y deformaciones de flexión en una barra.



Fuente: Kinsler, Lawrence E.; Frey, Austin R., FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS, p. 65, 1967.

A r distancia del eje neutro se encuentra el incremento de longitud que es $\partial x = (\partial \xi / \partial x) dx$, a causa del doblamiento de un filamento de la barra, donde dx es la longitud de un segmento de la barra. Para encontrar la fuerza longitudinal en este punto df considérese que ds representa el área de la sección transversal del filamento, que dS es el área de la sección transversal del filamento y que aquellos filamentos que están debajo de eje neutro se comprimen por lo que ∂x es negativo, en tanto que arriba del eje se expanden y entonces ∂x es positivo. Abajo del eje la fuerza es de compresión y tomando en cuenta el signo de ∂x , resulta en una fuerza positiva. Geométricamente

$$\frac{\partial x}{dx} = \frac{r}{R}. \text{ Entonces:}$$

$$[2.67] \quad df = -\frac{Y}{R} r \cdot dS$$

Aunque la fuerza total longitudinal $f = \int df$ es 0, porque transversalmente las fuerzas internas se anulan, en la barra hay un momento de flexión

$$M = \int r \cdot df = -\frac{YS\kappa^2}{R} \text{ donde } \kappa \text{ es el radio de giro de la barra y } \kappa^2 = \frac{\int r^2 dS}{S}. \text{ "El$$

valor de κ para una sección transversal rectangular es $t/\sqrt{12}$, donde t es el grueso de la barra medida en dirección y . Para una barra circular de radio a , $\kappa = a/2$."¹ En general R es una función de la ubicación en el eje neutro

$$R = \frac{[1 + (\partial y / \partial x)^2]^{3/2}}{\partial^2 y / \partial x^2}. \text{ Si } \partial y / \partial x \ll 1 \text{ podemos aproximar } R \approx \frac{1}{\partial^2 y / \partial x^2}, \text{ entonces:}$$

$$[2.68] \quad M = -YS\kappa^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

Si el par de torsión en el extremo derecho del segmento dx gira en la dirección de las manecillas del reloj el momento de flexión M es negativo, al contrario es positivo.

2.1.3.2.1 La ecuación de la onda transversal:

Para distorsionar la barra se deben utilizar además fuerzas cortantes. Tomando en cuenta el segmento dx , consideramos una fuerza cortante hacia arriba F_y la cual trabaja en el extremo izquierdo. La fuerza cortante que actúe en el extremo derecho estará dirigida hacia abajo y por ende será negativa. Se dice que una barra flexionada está en equilibrio estático si los pares de torsión y las fuerzas cortantes no producen un momento de giro neto. En el extremo izquierdo del segmento, esta condición se convierte en:

$$[2.69] \quad M(x) - M(x + dx) - (F_y)(x + dx)dx = 0$$

Se utilizan expansiones de Taylor alrededor de x , cuando dx es pequeño, así:

¹Kinsler, Lawrence E.; Frey, Austin R.: FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS, Página 104, 2da edición, John Wiley & Sons INC., EEUU, 1967. (524 págs.)

$$[2.70] \quad F_y = -\frac{\partial M}{\partial x} = YS\kappa^2 \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}$$

Si $\frac{\partial F_y}{\partial x} = SY\kappa^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4}$, la fuerza neta hacia arriba en el segmento dx será:

$$[2.71] \quad dF_y = F_y(x) - F_y(x + dx) = -YS\kappa^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} dx$$

La aceleración del segmento es hacia arriba, la masa del segmento es $\rho S dx$ y además $c = \sqrt{Y/\rho}$ como en las ondas longitudinales, entonces aplicando la ley de Newton resulta:

$$[2.72] \quad \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\kappa^2 c^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4}$$

Una derivada parcial de cuarto orden, como en el caso de vibración en cuerdas, impide que funciones de forma $f(ct - x)$ sean soluciones de la anterior ecuación. En una barra, las ondas transversales no la recorren con velocidad constante c y forma invariable.

Se describe el desplazamiento transversal complejo como $y(x, t) = \Psi(x)e^{i\omega t}$ asumiendo que la solución a la anterior ecuación está dada por separación de variables, donde Ψ es sólo función de x . Utilizando $v = \sqrt{\omega c \kappa}$ resulta que:

$$[2.73] \quad \frac{d^4 \Psi}{dx^4} = \frac{\omega^4}{v^4} \Psi$$

Asumiendo que $\Psi = A \exp(\gamma x)$ y sustituyendo en la anterior ecuación, resultaría en $\gamma^4 = \left(\frac{\omega}{v}\right)^4$, cuyas cuatro soluciones sumadas conformarían la solución completa:

$$[2.74] \quad \Psi = A e^{\omega x/v} + B e^{-(\omega x/v)} + C e^{i\omega x/v} + D e^{-i\omega x/v}$$

Donde A, B, C y D son constantes de amplitudes completas. La velocidad c no es una amplitud constante, ondas con diferentes frecuencias viajan distintas

velocidades. La velocidad v es la velocidad de fase de cada componente de frecuencia de una onda compleja. Una barra en vibración origina dispersión para las ondas transversales.

El desplazamiento y en su parte real, utilizando identidades hiperbólicas y trigonométricas sería:

$$[2.75] \quad y = \cos(\omega t + \phi) \left[A' \cosh \frac{\omega x}{v} + B' \sinh \frac{\omega x}{v} + C' \cos \frac{\omega x}{v} + D' \sin \frac{\omega x}{v} \right]$$

Donde A' , B' , C' y D' son constantes reales determinadas por las condiciones iniciales y de frontera.

2.1.3.2.2 Condiciones de Frontera

Debido a la existencia de pares de condiciones de frontera en los extremos de la barra, la determinación de las constantes A' , B' , C' y D' requiere el doble de condiciones de frontera. Para obtener las formas particulares de estas condiciones, se debe considerar si se trata de extremo prensado o de extremo libre:

Extremo prensado: tanto desplazamiento como pendiente son cero. Entonces:

$$[2.76] \quad y = 0 \qquad \frac{\partial y}{\partial x} = 0$$

Extremo libre: no hay par de torsión externo M ni fuerza cortante F_y . El desplazamiento y la pendiente son pequeños. Por ende:

$$a. \quad \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \qquad \frac{\partial^2 y}{\partial x} = 0$$

2.1.3.2.3 Barra prensada en un extremo:

Aplicando estas condiciones para una barra de longitud L prensada en $x=0$ y libre en $x=L$, se obtiene en el extremo fijo:

$$[2.77] \quad y = \cos(\omega t + \phi) \left[A \left(\cosh \frac{\omega x}{v} - \cos \frac{\omega x}{v} \right) + B \left(\sinh \frac{\omega x}{v} - \sin \frac{\omega x}{v} \right) \right]$$

En el extremo libre:

$$[2.78] \quad A \left(\cosh \frac{\omega L}{v} + \cos \frac{\omega L}{v} \right) = -B \left(\sinh \frac{\omega L}{v} + \sin \frac{\omega L}{v} \right)$$

$$[2.79] \quad A \left(\sinh \frac{\omega L}{v} + \sin \frac{\omega L}{v} \right) = -B \left(\cosh \frac{\omega L}{v} + \cos \frac{\omega L}{v} \right)$$

Dividiendo ambas ecuaciones, multiplicando en cruz y utilizando identidades trigonométricas e hiperbólicas se obtiene:

$$[2.80] \quad \cosh \frac{\omega L}{v} \cos \frac{\omega L}{v} = -1$$

Conviene utilizar las siguientes identidades en la anterior ecuación:

$$[2.81] \quad \tan \frac{\theta}{2} = \sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{1 + \cos \theta}} \quad \text{Y} \quad \tanh \frac{\theta}{2} = \sqrt{\frac{\cosh \theta - 1}{\cosh \theta + 1}}$$

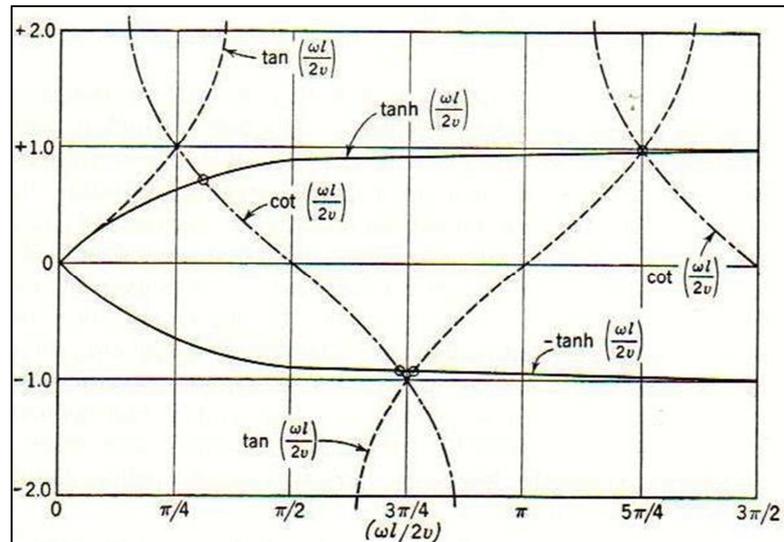
Y así tenemos:

$$[2.82] \quad \cos t \frac{\omega L}{2v} = \pm \tanh \frac{\omega L}{2v}$$

Graficando estas dos últimas funciones contra $\omega L/2v$, se aprecia que las frecuencias correspondientes a los modos de vibración permitidas cumplen la siguiente igualdad:

$$[2.83] \quad \frac{\omega L}{2v} = \frac{\pi}{4} (1.194, 2.988, 5, 7, \dots)$$

Foto 2.5: Curvas que muestran las funciones tangente, cotangente, e hiperbólicas.



Fuente: Kinsler, Lawrence E.; Frey, Austin R., FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS, p. 73, 1967.

Las dos frecuencias más bajas permitidas deben usar los valores exactos de $1.194\pi/4$ y $2.988\pi/4$, para las siguientes se usa $\omega L/2v = (2n-1)\pi/4$ donde $n = 3,4,5\dots$

Al substituir $v = \sqrt{\omega\kappa}$ se obtiene la fórmula para las frecuencias permitidas para las vibraciones transversales de una barra prensada, libre.

$$[2.84] \quad f = \frac{\pi c \kappa}{8L^2} (1.194^2, 2.988^2, 5^2, 7^2, \dots)$$

En barras, las frecuencias de los sobretonos no son armónicos de su fundamental. Si al golpear una barra algunos sobretonos son perceptibles, el sonido tendrá una cualidad metálica, estos se amortiguan rápidamente en frecuencias altas, convirtiéndose en un tono puro con frecuencia igual a la fundamental. Ejemplos de barras prensadas libres son los diapasones y las lengüetas vibrantes. Para estas últimas es posible ajustar la frecuencia fundamental de resonancia alterando su grosor, es decir κ o variando su longitud.

Foto 2.6: Diapasón,
ejemplo de barra
prensada libre.



Fuente: Internet,
<http://www.ars-antiqua.com/contents/es/d7_accesorios_instrumentos_musicales.html>, 2011.

Los nodos en una barra prensada, libre tienen un espaciamiento irregular entre ellos. Hay tres tipos de puntos nodales. El nodo donde la barra está prensada, los nodos cerca de puntos de inflexión de la barra y el nodo adyacente al extremo libre de la barra. Para cada antinodo se debe recordar que la amplitud vibracional no es la misma en diversas posiciones antinodales.

2.1.3.2.4 Barra libre en ambos extremos:

Aplicando las condiciones de frontera de barra libre en $x=0$ y en $x=L$ tenemos que:

$$[2.85] \quad \tan\left(\frac{\omega L}{2v}\right) = \pm \tanh\left(\frac{\omega L}{2v}\right)$$

Al graficar tenemos que las frecuencias permitidas están dadas por:

$$[2.86] \quad f = \frac{\pi c K}{8L^2} (3.0112^2, 5^2, 7^2, 9^2, \dots)$$

En este caso los sobretonos tampoco son armónicos de la fundamental. Para frecuencias impares los modos de vibración son simétricos con respecto al centro, mientras que en frecuencias pares están distribuidos asimétricamente.

Los puntos nodales son simétricos con respecto al centro en todos los modos de vibración.

Para soportar una barra libre libre, se la puede colocar en un filo de cuchillo, en un punto nodal sin alterar el modo normal correspondiente. Se debe impedir el desplazamiento a cero y no restringir los cambios de pendiente producidos en un nodo. Un ejemplo de este caso es el xilófono.

2.1.4 Vibraciones de membranas y placas

En sistemas de dos dimensiones, como es el caso de instrumentos musicales tales como los platillos, los timbales y los tambores, la superficie de los mismos es más grande con respecto a su espesor. Su vibración es causada por fricción o percusión; si se trata de membranas es necesario tensarlas para producir sonido, mientras que en las placas debemos tomar en cuenta que éstas necesitan un punto de apoyo, por ejemplo el que es generado por un pedestal.

Aparentemente el análisis de estos casos es más complicado, por cuanto son necesarias tres coordenadas espaciales para localizar un punto en la superficie, pero se utilizará una generalización bidimensional de la ecuación de onda unidimensional. Las condiciones de frontera determinarán las frecuencias permitidas, pero ahora éstas deben incluir además el tipo de soporte y la forma del perímetro de la membrana.

Para dicha generalización se debe determinar el sistema de coordenadas que será utilizado, pues aunque las ecuaciones resultantes de cualquier sistema son equivalentes, el sistema de coordenadas facilita el trabajo al tomar en cuenta las condiciones de frontera de la forma del perímetro. Sin embargo los sistemas de coordenadas son limitados y por tanto los problemas de membranas también.

2.2 BOCINAS

La bocina en acústica es un difusor de sonido de tipo cónico, cuya función es proyectar el sonido y canalizarlo por el interior del brazo hacia el exterior, de tal

manera que el sonido se amplifique y se consiga direccionalidad. Gracias a las bocinas es posible adaptar el sonido a la baja impedancia del aire. El tamaño de la bocina suele ser proporcional al nivel de ganancia que ofrece la bocina. En general se trabaja con bocinas exponenciales de madera curvada, que son útiles para la reproducción de frecuencias medias o agudas. Pero además hay bocinas de grandes proporciones utilizadas en frecuencias graves. Al usar más de una bocina, se complica la evaluación de su utilidad.

2.2.1 Parámetros

Para optimizar el funcionamiento de una bocina, el diseño de misma debe considerar la resonancia del sonido en un rango de frecuencia determinado. De lo contrario es posible que la bocina vibre en distintas direcciones, ocasionando la pérdida o el daño de otros componentes del sistema o una ganancia pobre frente a la esperada.

Frecuencia de corte: el tamaño y la geometría de la bocina determinan el límite de funcionamiento de la frecuencia más baja, es decir donde empieza a actuar la bocina, sin importar la frecuencia de resonancia del emisor de sonido.

Dispersión: comúnmente se utilizan dos ángulos de dispersión, uno horizontal y uno vertical. Para un haz de dispersión estrecho se usa el término de “tiro largo”. Para un haz de dispersión ancho “tiro corto”. Para grandes distancias es mejor usar un haz de dispersión estrecho, es decir, bocinas de tiro largo, mientras que en distancias pequeñas se recomienda bocinas de tiro corto.

2.2.2 Materiales para su construcción

Dependiendo del material con que están hechas, la utilidad de la bocina y la calidad sonora pueden variar:

- Aluminio: es un material ligero.
- Plástico ABS: es un plástico duro y resistente. Fáciles de fabricar.
- Fibra de vidrio reforzado: más costosos, pero más útiles.
- Poliuretano o poliestireno: es ligero y resistente en caso de impactos.

- Madera curvada: convenientes en la reproducción de frecuencias medias. Si la construcción es adecuada, ofrecen mayores prestaciones.

2.2.3 Tipos de bocinas

2.2.3.1 *Bocina de paso*

Tiene dos secciones, cada una con distintas secciones transversales. Aunque es la bocina que proporciona la mayor ganancia, no es muy utilizada, debido a la gran tensión que se genera en la región nodal entre las dos secciones, donde la fractura del material es muy probable a niveles elevados de sonido.

2.2.3.2 *Bocina exponencial*

Debido a la conicidad gradual de su diseño, la tensión es distribuida a lo largo de una zona amplia, generando tensión baja en la región nodal, así que la misma no representa un problema; sin embargo, la ganancia es muy baja.

Foto 2.7: Bocina Beyma.



Fuente: Internet,
<<http://www.duiops.net/hifi/enciclopedia/bocina-exponencial.htm>>, 2011.

2.2.3.3 *Bocina catenaria*

Tiene forma de curva catenoidal, combinando las mejores características de las anteriores. Disponibles en diseños exponenciales y catenoidales.

2.2.3.4 Bocina de barra

O rectangular. Las encontramos en pasos o cónicas, a veces macizas. Para reducir la tensión lateral, las más largas tienen ranuras cruzando la región nodal. Como resultado las vibraciones son longitudinales y hay ausencia de modos de vibración no deseados.

Foto 2.8: Bocina plástica.



Fuente: Internet,
<<http://www.radionorte1.com.ar/baffles%20y%20parlantes.html>>, 2011.

2.2.3.5 Bocinas circulares

Huecas o macizas, también constan de ranuras para reducir tensiones transversales.

Foto 2.9: Bocina Bosch.



Fuente: Internet,
<<http://products.boschsecurity.com.ar/es/LATIN/products/bxp/SKUF.01U.506.042-CATM7174c1ebff67024a39fc60d7823ab568>>, 2011.

3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

3.1 BREVE HISTORIA DE LA EVOLUCIÓN DE LAS CAJAS MUSICALES

3.1.1 Caja

La primera caja musical con cilindro apareció cerca de 1810. Hasta entonces las cajas musicales eran utilizadas como accesorios para la relojería. Las primeras bases eran cubiertas de madera muy tosca, con palo de rosa por fuera o nogal. Luego los movimientos musicales se convirtieron en objetos valiosos de por sí, usualmente encerrados en una caja de madera simple, cuya pesadez incluso con pino tendía a amortiguar el sonido.

Al principio los controles del mecanismo musical sobresalían de un extremo de la caja. Por la década de los 30's en el extremo izquierdo de la caja había una puerta colgante que se abría hacia abajo para revelar las tres palancas de control de nivel. Al mismo tiempo que la carcasa adquiría este sistema colgante, se añadieron dentro de algunas cajas, divisiones para separar el teclado y los controles. Se introdujo una tapa de cristal interna, para proteger al movimiento del polvo, la que inicialmente reposaba en dos ranuras de la parte superior de la caja.

Pero antes habían aparecido las cajas musicales de cilindros intercambiables o cambiables, por ende era necesario un compartimento para poder almacenar los otros cilindros. Se ideó utilizar cajones en la caja musical para alojar a los cilindros. Para no ahogar el sonido, casi siempre había un gran corte rectangular en el marco donde descansaba la caja de música. Un diseño bastante atractivo fue aquel que con el cajón correspondiente se inspiró en un pequeño escritorio, donde la caja musical se situaba en la parte superior, y en la parte inferior había una tapa con bisagras que al dejarse caer hacia abajo revelaba el compartimento donde se guardaban los cilindros.

Los primeros movimientos musicales apenas estaban montados en la carcasa. Como en la época se pasó a la producción en masa y a reducción de costos, la

caja sufrió transformaciones severas. Primero sustituyeron el metal por la madera en vista del costo, por lo que la caja comenzó a ser más grande que el movimiento. Esto en determinadas circunstancias fue beneficioso para la producción del sonido, pero se concluía que eran el resultado de que se había asumido un tamaño distinto al real.

Foto 3.1: Caja musical orquestal de cilindros intercambiables.



Fuente: Ord-Hume, Arthur W. J. G., MUSICAL BOX: A HISTORY AND COLLECTOR'S GUIDE, p. 31, 1980.

La carcasa que descansaba sobre unos pequeños pies, en un principio se trataba literalmente de una caja que descansaba sobre una tabla en su parte inferior. Entonces se dieron cuenta que esto amortiguaba el sonido y se colocaron unas pequeñas extensiones para el frente y la parte trasera para dar soporte a la caja, a unos 5 mm al aire desde el piso. Ahora el sonido podía pasar de la caja de resonancia al aire libre. Cuanto mayor era la caja, más grande eran los pies. El estilo de los movimientos vieneses no seguían los patrones del desarrollo suizo. Un buen adelanto fue la adición de una delgada cámara de resonancia de madera o un amplificador en la parte superior montado encima del movimiento. Ésta era de dimensiones más grandes que la caja y tenía salidas de sonido frontal y posteriormente.

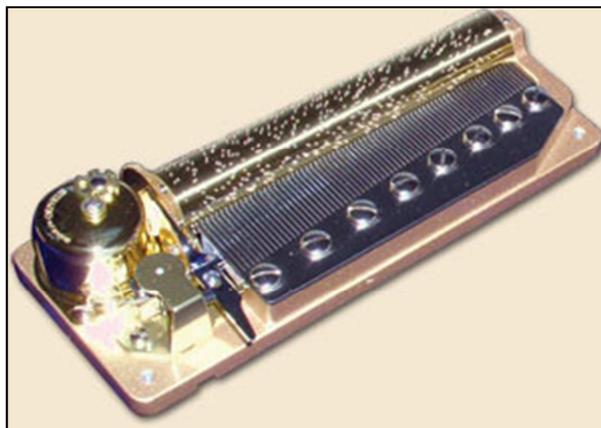
3.1.2 Bancada

Fueron fundidas en bronce desde el principio y la superficie pulida para formar una base desde la que nacía el mecanismo, no necesariamente era incrustado en la superficie del asiento, pero sí construido sobre la parte superior de la

misma. A finales de época, la bancada se parecía más a una estructura de soporte para el motor el cilindro y el peso de las notas graves del peine.

Para reducir los costos de producción y tratando de imitar la caja de música suiza, en Francia se cambió la bancada a una superficie pulida de acero que era sumergida en una solución de estaño. Luego del cambio la bancada se asemejaba a la esfera del reloj plateada y con el tiempo se parecía a un color metalizado que variaba casi desde el azul al amarillo cobrizo. Las bancadas de metal continuaron en algunos movimientos elaborados. Paillard introdujo las bancadas de hierro fundido. Éstas casi siempre estiradas a lo largo, proporcionaban una superficie fácil de manejar, que requerían el mínimo de trabajo manual para construir el resto de la estructura sobre ésta.

Foto 3.2: Movimiento musical sin caja donde se muestra la bancada de hierro.



Fuente: Internet, < <http://www.ma-boite-a-musique.com/>>, 2011.

Pequeños pies eran fundidos para apoyar las bancadas en la parte inferior de la carcasa; éstas eran de hierro y se las atornillaba en el bronce. En la era de las bancadas de hierro, éstas eran casi en su totalidad fundidas y finalmente se prescindió de ellas.

3.1.3 Peine

Es aquel que produce el sonido en la caja musical. En la fabricación de cajas musicales, la creación y el desarrollo del peine fue uno de los aspectos más importantes. Hacer un diente por separado, cada uno cortado laboriosamente

afinado y luego puesto en la posición adecuada, atornillado y luego asegurado por goma laca, era un proceso lento; lo que más se alcanzó fue un intervalo de tercera o de quinta y una octava añadida. Por el contrario, el peine de una sola pieza ofrece numerosos beneficios. Un peine tiene cuatro características importantes: la altura, la duración, el volumen y el timbre.

- La altura que es la posición del sonido en la escala, está en función del peso del diente en relación con su espesor, ancho y longitud; el diente más pequeño produce el sonido más agudo y el más largo, el sonido más grave.
- La duración es la longitud de la vibración después de la pulsación del diente. La duración está en función de la masa del diente. Un diente largo y delgado vibrará más que un diente pequeño y grueso y la duración de una nota grave de un diente que lleve un peso considerable de ajuste será más larga que la de una nota aguda perteneciente a un diente sin ponderar.
- El volumen o nivel de intensidad depende de la rigidez del diente, es una función del radio de su sección transversal y su longitud. Dientes anchos que son pequeños en longitud producirán un sonido más alto y requieren más energía para arrancar. En dientes delgados y largos el sonido producido será de bajo nivel sonoro.
- El timbre es más complejo, depende de muchas características, la rigidez de los dientes y la forma en que estos son montados, por ejemplo.

Foto 3.3: Vista interna de una caja musical.



Fuente: Internet,
<[http://www.minidisc.org/
music_box.html](http://www.minidisc.org/music_box.html)>, 2011.

La forma de fijar el peine dependía de su geometría y de su base de metal, que normalmente estaba asegurada por soldadura. Para permitir que un peine tenga varias octavas, si la nota más alta estaba representada por un diente de 25 mm de largo, la nota más baja probablemente tenía que ser de 100 mm de largo. Pero era mejor hacer que los dientes fueran progresivamente más pesados a medida que avanzaban hacia el bajo final. Para aumentar la masa, se soldaron bloques de plomo en la parte inferior de los dientes y así bajar la frecuencia de vibración de una nota grave, el ajuste se lo realizaba cortando pequeñas porciones de peso.

Las puntas de los dientes tienen muchas variaciones. Donde hay más de una melodía para ser tocada, debe haber un espacio para los pines de la otra melodía o melodías, para que pase la punta de los dientes cuando estos no se los debe ejecutar. Esto explica porque los dientes tienen punta cónica. Los movimientos de estilo vienés muestran puntas asimétricas en forma de L, algo muy notable en los bajos. El diente más grave era visiblemente más grande y provisto de una compensación, ocasionalmente era una punta doblada. Las puntas cuadradas fueron una práctica descartada porque la forma de la esquina incrementaba el riesgo de romper la punta.

El aspecto que más ha generado debate, en cuanto al peine de la caja musical, es la afinación. Hoy en día con los oídos acostumbrados a ecualizaciones de semitonos, podemos escuchar estas piezas con un enfoque demasiado crítico. Pero un buen arreglista puede convertir una pequeña disonancia en una virtud, por ende esto no representa gran problema.

3.1.4 Accesorios

Entre estos contaban campanas, tambores, cítaras, órganos, y otros efectos de orquesta. Entre los primeros efectos introducidos estaba la combinación de tambores y campanas con los peines musicales. Sin embargo, el sonido del tambor era muy débil ya que el golpe del martillo no era suficientemente fuerte, por lo que los tambores fueron hechos con cámaras de resonancia separadas. Estos se hallaban fuera de vista y la estructura dejaba que emerja el sonido.

La amortiguación de la campana entre los ataques era un verdadero problema. Existen cajas que tienen el borde de la superficie del cilindro surcado en lugares que permiten que caiga un dedo delgado amortiguador donde sea necesario. Este sistema sofisticado depende de una alineación perfecta. Las campanas estaban ubicadas de forma estrecha, en razón de mantener las conexiones lo más cortas y ordenadas posibles. Al mejorar el sistema de las campanas, éstas se convirtieron en una atracción visible y dejaron de tratar de ocultarlas.

El progreso del tambor fue similar, casi al mismo tiempo introdujo el bloque de madera ahuecada, hecho de castañuela; se sucedieron pequeños martillos, que ampliaron las habilidades para golpear los objetos durante el uso de la caja musical y ampliaron la dramática con las cajas orquestales que tenían dos tambores, castañuelas y más.

Foto 3.4: Complejo y caro modelo de caja musical Frères hecho para el Shah de Persia, 1896.



Fuente: Ord-Hume, Arthur W. J. G., MUSICAL BOX: A HISTORY AND COLLECTOR'S GUIDE, p. 32, 1980.

3.1.5 Controles

Al comienzo el cilindro de la caja musical tenía tres controles. Los primeros ejemplares fueron hechos para adaptarse a aplicaciones tales como relojes musicales, de los que los controles sobresalían de la parte frontal.

Foto 3.5: Caja musical Lecoultré con palancas de control externas, 1834.



Fuente: Internet,
<<http://www.musicalbox.be/?s=lecoultré>>, 2011.

La mayoría de las cajas permitió que los extremos cortos de los controles sobresalgan por el lado izquierdo de la caja, debajo del orificio del cual salía la llave para dar cuerda.

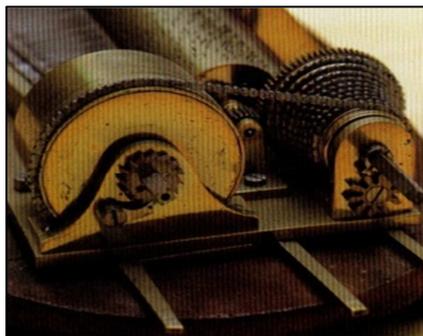
El primer control manejaba el cambio de melodía o repetía determinada posición; el segundo o de la mitad daba comienzo al movimiento y permitía detenerlo al final de la melodía. El tercero servía para detener la melodía y por ende el mecanismo, de forma instantánea. El control para detener instantáneamente era una palanca. En algunas cajas se incluyó un cuarto control, que consistía en un control de parada diseñado para ser utilizado sólo por el fabricante en caso de necesitar ajustar los pines del cilindro, usualmente era quitado cuando la caja era expuesta a la venta. Alrededor de 1838 – 1842 el final de la carcasa se extendió y una solapa con bisagras fue añadida con el fin ocultar los controles que sobresalían.

Las primeras cajas con tambores y campanas tenían una cuarta palanca, un poco más arriba de las tres principales y al centro, que servía para detener el funcionamiento de los tambores, mas no el de las campanas.

3.1.6 Los resortes

La potencia motriz de las cajas de música radica en el resorte en espiral, desarrollado a partir de su uso en relojes. Cuerdas de fusee (polea en forma de cono con un surco en espiral alrededor de ella) y fusees montados entre placas de bronce macizo fueron los primeros ejemplares. Más tarde el fusee fue reemplazado por una cuerda que iba directamente al barril, en lugar del eje fijo del resorte de la cuerda de fusee, el eje estaba equipado con una rueda y un trinquete, que permitían al eje dar vueltas con una llave para dar cuerda. El poder en el resorte era retenido y regulado por montaje principal a lo largo del eje formado por el cilindro en sí.

Foto 3.6: Detalle de un sistema de resortes para una caja musical a cuerda.



Fuente: Ord-Hume, Arthur W. J. G., MUSICAL BOX: A HISTORY AND COLLECTOR'S GUIDE, p. 23, 1980.

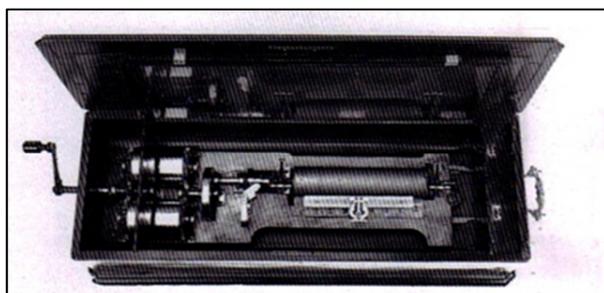
Resortes dobles o coaxiales fueron usados por primera vez alrededor de 1851 para prolongar el tiempo de reproducción del movimiento. Al principio se daba cuerda haciendo girar al cilindro alrededor del eje mediante los dientes trinquete alrededor de su borde. Otra variedad es representada por el motor de doble resorte, dispuestos de forma paralela y no en forma lineal. Los barriles daban cuerda en direcciones opuestas y daban su poder al engranaje central en el extremo de accionamiento que usualmente es coaxial al cilindro. Una última forma de montaje era el motor de cuatro resortes, compuesto por dos pares de resortes en paralelo dispuestos en línea, donde cada par de resortes en paralelo, gira en direcciones opuestas.

3.1.7 La cuerda

Había dos formas de dar cuerda, mediante una llave y mediante una palanca. Según los números de series de las cajas de Nicoles Frères, el cambio generalizado a la palanca para dar cuerda se dio cerca de 1863, pero cinco años antes otros movimientos más elaborados, cajas con tambores y campanas de seis oberturas, con los compartimientos de los tres controles, ya contaban con la palanca para dar cuerda. La manivela era hecha de madera, la caja todavía terminaba en una solapa y el control era aplicado al final sobresaliente del eje, como era aplicada la llave, se daba cuerda empujando de atrás para adelante.

Al avanzar al siglo diecinueve Paillard y Mermod cambiaron la manivela para dar paso a la del tipo usado en el gramófono, mediante un mango desmontable conectado en un agujero lateral de la caja para dar cuerda al eje del resorte directamente. Para permitir que se de cuerda del lado derecho, estas cajas tenían sus motores ubicados al lado.

Foto 3.7: Caja musical con varios motores de resorte, con manivela externa.



Fuente: Ord-Hume, Arthur W. J. G., **MUSICAL BOX: A HISTORY AND COLLECTOR'S GUIDE**, p. 155, 1980.

3.1.8 Regulador

La potencia del resorte de una caja musical se baja y se regula usando un regulador de velocidad que comprende una serie de engranes que terminan en un tornillo sinfín que lleva un ventilador. Además en casi todas las últimas cajas se incluye el eje del cilindro como un elemento de la serie de engranajes. Según determinaba el diseño, la velocidad de reproducción era determinada

por la potencia del resorte y el radio de las ruedas. Modificando las alas del ventilador, se podía hacer un ajuste fino de la velocidad. La velocidad era más lenta si la abertura de las alas era más grande y viceversa.

El ventilador tenía una cruz en forma de t en la parte superior del tornillo sinfín, a la cual se unen dos alas de metal cuya abertura era ajustada girándolos. En control de parada inmediato estaba justo debajo de la cruz t, cerrado en el eje del tornillo sinfín, un poco flojo para prevenir el riesgo de daño cuando se detiene.

En los movimientos musicales amplios, el ventilador debe absorber más potencia y debe ser más amplio, por lo cual el soporte tenía una forma de curva de proyección hacia afuera, permitiendo un ventilador de mayor diámetro. Pero esto no era suficiente para los movimientos realmente grandes, como aquellos que se encuentran en cajas de orquesta y cajas con órganos; aquí la cruz T fue sustituida por un volante con dos, tres o cuatro paletas.

Foto 3.8: Regulador de velocidad de una caja musical a cuerda.



**Fuente: Ord-Hume, Arthur W. J. G.,
MUSICAL BOX: A HISTORY AND
COLLECTOR'S GUIDE, p. 98, 1980.**

3.1.9 El cilindro

El centro de la caja musical se encuentra el cilindro que contiene el programa musical. El barril estaba hecho de una cáscara de latón delgada plana que es enrollada y soldada al cilindro. Las notas musicales están representadas por delicados pines de acero que sobresalen en la superficie del cilindro. El cilindro

es libre de moverse una distancia controlada a los lados a lo largo de su eje. El proceso de permitir que el cilindro se mueva de lado a lado en su eje, alineando los pines con el peine, permite tener distintas melodías. Casi siempre una revolución de cilindro es igual a una canción, poco común era encontrar dos canciones o tres en una sola revolución. Si la melodía era corta, la duración de cada canción cambiaba. Existían casos en que la melodía era representada en más de una revolución, aquí era permitida una pausa momentánea, mientras se cambiaba de cilindro. En otros se producía un desplazamiento lateral del cilindro para evitar grandes pausas.

Foto 3.9: Caja musical con campanas accionadas por martillos.



Fuente: Internet,
<http://wapedia.mobi/en/Musical_box>, 2011.

3.1.10 Cilindros cambiables

El desarrollo del mecanismo musical con cilindros cambiables, fue un intento de contrarrestar la restricción del repertorio. Se construían cilindros de repuesto y componentes manuales hechos a la medida para lograr precisión al sustituir el barril. Cajas de cilindros intercambiables implicaba que los cilindros de repuesto podían ser adquiridos después o intercambiados entre los mecanismos de cajas musicales del mismo tamaño y estilo.

Foto 3.10: Caja de cilindros intercambiables.



Fuente: Internet, <<http://www.ma-boite-a-musique.com/>>, 2011.

El riesgo de dañar el peine era grande con este mecanismo. El primer sistema práctico de cambio de cilindros fue ideado a mediados de 1860 por Paillard, que encontró una vía menos peligrosa de cambio de los cilindros. La clave para ello fue el ensamblaje de la plantilla de tamaño completo. Pero todavía se continuó tratando de encontrar un sistema más sencillo y seguro, manteniendo costos bajos. Junod fue el responsable del sistema inusual cilindros intercambiables. Eran un producto de bajo costo con cilindros completamente huecos que se abrían en un extremo y tenían un agarradero en el otro. Mermod Frères hizo una caja de cilindros intercambiables de buena calidad que gozaba de gran reputación.

Foto 3.11: Caja Frères de cilindros intercambiables.



Fuente: Internet, <<http://www.reginamusicboxcenter.com/lookup.php?id=184>>, 2011.

3.1.11 Cambio de melodía

Mover el cilindro hacia los lados para cambiar la melodía, es una práctica que dejó de ser utilizada. Utilizada por los relojeros y constructores de órganos de barril desde 1720, siempre se centraba en una rueda de estrella y el contorno de la leva conocido como limaçon o caracol. Se puede apreciar que el cambio en los puntos de la estrella era un trabajo directo, debería haber un método de realizar ajustes finos en el cilindro de modo que cada cambio sea preciso.

El cilindro debe deslizarse lentamente a lo largo de su eje para no tener fricción durante el proceso de cambio de melodía. La potencia necesaria para girar el caracol de un cilindro pesado combinado con la compresión de su resorte, era considerable y el cambio se producía en el peor momento desde el punto de vista mecánico, cuando había un cambio de melodías y cuando el movimiento era puesto en marcha. Hubiera sido peor si se cambiaba mientras se estaba reproduciendo, por lo que no había el arrastre del diente por el pin. La resistencia durante el cambio de melodía en los mecanismos normales, podía demandar más de lo que se alcanzaba hacer, por ello algunas cajas aprobaron la secuencia de cambio, donde se selecciona al final de la melodía, antes de que el mecanismo se detenga. Cuando se pone a reproducir de nuevo la caja, el cilindro ya está en su posición de nueva canción y la resistencia de la puesta en marcha es mínima.

Otra dificultad era regresar a la posición número uno de la última posición (melodía ocho en una caja de ocho arias). El cambio era de 3 mm o más y el cilindro podía sufrir un golpe de regreso. Para evitar esto, se proporcionó un paso intermedio y el cilindro regresaba en dos desplazamientos rápidos.

3.1.12 Hojas de melodías

Se denomina en la actualidad, hojas de música en las cajas musicales con disco. La lista de temas se ubicaba dentro de la tapa de la caja de música. Las primeras cajas musicales no se preocupaban en los títulos de las melodías que reproducían, pero luego se escribió los títulos a mano sobre la madera desnuda o a veces en el fondo de la caja. Se utilizaron etiquetas planas que eran pegadas en la parte inferior o en la parte trasera al interior de la caja.

Foto 3.12: Hoja de melodía de una caja Frères de 12 arias.



Fuente: Internet,
http://www.antiquemusicboxes.co.uk/cylinder_pages/box167.htm,
 2011.

Desde las primeras hojas hasta las de finales del Siglo 19, hermosos diseños fueron acogidos por los fabricantes. Con la llegada de la litografía a color, se produjeron algunos ejemplares de cromo muy finos. Al comienzo, las hojas de melodía los decorados consistían en motivos de carácter clásico, guirnaldas y columnas; al final evolucionaron en escenas pastorales, motivos más llamativos de proporciones grandes, proclamando a breves rasgos los títulos completos de la música que se reproduce.

3.2 APOLOGÍA DEL DISEÑO ELEGIDO

Se debe establecer inicialmente, que no es posible realizar la construcción del regulador de velocidad ni de los engranajes y resortes, ya que dicho trabajo precisa profundos conocimientos de Ingeniería Mecánica y un análisis minucioso que no corresponde a la carrera de Ingeniería en Sonido y Acústica, además ante las limitaciones de la industria y la tecnología ecuatoriana, realizar esa labor implicaría un costo alto de inversión y mucho más tiempo para la ejecución de la misma.

Se seleccionó, por ende, una caja musical con una manivela directamente articulada desde el cilindro; omitiendo con esto el diseño de los controles de parada, ya que la parada depende de la ejecución de la caja por parte del usuario.

En vista de que nuestro prototipo es apenas un modelo de laboratorio se decidió inicialmente no diseñar accesorios como campanas o tambores, pero profundizar el estudio de este trabajo, permitirá en un futuro añadir dichos accesorios. Además el diseño de la manivela está pensado para que se pueda implementar una caja musical con cilindros desmontables, si es que se decide continuar con el desarrollo de esta propuesta en la posteridad. De esta manera el prototipo será potencialmente el modelo de una caja musical de cilindros cambiables con melodías de temas tradicionales ecuatorianos.

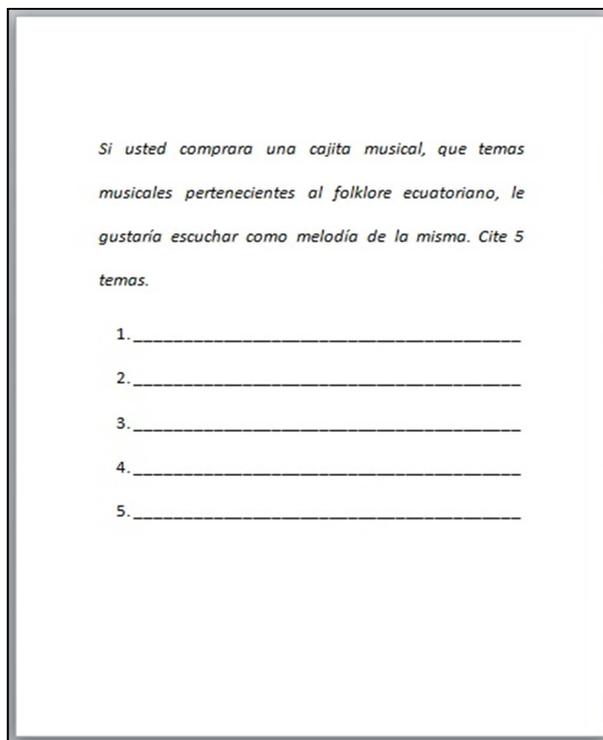
3.3 PARTES DEL PROTOTIPO

3.3.1 Selección de la melodía

Es importante realizar primero la selección de la melodía, ya que con esto podemos determinar la longitud del cilindro, de la peineta y por consiguiente de todo el movimiento. Previamente se instauró que la melodía reproducida pertenecería al grupo de piezas tradicionales de música ecuatoriana, más demandadas en los últimos tiempos, de forma que este trabajo pueda representar en un futuro el comienzo de una nueva empresa. Para ello se realizó una encuesta a un determinado grupo de personas interesadas en consumir estos objetos, con el fin de obtener un banco de las canciones con más acogida por el consumidor ecuatoriano. Se escogió a estudiantes de la carrera de Ing. En Sonido y Acústica de la UDLA y a estudiantes pertenecientes al Conservatorio Nacional de Música del Ecuador, ambos grupos conformados por personas que han cursado materias como apreciación Musical o Historia de la Música, y que por lo tanto tienen el suficiente nivel académico como para establecer un juicio bueno de las piezas musicales

tradicionales más populares del Ecuador. El número de personas encuestadas fue de 88.

Foto 3.13: Copia de la encuesta realizada.



Si usted comprara una cajita musical, que temas musicales pertenecientes al folklore ecuatoriano, le gustaría escuchar como melodía de la misma. Cite 5 temas.

1. _____

2. _____

3. _____

4. _____

5. _____

Fuente: Autora, 2011.

Entre las canciones sugeridas por el público, se encuentra al pasillo *Pasional* del compositor ecuatoriano Enrique Espín Yépez, con un arreglo de Julio Mosquera. Para este trabajo se utilizó la primera y la segunda parte del pasillo, pasajes muy reconocidos entre la gente. Así la pieza quedó reducida a 21 compases. Refiérase al Anexo 1 para ver los resultados.

Sin duda alguna Enrique Espín Yépez es considerado uno de los más grandes exponentes de la música nacional tanto en Ecuador, como en el exterior, y este pasillo es probablemente su pieza más importante. Para muchos una caja musical es un objeto de arte lleno de nostalgia y qué mejor tema que este pasillo para ratificar dicha idea. Es esta la razón de porqué se escogió dicha melodía para el presente trabajo. En el Anexo 2 se adjunta una breve biografía del compositor.

Foto 3.14: Estudiantes de CNM realizando la encuesta.

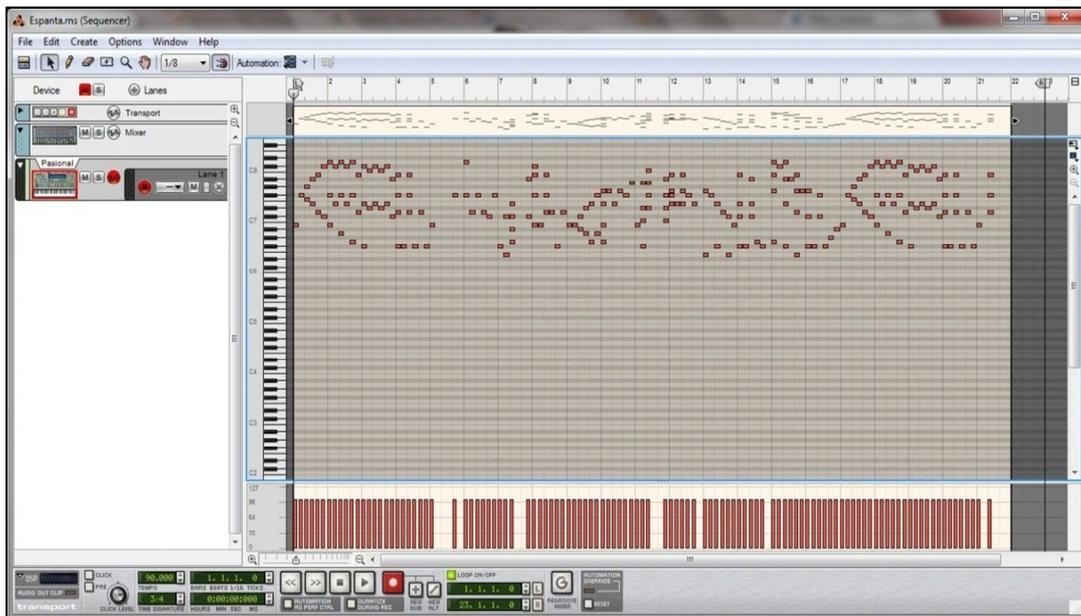


Fuente: Autora, 2011.

3.3.2 Cilindro

Se utilizaron principios de programación musical en la transcripción de la partitura al cilindro, simulando la melodía en Reason y el diagrama del cilindro en Autocad.

Foto 3.15: Simulación del Pasillo Pasional en Reason.



Fuente: Autora, 2011.

En vista del género (Pasillo) cada compás se subdivide en 3 partes iguales, cada parte representado una negra o dos corcheas, de acuerdo a la partitura (la duración más pequeña de nuestra melodía será una corchea). Se determinó que el ancho de cada compás en el cilindro sea de 12 mm, así el espacio que ocupará una negra es de 4 mm, y el de una corchea es de 2 mm. El perímetro de la circunferencia formada por el cilindro será de 252 mm, lo que representa el ancho del cilindro abierto. Mientras que el diámetro del cilindro será de 82,12 mm. El material utilizado fue Acero Perforado Ovako 280.

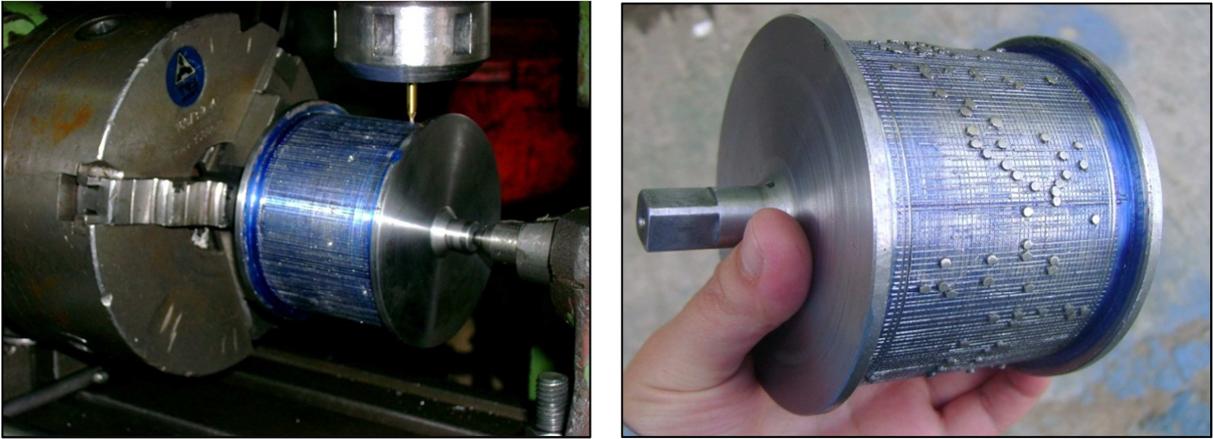
Foto 3.16: Cilindro antes de ser procesado.



Fuente: Autora, 2011.

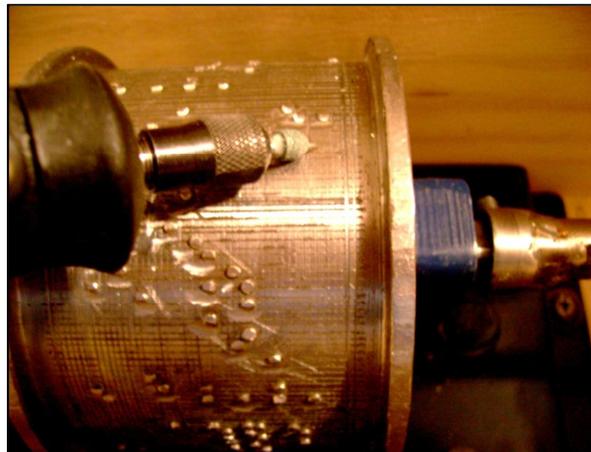
El registro de nuestra melodía va desde el Mi6 hasta el Re8, en un principio se comenzará el teclado desde la nota Mib6, de tal manera que se completen dos octavas, con doce semitonos cada una, es decir 24 dientes en la peineta. El alto de cada diente será de 1 mm y dejaremos 1 mm entre cada diente, así el alto total de la peineta y del cilindro será de 48 mm. Cada pin, que pulsará un diente del peine, produciendo el sonido, tiene un largo de 2 mm y un ancho de la misma medida. En vista de que los pines eran muy grandes, se utilizó una herramienta rotativa para lijado, con el fin de reducir el tamaño de los pines.

Foto 3.17 y 3.18: Imágenes antes y después de la perforación del cilindro para la colocación de los pines.



Fuente: Autora, 2011.

Foto 3.19: Lijado de pines para corrección de posiciones erróneas.



Fuente: Autora, 2011.

Refiérase al anexo 3 para ver el diseño del cilindro en Autocad. El anexo 4 muestra la partitura de la cual partimos para el diseño del cilindro

3.3.3 Peineta

Como se mencionó antes, el teclado, peine o peineta constará de 24 dientes, representando dos octavas, desde el Mib6 y terminará en Re8. El tema actual es un caso de vibraciones transversales de una barra, por lo que para determinar el largo de cada diente es necesario establecer el material con el

cual se hará la peineta y el grosor del mismo. Luego de una búsqueda meticulosa en los principales dispensadores de acero, se determinó que el mejor acero a utilizarse sería el AISI 1045, cuyas especificaciones son detalladas a continuación:

Tabla 3-1: Propiedades mecánicas.

Densidad (kg/m ³)	7700 – 8030
Coeficiente de Poisson	0.27 – 0.30
Módulo de Elasticidad (GPa)	190 -210
Resistencia a la tracción(MPa)	585
Límite elástico (Mpa)	505
Elongación (%)	12
Reducción de superficie (%)	45
Dureza (HB)	170

Fuente: Autora, 2011.

Tabla 3-2: Composición.

Elemento	Peso %
C (carbono)	0.43 – 0.50
Mn (magnesio)	0.60 – 0.90
P (fósforo)	0.04 (máx.)
S (azufre)	0.05 (máx.)

Fuente: Autora, 2011.

Foto 3.20: Vista lateral de la peineta de 1 mm de espesor.



Fuente: Autora, 2011

Para el presente estudio y al tratar de un caso de barra delgada, se necesitará de las medidas de la densidad y del módulo de elasticidad, para establecer la velocidad de fase, con la siguiente fórmula $c = \sqrt{Y/\rho}$, pero al no tener una medida específica, utilizaremos la media de los rangos encontrados. Así tenemos que:

Densidad volumétrica = 7870 kg/m^3

Módulo de Elasticidad = $20,7 * 10^{10} \text{ Pa}$

Velocidad de Fase = $5126,639183$

Es necesario además calcular, el radio de giro de la barra K , donde $K = \frac{t}{\sqrt{12}}$ y t es el grueso de la barra, inicialmente se trabajó con una peineta de 1 mm de grosor. Como resultado:

Radio de Giro: $0,000288675 \text{ m}$

La fórmula para las frecuencias permitidas para las vibraciones transversales

de una barra prensada, libre es: $f = \frac{\pi c K}{8L^2} (1.194^2, 2.988^2, 5^2, 7^2, \dots)$

Donde la frecuencia fundamental estará determinada por: $f = \frac{\pi c K}{8L^2} \times 1.194^2$

Así tenemos que el largo de cada diente resulta de la siguiente fórmula:

$$L = 1.194 \sqrt{\frac{\pi c K}{8f}}$$

Dependiendo de la frecuencia, el largo de cada diente irá variando, así para la primera peineta de 1 mm de grosor, se utilizó la siguiente tabla:

Tabla 3-3: Longitudes y frecuencias de los dientes de la primera peineta.

Nota	Frecuencia (Hz)	L (m)	L (mm)
re# 6	2489,016	0,01824	18,24
mi6	2637,02	0,01772	17,72
fa6	2793,826	0,01722	17,22
fa#6	2959,955	0,01673	16,73
sol6	3135,963	0,01625	16,25
sol#6	3322,438	0,01579	15,79
la6	3520	0,01534	15,34
la#6	3729,31	0,0149	14,9
si6	3951,066	0,01448	14,48
do7	4186,009	0,01407	14,07
do#7	4434,922	0,01366	13,66
re7	4698,636	0,01328	13,28
re#7	4978,032	0,0129	12,9
mi7	5274,041	0,01253	12,53
fa7	5587,652	0,01217	12,17
fa#7	5919,911	0,01183	11,83
sol7	6271,927	0,01149	11,49
sol#7	6644,875	0,01116	11,16

Fuente: Autora, 2011.

Continúa en la siguiente pág....

Tabla 3-3: Longitudes y frecuencias de los dientes de la primera peineta.

Nota	Frec. (Hz)	L (m)	L (mm)
la7	7040	0,01085	10,85
la#7	7458,62	0,01054	10,54
si7	7902,133	0,01024	10,24
do8	8372,018	0,00995	9,95
do#8	8869,844	0,00966	9,66
re8	9397,273	0,00939	9,39

Fuente: Autora, 2011.

Para la construcción de la primera peineta, se utilizó una lámina de acero AISI 1045 de 48 mm de alto, 40 mm de ancho y de 1 mm de grueso. Al final de cada diente se realizaron pequeños destajes, para una mejor ejecución de la melodía. Para fijar la peineta en la bancada, se colocaron dos tornillos equidistantes desde el centro de la altura de la peineta. La distancia entre el peine y la superficie del cilindro será de aproximadamente medio mm, esta distancia es graduable. Finalmente la peineta es colocada a la altura del centro del cilindro.

Al constatar con la primera peineta que el grueso de nuestra componente era demasiado grande y que por ende la vibración tenía poca amortiguación, se pensó en hacer una peineta con la mitad de ese grueso, es decir 0,5 mm. De manera que:

Radio de giro es: 0,000144338 m

La siguiente tabla con las mismas frecuencias planteadas en un principio, es el resultado de aplicar el nuevo radio de giro en la fórmula $L = 1.194 \sqrt{\frac{\pi c \kappa}{8f}}$

Tabla 3-4: Long. y frecuencias de los dientes de la segunda peineta.

Nota	Frecuencia (Hz)	L (m)	L (mm)
re# 6:	2489,016	0,01290	12,90
mi6	2637,02	0,01253	12,53
fa6	2793,826	0,01217	12,17
fa#6	2959,955	0,01183	11,83
sol6	3135,963	0,01149	11,49
sol#6	3322,438	0,01116	11,16
la6	3520	0,01085	10,85
la#6	3729,31	0,01054	10,54
si6	3951,066	0,01024	10,24
do7	4186,009	0,00995	9,95
do#7	4434,922	0,00966	9,66
re7	4698,636	0,00939	9,39
re#7	4978,032	0,00912	9,12
mi7	5274,041	0,00886	8,86
fa7	5587,652	0,00861	8,61
fa#7	5919,911	0,00836	8,36
sol7	6271,927	0,00813	8,13
sol#7	6644,875	0,00789	7,89
la7	7040	0,00767	7,67
la#7	7458,62	0,00745	7,45
si7	7902,133	0,00724	7,24
do8	8372,018	0,00703	7,03
do#8	8869,844	0,00683	6,83
re8	9397,273	0,00664	6,64

Fuente: Autora, 2011.

Si se elegía tener las mismas frecuencias en los dientes de la peineta, era de esperarse que la longitud variara, pero con dientes tan pequeños de poco más de 0.5 cm de largo, el riesgo de lastimar los dientes con los pines del cilindro

aumentaría. Por ello se eligió transponer la melodía una octava más grave, resultando dientes con las mismas longitudes del principio, en una peineta que abarca notas desde el Mib5 o R#5 a Re7. Los resultados finales serían:

Tabla 3-5: Longitudes y frecuencias de los dientes de la tercera peineta.

Nota	Frecuencia (Hz)	L (m)	L (mm)
re# 5	1244,508	0,01824	18,24
mi5	1318,51	0,01772	17,72
fa5	1396,913	0,01722	17,22
fa#5	1479,978	0,01673	16,73
sol5	1567,982	0,01625	16,25
sol#5	1661,219	0,01579	15,79
la5	1760	0,01534	15,34
la#5	1864,655	0,01490	14,90
si5	1975,533	0,01448	14,48
do6	2093,005	0,01407	14,07
do#6	2217,461	0,01366	13,66
re6	2349,318	0,01328	13,28
re#6	2489,016	0,01290	12,90
mi6	2637,02	0,01253	12,53
fa6	2793,826	0,01217	12,17
fa#6	2959,955	0,01183	11,83
sol6	3135,963	0,01149	11,49
sol#6	3322,438	0,01116	11,16
la6	3520	0,01085	10,85
la#6	3729,31	0,01054	10,54
si6	3951,066	0,01024	10,24
do7	4186,009	0,00995	9,95
do#7	4434,922	0,00966	9,66
re7	4698,636	0,00939	9,39

Fuente: Autora, 2011.

Foto 3.21: Peineta final de 0,5 mm.



Fuente: Autora, 2011.

El anexo 5 muestra el plano de la última peineta realizada.

3.3.4 Manivela

Fue hecha de hierro. Es una pieza que tienen dos partes, la primera está fija a un extremo del cilindro y la otra es el mango que hace girar al cilindro. De esta manera realizamos la transformación del movimiento circular del cilindro en el movimiento rectilíneo de la manivela. Se realizaron dos manivelas. La primera fue tan solo un ejemplo a escala de lo que iba a ser la manivela final, y era utilizada en el movimiento sin caja, para probar de esta manera la efectividad del trabajo, del funcionamiento de la peineta y el cilindro.

Foto 3.22: Primera manivela fabricada.



Fuente: Autora, 2011.

La segunda y definitiva manivela está dispuesta de manera que debe ser accionada por afuera de la caja. Esta manivela tendrá aproximadamente 1 cm de grosor. Para ver las medidas de las distancias que atraviesa la manivela, refiérase al anexo 5, donde se muestra el diseño del ensamblaje de las partes del prototipo de la caja musical.

Foto 3.23: Segunda y definitiva manivela.



Fuente: Autora, 2011.

3.3.5 Bancada

En vista de que nuestro movimiento es accionado por manivela y no tiene un regulador de velocidad, la bancada debe ensamblar el teclado, el cilindro y la manivela en un solo dispositivo. El cilindro es suspendido en el aire gracias a dos columnas coladas cada una a un extremo de las tapas del cilindro, ambas columnas son unidas a la bancada gracias a unos pernos ubicados en las bases de ellas. Lo mismo pasa con la peineta que debe ser colocada de manera perpendicular al cilindro y a la altura de la mitad de este.

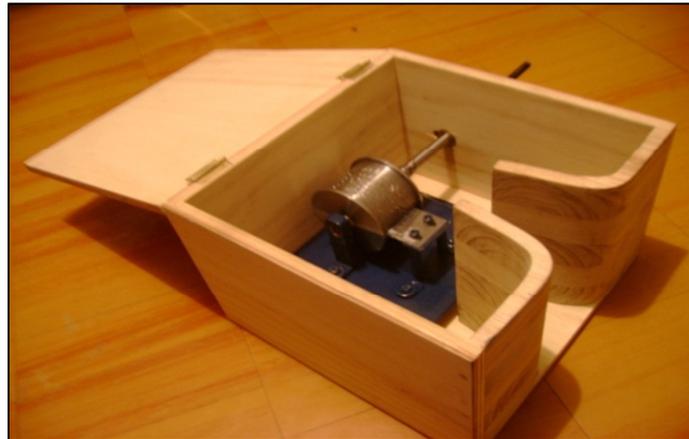
Foto 3.24: Bancada del movimiento con soporte para el peine y el cilindro.



Fuente: Autora, 2011.

La bancada será posicionada al espaldar de la caja de madera y será unida a ésta, a través de cuatro tornillos, ubicados cada par a un lado de la bancada. Para la construcción de la bancada se utilizó acero de transmisión que se emplea para estructuras de apoyo, es fácil de encontrar en el mercado y cuyo precio es conveniente.

Foto 3.25: Última manivela que sale al exterior de la caja.



Fuente: Autora, 2011.

Como se mencionó antes se puede ver el diseño del ensamblaje donde constan: teclado, cilindro, manivela y bancada en el anexo 6.

3.3.6 Caja

Desde principios del siglo XIX la mayoría de movimientos fueron colocados en cajas rectangulares de madera, con el fin de protegerlos del polvo y de otros factores externos. Puesto que en épocas anteriores los fabricantes no tenían vastos conocimientos para mejorar la calidad acústica de este pequeño recinto, era de esperarse que su preocupación no recayera tanto en el diseño de la caja como en otros elementos del movimiento. Apenas hubo pequeños avances como colocar una delgada cámara de resonancia de madera por encima del movimiento.

En este trabajo se eligió utilizar principios de bocinas para amplificar el sonido del movimiento. El diseño parte de una caja de 33 x 33 cm de largo por ancho con 23 cm de altura. Una de las caras frontales de esta caja es reemplazada por un cono de forma exponencial. Para encontrar las medidas de la curva exponencial, debemos tener la coordenada inicial y la coordenada final de la

curva de la bocina proyectada en el plano inferior de la caja, en este caso se eligió (0,0) y (10.5 , 10.5) respectivamente; esto quiere decir que la curva exponencial tendrá un ancho de 10.5 cm y un largo de 10.5 cm.

Foto 3.26: Cuatro lados de la caja que contendrá al movimiento.



Fuente: Autora, 2011.

La siguiente fórmula es la ecuación de una curva exponencial:

$$y = C \times e^x + A$$

Donde: C y A son las constantes que debemos determinar y así poder encontrar distintos valores de y para dibujar la curva.

En la coordenada (0,0) tenemos:

$$C + A = 0$$

En la coordenada (10.5, 10.5) tenemos:

$$C(e^{10.5}) + A = 10.5$$

Con estas dos igualdades podemos determinar que:

$$C = 0,00028914068$$

$$A = -0,00028914068$$

Por lo tanto:

$$y = 0,00028914068 \times e^x - 0,00028914068$$

Así obtenemos la siguiente tabla y su gráfico hecho en Excel:

Foto 3.27: Vista superior de la caja con bocina.



Fuente: Autora, 2011.

Tabla 3-6: Coordenadas para la curva exponencial de la bocina.

X	Y
0	0,00
0,5	0,00
1	0,00
1,5	0,00
2	0,00
2,5	0,00
3	0,01
3,5	0,01
4	0,02
4,5	0,03
5	0,04
5,5	0,07
6	0,12
6,5	0,19
7	0,32
7,5	0,52
8	0,86
8,5	1,42
9	2,34
9,5	3,86
10	6,37
10,5	10,50

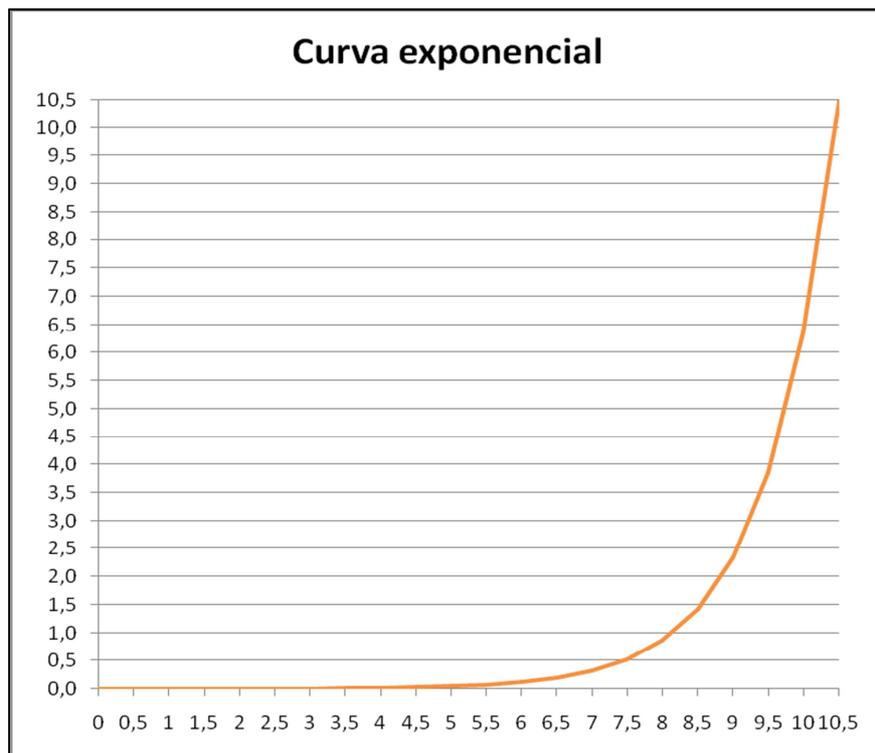
Fuente: Autora, 2011.

Foto 3.28: Vista frontal de la caja con bocina.



Fuente: Autora, 2011.

Foto 3.29: Curva exponencial de la bocina de la caja.



Fuente: Autora, 2011.

Para dejar salir a la manivela y que esta pueda ser utilizada por el usuario, se realizó un pequeño orificio en una de las caras laterales de la caja.

Los diseños en Autocad de la caja con bocina se muestran en el anexo 7 y adicionalmente se adjunta un zoom de un ala de la bocina exponencial en el anexo 8.

Foto 3.30: Acabado final de la caja con bocina exponencial.



Fuente: Autora, 2011.

3.4 COSTOS

Tabla 3-7: Costos de diseño, construcción y acabados.

MOVIMIENTO		
	Materia prima	Mano de obra
Cilindro	\$ 50	\$ 100
Peineta	\$ 15	\$ 60
Manivela	\$ 10	\$ 30
Bancada	\$ 10	\$ 10
CAJA		
	Materia prima	Mano de obra
Caja sin pintar	\$ 40	\$ 60
Pintura	\$ 20	\$ 30
LIJADO DE PINES		
	Costo	
Herram. rotativa de velocidad	\$ 40	
Tapones para protección	\$ 2	
Respirador purificador de aire	\$ 10	
Gafas protectoras para lijado	\$ 5	
ENCUESTAS		
	Costo	
Copias	\$ 2	

COSTO TOTAL: \$494

Fuente: Autora, 2011.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 MEDICIÓN DE RESULTADOS

Si queremos cuantificar los resultados del presente trabajo o si lo que se desea es ser más objetivos al momento de evaluar la viabilidad de este proyecto a futuro, será necesario medir las frecuencias de cada uno de los dientes de la peineta. Pero antes debemos medir la longitud real de la peineta y de los dientes, para así comprobar que el fabricante de la peineta cumplió con lo encargado en el diseño.

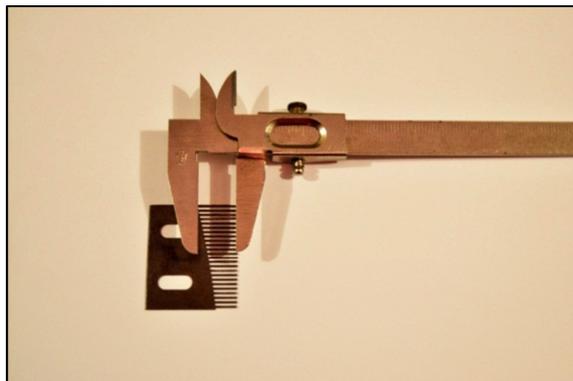
Al medir la longitud real de la peineta con la ayuda de un micrómetro y de una lupa, se pudo evidenciar que el grueso real de la peineta es de aproximadamente 0,7 milímetros, es decir, un poco más grueso de lo que se había pedido, pero aquella diferencia, por más pequeña que sea, causa grandes cambios, ocasionando que las frecuencias resultantes disten mucho de las calculadas. El resultado debería ser por ende, que las frecuencias emitidas por la peineta estén transpuestas más arriba. Sin embargo si el grueso fue constante en toda la superficie de la peineta, la distancia musical entre las lengüetas debería conservarse en un semitono y la diferencia sería únicamente que las peinetas emiten un sonido más agudo del esperado, pero manteniendo siempre una ejecución musicalmente lógica.

Foto 4.1: Utilización de un micrómetro y de una lupa para medir el grueso de la peineta.



Fuente: Autora, 2011.

Foto 4.2: Medición con micrómetro de las longitudes de cada una de las lengüetas.



Fuente: Autora, 2011.

Luego se procedió a medir con el micrómetro la longitud de las peinetas, pero debido a la tecnología limitada disponible, tan sólo se pudieron realizar las mediciones en metros con cuatro decimales y no los cinco con los que se había calculado el diseño. Es necesario entonces acotar, que de igual manera las ínfimas diferencias en las medidas de los dientes, imperceptibles al ojo humano, representan grandes cambios en la escala musical. A continuación se muestra la tabla de las longitudes medidas, siendo la lengüeta No.1 la de mayor tamaño, mientras que la lengüeta No.24 será la de menor tamaño. Entre paréntesis se denota la nota supuesta calculada en el diseño.

Tabla 4-1: Longitudes medidas de las lengüetas vs longitudes calculadas.

Lengüeta	L (m) medidas	L (mm) calculadas
1 (re# 5)	0,0182	0,01824
2 (mi5)	0,0177	0,01772
3 (fa5)	0,0167	0,01722
4 (fa#5)	0,0167	0,01673
5 (sol5)	0,0162	0,01625
6 (sol#5)	0,0158	0,01579
7 (la5)	0,0153	0,01534

Fuente: Autora, 2011. Continúa en la siguiente pág....

Tabla 4-1: Longitudes medidas de las lengüetas vs longitudes calculadas.

Lengüeta	L (m) medidas	L (mm) calculadas
8 (la#5)	0,0150	0,01490
9 (si5)	0,0145	0,01448
10 (do6)	0,0140	0,01407
11 (do#6)	0,0137	0,01366
12 (re6)	0,0133	0,01328
13 (re#6)	0,0129	0,01290
14 (mi6)	0,0126	0,01253
15 (fa6)	0,0122	0,01217
16 (fa#6)	0,0118	0,01183
17 (sol6)	0,0115	0,01149
18 (sol#6)	0,0112	0,01116
19 (la6)	0,0107	0,01085
20 (la#6)	0,0105	0,01054
21 (si6)	0,0102	0,01024
22 (do7)	0,0099	0,00995
23 (do#7)	0,0096	0,00966
24 (re7)	0,0094	0,00939

Fuente: Autora, 2011.

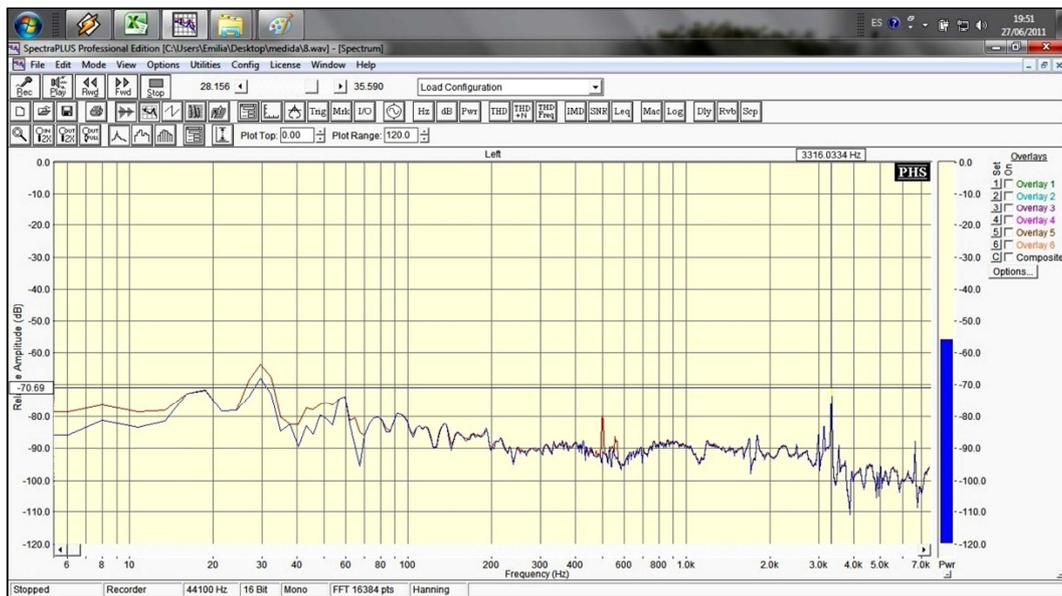
En la anterior tabla se puede apreciar que hay ciertas lengüetas que difieren de las medidas indicadas en el diseño, el caso más crítico es el de la lengüeta No.3, pero en general se conservan los mismos valores. Posteriormente se midieron las frecuencias de las lengüetas, pulsándolas con una aguja; para ello se utilizó un micrófono de medición y la ayuda del software SpectraPLUS 5.0. Se realizaron tres mediciones por diente y luego se las promediaron.

Foto 4.3: Mediciones de las frecuencias de cada una de las lengüetas.



Fuente: Autora, 2011.

Foto 4.4: Programa SpectraPLUS captando las frecuencias de la peineta.



Fuente: Autora, 2011.

A continuación se adjunta una tabla con las mediciones resultantes:

Tabla 4-2: Tabla resultante, con las longitudes y las frecuencias reales. La lengüeta No.1 es la más grande, mientras que la No.2 es la más pequeña.

Lengüeta	f Medida (Hz)	f Calculada (Hz)
1	2987,878	1244,508
2	2327,039	1318,51
3	2495,361	1396,913
4	2495,361	1479,978
5	2725,514	1567,982
6	2955,089	1661,219
7	3125,021	1760
8	3316,351	1864,655
9	3521,169	1975,533
10	3738,900	2093,005
11	3936,355	2217,461
12	4205,625	2349,318
13	4460,399	2489,016
14	4661,561	2637,02
15	4980,438	2793,826
16	5561,107	2959,955
17	5727,075	3135,963
18	6118,842	3322,438
19	6301,455	3520
20	6933,441	3729,31
21	7088,063	3951,066
22	7299,601	4186,009
23	7798,939	4434,922
24	8150,662	4698,636

Fuente: Autora, 2011.

Como era de esperarse, en vista de que el grueso de la peineta no fue el diseñado, los valores de las frecuencias medidas y las frecuencias diseñadas distan mucho. Hay que destacar ciertos casos: la lengüeta No.1 emite una frecuencia más aguda que la lengüeta No.2, lo cual no es lógico, pero al ver la lengüeta se aprecia a simple vista que no tiene la misma densidad que las otras lengüetas, lo cual seguramente produce aquel cambio de frecuencia. Luego tenemos el caso de la lengüeta No.3 que mantiene la misma frecuencia que la lengüeta No.4, la explicación está en la Tabla 4-1 donde se aprecia el hecho de que ambas lengüetas comparten la misma longitud.

Para saber si las lengüetas están separadas en razón de un semitono, se debe tomar en cuenta la siguiente tabla de la afinación diatónica. Aplicando dicha afinación y utilizando los nombre de las notas del diseño como referencia (re#5 – re7), podemos evidenciar que muchos de los valores de la peineta coinciden y que por ende se está cumpliendo con la teoría que hemos aplicado.

Tabla 4-3: Afinación diatónica.

Nota	Frec. fundamental [Hz]
do ₄	$f_{do4} = 256$
re ₄	$f_{re4} = 9 / 8 * f_{do4}$
mi ₄	$f_{mi4} = 9 / 8 * f_{re4}$
fa ₄	$f_{fa4} = 256 / 243 * f_{mi4}$
sol ₄	$f_{sol4} = 9 / 8 * f_{fa4}$
la ₄	$f_{la4} = 9 / 8 * f_{sol4}$
si ₄	$f_{si4} = 9 / 8 * f_{la4}$
do ₅	$f_{do5} = 256 / 243 * f_{si4}$

Fuente: Autora, 2011.

Tabla 4-4: Tabla de las frecuencias medidas vs frecuencias calculadas en base a la afinación diatónica.

Lengüetas	f. Medidas (Hz)	f. Afinadas (Hz)
1 (re# 5)	2987,878	2987,878
2 (mi5)	2327,039	3361,36275
3 (fa5)	2495,361	2451,530798
4 (fa#5)	2495,361	2617,918875
5 (sol5)	2725,514	2807,281125
6 (sol#5)	2955,089	2807,281125
7 (la5)	3125,021	3066,20325
8 (la#5)	3316,351	3324,475125
9 (si5)	3521,1685	3515,648625
10 (do6)	3738,9	3709,54377
11 (do#6)	3936,355	3961,314563
12 (re6)	4205,625	4206,2625
13 (re#6)	4460,399	4428,399375
14 (mi6)	4661,561	4731,328125
15 (fa6)	4980,438	4910,944922
16 (fa#6)	5561,107	5244,256125
17 (sol6)	5727,075	5602,99275
18 (sol#6)	6118,842	6256,245375
19 (la6)	6301,455	6442,959375
20 (la#6)	6933,441	6883,69725
21 (si6)	7088,063	7089,136875
22 (do7)	7299,601	7467,259786
23 (do#7)	7798,939	7974,070875
24 (re7)	8150,662	8212,051125

Fuente: Autora, 2011.

4.2 CONCLUSIONES

- No cabe duda del interés de muchos ecuatorianos en la cultura musical nacional. Sin embargo, debemos destacar que ésta ha sido olvidada en los últimos años por parte de la mayoría de la población de edad joven y adulta. Durante la realización de las encuestas se pudo evidenciar que ni los propios estudiantes de música tienen buenos conocimientos al respecto, mucho menos los estudiantes de Ingeniería Acústica y en Sonido. Esto no sólo es el reflejo de un descuido por parte de las autoridades educativas, sino que además nos habla de una cierta actitud apática que poseen los ecuatorianos hacia temas relacionados con su identidad nacional. Por ello no sería sorpresa alguna que una caja musical de temas tradicionales ecuatorianos no demandase mayor interés que una caja musical con temas populares extranjeros. Aun así el riesgo de comenzar esta nueva industria, serviría para incentivar el consumo de objetos con significado cultural.
- Es admirable el trabajo que realizaban las fábricas de cajas musicales en tiempos pasados, elaborando cajas musicales que reproducían sonido continuo por hasta 3 horas. Pero estos modelos exigían conocimientos bastante profundos de Ingeniería Mecánica, mucha experiencia en trabajos de mecánica de precisión y gran capital para invertir en la construcción de máquinas diseñadas solamente para esta tarea. Si se desarma una caja musical infantil, se puede constatar en el cilindro la simpleza de su melodía, pero incluso en estos pequeños objetos, es evidenciable un diseño mecánico que implica vastos conocimientos en la materia. Por tal razón es obvio que si se hubiese elegido una melodía mucho más simple o en todo caso reducir el número de compases que iban a ser ejecutados, nuestro trabajo se hubiese simplificado, reduciendo de esa forma los costos y el tamaño de nuestro prototipo.

- La peineta está formada por 24 dientes, representando dos octavas completas, es decir 24 semitonos. Para la elaboración de la peineta, era necesario calcular el largo de cada pequeño diente, mediante una fórmula que relacionaba el grueso, el módulo de Young, la densidad volumétrica del material con que se fabricaría la peineta y la frecuencia a la cual se quería hacer vibrar cada uno de los dientes. Los valores obtenidos mediante la aplicación de dicha fórmula, fueron milimétricos y redondeados con dos decimales en vista de la limitación de la tecnología necesaria para hacerlo con una precisión absoluta. Como resultado la afinación del peine no es exacta. En un principio se pensó que esto se debía a que el grueso del peine no era lo suficientemente pequeño como para que la fórmula encontrada pudiera ser aplicable. Pero luego se disminuyó el grueso y a pesar de eso no se logró algún cambio significativo en la afinación, a parte de la transposición a una octava inferior. Y es que en medidas como 9,66 milímetros, si se aproxima a un decimal, es decir 9,7 es imposible determinar la diferencia a simple vista, pero en la aplicación esos pequeños cambios en los valores representan desafinaciones en la peineta.
- Ya que la peineta fue hecha gracias a los resultados obtenidos mediante la utilización de fórmulas de la teoría de ondas transversales, el timbre de su sonido dista mucho del sonido que genera una peineta en una caja musical normal. Y es que aquellas peinetas tenían en la punta de sus dientes pequeños amortiguadores en forma de pesos, que eran dispuestos así para realizar las últimas afinaciones en la peineta, debido a que la longitud de los dientes no era calculada, sino que simplemente se trataba de un proceso empírico con una pendiente que atravesaba toda la peineta al inicio de los dientes. Se resolvió por ende que en reemplazo de estos amortiguadores, se realizaría un pequeño destaje en la punta de los dientes, para que la pulsación de los dientes de la peineta no fuera tan brusca y produjese un sonido bronco. Este fue otro factor que afectó la afinación de la peineta de nuestro prototipo, en vista de que en la fórmula utilizada, el valor del grueso cambió; se esperaba

que esto no pasase, ya que al ser igual el destaje en cada diente, el valor del grueso también sería igual; sin embargo reiteramos que los procesos fueron artesanales y por eso no se puede asegurar que los destajes hayan sido iguales en cada diente.

- En los primeros años de las cajas musicales, éstas eran el trabajo de personas con extensos conocimientos artesanales de relojería. Posteriormente se establecieron fábricas y se crearon máquinas especializadas en esta labor, con el fin de satisfacer la demanda de los consumidores, los cuales tenían en las cajas musicales una de las pocas formas de llevar la música hasta su casa, puesto que no contaban con un reproductor de disco, casete, CD o mp3 como pasa en la actualidad. Ecuador no es un país de tradición relojera, por tanto esperar una buena labor artesanal es ser muy idealista y en vista de que construir maquinaria especializada en la fabricación de las partes de las cajas musicales resultaría muy costoso, se eligió realizar el cilindro del prototipo del presente trabajo de una manera artesanal. Debido a las limitaciones tecnológicas tan sólo se pudo colocar en el cilindro pines de 2 milímetros de ancho, 2 milímetros de largo y 1 milímetro de alto. Así se obtuvo finalmente la colocación de aproximadamente 200 pines; pero al ser esta actividad realizada de una forma artesanal, muchos de los pines fueron colocados en una posición incorrecta, ocasionando por ejemplo que se pulsen dos dientes contiguos en la peineta, o en ocasiones ciertos pines lastimen la misma. Luego, con la ayuda de una herramienta rotativa de lijado y mucha paciencia, se procedió a tratar de corregir estos errores, y aunque se logró mejorar en algo la reproducción del sonido, está claro que nunca se podría obtener el mismo resultado que con máquinas de precisión, ni si quiera con un plazo de tiempo más amplio para perfeccionar el lijado, simplemente hay un retraso tecnológico abismal con respecto a otros países.

- Es clara la necesidad de que este trabajo sea de mucha precisión. Los resultados no fueron los esperados, no sólo por la posición incorrecta de los pines o las aproximaciones de las longitudes de los dientes de la peineta; el hecho de utilizar una herramienta rotativa manual de lijado, evidentemente aumentó las asimetrías en las alturas de los pines del cilindro, resultando pines tan bajos que apenas rozan la peineta, reduciendo así la respuesta mecánica del movimiento. Sin embargo era necesario un proceso para bajar la masa de los pines y que estos no lastimen los dientes de la peineta, además se necesitaba corregir un poco las pequeñas fallas de las posiciones de los pines en la superficie del cilindro. Para alcanzar este objetivo se hubiera necesitado tener las habilidades de un relojero que trabaje con instrumentos de precisión y que tenga varios años de experiencia, como para que cada pequeño pin sea tratado de igual manera y en caso de que haya algún error este sea retirado y colocado de nuevo. Una vez más se concluye que el número de pines era exagerado como para ser parte de un prototipo, ya que dicho trabajo le hubiera tomado mucho más tiempo a la persona encargada y sin duda alguna hubiera representado un costo más alto del proyecto.
- Un pequeño movimiento musical está expuesto a varios factores externos que pueden dañar su delicado diseño. Ésta era la razón más sobresaliente para colocar un movimiento en una caja y así formar la caja musical tal y cómo la conocemos. Pero además el movimiento produce por si sólo sonidos de muy leve intensidad y la madera ayuda a amplificar su sonoridad. Puesto que es sabido que en transmisión acústica, la madera es uno de los mejores materiales; ya que existe una relación entre la velocidad de transmisión del sonido y el módulo de elasticidad del material, en este caso la madera. De todas maneras en una caja musical completamente cerrada, el sonido sería opacado, es por eso que eligió un diseño tipo bocina exponencial en la parte frontal,

sin embargo los más altos niveles sonoros se obtienen con la tapa abierta de la caja del prototipo. La bocina exponencial de por sí no es totalmente responsable de la amplificación del sonido, todo el sistema se encarga de ese trabajo y la bocina además, direcciona toda la energía sonora producida por el movimiento. Así que aunque la intensidad del sonido de la caja cerrada es inferior al de la caja abierta, podemos afirmar que la caja con bocina cumple con su propósito pues amplifica en algo el nivel sonoro del movimiento y protege al mismo tiempo el movimiento de factores como el polvo o el maltrato irresponsable del usuario.

- Como es sabido, la música y las matemáticas están estrechamente relacionadas. La matemática es una de las bases principales para los conceptos musicales tales como: la altura, la duración, la intensidad, etc. Por ejemplo en la escala musical se sabe que el oído musical percibe los sonidos, cuyas frecuencias están en proporción simple $2/1$, $3/2$, $4/3$, etc. como sonidos agradables. En softwares como Reason y Finale, la relación de la música y las matemáticas se torna indiscutible. De igual manera al construir un instrumento musical o como en este caso, un instrumento musical mecánico, la matemática es indispensable en el desarrollo del diseño para la construcción y como se comprueba en el presente trabajo, no se puede descuidar ni el más mínimo detalle, porque entonces los resultados jamás llegarán a ser los esperados. Sin embargo la mayoría de las personas ignoran esta importante relación, pensando así que la música es tan sólo un arte más, olvidando la ciencia que representa y la lógica matemática que viene con ella. Incluso muchos de los jóvenes que se sienten atraídos hacia esta rama, desconocen de la dependencia de la una con la otra. Un músico que pretenda ser respetado, debe tener muy claro este concepto, de lo contrario demuestra poca pasión en su tarea, ya que no sabe qué está haciendo, ni cómo se generan los sonidos.

- Sólo el hecho de realizar una manivela con engranajes requiere de conocer la teoría para el cálculo de los mismos; con ellos se hubiera podido obtener un movimiento más constante que al tener la manivela directamente articulada desde el cilindro. Mientras que para tener una caja de música a cuerda, se necesitaría fabricar un regulador de velocidad, de forma que nuestro prototipo tendría características óptimas en su funcionamiento. No es necesario ser Ingeniero Mecánico para darnos cuenta de la dificultad en ambos procesos para un Ingeniero en Sonido y Acústica. Es por ello que se concluye que los instrumentos musicales mecánicos son verdaderas obras de arte y de ingenio subestimadas. Detrás de pequeños juguetes como las cajas musicales infantiles, se esconden años de investigación y perfeccionamiento, fusionando conocimientos de acústica y mecánica. Si se detiene la producción de estos objetos, como ha venido pasando en los últimos años, estaríamos lapidando un arte hermosísimo e invaluable.

4.3 RECOMENDACIONES

- Al construir un instrumento musical, sea del tipo que sea, no hay que sorprenderse si es que se deben hacer varios intentos en la construcción del mismo para estar totalmente seguros y así llegar a los resultados esperados. Sin embargo, se pueden tomar en cuenta varios aspectos para acelerar este proceso. Por ejemplo siempre se debe partir de un prototipo o modelo de prueba, ya que el hacer el instrumento musical con exactamente todos los elementos involucrados, puede significar una gran inversión monetaria, en el caso de que no contemos con la maquinaria necesaria para hacerlo. Además está claro que un modelo a escala es mucho más útil en el momento en que queremos ver los errores cometidos. De igual manera si se muestra el prototipo al usuario, es más fácil modificar las partes del mismo en esta etapa temprana del desarrollo del sistema. Pero siempre se debe tener presente que el prototipo no es el sistema final, ya que muchos pueden pasar por alto

sus errores y exponer un diseño mediocre, no olvidar que ante todo siempre se debe tener mucha paciencia para alcanzar nuestro objetivo.

- No se puede esperar que la música ecuatoriana trascienda hacia otros países, si es que en el propio territorio no se la respeta ni se la valora. El desconocimiento de los grandes autores ecuatorianos, que en otras épocas brillaron en tierras ajenas, revela un profundo abismo en el sistema educativo nacional. Más allá de que la música de nuestros antepasados haya pasado de moda o de que simplemente no sea de nuestro agrado, está el hecho de que para poder transmitir nuestras ideas a foráneos mediante la música, primero debemos conocernos y esto implica saber nuestra historia. En el caso del Ingeniero Acústico y en Sonido ecuatoriano, es primordial este estudio, ya que si se pretende entrar en el mercado o cambiarlo, es necesario conocer el porqué de las falencias pasadas y enmendarlas en el futuro. Lastimosamente este es uno de los peligros de la globalización, la destrucción paulatina de la identidad cultural y territorial, por ello se deberían implementar más métodos para incentivar el consumo de productos ecuatorianos.
- Si se pretende hacer de este proyecto una futura industria, es necesario recordar que se debe priorizar la opinión del usuario o del consumidor, ya que en estos tipos de sistemas interviene mucho la subjetividad de los gustos personales del cliente para poder obtener éxito. Por eso se decidió realizar una encuesta y así ver cuáles eran las melodías más populares de la música tradicional ecuatoriana; sin embargo al evidenciar el poco interés de la sociedad en su cultura nacional, es probable que sea necesario reevaluar el enfoque del proyecto. Quizás se podría trabajar en conjunto con alguna institución preocupada por la difusión de la cultura ecuatoriana, buscando de esa manera algún auspicio o financiamiento para facilitar de alguna forma los procesos de fabricación y hacer que el proyecto sea rentable.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cuerpo técnico de Mecánica Popular: DICCIONARIO TÉCNICO INGLÉS ESPAÑOL, 1era edición, Editorial Omega INC., EEUU, 1969. (351 págs.)
- [2] Estévez, Mayra: ESTUDIOS SONOROS DESDE LA REGIÓN ANDINA, 1era edición, TRAMA ediciones, Ecuador, 2008. (123 págs.)
- [3] Hartog, Den: MECÁNICA DE VIBRACIONES, 10ma edición, CIA. Editorial Continental S. A. de C. V., México, 1982. (574 págs.)
- [4] Kinsler, Lawrence E.; Frey, Austin R.: FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS, 2da edición, John Wiley & Sons INC., EEUU, 1967. (524 págs.)
- [5] Mediavilla, Guillermo: EDUCACIÓN MUSICAL: SEGUNDO CURSO CICLO BÁSICO, 9na edición, Gráficas Mediavilla Hnos., 1989. (155 págs.)
- [6] Ord-Hume, Arthur W. J. G.: MUSICAL BOX: A HISTORY AND COLLECTOR'S GUIDE, 1era edición, G. Allen & Unwin, 1980. (409 págs.)

DIRECCIONES WEB

- <http://books.google.com.ec/books?id=xqbNIVUsTU4C&pg=PA109&dq=normal+modes+of+vibration&hl=es&ei=9bVpTMyFOsKBIAei7d2eBQ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=2&ved=0CC0Q6AEwAQ#v=onepage&q=normal%20modes%20of%20vibration&f=false> Martes, 01 de marzo de 2011: SCIENCE OF PERCUSSION INSTRUMENTS - GOOGLE LIBROS.
- <<http://es.5wk.com/viewtopic.php?f=4&t=30057>> Martes, 01 de marzo de 2011: EL PASILLO ECUATORIANO, ORGULLO NACIONAL.
- <[http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93rgano_\(instrumento_musical\)](http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93rgano_(instrumento_musical))> Martes, 01 de marzo de 2011: ÓRGANO (INSTRUMENTO MUSICAL) - WIKIPEDIA, LA ENCICLOPEDIA LIBRE.

- <http://es.wikipedia.org/wiki/Caja_de_m%C3%BAsica> Martes, 01 de marzo de 2011: CAJA DE MÚSICA - WIKIPEDIA, LA ENCICLOPEDIA LIBRE.
- <<http://grupoguitarra.wordpress.com/solfeo/las-escalas/>>Martes, 01 de marzo de 2011: LAS ESCALAS « GRUPO DE GUITARRA.
- <<http://labspace.open.ac.uk/mod/resource/view.php?id=378400>>Martes, 01 de marzo de 2011: 5.4 VIBRATING STRING: NORMAL MODES OF VIBRATION - CREATING MUSICAL SOUNDS - OPENLEARN - THE OPEN UNIVERSITY.
- <<http://latecladeescape.com/recetas-algoritmicas/frecuencia-de-las-notas-musicales.html>>Martes, 01 de marzo de 2011: FRECUENCIA DE LAS NOTAS MUSICALES - LA TECLA DE ESCAPE.
- <<http://lavidaenunpunto.blogspot.com/2009/07/anecdotas-del-pasional.html>>Martes, 01 de marzo de 2011: LA VIDA EN UN PUNTO: ANÉCDOTAS DEL "PASIONAL".
- <<http://members.fortunecity.es/grace/Pasillo.htm>>Martes, 01 de marzo de 2011: EL PASILLO.
- <http://musichouse.org/catalog/product_info.php?products_id=35&osCsid=69da355c34da7547ba8618ae05bd4486>Martes, 01 de marzo de 2011: MUSIC HOUSE MUSEUM.
- <<http://people.rit.edu/andpph/text-string-vibrations.html>>Martes, 01 de marzo de 2011: STRING VIBRATIONS.
- <<http://prof.usb.ve/orlandop/armonicossimple.html>>Martes, 01 de marzo de 2011: EL MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE.
- <<http://soymusicaecuador.blogspot.com/2010/03/musicos-en-andamio-ecuador-y-mexico.html>> Martes, 01 de marzo de 2011: MEMORIA MUSICAL DEL ECUADOR: MÚSICOS EN ANDAMIO: ECUADOR Y MÉXICO.

- <http://wapedia.mobi/en/Musical_box> Martes, 01 de marzo de 2011: WAPEDIA - WIKI: MUSICAL BOX.
- <<http://witcombe.sbc.edu/water/music.html>>Martes, 01 de marzo de 2011: H2O - THE MYSTERY, ART, AND SCIENCE OF WATER: MUSIC AND WATER.
- <http://www.achiras.net/web/pentagrama_nacional/3331.html>Martes, 01 de marzo de 2011: ENRIQUE GUSTAVO ESPÍN YÉPEZ.
- <http://www.antiquemusicboxes.co.uk/cylinder_pages/box167.htm>Martes, 01 de marzo de 2011: ANTIQUE CYLINDER MUSIC BOXES.
- <<http://www.arnovanderheijden.nl/shop2.html>>Martes, 01 de marzo de 2011: ARNO VAN DER HEIJDEN. RESTORATION, VALUATION AND SALE OF ANTIQUE MUSIC BOXES. SHOP.
- <<http://www.artiola.com/MusixBox.html>>Martes, 01 de marzo de 2011: MUSIC BOX FOR SALE - AMI RIVENC.
- <<http://www.azimadli.com/vibman-spanish/frecuencianatural1.htm>>Martes, 01 de marzo de 2011: FRECUENCIA NATURAL.
- <http://www.coleccionfb.com/pagina_nueva_28.htm>Martes, 01 de marzo de 2011: BOCINA.
- <<http://www.deanorgans.co.uk/images/musicaljewelleryboxes/musical-jewellery-boxes-j4a.jpg>>Martes, 01 de marzo de 2011: BEAUTIFUL MUSICAL JEWELLERY BOXES FROM MUSIC BOX WORLD UK, LUXURY JEWELLERY BOXES, BURR ELM.
- <<http://www.diarezzo.es/accesorio/partitura+cl%C3%A1sica/productos+musicales/Jazz/m%C3%A9todo+de+aprendizaje+musical/partitura+moderna/Diapason/WITTN00002.html>>Martes, 01 de marzo de 2011: DIAPASON - - - DIAREZZO, EL UNIVERSO DE LAS PARTITURAS.

- <http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon_steels/show_carbon.cfm?id=aisi_1045&prop=all&page_title=aisi%201045>Martes, 01 de marzo de 2011: PROPERTIES OF CARBON STEEL AISI 1045.
- <<http://www.holtzhausen.com/demo/productdetail.php?pid=114&cid=6&bid=9&mcid=2>>Martes, 01 de marzo de 2011: HOLTZHAUSEN CLOCKS, MUSIC BOXES, DISPLAY CASES.
- <http://www.iesmarenosttrum.com/departamentos/tecnologia/mecaneso/mecanica_basica/mecanismos/mec_sinfin-pinon.htm>Martes, 01 de marzo de 2011: MECANISMO SINFÍN - PIÑÓN.
- <<http://www.ma-boite-a-musique.com/>>Martes, 01 de marzo de 2011: CAJA DE MÚSICA, JOYERO, MECANISMO MUSICAL Y AUTÓMATA.
- <http://www.minidisc.org/music_box.html>Martes, 01 de marzo de 2011: REG SMITH'S MUSIC BOX RESTORATION WORK.
- <<http://www.musicalbox.be/?paged=2>>Martes, 01 de marzo de 2011: MUSICAL BOX - MUZIEKDOZEN, RESTAURATIE - PART 2.
- <<http://www.musicaperuana.com/espanol/mm.htm>>Martes, 01 de marzo de 2011: MUSICA Y MATEMÁTICAS.
- <<http://www.musicboxrestorations.com/portfolio.html>>Martes, 01 de marzo de 2011: ANTIQUE MUSIC BOX REPAIR AND RESTORATIONS PORTFOLIO.
- <http://www.oneofakindantiques.com/catalog/6163_antique_victorian_cylinder_music_box_1.htm> Martes, 01 de marzo de 2011: ANTIQUE VICTORIAN CYLINDER MUSIC BOX.
- <<http://www.patentesonline.com.mx/transductor-de-bocina-acustica-con-un-difusor-tipo-conico-que-tiene-un-perfil-exponencial-55922.html>>Martes, 01 de marzo de 2011: TRANSDUCTOR DE BOCINA ACUSTICA CON UN DIFUSOR TIPO CONICO QUE TIENE UN PERFIL EXPONENCIAL EN MADERA.

- <<http://www.pianomundo.com.ar/instrumentos/mecanicos.html>>Martes, 01 de marzo de 2011: LOS INSTRUMENTOS MECÁNICOS.
- <<http://www.reginamusicboxcenter.com/lookup.php?id=184>>Martes, 01 de marzo de 2011: REGINA MUSIC BOX CENTER: MERMOD FRERES IDEAL SUBLIME HARMONY PICCOLO INTERCHANGEABLE.
- <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/oscilaciones/amortiguadas/amortiguadas.htm>> Martes, 01 de marzo de 2011: OSCILACIONES AMORTIGUADAS.
- <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/din_rotacion/alargamiento/alargamiento.htm>Martes, 01 de marzo de 2011: MEDIDA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.
- <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/ondas/movimiento/vibracion_barra/vibracion_barra.xhtml>Martes, 01 de marzo de 2011: MOVIMIENTO ONDULATORIO.

6 ANEXOS

CANCIÓN	VOTOS
El Aguacate	43
Vasija de barro	34
El Alma en los Labios	34
Ángel de luz	21
El Chullita Quiteño	21
Pasional	16
La Naranja	14
Pobre Corazón	14
Nuestro Juramento	13
Andarele	12
5 Centavitos	11
Sombras	10
El Espantapájaros	10
Reir Llorando	8
La Caderona	8
La Bocina	7
Mi Chagrita Caprichosa	5
Mi Lindo Carpuela	5
Confesión	4
Invernal	4
La Vuelta del Chagra	4
Solo Tú	4
Apamuy Shungo	3
Caminos de la Vida	3
Cantares del Alma	4
Carnaval de Guaranda	3
Collar de Lágrimas	3
Si Tú Me Olvidas	3
Sueño Estival	3
Tú y Yo	3
Romance de mi Destino	3
Rosario de Besos	3
Al Besar de un Pétalo	2
Atajitos de Caña	2
Danza Ecuatoriana	2
Himno Nacional del Ecuador	2
Morena la Ingratitud	2
Pasillos	2
Poncho Verde	2
Santuario de Amor	2
Bomba Bomba	2
Al Morir de las Tardes	1
Alma Mía	1
Amarguras	1
Apasionadamente	1
Beatriz	1
Chimbacalle	1
Del Carchi al Macará	1
Despedida	1

Detrás de una Piedra	1
Dolencias	1
Dulce Jesús Mío	1
El Maicito	1
El Simiruco	1
Esposa	1
Fiesta Andina	1
Guayaquileña	1
Huasipungo	1
Lindo Quito de mi Vida	1
Los Pumisachos	1
Manabí	1
Mosaico el Paisano	1
Nocturnal	1
Ódiame	1
Odio y amor	1
Pañuelo Blanco	1
Pillaro Viejo	1
Primor de Chola	1
San Juanito del Recuerdo	1
San Juanito Futurista	1
Sangre Ecuatoriana	1
Solito	1
Tú	1
En Brazos de una Doncella	1
El Último Beso	1
Esta Pena Mía	1
El Huiracchurito	1
Subiendo el Cerro	1
Ojos Verdes	1
Ambato Tierra de Flores	1
La Canción de los Andes	1
Romántico Quito Mío	1

CANCIÓN	VOTOS
En Vida	6
El Secreto	5
Candela	2
Chúpate la Plata	1
Cuando Me Fui	1
Fabiolita	1
Guerra	1
Hijo del Monte	1
Lola	1
Mi Cielito Lindo	1
Mi Destino Es Como El Viento	1
Mi Vida Es Un Yahuarlocro	1
Niña Chay	1
Ojos Cual Dos Luceros	1
Sentada en un Bar	1
Te Acuerdas de Mí	1
Curaray	1
Mi Linda Cuenca	1
Rosa Chumada	1
La Rosa de los Vientos	1
Toros de San Pedro	1
Angélica	1

CANCIONES	VOTOS
Cuando llora mi guitarra	5
Ojos Azules	5
El Cóndor Pasa	2
Merceditas	1
Ojos Negros	1
Mi Cajita de Música	1
Alma Corazón y Vida	1

Enrique Espín Yépez y el Pasillo Pasional

Foto 1: Enrique Espín Yépez (1946).



Fuente: Internet,
<http://es.wikipedia.org/wiki/Enrique_Esp%C3%ADn_Y%C3%A9pez>,
2011.

Enrique Espín Yépez (9 de noviembre de 1926 - 21 de mayo de 1997) fue compositor y músico quiteño de nacimiento, que se radicó en México en 1969, donde murió a la edad de 70 años. Nació en el Barrio de San Roque y fue hijo de Delia Yépez y de Manuel María Espín, compositor de canciones populares ecuatorianas y profesor de clarinete en el CNM. Tuvo una gran formación académica, primero estudió piano, luego violín y conducción orquestal.

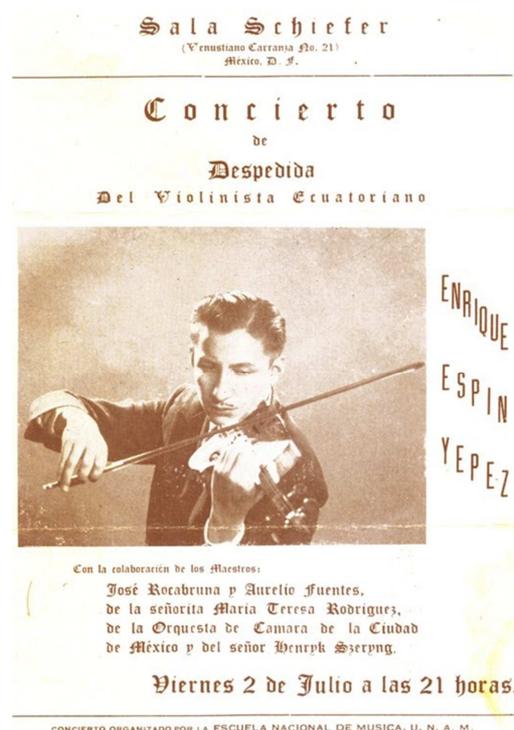
En la década de los 40's conoce al reconocido violinista polaco-mexicano Henryk Szeryng, quien visitaba por aquel entonces tierras ecuatorianas. Éste lo invita a estudiar en la UNAM, donde Szeryng era profesor. En 1944 Enrique Espín Yépez viaja a México y es acogido como alumno de Henryk Szeryng y de Manuel M. Ponce, principal representante del nacionalismo en aquel país. De regreso a Ecuador es nombrado profesor de violín del Conservatorio. Con el Cuarteto Quito realiza gran actividad, muchos de los discos de aquella época tiene a Espín Yépez como violinista. Fue Director Nacional de Educación Musical, logrando incorporar a la asignatura de Música como obligatoria en el pensum de escuelas y colegios. Fundó además, la Orquesta Sinfónica Nacional. A la edad de 25 años ya era autor del célebre Pasillo "Pasional", al saber de esto el Presidente Velasco Ibarra le ofreció una beca para estudiar en Alemania, y en su quinta presidencia lo nombró Cónsul del Ecuador en México.

El maestro Szeryng le heredó su técnica pedagógica para ejecutar el violín y además le obsequió su valioso violín Cerruttii, fabricado en 1810. Así creó la Fundación Henryk Szeryng en México, cuna de varios violinistas de talla mundial. Fue partícipe en el estreno mundial del Ballet La Chola María en México con su obra Rapsodia ecuatoriana para piano y orquesta compuesta en Alemania en 1955. En 1993 realizó el Primer Festival de violín, que llevaba el nombre de su maestro, que se realizó hasta el año de su muerte. Fue Director Técnico y

ANEXO 2

fundador de la Orquesta Sinfónica del Estado de México y Profesor del Conservatorio de la Ciudad de México.

Foto 2: Afiche de un concierto de despedida a su regreso a Ecuador.



**Fuente: Internet,
<http://soymusicaecuador.blogspot.com/2010_03_01_archive.html>, 2011.**

Debido al gran legado que dejó para la música clásica y popular ha recibido muchos homenajes. Destacan entre sus composiciones los pasillos "Pasional", "Aquella Noche", "Confesión", "Nostalgias", "Serenata", "Imposible", "Invocación", "Noches Sombrías", "Nocturnal". Compuso varias piezas para Orquesta, obras como el "Himno de la Gratitude al Maestro", entre otros. Enrique Espín Yépez es reconocido como el creador de la forma de pasillo más popular en la que la primera parte es lenta y en tonalidad menor y la segunda acelerada y en tonalidad mayor, hasta hacer cadencia y volver a la primera.

Se dice que el Pasillo "Pasional" inicialmente para violín y piano fue compuesto en honor al Concierto No. 5 del compositor belga Henri Vieuxtemps; así la primera versión de la pieza más conocida de Enrique Espín Yépez no era un pasillo, sino una romanza titulada como 'Romanza en homenaje a Vieuxtemps'. Pero luego se añadió la letra 'Pasional' y se construyó el ritmo hasta ser el Pasillo tal y como lo conocemos ahora. La melodía seleccionada es un arreglo realizado por el Maestro Julio Mosquera, quien actualmente dicta clases de Guitarra Clásica en el Conservatorio Nacional de Música.

ANEXO 2

PASIONAL

Letra y música: Enrique Espín Yépez

Amar sin esperanzas y dar el corazón con toda el alma.

¿Por qué siempre yo he de amarte sin haberme comprendido?

Qué triste es el vivir soñando una ilusión que nunca a mi vendrá.

Yo te amé con locura y te di mi ternura

Más burlaste mi vida sin tener compasión.

Hoy nunca olvides que te he querido

Que aunque me hayas herido,

Siempre te recuerdo sin sentir rencor.

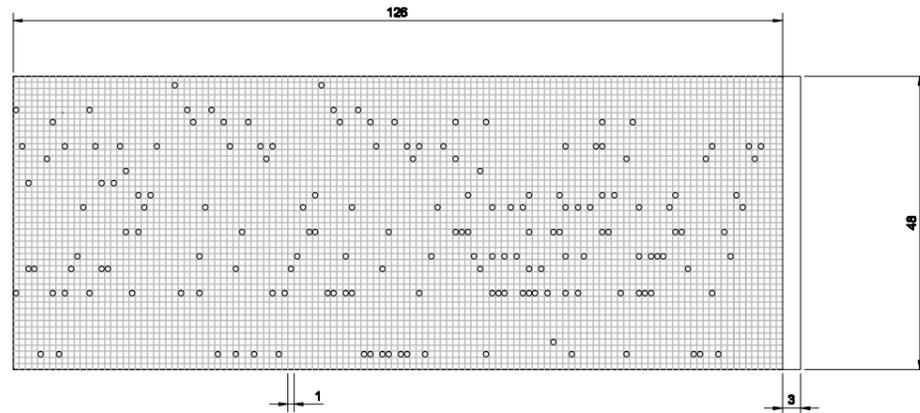
Soñar que nos quisimos es sólo recordar una quimera.

¿Por qué siempre yo he de amarte sin haberme comprendido?

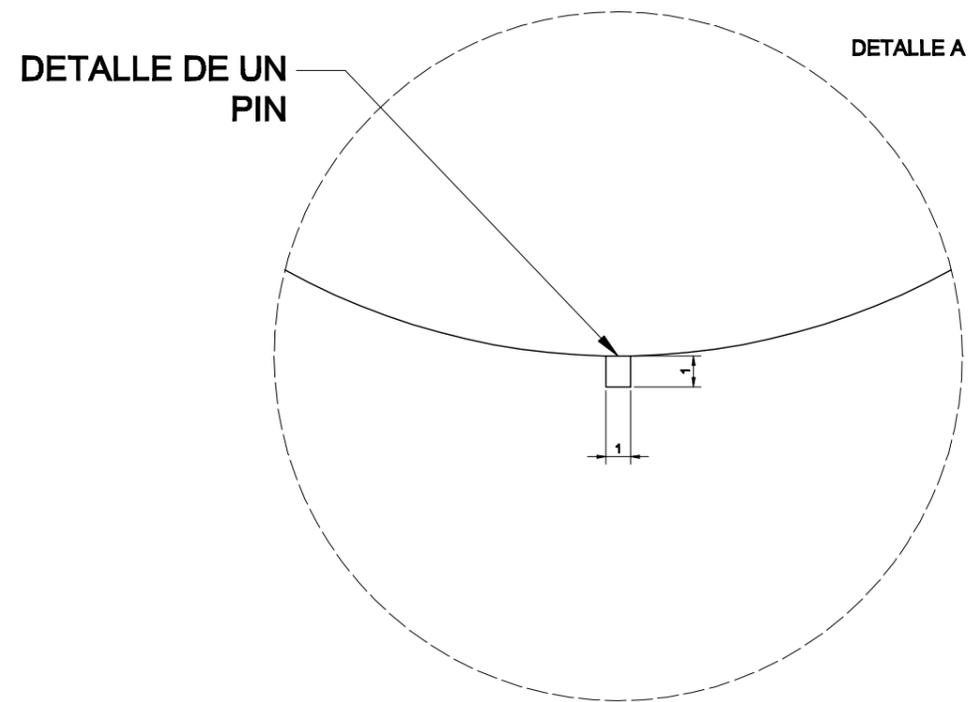
Qué triste es el vivir soñando una ilusión que nunca a mí vendrá.

ANEXO 3

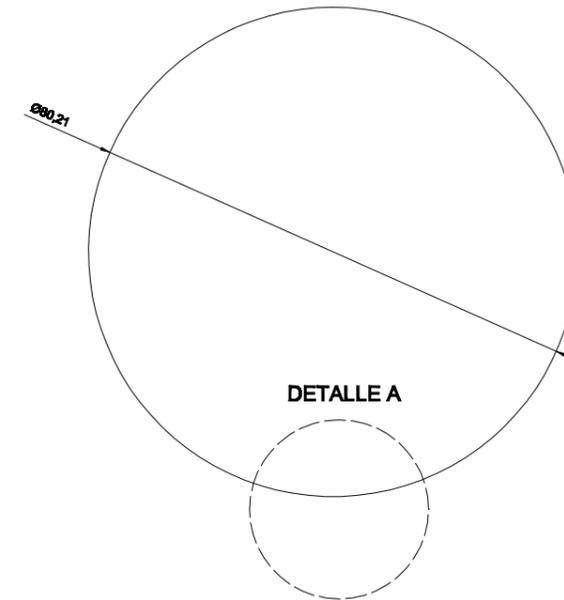
CILINDRO ABIERTO



TODAS LAS MEDIDAS EN MILIMETROS



CILINDRO CERRADO



MATERIAL: POR DETERMINARSE

SIN ESCALA

TODAS LAS MEDIDAS EN MILIMETROS

Pasillo

Pasional

ANEXO 4

Enrique Espín Yépez
Arreglo: Julio Mosquera

♩ = 80

6

12

♩ = 160

18

24

Tempo 1

30

D.C. al Coda

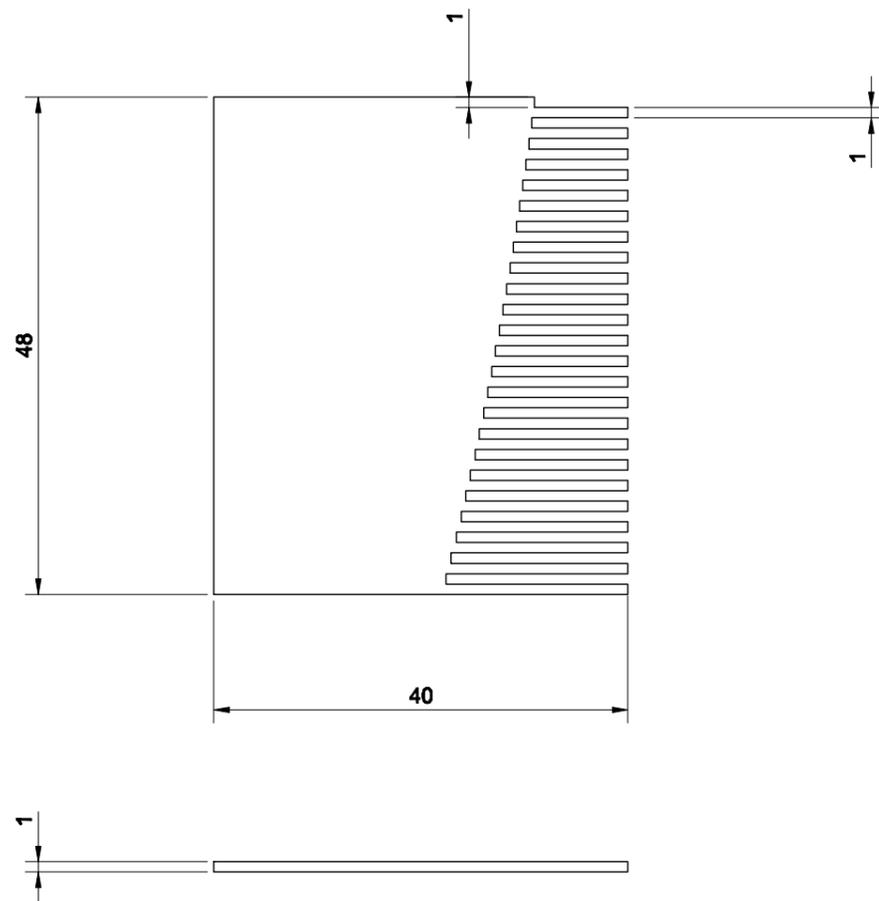
35

1. 2.

The musical score is written for a single melodic line on a treble clef staff. It begins with a 3/4 time signature and a tempo marking of ♩ = 80. The key signature has one flat (B-flat). The score is divided into measures, with measure numbers 6, 12, 18, 24, 30, and 35 indicated. A section starting at measure 18 is marked with a tempo change to ♩ = 160. A section starting at measure 30 is marked 'Tempo 1'. A section starting at measure 35 is marked 'D.C. al Coda' and includes first and second endings. The score concludes with a final cadence.

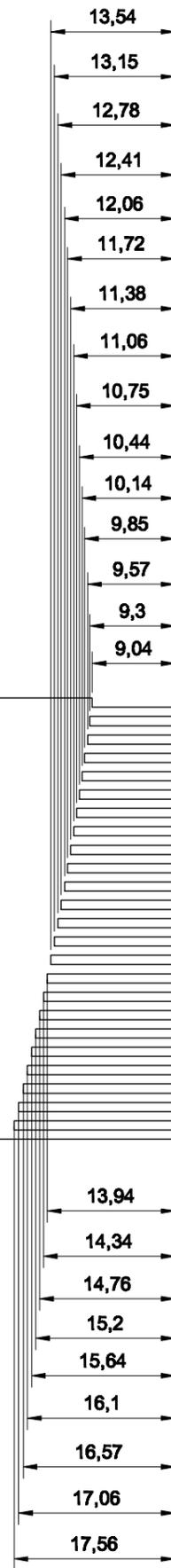
TECLADO

TODAS LAS MEDIDAS EN MILIMETROS



MATERIAL: ACERO INOXIDABLE

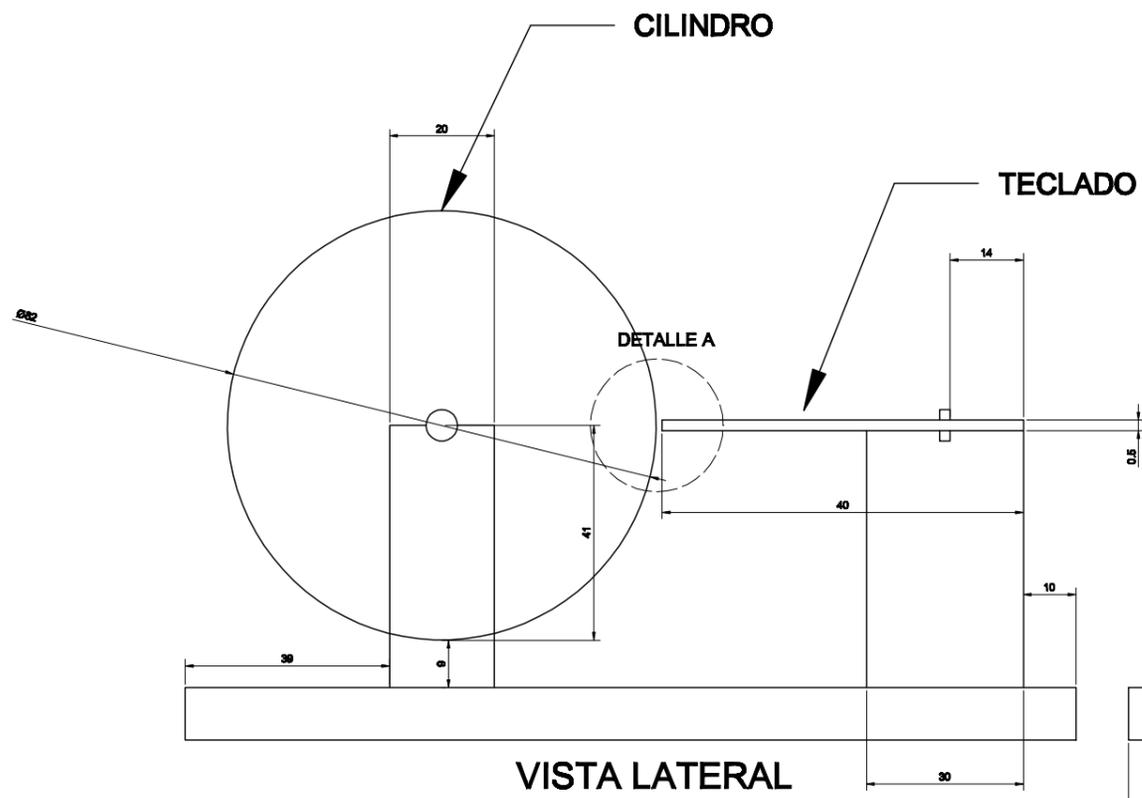
SIN ESCALA



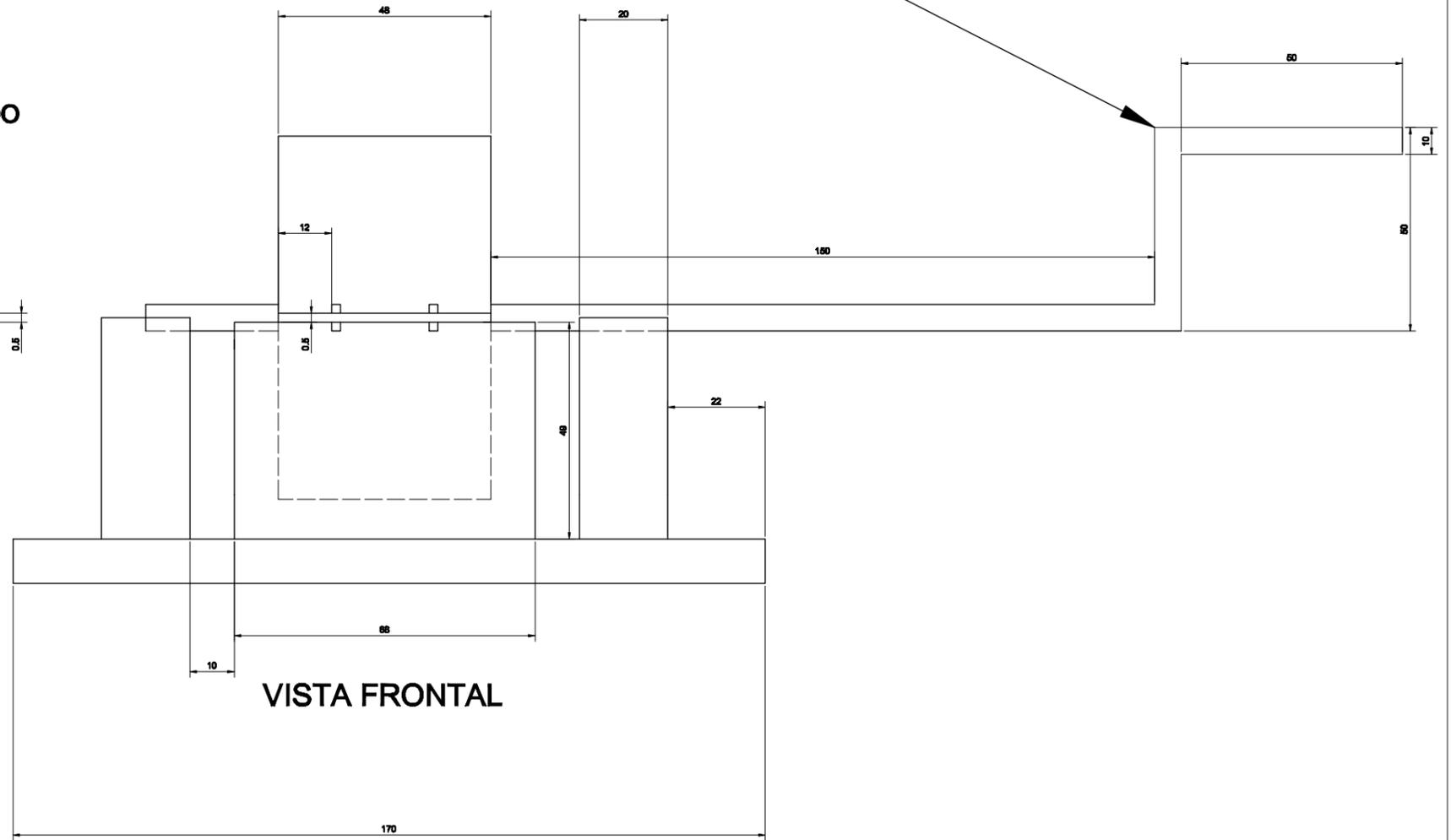
ANEXO 5

ENSAMBLE

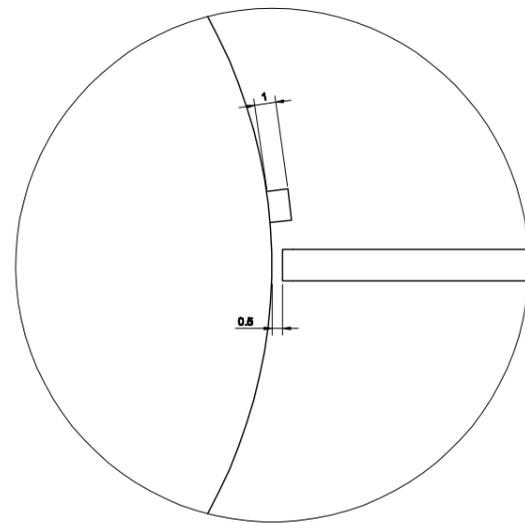
ANEXO 6



MANIVELA CONECTADA DIRECTAMENTE AL CILINDRO



DETALLE A



TODAS LAS MEDIDAS EN MILIMETROS

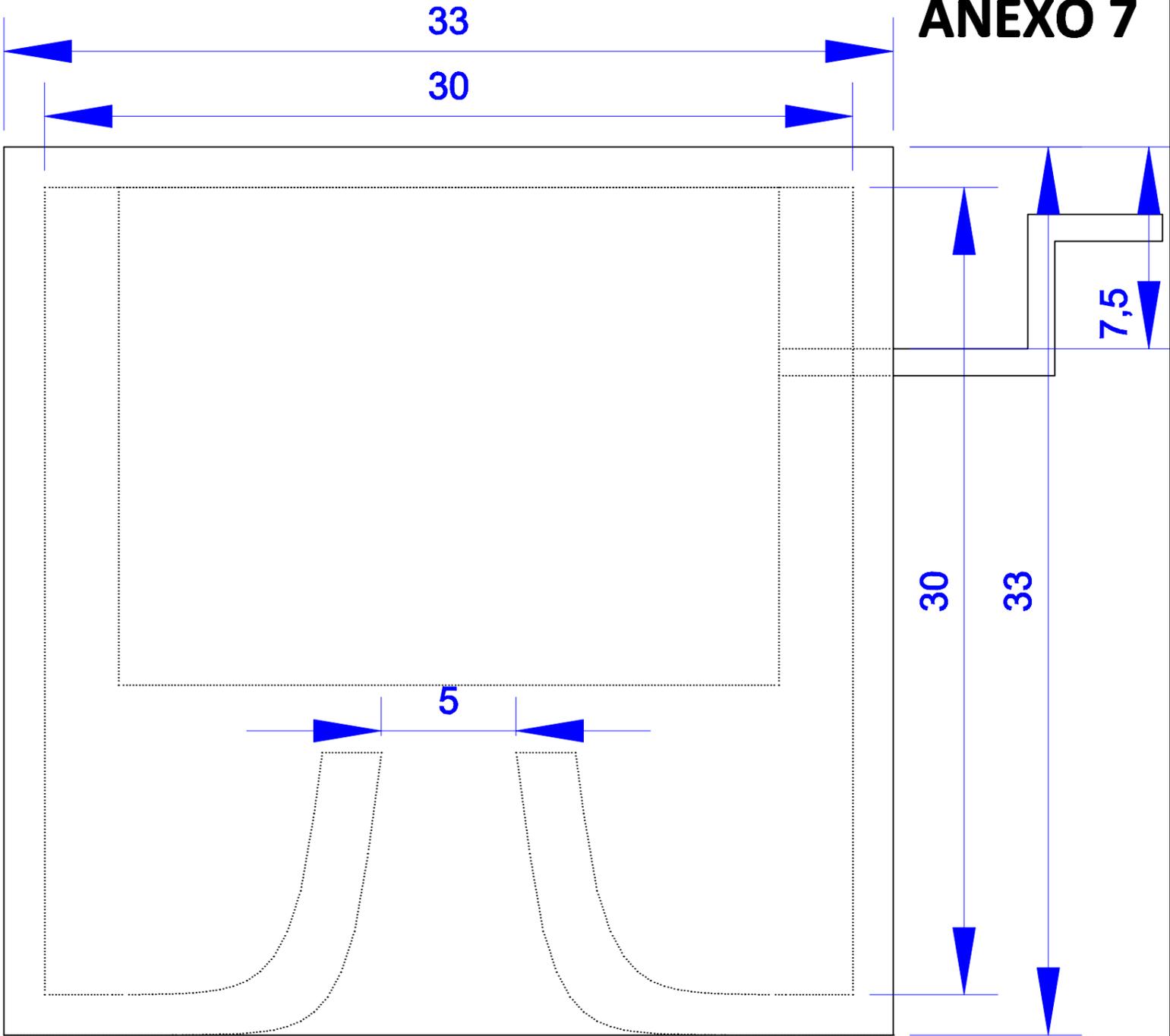
MATERIAL: VARIOS

SIN ESCALA

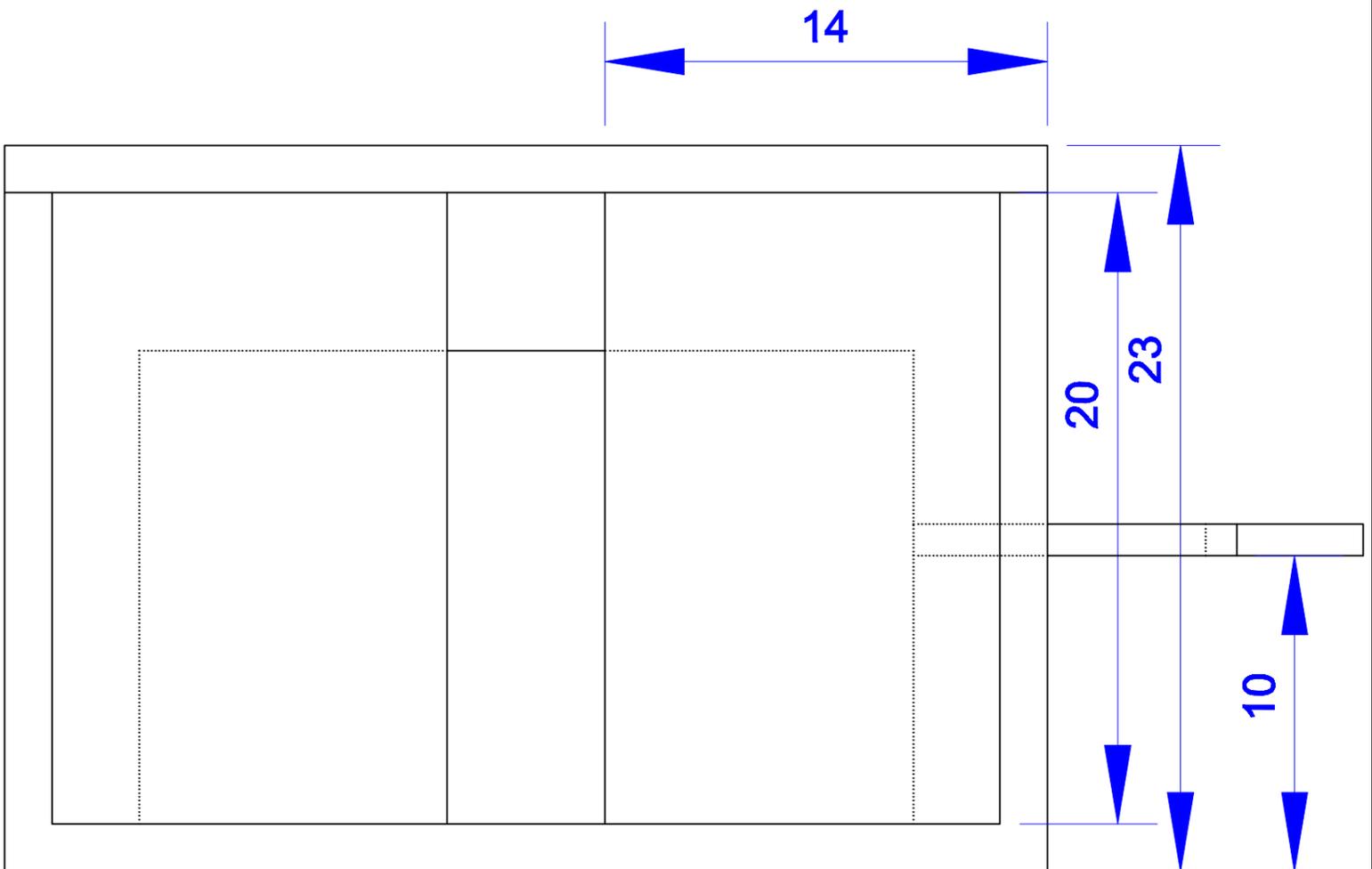
TODAS LAS MEDIDAS EN MILIMETROS

ANEXO 7

VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL

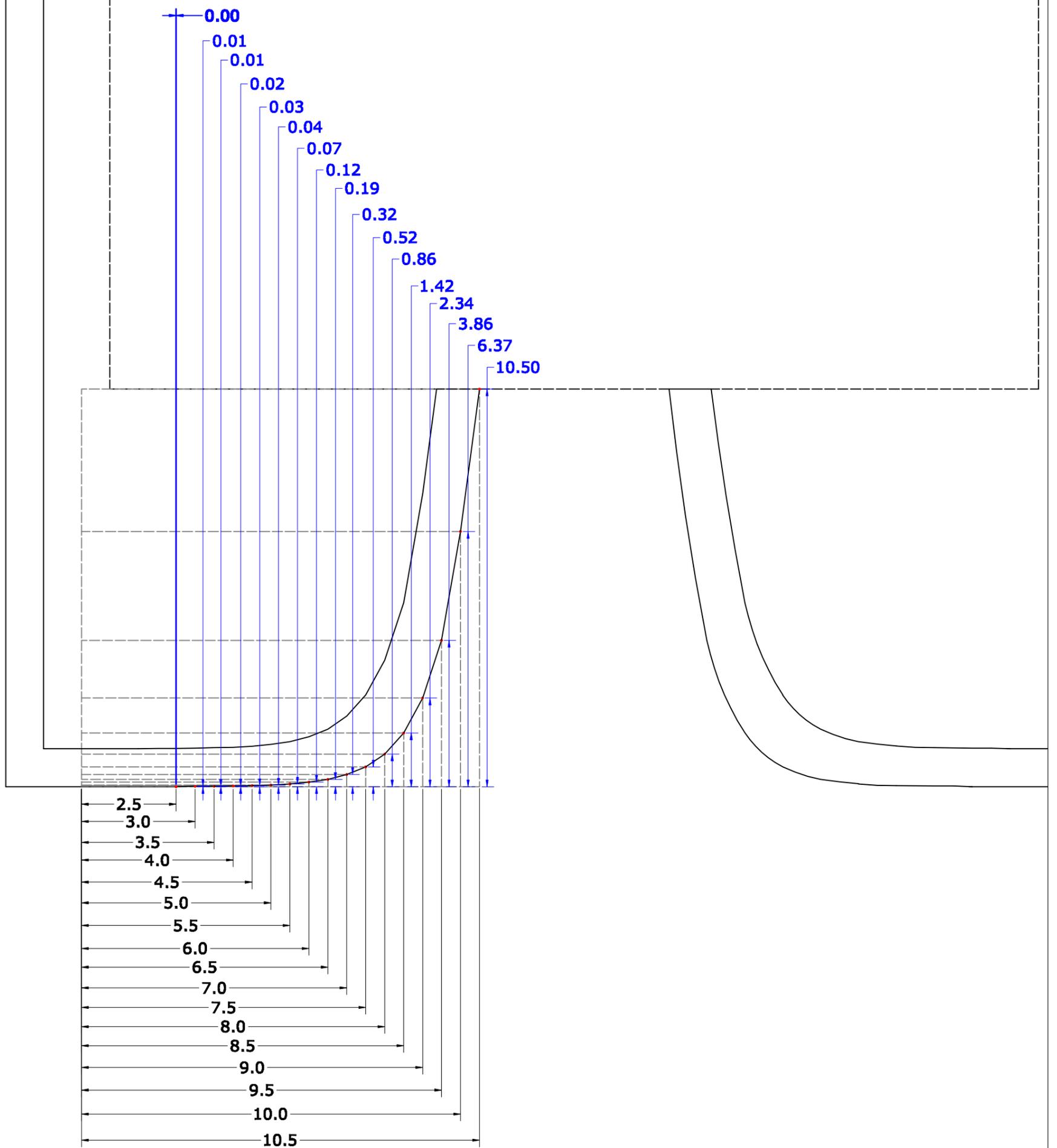


MATERIAL: MADERA LAUREL

ESCALA 1:2

TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS

ANEXO 8



DETALLE DE UN LADO DE LA BOCINA
MATERIAL: MADERA LAUREL
SIN ESCALA
TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS