



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**ESTUDIO ACÚSTICO DE LA FLAUTA
TRIPLE MAYA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

F I S I C A

P R E S E N T A:

DULCE SUGEY ESPINO ORTIZ



DIRECTOR DE TESIS:
DR. PABLO PADILLA
2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Espino
Ortiz
Dulce Sugely
57930416
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Física
404065124

Tutor
Doctor
Padilla
Longoria
Pablo

Sinodal 1
Doctor
Mandujano
Sánchez
Francisco Javier

Sinodal 2
Doctora
Zalaquett
Rock
Francisca Amelia

Sinodal 3
Doctor
Rendón
Garrido
Pablo Luis

Sinodal 4
Doctora
López
Suárez
Alejandra

CONTENIDO

Agradecimientos	6
Introducción	8
Objetivo	9
Estructura del Proyecto de Tesis	9
1. MARCO TEÓRICO ARQUEOLÓGICO	10
1.1. LA CULTURA MAYA Y SU MÚSICA	10
1.2. INSTRUMENTOS SONOROS MAYAS	12
1.3. FLAUTAS MAYAS	13
2. ONDAS ACÚSTICAS	16
2.1. ONDAS ACÚSTICAS PLANAS	16
2.1.1. Ondas Acústicas Estacionarias	18
2.2. SONIDOS PERIÓDICOS	19
2.2.1. Series de Fourier	20
2.2.2. Espectro de Sonido Continuo	20
3. ACÚSTICA DE TUBOS	22
3.1. TUBOS SONOROS	22
3.1.1. Impedancia Acústica Específica	23
3.1.2. Impedancia a la entrada de un tubo	24
3.2. FLAUTAS	25
3.2.1. Fenómenos asociados a las flautas	27
4. SONIDO DIGITAL	29
4.1. CONVERSION ANALÓGICA-DIGITAL	29
4.1.1. Teorema de Nyquist-Shannon	30
4.2. OBTENCIÓN DEL CONTENIDO ARMÓNICO DE UNA SEÑAL COMPLEJA	30
4.2.1. Análisis Tiempo-Frecuencia. Transformada Discreta de Fourier (DFT)	31
5. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LA FLAUTA TRIPLE MAYA	33

5.1. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	33
5.2. CONTENIDO ARMÓNICO	35
5.3. LONGITUD EFECTIVA	38
5.4. CORRIMIENTO EN LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA	40
5.5. TUBOS RESONADORES	46
5.6. INTERVALOS MUSICALES DE LA FLAUTA TRIPLE MAYA	49
5.7. FENÓMENO DE BATIMIENTO EN LA FLAUTA TRIPLE MAYA	61
5.7.1 Generación de tonos diferenciales o de Tartini	73
6. CONCLUSIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78
APÉNDICES	80
II. EL DECIBEL	80
III. FUNCIONES NATIVAS DE MATLAB	81
IV. ESPECIFICACIONES DEL INSTRUMENTAL DE MEDICIÓN	84
V. TABLAS DE INTERVALOS MUSICALES	90
VI. PROTOCOLO PARA LA MEDICIÓN DE FLAUTAS MESOAMÉRICANAS	96

AGRADECIMIENTOS

- Dra. Diana Isabel Magaloni Kerpel. Directora del MNA
- Lic. Federica Sodi. Curadora de la Sala Maya del MNA
- Lic. Roberto Carbajal. Orquesta Sinfónica del Estado de México
- Universos Sonoros Mayas: Un estudio diacrónico de la acústica, el uso, función y significado de sus instrumentos. CEM, IIFL, UNAM
- A la facultad de Ciencias de la UNAM, por ser mi segunda casa y la fuente esencial de mi conocimiento.
- A mi familia: A mi madre Araceli Ortiz, a mis hermanas Gisela, Ivonne y Claudia, a mi hermano José Antonio, a mis sobrinos Jessica Areli, Daniel y Alexa Fernanda. A mi tía Liliana González.
- A Josué Flores Vargas por su apoyo incondicional.
- Al Dr. Pablo Padilla Longoria. IIMAS, UNAM. Por su tiempo y aportación de conocimientos, mismos que sirvieron en la elaboración de este proyecto.
- A mis sinodales:
 - Dra. Francisca Zalaquett Rock por la gran oportunidad de trabajar en el proyecto y ser una guía en mi carrera profesional
 - Dr. Pablo Luis Rendón, Dr. Francisco Mandujano y a la Dra. Alejandra Suárez; por sus acertadas aportaciones que permitieron mejorar considerablemente mi proyecto.
- A mis amigos: Iván Gabriel Lázaro, Roberto Linares, Frank Guerrero, Víctor Linares, Hugo Gutiérrez, Alejandro Méndez, Miztli Yépez y Víctor Manuel Corzo.

Un agradecimiento especial a:

- La Dra. Laura E. Sotelo Santos. CEM, IIFL, UNAM. Por creer en mí y compartir sus conocimientos y experiencia.
- Al maestro Alejandro Ramos por darme la oportunidad de trabajar en su proyecto de arqueoacústica.

ESTUDIO ACÚSTICO DE LA FLAUTA TRIPLE MAYA

INTRODUCCIÓN

ESTUDIO ACÚSTICO DE INSTRUMENTOS MUSICALES ARQUEOLÓGICOS

El estudio científico de instrumentos musicales ha sido ampliamente desarrollado, sin embargo el estudio de instrumentos musicales arqueológicos y más aún de instrumentos mesoamericanos es relativamente reciente y escaso, de tal manera que resulta interesante sumarse a tan sustancial trabajo, el cual está inmerso en el proyecto de investigación “Universos Sonoros Mayas: Un estudio diacrónico de la acústica, el uso, función y significado de sus instrumentos musicales”, del Instituto de Investigaciones Filológicas de la UNAM, que tiene por objeto establecer los mecanismos de producción sonora, técnicas y posibles lugares de manufactura a través del tiempo, para así establecer lineamientos teórico-metodológicos que permitan aclarar los esquemas sonoros de las antiguas culturas sustentados en el pensamiento europeo; esto por medio de un estudio multidisciplinario, que involucra ciencias como Arqueología, Física, Matemáticas, Etnomusicología, Historia, entre otras.

El estudio en conjunto de los instrumentos sonoros resulta una tarea compleja, no menos el estudio de un solo instrumento, siendo éste, una flauta triple maya, que para su estudio requiere incorporar metodologías sistemáticas y protocolos de caracterización adecuados para posteriormente proceder a una valoración arqueológica, histórica y musical que permita formular hipótesis adecuadas sobre su uso y función, así como también obtener datos que indiquen el nivel de tecnología empleado en su manufactura, para ello se necesitan técnicas de modelación física y matemática que involucren aspectos acústicos y computacionales.

En el presente trabajo se realizará un estudio acústico de la flauta de Jaina (Figura1) que se encuentra resguardada en la Sala Maya del Museo Nacional de Antropología. Esta flauta está constituida por tres tubos, es de cerámica y pertenece al Clásico tardío (600 a.C. - 900 d.C.), su lugar de manufactura es desconocida, pero se cree que fue elaborada en sitios arqueológicos de la cuenca del Usumacinta.



Figura1. Flauta Triple Maya (Flauta de Jaina) cortesía Sala Maya. MNA.
Universos Sonoros Mayas. UNAM.

Objetivo: Estudiar acústicamente la flauta triple maya del sitio arqueológico de Jaina incorporando metodologías sistemáticas y protocolos de caracterización para hacer un estudio de su organología desde el punto de vista de la modelación física y matemática.

Estructura del Proyecto de Tesis

Este proyecto de tesis consta de seis capítulos y una introducción. En la introducción se describe el objetivo y se da un panorama del desarrollo y función del proyecto. En el capítulo 1 se describen aspectos teóricos arqueológicos que refieren a la importancia del estudio de instrumentos sonoros mesoamericanos y en específico de la flauta triple maya. En el capítulo 2, 3 y 4 se desarrolla toda la teoría físico-matemática y tecnológica que se utilizará para el estudio de la flauta. El capítulo 5 describe el desarrollo experimental del proyecto y la caracterización acústica de la flauta triple. El capítulo 6 está dedicado a las conclusiones, y por último se anexan apéndices que van relacionados con cada uno de los capítulos.

1. MARCO TEÓRICO ARQUEOLÓGICO

1.1. La Cultura Maya y su música

Entre las antiguas culturas que habitaron Mesoamérica, una de las más importantes es la cultura Maya que se extendió en los actuales estados del sureste de México, Campeche, Chiapas, Quintana Roo, Tabasco y Yucatan, así como también en parte de Centroamérica, Guatemala, Belice, Honduras y el Salvador [1]. Gracias al estudio de las piezas, murales, códices y construcciones que se preservan, se sabe que esta cultura se desarrolló aproximadamente del 2000 a.C.-1546 d.C., periodo en el que dejaron un legado impresionante de adelantos científicos y tecnológicos gracias a la estructura socio-económica y política que desarrollaron a lo largo de casi 3000 años.

Uno de los aspectos poco estudiados sobre la cultura Maya, son los sonoros, no se sabe cuales eran sus esquemas musicales y el nivel de tecnología empleado en la elaboración de sus instrumentos musicales. Hasta el momento no se tiene registro alguno de sus composiciones, pero gracias a la iconografía y artefactos musicales encontrados en distintos lugares y momentos sagrados, se sabe que la música fue relevante para las sociedades mayas, siendo ésta un elemento social complejo para la misma, pues es una de las manifestaciones artísticas que las representa, ya que celebra la vida y la muerte, la paz y la guerra.

Podemos ver representada la esencia de los sonidos mayas en la iconografía encontrada, como códices, murales y pictografía, los cuales indican el estatus de los músicos dentro de su sociedad. Uno de los ejemplos más estudiados de iconografía son los murales de Bonampak (Figura 1.1.1.) que se encuentran en Chiapas, México.



Figura 1.1.1. Fragmento de los frescos de Bonampak
(Acuarela-acrílico Dulce S. Espino)

Los frescos de Bonampak son una obra de arte donde plasman de manera excepcional una ceremonia religiosa, según Miller (1986) [2] y Coe (2005) [2], los frescos, fueron producidos en el 800 a.C. durante el período clásico Maya; la habilidad de los artistas mayas hizo posible que investigadores como Miller (1986) [2] encontraran que existe una relación ritual y social con la música, y de esta manera determinar que la música tuvo un lugar importante. A los músicos se les encuentra en diversas escenas de los frescos, relacionados con la clase élite y deidades mayas. En la sala 1 de la Estructura 1 se observan las imágenes de "Músicos que tocan sonajas, tambores, trompetas, batiendo a caparazones de tortuga con astas de ciervo" (Gallencamp 1985) [2]. El fresco representa un gobernante supremo, flanqueado por su esposa, hijos y un conjunto de dignatarios de élite vestidos de traje de gala (Gallencamp 1985; Miller, 1986) [2]. Esta elegante ceremonia se ve expresada por los detalles de los adornos que los bailarines portaban, vestidos con trajes de plumas de quetzal además de la participación de los actores que interpretaron el papel de los dioses de la tierra, en las máscaras fantásticas (Gallencamp 1985; Miller, 1986) [2]. Los frescos de Bonampak, como Miller (1986) y Gallencamp (1985) [2] señalan, dan fe de la falta de notación musical escrita. Bruno Nettl (1956) [2] indica que en varias culturas, la música ha sido y sigue siendo dependiente de la transmisión oral. Un gran repertorio era necesario para las actuaciones musicales en las sociedades mayas, los músicos tenían que prepararse por medio de ensayos por lo tanto la música improvisada es poco probable ya que los frescos representan a bailarines que necesariamente tuvieron que ensayar con ciertos ritmos, como han indicado Sachs (1937), Stevenson (1976) y Gallencamp (1985) [2]. Por lo tanto, el concepto de la música y la danza forman un solo grupo. La transmisión se refiere específicamente a la forma en que una cultura conserva la música a través del tiempo, por lo que la transmisión puede ser escrita u oral (Randel 2004) [2]. Los relatos de los misioneros españoles, en un estudio realizado por Robert Stevenson, dan idea de las cualidades profesionales requeridas por un músico: <<La formación era extremadamente rígida, ya que la música siempre se pensó como un complemento necesario para el ritual, absolutamente perfectas actuaciones, como sólo los cantantes más altamente capacitados pueden dar. Rituales con música ejecutada erróneamente se pensaba que ofendía más a los dioses, por lo tanto los errores en la interpretación de música ritual se castigaba llevando al músico a la pena de muerte. Cantantes y actores formaban parte de la élite, porque la música desempeñaba un papel importante en la vida ritual, tal que disfrutaron de un considerable prestigio social >> (Stevenson ,1976) [2].

Actualmente se han encontrado elementos iconográficos que se unen al conjunto de pruebas que indican la importancia de los músicos mayas ya señalada anteriormente, un ejemplo de ello es una de las imágenes plasmada en la vasija K1838 (Figura 1.1.2) donde se ven representados músicos y su alter-ego, que es un elemento del individuo que se considera un vínculo con lo sagrado.

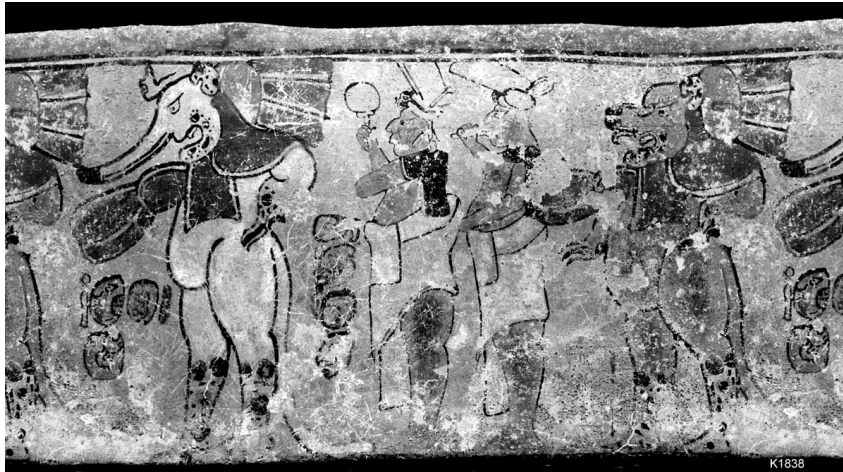


Figura 1.1.2. Tomada de la base de datos de Justin Kerr [3].

Gracias a la maestría de los artistas mayas, el estudio científico de la iconografía ha mostrado la relevancia que los músicos tenían dentro de esta sociedad, la descripción de los diversos instrumentos plasmados en Bonampak ha dado a los investigadores información a detalle del lugar que ocupaba la música, aún sin conocer su sonido. De manera que los frescos y otros elementos iconográficos han servido como recurso, para la comprensión de los esquemas sonoros de dicha sociedad, incitando a investigadores de distintas disciplinas al estudio organológico y sonoro de los instrumentos mediante réplicas de los mismos.

1.2. Instrumentos Sonoros Mayas

Las sociedades mayas fabricaron diversos instrumentos musicales encontrados en diferentes lugares a lo largo del tiempo, asociados a la clase élite, ofrendas y casas. De acuerdo a ciertas características organológicas los han clasificado, según Hornbostel y Sachs [4] como, membranófonos, idiófonos y aerófonos.

Membranófonos. Los instrumentos de esta clase, producen sonido mediante una o más membranas tendidas sobre sendas aberturas [4]. En esta clasificación encontramos toda clase de tambores como los de doble lengüeta. Este tipo de instrumentos jugaron un papel importante en las representaciones artísticas y por el momento no se sabe cuándo fueron introducidos y cuándo acompañaron a las flautas y ocarinas en las representaciones (Hammond, 1991) [2].

Idiófonos. Los instrumentos de esta clase están formados por materiales naturalmente sonoros [4]. Dentro de esta clasificación tenemos a las sonajas y a los cascabeles de cerámica, metal y conchas; estos apenas sobreviven en un contexto arqueológico debido a la baja tolerancia de las condiciones ambientales, la cual limita el estudio de idiófonos que se hicieron de madera o calabaza [2]. También se les encuentra representados en murales, vasijas y códices.

Aerófonos. Los instrumentos de esta clase utilizan el aire como fuente de sonido [4]. Son los instrumentos más comunes, en su mayoría de cerámica; entre ellos tenemos a los silbatos, ocarinas, flautas y trompetas. Al igual que las otras clasificaciones se les ha encontrado en entierros y diversos lugares. La mayoría de estos instrumentos tienen formas estéticas antropomorfas y zoomorfas.

El Códice de Dresde en su página 34 (Figura 1.2.1) ejemplifica la importancia de los instrumentos musicales asociados con un ritual de fertilidad o de acción de gracias (Girard, 1995; Villacorta 1977) [2]. En ella observamos tres músicos, uno tocando dos tambores, otro tocando una sonaja y un último tocando una flauta, indicativo del prestigio de estos instrumentos dada la importancia de la ceremonia.



Figura 1.2.1. Códice Dresde página 34. Cortesía Universos Sonoros Mayas. Instituto de Filológicas de la UNAM.

1.3. Flautas Mayas

La flauta es el instrumento de viento que se cree tuvo gran importancia para las sociedades mayas, ya que estudiosos como Cresson (1884), Healy (1988), Houston (1998), Inomata (2001) y Stiver (1998) [2], han encontrado pruebas que indican que fue el de mayor prestigio designado para la clase élite de esta sociedad. Una de tantas pruebas es el hecho de que existen pocos ejemplares, por ejemplo de flautas de cerámica; además, evidentemente se requería un mayor conocimiento para la elaboración de la misma, así como también para su ejecución y se les ha encontrado en entierros que han revelado datos que vinculan a las flautas a los ritos de élite. De las excavaciones se han encontrado de cerámica y de hueso. Las de cerámica se han encontrado tubulares: de uno, dos y tres tubos (Figura 1.3.1).



Figura 1.3.1. Cortesía Universos Sonoros Mayas. Instituto de Investigaciones Filológicas de la UNAM. (La flauta A es y B son de decomiso P.G.R. 1994 y la C no tiene contexto).

Varias representaciones visuales de las antiguas flautas mayas se pueden observar en el Códice de Dresde (Figura 1.2.1) y las figurillas (Martí 1968; Villacorta 1977; Miller 1986; Girard 1995)[2], así como también algunas vasijas, indican que las flautas estaban vinculadas con eventos de índole religiosa, lo que prueba el prestigio que gozaba el músico que ejecutara este instrumento.

“Entonces ellos comenzaron a cantar y bailar. Todos los de Xibalbá llegaron y se reunieron con el fin de verlos. Luego se realizó el baile del Cux, bailaron el pubuy, y la bailó el IBOY” [3]



Figura 1.3.2. Tomada de la base de datos de Justin Kerr [3].

En la vasija K6995 (Figura 1.3.2), se aprecian como elementos iconográficos un armadillo, inscripciones y dos músicos enmascarados, tocando una flauta [3]. Se cree que los flautistas tuvieron que especializarse para poder elaborar y ejecutar este instrumento y con ello lograr ser parte de la clase élite.



Figura 1.3.3. Tomada de la base de datos de Justin Kerr [3].

El trabajo de Justin Kerr (1998) provee evidencia de que el sonido se asoció a los Héroes Gemelos. La historia de la creación maya viene del Popol Vuh, en ésta aparecen los Héroes Gemelos, vasija K791 (Figura 1.3.3.) indica que uno de los Héroes Gemelos utiliza el sonido como forma de comunicación con los señores del inframundo (Kerr 1998) [2].



Figura 1.3.4. Tomada de la base de datos de Justin Kerr [3].

Para Cresson (1984); Harcourt (1930), Martí (1968), Payne y Hartley (1992), Stevenson (1976) [2], entre otros, consideraron que las ocarinas y las flautas de cerámica al ser estudiadas pueden determinar los principios musicales de los antiguos mayas ya que la antigüedad de estos instrumentos no ha tenido ningún efecto en su sonido. En la vasija K4629 (Figura 1.3.4) se observan bailarines enmascarados y músicos especializados en la flauta en compañía de un gobernante; aquí nuevamente se observa que los músicos, en específico flautistas se encontraban en eventos importantes, es decir, eventos rituales.

Durante el período Cásico Tardío, alrededor del año 700 d.C., las flautas triples marcaron el inicio de la combinación de la musicalidad de tres flautas en un instrumento (Martí, 1968). La necesidad humana de crear nuevos sonidos, llevó a la creación de una flauta triple que marca una revolución en el sentido tecnológico y musical de los antiguos pobladores.

Por lo tanto, la música era una especialización en las sociedades antiguas, y en este sentido la creación de las flautas triples originó una nueva generación de músicos con mayores conocimientos en el arte de la elaboración y ejecución de este tipo de instrumento.

2. ONDAS ACÚSTICAS

Las ondas acústicas consisten en la propagación de perturbaciones del aire [5]. Este tipo de ondas son un ejemplo relativamente simple de ondas tridimensionales longitudinales en un fluido no viscoso [6].

La propagación del sonido en el aire es gobernada por la ecuación de onda 2.1,

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

dónde c es la velocidad del sonido en el aire.

En algunos casos se puede tomar a la radiación de sonido como ondas planas, es decir, ondas que solamente dependen de una dirección del espacio. Asumiendo que esta dirección es el eje x , y por lo tanto que la presión $p(x, y, z, t)$ es independiente de y y z , lo que implica que $p(x, t)$ [6].

2.1. Ondas Acústicas Planas

Si se toma una pequeña sección de ondas acústicas retiradas de la fuente, a una distancia mucho mayor que la longitud de onda, los frentes de onda pueden ser tratados como ondas planas en la dirección de propagación (fig. 2.1.1) [6,7,8].

Sean dos frentes de onda, como se observa en la figura 2.1.2, ambos frentes con una área superficial A , una separación dx y ξ el desplazamiento del aire entre los dos frentes de onda, de manera que los puntos $EFGH$ se muevan a las posiciones $E'F'G'H'$ como se indica en la figura 2.1.2, así el volumen de este elemento está dado por:

$$V + dV = A dx \left(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \quad (2.1.1)$$

Sea P_a la presión total del aire y p la parte que corresponde a la presión acústica, mediante la definición de módulo de elasticidad volumétrico B , se obtiene la siguiente relación:

$$p = dP_a = -B \frac{dV}{V} \quad (2.1.2)$$

$$p = -B \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (2.1.3)$$

Aplicando la segunda ley de Newton al movimiento del elemento $EFGH$, señalando la fuerza del gradiente de presión en la dirección opuesta a la aceleración, se obtiene:

$$-A \left(\frac{\partial p}{\partial x} dx \right) = \rho_0 A dx \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1.4)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (2.1.5)$$

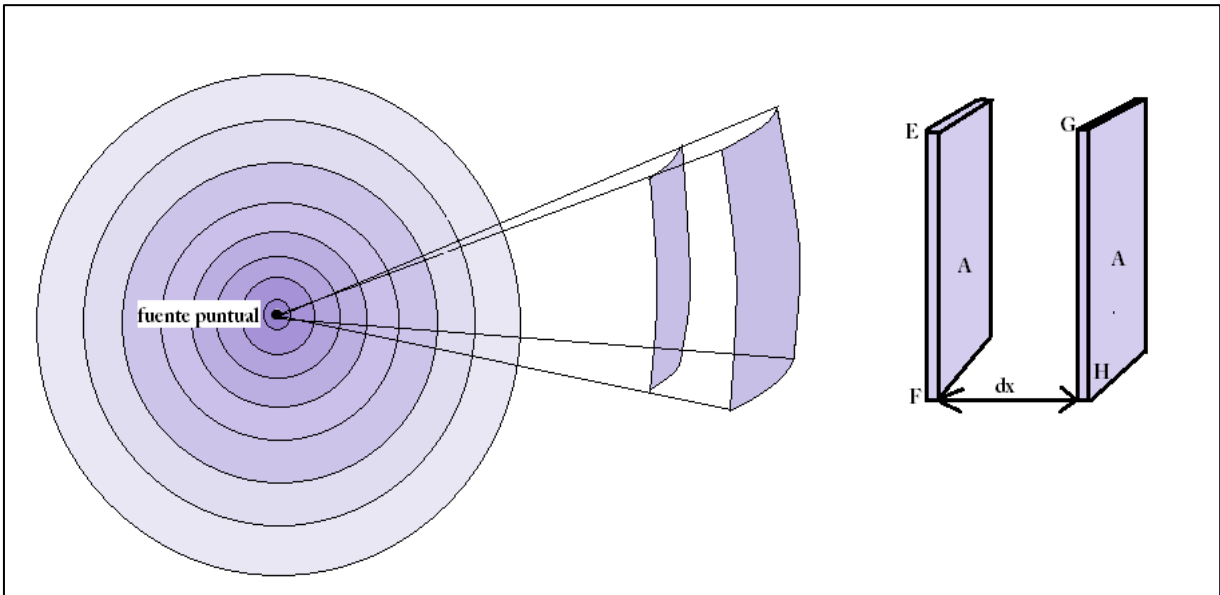


Figura 2.1.1. Muestra la fuente puntual y los frentes de onda esféricos. En un segundo plano se muestran dos ondas planas que se encuentran en posiciones más alejadas de la fuente.

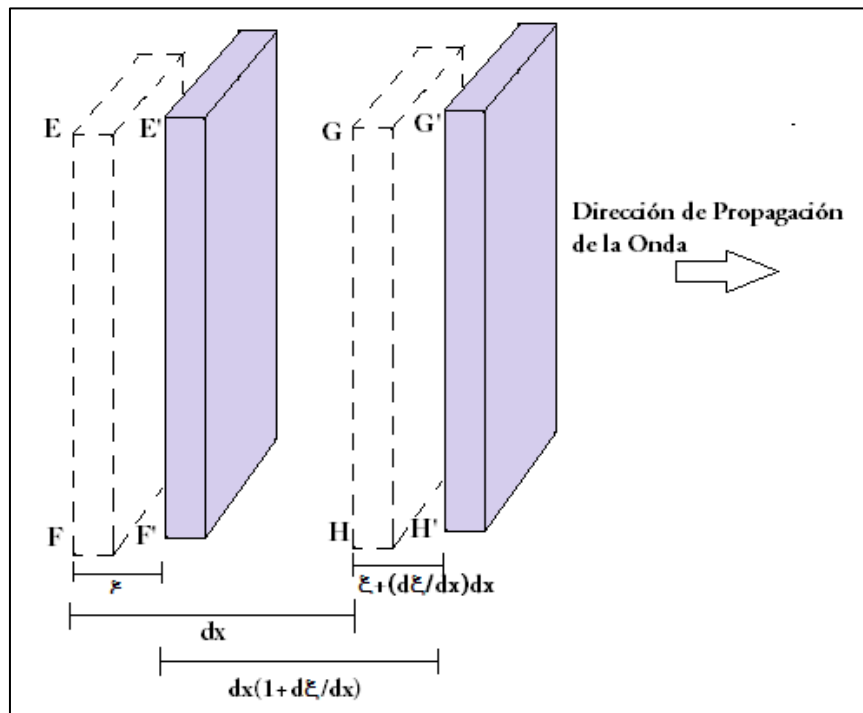


Figura 2.1.2. Muestra los frentes de ondas acústicas planas.

A partir de las ecuaciones (2.1.1), (2.1.3) y (2.1.5), se obtiene, la ecuación lineal de onda acústica:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1.6)$$

Las soluciones de la ecuación (2.1.6) son de la forma:

$$p(x, t) = f_1(x - ct) + f_2(x + ct) \quad (2.1.7)$$

En donde f_1 y f_2 son funciones espaciales arbitrarias.

La solución de la ecuación (2.1.6) en el dominio de la frecuencia ω está dada por:

$$p = \mathcal{A}e^{-ikx}e^{i\omega t} + \mathcal{B}e^{ikx}e^{i\omega t} \quad (2.1.8)$$

dónde $k = \frac{\omega}{c}$ es el número de onda, $\omega = 2\pi f$, y los términos \mathcal{A} y \mathcal{B} representan ondas viajando hacia la derecha y hacia la izquierda del eje x respectivamente [8].

2.1.1. Ondas Acústicas Estacionarias

Las ondas acústicas estacionarias se producen por la interferencia de dos ondas, con igual amplitud y frecuencia, que avanzan en sentido opuesto a través del aire. Dichas ondas permanecen confinadas en una región del espacio (cuerda, tubo, membrana, etc.) [9].

Sean dos ondas acústicas planas de igual amplitud y frecuencia:

$$p_1 = \frac{1}{2} \mathcal{A}e^{-i(kx - \omega t)}$$

$$p_2 = \frac{1}{2} \mathcal{A}e^{-i(-kx - \omega t)} \quad (2.1.1.1)$$

que viajan simultáneamente pero en sentido opuesto en una región del espacio, cuando se interfieren o superponen, se obtiene:

$$p = p_1 + p_2 = \mathcal{A} \cos kx e^{-i\omega t} \quad (2.1.1.2)$$

que representa una onda estacionaria en una dimensión, ya que la suma también es solución de la ecuación lineal de onda 2.1.6.

La presión y el desplazamiento relacionado en la onda estacionaria están fuera de fase con respecto a la posición, pero no con respecto al tiempo. Un nodo de desplazamiento se produce en el origen y en posiciones igualmente espaciadas, es decir, medias longitudes de onda desde el origen. Los nodos de presión están simétricamente entrelazados con los nodos de desplazamiento, de modo

que un nodo de desplazamiento (nodo de presión) produce un antinodo de presión (nodo de desplazamiento) [9].

Se produce un antinodo cuando $\sin kx = \pm 1$, siendo

$$kx = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \dots, \frac{(2n+1)\pi}{2} \quad \forall n \in \mathbb{Z} \quad (2.1.1.3)$$

Si $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, entonces

$$x = \left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \forall n \in \mathbb{Z} \quad (2.1.1.4)$$

Se produce un nodo cuando $\sin kx = 0$, siendo

$$kx = 0, \pi, \dots, n\pi \quad \forall n \in \mathbb{Z} \quad (2.1.1.5)$$

Si $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, entonces

$$x = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \forall n \in \mathbb{Z} \quad (2.1.1.6)$$

Se puede considerar que las ondas acústicas estacionarias son los distintos modos de vibración de la cuerda, el tubo, la membrana, etc. Para estos sistemas las frecuencias a las que se producen ondas estacionarias se llaman frecuencias de resonancia. La más grave (baja) se denomina fundamental, y las demás son múltiplos enteros de la misma denominados armónicos [9].

2.2. Sonidos Periódicos

Por homogeneidad y linealidad de la ecuación de onda, cuando se producen ondas estacionarias acústicas, se genera un sonido complejo que es el resultado de la superposición de dos frecuencias y si se continúa el proceso, el resultado de una señal de sonido es [10]:

$$\begin{aligned} s(t) &= \alpha_1 \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) + \alpha_2 \cos(2\pi f_2 t + \theta_2) + \dots \\ &= \sum_{n \geq 1} \alpha_n \cos(2\pi f_n t + \theta_n) \end{aligned} \quad (2.2.1)$$

Cuando todas las frecuencias son múltiplos enteros de una frecuencia dada $f > 0$: $f_n = nf$, en tal caso, la señal de sonido es:

$$s(t) = \sum_{n \geq 1} \alpha_n \cos(2\pi n f t + \theta_n) \quad (2.2.2)$$

Es decir, un sonido periódico con periodo $T = \frac{1}{f}$, esto es $s(t + T) = s(t)$, para alguna t . Esto porque:

$$\cos(2\pi n f(t + T) + \theta_n) = \cos(2\pi n f t + 2n\pi + \theta_n) = \cos(2\pi n f t + \theta_n) \quad (2.2.3)$$

En música, la frecuencia f (del mismo modo la componente $\cos(2\pi f t + \theta)$) es llamada la fundamental, por lo tanto determina el tono de la nota correspondiente y la frecuencia $f_n = n f$ es el n -armónico [10].

2.2.1. Series de Fourier

El matemático Joseph Fourier (1768-1830) fue el primero en analizar sonidos periódicos que se descomponen en series trigonométricas que llevan su nombre: Series de Fourier [10].

La serie de Fourier de una función $s(t)$ periódica integrable sobre un intervalo $[0, T]$ está dada por:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \quad (2.2.1.1)$$

La forma compleja de la ecuación (2.2.1.1) es:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{-\frac{2i\pi n t}{T}} \quad (2.2.1.2)$$

dónde c_n son los coeficientes de Fourier con $n \in \mathbb{Z}$, definidos por:

$$c_n = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) e^{-\frac{2i\pi n t}{T}} dt \quad (2.2.1.3)$$

Con $a_n = c_n + c_{-n}$ y $b_n = i(c_n - c_{-n})$.

Las series de Fourier tienen diversas aplicaciones, como el análisis en el comportamiento armónico de una señal.

2.2.2. Espectro de Sonido Continuo

Como un sonido periódico puede ser escrito como una suma de términos con frecuencias, estos sonidos se pueden representar mediante integrales de términos similares, lo que constituye la síntesis de Fourier:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(f) e^{2i\pi f t} df \quad (2.2.2.1)$$

Dónde la función $\hat{s}(f)$, es llamada la transformada de Fourier de $s(t)$ y está dada por:

$$\hat{s}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-2i\pi f t} dt \quad (2.2.2.2)$$

El módulo $|\hat{s}(f)|$ es la amplitud de la frecuencia componente $e^{2i\pi f t}$ y el argumento de $\hat{s}(f)$ da la fase en el origen de tal componente [10]. El espectro de un sonido, es llamado el espectro continuo.

Cuando $s^2(t)$ es integrable sobre un intervalo $[0, T]$, la intensidad de sonido en más de un periodo es relacionado con los coeficientes de Fourier por medio del teorema de Parseval [10] como sigue:

$$\frac{1}{T} \int_0^T |s(t)|^2 dt = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |c_n|^2 \quad (2.2.2.3)$$

Cuya interpretación es que la energía total de la señal $s(t)$ es igual a la energía total de su transformada $\hat{s}(f)$ de Fourier a lo largo de todas sus componentes frecuenciales [10].

3. ACÚSTICA DE TUBOS

Un gran número de dispositivos generadores de sonido son de forma tubular, las ondas sonoras pueden estar en el interior del tubo, y parte de esta energía acumulada se irradia hacia fuera en el extremo abierto. Tubos de órgano, viento, madera y los altavoces son generadores de este tipo de sonido [11]. Para el estudio acústico de este tipo de dispositivos se realizan simplificaciones gracias a las simetrías de la naturaleza, por lo que sus ecuaciones de movimiento resultan equivalentes a otros sistemas.

3.1. Tubos Sonoros

Se denominan tubos sonoros aquellos que contienen una columna gaseosa capaz de producir sonido al ser convenientemente excitada [4]. En acústica se llaman tubos cerrados los que poseen una sola abertura y tubos abiertos los que poseen dos o más. La propagación del sonido en tubos se puede modelar asumiendo que la forma del sonido en un tubo es análoga a un sistema eléctrico, es decir, un circuito resonante [8]. Dicho sistema eléctrico tiene la misma ecuación de movimiento que un oscilador armónico forzado, compuesto de un elemento con inercia electromagnética (bobina de inducción L), un elemento disipativo (la resistencia R) y otro restitutivo (el capacitor C). Estos son alimentados por una fuente de fuerza electromotriz ϵ_0 ; tal como se muestra en la siguiente figura 3.1.1 [11,12]. Por lo tanto, un tubo sonoro puede ser visto como un tramo de guía de onda circular cortocircuitada en $x = 0$ y $x = L$.

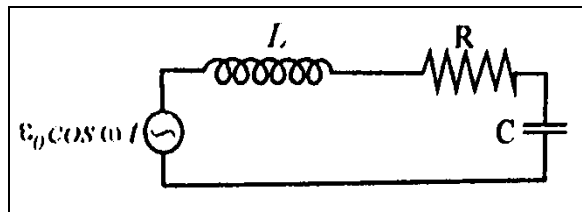


Figura 3.1.1. Circuito resonante [12].

La existencia de las ondas estacionarias en el tramo de la guía de onda implica que la longitud L del tubo sonoro debe ser múltiplo entero de media longitud de onda. De modo que se tiene que hacer una corrección a la longitud del tubo, dado que las aberturas del tubo modifican su longitud:

$$l_e = l + 0.8\sqrt{S} \tag{3.1.1}$$

Así los primeros dos parámetros acústicos que caracterizan al sistema estarán determinados por la capacidad acústica e inercia acústica, mediante:

$$L_\alpha \cong \left(\frac{\rho l_e}{S} \right) \tag{3.1.2}$$

$$C_\alpha \cong \left(\frac{V}{\rho c^2} \right) \quad (3.1.3)$$

Debido a la relevancia de la resistencia o impedancia acústica su análisis es más profundo porque está relacionado con las frecuencias de resonancia que produce el tubo, por lo que la siguiente sección está dedicada a este parámetro.

En el caso de un tubo sonoro abierto de radio uniforme con condiciones iniciales $x = 0$ y $x = L$, las frecuencias de resonancia pueden ser calculadas como [11]:

$$f_n = \frac{c}{2l_e} n \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (3.1.4)$$

Otra corrección a la longitud efectiva que se puede sustituir en la ecuación 3.1.4, es:

$$l_p = l + \frac{8a}{3\pi} \quad (3.1.5)$$

El tubo abierto se puede comportar como un clarinete, por lo que la longitud de onda estará dada por $\lambda_m = \frac{2l_p}{m}$ ($m = 1, 2, 3 \dots$) y las frecuencias de resonancia por:

$$f_m = \frac{c}{4l_p} m \quad (m = 1, 3, 5, \dots) \quad (3.1.6)$$

Es decir, sus frecuencias de resonancia son como las de un órgano de pipa cerrado.

3.1.1. Impedancia Acústica Específica

La impedancia se define como la resistencia al movimiento de un sistema hacia ciertos componentes de frecuencia de una señal de fuerza de entrada. Los componentes menos atenuados se denominan resonancias. En el caso del sonido se le llama impedancia acústica, a la relación entre la presión (esfuerzo volumétrico) y la velocidad o flujo acústico [8].

La presión en una onda de frecuencia ω viajando en la dirección positiva del eje x , con $\mathcal{A} = 1$ y $\mathcal{B} = 0$ tiene la forma:

$$p(x, t) = e^{-i(\omega t + kt)} \quad (3.1.1.1)$$

Tomando la parte real de la ecuación 3.1.1.1, se puede relacionar p y ξ por medio de la ecuación (2.1.5), por lo que se obtiene:

$$ikp = i\rho_0\omega \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (3.1.1.2)$$

Siendo $u = \frac{\partial \xi}{\partial t}$ la velocidad del flujo acústico y recordando que $k = \frac{\omega}{c}$, se tiene que:

$$p = \rho_0 c u \quad (3.1.1.3)$$

De esta manera, la presión acústica y el desplazamiento de velocidad o flujo acústico están en fase, en la dirección de propagación [6,7,8], así se tiene que:

$$Z_0 = \frac{p}{\frac{\partial \xi}{\partial t}} = \rho_0 c = (B\rho_0)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1.1.4)$$

Donde Z_0 es la impedancia acústica específica del medio para ondas acústicas planas [8]. Un parámetro acústico que sirve para determinar la resistencia del medio donde se propagan dichas ondas.

3.1.2. Impedancia a la entrada de un tubo

La impedancia de onda puede utilizarse para determinar la reflexión y transmisión acústicas en la interfaz entre dos medios, los coeficientes son los siguientes [8]:

$$C_R = \frac{B}{A} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.1.2.1)$$

$$C_T = \frac{C}{A} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3.1.2.2)$$

Dónde:

C_R = coeficiente de reflexión

C_T = coeficiente de transmisión

A = amplitud de la onda

B = amplitud de la onda reflejada

C = amplitud de la onda transmitida

Z_1 = impedancia de la interfaz 1

Z_2 = impedancia de la interfaz 2

En un tubo cilíndrico, la impedancia de entrada Z_{ent} en $x = 0$ está dada por [8]:

$$Z_{ent} = Z_0 \frac{\mathcal{A} + \mathcal{B}}{\mathcal{A} - \mathcal{B}} = Z_c \frac{Z_L \cos(kL) + jZ_c \sin(kL)}{jZ_L \sin(kL) - Z_c \cos(kL)} \quad (3.1.2.3)$$

Dónde:

Z_L = impedancia en $x = L$

$Z_c = \rho c/S$ impedancia acústica característica

\mathcal{A} = amplitud de la onda

\mathcal{B} = amplitud de la onda reflejada

Para el caso de un tubo rígido tapado en $x = L$, es decir, $Z_L = \infty$, se tiene:

$$Z_{ent} = -jZ_c \cot(kL) \quad (3.1.2.4)$$

En el caso de un tubo idealmente abierto, con $Z_L = 0$, se tiene:

$$Z_{ent} = -jZ_c \tan(kL) \quad (3.1.2.5)$$

Este último caso es difícil de obtener en la realidad, debido a la componente de impedancia de radiación, que ocurre en todos los extremos abiertos de un conducto acústico [8].

3.2. Flautas

La flauta es un tubo abierto cilíndrico de longitud finita. Presenta una impedancia acústica que provoca la resonancia de ciertas frecuencias. En el extremo final del tubo, ya sea abierto o cerrado ocurre el fenómeno de reflexión acústica. Las flautas se encuentran clasificadas en función de su mecanismo de producción de sonora, como instrumentos de viento, ya que la fuente de energía para generar sonido es una entrada de flujo de aire, donde el mecanismo de excitación son las oscilaciones de un chorro de aire a través de una abertura. Los modelos físicos de los instrumentos musicales de viento están divididos conceptualmente en dos partes: mecanismo de excitación y resonador acústico. Generalmente el mecanismo de excitación es modelado con una función no lineal, dado que su respuesta no depende linealmente de la variable de entrada (flujo de aire) y en el caso del resonador acústico, éste determina la frecuencia del sonido que produce el instrumento. En este caso el resonador se controla cerrando o abriendo distintos orificios, los cuales actúan alargando o reduciendo su longitud efectiva, elemento que puede ser modelada con una función de reflexión dependiente del tiempo [8].

Una propuesta de modelado es la realizada por McIntyre, Schumacher y Woodhouse [8]. En esta propuesta, el instrumento musical se separa en dos elementos fundamentales, uno lineal que corresponde a cada tubo y uno no lineal que corresponde a la embocadura (figura 3.2.1).

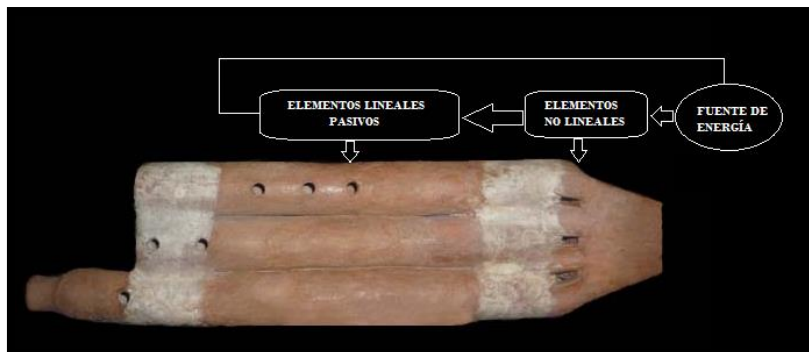


Figura 3.2.1. Esquema de modelo físico de McIntyre, Schumacher y Woodhouse (Adaptado a la flauta triple maya).

El elemento que recibe la energía directamente del exterior reacciona ante la excitación de forma no lineal, por lo tanto las ecuaciones que lo modelan son no lineales (por ejemplo, las relaciones entre presión y flujo en la embocadura). La dinámica de la excitación es influida por un segundo

elemento, el resonador, que la induce a producir un sonido, haciendo oscilar a dicho elemento a ciertas frecuencias. En general el tono está relacionado linealmente con alguna característica física del elemento resonador (su longitud). A este modelo se le denomina excitador-resonador. Prácticamente todos los instrumentos musicales tonales de excitación constante pueden ser adaptados a este modelo. En las flautas el primer elemento corresponde a la boquilla. Ahí el movimiento del aire obedece a las leyes de flujo no lineales. En las boquillas de tipo flauta, en principio, un chorro de aire proveniente del canalillo, cruza una apertura, la cual es también llamada boca. Por la ley de Bernoulli, la presión del chorro es inferior a la presión atmosférica, pues tiene una velocidad mayor (Figura 3.2.2). Esto, aunado a la geometría del bisel, así como a un leve efecto de vorticidad, provoca una ligera desviación de la dirección del chorro, hacia fuera del tubo. Una parte del chorro choca con el filo de un bisel, lo que produce una perturbación del chorro que viaja en dirección contraria y llega hasta su origen, a la salida del canalillo. Estas perturbaciones se amplifican a través del chorro, hacia el bisel, e incitan que el chorro se desvíe dentro y fuera del tubo de una forma oscilatoria. Esta excitación energética es transferida al segundo elemento, el tubo resonador. En este elemento, se favorece la excitación en una frecuencia (tono) que está relacionada con la longitud y la geometría del tubo. La presión de aire regresa al excitador, y provoca que el chorro oscile en la frecuencia de resonancia (Figura 3.2.3). De esa forma, el resonador influye en las desviaciones del chorro de aire en la ventana, de manera que el sistema se retroalimenta [8].

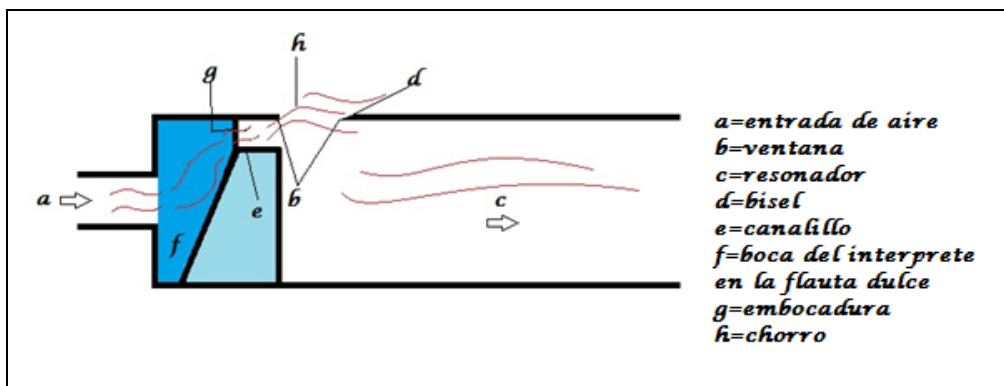


Figura 3.2.2. Esquema de un instrumento de viento, tipo flauta [8].

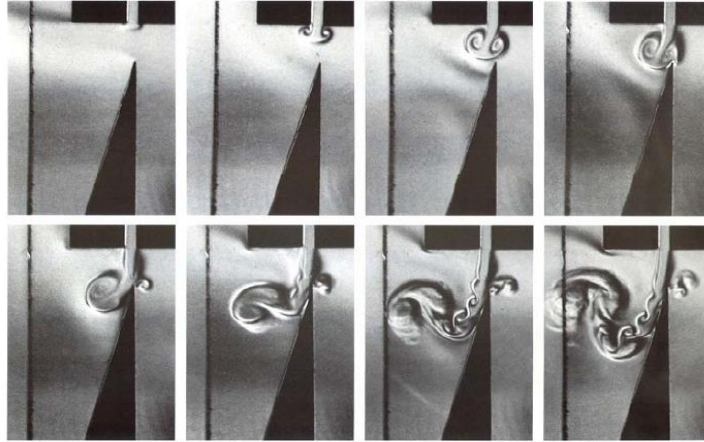


Figura 3.2.3. Secuencia de fotografías que muestran el proceso inicial de oscilación de un chorro en una boquilla de flauta dulce, a un intervalo de 0.5 microsegundos. Imagen tomada del artículo “Jet information and jet velocity fluctuations in a flue organ pipe” de Verge et al. [8].

En otras palabras es en el tubo resonador donde la excitación de la boquilla es inducida a una dinámica que corresponde a un tono armónico. Un conjunto de impulsos, en forma de presión de entrada, se introduce al resonador, recorre el tubo, rebota en un orificio abierto y regresa como presión de salida, con sentido inverso. Las transformaciones de la presión de salida con respecto a la de la entrada dependen directamente de las características geométricas del tubo y sus orificios. Por lo tanto, la función de reflexión del tubo resonador dependerá de tales características geométricas [8]. La modelación matemática de una flauta, se puede realizar a través del método de matrices de transferencia de Keffie en base de la geometría del resonador dividiendo al instrumento en secciones cilíndricas y en secciones nulas (orificios de digitación abiertos o cerrados), de esta manera se puede obtener la función de reflexión [8]. Esto se logra construyendo matrices de transferencia de cada sección por medio de la impedancia de entrada y de la impedancia de los orificios de digitación:

$$R_0 = \frac{\rho c}{\pi r^2} \quad (3.2.1)$$

Una vez calculadas las impedancias, se construye cada una de las matrices de transferencia en el dominio de la frecuencia para cada segmento del instrumento. La matriz de transferencia del tubo será la multiplicación de las demás matrices. Así la función de reflexión $r(t)$ se obtiene aplicando la transformada inversa de Fourier al coeficiente de reflexión en el dominio de la frecuencia para así obtener la función de reflexión en el dominio del tiempo.

3.2.1. Fenómenos Asociados a las Flautas

La interferencia es un fenómeno en el que dos o más ondas se superponen para formar una onda resultante de mayor o menor amplitud. La superposición de ondas de frecuencias muy cercanas entre sí produce el fenómeno de batimiento [13]. Se origina cuando se tienen dos fuentes sonoras con frecuencias ligeramente diferentes, el resultado de la superposición es una variación periódica

en amplitud en un punto dado, equivalentemente es una oscilación con una lenta intensidad pulsante [14], es decir, si se suman dos ondas acústicas planas, de frecuencias ω_1 y ω_2 , se obtiene una onda resultante de frecuencia promedio $\frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$ que oscila en intensidad con una frecuencia $\omega_1 - \omega_2$.

Matemáticamente se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$\mathcal{A}_1 e^{i\omega_1 t} + \mathcal{A}_2 e^{i\omega_2 t} = e^{\frac{1}{2}i(\omega_1 + \omega_2)t} \left[\mathcal{A}_1 e^{\frac{1}{2}i(\omega_1 - \omega_2)t} + \mathcal{A}_2 e^{\frac{1}{2}i(\omega_1 - \omega_2)t} \right] \quad (3.2.1.1)$$

Se tiene una onda de alta frecuencia con una modulación a la frecuencia más baja.

Cuya intensidad está dada por:

$$I = \mathcal{A}_1^2 + \mathcal{A}_2^2 + 2\mathcal{A}_1\mathcal{A}_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t \quad (3.2.1.2)$$

La intensidad se infla y desinfla a una frecuencia $\omega_1 - \omega_2$, variando entre los límites $(\mathcal{A}_1 + \mathcal{A}_2)^2$ y $(\mathcal{A}_1 - \mathcal{A}_2)^2$, si $\mathcal{A}_1 \neq \mathcal{A}_2$, la intensidad mínima no es cero [14].

Si las frecuencias de las ondas son muy cercanas (batimiento lento), se oye un trémolo (fluctuación periódica en la intensidad del sonido), mientras que si la frecuencia del batimiento se encuentra dentro del registro audible por los humanos (batimiento rápido) que es aproximadamente 20 Hz, pero no llega a ser mayor al ancho de banda crítica correspondiente, el cerebro lo comienza a percibir como una frecuencia muy grave, cuya frecuencia es correspondiente a la diferencia de las dos ondas que interactúan. Cuando sobrepasa la banda crítica se oyen dos sonidos separados por lo que el batimiento no es real, ya que no puede ser percibido mediante un osciloscopio, sino que es un falso sonido generado por el propio cerebro [13,15].

4. SONIDO DIGITAL

Para el estudio de fenómenos sonoros se deben incorporar principios básicos del Procesamiento Digital de Señales. Cuando la señal es digital, el sonido es capturado por un micrófono en secuencias de números binarios (0,1) que son transmitidos, almacenados o grabados en esa forma. El dispositivo que opera la conversión es llamado conversor analógico-digital (ADC) [10].

4.1. Conversión Analógica-Digital

Para el procesamiento y representación de señales analógicas en tiempo real, como el sonido, se utiliza un conversor analógico-digital, que consiste en la transcripción de dicha señal en señal digital [16,17,18]. La fig. 4.1.1 nos muestra esquemáticamente dicha conversión:

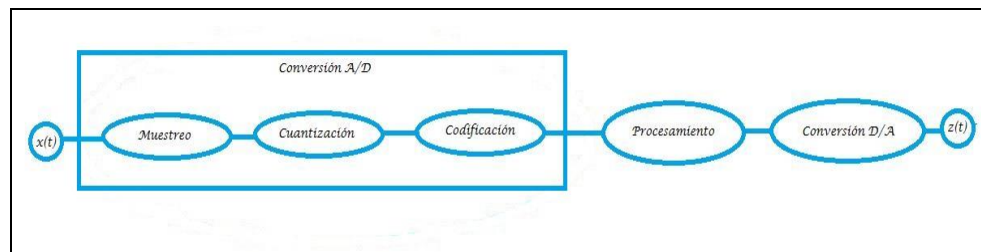


Figura 4.1.1. Esquema A/D de una señal x en función del tiempo

Dicha digitalización o conversión analógica-digital (conversión A/D) consiste básicamente en realizar de forma periódica medidas de la amplitud (tensión) de una señal, como aquella que proviene de un micrófono, tratando de registrar sonidos, redondear sus valores a un conjunto finito de niveles preestablecidos de tensión (conocidos como niveles de cuantificación) y registrarlos como números enteros en cualquier tipo de memoria o soporte [16,17,18].

La conversión A/D actúa en función de tres procesos sobre la señal analógica:

Muestreo: Consiste en tomar muestras periódicas de la amplitud de onda, es decir, medir los valores de la señal analógica en intervalos regularmente espaciados de tiempo. La velocidad con que se toma el número de muestras por segundo, es lo que se conoce como frecuencia de muestreo que es el número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua para producir una señal discreta, según el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon [16,17,18,19].

Cuantización: Asigna un margen de valor de una señal analizada a un único nivel de salida. Su versión ideal, añade, como resultado, una señal indeseada a la señal de entrada: ruido de cuantificación [16,17,18,19].

Codificación: Traduce los valores obtenidos durante la cuantificación al código binario, que toman valores desde un conjunto finito de $L = 2^b$ valores posibles. Cada uno de estos números es

entonces codificado usando b bits con el fin de ser almacenada o transmitida. Para audio de calidad se utiliza la codificación de 16 bits [16,17,18,19].

4.1.1. Teorema de Nyquist-Shannon

El teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, dice que la reconstrucción exacta de una señal periódica continua limitada en banda base a partir de sus muestras, es matemáticamente posible si la señal está limitada en banda y la tasa de muestreo es superior al doble de su ancho de banda. Dicho de otro modo, la información completa de la señal analógica original que cumple el criterio anterior está descrita por la serie total de muestras que resultaron del proceso de muestreo. No hay nada, por tanto, de la evolución de la señal entre muestras que no esté perfectamente definido por la serie total de muestras [10,16,17,18].

El proceso parte de una señal continua $x(t)$, que se muestrea usando un convertidor A/D para producir una sucesión de valores discretos $x[n] = x[nT_s]$, donde n es un valor entero que se utiliza como índice de muestreo y T_s es el período de muestreo ($T_s > 0$). La frecuencia de muestreo es el valor $F_s = \frac{1}{T_s}$. El convertidor D/A ideal permite recuperar de nuevo la señal a partir de los valores discretos [10].

Sea $x(t)$ una señal continua (analógica) sobre \mathbb{R} con periodo $T = \frac{1}{f}$, esto conduce a considerar la siguiente hipótesis al periodo de muestreo: $T < \frac{1}{2f}$

Porque la frecuencia de muestreo es $F_s = \frac{1}{T}$, que es una condición equivalente a:

$$f_s > 2f_M \equiv 2f \quad (4.1.1.1)$$

Dónde $f_M = f$ la frecuencia máxima de dicha señal. La expresión (4.1.1.1) es llamada el Criterio de Nyquist o Condición de Shannon [16,17,18].

4.2. Obtención del Contenido Armónico de una Señal Compleja

Determinadas propiedades de las señales digitales de sonido no son observables en el dominio temporal por lo que es necesario disponer de otro dominio que nos permita estudiarlas. Este dominio es el de la frecuencia, de manera que se pueda convertir la secuencia que está en el dominio del tiempo en una secuencia equivalente en el dominio de la frecuencia.

4.2.1. Análisis Tiempo-Frecuencia. Transformada Discreta de Fourier (DFT)

La transformada discreta de Fourier o DFT (Discrete Fourier Transform) transforma una función matemática en otra, obteniendo una representación en el dominio de la frecuencia, siendo la función original una función en el dominio del tiempo. Sin embargo, la DFT requiere que la función de entrada sea una secuencia discreta y de duración finita. Dichas secuencias se suelen generar a partir del muestreo de una función continua. Utilizar la DFT implica que el segmento que se analiza es un único periodo de una señal periódica que se extiende de forma infinita; si esto no se cumple, se debe utilizar una ventana para reducir los errores del espectro, es decir, evitar las frecuencias ficticias en los bordes. Por la misma razón, la DFT inversa (IDFT) no puede reproducir el dominio del tiempo completo, a no ser que la entrada sea periódica indefinidamente. Por estas razones, se dice que la DFT es una transformada de Fourier para análisis de señales de tiempo discreto y dominio finito. Las funciones sinusoidales base que surgen de la descomposición tienen las mismas propiedades [17,18].

Matemáticamente la Transformada de Fourier se expresa así:

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-\frac{2\pi i}{n}jk} \quad j = 0, \dots, n-1 \quad (4.2.1.1)$$

Por tanto, la DFT es el equivalente discreto de la Transformada de Fourier, donde se ha transformado la variable continua t por la variable discreta nT_s , por lo que la DFT es:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{kn} \quad (4.2.1.2)$$

Dónde $W_N^{kn} = e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$

Para el cálculo de la DFT se utiliza el algoritmo de la Transformada de Rápida de Fourier (FFT). Una de las herramientas más poderosas en el análisis científico moderno es la relación entre la convolución y la transformada de Fourier [16,17,18], esta relación se expresa como:

$$f(x) * h(x) \leftrightarrow F(k) \times H(k) \quad (4.2.1.3)$$

Es decir, la Transformada de Fourier de una convolución es el producto punto a punto de las transformadas. Este producto de transformadas se aplica en el análisis y procesamiento de señales que utilizan para generar funciones ventana, evitando las discontinuidades en el inicio y final de una señal de longitud limitada.

Si $x(t)$ es la señal en el dominio del tiempo a la que se le desea aplicar una ventana y $h(t)$ la función ventana, basta multiplicar (convolucionar) las transformadas de las mismas, y se tendrá una señal sin frecuencias ficticias:

$$X(f) * H(f) \tag{4.2.1.4}$$

Donde $X(f)$ y $H(f)$ son las transformadas de la señal y la función ventana respectivamente.

5. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LA FLAUTA TRIPLE MAYA

5.1. Dispositivo Experimental

Se diseñó un experimento para obtener el contenido armónico de instrumentos sonoros mesoamericanos, mismo que se utilizó para obtener la gama de sonidos emitidos por la Flauta Triple Maya, con el fin de realizar un estudio acústico, así como también para preservarlos.

Para realizar el estudio acústico de un instrumento de viento tipo flauta, se requiere:

- 1) Medidas anatómicas (Geometría del Instrumento)
- 2) Sonido emitido (Frecuencias de resonancia)

Por lo que se implementó un dispositivo experimental conformado por una cámara sonoamortiguada móvil (Figura 5.1.1) diseñada por la Dra. Francisca Zalaquett y el M. en Música Alejandro Ramos, micrófono ECM 800, computadora portátil, cables, sonómetro, interfaces Digi 002 (de 4 canales analógicos y 2 canales digitales) y Tascam US-122, cables de conexión instrumental y un vernier digital (detalles en el apéndice III).

El diseño se basó en la teoría de la información y en la conversión A/D (ver esquema de la figura 4.1.1), respetando el límite de Nyquist-Shannon (ecuación 4.1.1.1). Por lo que la frecuencia de muestreo utilizada en el experimento fue de 44100[Hz], ya que el rango auditivo humano es de [0, 20000][Hz] más un margen de error de 50 [Hz]. Con una resolución de 16 bits.

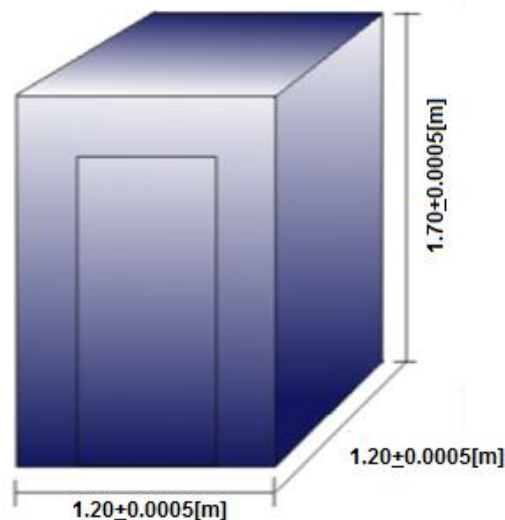


Figura 5.1.1. Cámara Sonoamortiguada Móvil

Para la obtención del sonido emitido por la flauta triple maya se introdujeron dos personas dentro de la cámara sonoamortiguada móvil, el ejecutante **E** y la persona encargada del cuidado del instrumento **EF**; mientras el ejecutante realiza las diferentes excitaciones, otra persona **PG** afuera se encarga de obtener la señales por medio de un software especializado en grabación de audio (la configuración de las posiciones se pueden observar en la figura 5.1.2); la posición del micrófono fue a una distancia de (20 ± 0.05) [cm] del instrumento y con dirección al instrumento como se observa en la figura 5.1.3. Para la excitación de la flauta, el ejecutante o intérprete tomó una posición similar a la que se toma en flautas modernas (la posición de su boca se puede observar en la figura 5.1.4). De esta manera se realizaron diferentes excitaciones al instrumento tratando de obtener en la medida de las posibilidades del intérprete la mayor cantidad de tonos generados por la misma, haciendo diferentes digitaciones e intensificando el soplo. Las señales (grabaciones) obtenidas se guardaron para su posterior edición y análisis.

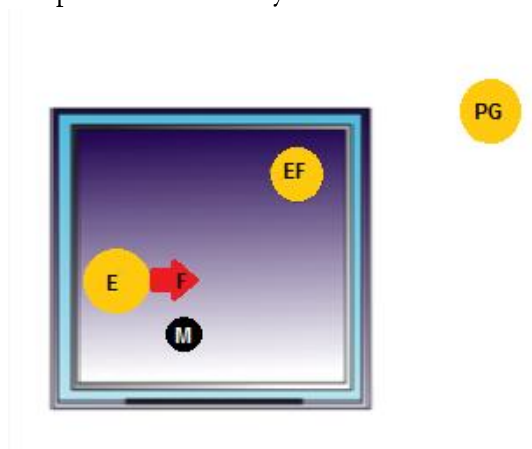


Figura 5.1.2. Esquema de las posiciones, vista desde arriba dentro de la cámara sonoamortiguada móvil.
M: micrófono y F: flauta de Jaina.

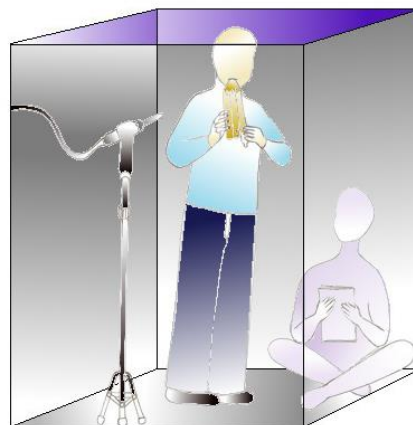


Figura 5.1.3. Muestra la posición del micrófono y el ejecutante dentro de la cámara sonoamortiguada móvil.

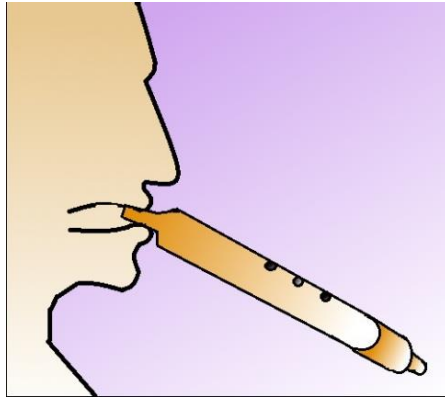


Figura 5.1.4. Posición de la boquilla

Se obtuvieron 6 grabaciones (ver base de datos en Anexos-Medición) de la flauta:

Grabación 1 → Excitación de los 3 tubos por separado que conforman a la flauta.

Grabación 2 → Excitación de la Flauta 1 y 2

Grabación 3 → Flautas 2 y 3

Grabación 4 → Flautas 1 y 3

Grabación 5 → Las 3 Flautas

Grabación 6 → Ejecución Libre

Cada grabación contiene diferentes tipos de digitaciones, (puesto que las diferentes digitaciones permiten cambiar la frecuencia del sonido emitido por el instrumento), es decir, las diferentes combinaciones que se hicieron tapando y destapando orificios, así como también se excitó de forma suave y media en cada caso que se refieren a la intensidad del soplido. Los esquemas que muestran las diferentes digitaciones se pueden ver en los anexos.

Para obtener las medidas anatómicas de la flauta se utilizó un vernier digital calibrado cuya mínima escala es de 0.1[mm], sin embargo los bordes de la flauta no son finos por lo que la medición se hizo tomando como mínima escala 1[mm]. Las medidas fueron tomadas siguiendo una metodología arqueológica. Dicha metodología implica manipular el instrumento adecuadamente para la toma de datos anatómicos, así como las características estructurales y clasificaciones arqueológicas del instrumento, además de la toma de fotografías en diferentes posiciones. Los datos anatómicos se pueden consultar en el apéndice IV.

5.2. Contenido Armónico

Por su constitución anatómica y mecanismo de producción sonora, la flauta triple es un instrumento de viento, puesto que la fuente de energía para generar sonido es una entrada de flujo de aire. Su estudio se puede realizar a través del modelo físico, que divide a la flauta en dos elementos, el excitador (la boquilla) parte no lineal y el tubo resonador parte lineal.

La flauta triple genera diversidad de sonidos cuando es excitada por medio de un flujo de aire proveniente del soplido de un músico. Esta diversidad depende de la interacción de los tres tubos y de los orificios de digitación. Por lo que para caracterizarla acústicamente, es necesario realizar un análisis Tiempo-Frecuencia, por medio del algoritmo FFT aplicado a las señales de audio obtenidas del experimento. De manera que se toma un elemento finito que contenga el tipo de excitación a estudiar, mismo que se obtiene mediante la edición de cada señal.

Para lograr obtener la señal en el dominio del tiempo y de la frecuencia, fue necesario implementar un programa automatizado, que también permitió obtener las frecuencias de resonancia y sus respectivos rangos dinámicos. La base de datos se puede ver en los anexos (Tablas A.1-A.6) y el programa en el apéndice II.

Las siguientes gráficas muestran la dispersión de las frecuencias de resonancia obtenidas mediante el programa (figuras 5.2.1, 5.2.2. y 5.2.3).

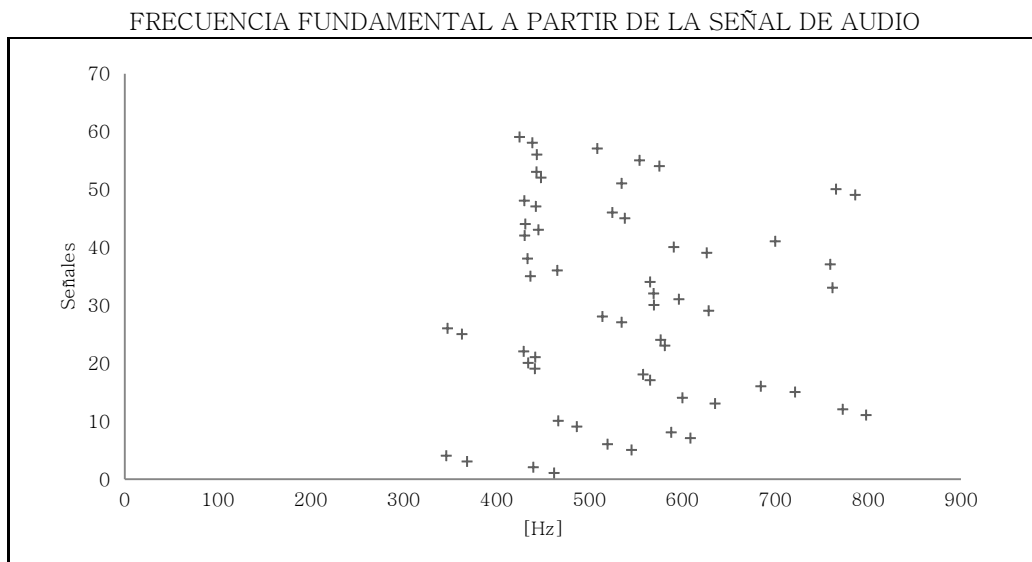


Figura 5.2.1. Muestra la dispersión de frecuencias fundamentales

PRIMER ARMÓNICO A PARTIR DE LA SEÑAL DE AUDIO

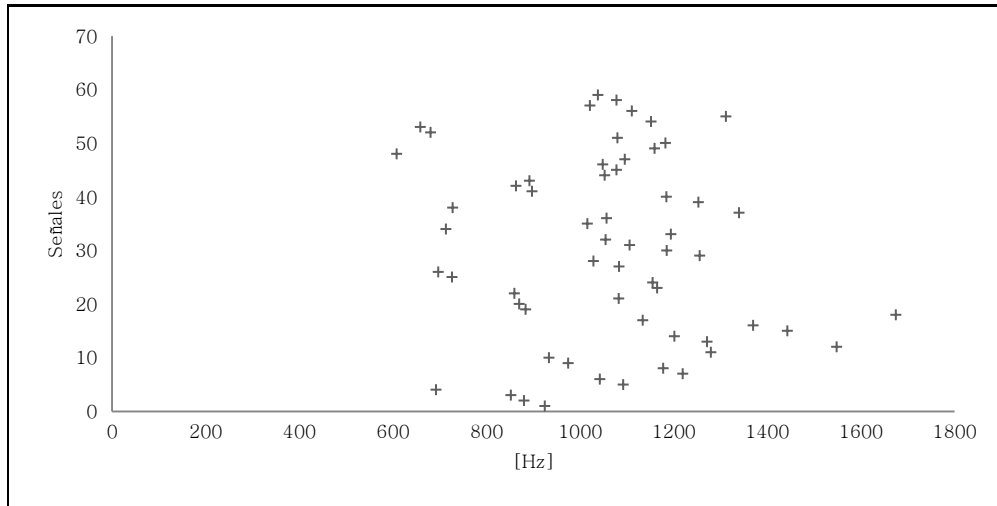


Figura 5.2.2. Muestra la dispersión de las frecuencias resonantes del primer armónico.

SEGUNDO ARMÓNICO A PARTIR DE LA SEÑAL DE AUDIO

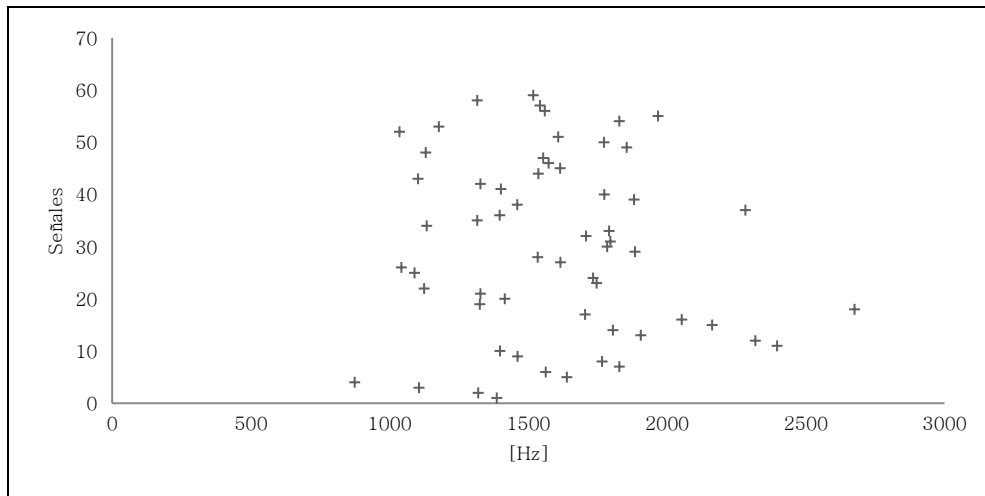


Figura 5.2.3. Muestra la dispersión de frecuencias resonantes del segundo armónico.

De las gráficas de dispersión anteriores (Figuras 5.2.1, 5.2.2 y 5.2.3), las frecuencias de resonancia están dentro de los siguientes intervalos:

Fundamental → de $(346.430820 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz] a $(798.339370 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Primer armónico → de $(608.004600 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz] a $(1675.07600 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Segundo armónico → de $(874.5577090 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz] a $(2676.121400 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

En la siguiente tabla se muestra la función que tienen las frecuencias dados los intervalos donde se encuentran las frecuencias de resonancia.

Frecuencias	Hertz	Función	Grupo
Bajas (graves)	40-120	Dar cuerpo y fuerza	Rítmicos
Medias (graves)	130-900	Dan Cuerpo	Rítmicos y melódicos
Medias (agudas)	1000-4000	Definen el sonido	Melódicos
Agudas	5000 -7000	Dan brillo y apertura	Adorno
Armónicas	10000 -20000		

Tabla 5.2.1. Muestra la función de la frecuencia desde la perspectiva occidental [21].

Por lo tanto, de la tabla 5.2.1, la parte sombreada muestra que desde el punto de vista de la cultura occidental la flauta se encuentra dentro de las frecuencias medias que dan cuerpo y definen el sonido, perteneciendo al grupo de los rítmicos y melódicos. Sin embargo esto solo nos indica de manera muy básica la funcionalidad que pudo tener como instrumento desde la óptica moderna, por lo que es necesario realizar un análisis cuantitativo y cualitativo más amplio que permita obtener resultados acerca de la gama de posibilidades musicales.

5.3. Longitud Efectiva

Se hacen dos correcciones a la longitud anatómica tomando a la flauta triple integrada por tres tubos abiertos de diámetro uniforme y posteriormente se hace otra corrección tomándola como si los tubos tuvieran una organología similar al clarinete.

1) Flauta Triple como tubo abierto

$$\text{Corrección } l_e \cong l + 0.8\sqrt{S}$$

Con los datos anatómicos de flauta triple, obtenidos de la tabla IV.1 (Apéndice IV), se obtienen las longitudes efectivas de cada tubo (Tablas 5.3.1 y 5.3.2):

Ejemplar	Área [m ²] $\pm 0.111 \times 10^{-4}$	Longitud efectiva [m] $\pm 5 \times 10^{-4}$
Flauta 1 $\rightarrow l_{e1}$	3.870X10 ⁻⁴	0.2827
Flauta 2 $\rightarrow l_{e2}$	3.767 X 10 ⁻⁴	0.2295
Flauta 3 $\rightarrow l_{e3}$	3.698 X 10 ⁻⁴	0.2294

Tabla 5.3.1. Muestra el área y las longitudes efectivas a partir de los datos anatómicos.

Donde S=área de la sección transversal. Como los tubos son cilíndricos $S = \pi r^2$

$$\text{Corrección } l_p = l + \left(\frac{8a}{3\pi}\right)$$

Ejemplar	Longitud efectiva [m]
Flauta 1 $\rightarrow l_{p1}$	0.279 ± 0.0005
Flauta 2 $\rightarrow l_{p2}$	0.226 ± 0.0005
Flauta 3 $\rightarrow l_{p3}$	0.226 ± 0.0005

Tabla 5.3.2. Muestra las longitudes efectivas de cada flauta.

Con la ecuación 3.1.4 se obtuvieron las frecuencias de resonancia para ambas correcciones. La tabla 5.3.1 muestra la longitud efectiva de cada flauta con la corrección l_e y la tabla 5.3.2 con la

corrección l_p (ecuación 3.1.5). Las tablas de dichas frecuencias resonantes se pueden ver en los anexos, de la tabla A.7-A.16 para la corrección l_e . Y de la tabla A.17-A.26 para la corrección l_p .

Con la corrección l_e se tienen los siguientes intervalos de frecuencias:

Fundamental $\rightarrow (606.56564 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz] - (747.18977 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz]$
 Primer armónico $\rightarrow (1213.11313 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz] - (1494.37955 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz]$
 Segundo armónico $\rightarrow (1819.69693 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz] - (2241.56932 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz]$

El conjunto de frecuencias de resonancia obtenidas a partir de la corrección, se encuentran dentro de los intervalos de las frecuencias de resonancia obtenidas a partir de las señales de audio, ya que la cota inferior (frecuencias fundamentales) está por arriba de la cota inferior de las señales de audio en 260.134844[Hz]. La cota superior está por debajo de la cota superior de las señales de audio en 51.1496[Hz]. De la misma forma sucede con el primer y segundo armónico los cuales también se encuentran dentro del intervalo obtenido por las señales de audio.

Con la corrección l_p se tienen los siguientes intervalos:

Fundamental $\rightarrow (620.42825 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz] - (768.04348 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz]$
 Primer armónico $\rightarrow (1240.85649 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz] - (1536.08697 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz]$
 Segundo armónico $\rightarrow (1861.28474 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz] - (2304.13045 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz]$

En este caso el conjunto de resonancias obtenidas a partir de la señal se encuentran dentro del conjunto de resonancias obtenidas de las señales de audio pero más alejadas que el caso anterior.

Por lo tanto para estos dos casos, las cotas más cercanas a los valores reales, son los de la corrección $l_e \cong l + 0.8\sqrt{S}$ para tubo abierto.

2) Flauta Triple como tubo cerrado (clarinete)

$$\text{Corrección } l_p = l + \left(\frac{8a}{3\pi}\right)$$

Con la ecuación 3.1.6 se obtuvieron las frecuencias de resonancia de un tubo cerrado. Las tablas se pueden ver en los anexos (Tablas A.27-A.36).

Corrección l_p se tienen los siguientes intervalos:

Frecuencia fundamental $\rightarrow (310.21412 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz] - (384.02174 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz]$
 Primer armónico $\rightarrow (930.64237 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz] - (1152.06523 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz]$
 Segundo armónico $\rightarrow (1551.07062 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz] - (1920.10871 \pm 4.5 \times 10^{-5})[Hz]$

En este caso las frecuencias de resonancia obtenidas con esta corrección, para tubo cerrado no están completamente contenidas en el conjunto de frecuencias de resonancia obtenidas a partir de las señales de audio. Para la frecuencia fundamental el intervalo no alcanza los valores obtenidos de las señales de audio. En el caso del primer y segundo armónico, hay una diferencia apreciable en sus cotas inferiores respecto a las cotas inferiores de las frecuencias de resonancia de las señales de audio.

Por lo tanto la corrección que mejor aproxima los valores de las señales sonoras emitidas por la flauta es la $l_e \cong l + 0.8\sqrt{S}$.

5.4. Corrimiento en las frecuencias de resonancia

Las siguientes figuras muestran las gráficas de las frecuencias de resonancia de las señales de audio. Se pretende observar que tan diferentes son las frecuencias de resonancia obtenidas del espectro de la señal (primer y segundo armónico), respecto a las obtenidas de la teoría, donde los armónicos van en una sucesión de múltiplos enteros a partir de la frecuencia fundamental. Es, decir, obtener el coeficiente de correlación entre ambas frecuencias.

Grabación 1. Flautas por separado

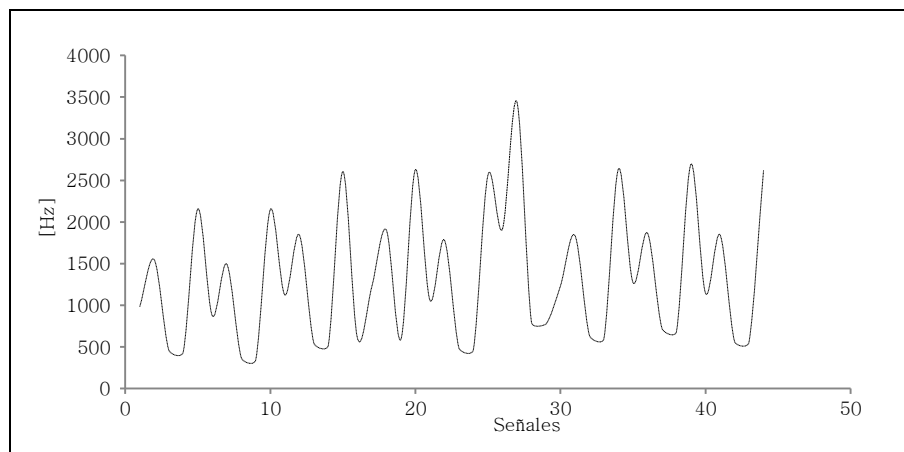


Figura 5.4.1. Muestra las frecuencias fundamentales de resonancia.

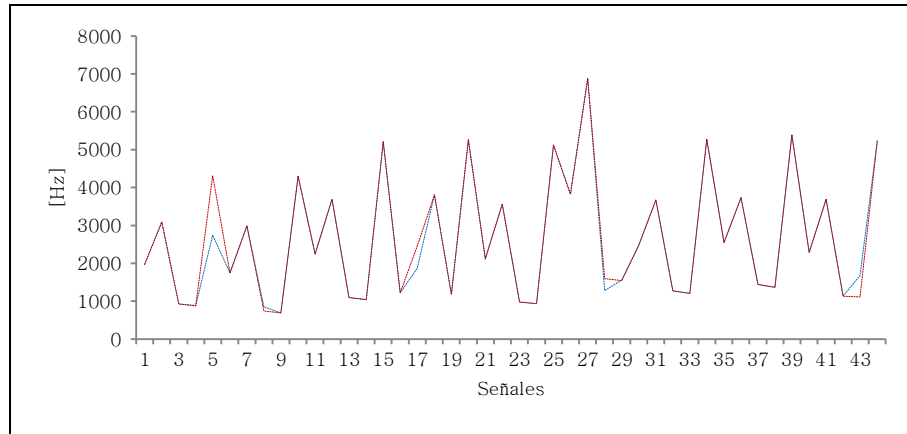


Figura 5.4.2. Muestra el corrimiento del primer armónico. (Línea azul-corresponde al armónico obtenido de la señal y línea roja-corresponde al armónico obtenido de la sucesión de múltiplos enteros).

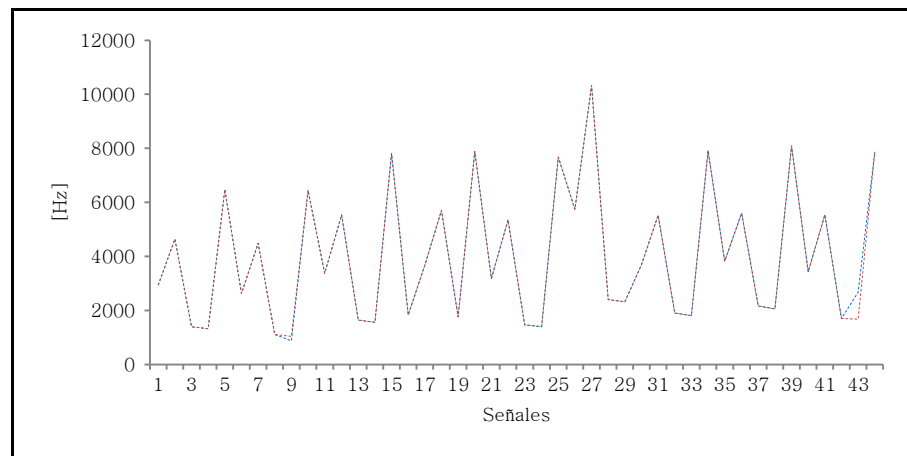


Figura 5.4.3. Muestra el corrimiento del segundo armónico. (La línea azul corresponde al armónico obtenido del espectro y línea roja, corresponde al armónico obtenido de la sucesión de múltiplos enteros)

El corrimiento vertical entre frecuencias de resonancia para el primer armónico (Figura 5.4.2), es sutil ya que la línea azul solo se logra diferenciar en tres de sus puntos, por lo tanto ambas frecuencias, teóricas y experimentales se corresponden. Su coeficiente de correlación es de **0.99572** es casi 1, pues entre más cercano sea a 1, mejor correlacionadas están. Es mayor la correlación para el segundo armónico (Figura 5.4.3) cuyo coeficiente de correlación es **0.99758**, pues sólo se logra distinguir la línea azul en un punto.

Para las siguientes figuras, de la misma forma que las figuras 5.4.2 y 5.4.3 la línea azul corresponde al armónico obtenido del espectro de la señal y la línea roja corresponde al armónico obtenido de la sucesión de múltiplos enteros ($2f$ y $3f$).

Grabación 2. Flautas 1 y 2

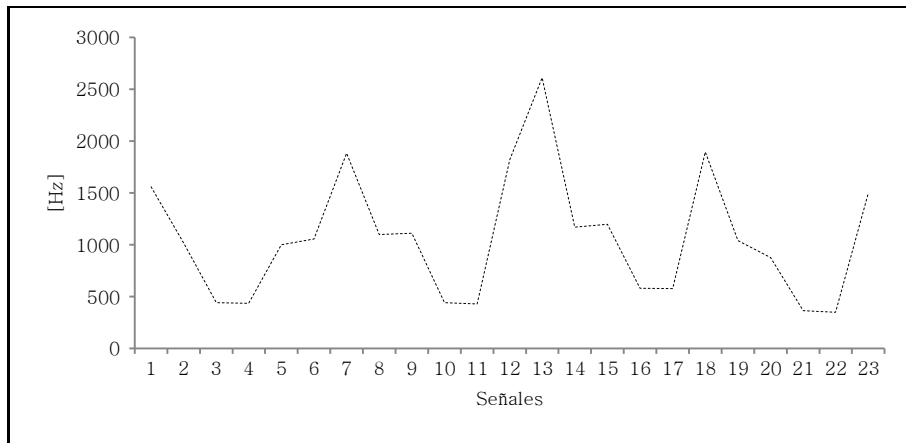


Figura 5.4.4. Muestra las frecuencias fundamentales de la grabación de las flautas 1 y 2.

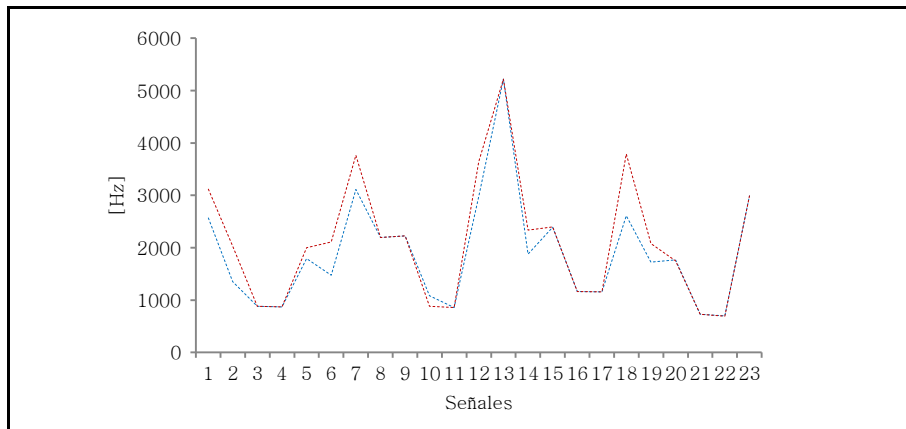


Figura 5.4.5. Muestra el corrimiento del primer armónico entre las flautas 1 y 2.

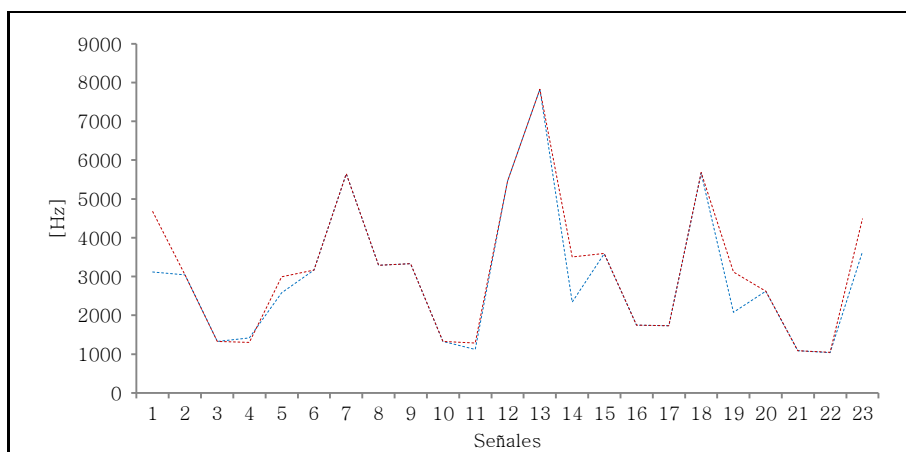


Figura 5.4.6. Muestra el corrimiento del segundo armónico entre las flautas 1 y 2.

Coefficiente de correlación (Figura 5.4.5) \rightarrow 0.9665558

Coefficiente de correlación (Figura 5.4.6) \rightarrow 0.974220081

Grabación 3. Flautas 2 y 3

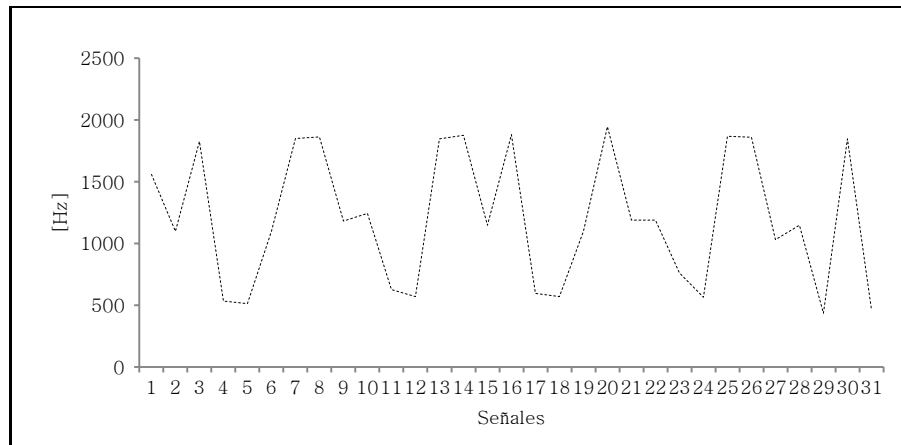


Figura 5.4.7. Muestra las frecuencias fundamentales entre las flautas 2 y 3.

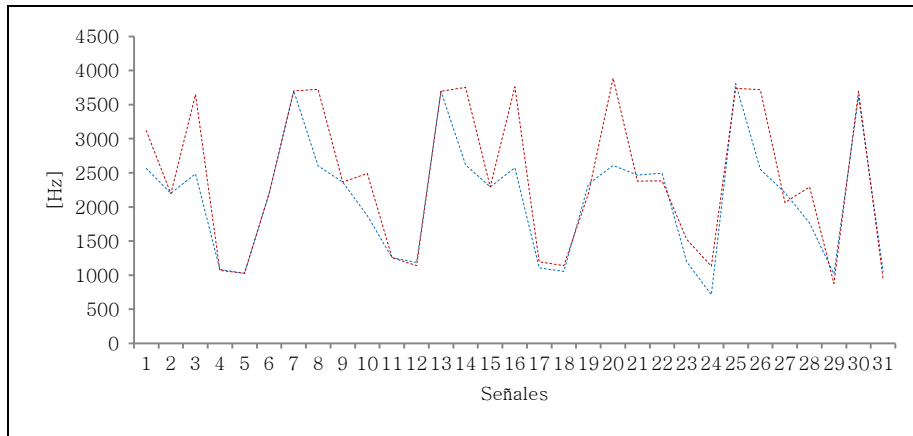


Figura 5.4.8. Muestra el corrimiento del primer armónico entre flautas 2 y 3.

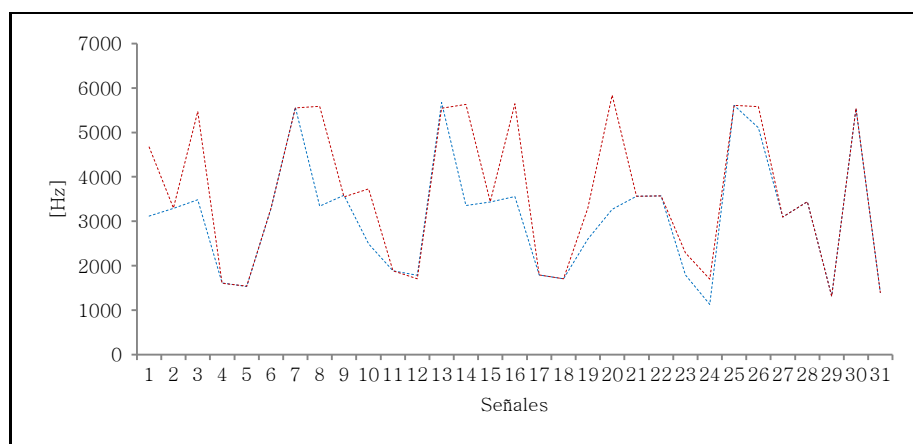


Figura 5.4.9. Muestra el corrimiento del segundo armónico entre flautas 2 y 3.

Coefficiente de correlación (Figura 5.4.8) \rightarrow 0.89556508

Coefficiente de correlación (Figura 5.4.9) \rightarrow 0.847883804

Grabación 4. Flautas 1 y 3

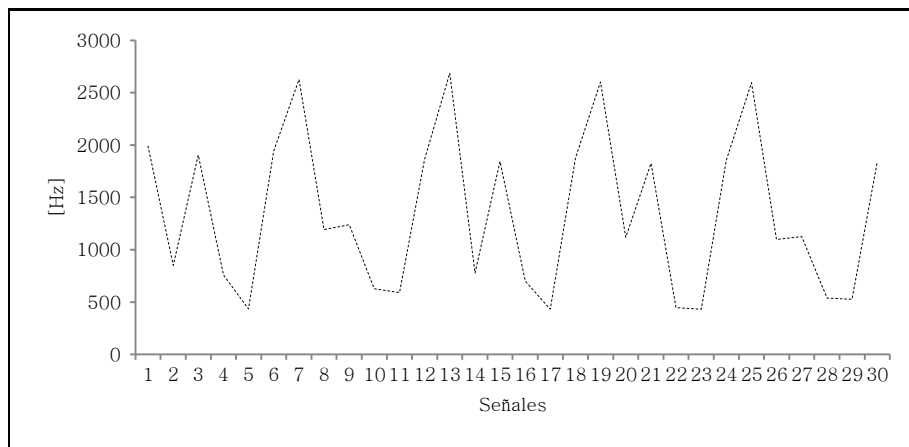


Figura 5.4.10. Muestra las frecuencias fundamentales entre las flautas 1 y 3.

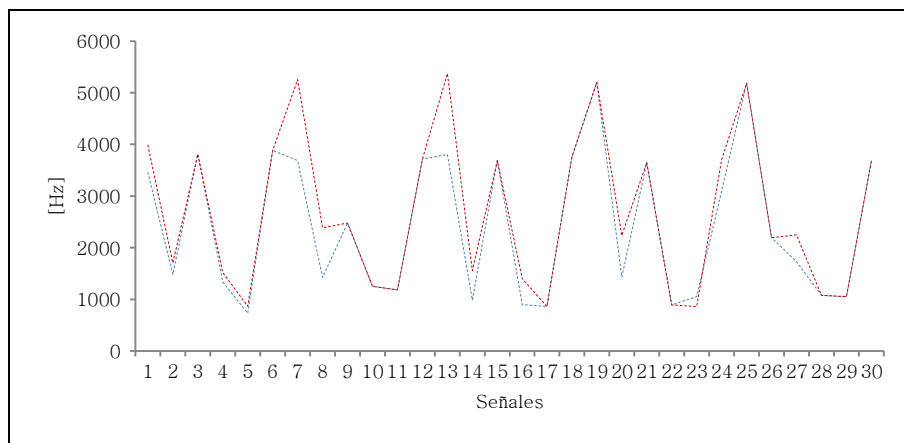


Figura 5.4.11. Muestra el corrimiento del primer armónico entre las flautas 1 y 3.

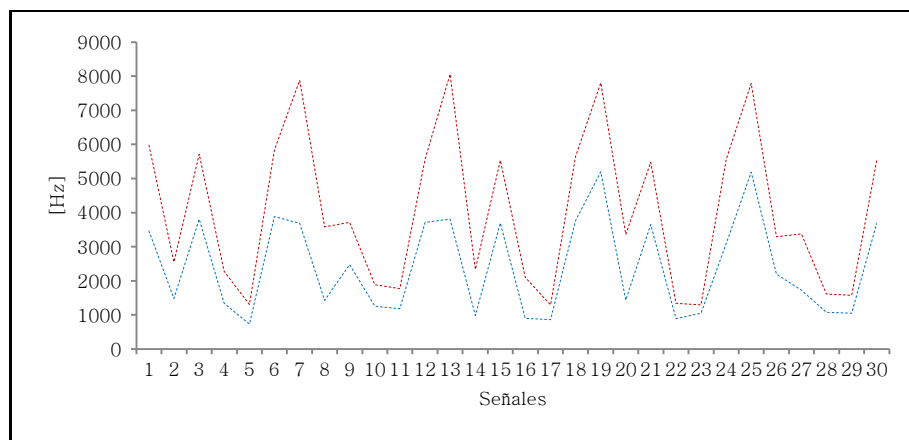


Figura 5.4.12. Muestra el corrimiento del segundo armónico entre las flautas 1 y 3.

Coefficiente de correlación (Figura 5.4.11) \rightarrow 0.9534665

Coefficiente de correlación (Figura 5.4.12) $\rightarrow 0.9534665$

Grabación 5. Las tres flautas

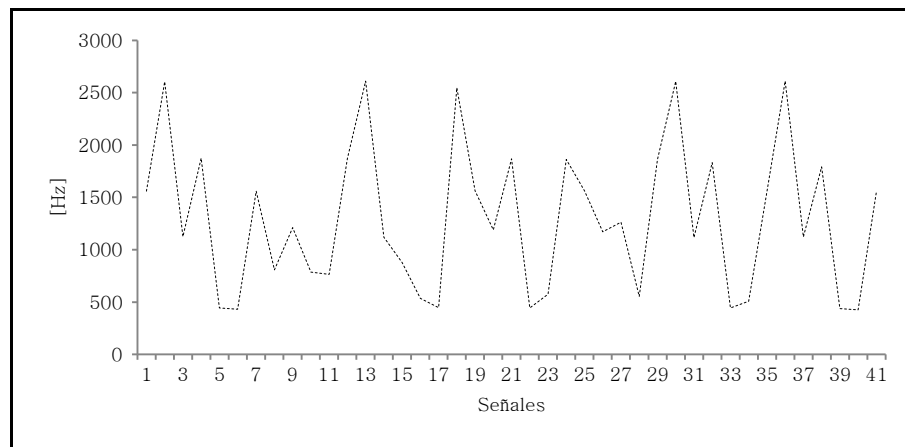


Figura 5.4.13. Muestra las frecuencias fundamentales entre las tres flautas.

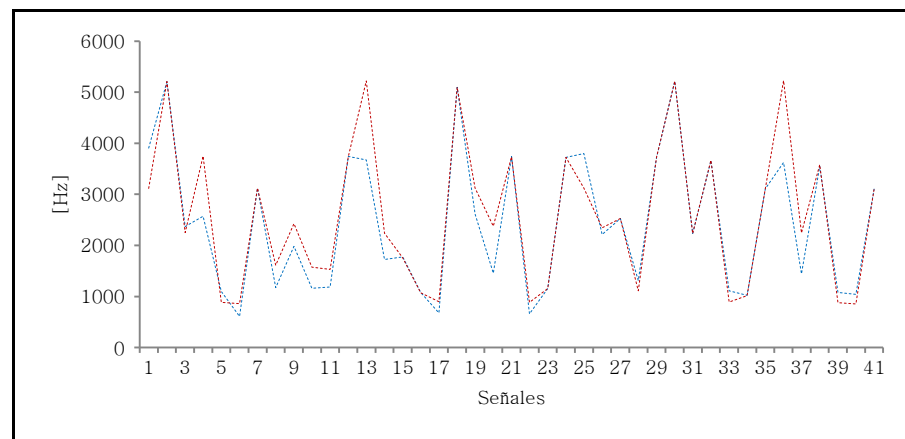


Figura 5.4.14. Muestra el corrimiento del primer armónico entre las tres flautas.

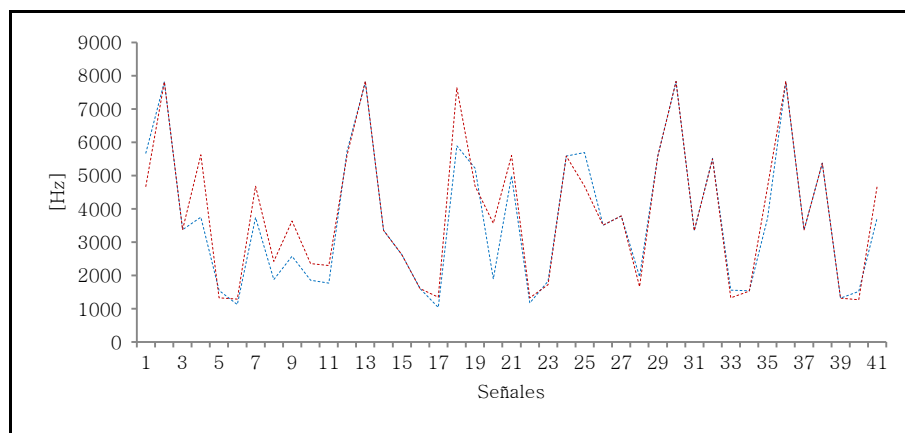


Figura 5.4.15. Muestra el corrimiento del segundo armónico entre las tres flautas.

Coefficiente de correlación (Figura 5.4.14) $\rightarrow 0.94113945$

Coefficiente de correlación (Figura 5.4.15) $\rightarrow 0.965728883$

Con el cálculo de los coeficientes de correlación así como de la observación de las gráficas, se concluye que las frecuencias de resonancia obtenidas del espectro de la señal respecto a las obtenidas de los múltiplos enteros de la fundamental, están ligeramente desplazadas; posiblemente por el ruido generado por los cables durante la grabación. Sin embargo, los coeficientes de correlación verifican la efectividad del programa automatizado para la obtención de frecuencias de resonancias.

5.5. Tubos resonadores

El análisis del comportamiento de un resonador puede ser modelado por medio de un circuito equivalente que interprete el funcionamiento de cada una de sus partes (figura 3.1.1).

Tomando la corrección $l_e \cong l + 0.8\sqrt{S}$ y las ecuaciones 3.1.2 y 3.1.3 sobre la longitud de cada uno de los tubos, se obtienen los siguientes parámetros acústicos:

Inductancia

Flauta 1.

$$L_{\alpha 1} = \left(\frac{\rho l_{e1}}{S_1} \right) \left[\frac{g}{m^4} \right] = \left(\frac{1.29 * (0.2827 \pm 5 \times 10^{-4})}{3.870 \times 10^{-4} \pm 0.111 \times 10^{-4}} \right) = (942.3333 \pm 29.2982) \left[\frac{Kg}{m^4} \right]$$

Donde $\rho = 1.29 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

La incertidumbre relativa en esta medición es ± 0.0310 que representa el 3.1%

Flauta 2.

$$L_{\alpha 2} = \left(\frac{\rho l_{e2}}{S_2} \right) \left[\frac{g}{m^4} \right] = \left(\frac{1.29 * (0.2295 \pm 5 \times 10^{-4})}{(3.767 \times 10^{-4}) \pm 0.111 \times 10^{-4}} \right) = (785.9172 \pm 24.4854) \left[\frac{Kg}{m^4} \right]$$

La incertidumbre relativa es ± 0.0311 que representa el 3.1%

Flauta 3.

$$L_{\alpha 3} = \left(\frac{\rho l_{e3}}{S_3} \right) \left[\frac{g}{m^4} \right] = \left(\frac{1.29 * (0.2294 \pm 5 \times 10^{-4})}{(3.698 \times 10^{-4}) \pm 0.111 \times 10^{-4}} \right) = (800.2326 \pm 25.3720) \left[\frac{Kg}{m^4} \right]$$

La incertidumbre relativa es ± 0.0317 que representa el 3.1%

Capacitancia

$$c = 331 \left[\frac{m}{s} \right] \pm (0.6 * T) \left[\frac{m}{s^{\circ}C} \right]$$

Flauta 1.

$$C_{\alpha 1} \approx \left(\frac{V_1}{\rho c^2} \right) \left[\frac{m^4 s^2}{g} \right] = \left(\frac{1.094 \times 10^{-4}}{1.29 * 343^2} \right) = (7.208 \times 10^{-10}) \left[\frac{m^4 s^2}{Kg} \right]$$

Flauta 2.

$$C_{\alpha 2} \approx \left(\frac{V_2}{\rho c^2} \right) \left[\frac{m^4 s^2}{g} \right] = \left(\frac{8.645 \times 10^{-5}}{1.29 * 343^2} \right) = (5.698 \times 10^{-10}) \left[\frac{m^4 s^2}{Kg} \right]$$

Flauta 3.

$$C_{\alpha 3} \approx \left(\frac{V_3}{\rho c^2} \right) \left[\frac{m^4 s^2}{g} \right] = \left(\frac{8.483 \times 10^{-5}}{1.29 * 343^2} \right) = (5.589 \times 10^{-10}) \left[\frac{m^4 s^2}{Kg} \right]$$

La inductancia es la propiedad de un circuito eléctrico que se opone a cualquier cambio en la corriente que pasa por ese circuito dado que es un elemento inercial. En un sistema acústico como la flauta triple maya, la inductancia obtenida es la masa que se opone a cualquier cambio de variación en el movimiento de las partículas del medio. Mientras que la capacitancia es el elemento restitutivo por lo que una unidad de presión aplicado al sistema será el volumen de desplazamiento.

Impedancia Acústica Característica de cada tubo

Tomando la impedancia acústica específica del aire: $Z_0 = \rho c = (1.29)(343) = 442.47 \left[\frac{Pa \cdot s}{m} \right]$, y de la ecuación $Z_c = \rho c / S$, se calculó la impedancia acústica característica de cada tubo:

Flauta 1

$$Z_{c1} = \frac{422.47}{0.0003870} = 1091653.747 \left[\frac{Pa \cdot s}{m^3} \right]$$

Flauta 2

$$Z_{c2} = \frac{422.47}{0.0003767} = 1121502.522 \left[\frac{Pa \cdot s}{m^3} \right]$$

Flauta 3

$$Z_{c3} = \frac{422.47}{0.0003698} = 1142428.34 \left[\frac{Pa \cdot s}{m^3} \right]$$

Impedancias de entrada

De la ecuación 3.1.2.5 y del hecho que el número de onda es $k = \frac{\omega}{c}$ se tiene:

Orificios Destapados $k1=8.060$ $k2=10.7804$ $k3=14.1638$

$$\text{Flauta 1} \rightarrow Z_{ent} = -j1091653.747 \tan(k0.2827) = -43436.23375j$$

$$\text{Flauta 2} \rightarrow Z_{ent} = -j1121502.522 \tan(k0.2295) = -48457.97215j$$

$$\text{Flauta 3} \rightarrow Z_{ent} = -j1142428.34 \tan(k0.2294) = -64855.29397j$$

Orificios Tapados $k1=6.3460$ $k2=8.5508$ $k3=10.2221$

$$\text{Flauta 1} \rightarrow Z_{ent} = -j1091653.747 \tan(k0.2827) = -34192.44166j$$

$$\text{Flauta 2} \rightarrow Z_{ent} = -j1121502.522 \tan(k0.2295) = -38427.0398j$$

$$\text{Flauta 3} \rightarrow Z_{ent} = -j1142428.34 \tan(k0.2294) = -46782.39529j$$

Impedancias de los Agujeros de Digitación

De la ecuación 3.2.1 y de las medidas anatómicas de la tabla IV.4 (Apéndice IV):

Flauta 1.

-Orificio 1

$$R_{01} = \frac{442.47}{\pi(0.0033)^2} = 12933202.51 \left[\frac{Pa \cdot s}{m^3} \right]$$

Flauta 2.

-Orificio 2

$$R_{01} = \frac{442.47}{\pi(0.00275)^2} = 18623768.06 \left[\frac{Pa \cdot s}{m^3} \right]$$

-Orificio 3

$$R_{01} = \frac{442.47}{\pi(0.0028)^2} = 17964614.2 \left[\frac{Pa \cdot s}{m^3} \right]$$

Flauta 3.

-Orificio 4=Orificio 7=Orificio 8

$$R_{01} = \frac{442.47}{\pi(0.00305)^2} = 15140292.97 \left[\frac{Pa \cdot s}{m^3} \right]$$













-Orificio 5=Orificio 6

$$R_{01} = \frac{442.47}{\pi(0.0035)^2} = 11497353.09 \left[\frac{Pa \cdot s}{m^3} \right]$$

Estas impedancias calculadas son los elementos disipativos dentro de nuestro sistema, por lo tanto donde hay menos resistencia para el fluido es en un tubo de radio mayor que de uno menor, por eso la impedancia es más grande en los agujeros de digitación. Este cálculo de impedancias es el inicio para la construcción de las matrices de transferencia y con ello calcular la función de reflexión del tubo de resonador.

5.6. Intervalos Musicales de la Flauta Triple Maya

Para encontrar la diferencia de altura entre dos notas musicales de manera cuantitativa y cualitativa, que indique la distancia entre tonos y semitonos, es decir, el intervalo existente entre las mismas; se realiza una equivalencia entre las frecuencias de resonancia de la flauta triple (frecuencias fundamentales, soplido medio) y las frecuencias de las notas musicales del sistema occidental (Anexos tablas A.37-A.39). Así se obtienen los siguientes esquemas de digitación:

e1	e2	e3	e4	e5	e6
					
La #4 -13.81 2f=La #5 -13.51 3f=Fa 6 -11.92	f=Fa #4 -6.02 2f=Sol #5 43.32 3f=Do #6 -2.87	f=Re #5 -35.04 2f=Re #6 -36.75 3f=LLa#6 -21.1	f=Si 4 -23.42 2f=Si 5 -22.74 3f=Fa #6 -21.1	f=Do #5 -47.96 2f=Do #6 -25.36 3f=Sol #6 -22.73	f=Fa #5 18.98 2f=Mí 6 -40.97 3f=Re 7 33.79
e7	e8	e9	e10	e11	e12
					
f=Do #5 34.14 2f=Fa #6 -42.37 3f=Do #7 -41.28	f=Re #5 35.83 2f=La 5 7.34 3f=Mí 6 14.59	f=Fa #5 -41.62 2f=Do #6 -39.32 3f=Mí 6 16.67	f=La 4 7.02 2f=Re 6 -14.53 3f=La 6 -13.36	f=La 4 8.42 2f=Do #6 38.04 3f=Sol #6 44.34	f=Re 5 -16.68 2f=Re #6 38.43 3f=La #6 36.88

e13



f=Fa #4 -30.63
2f=Fa #5 -30.64
3f=Do #5 -28.77

e14



f=Do 5 37.77
2f=Do #6 -36.68
3f=Sol #6 -45.99

e15



f=Re #5 17.34
2f=Re #5 16.43
3f=La #6 18.66

e16



f=Re 5 27.13
2f=Do #6 -4.43
3f=La 6 34.03

e17



f=Sol 5 -46.8
2f=Re 6 27.43
3f=La 6 29.79

e18



f=La #4 -1.42
2f=Do 6 16.09
3f=Fa 6 0.12

e19



f=Fa #5 45.04
2f=Mí 6 31.54
3f=Do #7 49.27

e20



f=Re #5 11.94
2f=Re #6 12.56
3f=La #6 14.6

e21



f=Fa 5 4.53
2f=La 5 33.46
3f=Fa 6 5.74

e22



f=La 4 21.42
2f=La 5 22.57
3f=Re 6 39.73

e23



f=Do #5 -47.96
2f=Do #6 -46.6
3f=Sol #6 -46.34

e24



f=La 4 10.53
2f=Do #6 -20.43
3f=Sol 6 -14.71

e25



f=Sol 5 5.75
f=Re 6 -21.93
3f=La #6 -9

e26



f=Do 5 32.42
2f=Do #6 -44.17
3f=Sol 6 43.15

e27



f=La 4 13.01
2f=Mí 5 -1.66
3f=Re 6 4.8

e28



f=La 4 -4.57
2f=Do #6 -46.6
3f=Mí 6 3

Los esquemas se obtuvieron por medio de las frecuencias de los tonos musicales de la escala diatónica, como las frecuencias no se corresponden exactamente con las frecuencias de los tonos, se utilizó el cent de Ellis, porque es una unidad de medición pequeña y sirve para comparar las diferencias entre diferentes sistemas de afinación, en este caso, entre el sistema musical maya y la escala diatónica occidental [22]. Se tiene que 200 cents equivalen a un tono y 100 cents a un

semitono. En los esquemas anteriores podemos ver las diferentes configuraciones de digitación y el tono correspondiente a los tres primeros armónicos, a ellos van asociados los cents, que en algunos casos tienen signo negativo. Cuando tienen signo negativo significa que al tono le falta ese número de cents para llegar a ser el tono, y cuando es positivo significa que le sobra ese número de cents para ser el tono.

Para obtener las distancias entre dos tonos se hicieron combinaciones entre los diferentes esquemas de configuraciones de digitación, de esta manera se obtuvieron las tablas V.1-V.11 del apéndice V.

Los cents asociados a cada tono fueron graficados para observar la distancia que falta o sobre para llegar a ser el tono como se puede observar en la figura 5.6.1, en ella se ve que los cents no exceden los ± 50 cents, es decir, $\frac{1}{4}$ de tono.

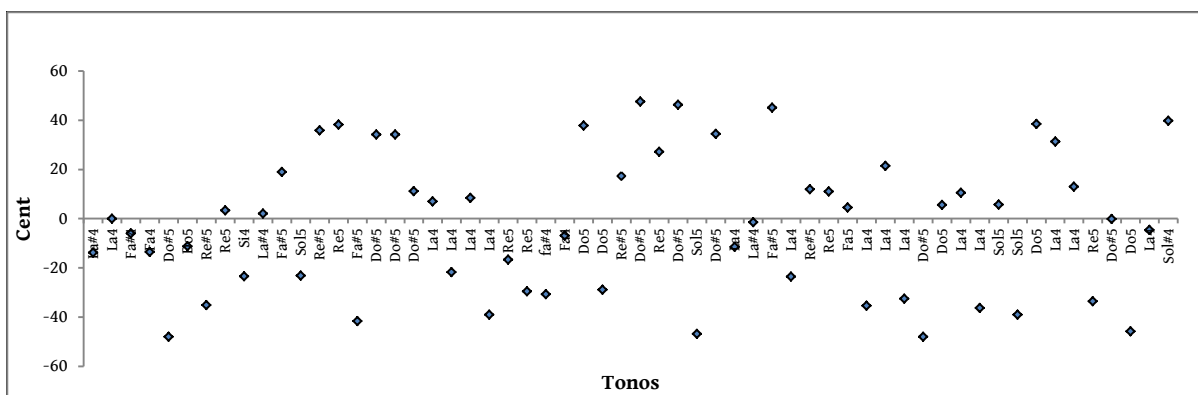


Figura. 5.6.1. Muestra los cents obtenidos para cada uno de los tonos que generan las diversas digitaciones.

Las siguientes figuras muestran la distribución de tonos en cada intervalo para los diferentes esquemas de digitación.

En el caso del unísono, su definición indica que debe ser exactamente el mismo sonido, es decir, el mismo tono, que implica no debe haber ni siquiera cents, para poder ser llamado unísono. Sin embargo, en este trabajo, se toma en cuenta el unísono, aunque existan diferencias en cents, dado que es importante tomarlos en cuenta como una forma de caracterización cualitativa y cuantitativa de las frecuencias que emite la flauta y observar en que configuraciones de digitación logra realizar aproximadamente el mismo sonido.

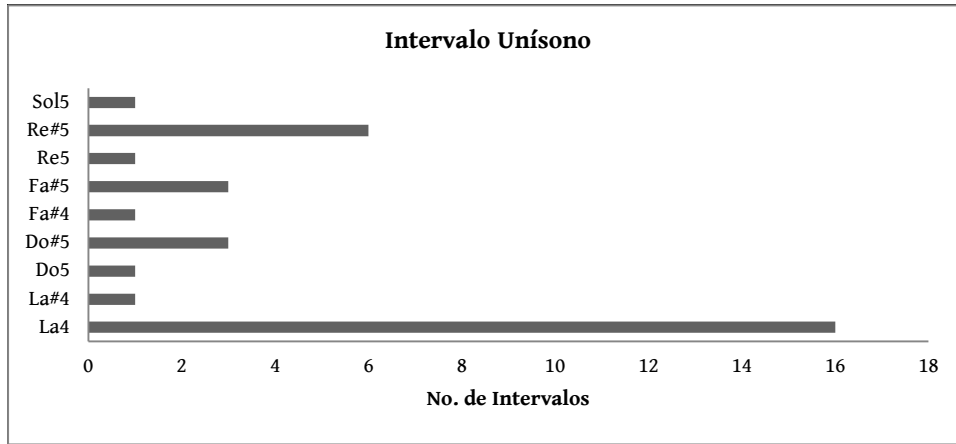


Figura 5.6.2. Distribución de tonos occidentales.

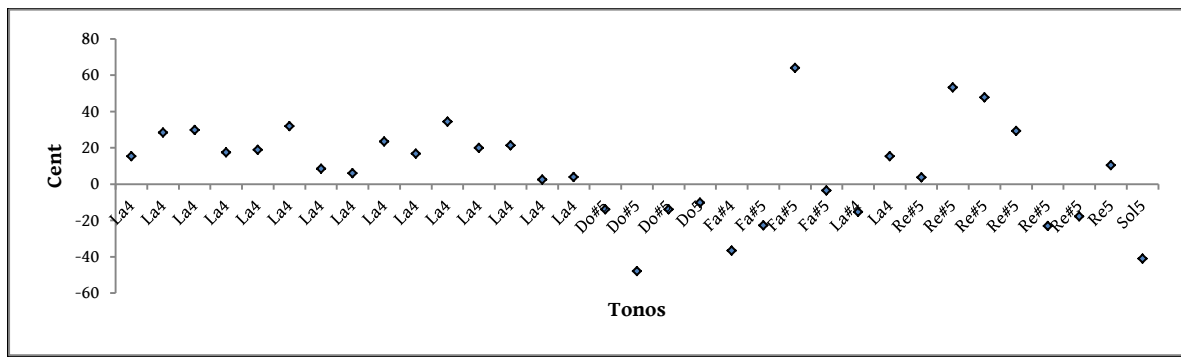


Figura. 5.6.3. Muestra los cents obtenidos para cada uno de los tonos unísono.

De la figura 5.6.2 se puede observar una gráfica de distribución del intervalo unísono, el tono que presenta mayor generación del unísono es el de La4. En la figura 5.6.3 se observa en la gráfica de dispersión que los cents no exceden ± 80 cents, es decir, $\frac{2}{5}$ de tono. Sin embargo hay muchos esquemas que son muy cercanos a los 0 cents el más cercano es de 0.012 de tono. La figuras se obtuvieron del apéndice V, tabla V.1.

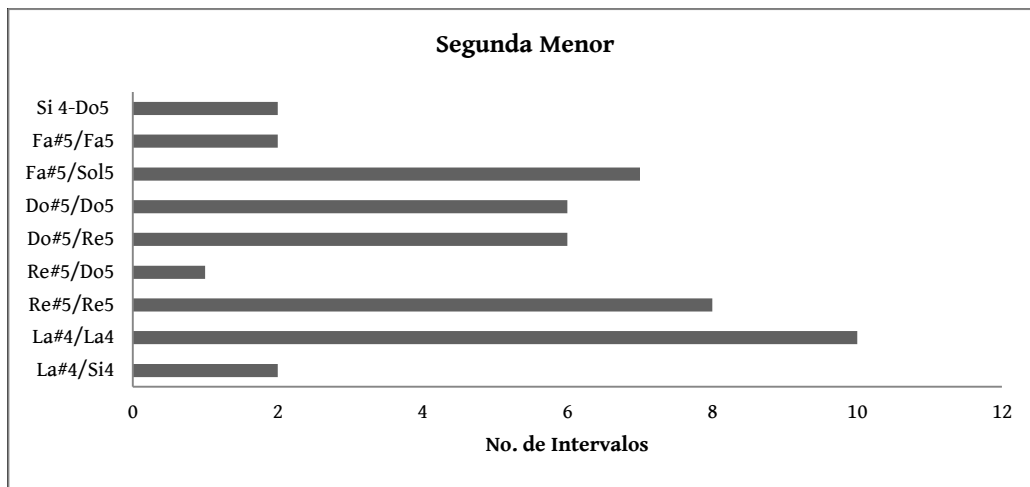


Figura 5.6.4. Grafica de distribución de tonos occidentales.

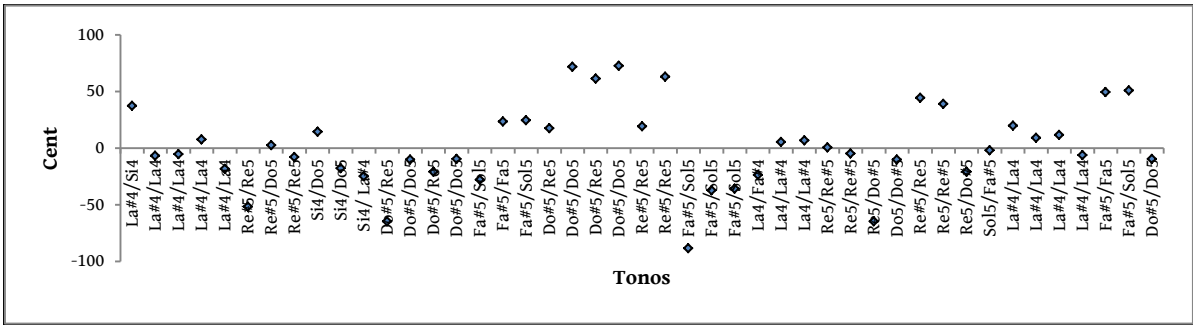


Figura. 5.6.5. Muestra los cents obtenidos para cada uno de los tonos de las diferentes digitaciones.

En la gráfica de distribución de la figura 5.6.4 se puede ver que la distancia La#4-La4 es aquel que más produce el intervalo de segunda menor, y se ve de la figura 5.6.5 que los cents no sobrepasan los ± 0.45 de tono, muy cercano al semitono, se puede ver que los principales problemas los tiene la distancia Do#5-Do5, Fa#5-Sol5, y también Re#5-Re5 y la distancia más cercana al intervalo es La4-La#4, es decir, que menos cents tiene. Las figuras se obtuvieron de la tabla V.2, apéndice V.

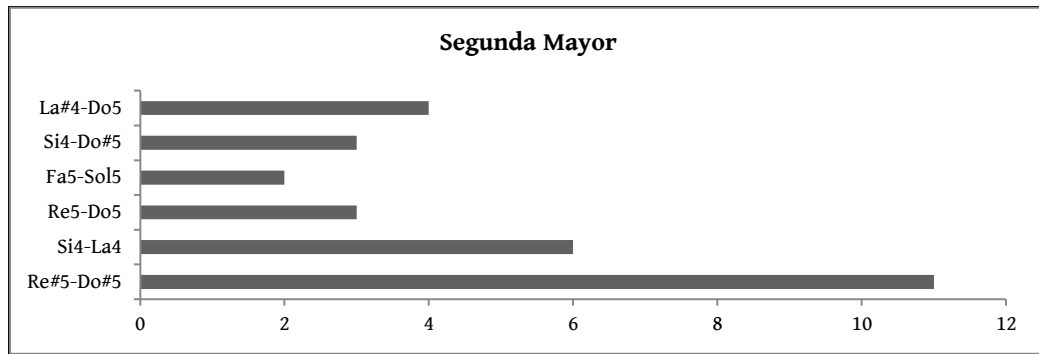


Figura 5.6.6. Distribución intervalica de tonos occidentales.

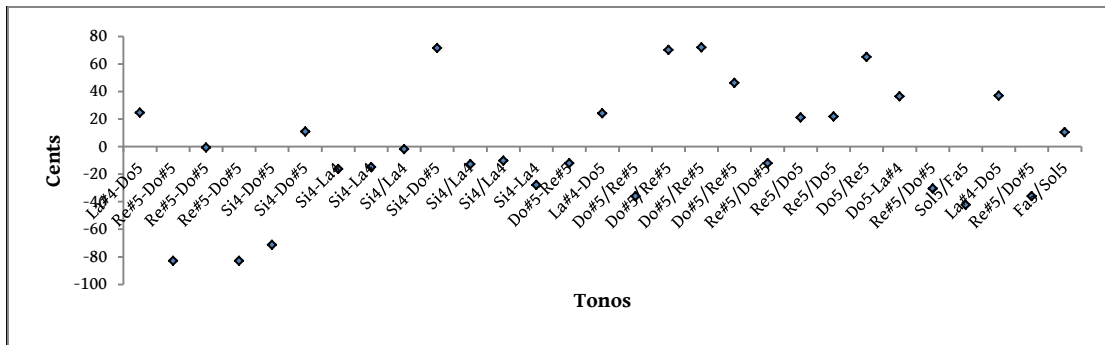


Figura. 5.6.7. Muestra los cents obtenidos para cada uno de los tonos de las diferentes digitaciones.

En la gráfica de distribución de la figura 5.6.6 se puede ver que la distancia Re#5-Do#5 es aquel que mayormente produce el intervalo de segunda mayor, y se ve de la figura 5.6.7 que los cents no sobrepasan los 0.41 de tono que es casi un semitono, se puede ver que los principales problemas los tiene la distancia Re#5-Do#5, sin embargo, la distancia más cercana también se da en ella. Por lo

tanto los esquemas que mejor representan el tono son lo que se deben de tomar en cuenta para la digitación, en la tabla V.3 del apéndice V, se puede ver cuales esquemas son más cercanos al intervalo.

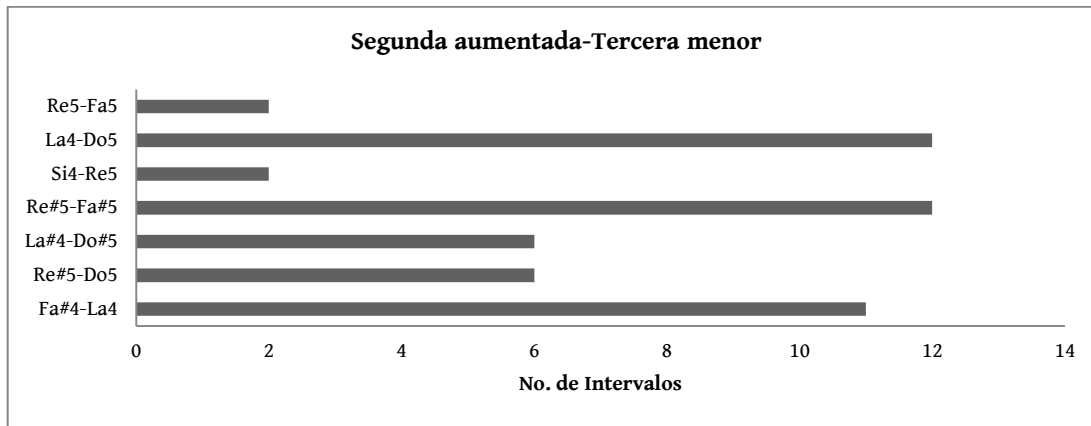


Figura 5.6.8. Distribución intervalica de tonos occidentales.

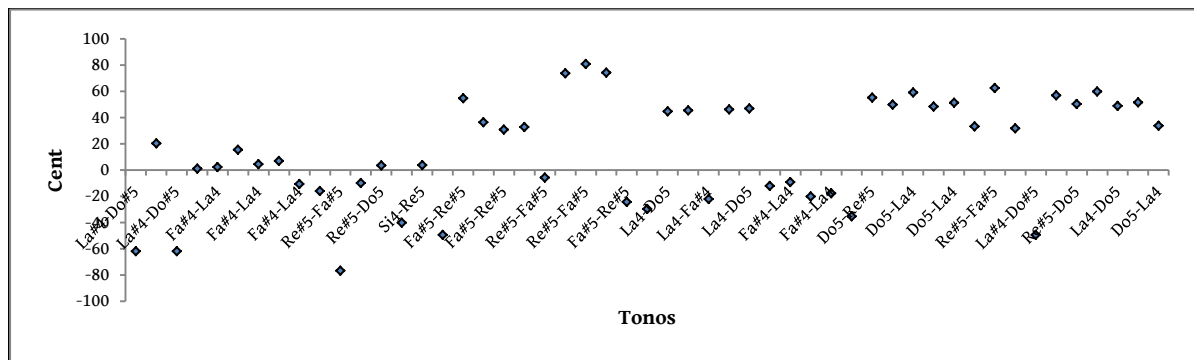


Figura. 5.6.9. Muestra los cents obtenidos para cada uno de los tonos de las diferentes digitaciones.

En la gráfica de distribución de la figura 5.6.8 se puede ver que la distancia La4-Do5, Re#5-Fa#5 y Fa#4-La4 son aquellas que en su mayoría producen el intervalo de segunda aumentada que representa la distancia de 1 tono, y se ve de la figura 5.6.9 que los cents no sobrepasan los ± 0.45 de casi un semitono, se deben tomar las configuraciones esquemáticas que tengan un mayor acercamiento al cero porque es donde es más cercano al intervalo. Las figuras anteriores se obtuvieron de la tabla V.4 del apéndice V.

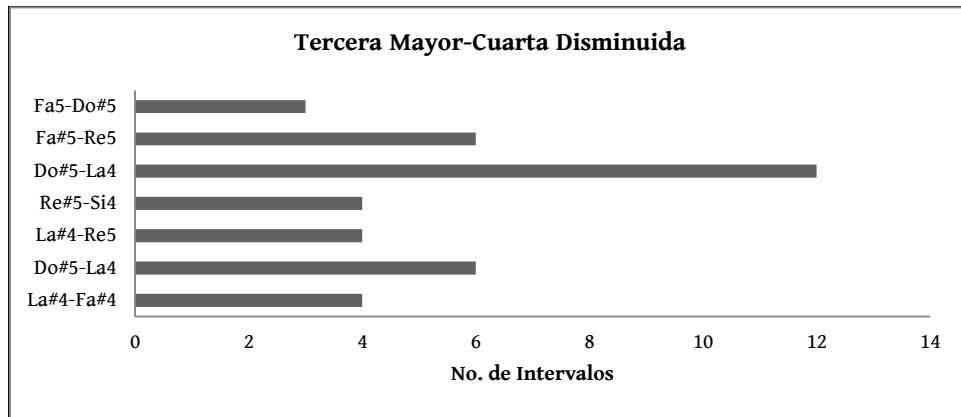


Figura 5.6.10. Distribución intervalica de tonos occidentales.

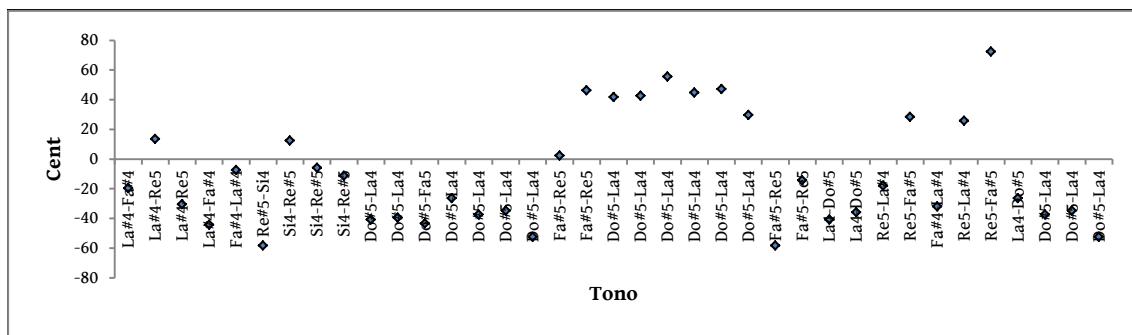


Figura 5.6.11. Muestra los cents obtenidos para cada uno de los tonos de las diferentes digitaciones.

En la gráfica de distribución de la figura 5.6.10 se puede ver que la distancia Do#5-La4 es el que más produce el intervalo de tercera mayor, y de la figura 5.6.11 los cents no sobrepasan los ± 0.37 . (Datos obtenidos de la tabla V.5, apéndice V).

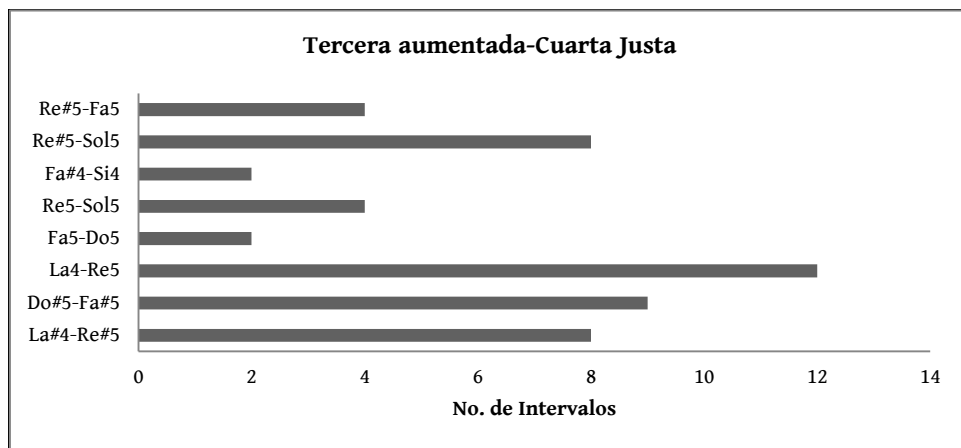


Figura 5.6.12. Distribución intervalica de tonos occidentales.

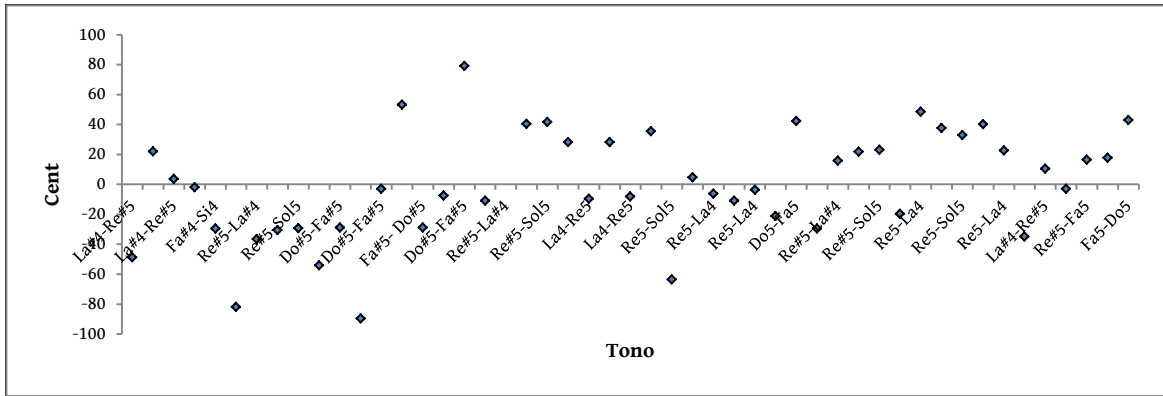


Figura. 5.6.13. Muestra los cents obtenidos para cada uno de los tonos de las diferentes digitaciones.

En la gráfica de distribución de la figura 5.6.12 se puede ver que 12 diferentes esquemas producen la distancia La4-Re5 que genera el intervalo de tercera aumentada, y se ve de la figura 5.6.13 que los cents no sobrepasan los ± 0.4 de tono. Las figuras se obtuvieron de la tabla V.6 del apéndice V.

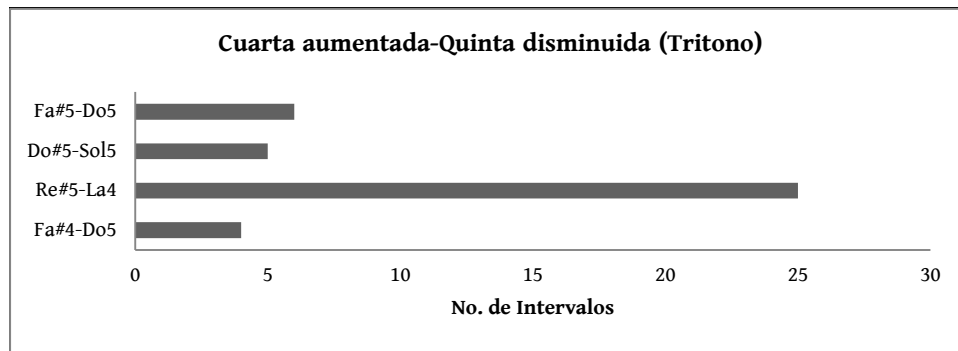


Figura 5.6.14. Distribución intervalica de tonos occidentales.

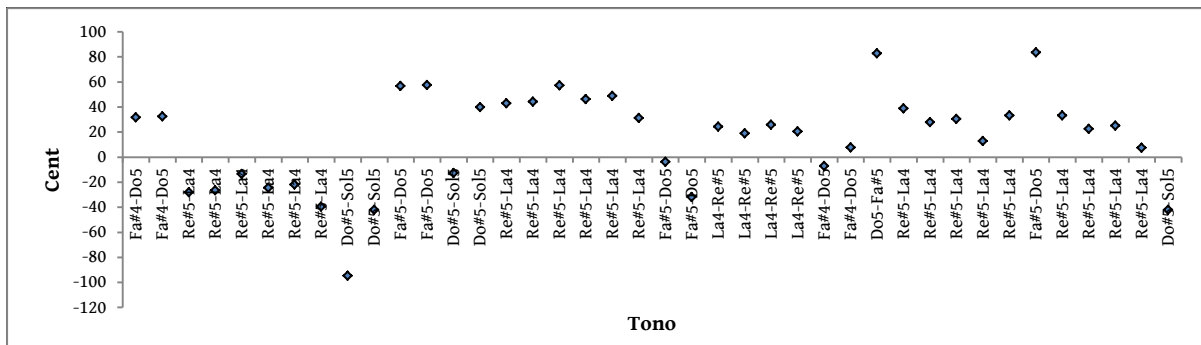


Figura. 5.6.15. Muestra los cents obtenidos para cada uno de los tonos de las diferentes digitaciones.

En la gráfica de distribución de la figura 5.6.14, la distancia Re#5-La4 es la que más produce el intervalo de cuarta aumentada o quinta disminuida, y se ve de la figura 5.6.15 que los cents no sobrepasan los ± 0.42 de tono (Ver tabla V.7 del apéndice V).

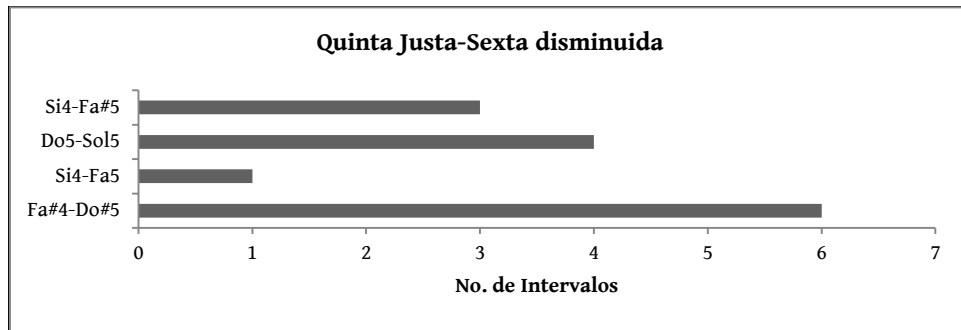


Figura 5.6.16. Distribución intervalica de tonos occidentales.

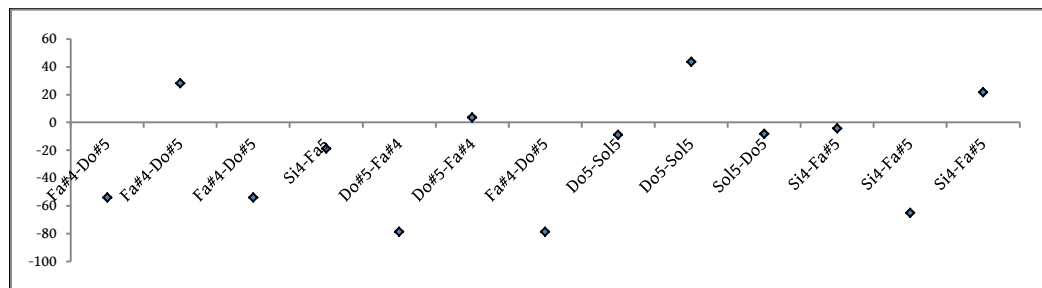


Figura. 5.6.17. Muestra los cents obtenidos para cada uno de los tonos de las diferentes digitaciones.

En la gráfica de distribución de la figura 5.6.16, la distancia Fa#4-Do#5 la generan seis diferentes esquemas que producen como mayoría el intervalo de quinta justa, y se ve de la figura 5.6.17 que los cents no sobrepasan los ± 0.4 de tono que es cercano al semitono. Las figuras se obtuvieron de la tabla V.8 del apéndice V.

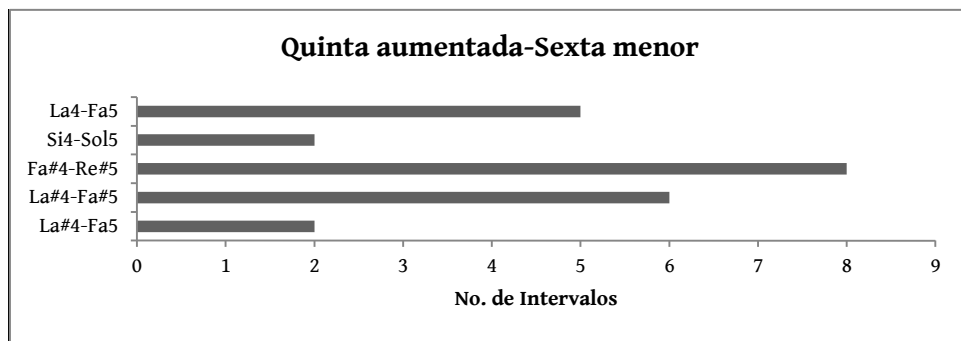


Figura 5.6.18. Distribución intervalica de tonos occidentales.

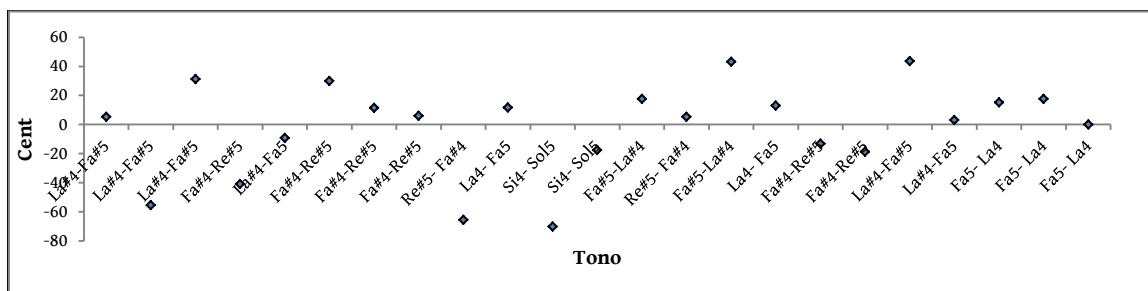


Figura. 5.6.19. Muestra los cents obtenidos para cada uno de los tonos de las diferentes digitaciones.

En la gráfica de distribución de la figura 5.6.18 se puede ver que la distancia Fa#4-Re#5 es la que más produce el intervalo de quinta aumentada, y se ve de la figura 5.6.19 que los cents no sobrepasan los ± 0.37 (Tabla V.9 del apéndice V).

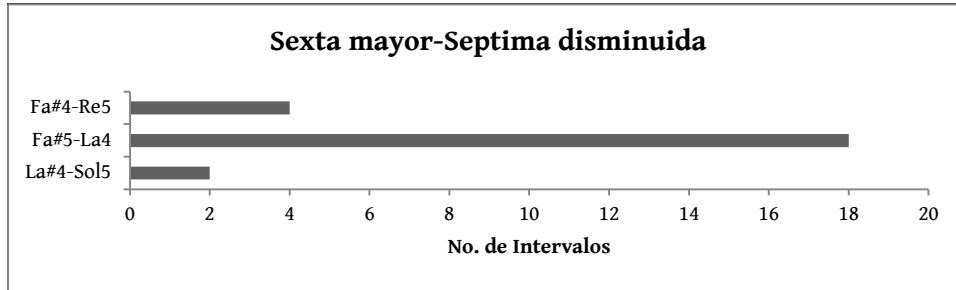


Figura 5.6.20. Distribución intervalica de tonos occidentales.

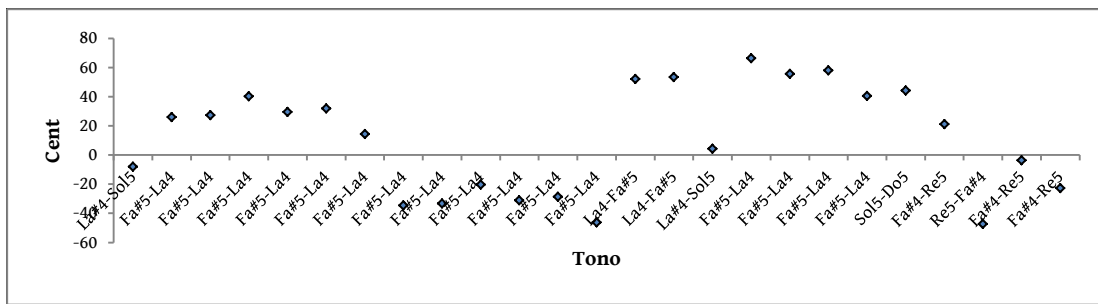


Figura. 5.6.21. Muestra los cents obtenidos para cada uno de los tonos de las diferentes digitaciones.

En la gráfica de distribución de la figura 5.6.20, la distancia Fa#5-La4 es la que más produce el intervalo de sexta mayor, y de la figura 5.6.21 los cents no sobrepasan los ± 0.35 de tono (Apéndice V, tabla V.10).

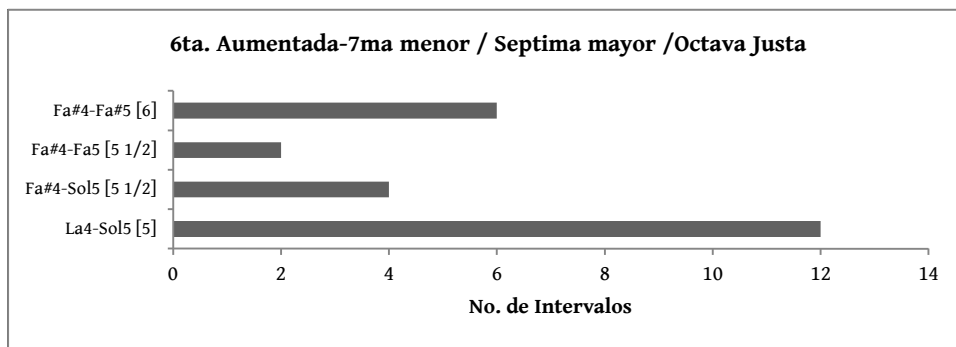


Figura 5.6.22. Distribución intervalica de tonos occidentales.

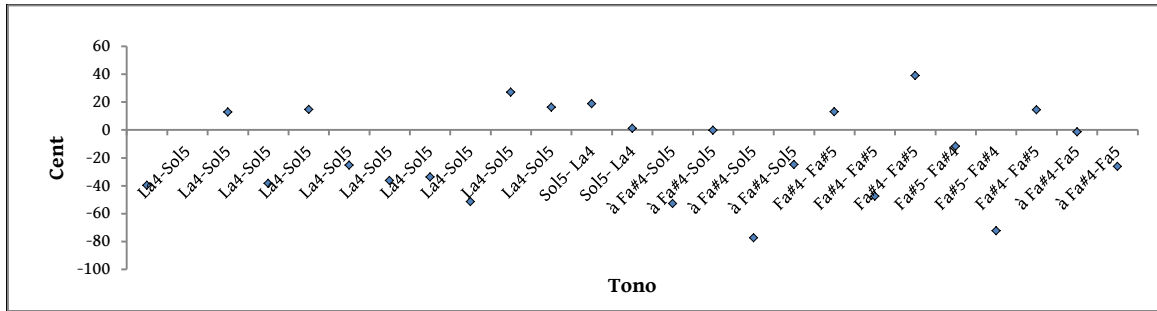


Figura 5.6.23. Muestra los cents obtenidos para cada uno de los tonos de las diferentes digitaciones.

En la gráfica de distribución de la figura 5.6.22 se pueden ver tres distintos intervalos, donde solo se puede comparar el intervalo cuya distancia es de $5 \frac{1}{2}$ tonos, siendo Fa#4-Sol5 aquella que en su mayoría produce el intervalo de Septima mayor, y las otras solo muestran el número de esquemas que generan la sexta aumentada y la octava justa. Se ve de la figura 5.6.23 que los cents no sobrepasan los ± 0.4 de tono (Apéndice V, tabla V.11).

Mediante el análisis anterior se obtiene la tesitura de la flauta triple maya, que es casi de una octava justa, de Fa#4-Fa5 con -1.49 cents, es decir, le falta 0.0075 de tono para ser dicho intervalo. Y se aclara que la generación de intervalos depende del orden de la digitación que el interprete haga, es decir, ya sea que realice, por ejemplo, una sexta aumentada o septima menor.

Las siguientes figuras se obtuvieron para observar como se relacionan las distancias entre notas con respecto a los orificios de digitación, es decir, cuales longitudes generan los tonos. Primero se realiza una gráfica (Figura 5.6.24) para ver que tono produce cada esquema de flautas por separado, es decir, que tono genera la longitud efectiva de cada tubo (Las longitudes se obtuvieron del apéndice IV, tablas IV.1 y IV.4, figura IV.6).

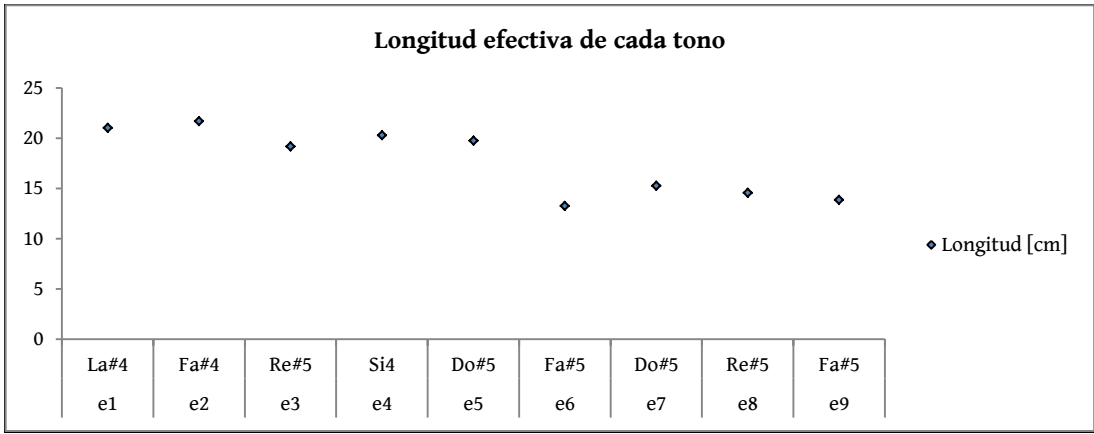


Figura 5.6.24. Muestra la longitud efectiva de cada tono.

Posteriormente se obtiene una gráfica de intervalos con respecto a los esquemas, o sea los intervalos que generó cada configuración de digitaciones (Figura 5.6.25).

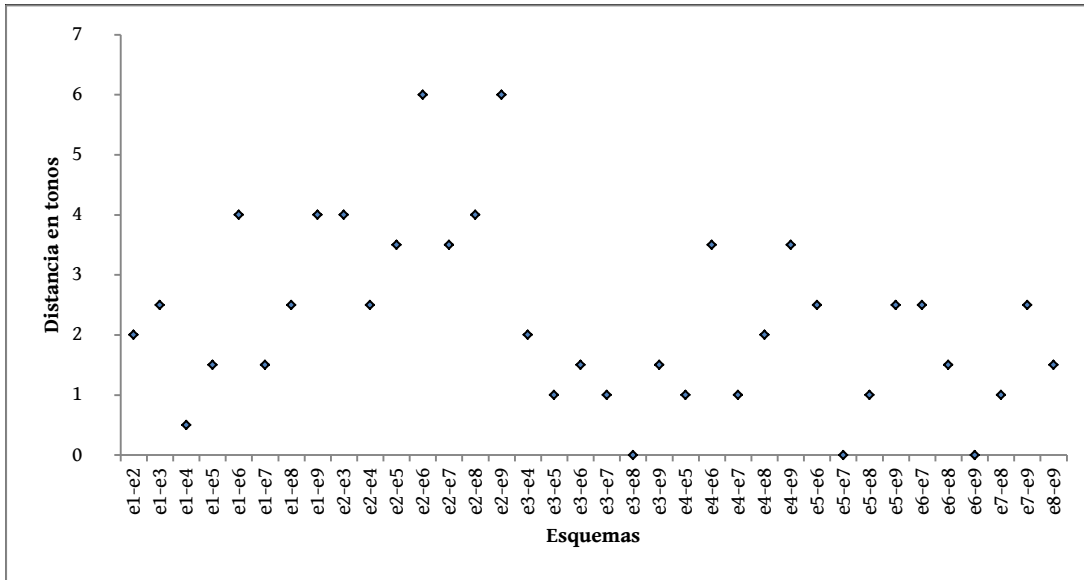


Figura 5.6.25. Muestra los intervalos o distancias entre tonos respecto de los esquemas

Luego se relacionó la diferencia en longitud de las distintas digitaciones para cada combinación de esquemas. Así se puede ver como varía la longitud en los diferentes esquemas que generan los intervalos (Figura 5.6.26).

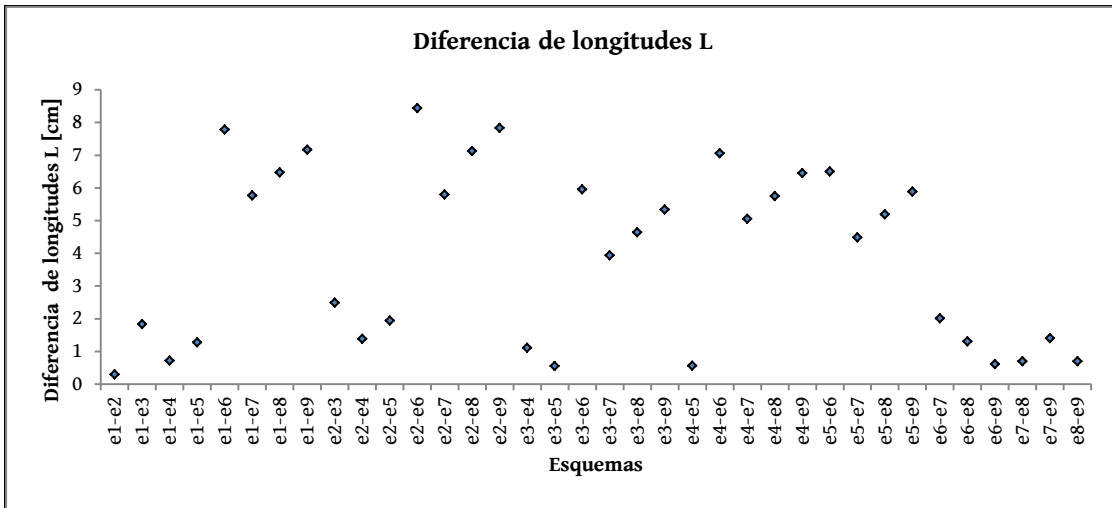


Figura 5.6.26. Muestra la diferencia en centímetros de las longitudes de las flautas respecto a los esquemas.

Por último se realiza una grafica (Figura 5.6.27), donde se observa como se relacionan los diferente intervalos representados en tonos respecto a las longitudes que hay entre los orificios de digitación de los diferentes esquemas.

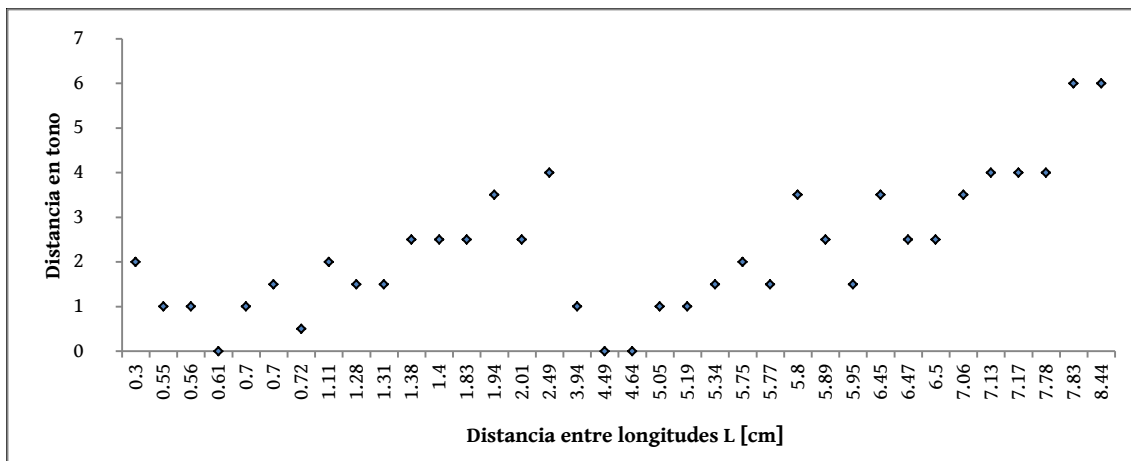


Figura 5.6.27. Muestra los intervalos respecto las diferencia entre las distancias correspondientes a los diferentes esquemas.

De esta manera se tiene una gráfica que relaciona las distancias tonales, respecto a la longitud efectiva de la flauta para generar dicho intervalo.

La caracterización de la flauta triple por medio de las distancias tonales que generan los diferentes esquemas de digitación, abre el panorama respecto a la construcción y objetivos sonoros que tenían las sociedades mayas. Los tonos e intervalos que genera este instrumento difiere en cents de los tonos occidentales en menos de un semitono, esto habla de un grado de precisión impecable y demuestra la hipótesis de que la construcción e interpretación de dicho instrumento era una especialización.

5.7. Fenómeno de batimiento en la Flauta Triple Maya

La interferencia constructiva y destructiva de ondas sonoras genera fluctuaciones en la amplitud, es decir, el fenómeno de batimiento. Este fenómeno psicoacústico, genera sensaciones disonantes y consonantes que dependen del oyente. Como la flauta triple maya está constituida por tres tubos sonoros, se tienen tres fuentes generadoras que pueden producir sonidos simultáneos. Cuando dos ondas superpuestas generan fluctuaciones de amplitud que tienen una diferencia promedio de frecuencia menor a 20 [Hz] se producen batimientos lentos (tremolo). Cuando las fluctuaciones son más rápidas se produce el batimiento rápido, es decir, una sensación de aspereza (disonancia). La sensación depende de la fisiología de la cóclea del oyente (banda crítica) [15]. Cuando el sonido escuchado es mayor que la banda crítica, se oyen dos sonidos por separado. Cualquiera que sea el grado de aspereza que un oyente tenga a nivel fisiológico respecto a sonidos simultáneos, la disonancia como medio de expresión musical depende de factores culturales [23].

Para estudiar el fenómeno se toman las frecuencias fundamentales (Anexos, tablas A.1-A.5), los espectros de cada digitación así como también la combinación obtenida a partir del análisis tiempo-frecuencia (Los esquemas de digitación y las gráficas se pueden ver en los anexos 2). Se buscan las frecuencias fundamentales que puedan generar el fenómeno de batimiento, de la

grabación 2 a la grabación 5, que correspondan a la misma digitación en la grabación 1. Por conveniencia auditiva se toma el sonido medio, ya que es el de mayor intensidad. Se comparan las frecuencias obtenidas de las diferentes combinaciones entre tubos (Grabación 2, 3, 4 y 5) con las obtenidas de los tubos por separado (Grabación 1).

GRABACION 2. Flautas F1 y F2

Destapada F1 y Tapando F2 \rightarrow Sonido medio $v = (441.836670 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow La 4 con 7.02 cents

Flautas por separado:

F1 destapada \rightarrow Sonido medio $v = (462.336830 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow La#4 con -13.81 cents

F2 tapada \rightarrow Sonido medio $v = (487.004420 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Si 4 con -23.42 cents

Comparaciones

Suma promedio sonido medio $v = (474.670625 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Frecuencia de batimiento sonido medio $v = (24.66759 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

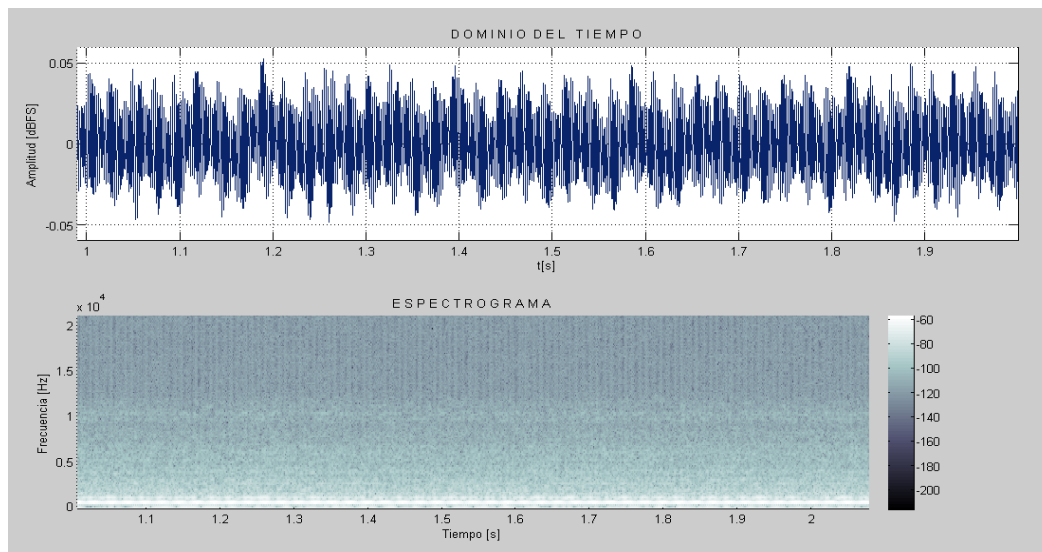


Figura 5.7.1. Muestra un zoom de la señal (sonido medio) de la combinación de las flautas 1 y 2. Flauta 1 con orificios destapados y de la flauta 2 con orificios tapados en el dominio del tiempo, así como también el espectrograma de la misma.

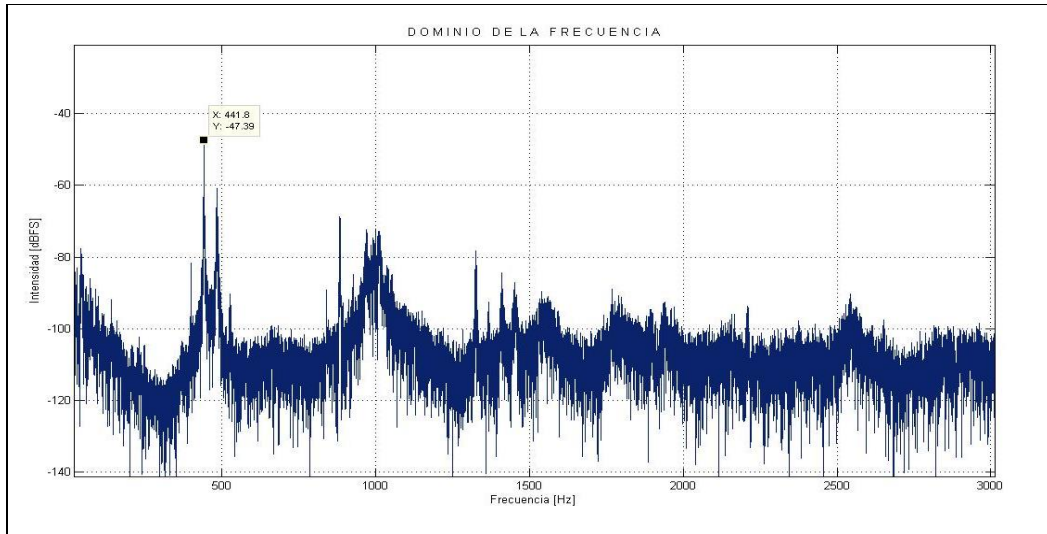


Figura 5.7.2. Muestra la señal (sonido medio) de las flautas 1 y 2. Flauta 1 con orificios destapados y de la flauta 2 con orificios tapados en el dominio de la frecuencia.

Observaciones

En este caso se genera el fenómeno de batimiento rápido (disonancia) ya que la diferencia entre las dos frecuencias (F_1 y F_2) es por 4[Hz] mayor a 20[Hz] y su diferencia en tonos es de un semitono.

En la figura 5.7.1 se observa claramente el fenómeno de batimiento tanto sobre la envolvente de la onda (señal en el dominio del tiempo) como en el espectrograma donde las interrupciones de las rayas espectrales, muestran el fenómeno y nos indica también que la mayor concentración de energía en el transcurso del tiempo se encuentra entre las frecuencias 440-480[Hz]. Por otro lado se observa que la diferencia entre la frecuencia fundamental de la señal de audio y la frecuencia suma promedio obtenida de las flautas por separado es de $(32.833955 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]. En la gráfica de la señal en el dominio de la frecuencia (figura 5.7.2) se observa el máximo de la señal de audio y muy cercano a él se encuentra otro pico que es la frecuencia fundamental de la flauta 2. En función de la percepción sonora se producen dos sonidos por separado de menor intensidad, apenas apreciable, se percibe ligeramente fluctuación en la amplitud y distorsión debido a que diferencia de frecuencia entre las dos flautas por separado es de $(24.66759 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz] que excede en 4[Hz] el rango audible.

F1-F2 Orificios destapados → Sonido medio $v = (581.506590 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → Re 5 con -16.68

Flautas por separado:

F1 Destapada → Sonido medio $v = (462.336830 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → La #4 con -13.81

F2 Destapada → Sonido medio $v = (609.289660 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → Re #5 con -35.04

Comparaciones

Suma promedio sonido medio $v = (535.813245 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Frecuencia de batimiento sonido medio $v = (146.95283 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Observaciones

Esta combinación genera el fenómeno de batimiento rápido (disonancia) ya que la diferencia de frecuencias es mayor que los 20[Hz], en tonos es de $2\frac{1}{2}$ tonos. La sensación sonora percibida es la de dos sonidos por separado de intensidad más baja que las frecuencias de los sonidos por separado. Se percibe una ligera distorsión.

F1-F2 Orificios tapados \rightarrow Sonido medio $v = (363.254120 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Fa #4 con -30.63

Flautas por separado:

F1 orificios tapados \rightarrow Sonido medio $v = (368.609450 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Fa #4 con -6.02

F2 orificios tapados \rightarrow Sonido medio $v = (487.004420 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Si 4 con -23.42

Comparaciones

Suma promedio sonido medio $v = (427.806935 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Frecuencia de batimiento sonido medio $v = (118.33497 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Observaciones

Se genera el fenómeno de batimiento rápido (disonancia), hay una diferencia de $2\frac{1}{2}$ tonos. Se perciben dos sonidos cuya intensidad es más baja que la de las fuentes originales. Se percibe distorsión.

GRABACION 3. Flautas F2-F3

Obturando orificios 4 y 5 de F3 \rightarrow Sonido medio $v = (628.671420 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Re #5 con 17.34

Flautas por separado:

F2 destapada \rightarrow Sonido medio $v = (609.289660 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Re #5 con -35.04

F3 obturando orificios 4 y 5 \rightarrow Sonido medio $v = (635.514410 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Re #5 con 35.83

Comparaciones

Suma promedio sonido medio $v = (622.402035 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Diferencia de batimiento sonido medio $v = (26.22475 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

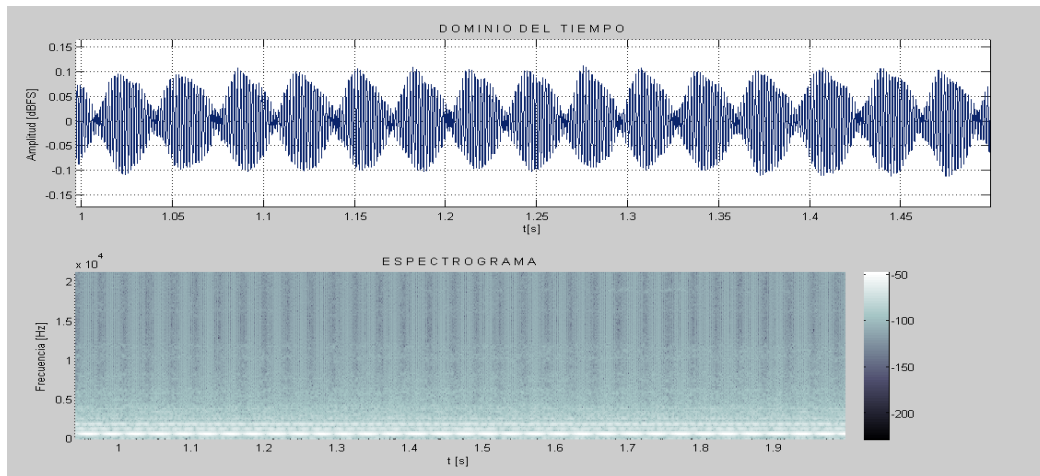


Figura 5.7.3. Muestra un zoom de la señal (sonido medio) de las flautas 2 y 3. Flauta 2 con orificios destapados y de la flauta 3 obturando orificios 4 y 5, en el dominio del tiempo, así como también se muestra el espectrograma de la misma.

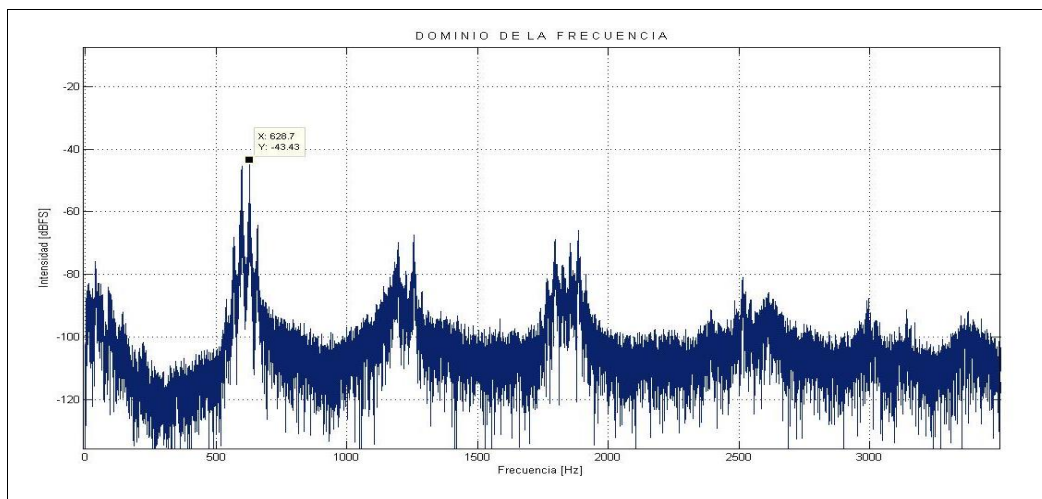


Figura 5.7.4. Muestra la señal (sonido medio) de las flautas 2 y 3. Flauta 2 con orificios destapados y de la flauta 3 obturando orificios 4 y 5 en el dominio de la frecuencia.

Observaciones

En este caso se genera el fenómeno de batimiento rápido (disonancia) ya que la diferencia de frecuencias de las flautas por separado es mayor que 20 [Hz], en tonos se tiene aproximadamente un unísono. En la figura 5.7.3 se observa dicho fenómeno sobre la envolvente de la onda (señal en el dominio del tiempo) como en el espectrograma donde las interrupciones de las rayas espectrales, muestran el fenómeno. En la gráfica de la señal en el dominio del tiempo (Figura 5.7.4) se observa el máximo de la señal de audio y muy cercano a él se encuentra otro pico que es la frecuencia fundamental de la flauta 3. A nivel de percepción sonora se escuchan fluctuaciones en la intensidad del sonido y una ligera distorsión porque la diferencia entre las flautas por separado es

de $(13.112375 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz] sobrepasando por 6[Hz] el rango audible. Apenas se aprecia auditivamente dos sonidos por separado.

F3 Tapada y F2 Destapada → Sonido medio $v = (596.805410 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → Re 5 con 27.13

Flautas por separado:

F2 destapada → Sonido medio $v = (609.289660 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → Re #5 con -35.04

F3 tapada → Sonido medio $v = (565.605130 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → Do #5 con 34.14

Comparaciones

Suma promedio sonido medio $v = (587.447395 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Frecuencia de batimiento medio $v = (43.68453 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Observaciones

Se genera el fenómeno de batimiento rápido (disonancia) con una diferencia de 1 tono. Se perciben dos sonidos por separado pero con menor intensidad que la de las fuentes por separado, también se percibe distorsión.

Flautas F2-F3 Destapadas → Sonido medio $v = (762.172430 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → Sol 5 con -46.8

Flautas por separado:

F2 destapada → Sonido medio $v = (609.289660 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → Re #5 con -35.04

F3 destapada → Sonido medio $v = (798.339370 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → Fa #5 con 34.14

Comparaciones

Suma promedio sonido medio $v = (703.814515 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Frecuencia de batimiento sonido medio $v = (189.04971 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Observaciones

Se genera el fenómeno de batimiento rápido (disonancia) con una diferencia de $1\frac{1}{2}$ tono, y se perciben dos sonidos por separado uno con mayor intensidad que el otro, así como también se aprecia distorsión.

Flautas F2-F3 Tapadas → Sonido medio $v = (465.755280 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → La #4 con -1.48

Flautas por separado:

F2 tapada → Sonido medio $v = (487.004420 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → Si 4 con -23.42

F3 tapada → Sonido medio $v = (565.605130 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → Do #5 con 34.14

Comparaciones

Suma promedio sonido medio $v = (526.30 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Frecuencia de batimiento sonido medio $v = (78.60071 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Observaciones

Se genera el fenómeno de batimiento rápido (disonancia), cuya diferencia es de 1 tono. Se perciben también dos sonidos por separado de diferentes intensidades presentando ligera distorsión.

GRABACION 4. Flautas F1 y F3

F1-F3 Orificios destapados → Sonido medio $v = (759.806890 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → Fa #5 con 45.04

Flautas por separado:

F1 orificios destapados → Sonido medio $v = (462.336830 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → La #4 con -13.81

F3 orificios destapados → Sonido medio $v = (798.339370 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono → Fa #5 con 18.98

Comparaciones

Suma promedio sonido medio $v = (630.3381 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Frecuencia de batimiento sonido medio $v = (336.00254 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

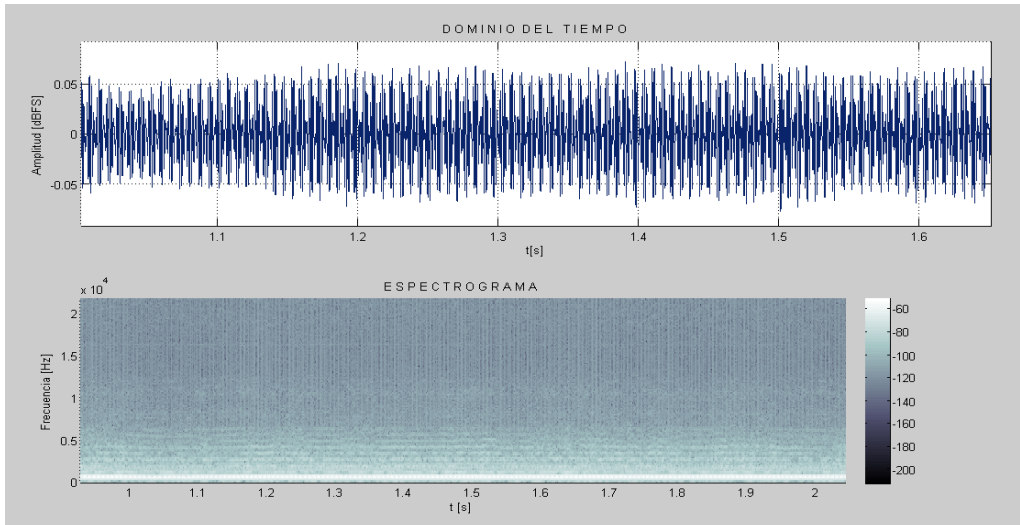


Figura 5.7.5. Muestra un zoom de la señal (sonido medio) de las flautas 1 y 3. Flautas con orificios destapados en el dominio del tiempo, así como también se muestra el espectrograma de la misma.

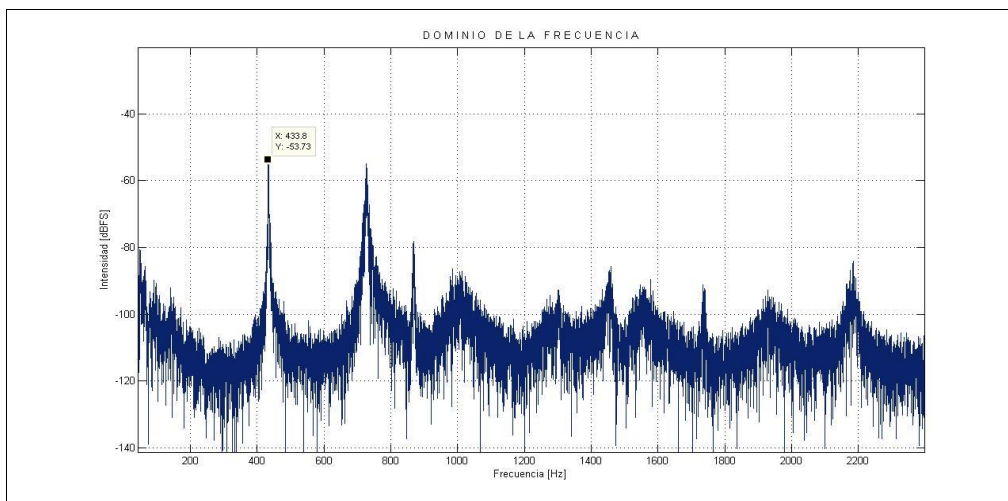


Figura 5.7.6. Muestra la señal (sonido medio) de las flautas 1 y 3. Flautas con orificios destapados en el dominio de la frecuencia.

Observaciones

Se genera el fenómeno de batimiento rápido (disonancia) ya que la diferencia de las flautas por separado está dentro del rango del audible y corresponde a 4 tonos en la escala diatónica. En la figura 5.7.5 se observa el fenómeno sobre la envolvente de la onda (señal en el dominio del tiempo) y en el espectrograma y en la figura 5.7.6 se puede ver la señal en el dominio de la frecuencia. También se perciben dos sonidos por separado de igual intensidad presentando distorsión.

Flautas F1-F3 Destapando F1 → Sonido medio $v = (445.604040 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]
Tono → La 4 con 21.42

Flautas por separado:

F1 destapada → F1 sonido medio $v = (462.336830 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]
Tono → La #4 con -13.81

F3 tapada → F3 sonido medio $v = (565.605130 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]
Tono → Do #5 con 34.14

Comparaciones

Suma promedio sonido medio $v = (513.97098 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Frecuencia de batimiento sonido medio $v = (103.34075 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Observaciones

Se genera el fenómeno de batimiento rápido (disonancia), la diferencia en tonos es de $1\frac{1}{2}$ tonos y se perciben dos sonidos por separado cuya intensidad es más baja que la de las dos flautas por separado.

Flautas F1-F3 Orificios tapados → Sonido medio $v = (538.574920 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]
Tono → Do# 5 con -47.96

Flautas por separado:

F1 tapada → F1 sonido medio $v = (368.609450 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]
Tono → Fa# 4 con -6.02

F3 tapada → F3 sonido medio $v = (565.605130 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]
Tono → Do #5 con 34.14

Comparaciones

Suma promedio sonido medio $v = (467.10729 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Frecuencia de batimiento sonido medio $v = (196.93568 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Observaciones

Se genera el fenómeno de batimiento rápido (disonancia) es de $3\frac{1}{2}$ tonos y se perciben dos sonidos por separado.

GRABACIÓN 5. Flautas F1-F2-F3

F1 y F2 destapadas → Sonido medio $v = (442.755020 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]
Tono → La 4 con 10.53

Flautas por separado:

F1 y F2 destapadas \rightarrow Sonido medio $v = (581.506590 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Re 5 con -16.68

F3 tapada \rightarrow Sonido medio $v = (565.605130 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Do #5 con 34.14

Comparaciones

Suma promedio sonido medio $v = (573.55586 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Diferencia de batimiento sonido medio $v = (15.90146 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

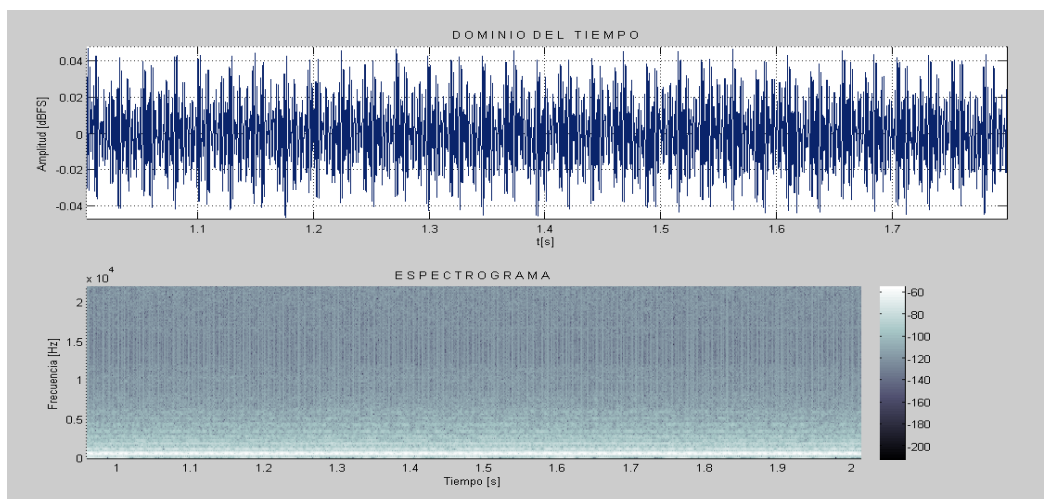


Figura 5.7.7. Muestra un zoom de la señal (sonido medio) de las flautas 1, 2 y 3. Flautas 1 y 2 con orificios destapados y flauta 3 obturando orificios, en el dominio del tiempo, así como también se muestra el espectrograma de la misma.

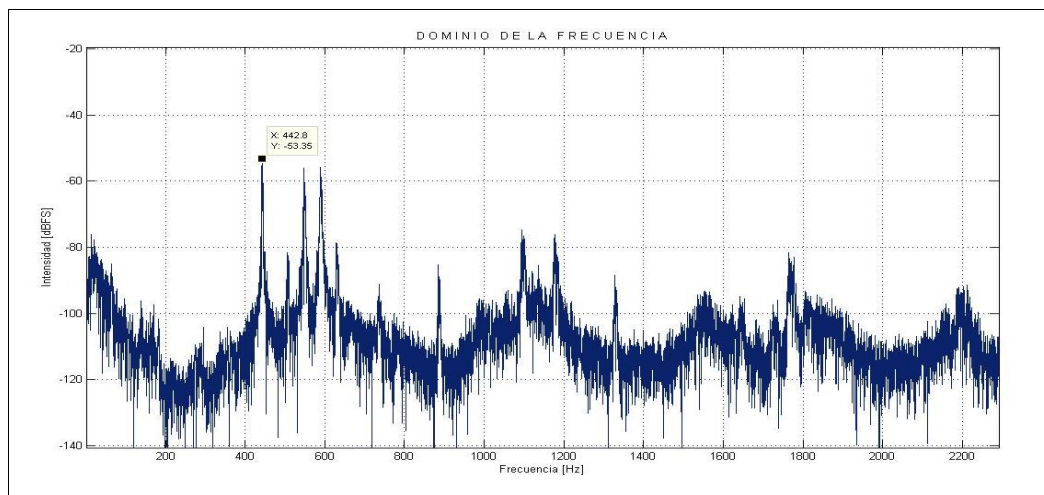


Figura 5.7.8. Muestra la señal (sonido medio) de las flautas 1, 2 y 3. Flautas 1 y 2 con orificios destapados y flauta 3 obturando orificios en el dominio de la frecuencia.

Observaciones

Se genera el fenómeno de batimiento lento (trémolo) ya que la diferencia entre las dos frecuencias es menor al registro del audible su diferencia en tonos es de $1\frac{1}{2}$ tonos. En la figura 5.7.7 se observa el fenómeno sobre la envolvente de la onda (señal en el dominio del tiempo), donde se nota la fluctuación de la amplitud y la combinación de las dos señales. En el espectrograma que se encuentra en la misma figura, se observan las pulsaciones por medio de las interrupciones de las rayas espectrales. La gráfica de la señal en el dominio del tiempo (figura 5.7.8) muestra el máximo de la señal de audio y muy cercano a él se encuentran otros dos picos, uno es la frecuencia fundamental de las flauta 3 tapada y el otro es la frecuencia fundamental de las flautas 1 y 2 destapadas. Respecto a la percepción sonora hay distorsión y se escuchan más de dos sonidos y una fluctuación de la intensidad del sonido.

Flautas F1-F2-F3 destapadas \rightarrow Sonido medio $v = (786.672610 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Sol 5 con 5.75

Flautas por separado:

F1-F2 Destapadas \rightarrow Sonido medio $v = (581.506590 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Re 5 con -16.68

F3 destapada \rightarrow Sonido medio $v = (798.339370 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Fa #5 con 18.98

Comparaciones

Suma sonido medio $v = (689.92298 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Diferencia de batimiento sonido medio $v = (216.83278 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Observaciones

Se genera el fenómeno de batimiento rápido (disonancia) y su diferencia es de 2 tonos. Se percibe distorsión y sonidos por separado.

Flautas F1-F2-F3 tapadas \rightarrow Sonido medio $v = (535.204850 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Do 5 con 38.42

Flautas por separado:

F1-F2 tapadas \rightarrow Sonido medio $v = (363.254120 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Fa #4 con -30.63

F3 tapada \rightarrow Sonido medio $v = (565.605130 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Tono \rightarrow Do #5 con 34.14

Comparaciones

Suma promedio sonido medio $v = (464.429625 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Diferencia de batimiento sonido medio $v = (202.35101 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Observaciones

Se genera el fenómeno de batimiento rápido (disonancia), su diferencia es de $3\frac{1}{2}$ tonos y se escuchan tres sonidos por separados cuya intensidad es variable.

Flautas F1-F2-F3 obturando 4 y 5 de F3 → Sonido medio $v = (443.404020 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]
Tono → La 4 con -13.01

Flautas por separado:

F1-F2 destapadas → Sonido medio $v = (581.506590 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]
Tono → Re 5 con -16.68

Obturando 4 y 5 de F3 → Sonido medio $v = (635.514410 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]
Tono → Re #5 con 35.83

Comparaciones

Suma promedio sonido medio $v = (608.5105 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Diferencia de batimiento sonido medio $v = (54.00782 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Observaciones

Se genera el fenómeno de batimiento rápido (disonancia) y una distancia de un semitono y se percibe distorsión sonora así como tres sonidos por separado.

Flautas F1-F2-F3 , F1 destapada → Sonido medio $v = (438.803980 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]
Tono → La 4 con -4.57

Flautas por separado:

F1 destapada → Sonido medio $v = (462.336830 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]
Tono → La #4 con -13.81

F2 y F3 tapadas → Sonido medio $v = (465.755280 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]
Tono → La #4 con -1.48

Comparaciones

Suma promedio sonido medio $v = (464.05000 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Diferencia de batimiento sonido medio $v = (3.41845 \pm 4.5 \times 10^{-5})$ [Hz]

Observaciones

Se genera batimientos lentos ya que la diferencia es menor que los 20 [Hz], aproximadamente un unísono. Se perciben fluctuaciones en la intensidad del sonido y una ligera distorsión.

Observación Final

Finalmente la flauta triple genera en su mayoría batimientos rápidos por lo que los sonidos que produce son disonantes o se percibe una ligera distorsión. En todas las combinaciones sobrepasa la

banda crítica por lo que se escuchan sonidos por separado. La distancia entre tonos para este análisis abarcó solo 4 tonos, en dos casos se hizo una combinación donde los tonos eran aproximadamente unísonos y en solo uno de los casos se generaron batimientos lentos. Es necesario realizar más combinaciones como se propone en el apéndice VI, para ampliar el estudio.

El hecho de que esta flauta produzca el fenómeno de batimientos rápidos no indica lo agradable que pueda ser el sonido por la misma puesto que ese aspecto depende exclusivamente del contexto cultural.

5.7.1. Generación de tonos diferenciales o de Tartini

Para la búsqueda de tonos de Tartini se utilizaron los datos de la grabación 1, ya que es la que nos da las frecuencias de resonancia por separado, de manera que se realizan las combinaciones de cada una de las configuraciones. Las siguientes tablas muestran los resultados de la búsqueda, algunas combinaciones pudieron ser analizadas respecto al fenómeno de batimiento y percepción sonora.

Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Combinación analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$
F1 destapada	462.33683	-	F1 destapada	462.33683/La#4	-
F2 tapando orificio 2	545.75619	-	F2 destapada	609.28966/Re#5	-
F2-F1	83.41936	No	F2-F1=t1	146.95283/2.5 T	3t1=440.85849-F1
2F2-F1	629.17555	No	2F2-F1=t2	756.24249	No
2F1-F2	378.91747	No	2F1-F2=t3	315.384	2t3=630.768-F2
Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Combinación analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$
F1 destapada	462.33683	-	F1 destapada	462.33683	-
F2 tapada	487.00442	-	F3 destapada	798.33937	-
F2-F1	24.66759	No	F3-F1	336.00254	No
2F2-F1	1436.34567	No	2F3-F1	1134.34191	No
2F1-F2	437.66924	No	2F1-F3	126.33429	No
Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$
F1 destapada	462.33683	-	F1 destapada	462.33683	-
F3 obturando 4 y 5	635.51441	-	F3 obturando 4	721.67758	-
F3-F1	173.17758	No	F3-F1	259.34075	No
2F3-F1	808.69199	No	2F3-F1	981.01833	No
2F1-F3	284.15925	No	2F1-F3	202.99608	No
Combinación analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$			
F1 destapada	462.33683	-			
F3 tapada	565.60513	-			
F3-F1	103.34075	No			
2F3-F1	668.87343	No			

F1-F3	359.06853	No			
-------	-----------	----	--	--	--

Tabla 5.7.1.1. Muestra las diferentes combinaciones entre las tres flautas y cuales generan tonos de Tartini.

Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$
F1 tapada	368.66945/Fa#4	-	F1 tapada	368.66945/Fa#4	-
F2 tapando orificio 2	545.75619/Do#5	-	F2 destapada	609.28966/Re#5	-
F2-F1=t1	177.08674/3.5T	2t1=354.17348-F1 3t1=574.74813-F2	F2-F1=t1	240.62021	No
2F2-F1=t2	722.84293	No	2F2-F1=t2	849.90987	No
2F1-F2=t3	191.58271	2t3=F1/3t3-F2	2F1-F2=t3	128.04924	3t3=384.14772-F2
Combinación analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$
F1 tapada	368.66945/Fa#4	-	F1 tapada	368.66945	-
F2 tapada	487.00442/Si4	-	F3 destapada	798.33937	-
F2-F1=t1	118.33497/2.5T	3t1=355.00491-F1	F2-F1	429.66992	No
2F2-F1=t2	605.33939	No	2F2-F1	1228.00929	No
2F1-F2=t3	250.33448	2t3=500.66896-F2	2F1-F2	61.00047	No
Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$
F1 tapada	368.66945	-	F1 tapada	368.66945/Fa#4	-
F3 obturando 4 y 5	635.51441	-	F3 obturando 4	721.67758/Fa#5	-
F3-F1	266.84496	No	F3-F1=t1	353.00813/6T	2t1=706.01626-F3
2F3-F1	902.35937	No	2F3-F1=t2	1074.68571	No
2F1-F3	101.82449	No	2F1-F3=t3	15.66132	No
Combinación analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$			
F1 tapada	368.66945/Fa#4	-			
F3 tapada	565.60513/Do#5	-			
F3-F1=t1	196.93568/3.5T	2t1=393.87136-F1 3t1=590.80704-F3			
2F3-F1=t2	762.54081	No			
2F1-F3=t3	71.73377	2t3=343.46754-F1			

Tabla 5.7.1.2. Muestra las diferentes combinaciones entre las tres flautas y cuales generan tonos de Tartini.

Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Combinación analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$
F2 tapando orificio 2	545.75619	-	F2 tapando orificio 2	545.75619	-
F3 destapada	798.33937	-	F3 obturando 4 y 5	635.51441	-
F3-F2	252.58318	No	F3-F2	89.75822	No
2F3-F2	1050.92255	No	2F3-F2	725.27263	No
2F2-F3	293.17301	No	2F2-F3	455.99797	No

Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$
F2 tapando orificio2	545.75619/Do#5	-	F2 tapando orificio 2	545.75619	-
F3 obturando 4	721.67758/Fa#5	-	F3 tapada	565.60513	-
F3-F2=t1	175.92139/2.5T	3t1=527.76417-F2	F3-F2	19.84894	No
2F3-F2=t2	897.59897	No	2F3-F2	585.45407	No
2F2-F3=t3	369.8348	2t3=739.6696-F3	2F2-F3	525.90725	No

Tabla 5.7.1.3. Muestra las diferentes combinaciones entre las tres flautas y cuales generan tonos de Tartini.

Combinación analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$
F2 destapada	609.28966	-	F2 destapada	609.28966	-
F3 destapada	798.33937	-	F3 obturando 4 y 5	635.51441	-
F3-F2	189.04971	No	F3-F2	26.22475	No
2F3-F2	987.38908	No	2F3-F2	661.73916	No
2F2-F3	420.23995	No	2F2-F3	583.06491	No
Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Combinación analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$
F2 destapada	609.28966	-	F2 destapada	609.28966	-
F3 obturando 4	721.67758	-	F3 tapada	565.60513	-
F3-F2	112.38792	No	F3-F2	43.68453	No
2F3-F2	834.0655	No	2F3-F2	652.97802	No
2F2-F3	496.90174	No	2F2-F3	521.9206	No

Tabla 5.7.1.4. Muestra las diferentes combinaciones entre las tres flautas y cuales generan tonos de Tartini.

Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$
F2 tapada	487.00442	-	F2 tapada	487.00442	-
F3 destapada	798.33937	-	F3 obturando 4 y 5	635.51441	-
F3-F2	311.33495	No	F3-F2	148.51021	No
2F3-F2	1109.67432	No	2F3-F2	784.0244	No
2F2-F3	175.66947	No	2F2-F3	338.49443	No
Combinación no analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Combinación analizada en batimiento	$f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$	Tonos Tartini $f_{\pm 4.5 \times 10^{-5}}[\text{Hz}]$
F2 tapada	487.00442 /Si4	-	F2 tapada	487.00442	-
F3 obturando 4	721.67758/ Fa#5	-	F3 tapada	565.60513	-
F3-F2	234.67316/3.5T	2t1=469.34632-F2 3t1=704.01948-F3	F3-F2	78.60071	No
2F3-F2	956.35074	No	2F3-F2	644.20584	No
2F2-F3	252.33126	No	2F2-F3	408.4371	No

Tabla 5.7.1.5. Muestra las diferentes combinaciones entre las tres flautas y cuales generan tonos de Tartini.

Se encontraron 9 configuraciones que producen aproximadamente tonos Tartini, en la tabla 5.7.1.1 tenemos que la primera configuración que origina los tonos de Tartini, produce batimientos rápidos y excede la banda crítica pues se perciben sonidos por separado. La segunda configuración es similar a la anterior, produce batimientos rápidos y se perciben dos sonidos con frecuencia grave respecto a la original. En el tercer tono de Tartini encontrado no se hizo análisis de batimiento porque no se realizó esa digitación en el experimento. En el cuarto tono de la misma tabla, tuvo un análisis de batimiento y produce un batimiento rápido en la cual se percibieron dos sonidos por separado. El quinto y sexto tono tartini, encontrados en la misma tabla no fueron analizadas en la producción de batimientos debido a que no se realizó esa digitación en el experimento. En la tabla 5.7.1.3 se encontró un tono Tartini que no fue analizado en batimiento por la misma razón que en los casos anteriores. En la tabla 5.7.1.4 no se encontraron tonos de Tartini. Y por último en la tabla 5.7.1.5 se encontró un tono Tartini, sin embargo, la producción de batimientos no fue analizada. Por lo tanto, es necesario optimizar la metodología de la medición para realizar todas las posibles combinaciones de digitación, como se propone en el apéndice VI (Protocolo para la medición de Flautas Mesoamericanas), de esta manera se ampliará el estudio de batimientos y de tonos Tartini.

6. CONCLUSIONES

El estudio acústico de la flauta se realizó por medio de un análisis tiempo-frecuencia, con el que se obtuvieron las frecuencias de resonancia. Utilizando el modelo físico excitador-resonador, se calcularon parámetros acústicos que son de utilidad para la construcción de matrices de transferencia que posteriormente obtengan la función de reflexión de los tubos resonadores. Se obtuvieron los tonos generados por la flauta basados en escala diatónica y se realizó un estudio de batimientos y de tonos de Tartini, fenómenos que produce la flauta. Con esto se llegó a que la manufactura del instrumento implicó un desarrollo tecnológico de alto nivel porque:

- 1) Los orificios de digitación y las distancias de unos con otros difieren en milésimas de metro, de manera que las medidas son precisas.
- 2) Por observación, la boquilla tiene biseles, por lo que demuestra la capacidad de técnica del especialista para la integración de tres flautas en una sola.
- 3) La creación de la flauta triple no fue accidental, pues de acuerdo con las investigaciones sobre iconografía y epigrafía, que indican que un instrumento tiene alma, es decir, es una entidad viva que reside en el instrumento, y por ello puede emitir sonidos que producen fenómenos psicoacústicos que permitieron comunicarlos con el mundo sagrado.
- 4) Las técnicas de manufactura son conocimientos obtenidos por la experimentación empírica a través del paso de generaciones, sin embargo, la flauta triple maya integra tres flautas en una sola. Es en sí misma generadora de polifonía; implica que las sociedades mayas lograron realizar polifonía antes que las sociedades occidentales y más aun integrar los sonidos simultáneos en un solo instrumento.
- 5) La ubicación de los orificios está predeterminada para generar un intervalo de sonidos específicos, así como también está construida intencionalmente para generar el fenómeno de batimiento, producir tonos de Tartini.
- 6) Los batimientos que produce la Flauta triple son en su mayoría rápidos. Sin embargo la disonancia o consonancia son factores adquiridos y dependen de la tradición musical de los receptores. Los sonidos emitidos por la flauta triple producen tonos virtuales que son creados por el cerebro al sobrepasar la banda crítica que depende únicamente de la fisiología del oído de un individuo.
- 8) La flauta triple maya, es solo un ejemplo de tantos que demuestra que los mayas eran maestros en el arte de medir, músicos universales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **De la Garza Mercedes; Nalda Enrique; Schmidt Peter;**
“Los Mayas”. Instituto Nacional de Antropología.
Antiguo Colegio de San Ildefonso, México.
- [2] **Hideo Bourg Cameron;**
Tesis de Licenciatura 2005. “Ancient Maya Music now with Sound”
- [3] <http://research.mayavase.com/kerrmaya.html>
- [4] **Olazábal, Tirso de;**
“Acústica Musical y Organología” 1ra. Ed. Buenos Aires.
Melos Ediciones Musicales S.A.
- [5] **French, A.P. ;**
Vibrations and Waves (M.I.T. Introductory physics series).
Nelson Thornes (1971).
- [6] **William C. Elmore, Mark A. Heald;**
“Physics of Waves”
McGraw-Hill.
- [7] **John William Strutt, Baron Rayleigh;**
“The Theory of Sound”
Dover Publications.
- [8] **Cordourier Maruri Hector Alfonso;**
Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica. CCADET. UNAM
“Programa Interactivo asistido por Computadora de
Instrumentos Musicales de Viento”
- [9] **Raymond A. Serway, Jerry S Faughn;**
“Fundamentos de Física”. Vol II.
Cengage Learning Edirores S.A. de C.V.
- [10] **Guillaume Philippe;**
“Music and Acoustic from Instrument to Computer”
- [11] **Philip M. Morse;**
“Vibrations and Sound”
McGraw-Hill Book Company, Inc. 1948.

- [12] **Yépez M. Enrique, Yépez M. Miztli;**
 “Mecánica Analítica”
 Facultad de Ciencias, UNAM.
- [13] <http://es.wikipedia.org/wiki/Batimiento>
- [14] **Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands;**
 “The Feynman Lectures on Physics”
 Addison–Wesley.
- [15] **R. Plomp and W.J.M. Levelt;**
 “Tonal Consonance and Critical Bandwidth”
- [16] **Weeks Michael;**
 “Digital Signal Processing Using Matlab and Wavelets”
- [17] **John G. Proakis and Dimitris K Manolakis;**
 “Digital Signal Processing. Principles, Algorithms and Applications”
 Fourth Edition. Pearson Prentice Hall.
- [18] **Steven W. Smith;**
 The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing. Second Edition.
- [19] http://es.wikipedia.org/wiki/Conversi%C3%B3n_anal%C3%B3gica-digital
- [20] <http://web.mit.edu/newsoffice/2012/faster-fourier-transforms-0118.html>
- [21] **Zalaquett Rock Francisca Amelia;**
 Tesis de doctorado. “Estudio de las Representaciones Escénicas en los Mayas del Periodo Clásico. El grupo Norte de Palenque y su significado Social”
- [22] [http://es.wikipedia.org/wiki/Intervalo_\(m%C3%BAsica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Intervalo_(m%C3%BAsica))
- [23] **Juan Sebastián Lach;**
 “Investigación composicional sobre curvas de disonancia”.
 Centro Multimedia CNA

APÉNDICES

I. EL DECIBEL

El decibel (dB), es una medida empleada para el nivel de potencia y el nivel de intensidad de ruido. Es una unidad relativa que expresa la relación entre dos magnitudes: la magnitud que se estudia y una magnitud de referencia. Como la sensibilidad del oído humano a las variaciones de intensidad sonora sigue una escala aproximadamente logarítmica, no lineal, la escala que utiliza el decibel es logarítmica. Por ello el bel (B) y su submúltiplo el decibel (dB), resultan adecuados para valorar la percepción de los sonidos por un oyente. En acústica al umbral de audición del ser humano se asigna un valor de 0 dB que por convención equivale a un sonido con una presión de 20 micropascales, que es como un cambio de la presión atmosférica normal de 1/5000000000. Como el umbral de audición depende de la frecuencia del sonido, éste varía para cada persona, y para el umbral del dolor humano se considera a partir de los 140 dB.

UNIDADES BASADAS EN EL DECIBEL

Dado que decibel es adimensional y relativo, para medir valores absolutos se necesita especificar a qué unidades está referida la medida, por ejemplo:

dB_{SPL}: Hace referencia al nivel de presión sonora. Es la medida, por ejemplo, usada para referirse a ganancia o atenuación de volumen. Para sonido en el aire, toma como unidad de referencia 20 micropascal (20 μ Pa). En el agua se utiliza una referencia de 1 μ Pa.

dBW: La W indica que el decibel hace referencia a vatios. Es decir, se toma como referencia 1 W (vatio). Así, a un vatio le corresponden 0 dBW.

dBFS, significa "decibel a escala completa" ("decibels full scale"). Se trata de una abreviatura para los niveles de amplitud de decibel en sistemas digitales que tienen un nivel máximo disponible (como la codificación PCM). 0 dBFS se asigna al nivel máximo posible. Puede haber ambigüedades cuando se asigna un nivel de la escala dBFS a una forma de onda, y no a una amplitud específica, ya que a veces se deriva el nivel característico de la forma de onda a partir de su valor de amplitud de pico, mientras que otras veces se usa el valor de amplitud de su valor eficaz.

Para el caso en el que el valor RMS de una onda cuadrada de escala completa se designa como 0 dBFS, todos los valores posibles de dBFS son números negativos. Usando esta convención, una onda sinusoidal no podría existir con un valor RMS mayor que -3 dBFS sin recorte.

Para el caso en el que el valor RMS de una onda sinusoidal fuera de 0 dBFS, una onda cuadrada a escala completa estaría a +3 dBFS.

La medida del rango dinámico de un sistema digital es la relación entre el nivel de señal a escala completa y el ruido mínimo RMS. El rango dinámico teórico de un sistema digital se estima a menudo mediante la siguiente ecuación

$$DR = SNR = 20 \log_{10}(2)^n \approx 6.02 \cdot n$$

Esto viene de un modelo de ruido de cuantificación equivalente a una fluctuación aleatoria uniforme entre dos niveles vecinos de cuantización. Las fluctuaciones aleatorias uniformes son producidas sólo por ciertas señales, de manera que este modelo no es siempre una buena aproximación.

No obstante, una señal que fluctúe aleatoriamente entre dos niveles vecinos de cuantificación a 16 bits ofrecerá una medida de -96.33 dBFS cuando se use la convención de la onda cuadrada de escala completa, por lo tanto con mayor cuantificación, mayor bits, mejor rango dinámico ya que podemos representar en

dicha escala dBFS más valores. Aunque se permite el uso del decibel (dB) con unidades del SI, no está permitido el uso del dBFS.

En el caso del audio de los archivos .wav de 16 bits u otros formatos el límite es a los 0 dBFS, ninguna muestra puede exceder ese valor, pero la onda reconstituida si puede superarla. Entonces el rango dinámico es la diferencia entre el máximo y el mínimo, si tenemos un máximo de 0 dBFS y el mínimo valor posible es -192 dBFS entonces tendremos un rango dinámico de 192 dB, ahora en cambio si el valor máximo es de 1 dBFS y el mínimo fuera 191 dBFS, también se tendrá un rango dinámico de 192 dB, estos 192 dB son solo una relación, pero no un valor de voltaje o corriente específico.

II. FUNCIONES NATIVAS DE MATLAB

for: es un comando que utiliza un contador, es útil si se quiere repetir una parte del programa un número determinado de veces.

Sintaxis → For (contador), (ordenes) end;

wavread: Con esta función podemos extraer una señal de audio .wav

Sintaxis → s=wavread (archivo de audio);

length: Determina el número de componentes de un vector.

Sintaxis → longitud=length(vector);

Donde vector es el vector que se quiere medir (número de componentes).

fft: Hace la FFT del vector x. "X" es un vector de números complejos ordenados desde k=0...N-1. Se recomienda que la longitud del vector x sea una potencia de 2. Lo que no se recomienda es que la longitud de x sea un número primo.

Sintaxis: x=FFT(X);

Otra opción de la FFT es especificar el número de puntos con el que se quiere hacer la FFT.

X = fft(x,N)

Si la longitud de x es menor que N, el vector se rellena con ceros. Si es mayor, el vector es truncado.

abs: Calcula la norma de un complejo, o el valor absoluto de un real.

Sintaxis: Valor = abs(número);

Valor es la norma del complejo si (Número es complejo) o el valor absoluto de Número (si es real).

Número puede ser un real o un complejo:

- Si es Real: calcula el valor absoluto.
- Si es Complejo: calcula la norma del complejo.

linspace: Permite generar una colección de datos igualmente espaciados

Sintaxis: x=linspace (ext izq intervalo, ext der intervalo , número de datos a graficar)

spectrogram: Permite crear espectrogramas.

Sintaxis: [B,F,T]=spectrogram(x,nfft,ventana, superposición,Fs)

Dónde:

B=tabla de amplitudes complejas

F=vector de valores de frecuencia para etiquetar filas

T=vector de valores de tiempo utilizado para etiquetar columnas

nfft=tamaño de la transformada de Fourier

Fs=Frecuencia de muestreo

ventana=es el número de muestras de entrada por el tramo vertical (ancho de banda de análisis)

superposición=es el número de muestras por lo que las ventanas adyacentes se superponen

axis: Sirve para limitar los ejes dentro del rango de los datos

Sintaxis: axis (tight)

max: Retorna el mayor componente de un vector o matriz. Para el caso de los vectores: retorna el mayor valor contenido en sus componentes. En el caso de una matriz 'max' retorna un vector (fila) que contiene el máximo elemento que se desea encontrar en cada una de las columnas (la primera componente del vector tiene el mayor elemento en la primera columna de la matriz, y así sucesivamente).

Sintaxis: [máximo, imax] = max(Matriz);

Matriz es la matriz o vector al que se desea encontrar el máximo componente, máximo es el valor máximo de la matriz, imax es el índice del máximo, es decir, la posición.

save: Sirve para guardar los datos de las variables.

Sintaxis: save 'nombre del archivo' variables

PROGRAMA DISEÑADO PARA LA OBTENCIÓN DEL CONTENIDO ARMÓNICO Y DEL RANGO DINÁMICO DE FORMA AUTOMÁTICA

```
%-----  
%                               DULCE SUGEY ESPINO ORTIZ  
%-----  
% >>Noviembre 2011=> UNIVERSOS SONOROS MAYAS<<  
%-----  
%Programa diseñado para el análisis de señales de audio con el  
% fin de obtener el espectro de forma automática.  
%-----  
clc  
clear  
%llamamos los archivos de audio  
let1=['graba'];  
for i=1:44  
    k=i-1;  
    let2=[let1,num2str(k)];  
    Fs=44100;  
    s=wavread(let2);  
    N=length(s);  
    Ts=1/Fs;  
    t=[0:Ts:(N-1)*Ts];  
    h=hann(length(s));%implementando la ventana  
    z=s.*h; %convolución  
    Y=fft(z); %aplicamos la fft a la señal  
    Y=Y/N;  
    Py=abs(Y(1:N/2)) ;  
    Ydb=20*log10(Py);  
    freq=linspace(0,Fs/2,N/2);  
    figure(i)  
    subplot (211)  
    plot(t,s,'Color',[0.04,0.14,0.42]);  
    xlabel('t[s]');  
    ylabel('Amplitud');  
    title('D O M I N I O   D E L   T I E M P O');  
  
% datacursormode on  
% plot(freq,Ydb(1:N/2),'Color',[0.04,0.14,0.42]);  
% xlabel('Frecuencia [Hz]');  
% ylabel('Intensidad [dBFS]');  
% title(' D O M I N I O   D E   L A   F R E C U E N C I A ');  
grid  
subplot (212)  
[S,F,T,P] = spectrogram(s,256,250,256,Fs);%Obtención del espectrograma
```

```

surf(T,F,10*log10(P),'edgecolor','none'); axis tight;
view(0,90); colormap(bone); colorbar;
xlabel('t[s]'); ylabel('Frecuencia [Hz]');
title(' E S P E C T R O G R A M A ');
%Obteniendo la fundamental y los armónicos
[i0max,f0max]=max(Ydb);
in0(i)=i0max;
fr0(i)=freq(f0max);
%Aplico la transpuesta de la matriz con fines prácticos para el análisis
I0=in0';
f0=fr0';
%Obtención del primer armónico
[i1max,f1max]=max(Ydb(f0max+1000:2*f0max+1000,1));
in1(i)=i1max;
fr1(i)=freq(f0max+f1max+1000);
I1=in1';
f1=fr1';
% %Obtención del segundo armónico
[i2max f2max]=max(Ydb(f0max+f1max+2000:3*f0max+1000,1));
in2(i)=i2max;
fr2(i)=freq(f0max+f1max+f2max+2000);
I2=in2';
f2=fr2';
%Guardamos los vectores de frecuencia y de intensidad
save fre0.txt f0 -ASCII
save Inte0.txt I0 -ASCII

save fre1.txt f1 -ASCII
save Intel.txt I1 -ASCII

save fre2.txt f2 -ASCII
save Inte2.txt I2 -ASCII
end

```

El programa anterior utiliza funciones y comandos nativos de MATLAB. Mediante una serie de instrucciones carga automáticamente el número de archivos de audio uno por uno que el usuario quiera analizar (el nombre de los mismo debe de ser grabai donde $i=0,1,\dots,k$). A cada una de estas señales y paso a paso se les aplica la fft para obtener su espectro y el espectrograma de las señales. Para la obtención del contenido armónico utilizamos la función max que obtiene el máximo de la señal y la posición de la fundamental. La fundamental se obtiene de la siguiente forma:

```

[i0max,f0max]=max(Ydb);
I0(i)=i0max;
f0(i)=freq(f0max); ---Como f0max es el índice, se tiene que indicar al programa que dé la frecuencia en ese índice ----

```

Para obtener el segundo armónico se sabe que las ondas estacionarias en un tubo abierto deben encontrarse en $2*f_0$, pero esto es en el caso ideal. En el caso de las señales los armónicos pueden tener corrimiento en la frecuencia, que puede ser originado por muchos factores ya sea por los instrumentos de medición, el ruido, las condiciones de frontera (cámara sonoamortiguada), o bien por el mismo instrumento sonoro. Por lo tanto la señal se divide en intervalos que permiten aplicar la función max y encontrar el segundo y tercer armónico sin tomar en cuenta al índice de la fundamental. Por ello es que el intervalo inicia desde $f_0max+1000:2*f_0max+1000$, es decir, desde 1000 muestras, después de la posición del índice de la fundamental hasta aproximadamente $2*f_0max+1000$ con ello se garantiza que se encuentre el segundo máximo y no el primero ni el tercero:

$$[i1_{max}, f1_{max}] = \max(Y_{db}(f0_{max} + 1000:2 * f0_{max} + 1000, 1));$$

$$I1(i) = i1_{max};$$

$f1(i) = \text{freq}(f0_{max} + f1_{max} + 1000);$ --- Para obtener el valor tenemos que sumar $f0_{max} + 1000$ a la $f1_{max}$ localizada ya que el valor $f1_{max}$ toma como 0 a $f0_{max}$ ---

Para el tercer armónico se hace lo mismo que en el caso anterior:

$$[i2_{max}, f2_{max}] = \max(Y_{db}(f0_{max} + f1_{max} + 1100:3 * f0_{max} + 100, 1));$$

$$I2(i) = i2_{max};$$

$$f2(i) = \text{freq}(f0_{max} + f1_{max} + f2_{max} + 1100);$$

Por último se guardan los valores obtenidos en archivos diferentes para su posterior análisis.

III. ESPECIFICACIONES DEL INSTRUMENTAL DE MEDICIÓN

CÁMARA SONOAMORTIGÜADA MÓVIL

Se diseñó una cámara sonoamortigüada móvil que garantizara la calidad de la grabación (conversión A/D) para cada instrumento (Figura III.1), ésta se hizo basada en la teoría acústica para así tener un control de ruido en la medición. A este control de ruido se le denomina aislamiento acústico y nos ayuda a reducir la presión acústica respecto a un determinado sonido externo. El enfoque utilizado para la reducción de ruido fue la amortiguación que logra reducir la resonancia dentro de la cámara donde se propaga el sonido, este amortiguamiento se hizo por medio de la absorción y redirección. Para la absorción se utilizó material que reduce el nivel del sonido, mientras que la redirección que tiene que ver directamente con las reflexiones y difusiones, se redujeron por medio de una superficie reflejante por capas (Figura III.2); las capas son de triplay grueso y delgado al final, con un espacio de $(5 \pm 0.05)[\text{cm}]$ entre las mismas que es donde fluye el aire, lo que permite reducir la resonancia acústica en el aire y la resonancia mecánica en la estructura propia de la cámara impidiendo la salida y entrada de ruido. Fue elaborada en su exterior con madera de pino, tiene un marco interno de madera $[(3.7 \times 6.1) \pm 0.05][\text{cm}]$. Cada madera tiene una separación de $(1.9 \pm 0.05)[\text{cm}]$ de espacio de aire.

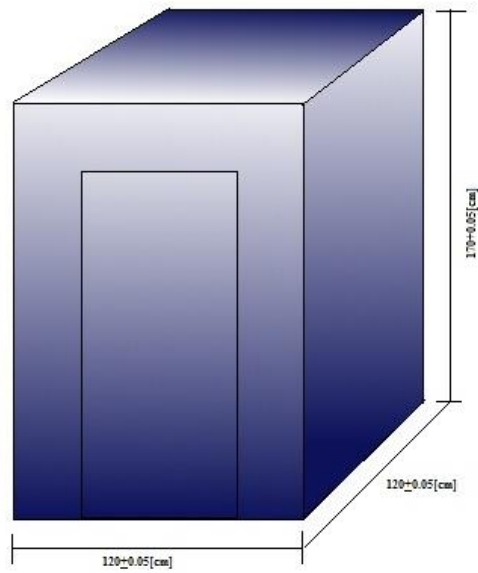


Figura III.1. Cámara Sonoamortiguada Móvil

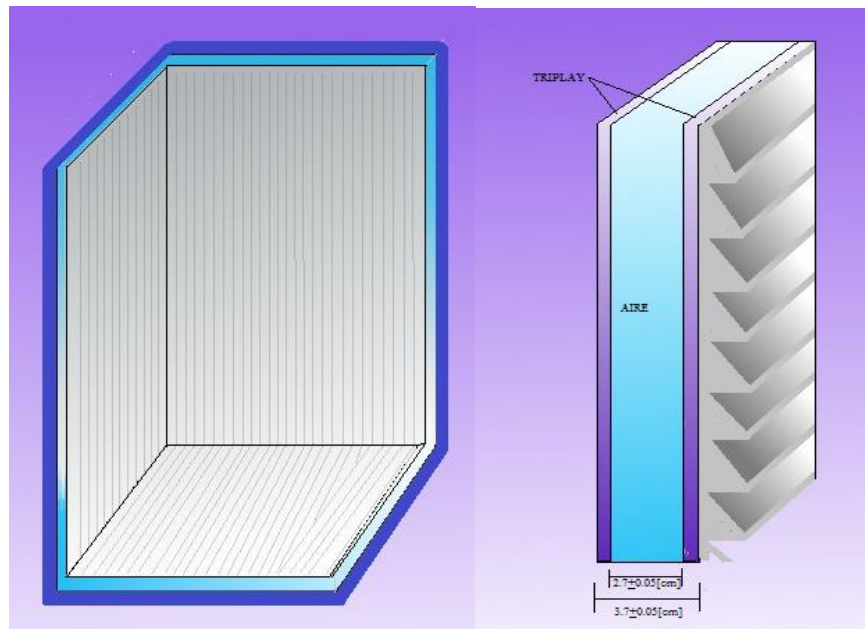


Figura III.2. Detalles de la cámara sonoamortiguada

1) ESPUMA ABSORTECH G-60 UTILIZADA EN LA CÁMARA SONOAMORTIGÜADA MÓVIL

Medidas: 120 x 60 x 5 [cm]

Área: 0.72 m²

Cantidad mínima: 1.44 m² (2 piezas)

Flamabilidad: 4 in/min

Frecuencia de corte: 480 Hz

Peso máximo: 3.25 Kg

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN ACÚSTICA

FRECUENCIA [Hz]	125	250	500	1,000	2,000	4,000
COEFICIENTE	0.14	0.44	0.86	1.00	1.00	1.00

TASCAM US-122

El US-122 es un interface audio/MIDI sobre USB diseñado principalmente para programas workstation de audio digital (DAW). Su diseño incorpora una interconexión de audio de 24 bits de dos entradas y dos salidas con entradas balanceadas, inserciones de entrada, alimentación fantasma y una interconexión MIDI de 16 canales.

MICROFONO ECM 800

- Micrófono de condensador omnidireccional para mediciones.
- Respuesta de frecuencia lineal desde 15 Hz a 20 kHz.
- Tecnología de condensador de eléctrico.
- Característica omnidireccional real y equilibrada.
- Adecuado para aplicaciones de medición acústica.
- Alimentación fantasma de +15 V a +48 V

SONOMETRO TES 1357 SOUND LEVEL METER

Medidor de nivel de Sonido digital.

- Display de barras gráficas.
- Resolución: 0.1[dB]
- Retención de lectura y Valor MAX.
- Rango: 30 a 130[dB].
- Normas: IEC-651 Tipo 2 ANSI S 1.4 Tipo 2
- Precisión: ± 1.5 [dB] (ref 94dB/1KHz)
- pantalla digital: 4 digital LCD
- Medición de Nivel de ponderación: 30[dB] a 130[dB]
- Medición de Nivel:
 - 35dB ~ 130[dB]
 - 30-80[dB]
 - 50-100[dB]
 - 60-110[dB]
 - 80-130[dB]
- Temperatura de funcionamiento la humedad: 5 ~ 40 ° C
- 10 ~ 90% de humedad relativa

IV. DATOS ANATÓMICOS DE LA FLAUTA TRIPLE MAYA

La flauta triple maya, es un instrumento de viento tipo flauta y dentro de la clasificación Hornbostel-Sachs es un aerófono. Está compuesta por tres tubos los cuales se han denotado por Flauta 1=tubo 1, Flauta 2=tubo 2, Flauta 3=tubo 3 (fig. IV.1), tiene un embocadura (boquilla) indirecta de pico superior y un rango de tesitura de 10.54 ± 0.05 [cm].

Las siguientes figuras muestran las mediciones y las partes de las que está compuesta la flauta triple maya:

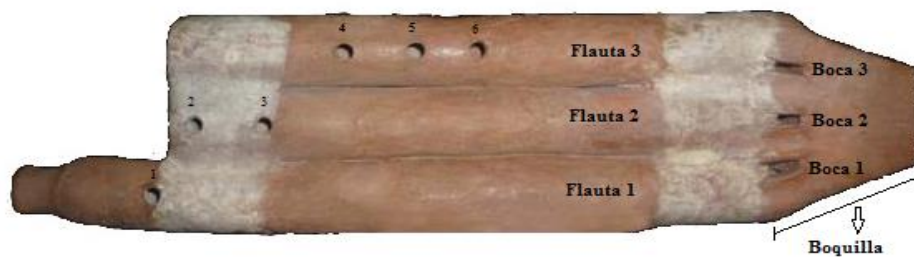


Figura IV.1. Muestra la numeración dada a los elementos que constituyen la Flauta triple, vista frontal.



Figura IV.2. Elementos que constituyen la Flauta triple, vista posterior.



Figura IV.3. Orificios parte inferior.

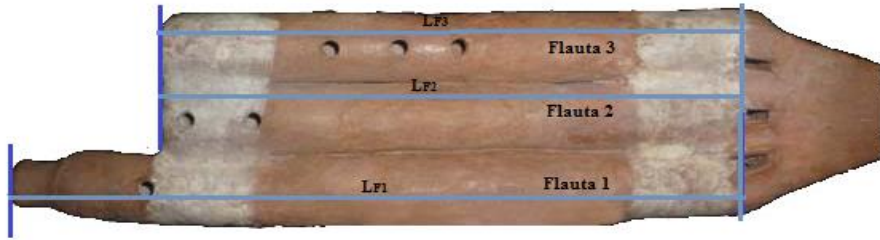


Figura IV.4. Longitud de cada una de las flautas.

FLAUTA	Longitud LF $\pm 5 \times 10^{-4}[m]$	Diámetro $\pm 5 \times 10^{-4}[m]$	Espesor $\pm 5 \times 10^{-4}[m]$	Diámetro sin espesor $\pm 5 \times 10^{-4}[m]$
1	0.2670	0.0269	0.0047	0.02220
2	0.2140	0.0266	0.0047	0.02190
3	0.2140	0.0264	0.0047	0.02170
3P	0.2223			

Tabla IV.1. Muestra las longitudes LF correspondientes a las líneas azules horizontales de la figura IV.4. También se muestra el diámetro de cada una de las flautas, el espesor y el diámetro sin espesor.

Boca	Ancho a $\pm 5 \times 10^{-4}[m]$	Ancho b $\pm 5 \times 10^{-4}[m]$	Largo $\pm 5 \times 10^{-4}[m]$
1	0.0049	0.0047	0.0099
2	0.0035	0.0047	0.0071
3	0.0040	0.0047	0.0092

Tabla IV.2. Muestra las medidas de cada boca. Se pueden observar en la figura IV.1.

Canal	Ancho a $\pm 5 \times 10^{-4}[m]$	Ancho b $\pm 5 \times 10^{-4}[m]$	Largo $\pm 5 \times 10^{-4}[m]$
1	0.0055	0.0049	0.0422
2	0.0050	0.0035	0.0420
3	0.0050	0.0040	0.0419

Tabla IV.3. Muestra las medidas de cada canal. (Figura IV.1)

Agujero	Flauta 1 $\pm 5 \times 10^{-4}[m]$	Flauta 2 $\pm 5 \times 10^{-4}[m]$	Flauta 3 $\pm 5 \times 10^{-4}[m]$
1	0.0066		
2		0.0055	
3		0.0056	
4			0.0061
5			0.0070
6			0.0070
7			0.0061
8			0.0061
9		0.0061	
10	0.0126		

Tabla IV.4. Muestra el diámetro de cada orificio de digitación. (figura IV.1)

Boquilla	Ancho $\pm 5 \times 10^{-5} [m]$	Apertura	Distancia $\pm 5 \times 10^{-5} [m]$
A	0.03760	a-b	0.00710
B	0.05950	a-c	0.00560

Tabla IV.5. Medidas de la boquilla (Figura IV.1.)



Figura IV.5. Muestra la distancia entre los orificios de digitación

Agujeros	Distancia (d_{xi}) $\pm 5 \times 10^{-5} [m]$
2-3	0.01840
4-5	0.01860
5-6	0.01530

Tabla IV.6. Datos de la distancia entre cada orificio de digitación (Figura IV.5)

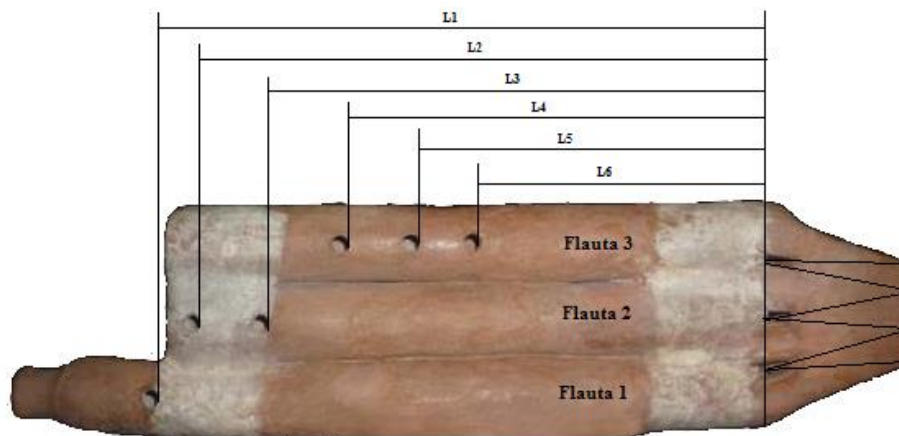


Figura IV.6. Longitudes medidas desde los orificios de digitación a cada uno de los canales.

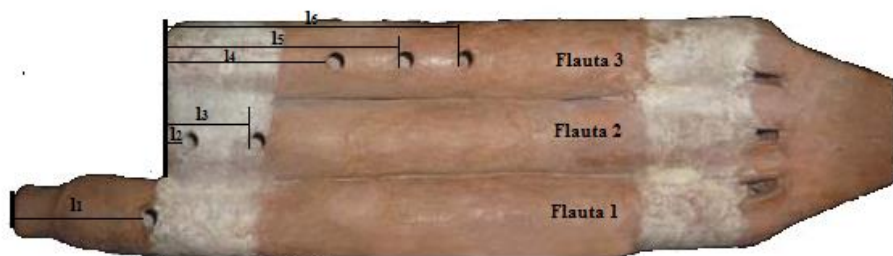


Figura IV.7. Longitudes l medidas del final de cada flauta a cada orificio de digitación.



Figura IV.8. Longitudes parte posterior.

Orificio	$L \pm 5 \times 10^{-5} [m]$	$l \pm 5 \times 10^{-5} [m]$
1	0.21700	0.04450
2	0.20320	0.00540
3	0.18020	0.02960
4	0.15270	0.57100
5	0.12800	0.81300
6	0.10600	0.10290
7	0.20850	0.00740

Tabla IV.7. Longitudes l_i de cada orificio a cada uno de los canales y longitudes l . (Figuras IV.6, IV.7 y IV.8)

V. TABLAS DE INTERVALOS MUSICALES

Esquemas	Distancia en Tonos y semitonos	Cents	Nombre del Intervalo	Esquemas	Distancia en Tonos y semitonos	Cents	Nombre del Intervalo
e14-e26	Mismo sonido: Do5	-10.19	Unísono	e10-e11	Mismo sonido: La4	15.44	Unísono
e5-e7	Mismo sonido: Do#5	-13.82	Unísono	e10-e22	Mismo sonido: La4	28.44	Unísono
e5-e23	Mismo Sonido: Do#5	-47.96	Unísono	e11-e22	Mismo sonido: La4	29.84	Unísono
e7-e23	Mismo Sonido: Do#5	-13.82	Unísono	e24-e10	Mismo sonido: La4	17.55	Unísono
e12-e16	Mismo sonido: Re5	10.45	Unísono	e24-e11	Mismo sonido: La4	18.95	Unísono
e3-e8	Mismo Sonido: Re#5	3.79	Unísono	e24-e22	Mismo sonido: La4	31.95	Unísono
e8-e15	Mismo sonido: Re#5	53.17	Unísono	e28-e27	Mismo sonido: La4	8.44	Unísono
e8-e20	Mismo sonido: Re#5	47.77	Unísono	e28-e24	Mismo sonido: La4	5.96	Unísono
e15-e20	Mismo sonido: Re#5	29.28	Unísono	e27-e24	Mismo sonido: La4	23.54	Unísono
e3-e20	Mismo sonido: Re#5	-23.1	Unísono	e28-e22	Mismo sonido: La4	16.85	Unísono

e3-e15	Mismo sonido: Re#5	-17.7	Unísono	e27-e22	Mismo sonido: La4	34.43	Unísono
e13-e2	Mismo sonido: Fa#4	-36.65	Unísono	e10-e27	Mismo sonido: La4	20.03	Unísono
e6-e9	Mismo sonido: Fa#5	-22.64	Unísono	e11-e27	Mismo sonido: La4	21.43	Unísono
e6-e19	Mismo sonido: Fa#5	64.02	Unísono	e10-e28	Mismo sonido: La4	2.45	Unísono
e9-e19	Mismo sonido: Fa#5	-3.42	Unísono	e11-e28	Mismo sonido: La4	3.85	Unísono
e17-e25	Mismo sonido: Sol5	-41.05	Unísono	e1-e18	Mismo sonido: La#4	-15.29	Unísono
e10-e11	Mismo sonido: La4	15.44	Unísono				

Tabla V.1. Muestra la relación de tonos con intervalos de las diferentes digitaciones.

Intervalo Segunda Menor \Leftrightarrow distancia entre notas de $\frac{1}{2}$ de tono

Esquemas	Tonos	Cents	Esquemas	Tonos	Cents
e1-e4	La#4/Si4	37.23	e8-e16	Re#5/Re5	62.96
e1-e10	La#4/La4	-6.79	e9-e17	Fa#5/Sol5	-88.42
e1-e11	La#4/La4	-5.39	e9-e21	Fa#5/Sol5	-37.09
e1-e22	La#4/La4	7.61	e9-e25	Fa#5/Sol5	-35.87
e1-e28	La#4/La4	-18.38	e10-e13	La4/Fa#4	-23.61
e3-e12	Re#5/Re5	-51.72	e10-e18	La4/La#4	5.54
e3-e14	Re#5/Do5	2.73	e11-e18	La4/La#4	6.94
e3-e16	Re#5/Re5	-7.91	e12-e15	Re5/Re#5	0.66
e4-e14	Si4/Do5	14.35	e12-e20	Re5/Re#5	-4.74
e4-e26	Si4/Do5	-17.67	e12-e23	Re5/Do#5	-64.64
e4-e18	Si4/La#4	-24.9	e14-e23	Do5/Do#5	-10.19
e5-e12	Do#5/Re5	-64.64	e15-e16	Re5/Re5	44.47
e5-e14	Do#5/Do5	-10.19	e16-e20	Re5/Re#5	39.07
e5-e16	Do#5/Re5	-20.83	e16-e23	Re5/Do#5	-20.83
e5-e26	Do#5/Do5	-9.54	e17-e19	Sol5/Fa#5	-1.76
e6-e17	Fa#5/Sol5	-27.82	e18-e22	La#4/La4	19.94
e6-e21	Fa#5/Fa5	23.51	e18-e24	La#4/La4	9.05
e6-e25	Fa#5/Sol5	24.73	e18-e27	La#4/La4	11.53
e7-e12	Do#5/Re5	17.46	e18-e28	La#4/La4	-6.05
e7-e14	Do#5/Do5	71.91	e19-e21	Fa#5/Fa5	49.57
e7-e16	Do#5/Re5	61.27	e19-e25	Fa#5/Sol5	50.79
e7-e26	Do#5/Do5	72.56	e23-e26	Do#5/Do5	-9.54
e8-e12	Re#5/Re5	19.15			

Tabla V.2. Muestra la distancia de semitono entre las diferentes digitaciones.

Intervalo Segunda Mayor o Tercera Disminuida \Leftrightarrow distancia entre notas de 1 tono

Esquemas	Tono	Cents	Esquemas	Tono	Cents
e1-e26	La#4-Do5	24.61	e5-e20	Do#5/Re#5	-36.02
e3-e5	Re#5-Do#5	-83	e7-e8	Do#5/Re#5	69.97
e3-e7	Re#5-Do#5	-0.9	e7-e15	Do#5/Re#5	71.91
e3-e23	Re#5-Do#5	-83	e7-e20	Do#5/Re#5	46.08
e4-e5	Si4-Do#5	-71.38	e8-e23	Re#5/Do#5	-12.13
e4-e7	Si4-Do#5	10.72	e12-e14	Re5/Do5	21.09
e4-e10	Si4-La4	-16.4	e12-e26	Re5/Do5	21.74
e4-e11	Si4-La4	-15	e14-e16	Do5/Re5	64.9
e4-e22	Si4/La4	-2	e14-e18	Do5-La#4	36.29
e4-e23	Si4-Do#5	71.38	e15-e23	Re#5/Do#5	-30.62
e4-e24	Si4/La4	-12.89	e17-e21	Sol5/Fa5	-42.27

e4-e27	Si4/La4	-10.41	e18-e26	La#4-Do5	36.94
e4-e28	Si4-La4	-27.99	e20-e23	Re#5/Do#5	-36.02
e5-e8	Do#5-Re#5	-12.13	e21-e25	Fa5/Sol5	10.28
e1-e14	La#4-Do5	23.96			

Tabla V.3.Distancia de 1 tono entre los diferentes esquemas.

Intervalo Segunda aumentada o Tercera menor \Leftrightarrow distancia entre notas de $1\frac{1}{2}$ tono

Esquemas	Tonos	Cents	Esquemas	Tonos	Cents
e1-e5	La#4-Do#5	-61.77	e10-e14	La4-Do5	44.79
e1-e7	La#4-Do#5	20.33	e10-e26	La4-Do5	45.44
e1-e23	La#4-Do#5	-61.77	e11-e13	La4-Fa#4	-22.21
e2-e10	Fa#4-La4	1	e11-e14	La4-Do5	46.19
e2-e11	Fa#4-La4	2.4	e11-e26	La4-Do5	46.84
e2-e22	Fa#4-La4	15.4	e12-e21	Re5-Fa5	-12.15
e2-e24	Fa#4-La4	4.51	e13-e22	Fa#4-La4	-9.21
e2-e22	Fa#4-La4	6.99	e13-e24	Fa#4-La4	-20.1
e2-e24	Fa#4-La4	-10.59	e13-e27	Fa#4-La4	-17.62
e3-e6	Re#5-Fa#5	-16.06	e13-e28	Fa#4-La4	-35.2
e3-e9	Re#5-Fa#5	-76.66	e14-e15	Do5-Re#5	55.11
e3-e19	Re#5-Fa#5	-10	e14-e20	Do5-Re#5	49.71
e3-e26	Re#5-Do5	3.38	e14-e22	Do5-La4	59.19
e4-e12	Si4-Re5	-40.1	e14-e24	Do5-La4	48.3
e4-e16	Si4-Re5	3.71	e14-e27	Do5-La4	51.38
e5-e18	Do#5-La#4	-49.44	e14-e28	Do5-La4	33.2
e6-e8	Fa#5-Re#5	54.81	e15-e19	Re#5-Fa#5	62.38
e6-e15	Fa#5-Re#5	36.32	e16-e21	Re5-Fa5	31.66
e6-e20	Fa#5-Re#5	30.92	e18-e23	La#4-Do#5	-49.44
e7-e22	Do#5-La#4	32.66	e19-e20	Fa#5-Re#5	56.98
e8-e9	Re#5-Fa#5	-5.79	e20-e26	Re#5-Do5	50.36
e8-e14	Re#5-Do5	73.6	e22-e26	La4-Do5	59.84
e8-e19	Re#5-Fa#5	80.87	e24-e26	La4-Do5	48.95
e8-e26	Re#5-Do5	74.25	e26-e27	Do5-La4	51.43
e9-e15	Fa#5-Re#5	-24.28	e26-e28	Do5-La4	33.85
e9-e20	Fa#5-Re#5	-29.68			

Tabla V.4.Distancia de uno y medio tono entre los diferentes esquemas.

Intervalo Tercera mayor y Cuarta disminuida \Leftrightarrow distancia entre notas de 2 tonos

Esquemas	Tonos	Cents	Esquemas	Tonos	Cents
e1-e2	La#4-Fa#4	-19.83	e7-e11	Do#5-La4	42.56
e1-e16	La#4-Re5	13.32	e7-e22	Do#5-La4	55.56
e1-e12	La#4-Re5	-30.49	e7-e24	Do#5-La4	44.67
e1-e13	La#4-Fa#4	-44.44	e7-e27	Do#5-La4	47.15
e2-e18	Fa#4-La#4	-7.5	e7-e28	Do#5-La4	29.57
e3-e4	Re#5-Si4	-58.46	e9-e12	Fa#5-Re5	-58.3
e4-e8	Si4-Re#5	12.41	e9-e16	Fa#5-Re5	-14.49
e4-e15	Si4-Re#5	-6.08	e10-e23	La4-Do#5	-40.94
e4-e20	Si4-Re#5	-11.48	e11-e23	La4-Do#5	-36.02
e5-e10	Do#5-La4	-40.94	e12-e18	Re5-La#4	-18.16
e5-e11	Do#5-La4	-39.54	e12-e19	Re5-Fa#5	28.36

e5-e21	Do#5-Fa5	-43.43	e13-e18	Fa#4-La#4	-32.11
e5-e22	Do#5-La4	-26.54	e16-e18	Re5-La#4	25.65
e5-e24	Do#5-La4	-37.46	e16-e19	Re5-Fa#5	72.17
e5-e27	Do#5-La4	-34.95	e21-e23	Fa5-Do#5	-43.43
e5-e28	Do#5-La4	-52.53	e22-e23	La4-Do#5	-26.54
e6-e12	Fa#5-Re5	2.3	e23-e24	Do#5-La4	-37.43
e6-e16	Fa#5-Re5	46.11	e23-e27	Do#5-La4	-34.95
e7-e10	Do#5-La4	41.6	e23-e28	Do#5-La4	-52.53
e7-e21	Do#5-Fa5	38.67			

Tabla V.5. Muestra los esquemas que forman el intervalo de tercera mayor.

Intervalo Tercera aumentada y Cuarta justa \Leftrightarrow distancia entre notas de $2\frac{1}{2}$ tonos

Esquemas	Tonos	Cents	Esquemas	Tonos	Cents
e1-e3	La#4-Re#5	-48.85	e11-e16	La4-Re5	35.55
e1-e8	La#4-Re#5	22.02	e12-e17	Re5-Sol5	-63.48
e1-e15	La#4-Re#5	3.53	e12-e22	Re5-La4	4.74
e1-e20	La#4-Re#5	-1.87	e12-e24	Re5-La4	-6.15
e2-e4	Fa#4-Si4	-29.44	e12-e25	Re5-Sol5	-10.93
e3-e17	Re#5-Sol5	-81.84	e12-e27	Re5-La4	-3.67
e3-e18	Re#5-La#4	-36.52	e12-e28	Re5-La4	-21.25
e3-e21	Re#5-Fa5	-30.51	e14-e21	Do5-Fa5	42.3
e3-e25	Re#5-Sol5	-29.34	e15-e17	Re#5-Sol5	-29.46
e4-e13	Si4-Fa#4	-54.05	e15-e18	Re#5-La#4	15.86
e5-e6	Do#5-Fa#5	-28.98	e15-e21	Re#5-Fa5	21.87
e5-e9	Do#5-Fa#5	-89.58	e15-e25	Re#5-Sol5	23.09
e5-e19	Do#5-Fa#5	-2.92	e16-e17	Re5-Sol5	-19.67
e6-e7	Fa#5-Do#5	53.12	e16-e22	Re5-La4	48.55
e6-e23	Fa#5-Do#5	-28.98	e16-e24	Re5-La4	37.66
e7-e9	Do#5-Fa#5	-7.48	e16-e25	Re5-Sol5	32.88
e7-e19	Do#5-Fa#5	79.18	e16-e27	Re5-La4	40.14
e8-e17	Re#5-Sol5	-10.97	e16-e28	Re5-La4	22.56
e8-e18	Re#5-La#4	34.35	e17-e20	Sol5-Re#5	-34.86
e8-e21	Re#5-Fa5	40.36	e18-e20	La#4-Re#5	10.46
e8-e25	Re#5-Sol5	41.58	e19-e23	Fa#5-Do#5	-2.92
e9-e23	Fa#5-Do#5	28.15	e20-e21	Re#5-Fa5	16.47
e10-e12	La4-Re5	-9.66	e20-e25	Re#5-Sol5	17.69
e10-e16	La4-Re5	28.15	e21-e26	Fa5-Do5	42.95
e11-e12	La4-Re5	-8.26			

Tabla V.6. Muestra los esquemas que forman el intervalo de tercera aumentada.

Intervalo cuarta aumentada o Quinta disminuida (Tritono) \Leftrightarrow distancia entre notas de 3 tonos

Esquemas	Tonos	Cents	Esquemas	Tonos	Cents
e2-e14	Fa#4-Do5	31.77	e9-e14	Fa#5-Do5	-3.85
e2-e26	Fa#4-Do5	32.4	e9-e26	Fa#5-Do5	-32
e3-e10	Re#5-La4	-28.02	e10-e15	La4-Re#5	24.36
e3-e11	Re#5-La4	-26.62	e10-e20	La4-Re#5	18.96
e3-e22	Re#5-La4	-13.62	e11-e15	La4-Re#5	25.76
e3-e22	Re#5-La4	-24.51	e11-e20	La4-Re#5	20.36
e3-e27	Re#5-La4	-22.03	e13-e14	Fa#4-Do5	-7.14
e3-e28	Re#5-La4	-39.61	e13-e26	Fa#4-Do5	7.79

e5-e17	Do#5-Sol5	-94.76	e14-e19	Do5-Fa#5	82.86
e5-e25	Do#5-Sol5	-42.21	e15-e22	Re#5-La4	38.76
e6-e14	Fa#5-Do5	56.75	e15-e24	Re#5-La4	27.87
e6-e26	Fa#5-Do5	57.4	e15-e27	Re#5-La4	30.35
e7-e17	Do#5-Sol5	-12.66	e15-e28	Re#5-La4	12.77
e7-e25	Do#5-Sol5	39.89	e19-e22	Re#5-La4	33.36
e8-e10	Re#5-La4	42.85	e19-e26	Fa#5-Do5	83.46
e8-e11	Re#5-La4	44.25	e20-e22	Re#5-La4	33.36
e8-e22	Re#5-La4	57.25	e20-e24	Re#5-La4	22.47
e8-e24	Re#5-La4	46.36	e20-e27	Re#5-La4	24.95
e8-e27	Re#5-La4	48.84	e20-e28	Re#5-La4	7.37
e8-e28	Re#5-La4	31.26	e23-e25	Do#5-Sol5	-42.21

Tabla V.7. Muestra los esquemas que forman el intervalo de cuarta aumentada.

Intervalo Quinta justa y Sexta disminuida \Leftrightarrow distancia entre notas de $3\frac{1}{2}$ tonos

Esquemas	Tonos	Cents
e2-e5	Fa#4-Do#5	-53.98
e2-e7	Fa#4-Do#5	28.12
e2-e23	Fa#4-Do#5	-53.98
e4-e21	Si4-Fa5	-18.89
e5-e13	Do#5-Fa#4	-78.59
e7-e13	Do#5-Fa#4	3.51
e13-e23	Fa#4-Do#5	-78.59
e14-e17	Do5-Sol5	-9.03
e14-e25	Do5-Sol5	43.52
e17-e26	Sol5-Do5	-8.38
e4-e6	Si4-Fa#5	-4.44
e4-e9	Si4-Fa#5	-65.04
e4-e19	Si4-Fa#5	21.62

Tabla V.8. Muestra los esquemas que forman el intervalo de quinta justa.

Intervalo Quinta aumentada y sexta menor \Leftrightarrow distancia entre notas de 4 tonos

Esquemas	Tonos	Cents	Esquemas	Tonos	Cents
e1-e6	La#4-Fa#5	5.17	e6-e18	Fa#5-La#4	17.5
e1-e9	La#4-Fa#5	-55.43	e8-e13	Re#5- Fa#4	5.2
e1-e19	La#4-Fa#5	31.23	e9-e18	Fa#5-La#4	43.04
e2-e3	Fa#4-Re#5	-41.06	e11-e21	La4- Fa5	12.95
e1-e21	La#4-Fa5	-9.28	e13-e15	Fa#4-Re#5	-13.29
e2-e8	Fa#4-Re#5	29.81	e13-e20	Fa#4-Re#5	-18.69
e2-e15	Fa#4-Re#5	11.34	e18-e19	La#4-Fa#5	43.56
e2-e20	Fa#4-Re#5	5.92	e18-e21	La#4-Fa5	3.05
e3-e13	Re#5- Fa#4	-65.67	e21-e24	Fa5- La4	15.06
e3-e13	La4- Fa5	11.55	e21-e27	Fa5- La4	17.54
e4-e17	Si4- Sol5	-70.22	e21-e28	Fa5- La4	-0.04
e4-e25	Si4- Sol5	-17.67			

Tabla V.9. Muestra los esquemas que forman el intervalo de quinta aumentada.

Intervalo sexta mayor y septima disminuida $\Leftrightarrow 4\frac{1}{2}$ tonos

Esquemas	Tonos	Cents	Esquemas	Tonos	Cents
e1-e25	La#4-Sol5	-8.06	e9-e28	Fa#5-La4	-46.19
e6-e10	Fa#5-La4	26	e10-e19	La4-Fa#5	52.06
e6-e11	Fa#5-La4	27.4	e11-e19	La4-Fa#5	53.46
e6-e22	Fa#5-La4	40.4	e18-e25	La#4-Sol5	4.27
e6-e24	Fa#5-La4	29.51	e19-e22	Fa#5-La4	66.46
e6-e27	Fa#5-La4	31.99	e19-e24	Fa#5-La4	55.57
e6-e28	Fa#5-La4	14.41	e19-e27	Fa#5-La4	58.05
e9-e10	Fa#5-La4	-34.6	e19-e28	Fa#5-La4	40.47
e9-e11	Fa#5-La4	-33.2	e25-e26	Sol5-Do5	44.17
e9-e22	Fa#5-La4	-20.2	e2-e16	Fa#4-Re5	21.11
e9-e24	Fa#5-La4	-31.09	e12-e13	Re5-Fa#4	-47.31
e9-e27	Fa#5-La4	-28.61	e13-e16	Fa#4-Re5	-3.5
			e2-e12	Fa#4-Re5	-22.7

Tabla V.10. Muestra los esquemas que forman el intervalo de sexta mayor.

**Intervalo Sexta aumentada y Septima menor \Leftrightarrow distancia entre notas de 5 tonos
séptima mayor y octava disminuida $\Leftrightarrow 5\frac{1}{2}$ tonos**

Intervalo Octava justa \Leftrightarrow distancia entre notas de 6 tonos

Esquemas	Tonos	Cents	Esquemas	Tonos	Cents
e10-e17	5 La4-Sol5	-39.78	e2-e17	$5\frac{1}{2} \rightarrow$ Fa#4-Sol5	-52.82
e10-e25	5 La4-Sol5	12.77	e2-e25	$5\frac{1}{2} \rightarrow$ Fa#4-Sol5	-0.27
e11-e17	5 La4-Sol5	-38.38	e13-e17	$5\frac{1}{2} \rightarrow$ Fa#4-Sol5	-77.43
e11-e25	5 La4-Sol5	14.57	e13-e25	$5\frac{1}{2} \rightarrow$ Fa#4-Sol5	-24.88
e17-e22	5 La4-Sol5	-25.38	e2-e6	6 Fa#4- Fa#5	12.96
e17-e24	5 La4-Sol5	-36.27	e2-e9	6 Fa#4- Fa#5	-47.64
e17-e27	5 La4-Sol5	-33.79	e2-e19	6 Fa#4- Fa#5	39.02
e17-e27	5 La4-Sol5	-51.37	e6-e13	6 Fa#5- Fa#4	-11.65
e22-e25	5 La4-Sol5	27.17	e9-e13	6 Fa#5- Fa#4	-72.25
e24-e25	5 La4-Sol5	16.25	e13-e19	6 Fa#4- Fa#5	14.41
e25-e27	5 Sol5- La4	18.76	e2-e21	$5\frac{1}{2} \rightarrow$ Fa#4-Fa5	-1.49
e25-e28	5 Sol5- La4	1.18	e13-e21	$5\frac{1}{2} \rightarrow$ Fa#4-Fa5	-26.1

Tabla V.11. Muestra los esquemas que forman los intervalos de sexta aumentada, septima mayor y octava justa.

VI. PROTOCOLO PARA LA MEDICIÓN DE FLAUTAS MESOAMERICANAS

Se puede implementar una metodología para la recopilación de señales. Para la caracterización de un instrumento de viento como la flauta triple necesitamos obtener los tonos generados de la flauta destapando y tapando orificios de digitación, así como también necesitamos todas las posibles combinaciones de éstos y de los tres tubos sonoros.

Se propone la siguiente metodología para Flautas Triples→

EXCITACIÓN Y DIGITACIONES

Se realizan 3 excitaciones: sonido suave, sonido medio y sonido fuerte.

Utilizando las técnicas de conteo las posibles combinaciones para realizar el análisis son:

$$\binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!}$$

Es decir, se eligen r cosas de n que se tienen. En este caso 3 tubos si se quieren los tubos por separado se tendrá que:

$$\binom{3}{1} = \frac{3!}{1!(3-1)!} = 3 \text{ posibilidades}$$

Es decir se tendrán tubo 1, tubo 2, tubo 3.

Para las combinaciones de 2 tubos se tendrán:

3 posibilidades

Es decir, tubo 1-2, tubo 2-3 y tubo 1-3.

Para las combinaciones de 3 tubos:

1 posibilidad

Es decir, los tres tubos.

Para las combinaciones de los orificios de digitación de una flauta triple se tiene lo siguiente:

Se debe notar que en el caso de la flauta triple maya el instrumento consta de un orificio trasero el cual permanece destapado:

Para las 3 posibilidades de los tubos por separado se tiene:

TUBOS POR SEPARADO

Tubo 1 (Flauta 1): Consta de 1 orificio, por lo tanto, solo tendrá 1 posibilidad

Orificios	Digitación
1	Tapando /Destapando

Esto se realiza para las tres excitaciones: suave, medio y fuerte antes mencionadas.

Tubo 2 (Flauta 2): Tiene un total de 2 orificios por lo tanto, se requieren las combinaciones de 1 en 2 y de 2 en 2.

Digitación
Tapando orificio 2 /Destapando orificio 3
Tapando orificio 3 /Destapando orificio 2
Tapando ambos /Destapando ambos

Tubo 3 (Flauta 3): Consta de 3 orificios por lo que

Se necesitan las combinaciones de 1 en 3, de 2 en 3 y de 3 en 3.

Digitación
Tapando orificio 4 /Destapando orificios 5 y 6
Tapando orificio 5 /Destapando orificios 4 y 6
Tapando orificio 6 /Destapando orificios 4 y 5
Tapando orificios 4 y 5 /Destapando orificio 6
Tapando orificios 5 y 6 /Destapando orificio 4
Tapando orificios 4 y 6 / Destapando orificio 5
Tapando los tres orificios /Destapando los tres orificios

Para las 3 posibilidades de dos tubos combinados se tiene:

TUBOS COMBINADOS

Flauta 1-2: Tienen un total de 3 orificios por lo que empleando la formula se tienen que hacer las combinaciones de 1 en 3, de 2 en 3 y de 3 en 3.

Digitación
Tapando orificio 1 /Destapando orificios 2 y 3

Tapando orificio 2 /Destapando orificios 1 y 3
Tapando orificio 3 /Destapando orificios 1 y 2
Tapando orificios 2 y 3 /Destapando orificio 1
Tapando orificios 1 y 3 /Destapando orificio 2
Tapando orificios 1 y 2 / Destapando orificio 3
Tapando los 3 orificios /Destapando los 3 orificios

Flauta 2-3: Tienen un total de 5 orificios por lo que se tienen que obtener las combinaciones de 1 en 5, de 2 en 5, de 3 en 5, de 4 en 5 y de 5 en 5

Digitación
Tapando orificio 2 /Destapando orificios 3, 4, 5 y 6
Tapando orificio 3 /Destapando orificios 2, 4, 5 y 6
Tapando orificio 4 /Destapando orificios 2, 3, 5 y 6
Tapando orificio 5 /Destapando orificios 2, 3, 4 y 6
Tapando orificio 6 /Destapando orificios 2, 3, 4 y 5
Tapando orificios 2 y 3 /Destapando orificio 1
Tapando orificios 1 y 3 /Destapando orificio 2
Tapando orificios 1 y 2 / Destapando orificio 3
Tapando orificios 2 y 3/ Destapando orificios 4, 5 y 6
Tapando orificios 2 y 4/ Destapando orificios 3, 5 y 6
Tapando orificios 2 y 5/ Destapando orificios 3, 4 y 6
.
.
.
Tapando orificios 2, 3 y 4 /Destapando orificios 5 y 6
Tapando orificios 4, 5 y 6 /Destapando orificios 2 y 3
Tapando orificios 5, 6 y 4 /Destapando orificios 2 y 5
.
.
.
Tapando orificios 2, 3, 4 y 5 /Destapando orificio 6
Tapando orificios 3, 4, 5 y 6 /Destapando orificio 2
Tapando orificios 4, 5, 6 y 2 /Destapando orificio 3
Tapando orificios 5, 6, 2 y 3 /Destapando orificio 4
Tapando orificios 6, 2, 3 y 4 /Destapando orificio 5
Tapando los 3 orificios /Destapando los 3 orificios

Flauta 1-3: Tienen un total de 4 orificios, entonces se requieren las combinaciones de 1 en 4, de 2 en 4, de 3 en 4 y de 4 en 4.

Digitación
Tapando orificio 1 /Destapando orificios 4, 5 y 6
Tapando orificio 4 /Destapando orificios 5, 6 y 1
Tapando orificio 5 /Destapando orificios 6, 1 y 4
Tapando orificio 6 /Destapando orificios 1, 4 y 5

Tapando orificios 1 y 4/ Destapando orificios 5 y 6
Tapando orificios 1 y 5/ Destapando orificios 4 y 6
Tapando orificios 1 y 6/ Destapando orificios 4 y 5
Tapando orificios 4 y 5/ Destapando orificios 1 y 6
Tapando orificios 5 y 6/ Destapando orificios 1 y 4
Tapando orificios 4 y 6/ Destapando orificios 1 y 5
Tapando orificios 1, 4 y 5 /Destapando orificio 6
Tapando orificios 1, 4 y 6 /Destapando orificio 5
Tapando orificios 1, 5 y 6 /Destapando orificio 4
Tapando orificios 4, 5 y 6 /Destapando orificio 1
Tapando los 4 orificios /Destapando los 4 orificios

Para la posibilidad de los tres tubos se tiene:

3 TUBOS F1-F2-F3: Un total de 6 orificios entonces se requieren las combinaciones de 1 en 6, de 2 en 6, de 3 en 6, de 4 en 6, de 5 en 6 y de 6 en 6.

Digitación
Tapando orificio 1 /Destapando orificios 2, 3, 4, 5 y 6
Tapando orificio 2 /Destapando orificios 1, 3, 4, 5 y 6
.
.
.
Tapando orificios 1 y 2 /Destapando orificios 3, 4, 5 y 6
.
.
.
Tapando orificios 1, 2 y 3 /Destapando orificios 4, 5 y 6
.
.
.
Tapando orificios 1, 2, 3 y 4 /Destapando orificios 5 y 6
.
.
.
Tapando orificios 1, 2, 3, 4 y 5 /Destapando orificio 6
.
.
.
Tapando los 6 orificios /Destapando los 6 orificios

Esta metodología se puede implementar en otros instrumentos de viento, ya que es importante realizar el mayor número de combinaciones posibles sin repetición para tener gran variedad de tonos (señales a analizar), por lo tanto seguir un protocolo de medición es trascendental para un análisis acústico de cualquier instrumento.

A N E X O S

ESTUDIO ACÚSTICO DE LA
FLAUTA TRIPLE MAYA

Dulce Sugely Espino Ortiz

CONTENIDO

1. BASE DE DATOS	3
Medición	3
Frecuencias Experimentales y Teóricas	5
Corrección l_{ef} para tubo abierto	5
Corrección l_p para tubo abierto	6
Corrección l_p para tubo cerrado	8
Tablas de relación con tonos occidentales	10
Sonidos suaves y medios	10
Sonidos Medios	12
2.GRÁFICAS	14
Grabación 1: Flautas por separado	14
Grabación 2: Flautas 1 y 2	62
Grabación 3: Flautas 1 y 3	87
Grabación 4: Flautas 2 y 3	118
Grabación 5: Las tres flautas	150

Tabla A.10 Datos obtenidos a partir de los datos anatómicos

GRABACIÓN 2	Longitud	Longitud efectiva	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico
<i>Nombre del archivo</i>	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l_e \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$f_{0 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{1 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{2 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]
F12destapandoorificioF1sonidomedio	0.2405	0.2561	669.57295	1339.14591	2008.71886

Tabla A.11. Datos y cálculos obtenidos a partir de las señales de audio

GRABACIÓN 3	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico	Longitud efectiva	Longitud
<i>Nombre del archivo</i>	$f_{0 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{1 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{2 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$l_e \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]
F23destapando1erodeF2sonidomedio	535.002700	1083.227700	1615.785900	0.3206	0.3051
F23destapando1erodeF2suave	514.289050	1028.435200	1534.295700	0.3335	0.3180
F23obturando2.3deF3sonidomedio	628.671420	1255.842800	1885.347600	0.2728	0.2573
F23obturando2.3deF3suave	570.006460	1185.263400	1784.270200	0.3009	0.2854
F23obturando3orificiosdelaF3sonidomedio	596.805410	1105.810000	1795.616300	0.2874	0.2719
F23obturando3orificiosdelaF3suave	569.605170	1054.809600	1707.815500	0.3011	0.2856
F23orificiosdestapadosonidomedio	762.172430	1193.842400	1791.180200	0.2250	0.2096
F23orificiosdestapadosuave	565.717950	713.147480	1133.721600	0.3032	0.2877
F23orificiostapadosuave	437.004950	1015.511500	1315.764900	0.3924	0.3770
F23orificiostapadosonidomedio	465.755280	1056.512000	1397.015800	0.3682	0.3528

Tabla A.12. Datos obtenidos a partir de los datos anatómicos

GRABACIÓN 3	Longitud	Longitud efectiva	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico
<i>Nombre del archivo</i>	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l_e \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$f_{0 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{1 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{2 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]
F23destapando1erodeF2sonidomedio	0.2140	0.2295	747.42011	1494.84023	2242.26034

Tabla A.13. Datos y cálculos obtenidos a partir de las señales de audio

GRABACIÓN 4	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico	Longitud efectiva	Longitud
<i>Nombre del archivo</i>	$f_{0 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{1 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{2 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$l_e \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]
F13destapadassonidomedio	759.806890	1339.812200	2282.420700	0.2257	0.2102
F13destapadasuave	433.836610	727.838830	1460.011000	0.3953	0.3797
F13destapando1de3sonidomedio	626.671400	1253.176100	1880.847500	0.2737	0.2581
F13destapando1de3suave	591.205360	1184.410700	1774.216100	0.2901	0.2745
F13destapando1y2de3sonidomedio	700.338630	897.506780	1401.677300	0.2449	0.2293
F13destapando1y2de3suave	430.754880	862.759780	1328.015100	0.3981	0.3826
F13destapandoF1sonidomedio	445.604040	891.808090	1102.410000	0.3849	0.3693
F13destapandoF1suave	431.504890	1052.261900	1536.267400	0.3974	0.3819
F13orificiostapadosonidomedio	538.574920	1078.007000	1615.439000	0.3184	0.3029
F13orificiostapadosuave	525.004760	1048.609500	1573.614300	0.3267	0.3111

Tabla A.14. Datos obtenidos a partir de los datos anatómicos

GRABACIÓN 4	Longitud	Longitud efectiva	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico
<i>Nombre del archivo</i>	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l_e \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$f_{0 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{1 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{2 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]
F13destapadassonidomedio	0.2405	0.2561	669.75665	1339.51330	2009.26995

Tabla A.15. Datos y cálculos obtenidos a partir de las señales de audio

GRABACIÓN 5	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico	Longitud efectiva	Longitud
<i>Nombre del archivo</i>	$f_{0 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{1 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{2 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$l_e \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]
3destapadasF1F2sonidomedio	442.755020	1095.262400	1554.267600	0.3873	0.3718
3destapadasF1F2suave	430.503250	608.004600	1130.341900	0.3984	0.3828
3destapadassonidomedio	786.672610	1159.342100	1854.680700	0.2180	0.2025
3destapadasuave	765.806950	1182.410700	1772.816100	0.2239	0.2084
3Fsonidomedio	535.204850	1079.609800	1608.214600	0.3204	0.3049
3Fsuave	448.204070	680.406170	1036.009400	0.3826	0.3671
3obturando2y3F3sonidomedio	443.404020	658.605970	1178.010700	0.3868	0.3712
3obturando2y3F3suave	575.605220	1151.810400	1828.216600	0.2979	0.2824
3obturando3deF3suave	554.341710	1311.686500	1967.363100	0.3094	0.2938
3obturando3orificio2deF2sonidomedio	443.755030	1110.762600	1559.267700	0.3865	0.3709
3obturando3orificio2deF2suave	509.005770	1021.011600	1542.517500	0.3369	0.3214
3orificio1F1destapadosonidomedio	438.803980	1078.009800	1316.011900	0.3908	0.3753
3orificio1F1destapadasuave	425.004820	1038.261800	1518.517200	0.4035	0.3880

Tabla A.16. Datos obtenidos a partir de los datos anatómicos

GRABACIÓN 5	Longitud	Longitud efectiva	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico
<i>Nombre del archivo</i>	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l_e \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$f_{0 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{1 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{2 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]
3destapadasF1F2sonidomedio	0.2316	0.2471	693.91231	1387.82461	2081.73692

Corrección $l_p = l + \left(\frac{8a}{3\pi}\right)$ para tubos abiertos:

Tabla A.17. Datos y cálculos obtenidos a partir de las señales de audio

GRABACIÓN 1	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico	Longitud efectiva	Longitud
<i>Nombre del archivo</i>	$f_{0 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{1 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$f_{2 \pm 4.5X10^3}$ [Hz]	$l_e \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]
F1destapadassonidomedio	462.336830	924.840320	1387.010500	0.3709	0.3615
F1destapadasuave	440.002850	880.291420	1320.151400	0.3898	0.3803
F1tapadassonidomedio	368.669450	852.006440	1106.841700	0.4652	0.4558

F1tapadasuave	346.430820	692.147340	874.577090	0.4950	0.4856
F2obturandooficio2sonidomedio	545.756190	1092.012400	1638.768600	0.3142	0.3049
F2obturandooficio2suave	519.755890	1042.511800	1562.767700	0.3300	0.3207
F2sintaparmedio	609.289660	1219.150800	1828.869000	0.2815	0.2722
F2sintaparsuave	588.504450	1177.675600	1765.513300	0.2914	0.2821
F2tapandooficiossomidomedio	487.004420	974.408840	1461.413300	0.3522	0.3429
F2tapandooficiossuave	466.755290	933.260580	1398.265900	0.3674	0.3581
F3destapadasonidomedio	798.339370	1279.343000	2396.518100	0.2148	0.2056
F3destapadasuave	773.207010	1548.614000	2318.021000	0.2218	0.2126
F3obturando2y3sonidomedio	635.514410	1271.028800	1905.543200	0.2699	0.2607
F3obturando2y3suave	600.675750	1201.351500	1804.693900	0.2855	0.2763
F3obturandooficio3sonidomedio	721.677580	1442.688500	2163.032700	0.2376	0.2284
F3obturandooficio3suave	685.010360	1370.020700	2052.697700	0.2504	0.2412
F3tapandolos3orificiossonidomedio	565.605130	1133.810300	1705.015500	0.3032	0.2940
F3tapandolos3orificiossuave	558.025310	1675.076000	2676.121400	0.3073	0.2981

Tabla A.18. Datos obtenidos a partir de los datos anatómicos

GRABACIÓN 1	Longitud	Longitud efectiva	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico
<i>Nombre del archivo</i>	$l \pm 5 \times 10^{-4}[m]$	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4}[m]$	$f_{\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$f_{1\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$f_{2\pm 4.5X10^3}[Hz]$
F1destapadasonidomedio	0.2670	0.2764	620.42825	1240.85649	1861.28474
F2obturandooficio2sonidomedio	0.2140	0.2233	768.04348	1536.08697	2304.13045
F3destapadasonidomedio	0.2140	0.2232	768.33556	1536.67111	2305.00667

Tabla A.19. Datos y cálculos obtenidos a partir de las señales de audio

GRABACIÓN 2	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico	Longitud efectiva	Longitud
<i>Nombre del archivo</i>	$f_{\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$f_{1\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$f_{2\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4}[m]$	$l \pm 5 \times 10^{-4}[m]$
F12destapandooficioF1sonidomedio	441.836670	883.840010	1325.676700	0.3882	0.3788
F12destapandooficioF1suave	434.336620	870.173240	1415.010700	0.3949	0.3855
F12obturando2doorificioF2sonidomedio	442.204010	1082.809800	1327.412000	0.3878	0.3785
F12obturando2doorificioF2suave	429.803900	860.007800	1124.210200	0.3990	0.3897
F12orificiosdestapadossomidomedio	581.506590	1164.513200	1746.019800	0.2949	0.2856
F12orificiosdestapadossuave	577.006540	1154.763100	1733.269700	0.2972	0.2879
F12tapandooficiossomidomedio	363.254120	726.508240	1089.762400	0.4721	0.4628
F12tapandooficiossuave	347.803150	696.606320	1042.409500	0.4931	0.4837

Tabla A.20. Datos obtenidos a partir de los datos anatómicos

GRABACIÓN 2	Longitud	Longitud efectiva	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico
<i>Nombre del archivo</i>	$l \pm 5 \times 10^{-4}[m]$	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4}[m]$	$f_{\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$f_{1\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$f_{2\pm 4.5X10^3}[Hz]$
F12orificiosdestapadossomidomedio	0.2140	0.2233	768.04348	1536.08697	2304.13045

Tabla A.21. Datos y cálculos obtenidos a partir de las señales de audio

GRABACIÓN 3	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico	Longitud efectiva	Longitud
<i>Nombre del archivo</i>	$f_{\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$f_{1\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$f_{2\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4}[m]$	$l \pm 5 \times 10^{-4}[m]$
F23destapando1erodeF2sonidomedio	535.002700	1083.227700	1615.785900	0.3206	0.3113
F23destapando1erodeF2suave	514.289050	1028.435200	1534.295700	0.3335	0.3242
F23obturando2_3deF3sonidomedio	628.671420	1255.842800	1885.347600	0.2728	0.2635
F23obturando2_3deF3suave	570.006460	1185.263400	1784.270200	0.3009	0.2916
F23obturando3orificiosdelaf3sonidomedio	596.805410	1105.810000	1795.616300	0.2874	0.2781
F23obturando3orificiosdelaf3suave	569.605170	1054.809600	1707.815500	0.3011	0.2918
F23orificiosdestapadossomidomedio	762.172430	1193.842400	1791.180200	0.2250	0.2158
F23orificiosdestapadossuave	565.717950	713.147480	1133.721600	0.3032	0.2939
F23orificiosdestapadossuave	437.004950	1015.511500	1315.764900	0.3924	0.3832
F23orificiosdestapadossomidomedio	465.755280	1056.512000	1397.015800	0.3682	0.3590

Tabla A.22. Datos obtenidos a partir de los datos anatómicos

GRABACIÓN 3	Longitud	Longitud efectiva	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico
<i>Nombre del archivo</i>	$l \pm 5 \times 10^{-4}[m]$	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4}[m]$	$f_{\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$f_{1\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$f_{2\pm 4.5X10^3}[Hz]$
F23destapando1erodeF2sonidomedio	0.2140	0.2233	768.18949	1536.37899	2304.56848

Tabla A.23. Datos y cálculos obtenidos a partir de las señales de audio

GRABACIÓN 4	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico	Longitud efectiva	Longitud
<i>Nombre del archivo</i>	$f_{\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$f_{1\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$f_{2\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4}[m]$	$l \pm 5 \times 10^{-4}[m]$
F13destapadassomidomedio	759.806890	1339.812200	2282.420700	0.2257	0.2164
F13destapadasuave	433.836610	727.838830	1460.011000	0.3953	0.3860
F13destapando1de3sonidomedio	626.671400	1253.176100	1880.847500	0.2737	0.2644
F13destapando1de3suave	591.205360	1184.410700	1774.216100	0.2901	0.2808
F13destapando1y2de3sonidomedio	700.338630	897.506780	1401.677300	0.2449	0.2356
F13destapando1y2de3suave	430.754880	862.759780	1328.015100	0.3981	0.3888
F13destapandoF1sonidomedio	445.604040	891.808090	1102.410000	0.3849	0.3756
F13destapandoF1suave	431.504890	1052.261900	1536.267400	0.3974	0.3881
F13orificiosdestapadossomidomedio	538.574920	1078.007000	1615.439000	0.3184	0.3091
F13orificiosdestapadossuave	525.004760	1048.609500	1573.614300	0.3267	0.3173

Tabla A.24. Datos obtenidos a partir de los datos anatómicos

GRABACIÓN 4	Longitud	Longitud efectiva	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico
<i>Nombre del archivo</i>	$l \pm 5 \times 10^{-4}[m]$	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4}[m]$	$f_{\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$f_{1\pm 4.5X10^3}[Hz]$	$f_{2\pm 4.5X10^3}[Hz]$
F13destapadassomidomedio	0.2405	0.2498	686.50563	1373.01125	2059.51688

Tabla A.25. Datos y cálculos obtenidos a partir de las señales de audio

GRABACIÓN 5	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico	Longitud efectiva	Longitud
<i>Nombre del archivo</i>	$f_{0\pm}4.5X10^3$ [Hz]	$f_{1\pm}4.5X10^4$ [Hz]	$f_{2\pm}4.5X10^5$ [Hz]	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]
3destapadasF1F2sonidomedio	442.755020	1095.262400	1554.267600	0.3873	0.3780
3destapadasF1F2suave	430.503250	608.004600	1130.341900	0.3984	0.3891
3destapadassonidomedio	786.672610	1159.342100	1854.680700	0.2180	0.2087
3destapadasuave	765.806950	1182.410700	1772.816100	0.2239	0.2146
3Fsonidomedio	535.204850	1079.609800	1608.214600	0.3204	0.3111
3Fsuave	448.204070	680.406170	1036.009400	0.3826	0.3733
3obturando2y3F3sonidomedio	443.404020	658.605970	1178.010700	0.3868	0.3775
3obturando2y3F3suave	575.605220	1151.810400	1828.216600	0.2979	0.2886
3obturando3deF3suave	554.341710	1311.686500	1967.363100	0.3094	0.3001
3obturandoF3orificio2deF2sonidomedio	443.755030	1110.762600	1559.267700	0.3865	0.3772
3obturandoF3orificio2deF2suave	509.005770	1021.011600	1542.517500	0.3369	0.3276
3orificio1F1destapadosonidomedio	438.803980	1078.009800	1316.011900	0.3908	0.3815
3orificio1F1destapadosuave	425.004820	1038.261800	1518.517200	0.4035	0.3942

Tabla A.26 Datos obtenidos a partir de los datos anatómicos

GRABACIÓN 5	Longitud	Longitud efectiva	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico
<i>Nombre del archivo</i>	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$f_{0\pm}4.5X10^3$ [Hz]	$f_{1\pm}4.5X10^4$ [Hz]	$f_{2\pm}4.5X10^5$ [Hz]
3destapadasF1F2sonidomedio	0.2316	0.2409	711.88766	1423.77533	2135.66299

Corrección $l_p = l + \left(\frac{8a}{3\pi}\right)$ para tubos cerrados (Clarinete)

Tabla A.27. Datos y cálculos obtenidos a partir de las señales de audio

GRABACIÓN 1	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico	Longitud efectiva	Longitud
<i>Nombre del archivo</i>	$f_{0\pm}4.5X10^3$ [Hz]	$f_{1\pm}4.5X10^4$ [Hz]	$f_{2\pm}4.5X10^5$ [Hz]	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]
F1destapadosonidomedio	462.336830	924.840320	1387.010500	0.3709	0.3615
F1destapadasuave	440.002850	880.291420	1320.151400	0.3898	0.3803
F1tapadosonidomedio	368.669450	852.006440	1106.841700	0.4652	0.4558
F1tapadasuave	346.430820	692.147340	874.577090	0.4950	0.4856
F2obturandoorificio2sonidomedio	545.756190	1092.012400	1638.768600	0.3142	0.3049
F2obturandoorificio2suave	519.755890	1042.511800	1562.767700	0.3300	0.3207
F2sintaparmedio	609.289660	1219.150800	1828.869000	0.2815	0.2722
F2sintapasuave	588.504450	1177.675600	1765.513300	0.2914	0.2821
F2tapandoorificiosonidomedio	487.004420	974.408840	1461.413300	0.3522	0.3429
F2tapandoorificiosuave	466.755290	933.260580	1398.265900	0.3674	0.3581
F3destapadosonidomedio	798.339370	1279.343000	2396.518100	0.2148	0.2056
F3destapadasuave	773.207010	1548.614000	2318.021000	0.2218	0.2126
F3obturando2y3sonidomedio	635.514410	1271.028800	1905.543200	0.2699	0.2607
F3obturando2y3suave	600.675750	1201.351500	1804.693900	0.2855	0.2763
F3obturandoorificio3sonidomedio	721.677580	1442.688500	2163.032700	0.2376	0.2284
F3obturandoorificio3suave	685.010360	1370.020700	2052.697700	0.2504	0.2412
F3tapandolos3orificiosonidomedio	565.605130	1133.810300	1705.015500	0.3032	0.2940
F3tapandolos3orificiosuave	558.025310	1675.076000	2676.121400	0.3073	0.2981

Tabla A.28. Datos obtenidos a partir de los datos anatómicos

GRABACIÓN 1	Longitud	Longitud efectiva	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico
<i>Nombre del archivo</i>	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$f_{0\pm}4.5X10^3$ [Hz]	$f_{1\pm}4.5X10^4$ [Hz]	$f_{2\pm}4.5X10^5$ [Hz]
F1destapadosonidomedio	0.2670	0.2764	310.21412	930.64237	1551.07062
F2obturandoorificio2sonidomedio	0.2140	0.2233	384.02174	1152.06523	1920.10871
F3destapadosonidomedio	0.2140	0.2232	384.16778	1152.50334	1920.83889

Tabla A.29. Datos y cálculos obtenidos a partir de las señales de audio

GRABACIÓN 2	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico	Longitud efectiva	Longitud
<i>Nombre del archivo</i>	$f_{0\pm}4.5X10^3$ [Hz]	$f_{1\pm}4.5X10^4$ [Hz]	$f_{2\pm}4.5X10^5$ [Hz]	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]
F12destapandoorificioF1sonidomedio	441.836670	883.840010	1325.676700	0.3882	0.3788
F12destapandoorificioF1suave	434.336620	870.173240	1415.010700	0.3949	0.3855
F12obturando2oorificio2deF2sonidomedio	442.204010	1082.809800	1327.412000	0.3878	0.3785
F12obturando2oorificio2deF2suave	429.803900	860.007800	1124.210200	0.3990	0.3897
F12orificio2destapadosonidomedio	581.506590	1164.513200	1746.019800	0.2949	0.2856
F12orificio2destapadosuave	577.006540	1154.763100	1733.269700	0.2972	0.2879
F12tapandoorificiosonidomedio	363.254120	726.508240	1089.762400	0.4721	0.4628
F12tapandoorificiosuave	347.803150	696.606320	1042.409500	0.4931	0.4837

Tabla A.30. Datos obtenidos a partir de los datos anatómicos

GRABACIÓN 2	Longitud	Longitud efectiva	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico
<i>Nombre del archivo</i>	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$f_{0\pm}4.5X10^3$ [Hz]	$f_{1\pm}4.5X10^4$ [Hz]	$f_{2\pm}4.5X10^5$ [Hz]
F12destapandoorificioF1sonidomedio	0.2405	0.2499	343.19454	1029.58362	1715.97270

Tabla A.31. Datos y cálculos obtenidos a partir de las señales de audio

GRABACIÓN 3	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico	Longitud efectiva	Longitud
<i>Nombre del archivo</i>	$f_{0\pm}4.5X10^3$ [Hz]	$f_{1\pm}4.5X10^4$ [Hz]	$f_{2\pm}4.5X10^5$ [Hz]	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]	$l \pm 5 \times 10^{-4}$ [m]
F23destapando1erodeF2sonidomedio	535.002700	1083.227700	1615.785900	0.3206	0.3113

F23destapando1erodeF2suave	514.289050	1028.435200	1534.295700	0.3335	0.3242
F23obturando2.3deF3sonidomedio	628.671420	1255.842800	1885.347600	0.2728	0.2635
F23obturando2.3deF3suave	570.006460	1185.263400	1784.270200	0.3009	0.2916
F23obturando3orificiosdelaF3sonidomedio	596.805410	1105.810000	1795.616300	0.2874	0.2781
F23obturando3orificiosdelaF3suave	569.605170	1054.809600	1707.815500	0.3011	0.2918
F23orificiosdestapadossonidomedio	762.172430	1193.842400	1791.180200	0.2250	0.2158
F23orificiosdestapadossuave	565.717950	713.147480	1133.721600	0.3032	0.2939
F23orificiosdestapadossuave	437.004950	1015.511500	1315.764900	0.3924	0.3832
F23orificiosdestapadossonidomedio	465.755280	1056.512000	1397.015800	0.3682	0.3590

Tabla A.32. Datos obtenidos a partir de los datos anatómicos

GRABACIÓN 3	Longitud	Longitud efectiva	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico
Nombre del archivo	$l \pm 5 \times 10^{-4} [m]$	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4} [m]$	$f_{0 \pm 4.5X10^3} [Hz]$	$f_{1 \pm 4.5X10^3} [Hz]$	$f_{2 \pm 4.5X10^3} [Hz]$
F23destapando1erodeF2sonidomedio	0.2140	0.2233	384.09475	1152.28424	1920.47373

Tabla A.33. Datos y cálculos obtenidos a partir de las señales de audio

GRABACIÓN 4	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico	Longitud efectiva	Longitud
Nombre del archivo	$f_{0 \pm 4.5X10^3} [Hz]$	$f_{1 \pm 4.5X10^3} [Hz]$	$f_{2 \pm 4.5X10^3} [Hz]$	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4} [m]$	$l \pm 5 \times 10^{-4} [m]$
F13destapadassonidomedio	759.806890	1339.812200	2282.420700	0.2257	0.2164
F13destapadassuave	433.836610	727.838830	1460.011000	0.3953	0.3860
F13destapando1de3sonidomedio	626.671400	1253.176100	1880.847500	0.2737	0.2644
F13destapando1de3suave	591.205360	1184.410700	1774.216100	0.2901	0.2808
F13destapando1y2de3sonidomedio	700.338630	897.506780	1401.677300	0.2449	0.2356
F13destapando1y2de3suave	430.754880	862.759780	1328.015100	0.3981	0.3888
F13destapandoF1sonidomedio	445.604040	891.808090	1102.410000	0.3849	0.3756
F13destapandoF1suave	431.504890	1052.261900	1536.267400	0.3974	0.3881
F13orificiosdestapadossonidomedio	538.574920	1078.007000	1615.439000	0.3184	0.3091
F13orificiosdestapadossuave	525.004760	1048.609500	1573.614300	0.3267	0.3173

Tabla A.34. Datos obtenidos a partir de los datos anatómicos

GRABACIÓN 4	Longitud	Longitud efectiva	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico
Nombre del archivo	$l \pm 5 \times 10^{-4} [m]$	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4} [m]$	$f_{0 \pm 4.5X10^3} [Hz]$	$f_{1 \pm 4.5X10^3} [Hz]$	$f_{2 \pm 4.5X10^3} [Hz]$
F13destapadassonidomedio	0.2405	0.2498	343.25281	1029.75844	1716.26407

Tabla A.35. Datos y cálculos obtenidos a partir de las señales de audio

GRABACIÓN 5	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico	Longitud efectiva	Longitud
Nombre del archivo	$f_{0 \pm 4.5X10^3} [Hz]$	$f_{1 \pm 4.5X10^3} [Hz]$	$f_{2 \pm 4.5X10^3} [Hz]$	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4} [m]$	$l \pm 5 \times 10^{-4} [m]$
3destapadasF1F2sonidomedio	442.755020	1095.262400	1554.267600	0.3873	0.3780
3destapadasF1F2suave	430.503250	608.004600	1130.341900	0.3984	0.3891
3destapadassonidomedio	786.672610	1159.342100	1854.680700	0.2180	0.2087
3destapadassuave	765.806950	1182.410700	1772.816100	0.2239	0.2146
3Fsonidomedio	535.204850	1079.609800	1608.214600	0.3204	0.3111
3Fsuave	448.204070	680.406170	1036.009400	0.3826	0.3733
3obturando2y3F3sonidomedio	443.404020	658.605970	1178.010700	0.3868	0.3775
3obturando2y3F3suave	575.605220	1151.810400	1828.216600	0.2979	0.2886
3obturando3deF3suave	554.341710	1311.686500	1967.363100	0.3094	0.3001
3obturandoF3orificio2deF2sonidomedio	443.755030	1110.762600	1559.267700	0.3865	0.3772
3obturandoF3orificio2deF2suave	509.005770	1021.011600	1542.517500	0.3369	0.3276
3orificio1F1destapadossonidomedio	438.803980	1078.009800	1316.011900	0.3908	0.3815
3orificio1F1destapadossuave	425.004820	1038.261800	1518.517200	0.4035	0.3942

Tabla A.36. Datos obtenidos a partir de los datos anatómicos

GRABACIÓN 5	Longitud	Longitud efectiva	Fundamental	Primer armónico	Segundo armónico
Nombre del archivo	$l \pm 5 \times 10^{-4} [m]$	$l_{ef} \pm 5 \times 10^{-4} [m]$	$f_{0 \pm 4.5X10^3} [Hz]$	$f_{1 \pm 4.5X10^3} [Hz]$	$f_{2 \pm 4.5X10^3} [Hz]$
3destapadasF1F2sonidomedio	0.2316	0.2409	355.94383	1067.83150	1779.71916

TABLAS DE RELACIÓN CON TONOS OCCIDENTALES

SONIDOS SUAVES Y MEDIOS

FRECUENCIAS FUNDAMENTALES

Tabla A.37

Nombre del archivo	Frecuencia $f_0 \pm 4.5 \times 10^{-5}$ [Hz]	Intensidad $I_0 \pm 4.5 \times 10^{-5}$ [dBFS]	Relación	Distancia [Hz]	Tono Occi. [Hz]	Tono	Cents
F1destapadasonidomedio	462.33683	-38	La#4 y Si4	27.719	466.164	La#4	-13.81
F1destapadasuave	440.00285	-40	La4 y La#4	26.164	440	La4	0.01
F1tapadasonidomedio	368.66945	-43	fa#4 y Sol4	22.001	369.994	Fa#4	-6.02
F1tapadasuave	346.43082	-49	Fa4 y Fa#4	20.766	349.228	Fa4	-13.47
F2obturandoorificio2sonidomedio	545.75619	-47	Do#5 y Re5	32.925	554.365	Do#5	-47.96
F2obturandoorificio2suave	519.75589	-50	Do5 y Do#5	31.114	523.251	Do5	-11.24
F2sintaparmedio	609.28966	-45	Re#5 y Mi5	37.001	622.254	Re#5	-35.04
F2sintaparsuave	588.50445	-47	Re5 y Re#5	34.924	587.33	Re5	3.36
F2tapandoorificiossonidomedio	487.00442	-53	Si4 y Do5	29.368	493.883	Si4	-23.42
F2tapandoorificiossuave	466.75529	-54	La#4 y Si4	27.719	466.164	La#4	2.13
F3destapadasonidomedio	798.33937	-34	Fa#5 y Sol 5	44.002	739.989	Fa#5	18.98
F3destapadasuave	773.20701	-38	Sol 5 y Sol#5	46.618	783.991	Sol5	-23.13
F3obturando4y5sonidomedio	635.51441	-40	Re#5 y Mi5	37.001	622.254	Re#5	35.83
F3obturando4y5suave	600.67575	-54	Re5 y Re#5	34.924	587.33	Re5	38.21
F3obturandoorificio4sonidomedio	721.67758	-35	Fa#5 y Sol 5	44.002	739.989	Fa#5	-41.62
F3obturandoorificio4suave	685.01036	-40	Do#5 y Re5	32.925	554.365	Do#5	34.14
F3tapandolos3orificiossonidomedio	565.60513	-49	Do#5 y Re5	32.925	554.365	Do#5	34.14
F3tapandolos3orificiossuave	558.02531	-40	Do#5 y Re5	32.925	554.365	Do#5	11.12
F12destapandoorificioF1sonidomedio	441.83667	-47	La4 y La#4	26.164	440	La4	7.02
F12destapandoorificioF1suave	434.33662	-53	La4 y La#4	26.164	440	La4	-21.65
F12obturando2doorificiodeF2sonidomedio	442.20401	-52	La4 y La#4	26.164	440	La4	8.42
F12obturando2doorificiodeF2suave	429.80390	-55	La4 y La#4	26.164	440	La4	-38.97
F12orificiosdestapadasonidomedio	581.50659	-45	Re5 y Re#5	34.924	587.33	Re5	-16.68
F12orificiosdestapadosuave	577.00654	-51	Re5 y Re#5	34.924	587.33	Re5	-29.56
F12tapandoorificiossonidomedio	363.25412	-57	fa#4 y Sol4	22.001	369.994	fa#4	-30.63
F12tapandoorificiossuave	347.80315	-58	Fa4 y Fa#4	20.766	349.228	Fa4	-6.86
F23destapando1erodeF2sonidomedio	535.00270	-56	Do5 y Do#5	31.114	523.251	Do5	37.77
F23destapando1erodeF2suave	514.28905	-56	Do5 y Do#5	31.114	523.251	Do5	-28.8
F23obturando4.5deF3sonidomedio	628.67142	-43	Re#5 y Mi5	37.001	622.254	Re#5	17.34
F23obturando4.5deF3suave	570.00646	-47	Do#5 y Re5	32.925	554.365	Do#5	47.51
F23obturando3orificiosdelaf3sonidomedio	596.80541	-47	Re5 y Re#5	34.924	587.33	Re5	27.13
F23obturando3orificiosdelaf3suave	569.60517	-50	Do#5 y Re5	32.925	554.365	Do#5	46.29
F23orificiosdestapadasonidomedio	762.17243	-41	Sol 5 y Sol#5	46.618	783.991	Sol5	-46.8
F23orificiosdestapadosuave	565.71795	-52	Do#5 y Re5	32.925	554.365	Do#5	34.48
F23orificiostapadosuave	437.00495	-55	La4 y La#4	26.164	440	La4	-11.45
F23orificiostapadasonidomedio	465.75528	-55	La#4 y Si4	27.719	466.164	La#4	-1.48
F13destapadasonidomedio	759.80689	-47	Fa#5 y Sol 5	44.002	739.989	Fa#5	45.04
F13destapadasuave	433.83661	-54	La4 y La#4	26.164	440	La4	-23.56
F13destapando6de3sonidomedio	626.67140	-52	Re#5 y Mi5	37.001	622.254	Re#5	11.94
F13destapando6de3suave	591.20536	-58	Re5 y Re#5	34.924	587.33	Re5	11.1
F13destapando5y6de3sonidomedio	700.33863	-47	Fa5 y Fa#5	41.532	698.457	Fa5	4.53
F13destapando5y6de3suave	430.75488	-54	La4 y La#4	26.164	440	La4	-35.34
F13destapandoF1sonidomedio	445.60404	-51	La4 y La#4	26.164	440	La4	21.42
F13destapandoF1suave	431.50489	-56	La4 y La#4	26.164	440	La4	-32.47
F13orificiostapadasonidomedio	538.57492	-52	Do#5 y Re5	32.925	554.365	Do#5	-47.96
F13orificiostapadosuave	525.00476	-60	Do5 y Do#5	31.114	523.251	Do5	5.63
3destapadasF1F2sonidomedio	442.75502	-53	La4 y La#4	26.164	440	La4	10.53
3destapadasF1F2suave	430.50325	-59	La4 y La#4	26.164	440	La4	-36.3
3destapadasonidomedio	786.67261	-47	Sol 5 y Sol#5	46.618	783.991	Sol5	5.75
3destapadasuave	765.80695	-47	Sol 5 y Sol#5	46.618	783.991	Sol5	-39.01
3Fsonidomedio	535.20485	-56	Do5 y Do#5	31.114	523.251	Do5	38.42
3Fsuave	448.20407	-57	La4 y La#4	26.164	440	La4	31.36
3obturando4y5F3sonidomedio	443.40402	-49	La4 y La#4	26.164	440	La4	13.01
3obturando4y5F3suave	575.60522	-53	Re5 y Re#5	34.924	587.33	Re5	-33.57
3obturando4deF3suave	554.34171	-57	Do#5 y Re5	32.925	554.365	Do#5	-0.07
3obturandoF3orificio2deF2suave	509.00577	-61	Do5 y Do#5	31.114	523.251	Do5	-45.79
3orificio1F1destapadasonidomedio	438.80398	-50	La4 y La#4	26.164	440	La4	-4.57
3orificio1F1destapadasuave	425.00482	-56	Sol#4 y La4	24.695	415.305	Sol#4	39.82

PRIMER ARMÓNICO

F3obturandoorificio4suave	2052.69770	-79	Do7 y Do#7	124.456	2093.005	Do7	-32.39
F3tapandolos3orificiossonidomedio	1705.01550	-73	Sol#6 y La6	98.781	1661.219	Sol #6	44.34
F3tapandolos3orificiossuave	2676.12140	-96	Mi7 y Fa7	156.805	2637.021	Mi7	24.94
F12destapandoorificioF1sonidomedio	1325.67670	-78	Mi6 y Fa6	83.403	1313.51	Mi6	14.59
F12destapandoorificioF1suave	1415.01070	-84	Fa6 y Fa#6	83.065	1396.913	Fa6	21.79
F12obturando2doorificiodeF2sonidomedio	1327.41200	-84	Mi6 y Fa6	83.403	1313.51	Mi6	16.67
F12obturando2doorificiodeF2suave	1124.21020	-83	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	23.48
F12orificiosdestapadossonidomedio	1746.01980	-75	La6 y La#6	104.655	1760	La 6	-13.36
F12orificiosdestapadossuave	1733.26970	-81	La6 y La#6	104.655	1760	La 6	-25.54
F12tapandoorificiossonidomedio	1089.76240	-78	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	-28.77
F12tapandoorificiossuave	1042.40950	-84	Do 6 y Do#6	62.229	1046.502	Do 6	-6.58
F23destapando1erodeF2sonidomedio	1615.78590	-86	Sol#6 y La6	98.781	1661.219	Sol #6	-45.99
F23destapando1erodeF2suave	1534.29570	-85	Sol 6 y Sol #6	93.237	1567.982	Sol 6	-36.13
F23obturando4.5deF3sonidomedio	1885.34760	-66	La#6 y Si6	110.878	1864.655	La#6	18.66
F23obturando4.5deF3suave	1784.27020	-78	La6 y La#6	104.655	1760	La6	23.19
F23obturando3orificiosdelaF3sonidomedio	1795.61630	-67	La6 y La#6	104.655	1760	La6	34.03
F23obturando3orificiosdelaF3suave	1707.81550	-82	Sol#6 y La6	98.781	1661.219		47.17
F23orificiosdestapadossonidomedio	1791.18020	-67	La6 y La#6	104.655	1760	La6	29.79
F23orificiosdestapadossuave	1133.72160	-76	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	37.91
F23orificiostapadossuave	1315.76490	-91	Mi6 y Fa6	83.403	1313.51	Mi6	2.7
F23orificiostapadossonidomedio	1397.01580	-80	Fa6 y Fa#6	83.065	1396.913	Fa6	0.12
F13destapadossonidomedio	2282.42070	-81	Do#7 y Re7	131.857	2217.461	Do#7	49.27
F13destapadossuave	1460.01100	-86	Fa#6 y Sol6	88.004	1479.978	Fa#6	-22.69
F13destapando6de3sonidomedio	1880.84750	-72	La#6 y Si6	110.878	1864.655	La#6	14.6
F13destapando6de3suave	1774.21610	-80	La6 y La#6	104.655	1760	La 6	13.58
F13destapando5y6de3sonidomedio	1401.67730	-77	Fa6 y Fa#6	83.065	1396.913	Fa6	5.74
F13destapando5y6de3suave	1328.01510	-72	Mi6 y Fa6	83.403	1313.51	Mi6	17.39
F13destapandoF1sonidomedio	1102.41000	-62	Re6 y Re#6	69.849	1174.659	Re6	39.73
F13destapandoF1suave	1536.26740	-92	Sol 6 y Sol #6	93.237	1567.982	Sol 6	-34.02
F13orificiostapadossonidomedio	1615.43900	-89	Sol#6 y La6	98.781	1661.219	Sol #6	-46.34
F13orificiostapadossuave	1573.61430	-91	Sol 6 y Sol #6	93.237	1567.982	Sol 6	6.04
3destapadasF1F2sonidomedio	1554.26760	-93	Sol 6 y Sol #6	93.237	1567.982	Sol 6	-14.71
3destapadasF1F2suave	1130.34190	-85	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	32.78
3destapadossonidomedio	1854.68070	-70	La#6 y Si6	110.878	1864.655	La#6	-9
3destapadossuave	1772.81610	-76	La6 y La#6	104.655	1760	La 6	12.25
3Fsonidomedio	1608.21460	-88	Sol 6 y Sol #6	93.237	1567.982	Sol 6	43.15
3Fsuave	1036.00940	-81	Do 6 y Do#6	62.229	1046.502	Do 6	-16.86
3obturando4y5F3sonidomedio	1178.01070	-74	Re6 y Re#6	69.849	1174.659	Re6	4.8
3obturando4y5F3suave	1828.21660	-74	La#6 y Si6	110.878	1864.655	La#6	-32.86
3obturando4deF3suave	1967.36310	-89	Si6 y Do7	117.472	1975.533	Si6	-6.95
3obturandoF3orificio2deF2suave	1542.51750	-95	Sol 6 y Sol #6	93.237	1567.982	Sol 6	-27.31
3orificio1F1destapadossonidomedio	1316.01190	-82	Mi6 y Fa6	83.403	1313.51	Mi6	3
3orificio1F1destapadossuave	1518.51720	-95	Fa#6 y Sol6	88.004	1479.978	Fa #6	43.79

SONIDOS MEDIOS

Tabla A.40.

Nombre del archivo	Frecuencia $f_0+4.5X10^3$ [Hz]	Intensidad $I_0+4.5X10^{-2}$ [dBFS]	Relación	Distancia [Hz]	Tono Occid. [Hz]	Tono	Cents
F1destapadosonidomedio	462.33683	-38	La#4 y Si4	27.719	466.164	La#4	-13.81
F1tapadosonidomedio	368.66945	-43	fa#4 y Sol4	22.001	369.994	Fa#4	-6.02
F2obturandoorificio2sonidomedio	545.75619	-47	Do#5 y Re5	32.925	554.365	Do#5	-47.96
F2sintaparmedio	609.28966	-45	Re#5 y Mi5	37.001	622.254	Re#5	-35.04
F2tapandoorificiossonidomedio	487.00442	-53	Si4 y Do5	29.368	493.883	Si4	-23.42
F3destapadosonidomedio	798.33937	-34	Fa#5 y Sol 5	44.002	739.989	Fa#5	18.98
F3obturando4y5sonidomedio	635.51441	-40	Re#5 y Mi5	37.001	622.254	Re#5	35.83
F3obturandoorificio4sonidomedio	721.67758	-35	Fa#5 y Sol 5	44.002	739.989	Fa#5	-41.62
F3tapandolos3orificiossonidomedio	565.60513	-49	Do#5 y Re5	32.925	554.365	Do#5	34.14
F12destapandoorificioF1sonidomedio	441.83667	-47	La4 y La#4	26.164	440	La4	7.02
F12obturando2doorificiodeF2sonidomedio	442.20401	-52	La4 y La#4	26.164	440	La4	8.42
F12orificiosdestapadossonidomedio	581.50659	-45	Re5 y Re#5	34.924	587.33	Re5	-16.68
F12tapandoorificiossonidomedio	363.25412	-57	fa#4 y Sol4	22.001	369.994	fa#4	-30.63
F23destapando1erodeF2sonidomedio	535.00270	-56	Do5 y Do#5	31.114	523.251	Do5	37.77
F23obturando4.5deF3sonidomedio	628.67142	-43	Re#5 y Mi5	37.001	622.254	Re#5	17.34
F23obturando3orificiosdelaF3sonidomedio	596.80541	-47	Re5 y Re#5	34.924	587.33	Re5	27.13
F23orificiosdestapadossonidomedio	762.17243	-41	Sol 5 y Sol#5	46.618	783.991	Sol5	-46.8
F23orificiostapadossonidomedio	465.75528	-55	La#4 y Si4	27.719	466.164	La#4	-1.48
F13destapadossonidomedio	759.80689	-47	Fa#5 y Sol 5	44.002	739.989	Fa#5	45.04
F13destapando6de3sonidomedio	626.67140	-52	Re#5 y Mi5	37.001	622.254	Re#5	11.94
F13destapando5y6de3sonidomedio	700.33863	-47	Fa5 y Fa#5	41.532	698.457	Fa5	4.53
F13destapandoF1sonidomedio	445.60404	-51	La4 y La#4	26.164	440	La4	21.42
F13orificiostapadossonidomedio	538.57492	-52	Do#5 y Re5	32.925	554.365	Do#5	-47.96
3destapadasF1F2sonidomedio	442.75502	-53	La4 y La#4	26.164	440	La4	10.53
3destapadossonidomedio	786.67261	-47	Sol 5 y Sol#5	46.618	783.991	Sol5	5.75
3Fsonidomedio	535.20485	-56	Do5 y Do#5	31.114	523.251	Do5	38.42
3obturando4y5F3sonidomedio	443.40402	-49	La4 y La#4	26.164	440	La4	13.01
3orificio1F1destapadossonidomedio	438.80398	-50	La4 y La#4	26.164	440	La4	-4.57

PRIMER ARMÓNICO

Tabla A.41

Nombre del archivo	Frecuencia $f_0+4.5X10^{-5}$ [Hz]	Intensidad $I_0+4.5X10^{-5}$ (dBFS)	Relación	Distancia [Hz]	Tono Occid. [Hz]	Tono	Cents
F1destapadasonidomedio	924.84032	-58	La#5 y Si 5	55.439	932.328	La#5	-13.51
F1tapadasonidomedio	852.00644	-72	Sol#5 y La5	49.391	830.609	Sol#5	43.32
F2obturandoorificio2sonidomedio	1092.01240	-72	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	-25.36
F2sintaparmedio	1219.15080	-73	Re#6 y Mi6	69.002	1244.508	Re#6	-36.75
F2tapandoorificiossonidomedio	974.40884	-62	Si 5 y Do 6	58.735	987.767	Si5	-22.74
F3destapadasonidomedio	1279.34300	-80	Mi6 y Fa6	83.403	1313.51	Mi6	-40.97
F3obturando4y5sonidomedio	1271.02880	-60	Re#6 y Mi6	69.002	1244.508	Re#6	38.43
F3obturandoorificio4sonidomedio	1442.68850	-70	Fa#6 y Sol6	88.004	1479.978	Fa#6	-42.37
F3tapandolos3orificiossonidomedio	1133.81030	-68	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	38.04
F12destapandoorificioF1sonidomedio	883.84001	-69	La5 y La#5	52.328	880	La5	7.34
F12obturando2doorificioF2sonidomedio	1082.80980	-67	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	-39.32
F12orificiosdestapadossonidomedio	1164.51320	-70	Re6 y Re#6	69.849	1174.659	Re6	-14.53
F12tapandoorificiossonidomedio	726.50824	-80	Fa#5 y Sol 5	44.002	739.989	Fa#5	-30.64
F23destapando1erodeF2sonidomedio	1083.22770	-68	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	-36.68
F23obturando4.5deF3sonidomedio	1255.84280	-67	Re#6 y Mi6	69.002	1244.508	Re#6	16.43
F23obturando3orificiosdelF3sonidomedio	1105.81000	-58	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	-4.43
F23orificiosdestapadossonidomedio	1193.84240	-67	Re6 y Re#6	69.849	1174.659	Re6	27.43
F23orificiosdestapadossonidomedio	1056.51200	-70	Do 6 y Do#6	62.229	1046.502	Do6	16.09
F3destapadasonidomedio	1339.81220	-85	Mi6 y Fa6	83.403	1313.51	Mi6	31.54
F3destapando6de3sonidomedio	1253.17610	-73	Re#6 y Mi6	69.002	1244.508	Re#6	12.56
F3destapando5y6de3sonidomedio	897.50678	-74	La5 y La#5	52.328	880	La5	33.46
F3destapandoF1sonidomedio	891.80809	-70	La5 y La#5	52.328	880	La5	22.57
F3orificiosdestapadossonidomedio	1078.00700	-71	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	-46.6
3destapadasF1F2sonidomedio	1095.26240	-75	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	-20.43
3destapadasonidomedio	1139.34210	-79	Re6 y Re#6	69.849	1174.659	Re6	-21.93
3Fsonidomedio	1079.60980	-70	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	-44.17
3obturando4y5F3sonidomedio	658.60597	-73	Mi5 y Fa5	39.202	659.255	Mi5	-1.66
3orificio1F1destapadasonidomedio	1078.00980	-69	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	-46.6

SEGUNDO ARMÓNICO

Tabla A.42.

Nombre del archivo	Frecuencia $f_0+4.5X10^{-5}$ [Hz]	Intensidad $I_0+4.5X10^{-5}$ (dBFS)	Relación	Distancia [Hz]	Tono Occid. [Hz]	Tono	Cents
F1destapadasonidomedio	1387.01050	-67	Fa6 y Fa#6	83.065	1396.913	Fa6	-11.92
F1tapadasonidomedio	1106.84170	-79	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	-2.87
F2obturandoorificio2sonidomedio	1638.76860	-75	Sol#6 y La6	98.781	1661.219	Sol#6	-22.73
F2sintaparmedio	1828.86900	-60	La#6 y Si6	110.878	1864.655	La#6	-32.28
F2tapandoorificiossonidomedio	1461.41330	-84	Fa#6 y Sol6	88.004	1479.978	Fa#6	-21.1
F3destapadasonidomedio	2396.51810	-65	Re 7 y Re#7	139.698	2349.318	Re 7	33.79
F3obturando4y5sonidomedio	1905.54320	-73	La#6 y Si6	110.878	1864.655	La#6	36.88
F3obturandoorificio4sonidomedio	2163.03270	-71	Do#7 y Re7	131.857	2217.461	Do#7	-41.28
F3tapandolos3orificiossonidomedio	1705.01550	-73	Sol#6 y La6	98.781	1661.219	Sol #6	44.34
F12destapandoorificioF1sonidomedio	1325.67670	-78	Mi6 y Fa6	83.403	1313.51	Mi6	14.59
F12obturando2doorificioF2sonidomedio	1327.41200	-84	Mi6 y Fa6	83.403	1313.51	Mi6	16.67
F12orificiosdestapadossonidomedio	1746.01980	-75	La6 y La#6	104.655	1760	La 6	-13.36
F12tapandoorificiossonidomedio	1089.76240	-78	Do#6 y Re6	65.928	1108.731	Do#6	-28.77
F23destapando1erodeF2sonidomedio	1615.78590	-86	Sol#6 y La6	98.781	1661.219	Sol #6	-45.99
F23obturando4.5deF3sonidomedio	1885.34760	-66	La#6 y Si6	110.878	1864.655	La#6	18.66
F23obturando3orificiosdelF3sonidomedio	1795.61630	-67	La6 y La#6	104.655	1760	La6	34.03
F23orificiosdestapadossonidomedio	1791.18020	-67	La6 y La#6	104.655	1760	La6	29.79
F23orificiosdestapadossonidomedio	1397.01580	-80	Fa6 y Fa#6	83.065	1396.913	Fa6	0.12
F13destapadasonidomedio	2282.42070	-81	Do#7 y Re7	131.857	2217.461	Do#7	49.27
F13destapando6de3sonidomedio	1880.84750	-72	La#6 y Si6	110.878	1864.655	La#6	14.6
F13destapando5y6de3sonidomedio	1401.67730	-77	Fa6 y Fa#6	83.065	1396.913	Fa6	5.74
F13destapandoF1sonidomedio	1102.41000	-62	Re6 y Re#6	69.849	1174.659	Re6	39.73
F13orificiosdestapadossonidomedio	1615.43900	-89	Sol#6 y La6	98.781	1661.219	Sol #6	-46.34
3destapadasF1F2sonidomedio	1554.26760	-93	Sol 6 y Sol #6	93.237	1567.982	Sol 6	-14.71
3destapadasonidomedio	1854.68070	-70	La#6 y Si6	110.878	1864.655	La#6	-9
3Fsonidomedio	1608.21460	-88	Sol 6 y Sol #6	93.237	1567.982	Sol 6	43.15
3obturando4y5F3sonidomedio	1178.01070	-74	Re6 y Re#6	69.849	1174.659	Re6	4.8
3orificio1F1destapadasonidomedio	1316.01190	-82	Mi6 y Fa6	83.403	1313.51	Mi6	3

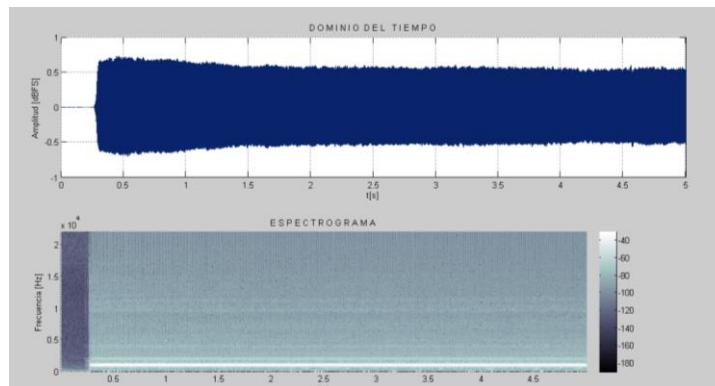
2. GRAFICAS

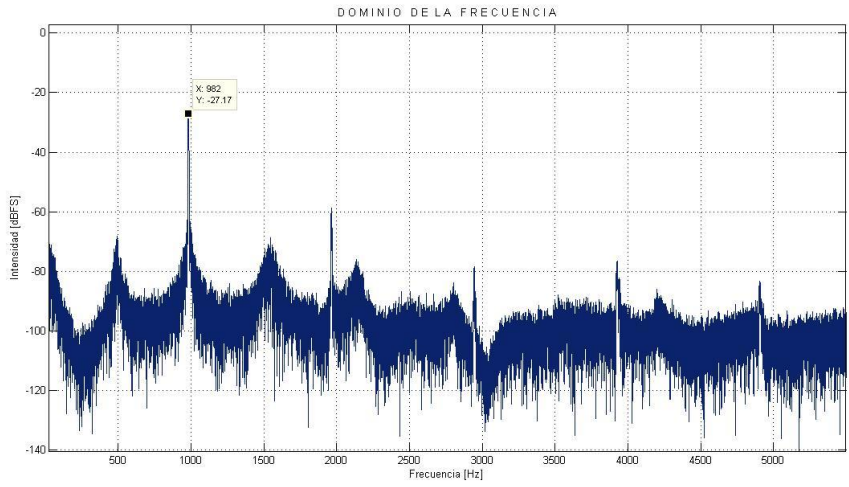
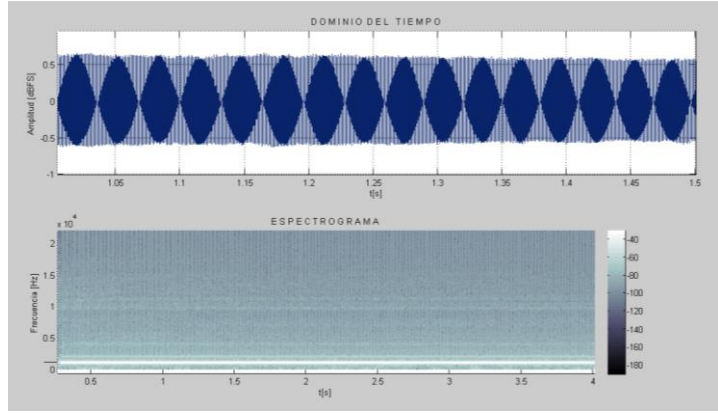
GRABACIÓN 1. Flautas por separado

Flauta 1 destapada

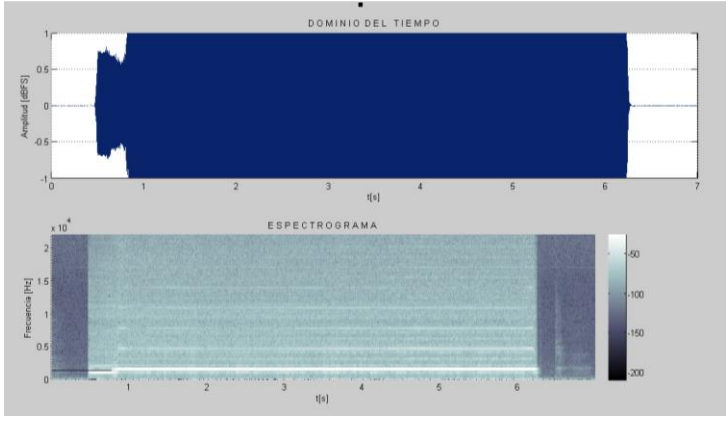


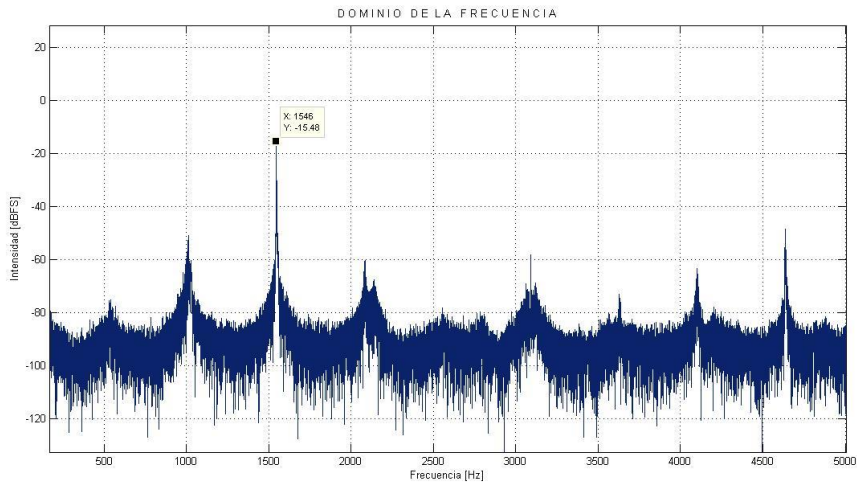
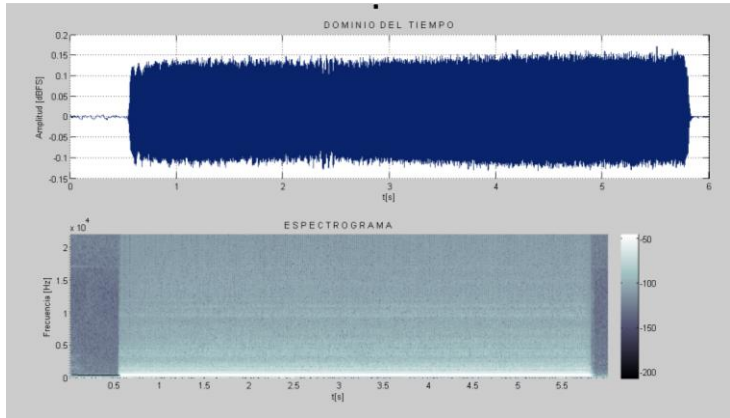
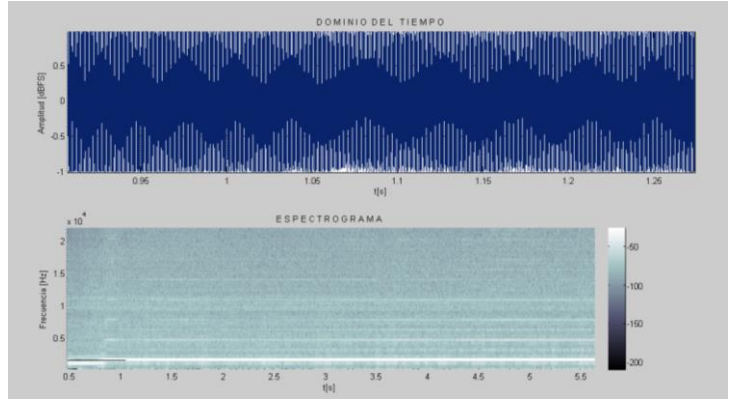
Primer Parcial



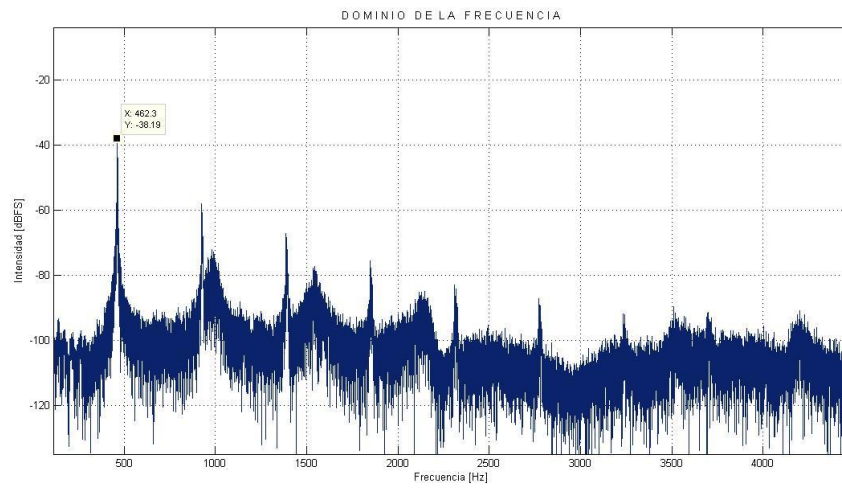
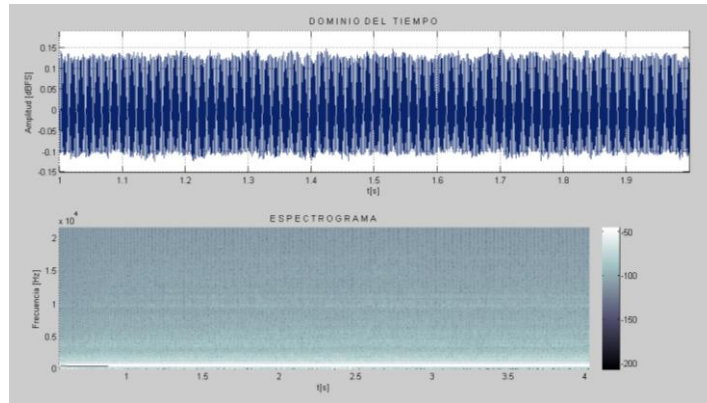


Segundo Parcial

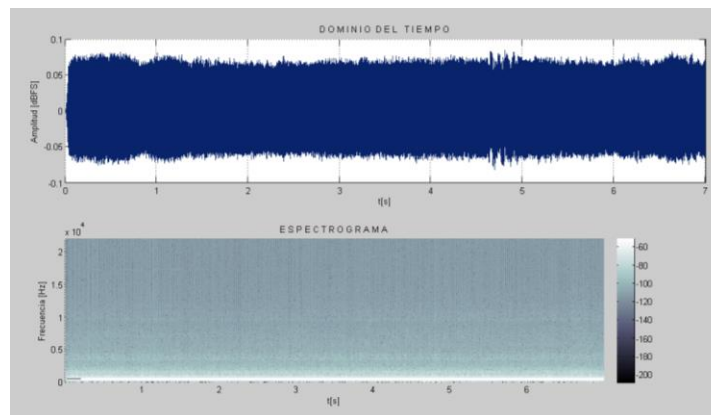


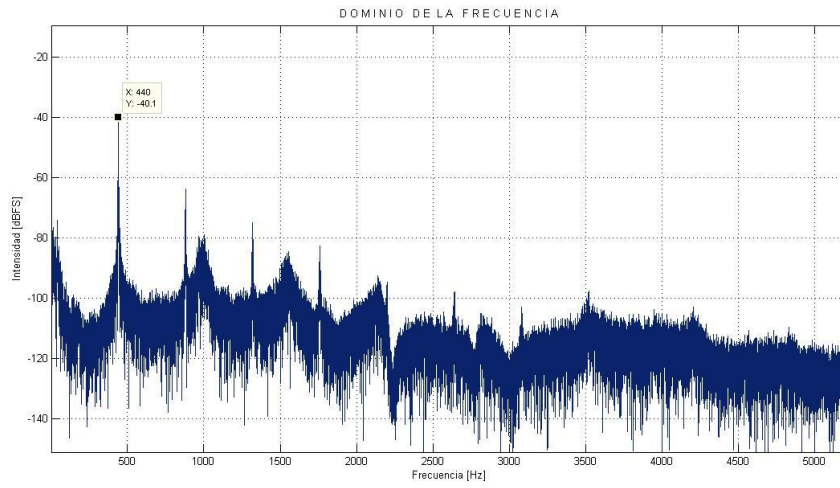
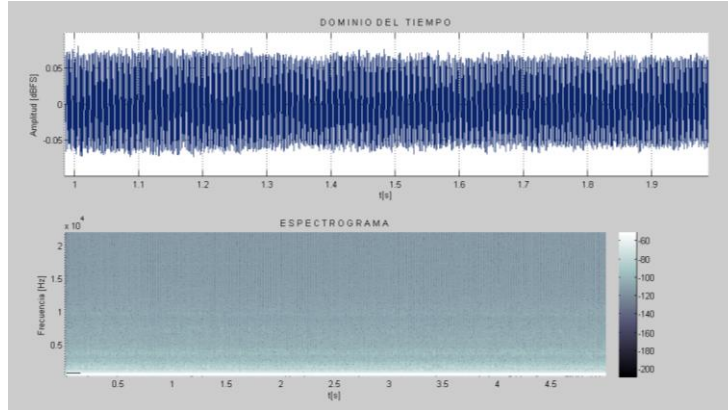


Sonido Medio

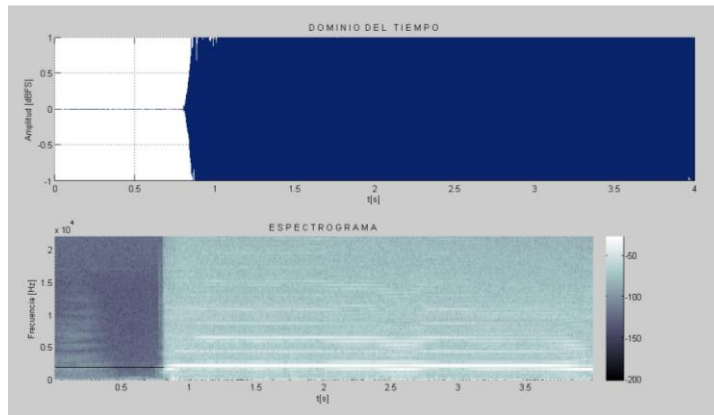


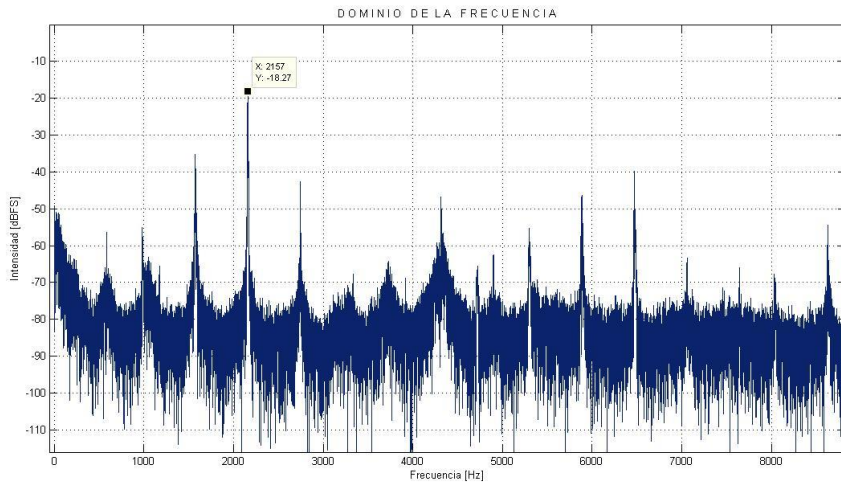
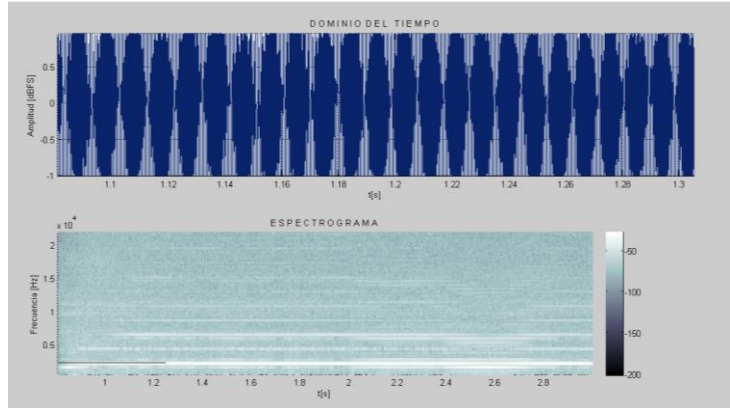
Sonido Suave





Tercer Parcial

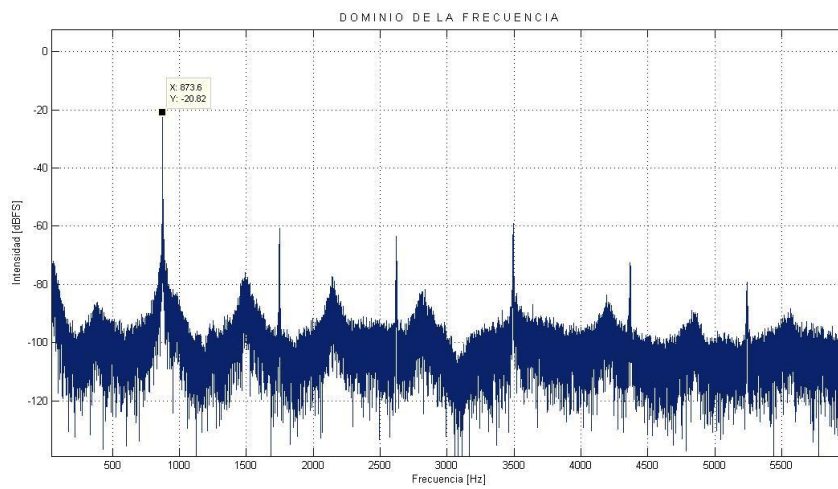
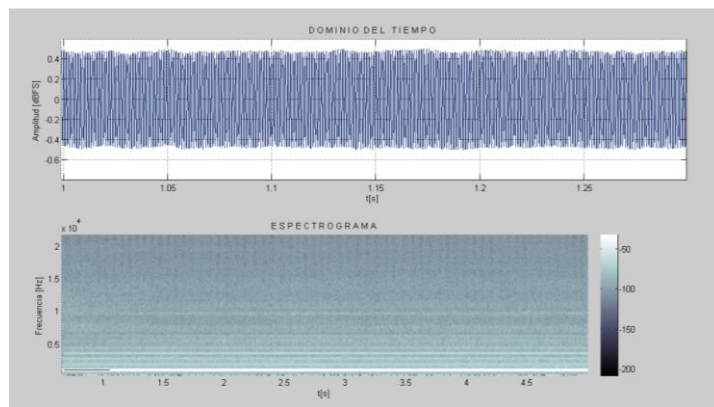
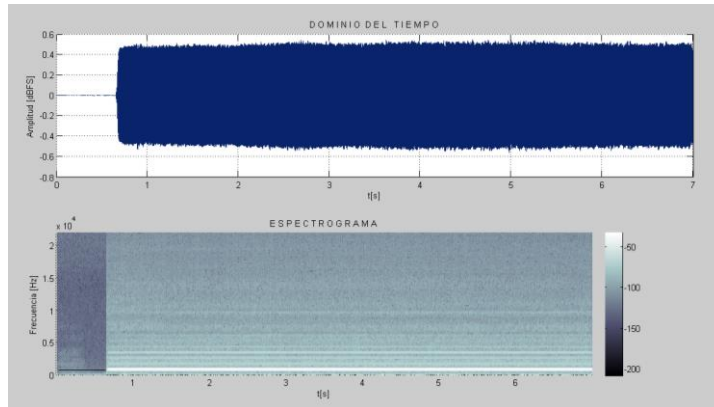




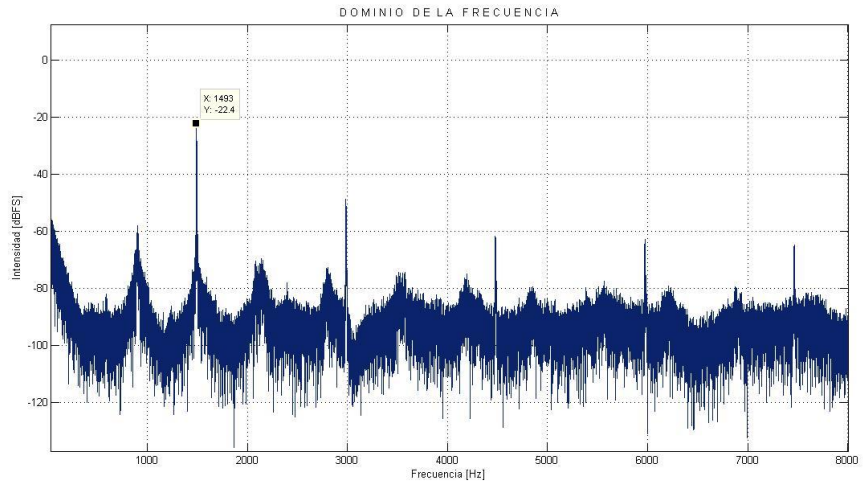
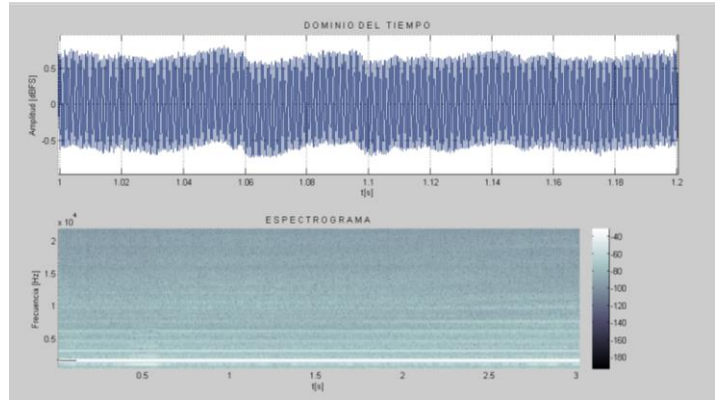
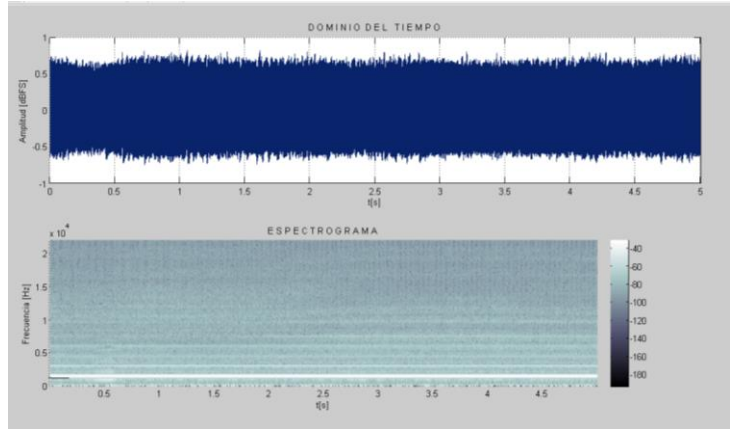
Flauta 1 tapada



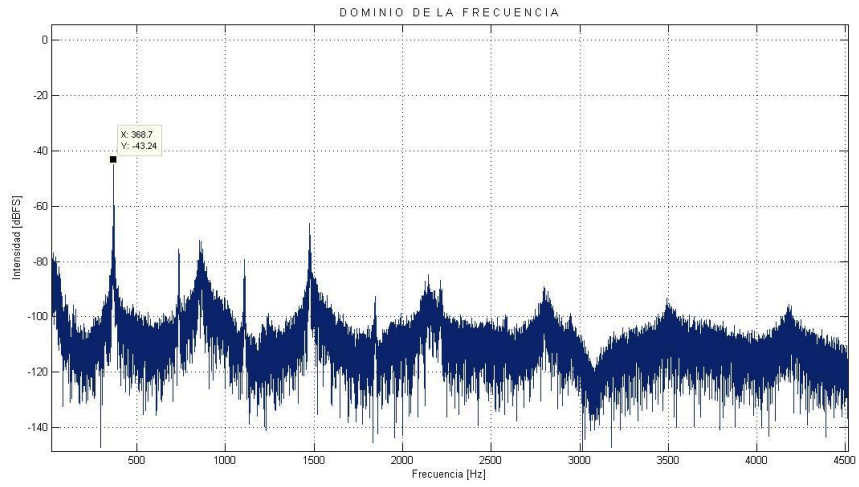
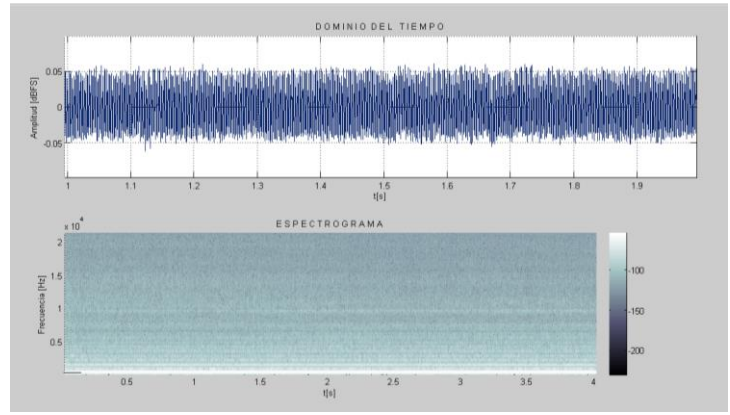
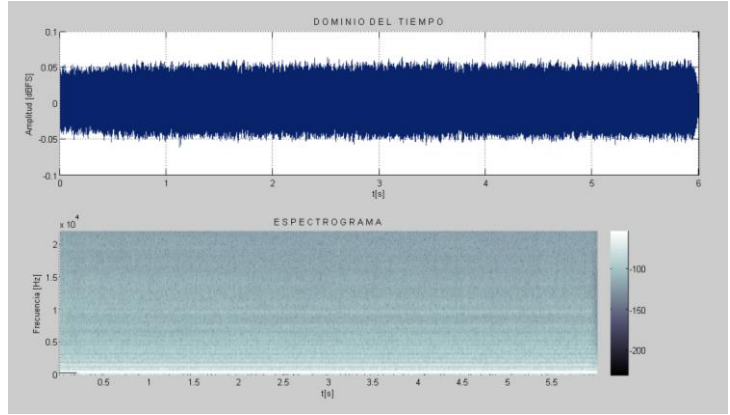
Primer Parcial



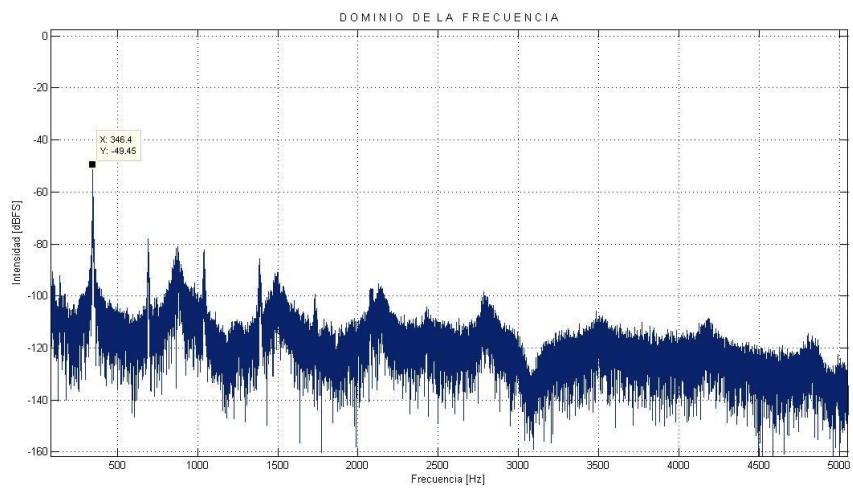
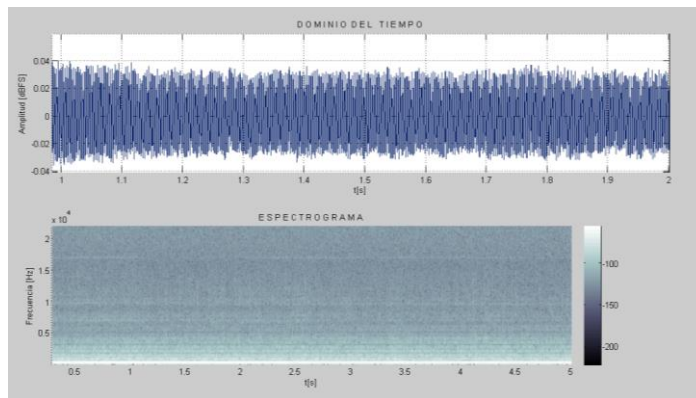
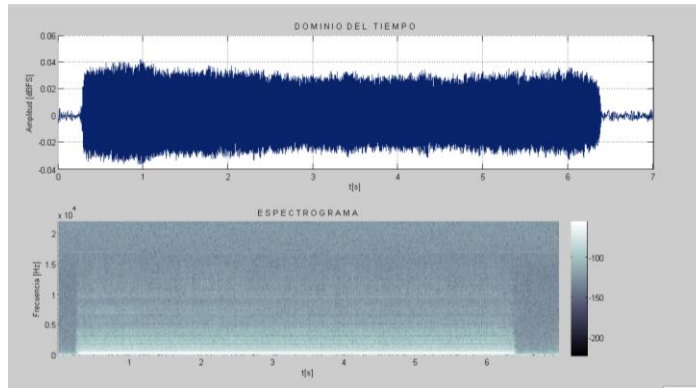
Segundo Parcial



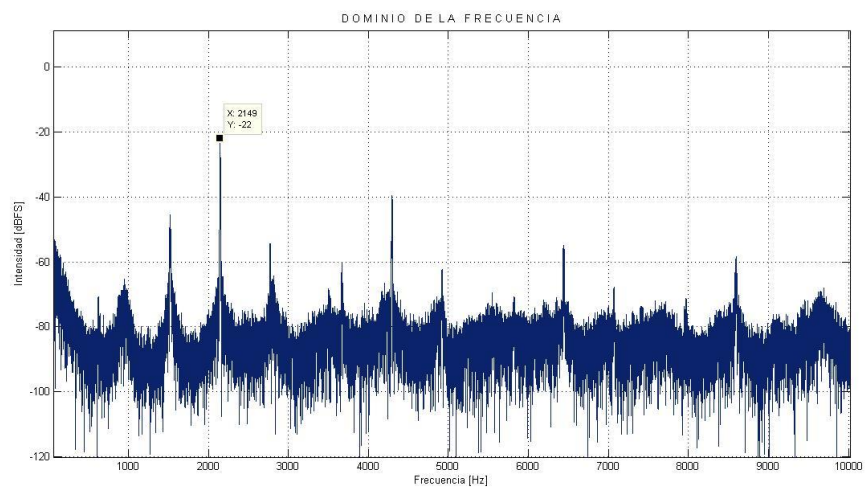
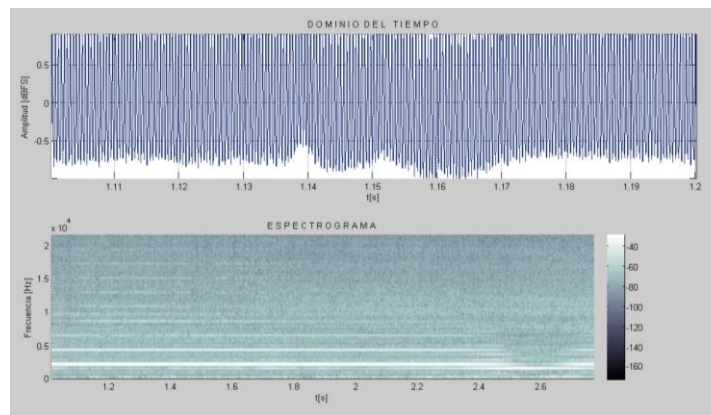
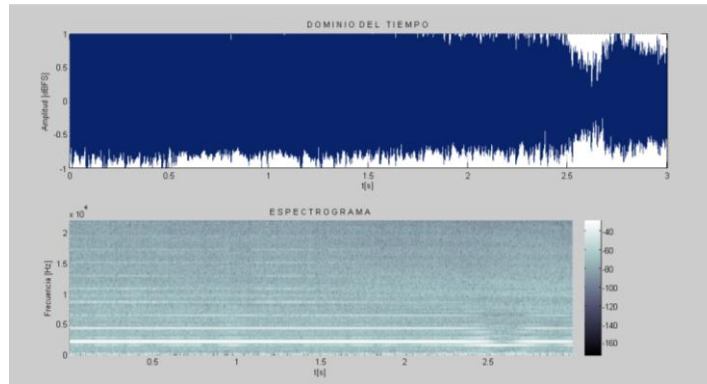
Sonido Medio



Sonido Suave



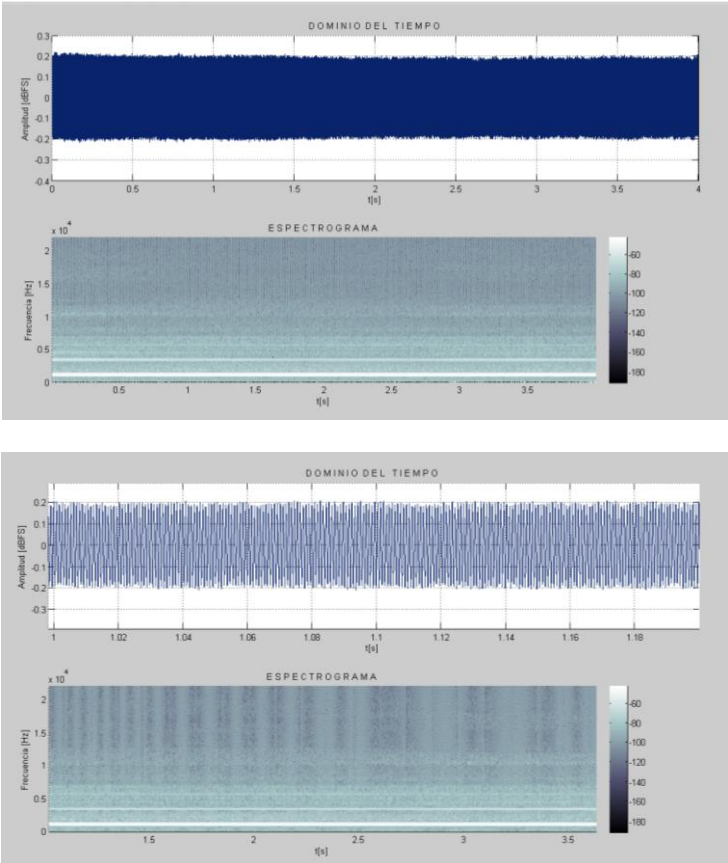
Tercer Parcial

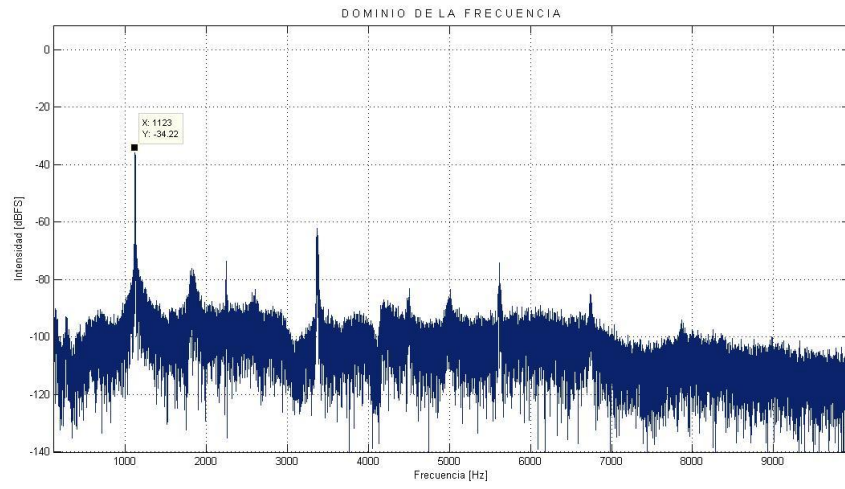


Flauta 2 obturando orificio 2

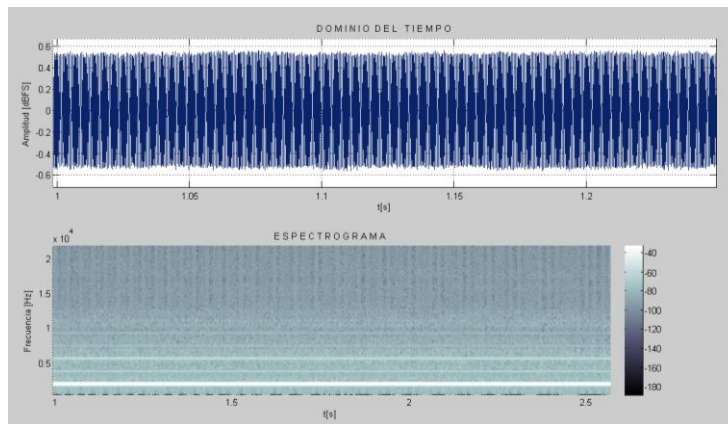
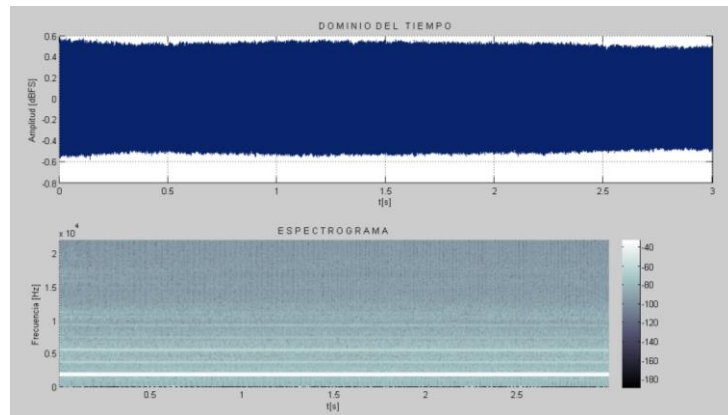


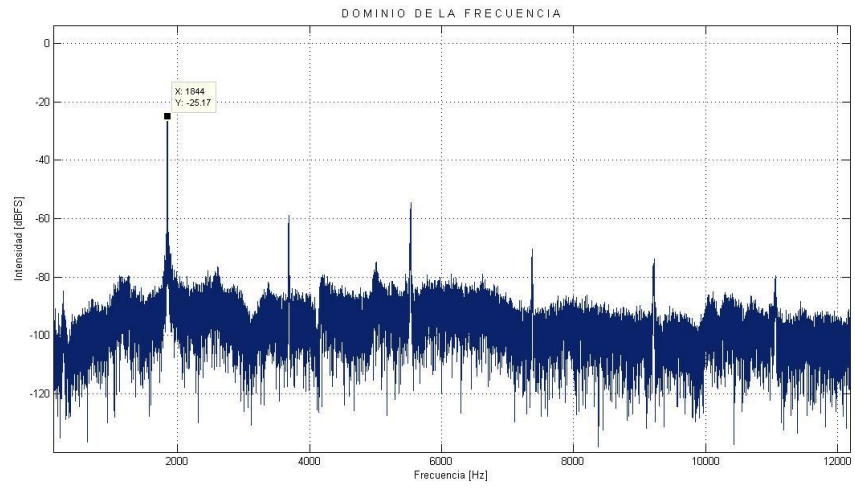
Primer Parcial



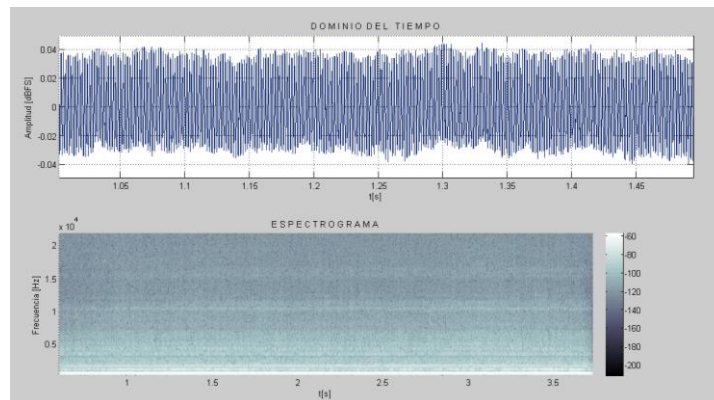
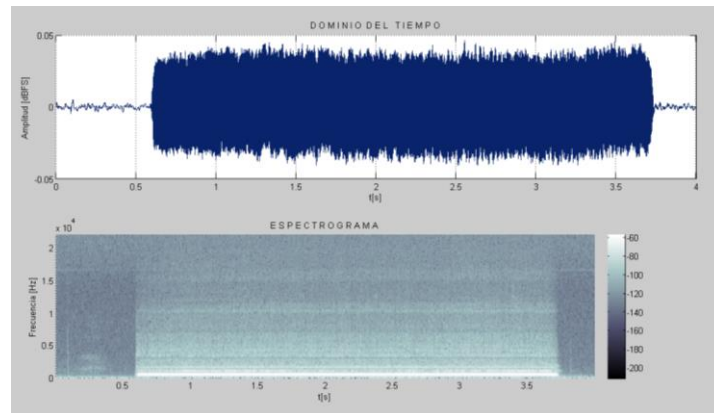


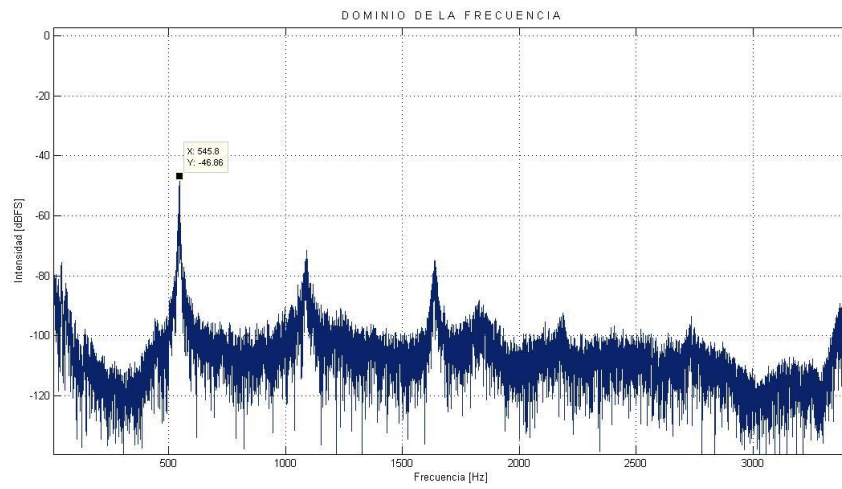
Segundo Parcial



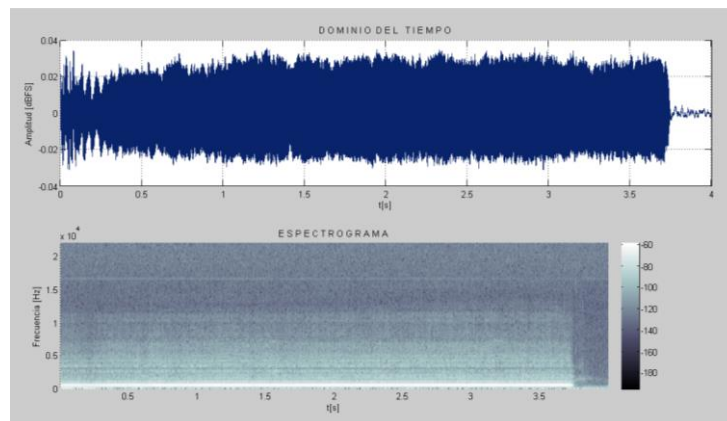


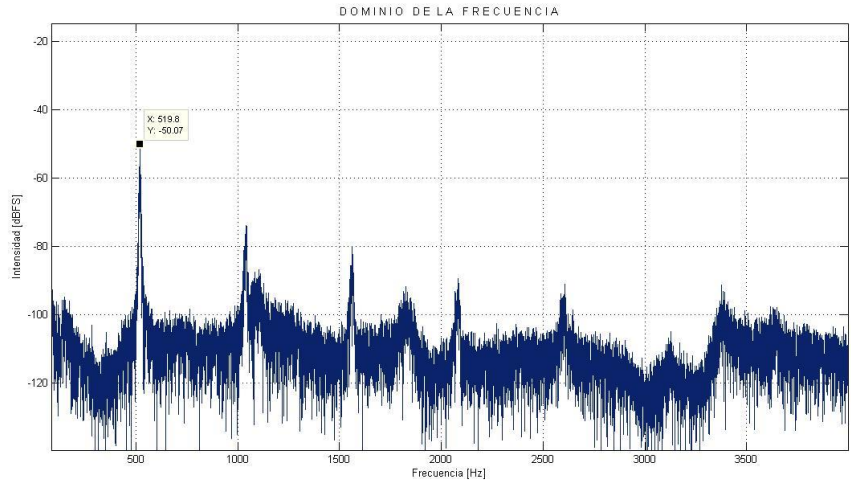
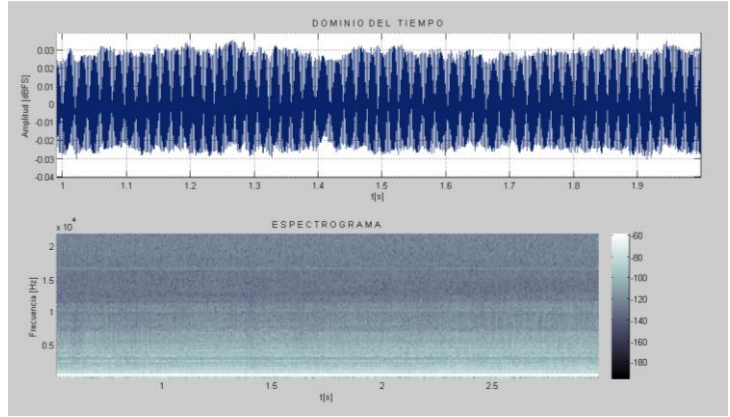
Sonido Medio



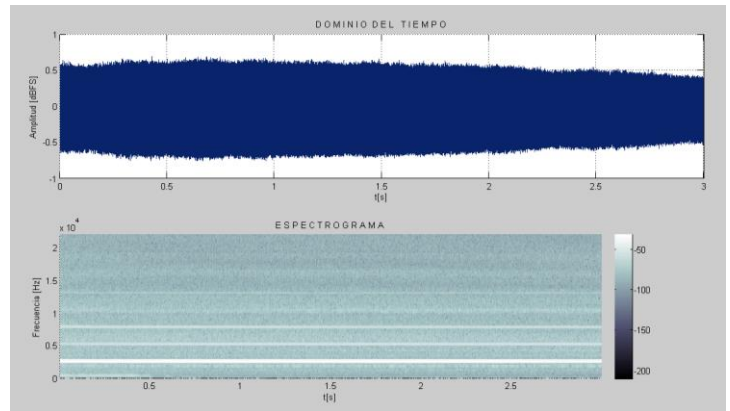


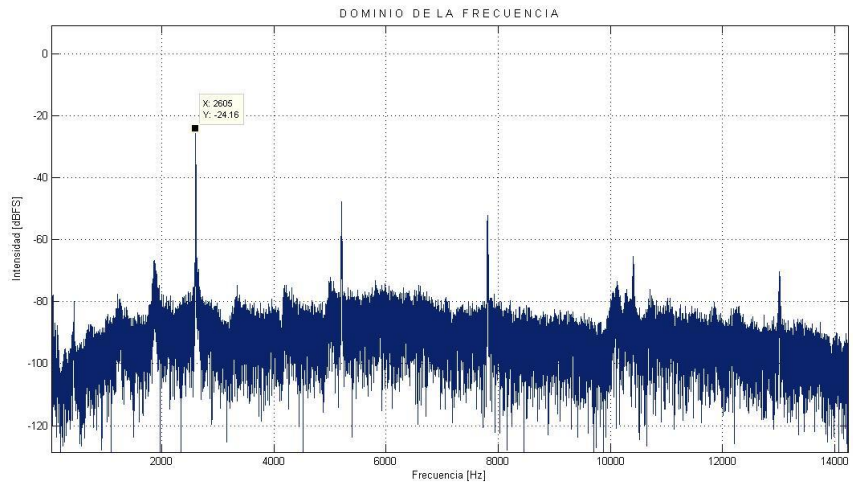
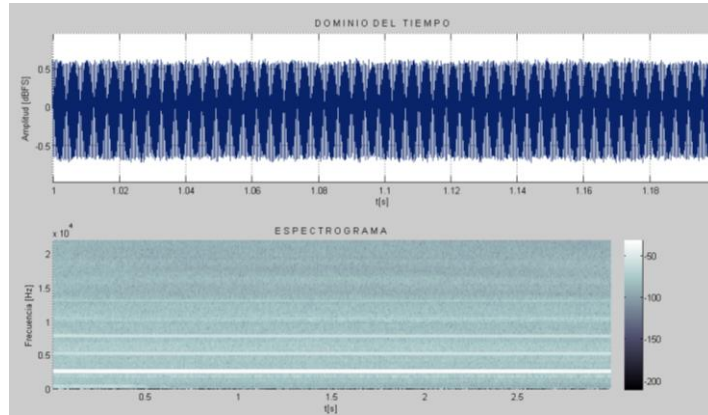
Sonido Suave





Tercer Parcial

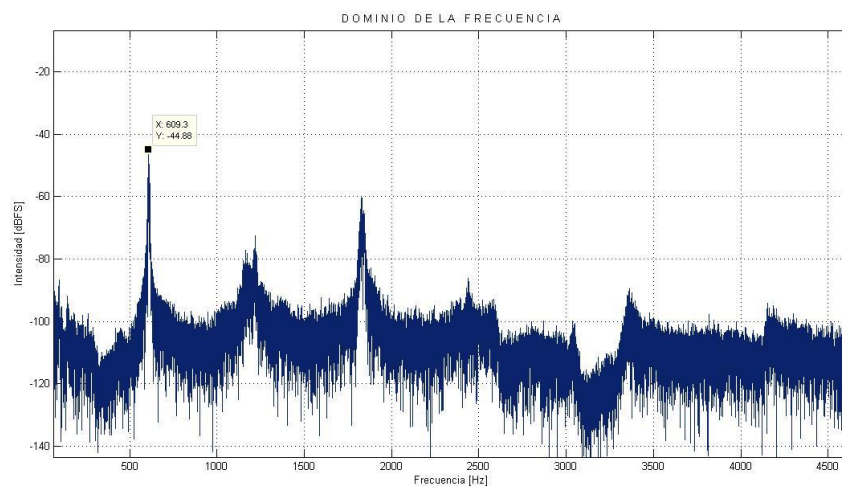
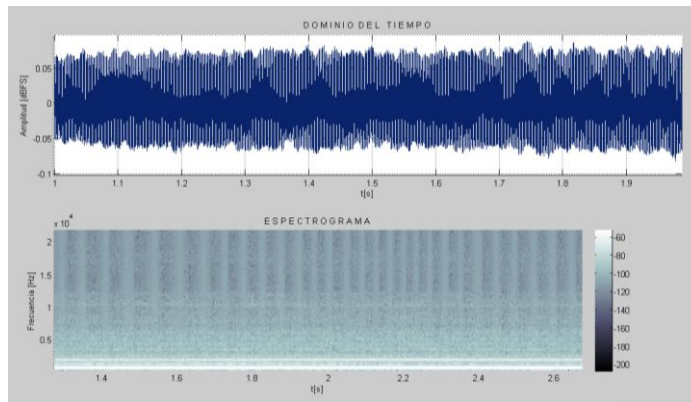
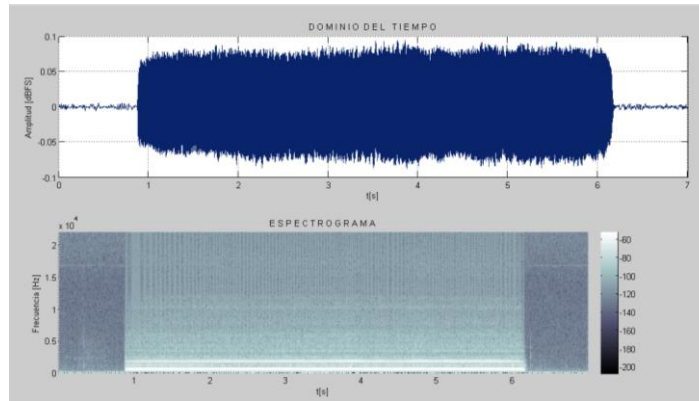




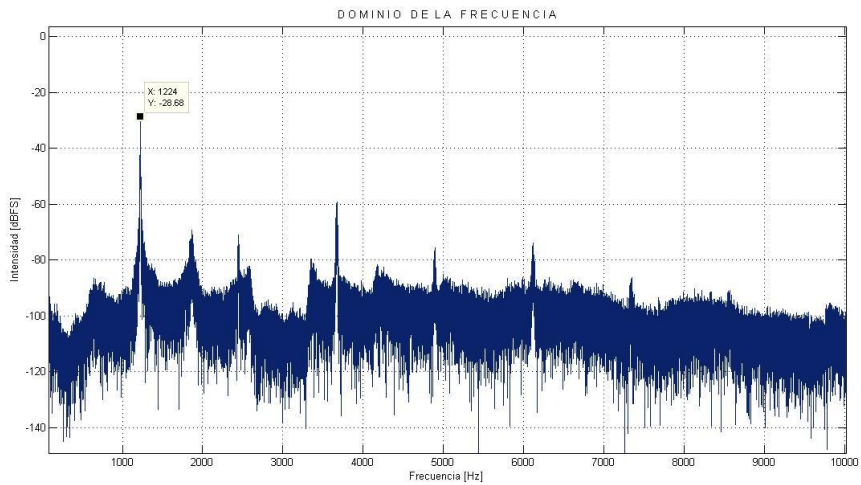
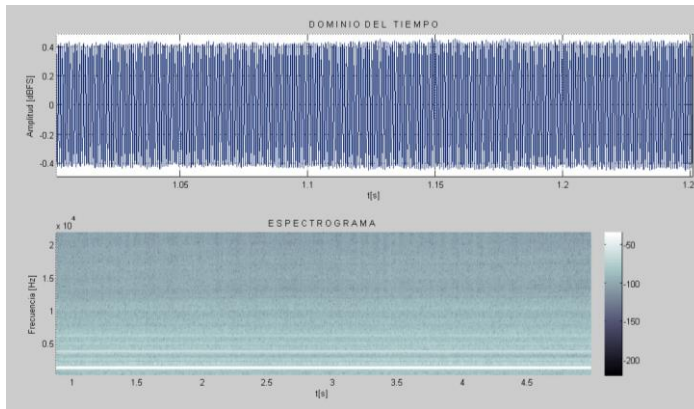
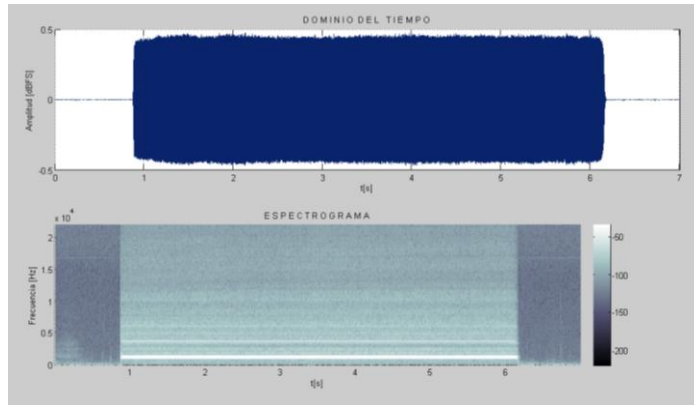
Flauta 2 sin tapar



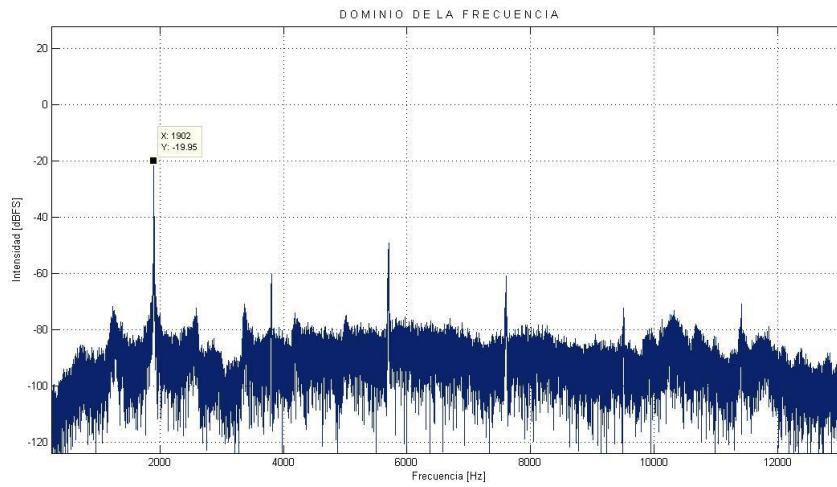
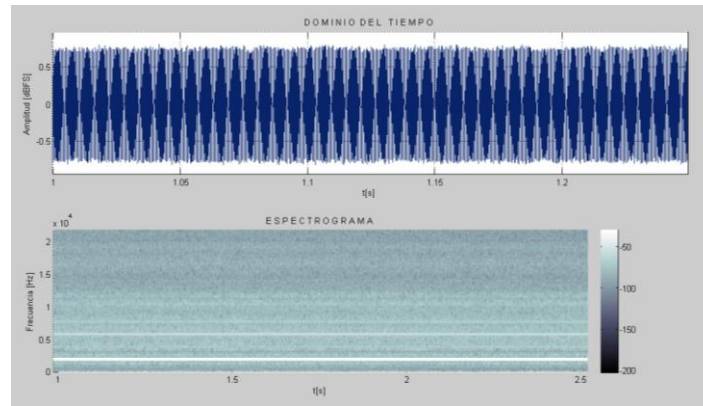
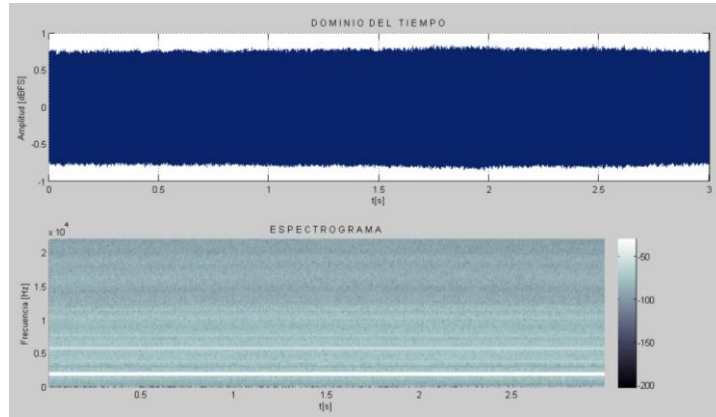
Sonido Medio



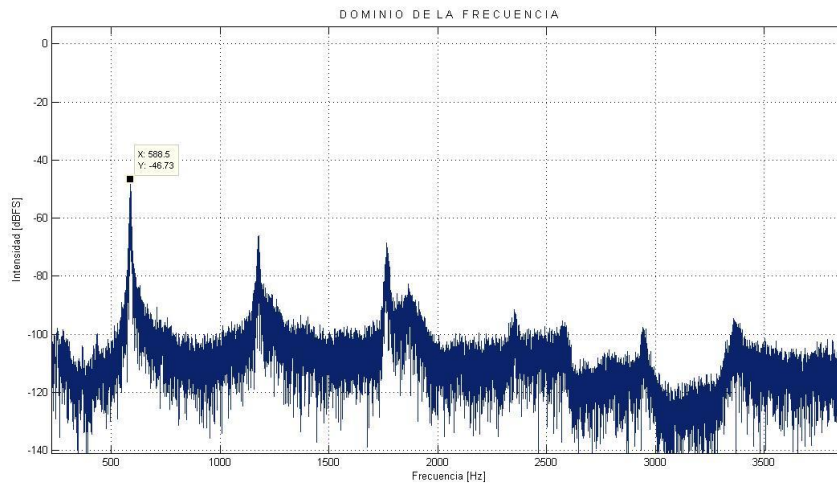
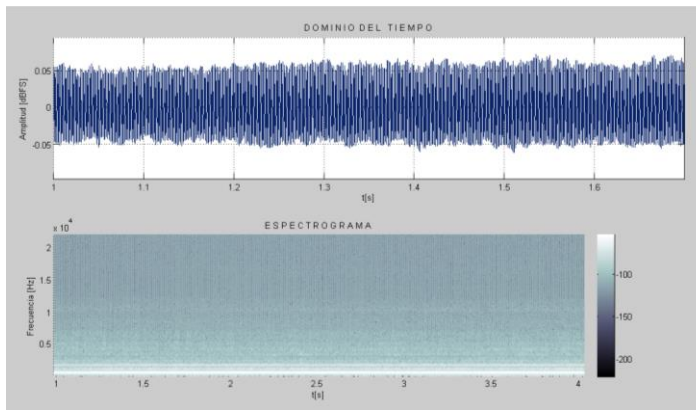
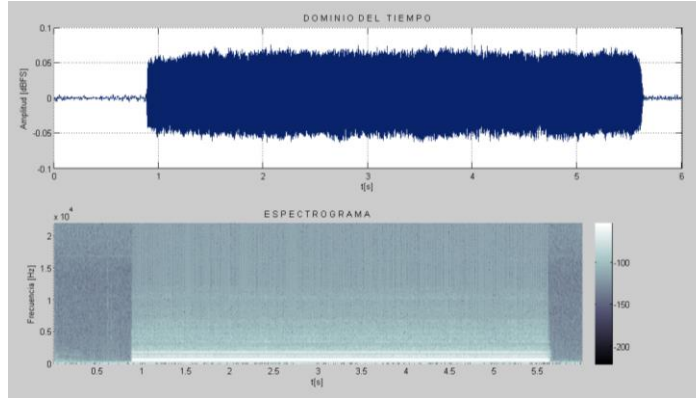
Primer Parcial



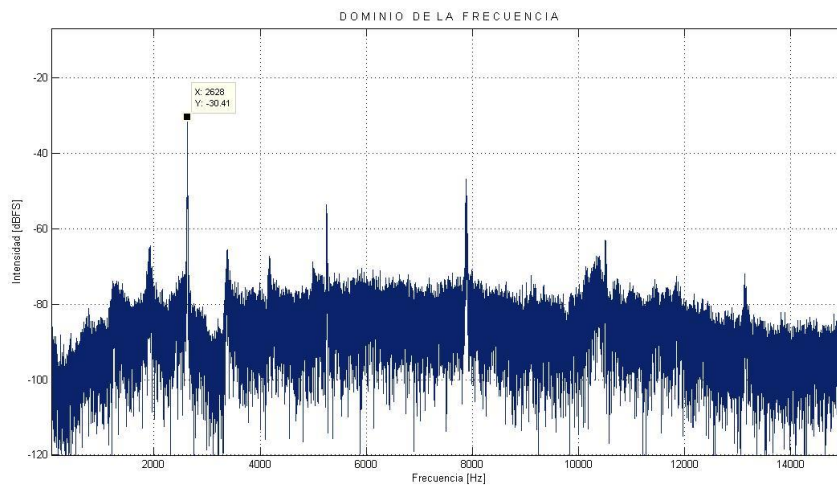
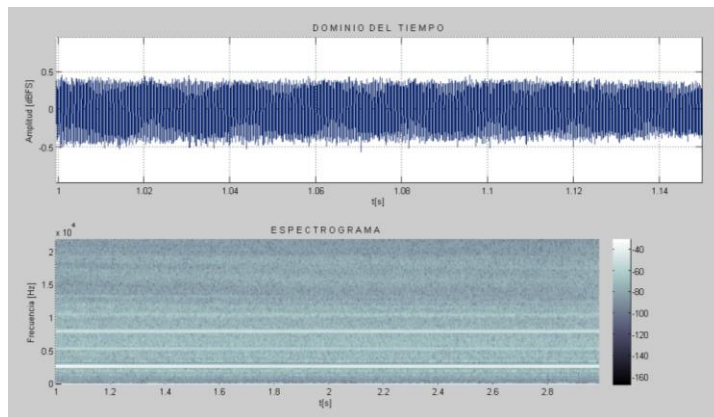
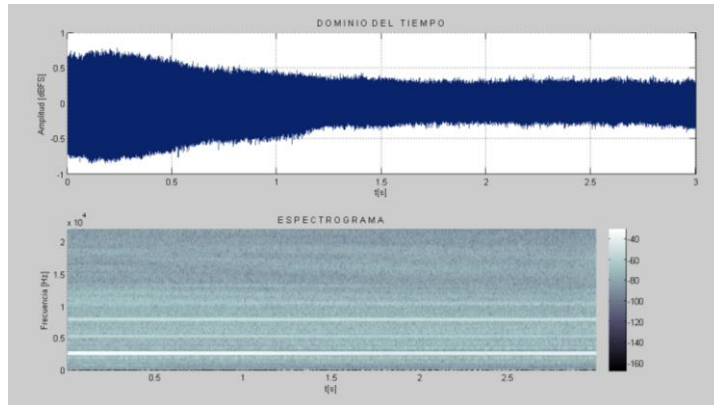
Segundo Parcial



Sonido Suave



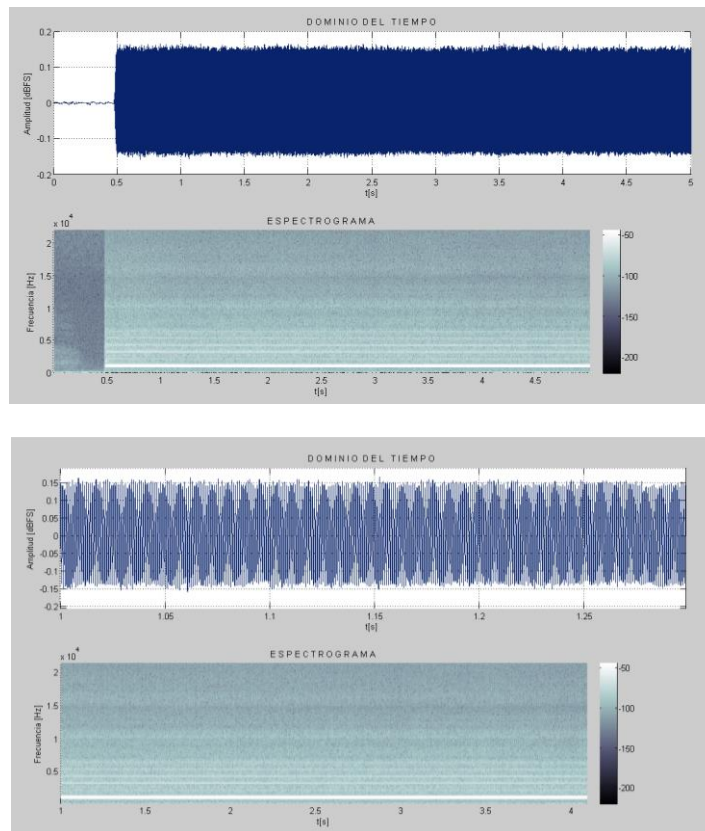
Tercer Parcial

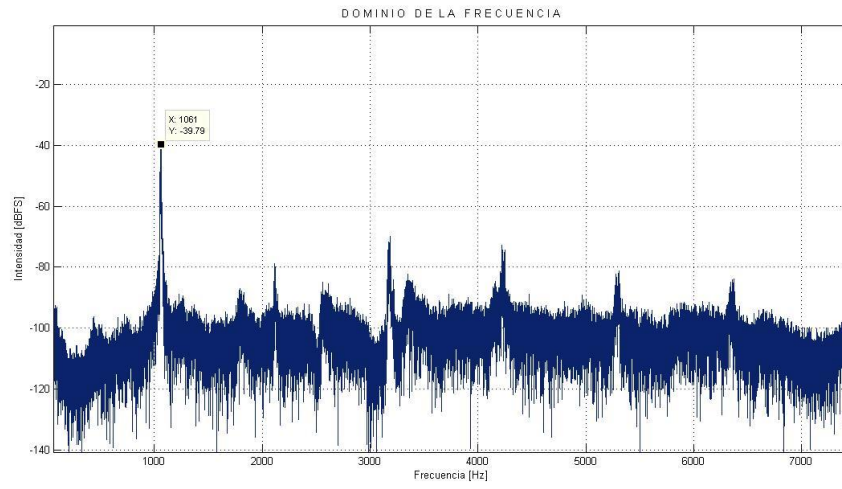


Flauta 2 tapando orificios

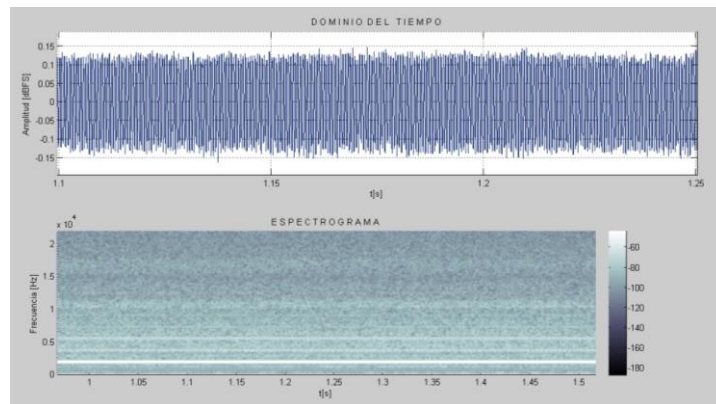
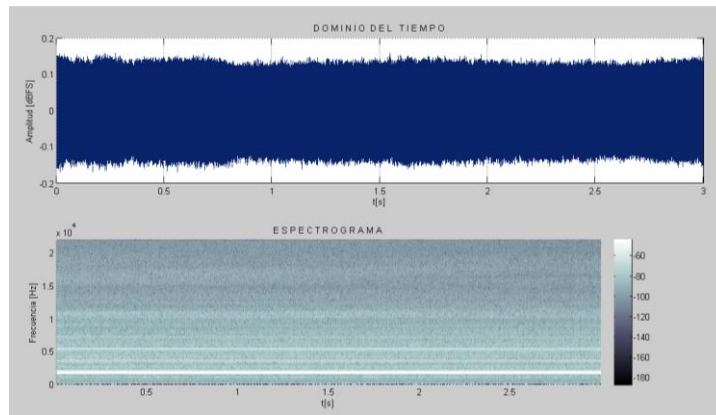


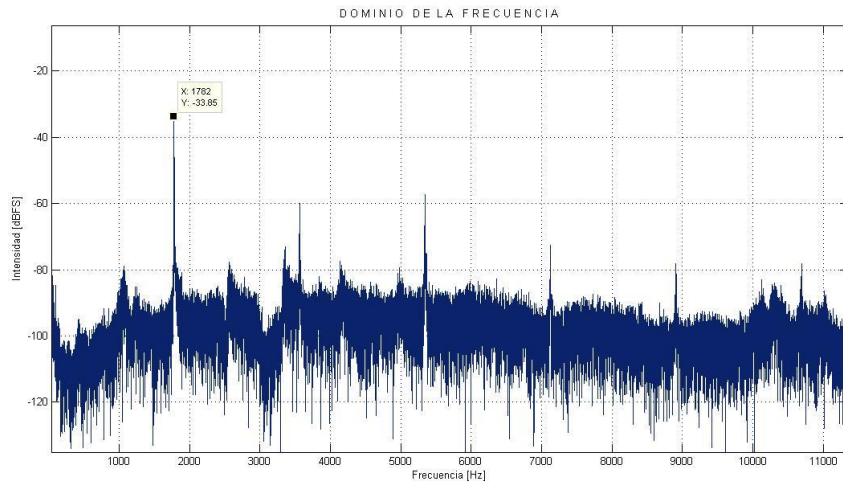
Primer Parcial



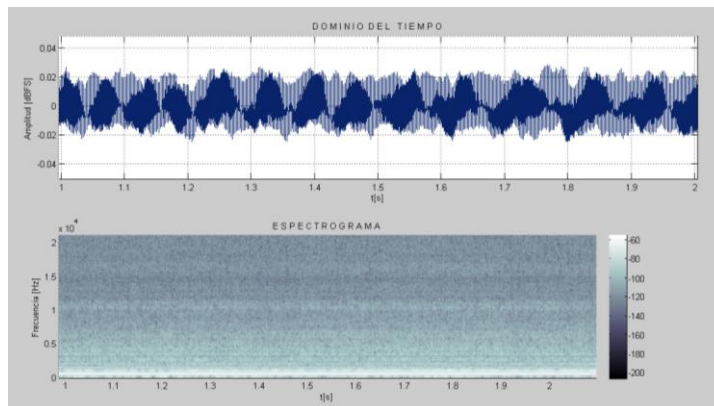
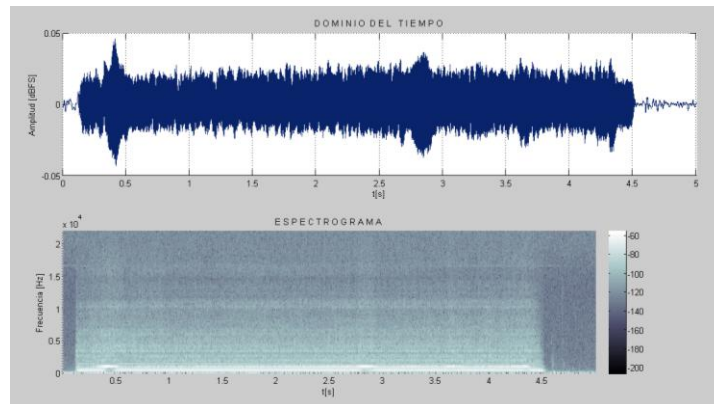


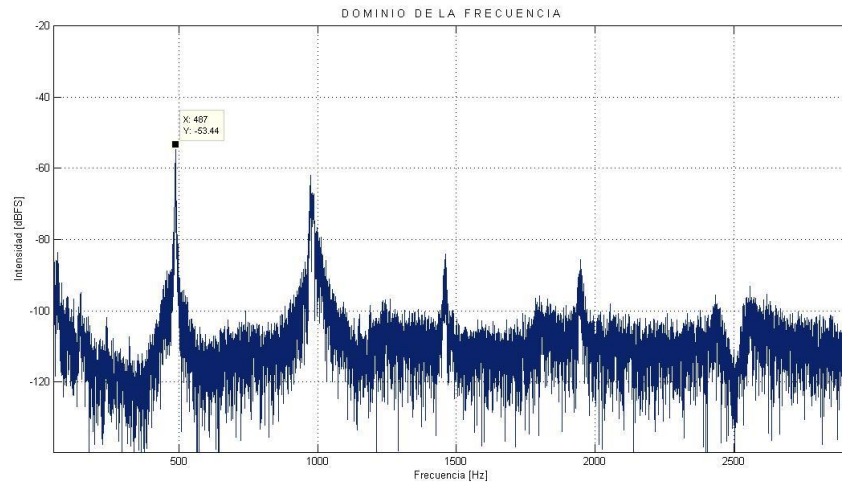
Segundo Parcial



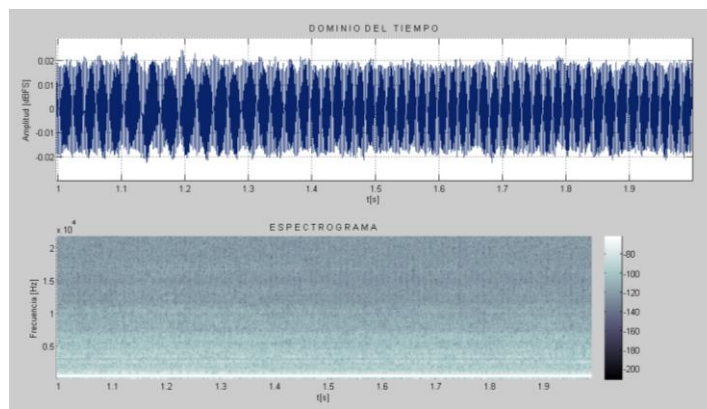
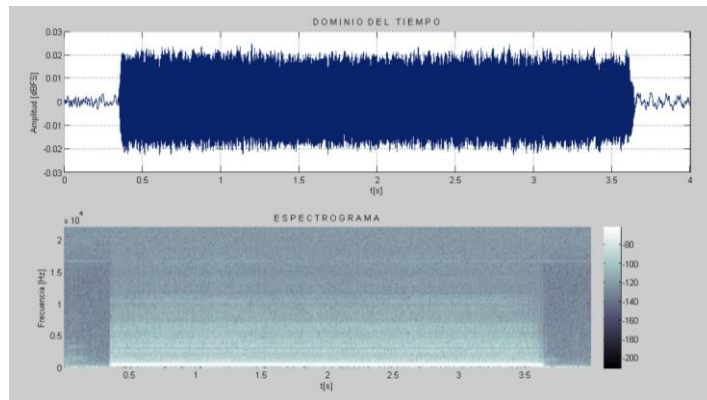


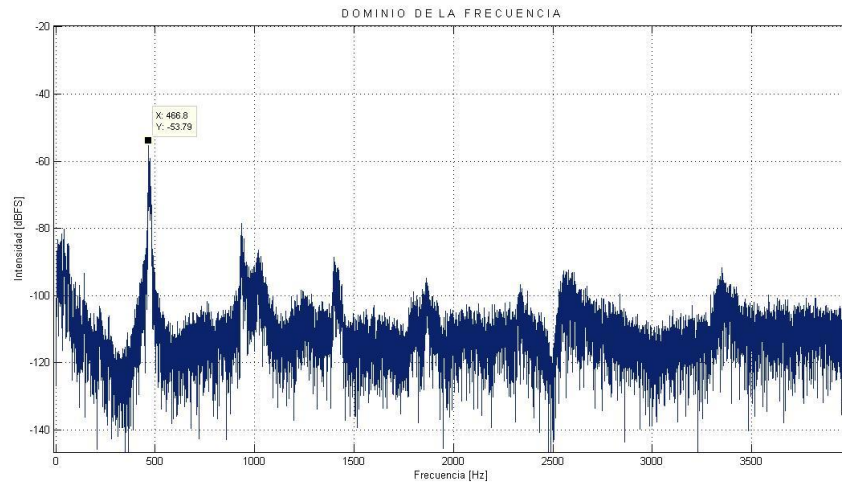
Sonido Medio



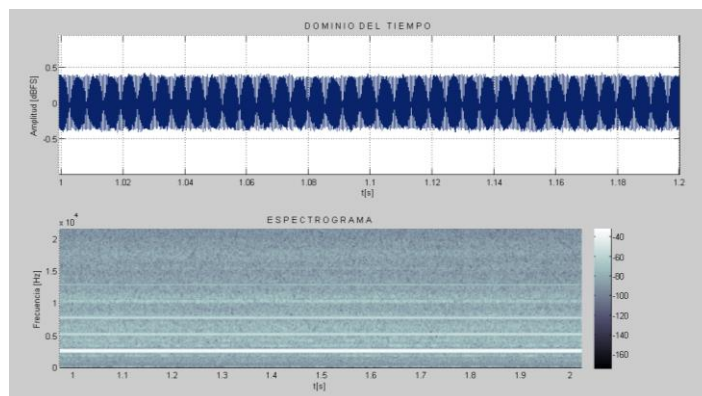
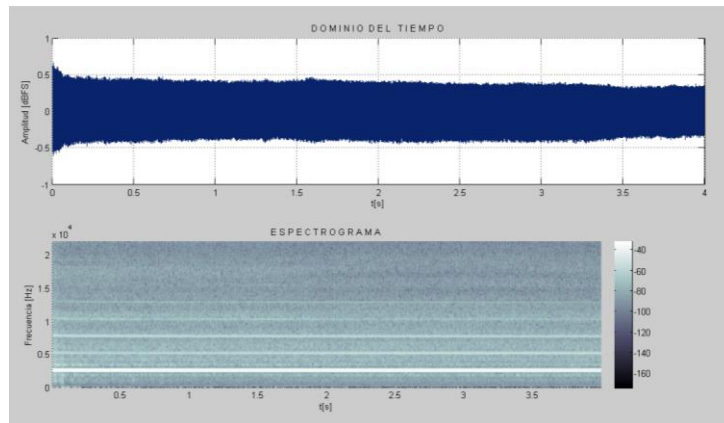


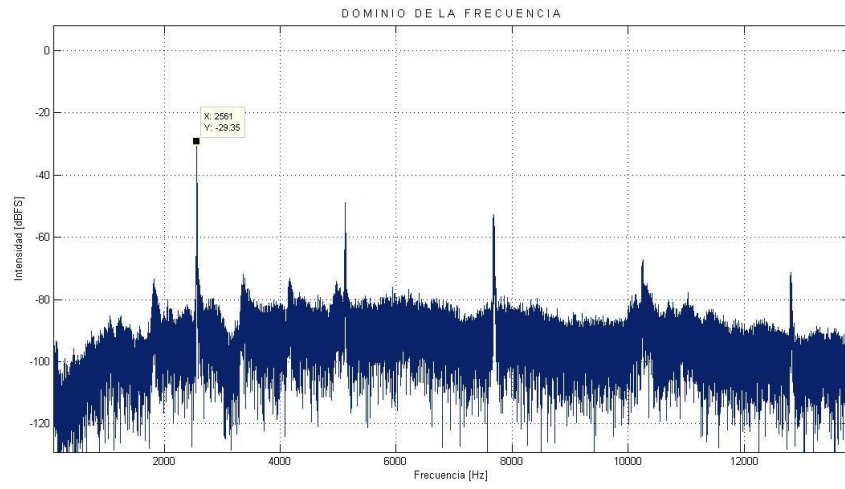
Sonido Suave



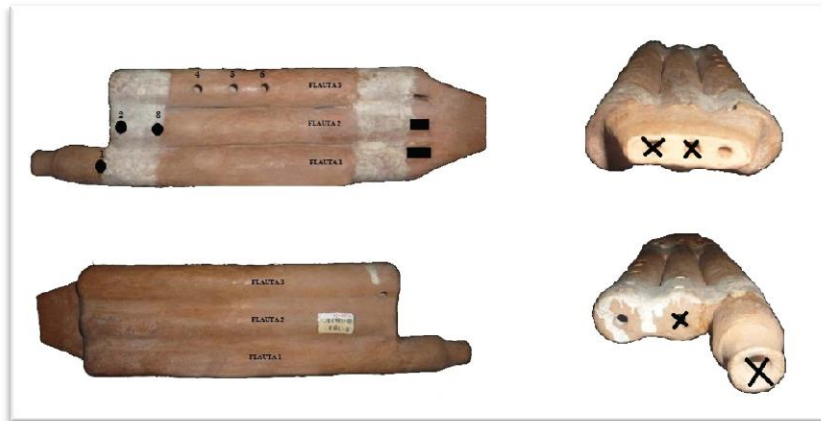


Tercer Parcial

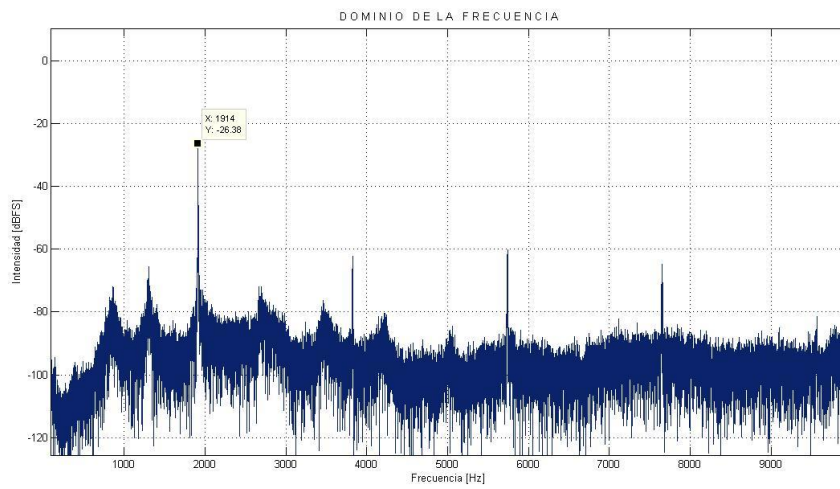
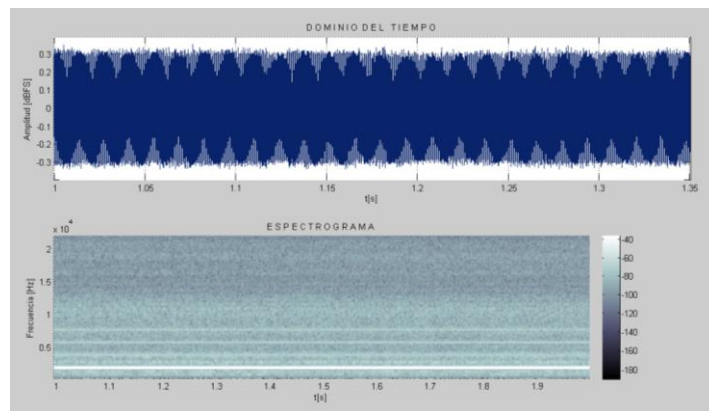
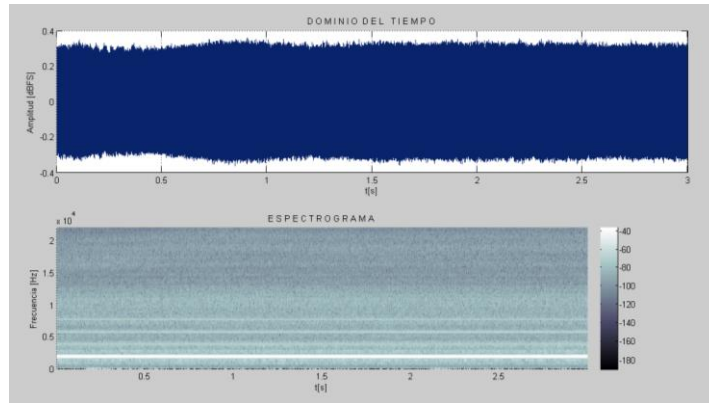




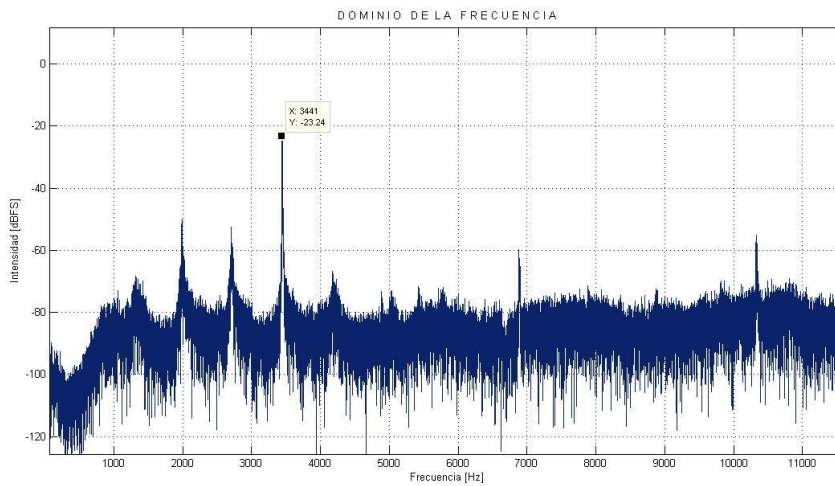
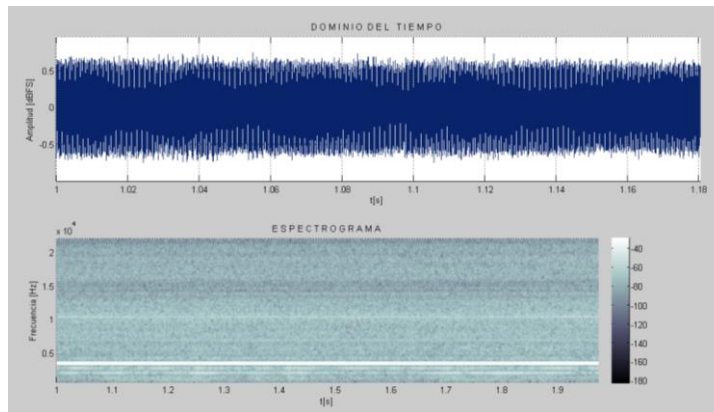
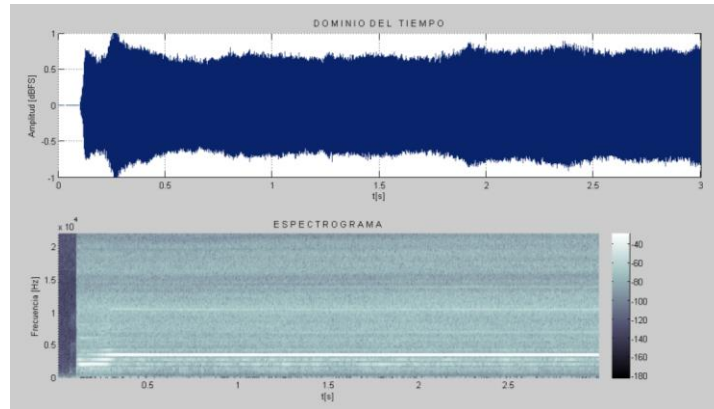
Flauta 3 destapada



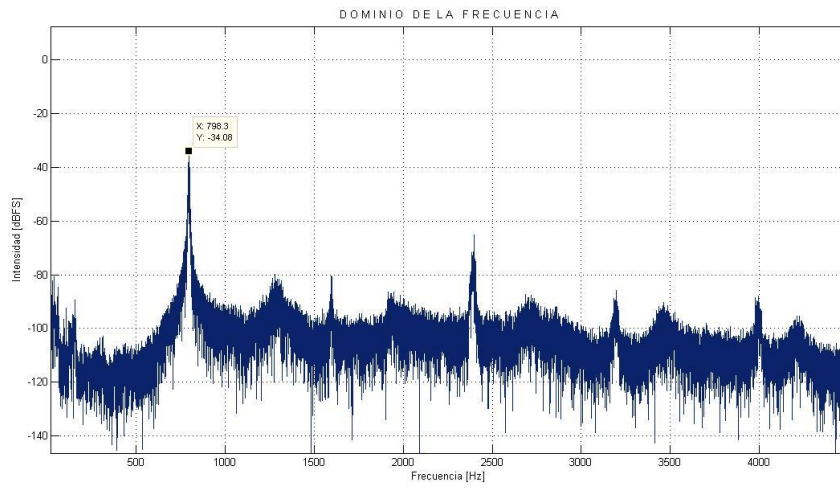
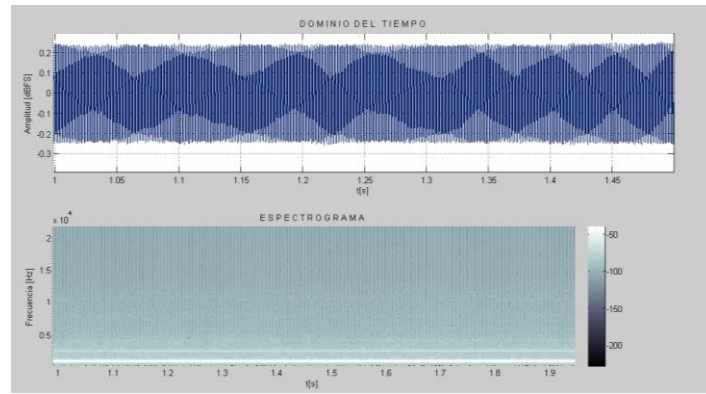
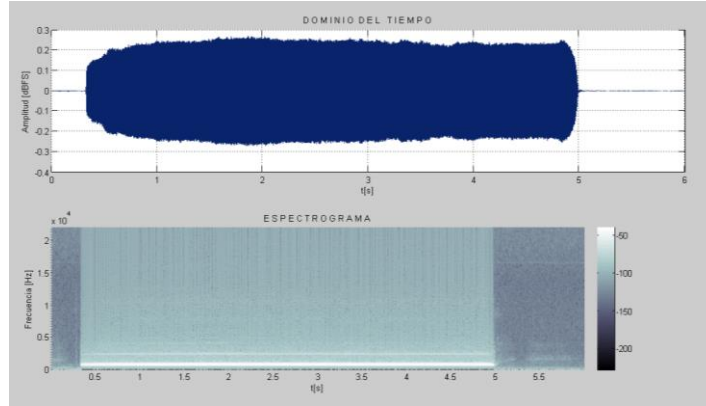
Primer Parcial



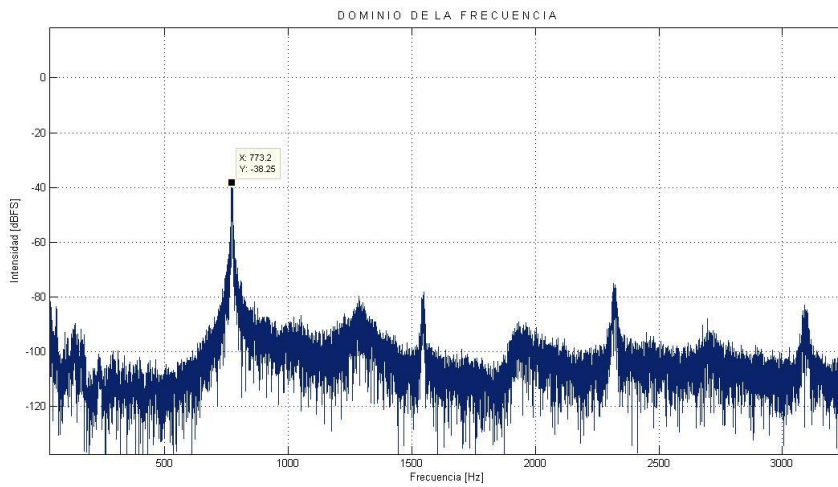
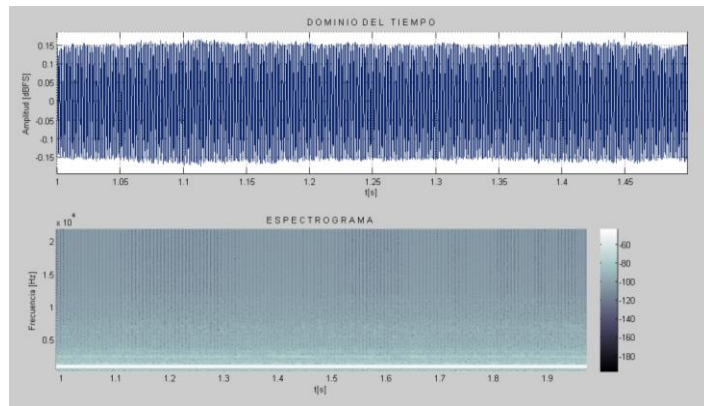
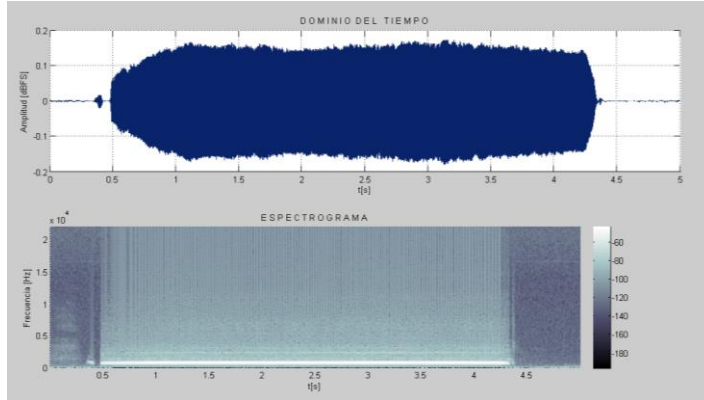
Segundo Parcial



Sonido Medio



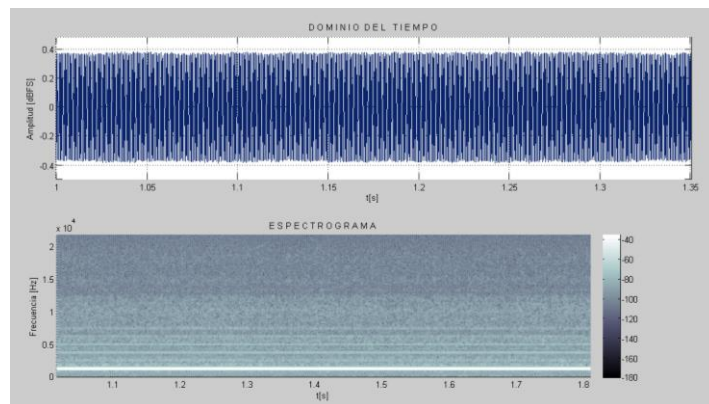
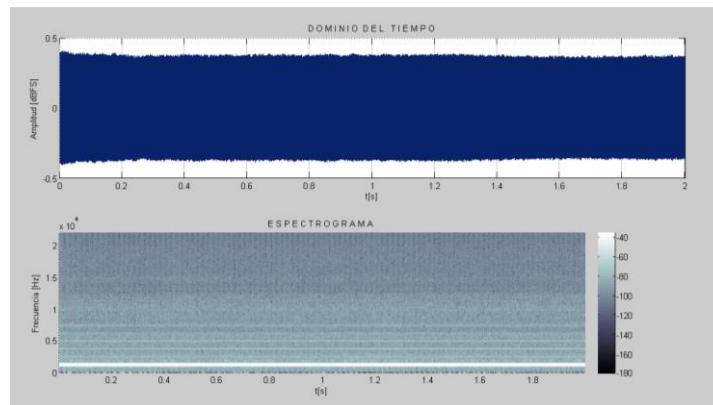
Sonido Suave

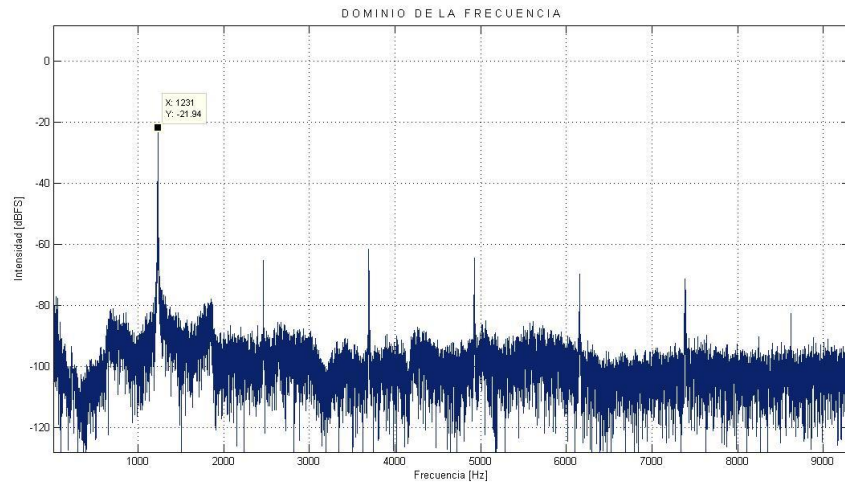


Obturando orificios 4 y 5 de la Flauta 3

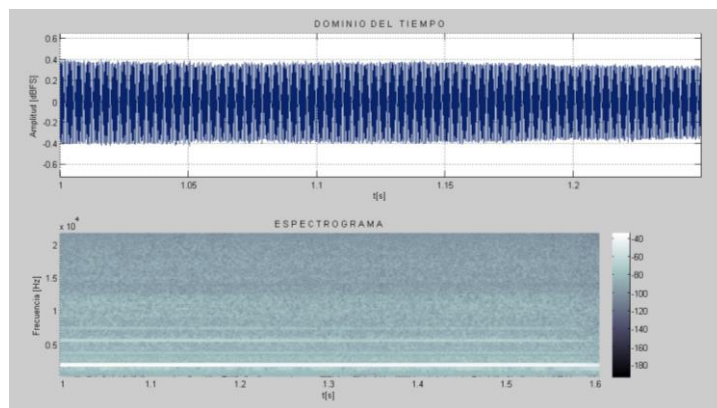
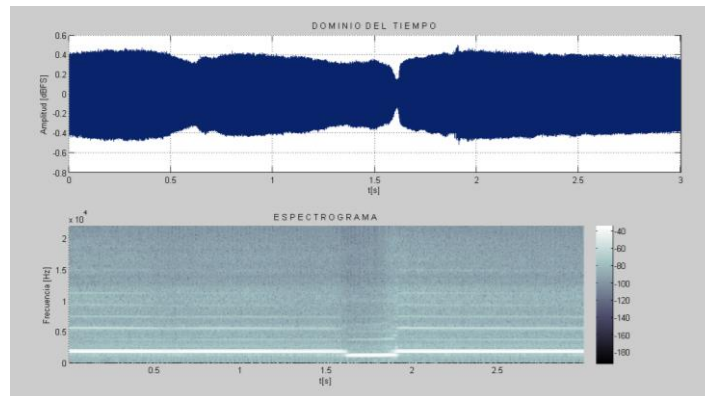


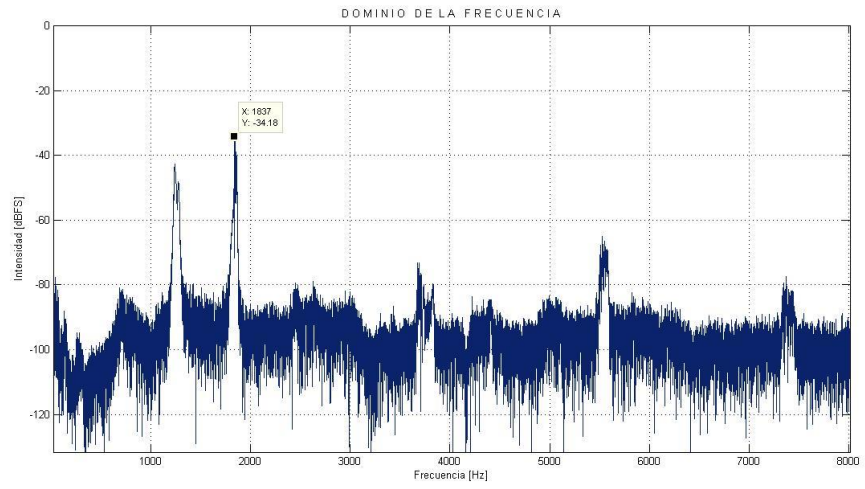
Primer Parcial



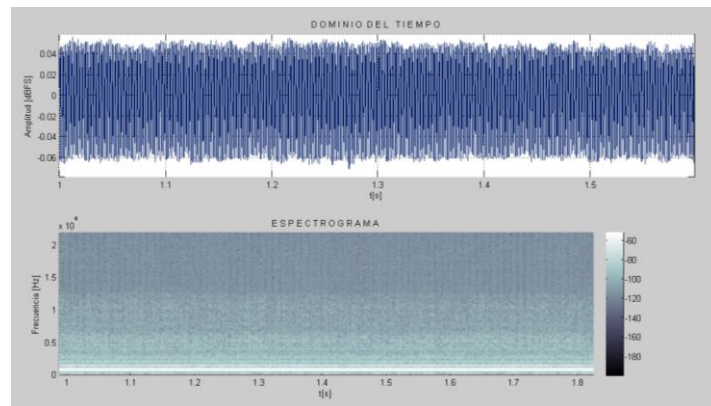
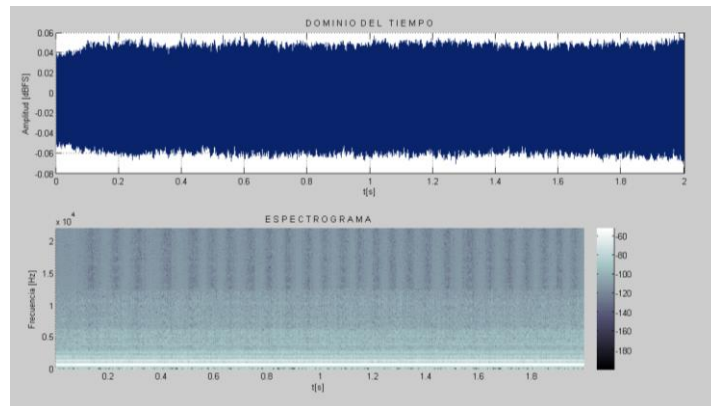


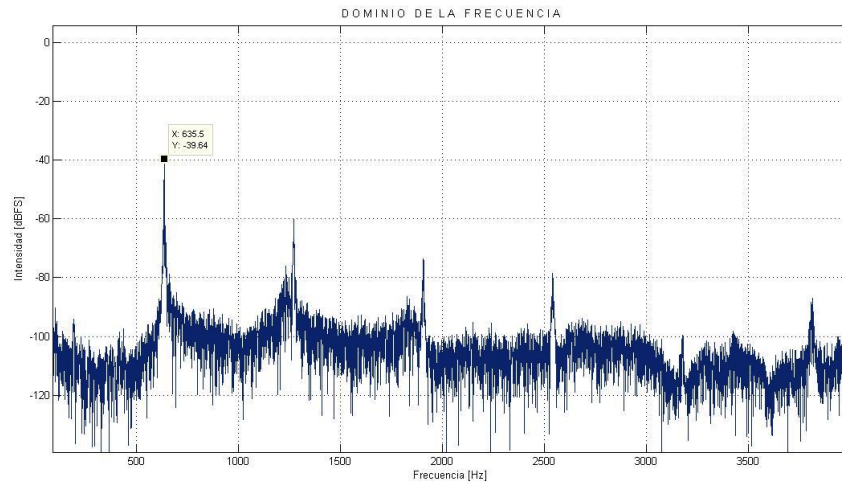
Segundo Parcial



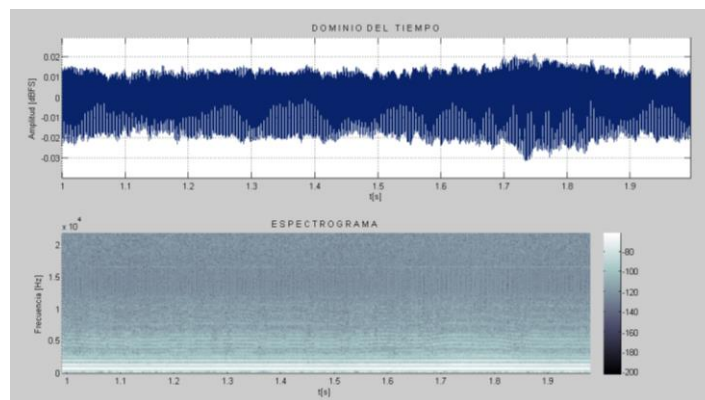
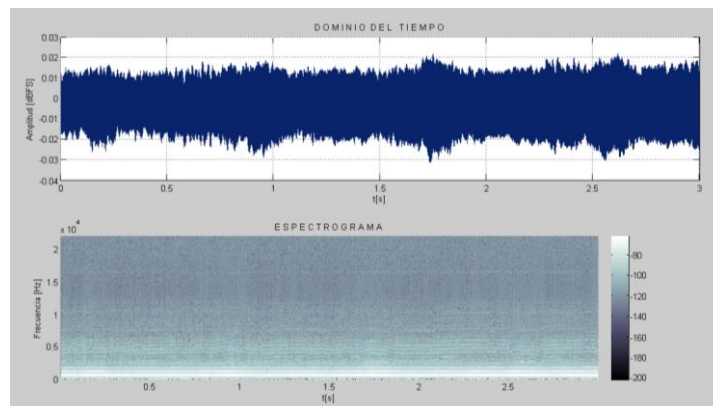


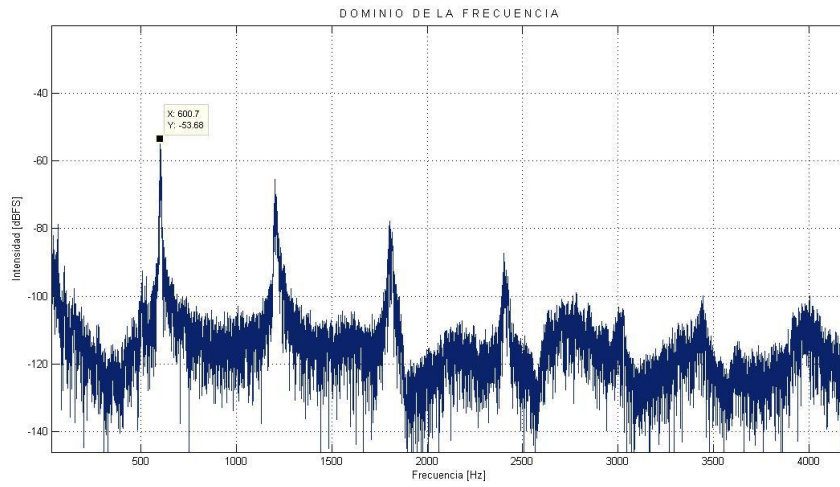
Sonido Medio



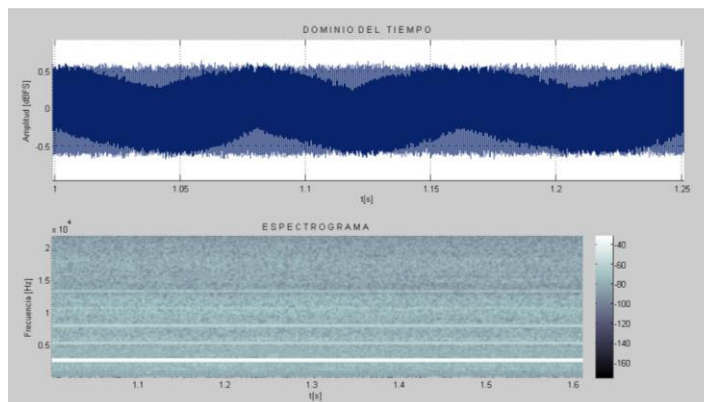
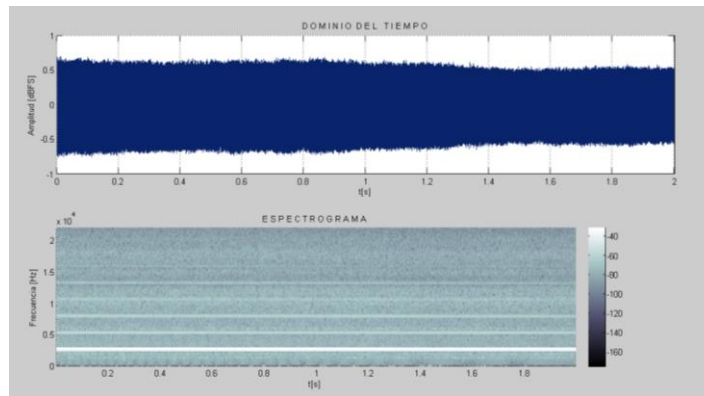


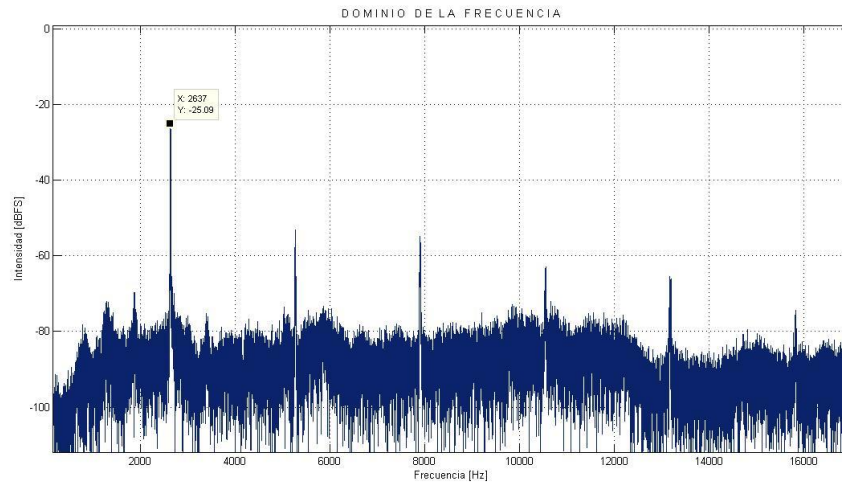
Sonido Suave





Tercer Parcial

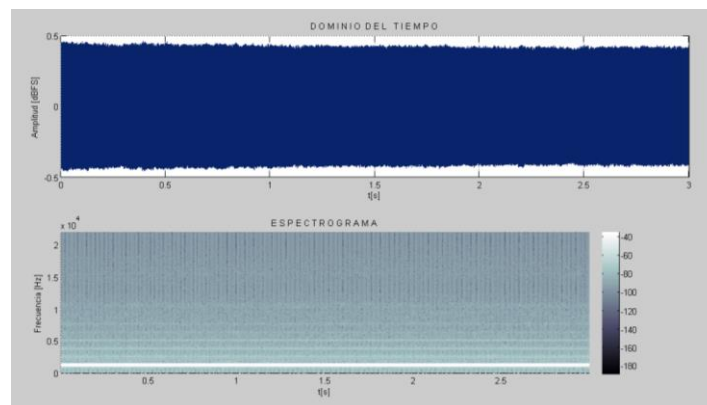


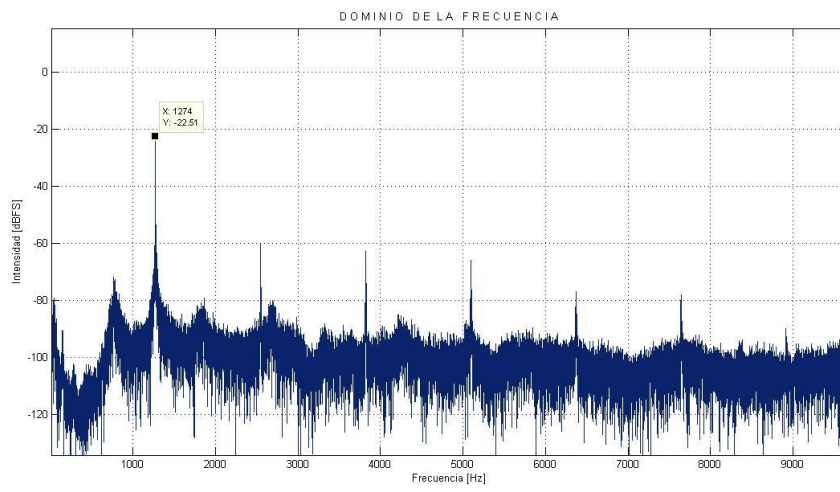
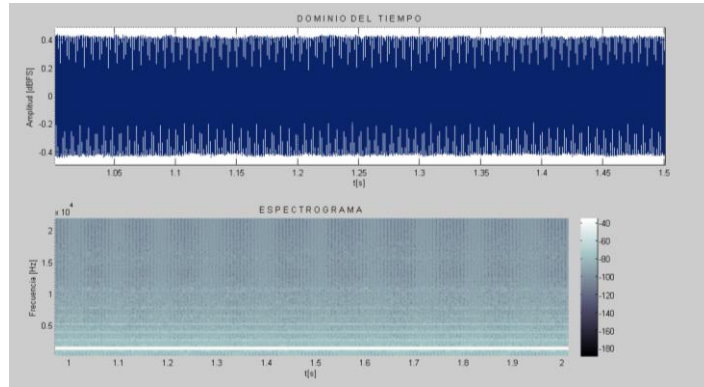


Obturando orificio 4 de la Flauta 3

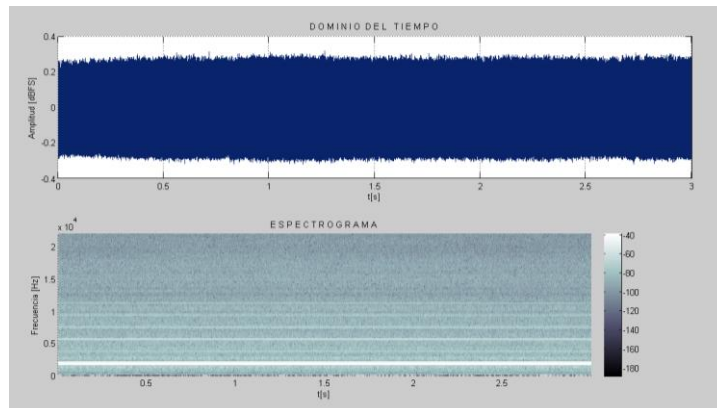


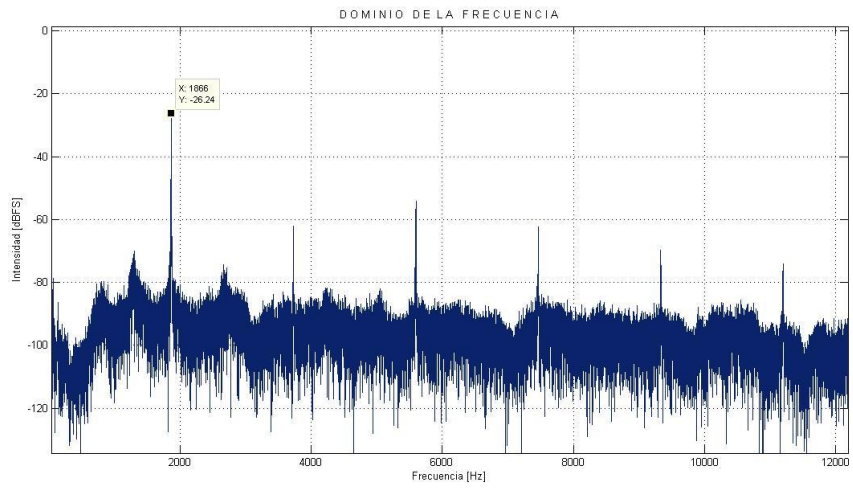
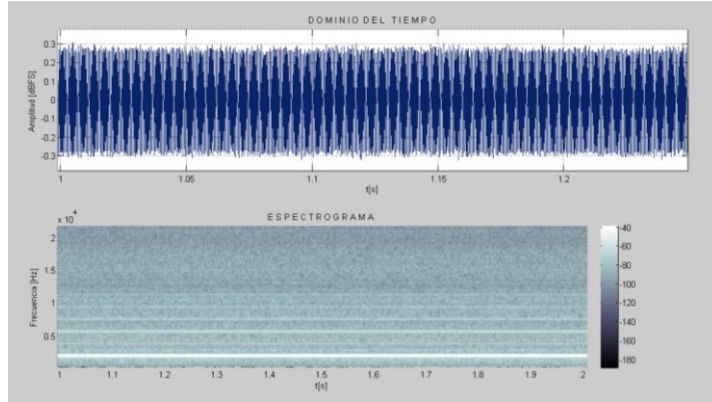
Primer Parcial



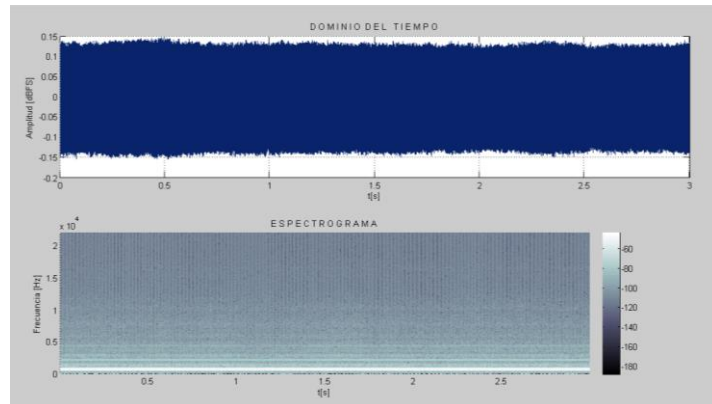


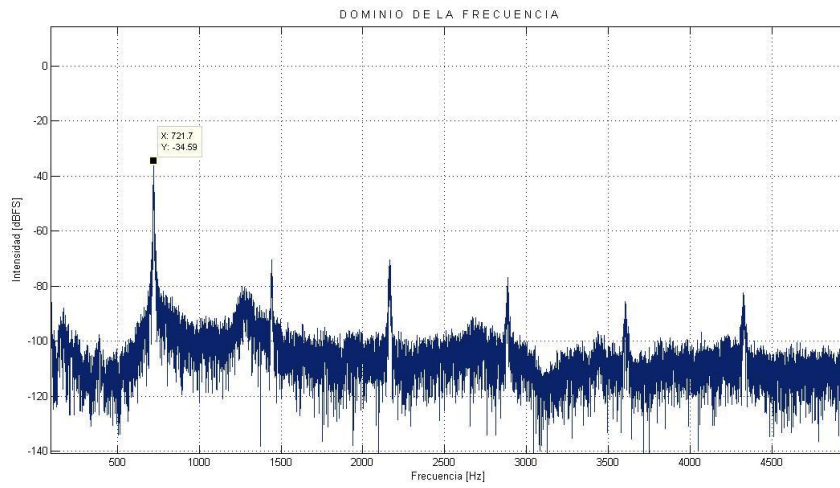
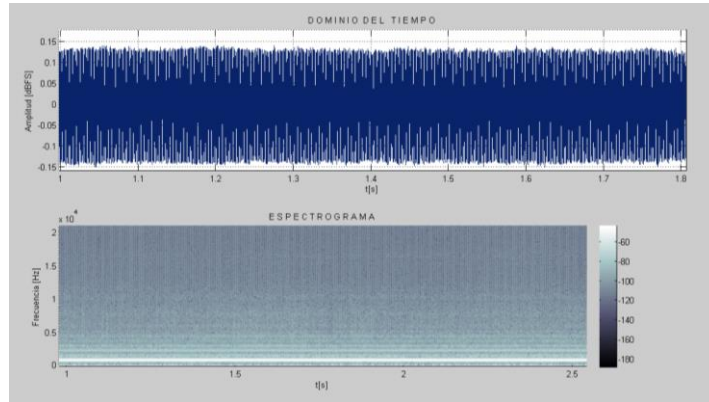
Segundo Parcial



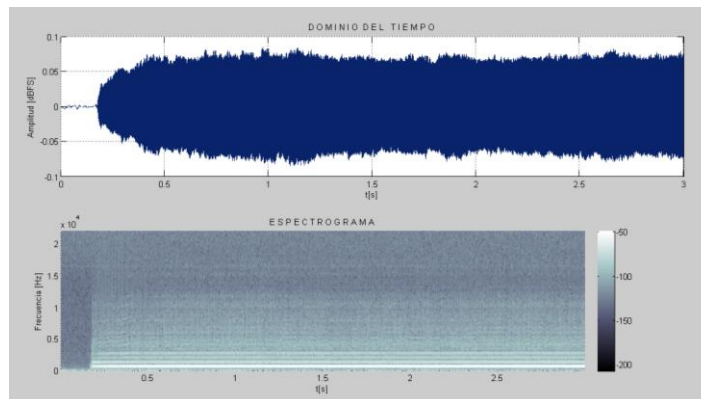


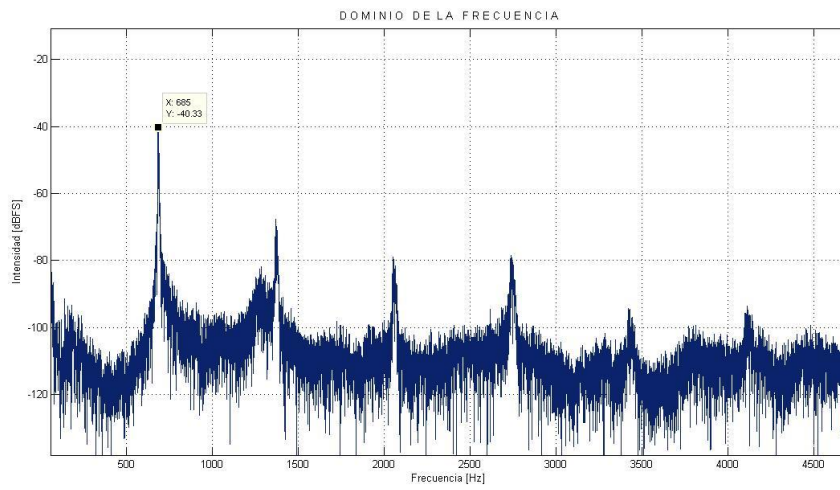
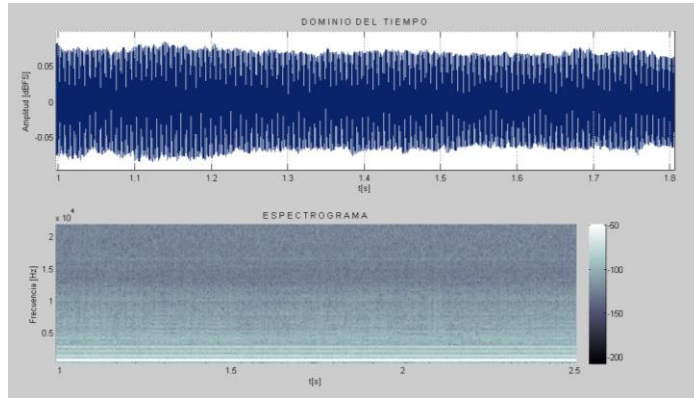
Sonido Medio



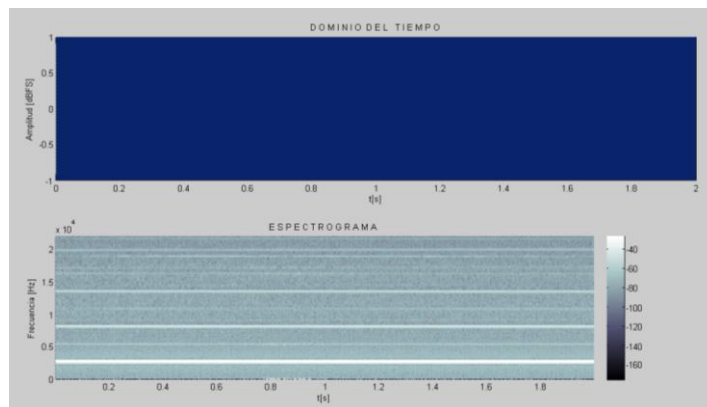


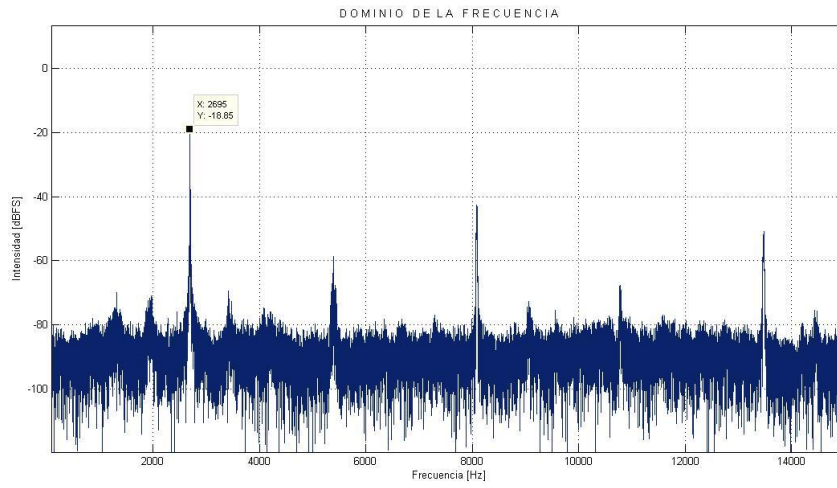
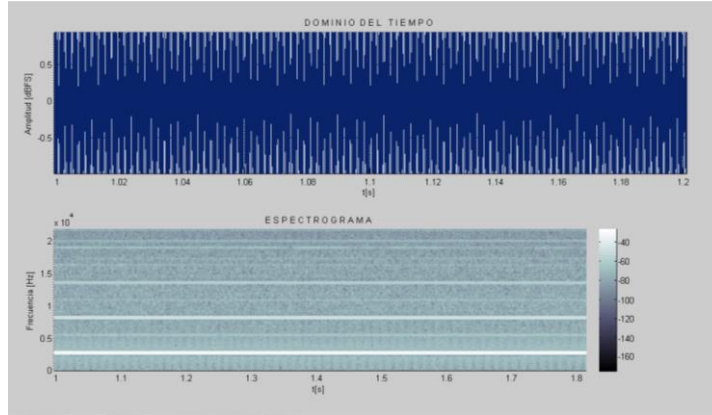
Sonido Suave





Tercer Parcial

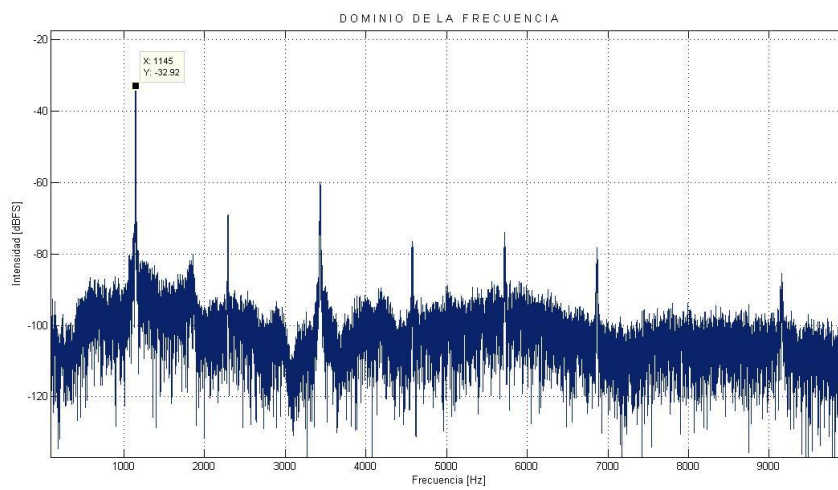
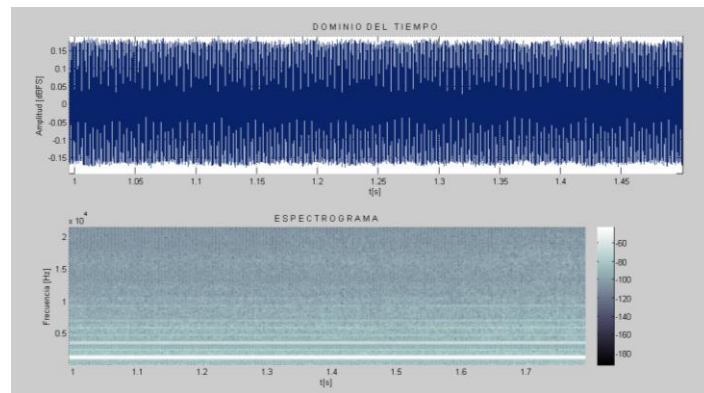
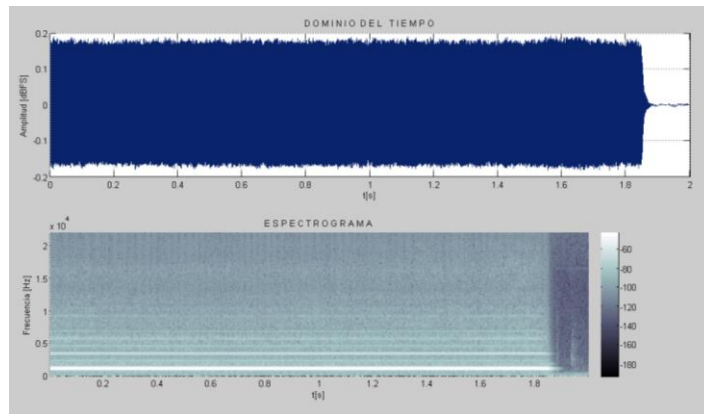




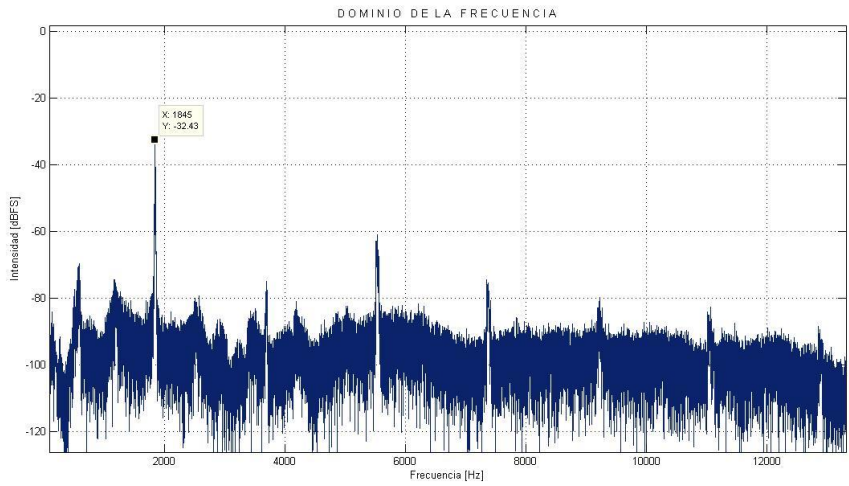
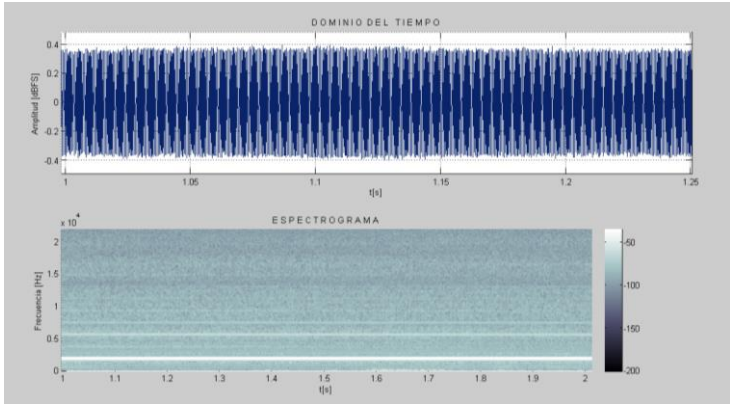
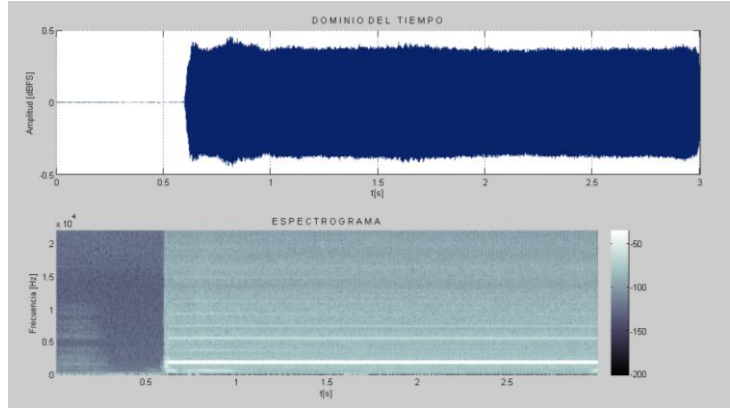
Flauta 3 tapando los 3 orificios



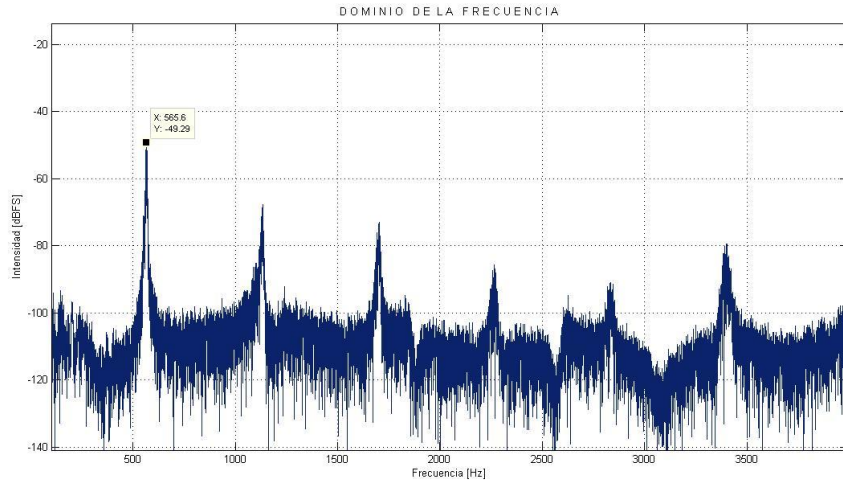
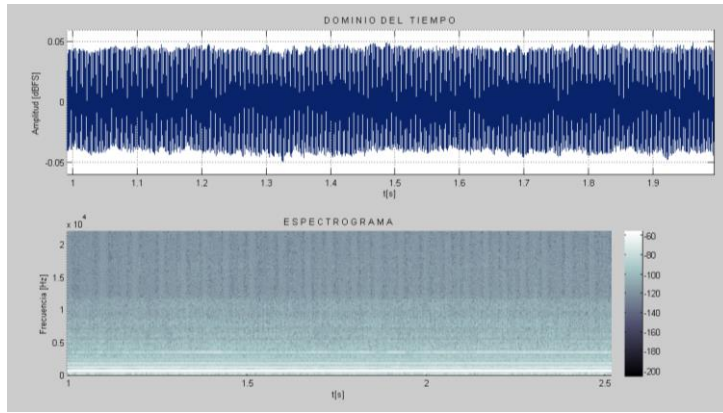
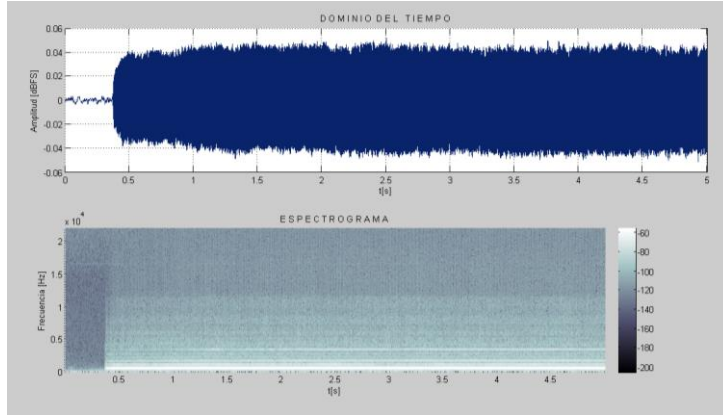
Primer Parcial



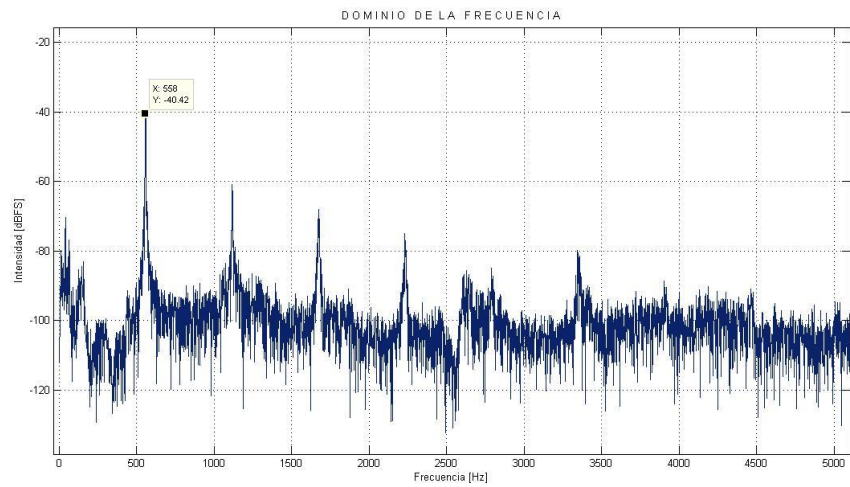
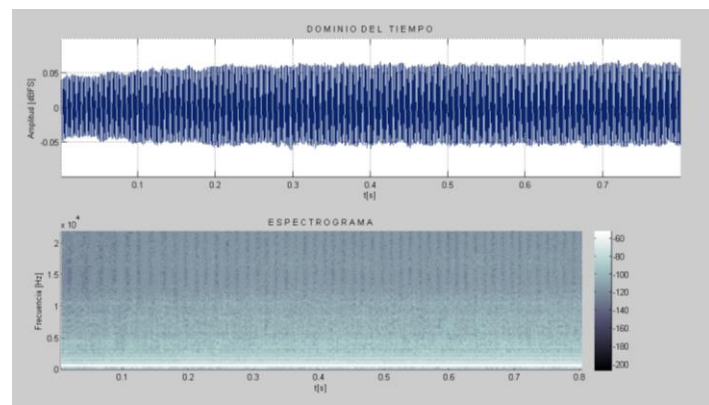
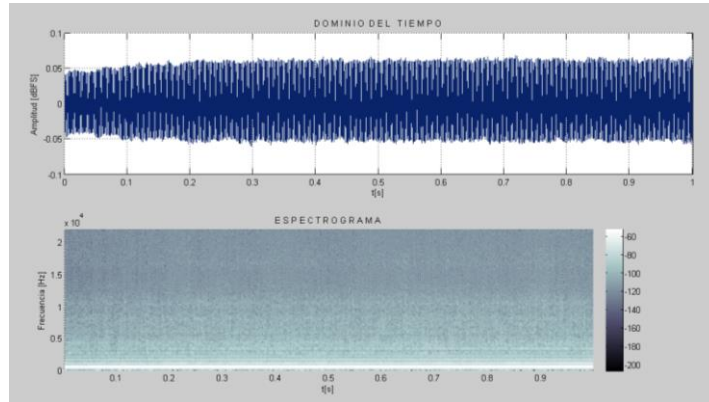
Segundo Parcial



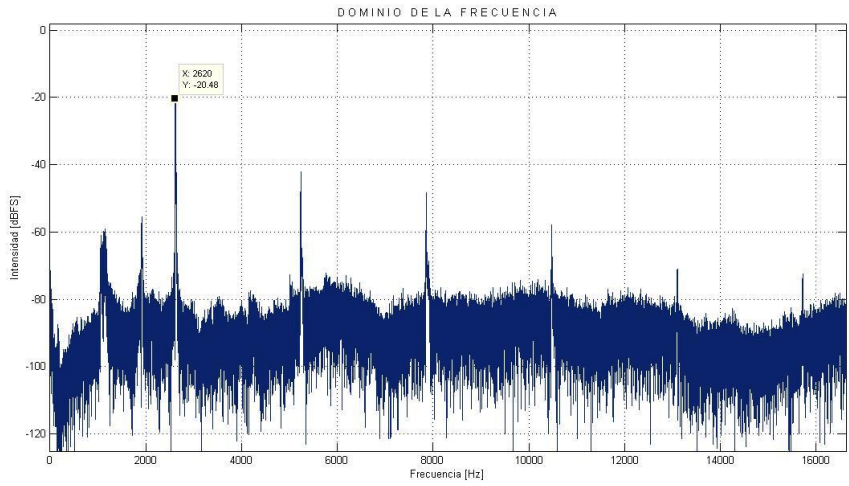
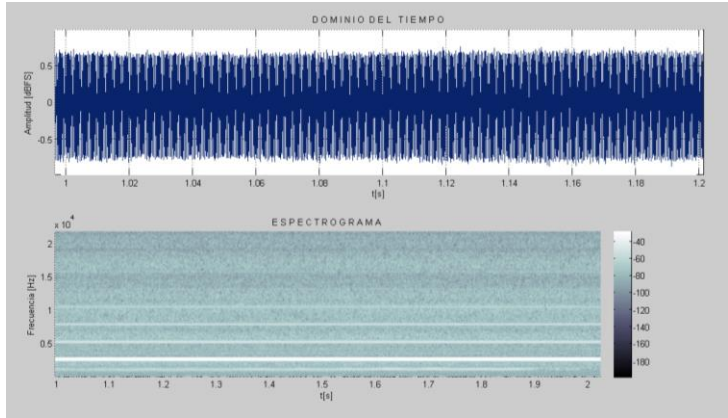
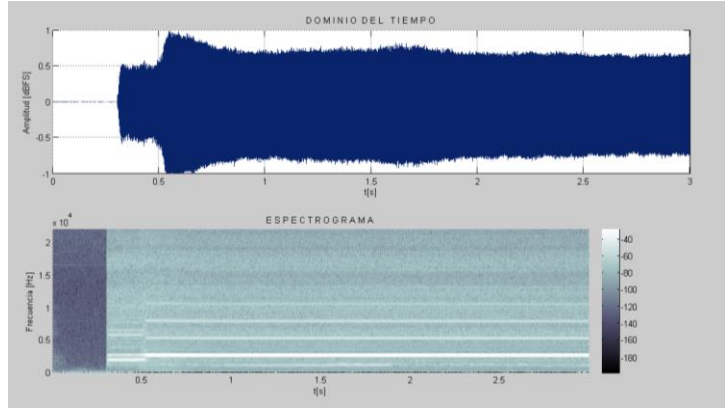
Sonido Medio



Sonido Suave

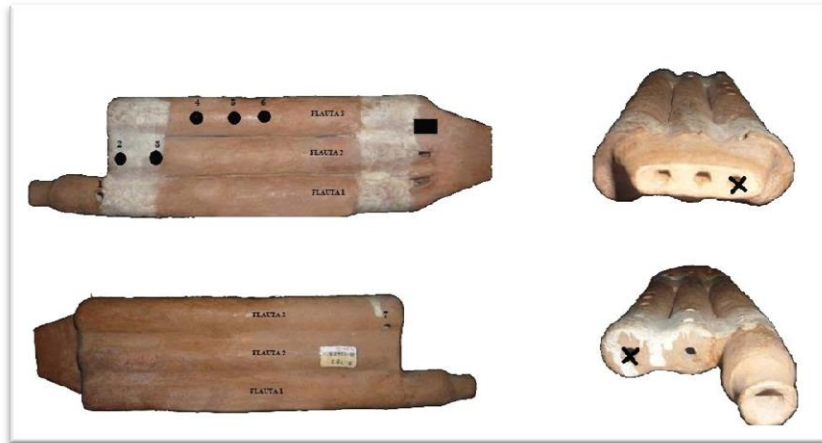


Tercer Parcial

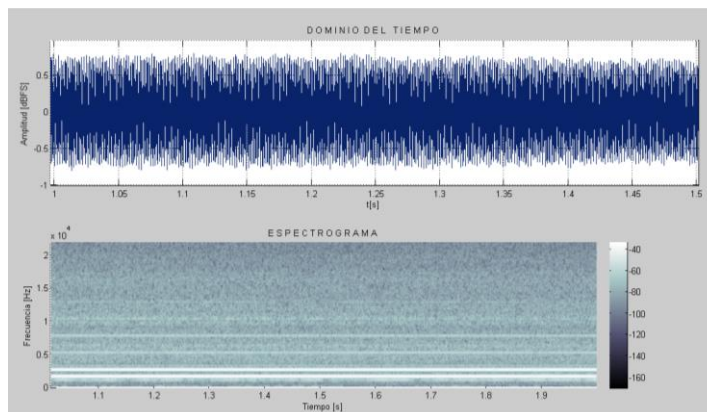
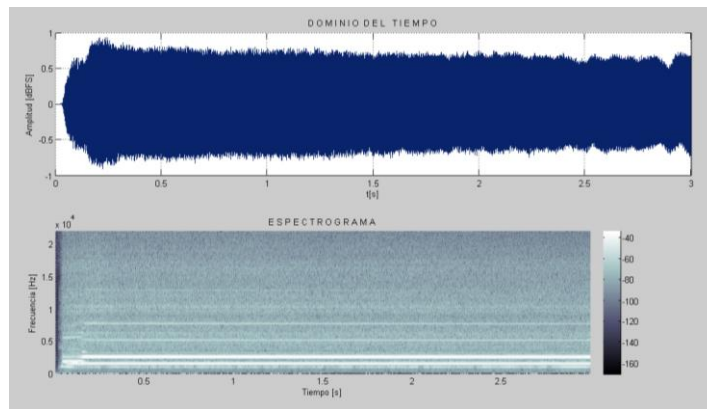


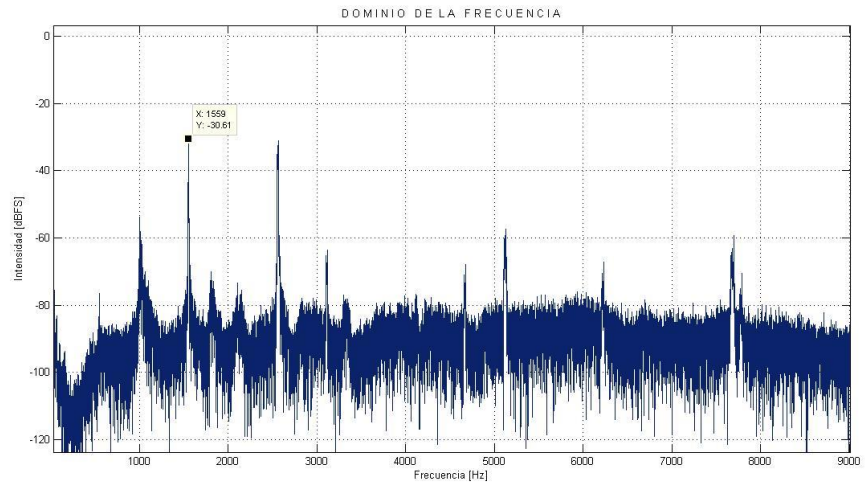
GRABACIÓN 2: FLAUTAS 1 Y 2

Flautas 1 y 2 destapando orificio 1 F1

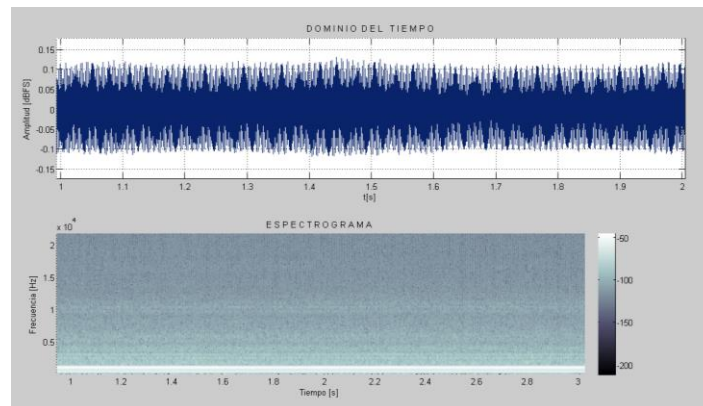
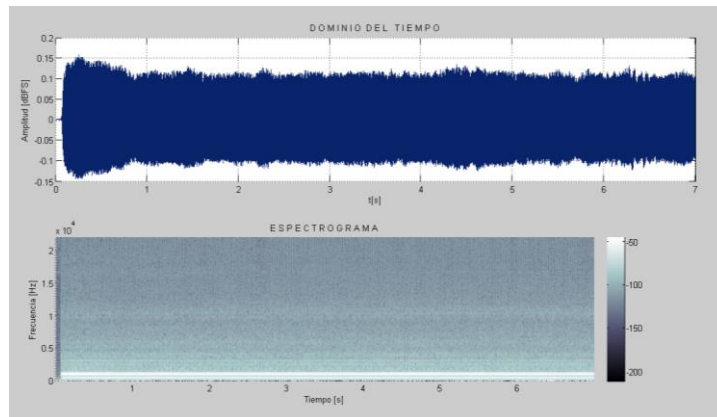


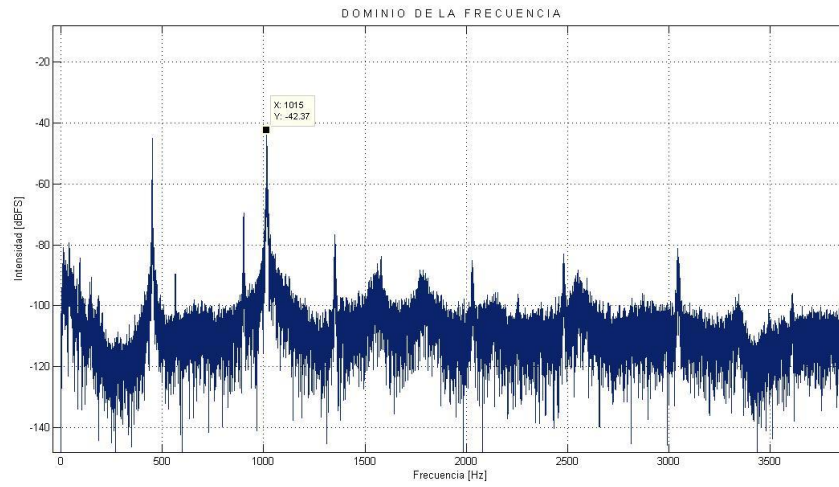
Cuarto Parcial



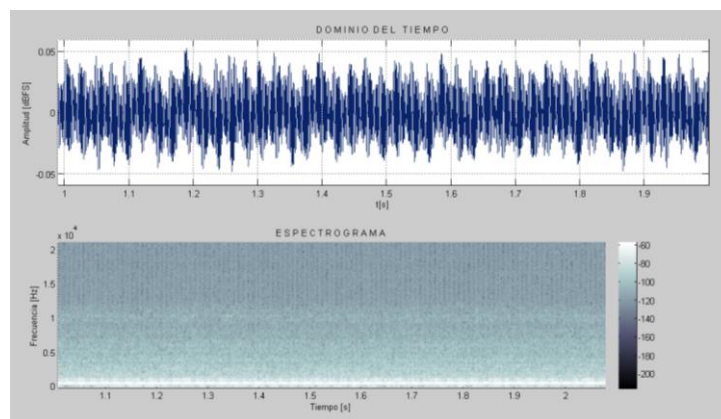
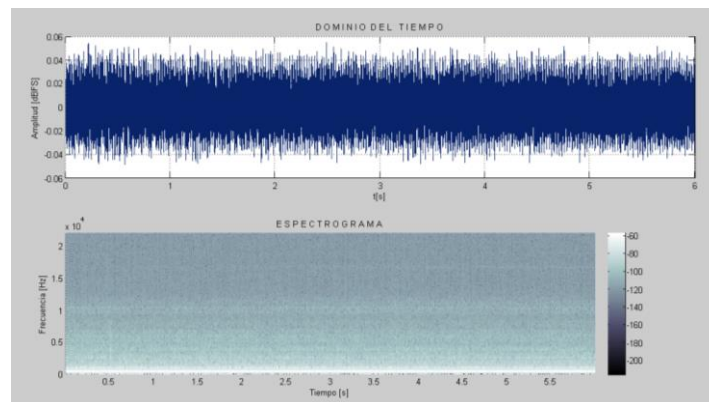


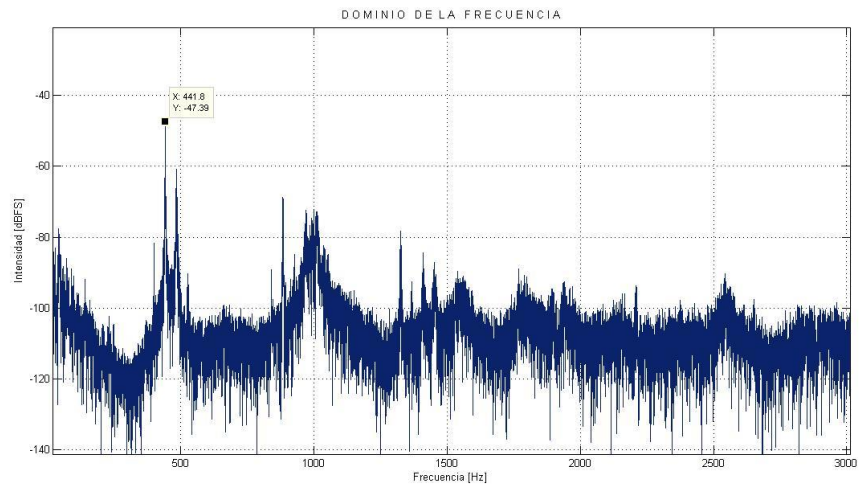
Primer Parcial



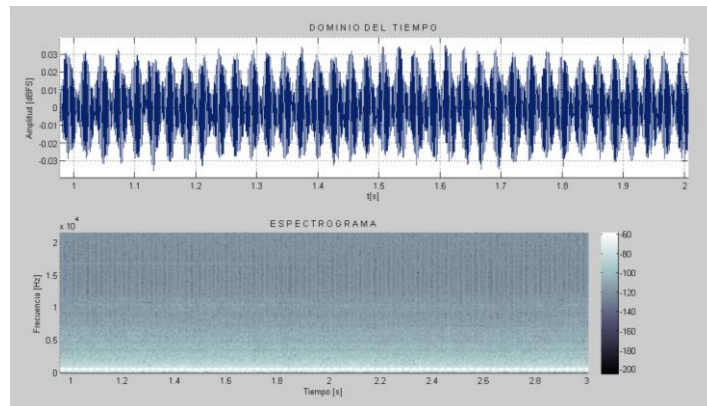
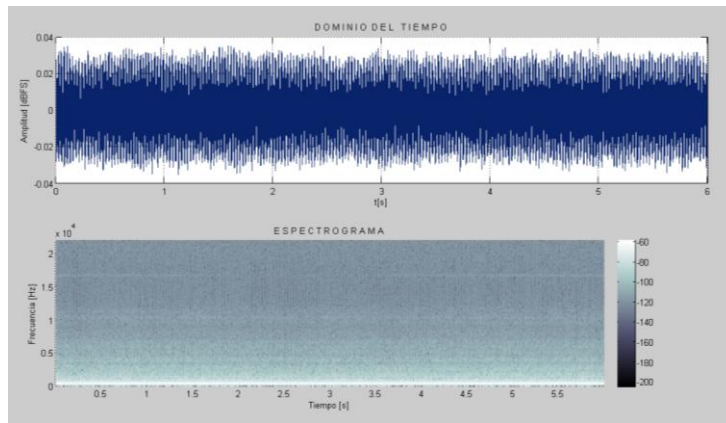


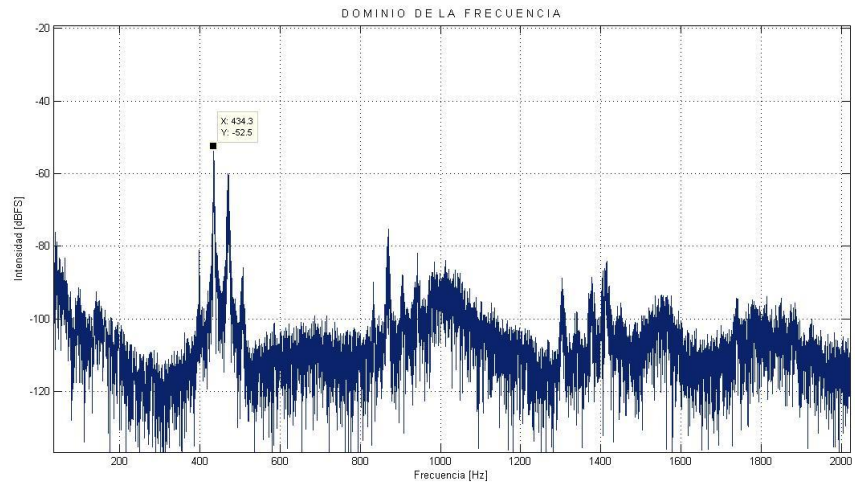
Sonido Medio



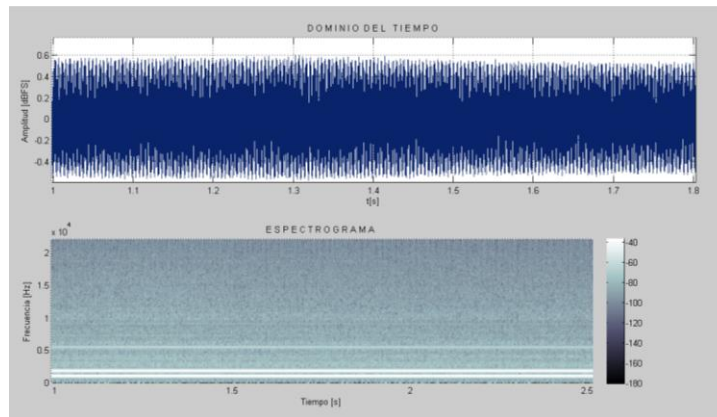
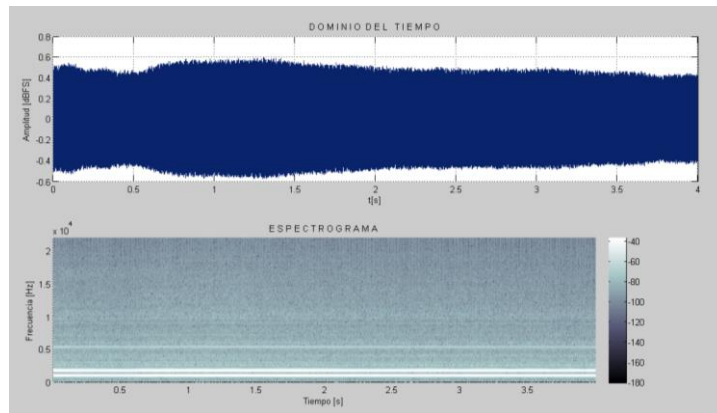


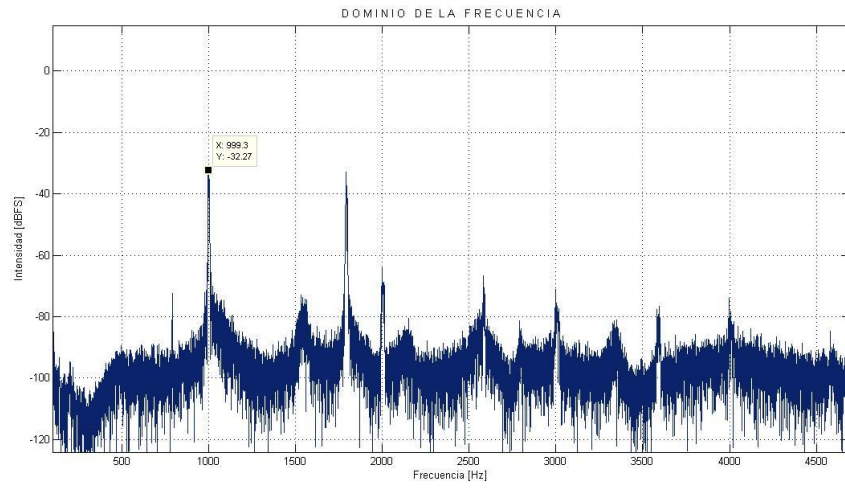
Sonido Suave



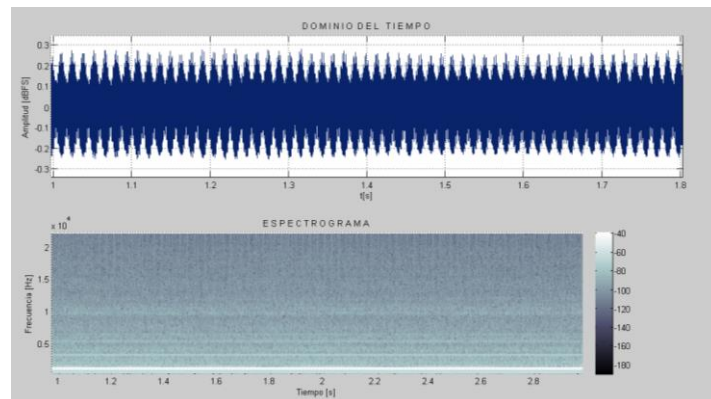
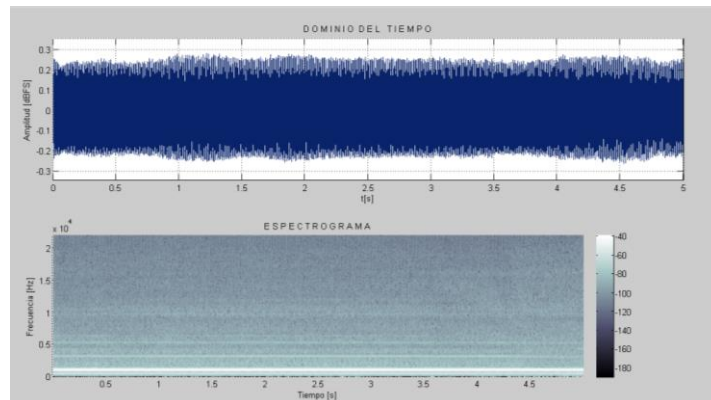


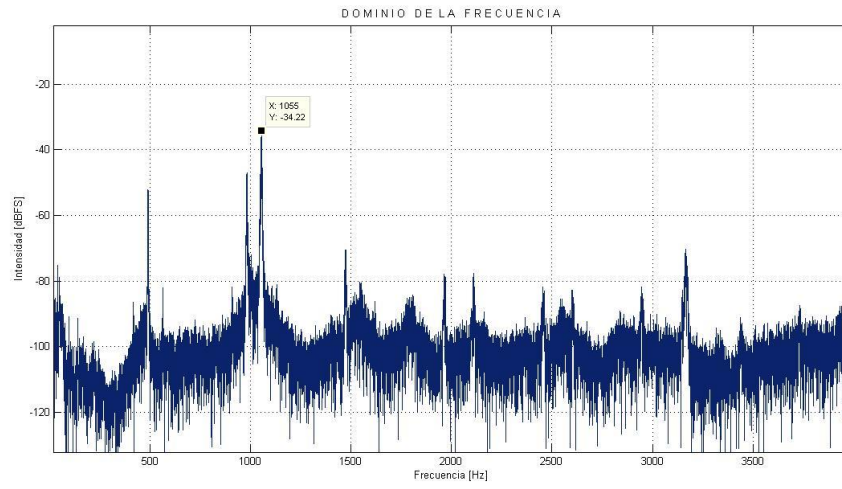
Tercer Parcial





Segundo Parcial

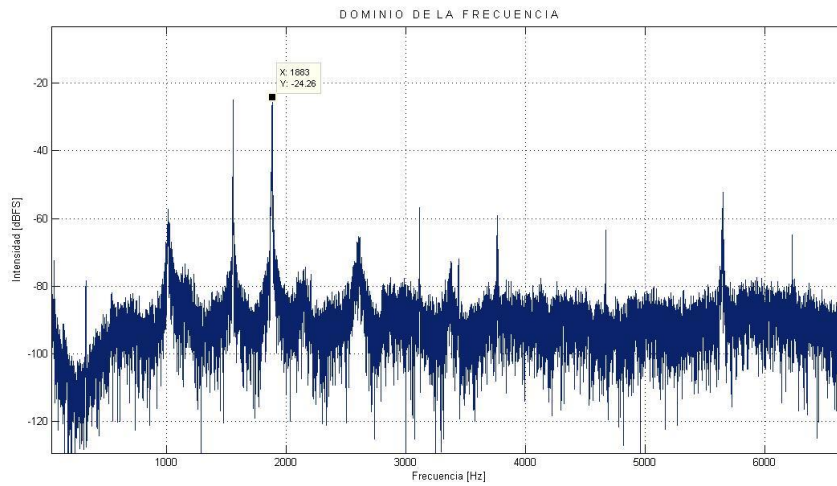
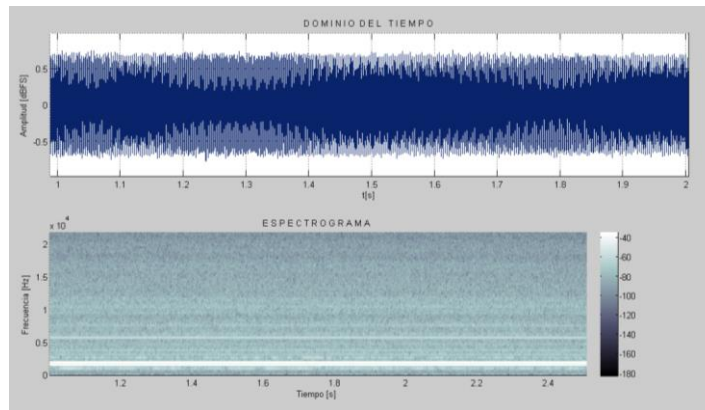
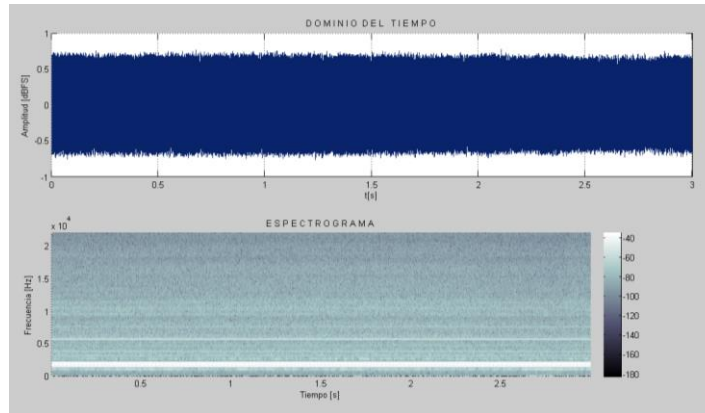




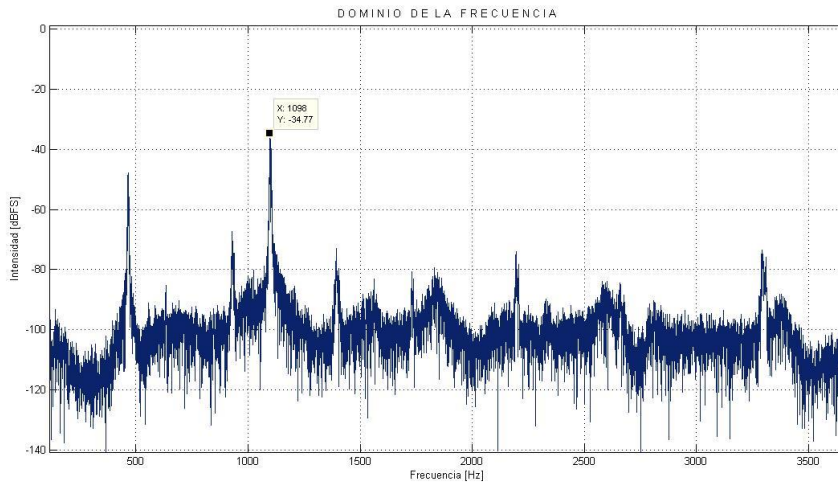
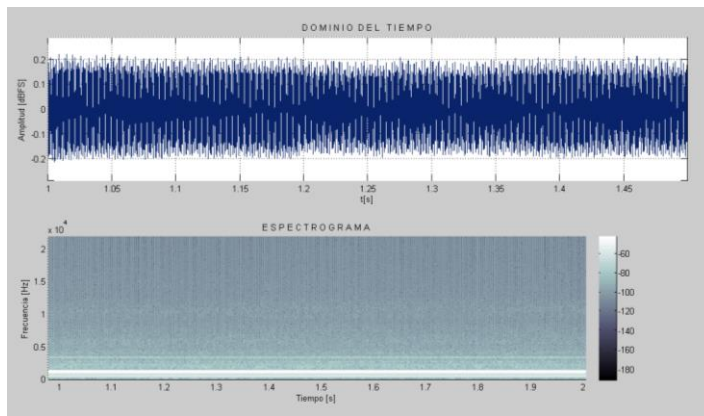
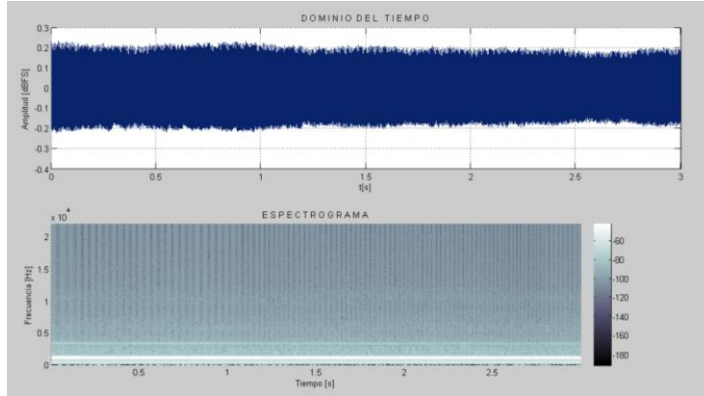
Flautas 1 y 2 obturando orificio 2 de F2



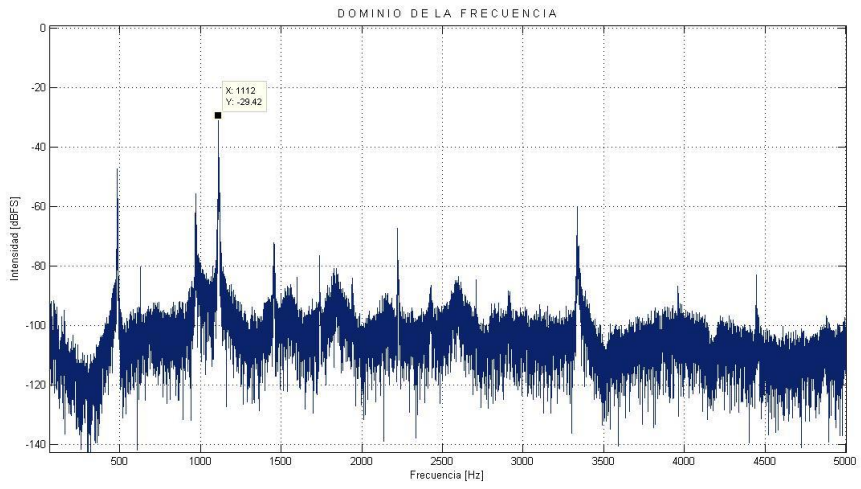
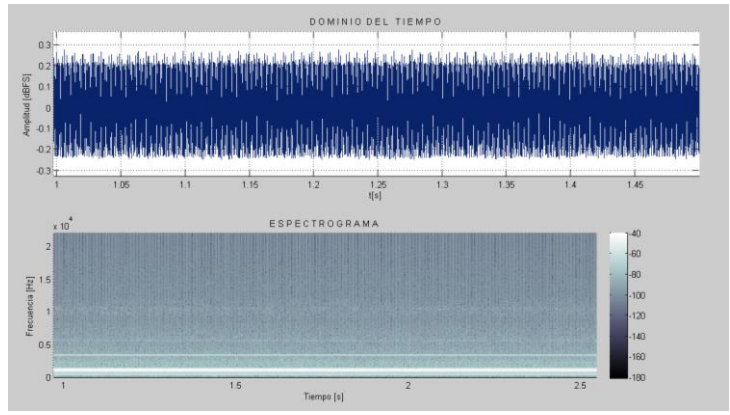
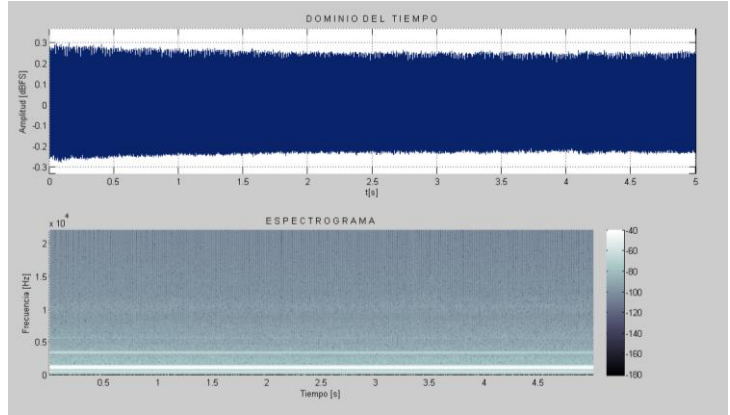
Cuarto Parcial



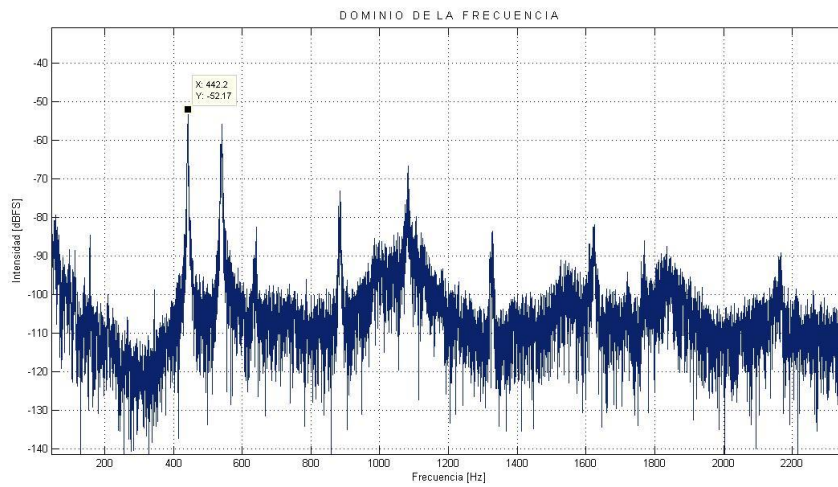
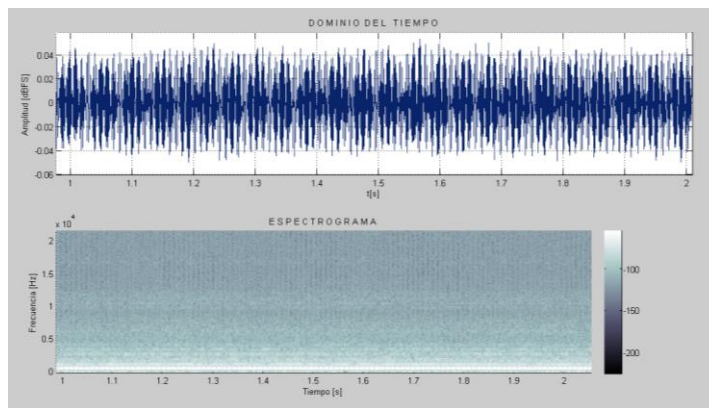
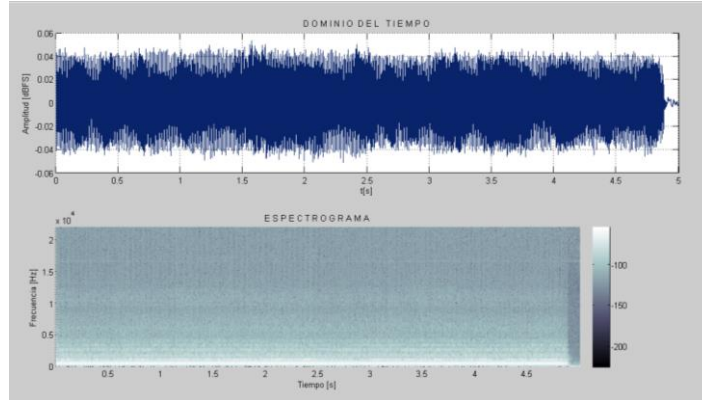
Primer Parcial



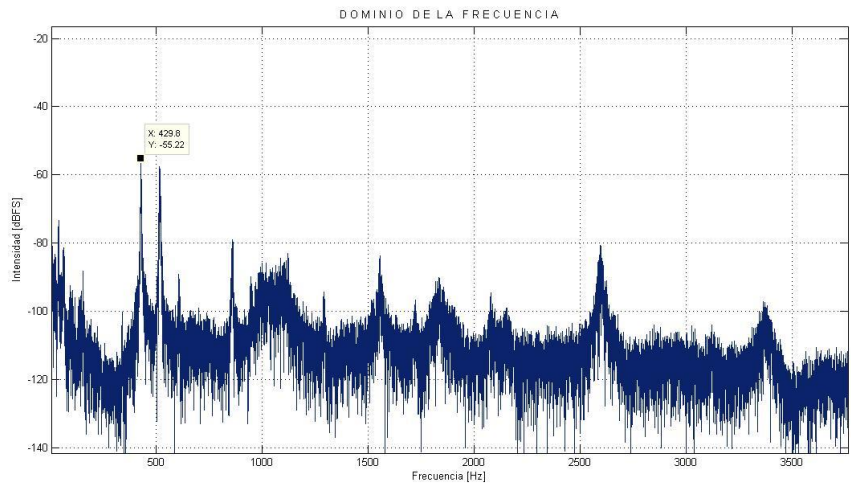
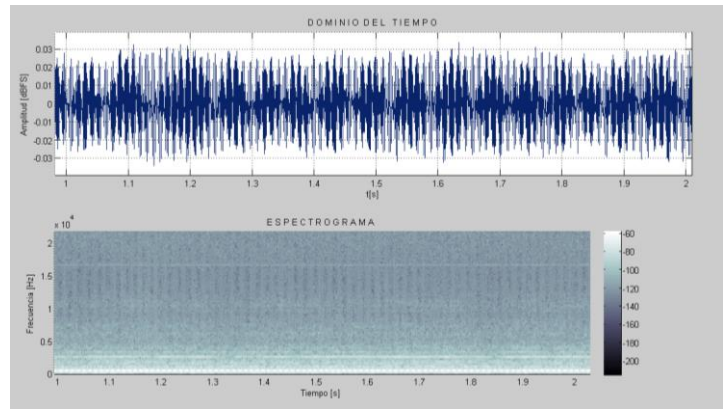
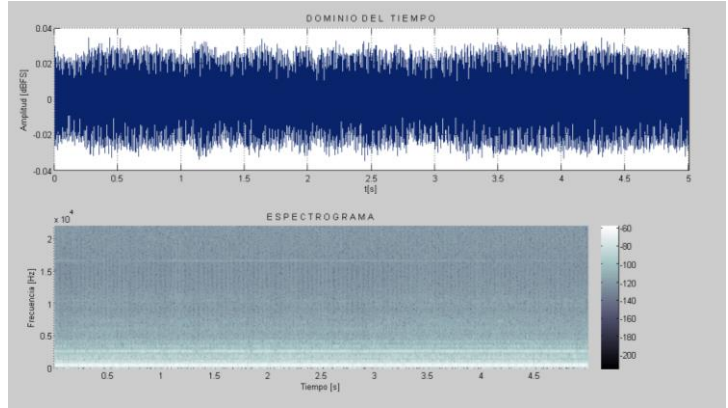
Segundo Parcial



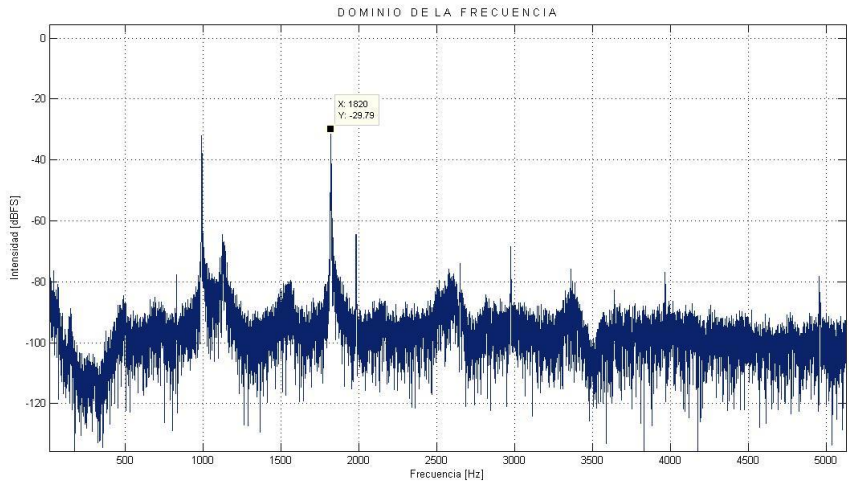
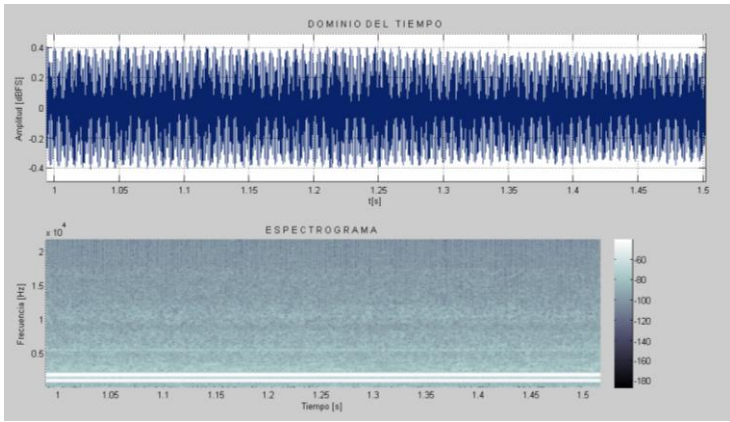
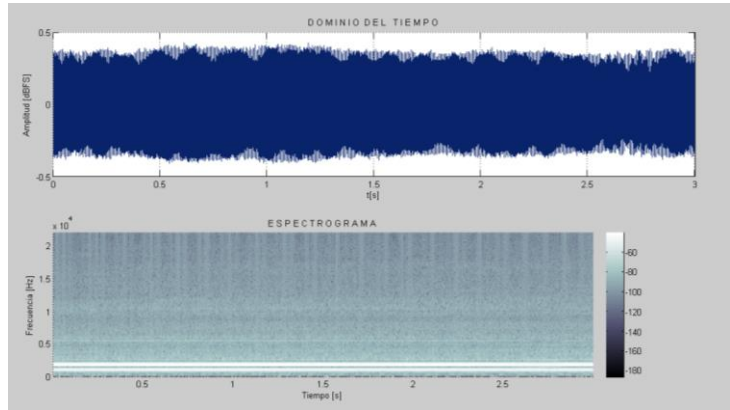
Sonido Medio



Sonido Suave



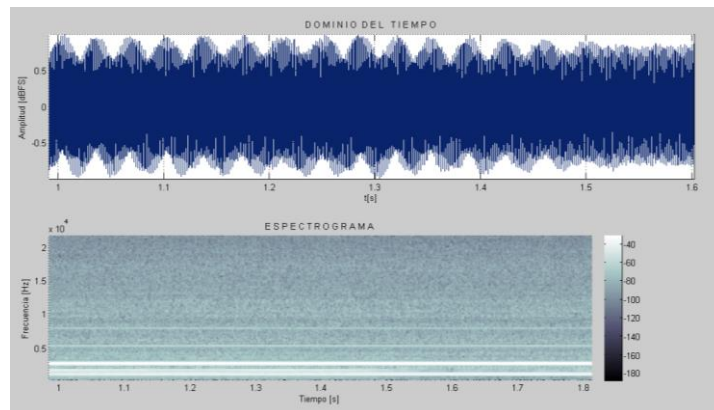
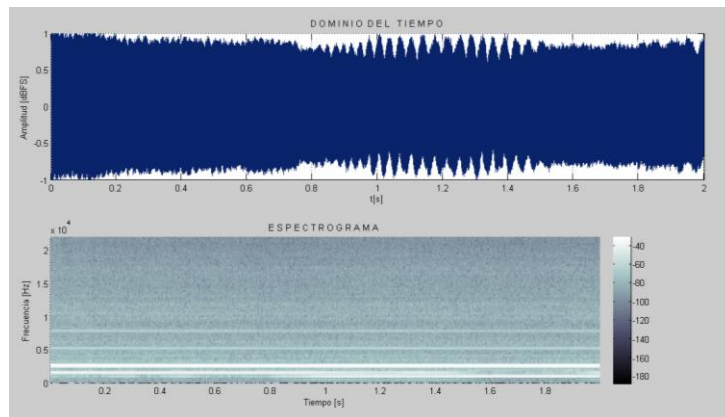
Tercer Parcial

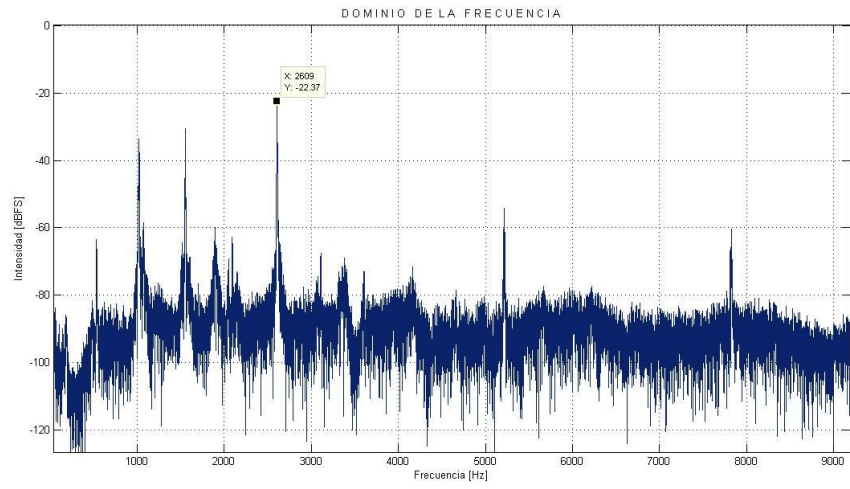


Flautas 1 y 2 orificios destapados

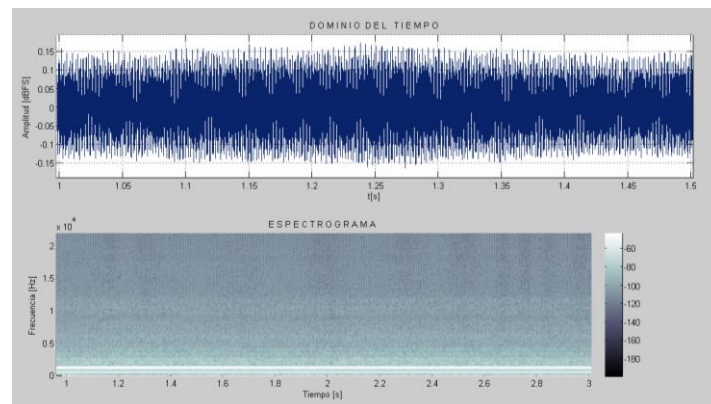
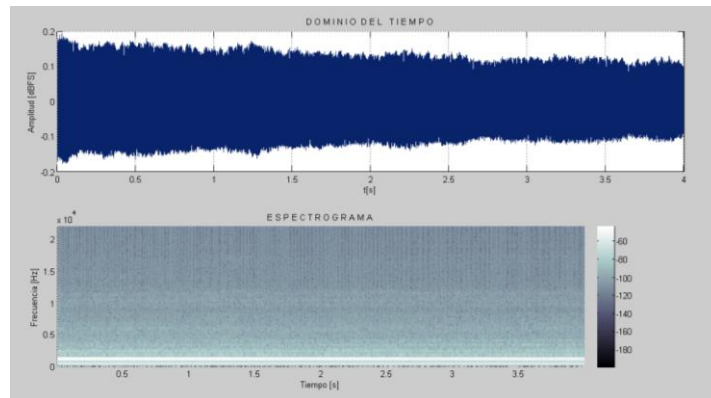


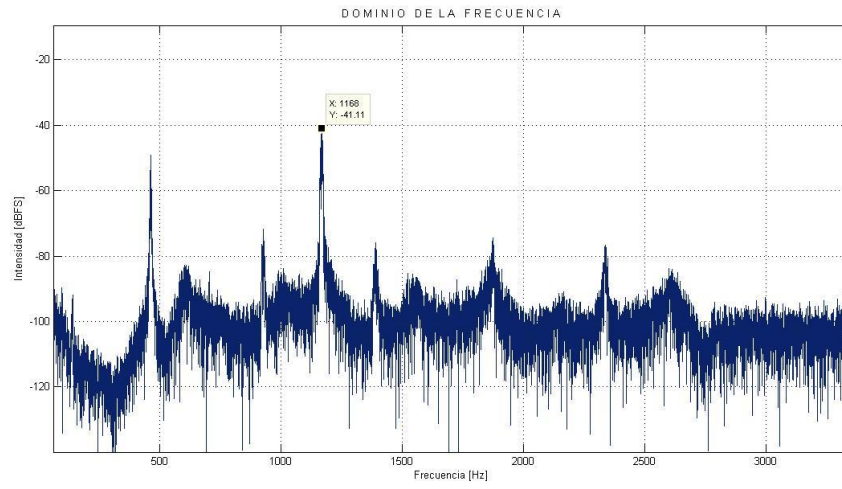
Cuarto Parcial



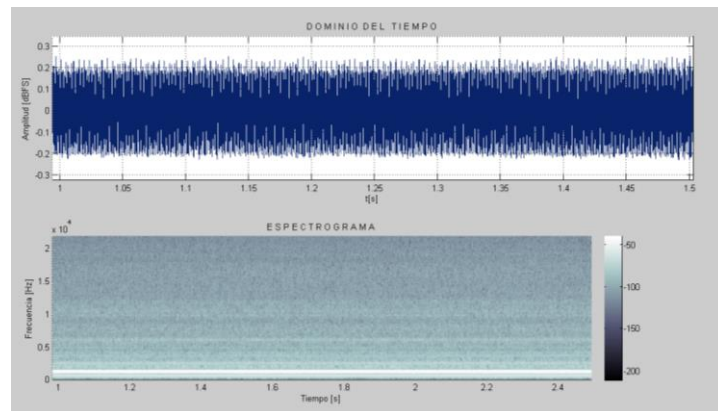
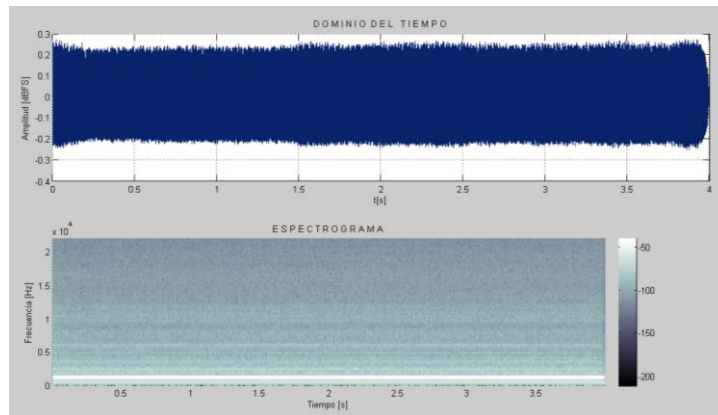


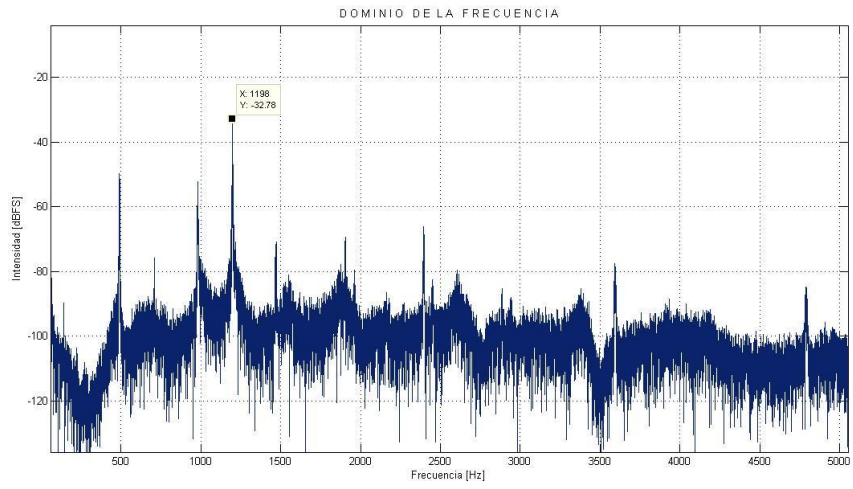
Primer Parcial



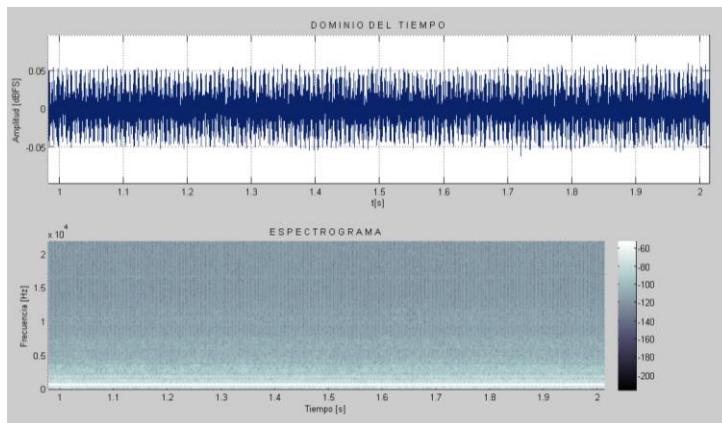
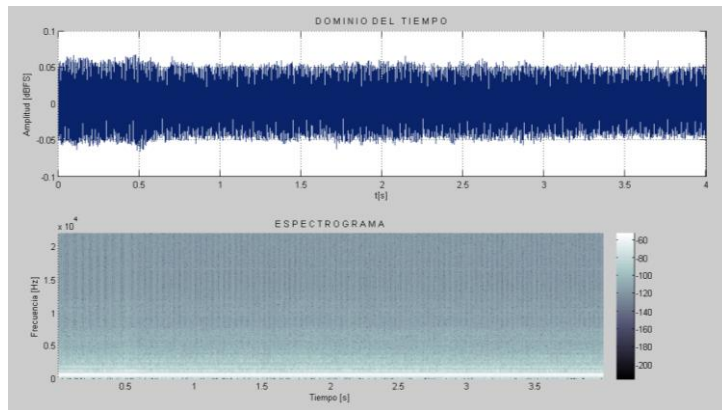


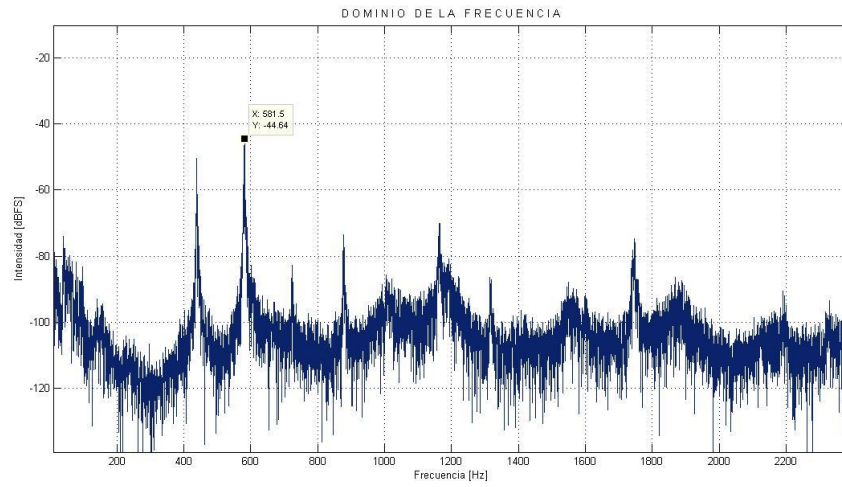
Segundo Parcial



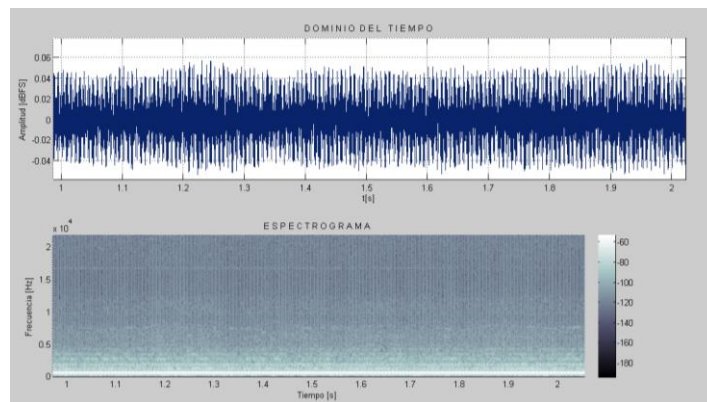
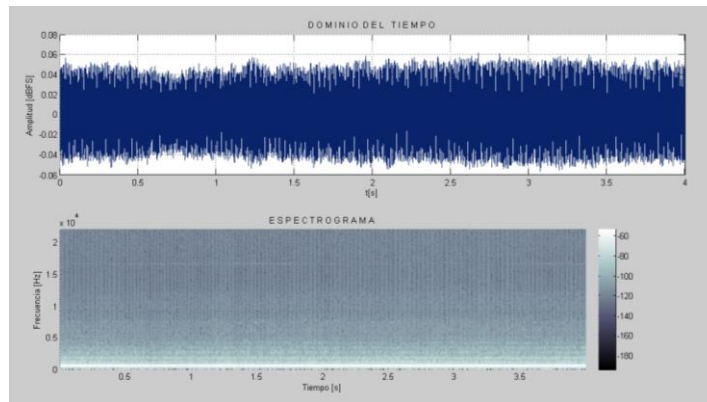


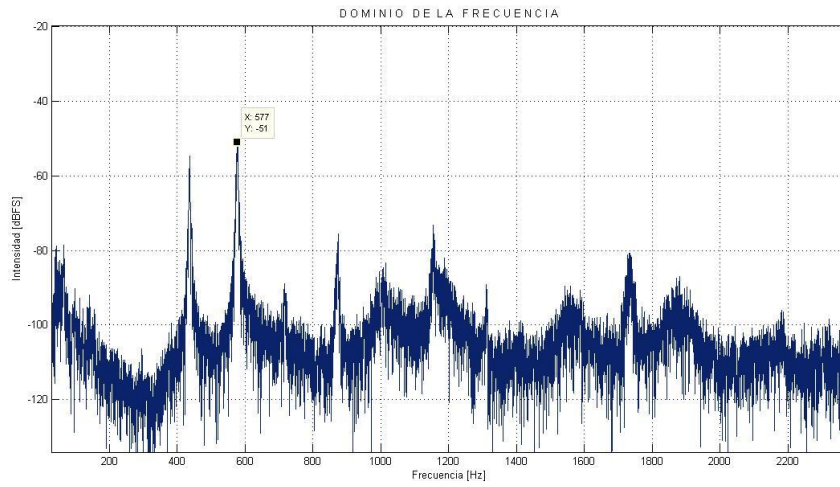
Sonido Medio



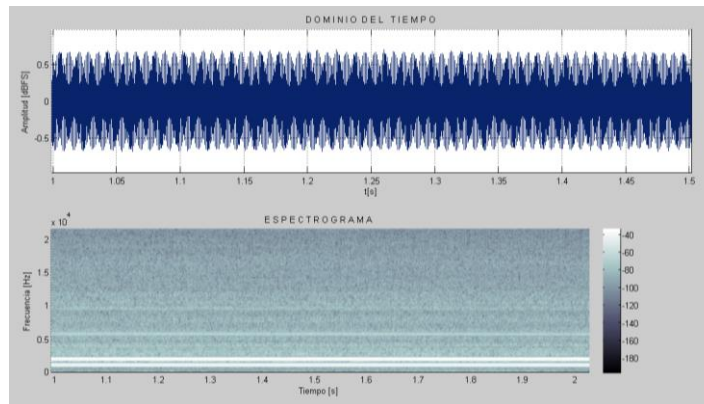
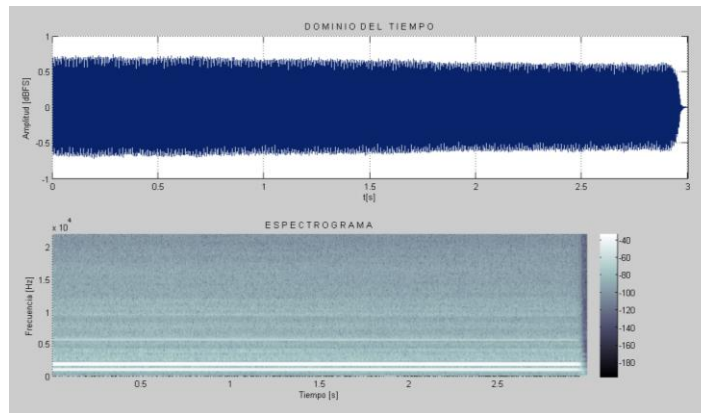


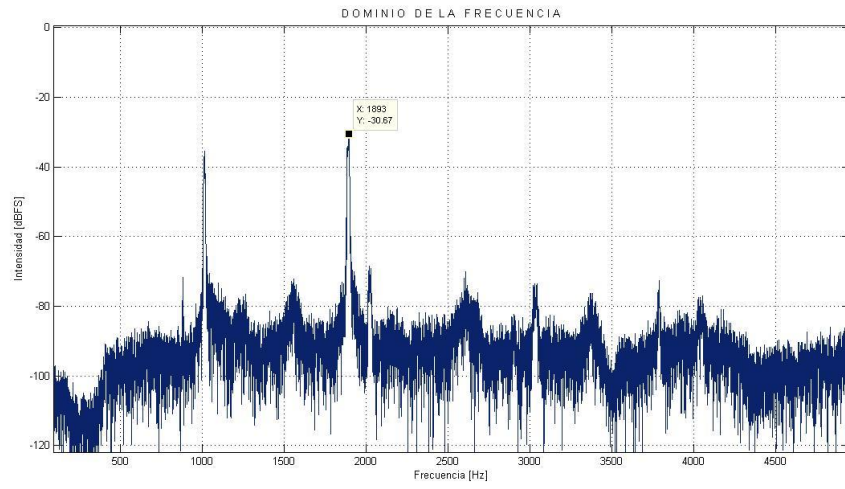
Sonido Suave





Tercer Parcial

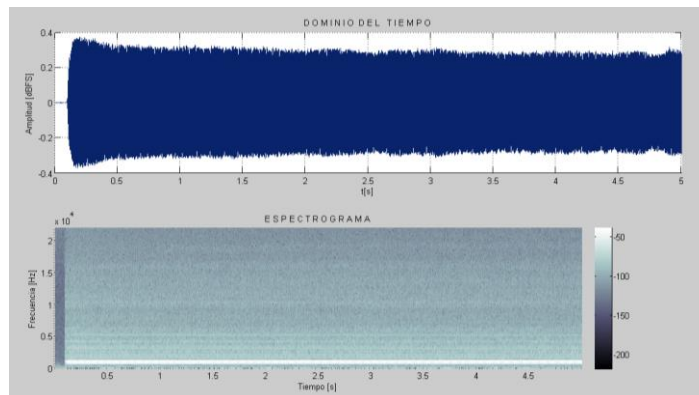


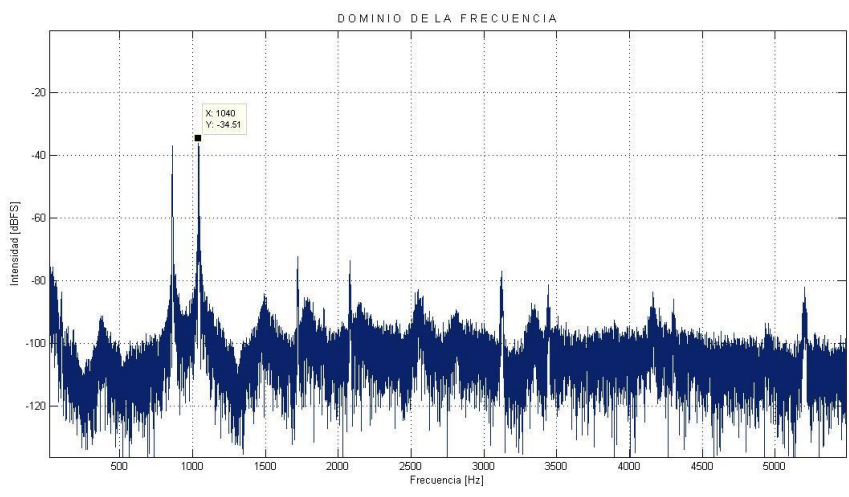
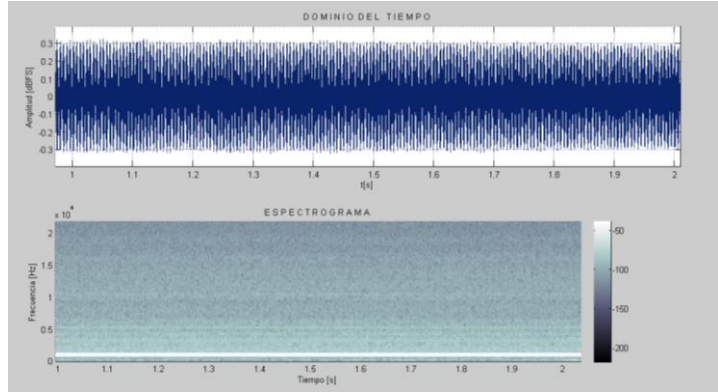


Flautas 1 y 2 tapando orificios

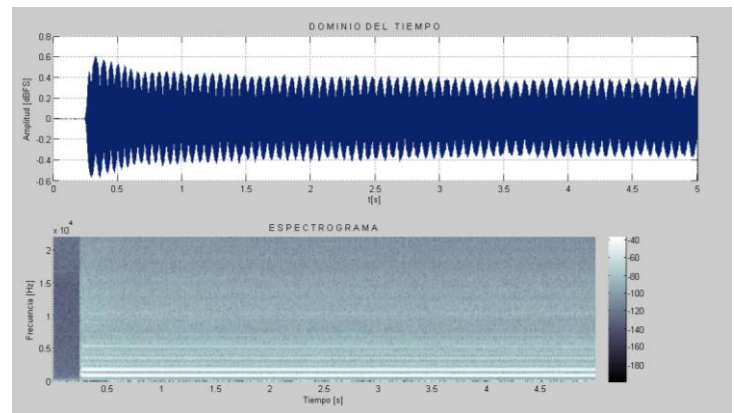


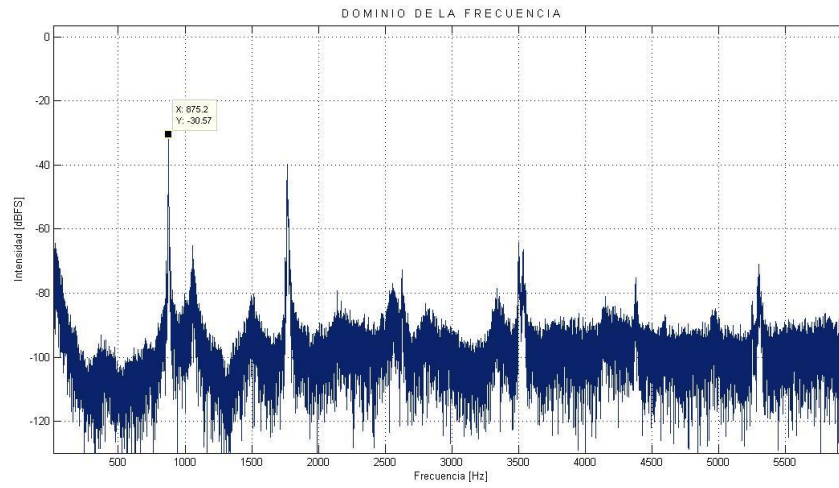
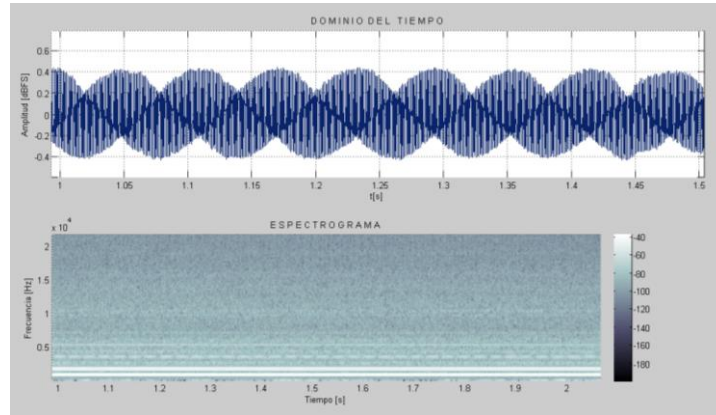
Primer Parcial



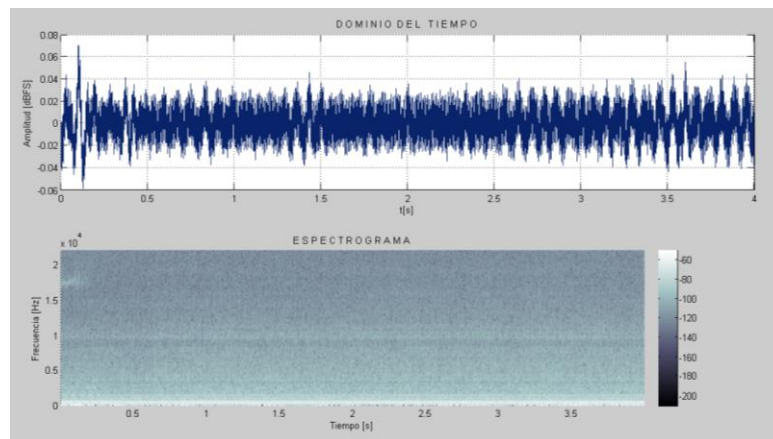


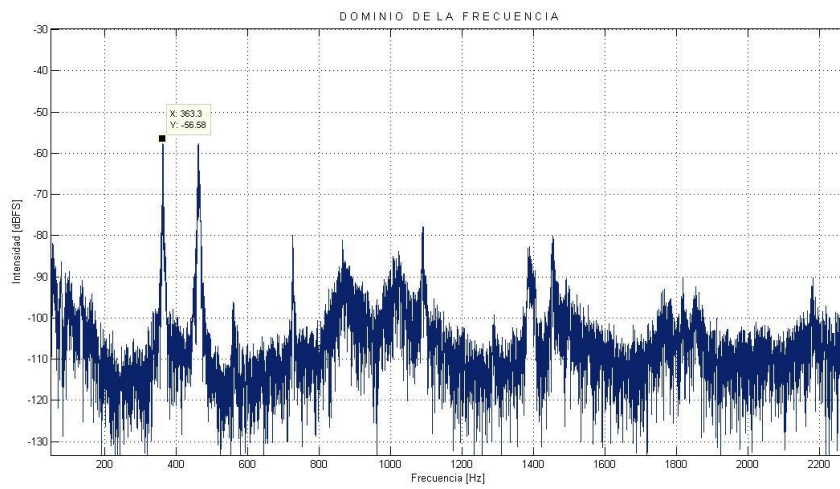
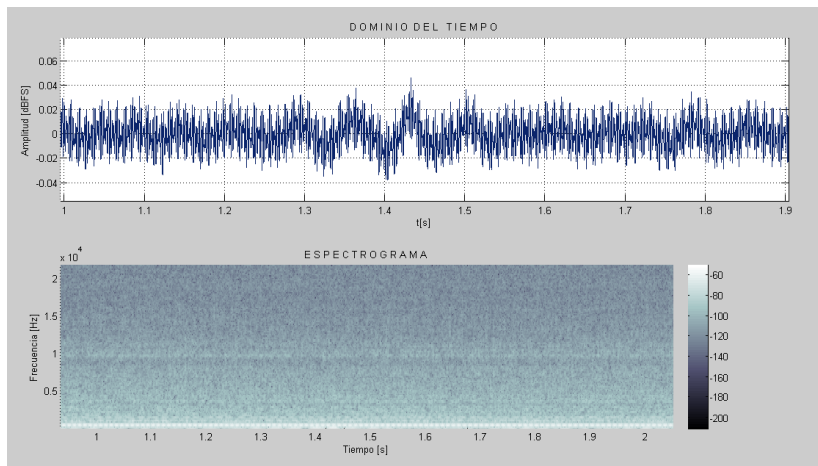
Segundo Parcial



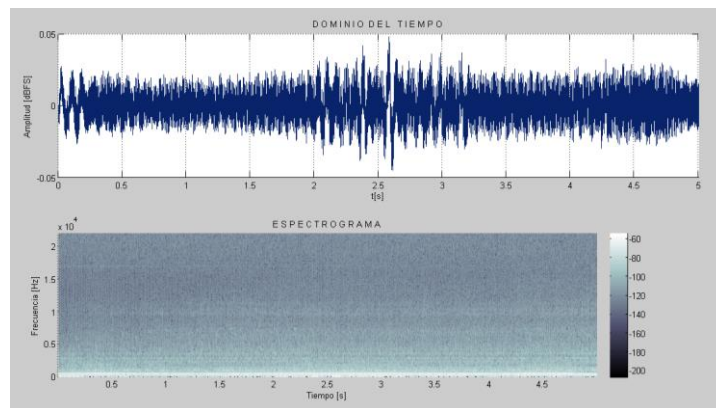


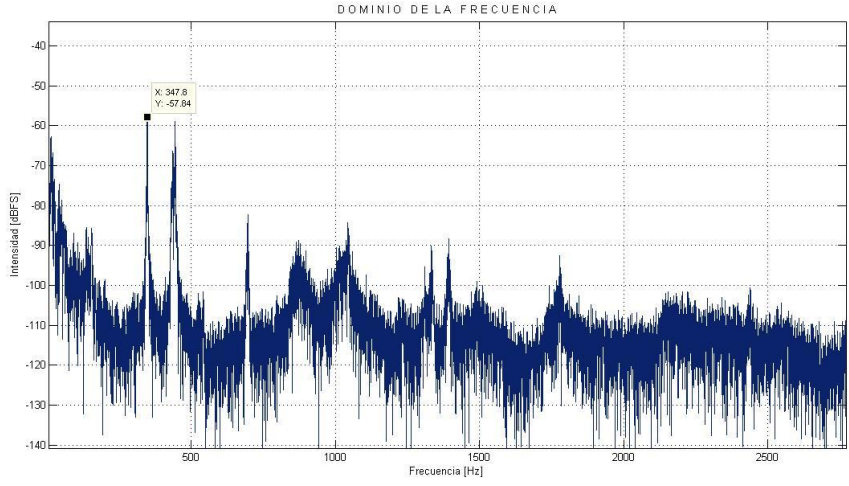
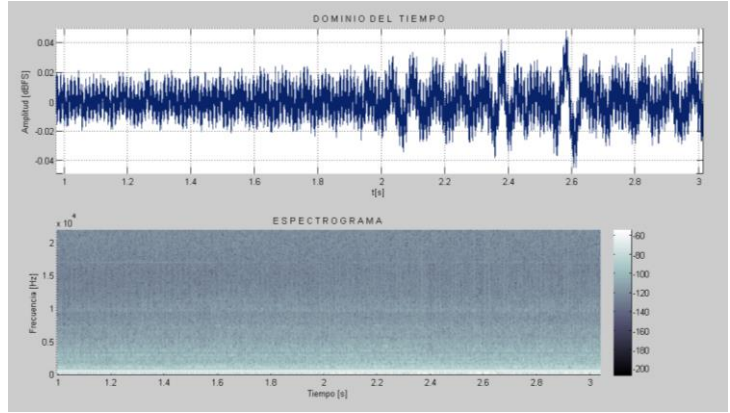
Sonido Medio



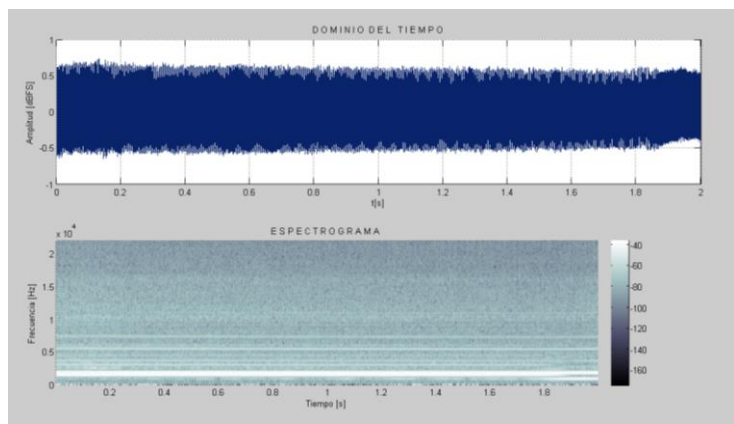


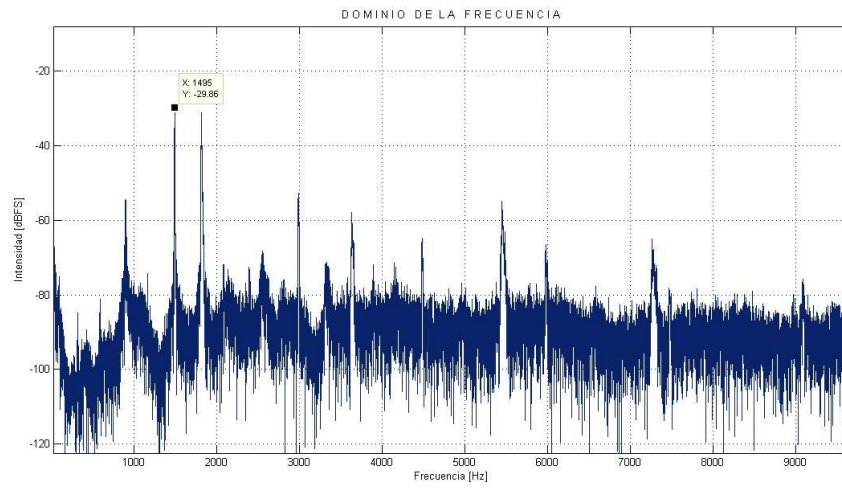
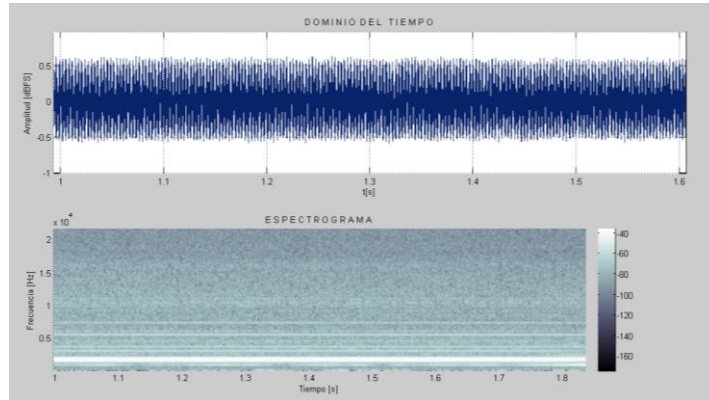
Sonido Suave





Tercer Parcial



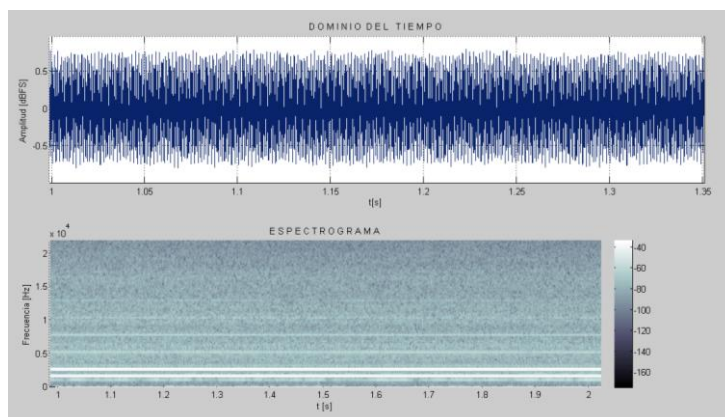
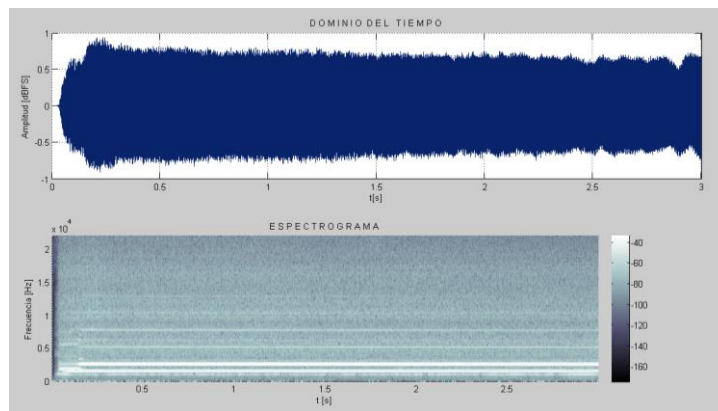


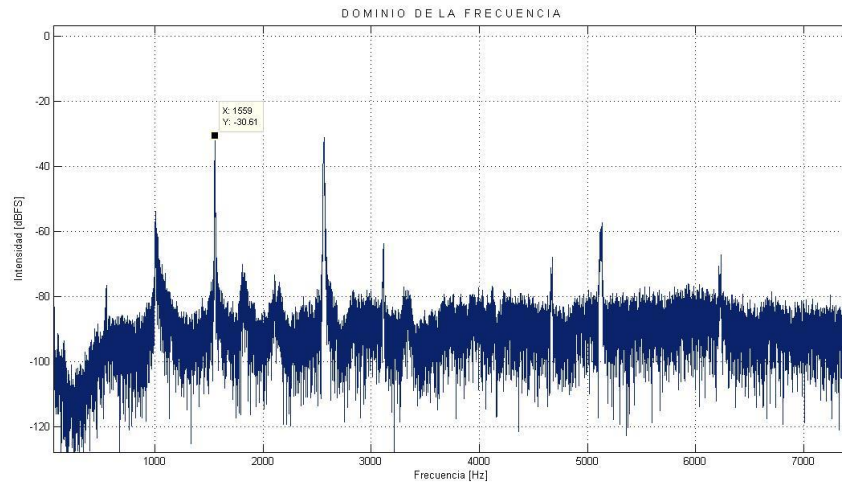
GRABACIÓN 3: FLAUTAS 2 Y 3

Flautas 2 y 3 destapando orificio 3 de F2

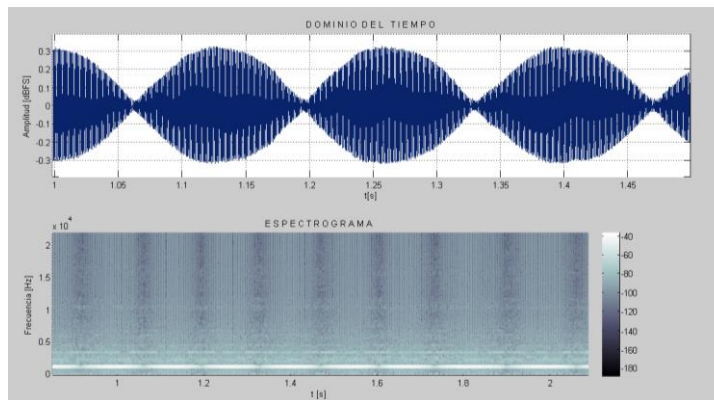
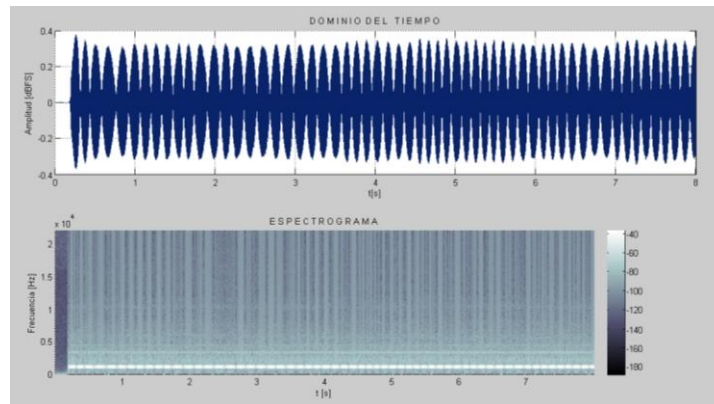


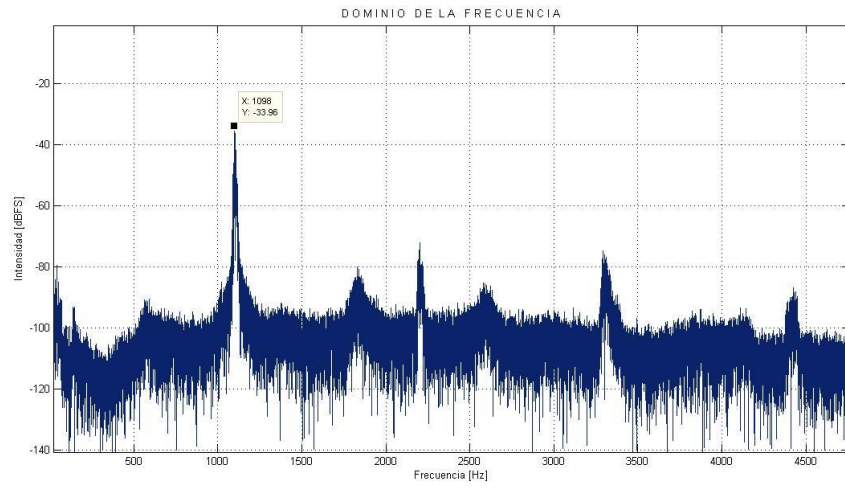
Cuarto Parcial



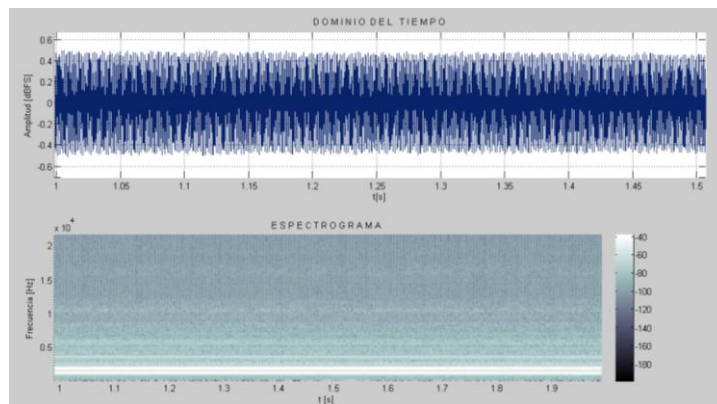
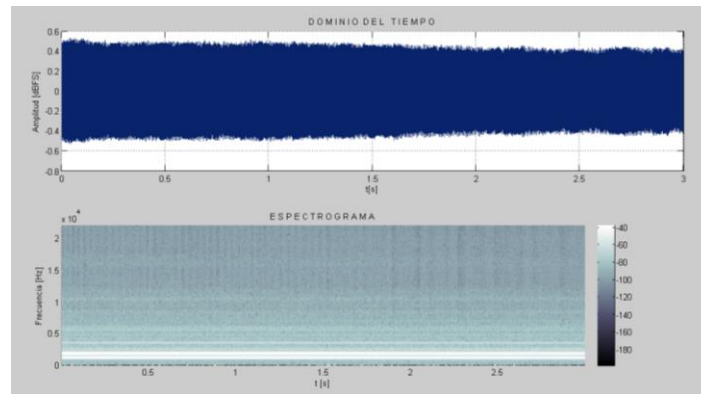


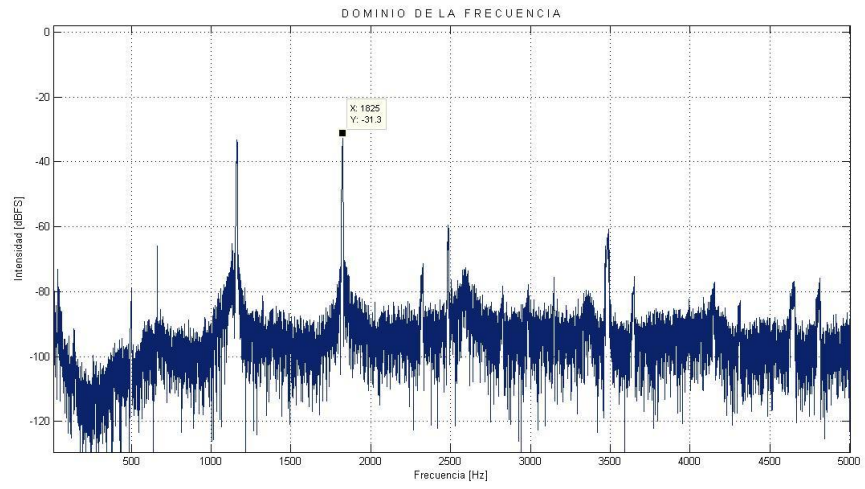
Primer Parcial



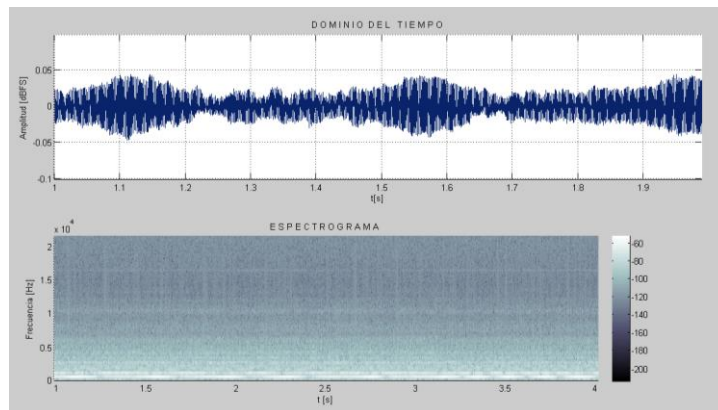
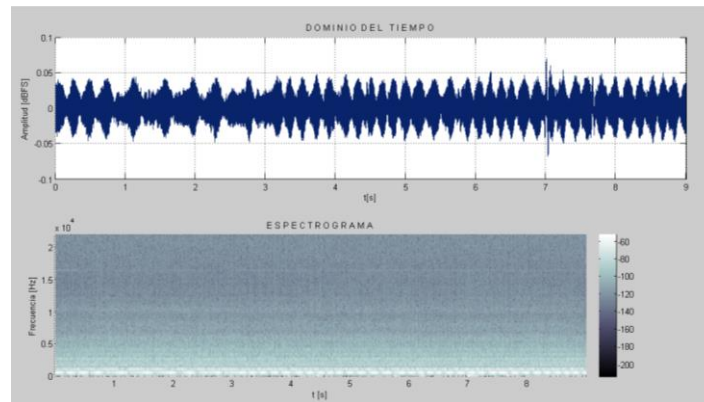


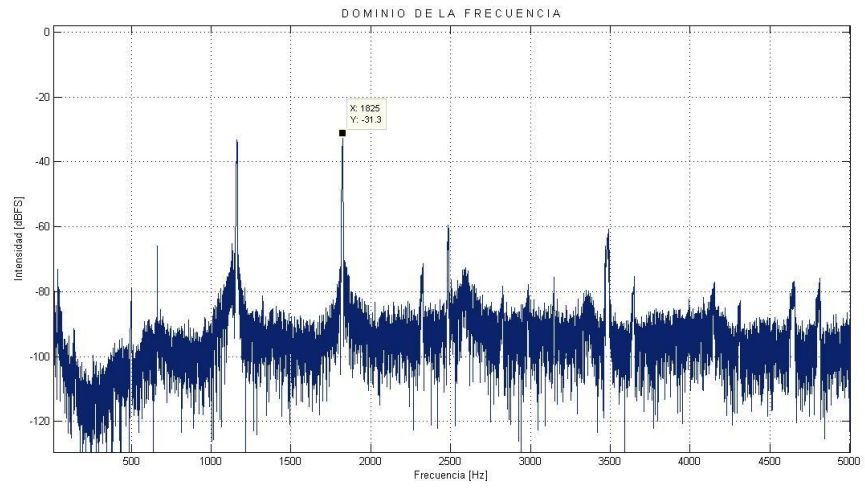
Segundo Parcial



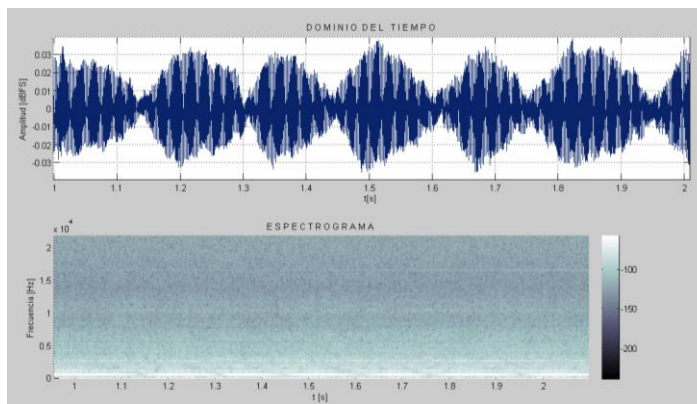
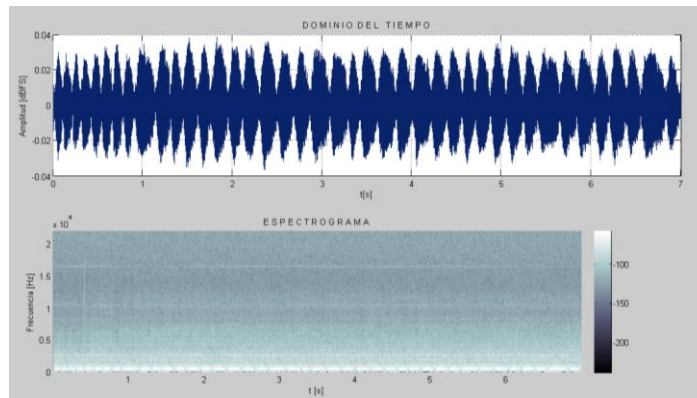


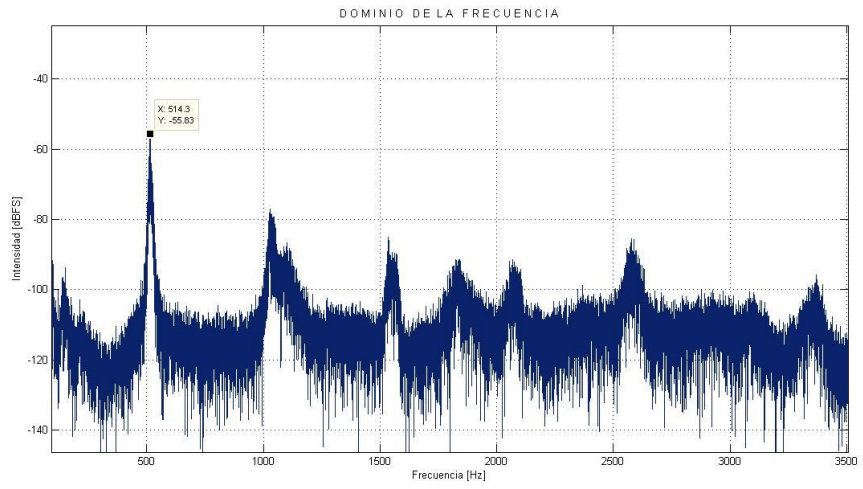
Sonido Medio



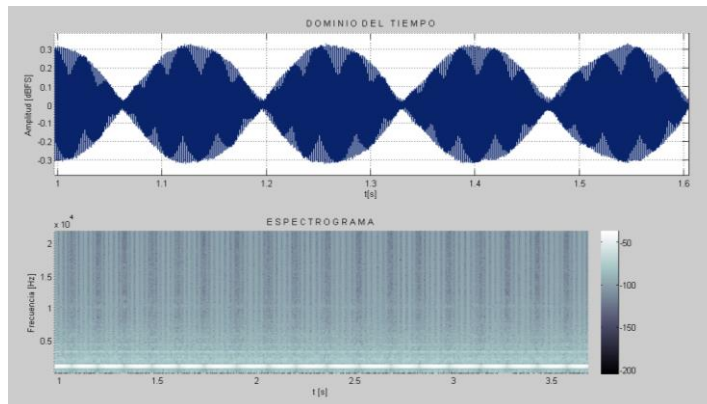
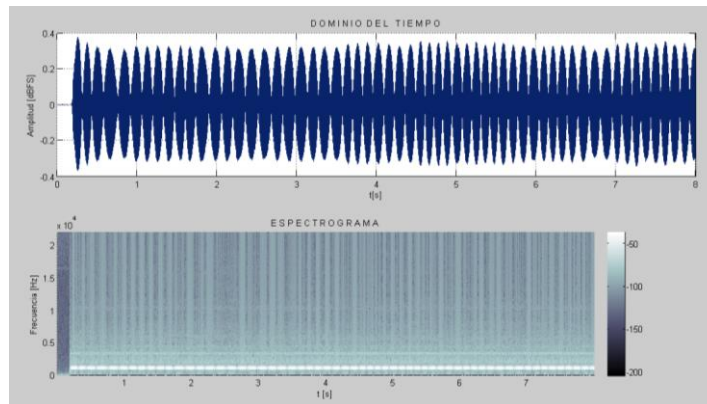


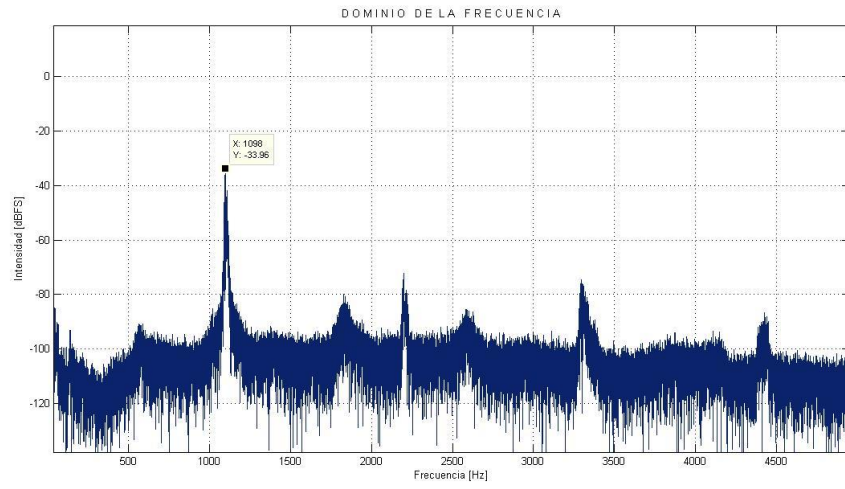
Sonido Suave



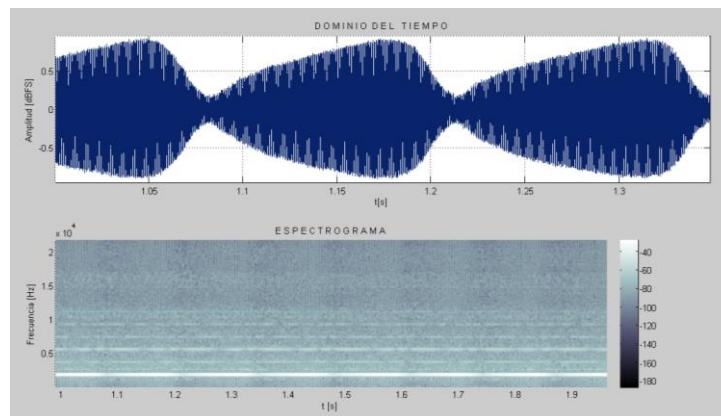
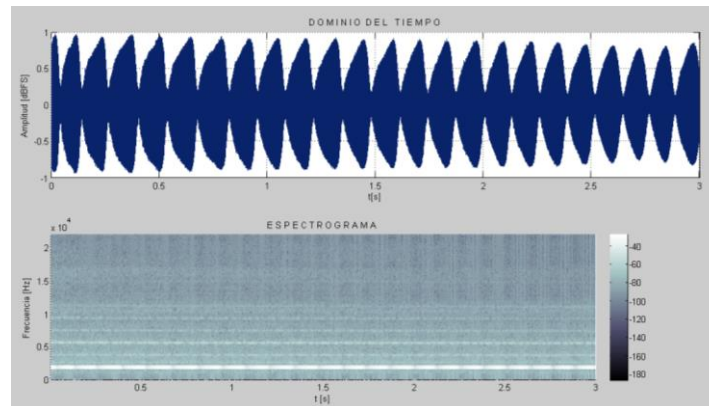


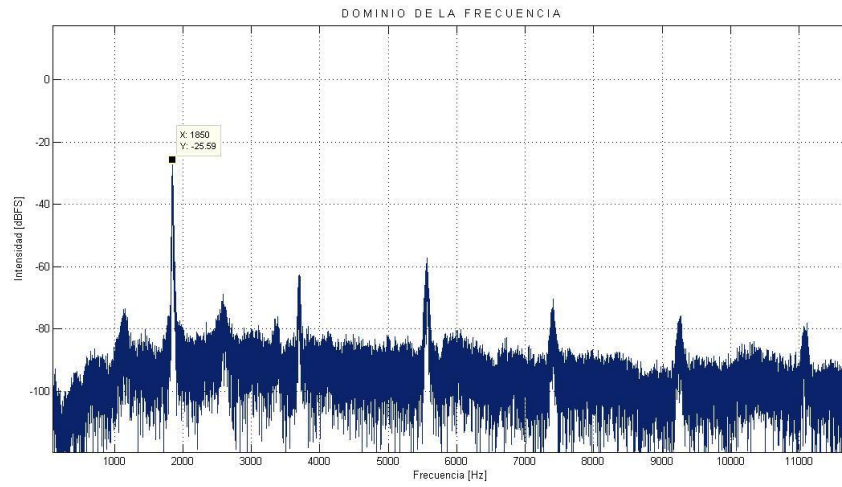
Primer Parcial





Tercer Parcial

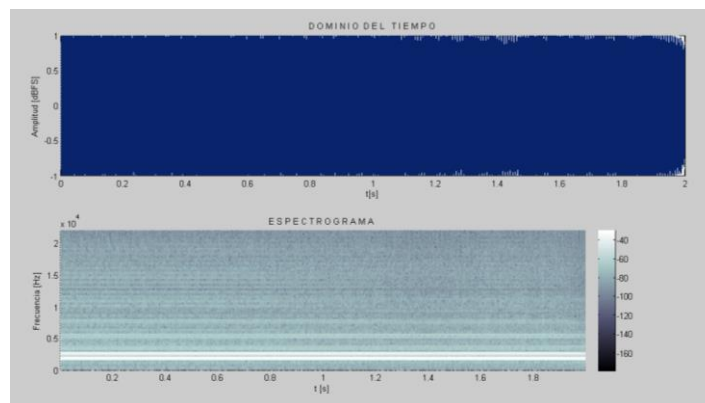


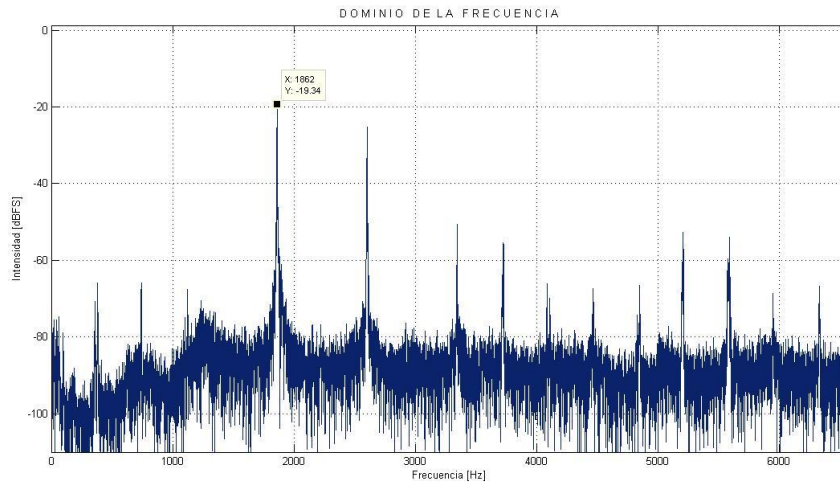
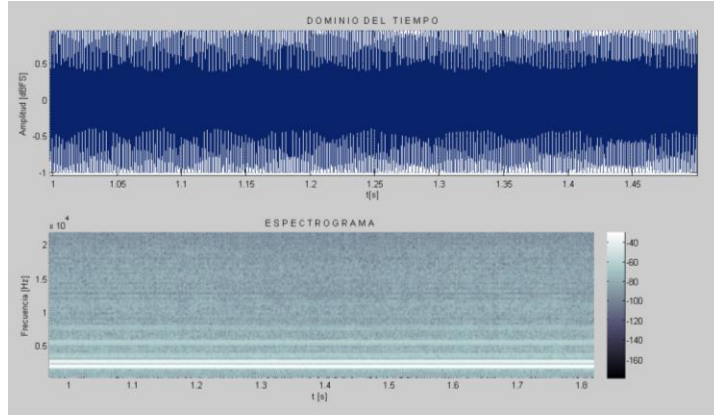


Flautas 2 y 3 obturando 4 y 5 de F3

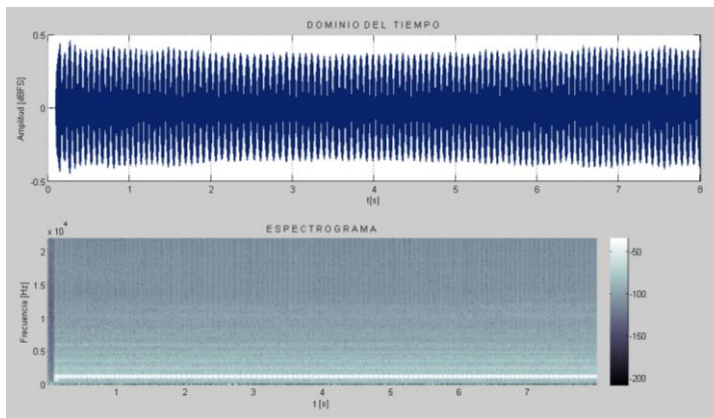


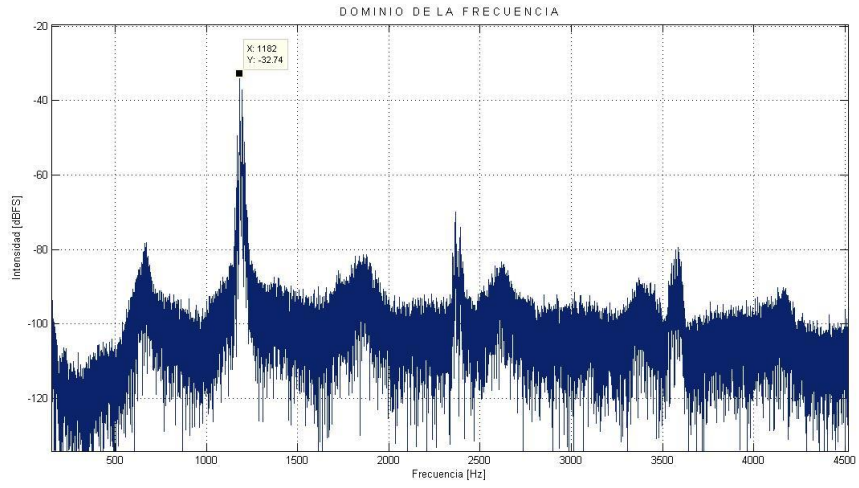
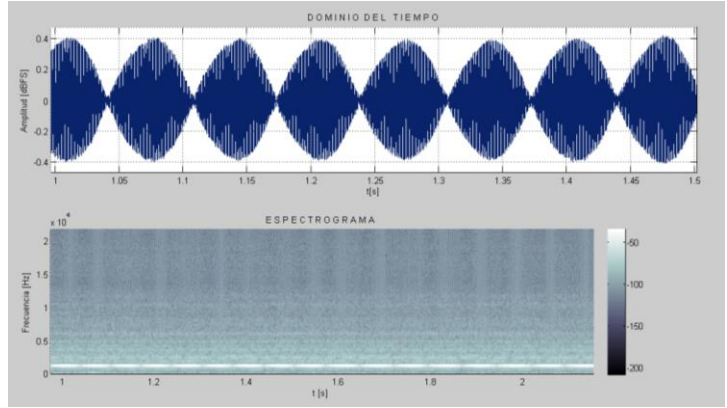
Cuarto Parcial



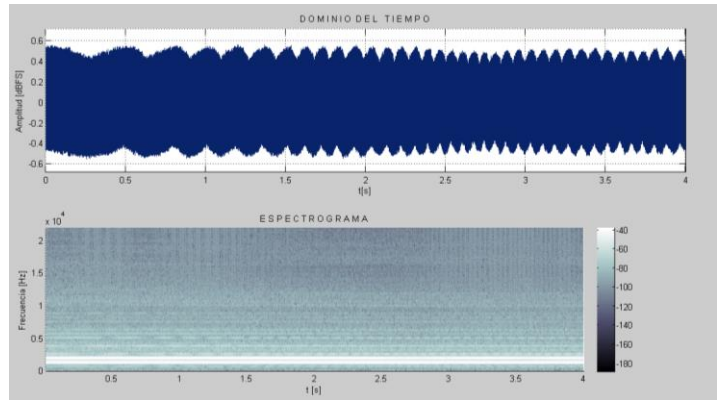


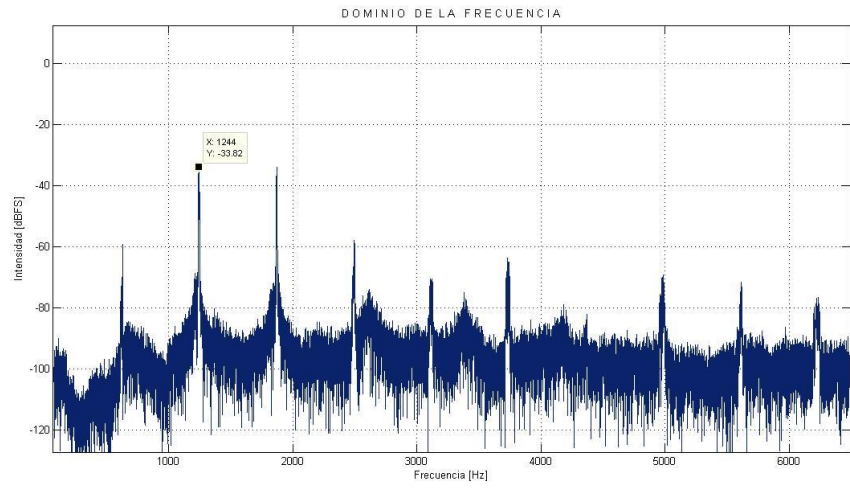
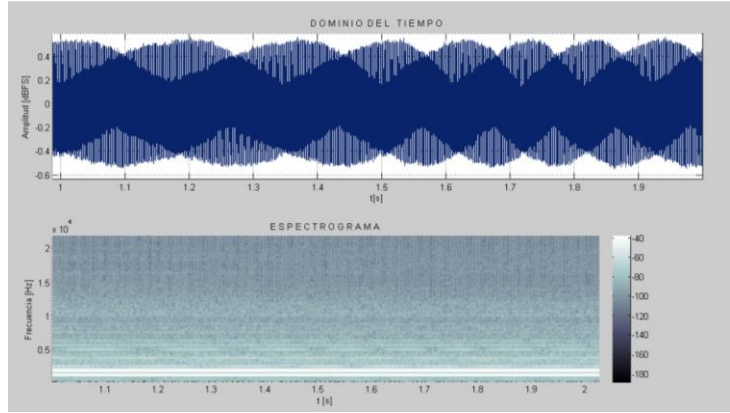
Primer Parcial



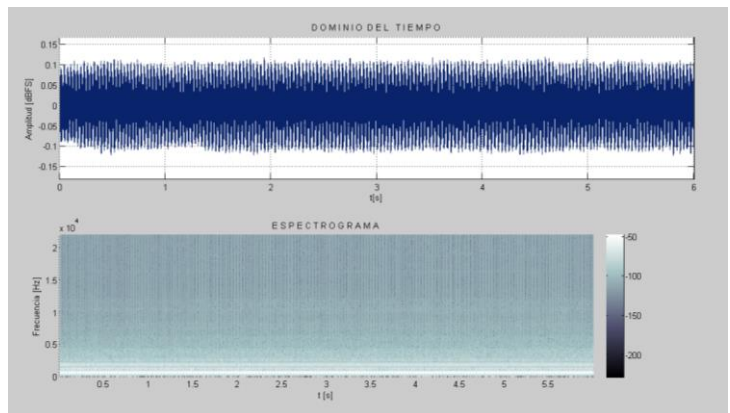


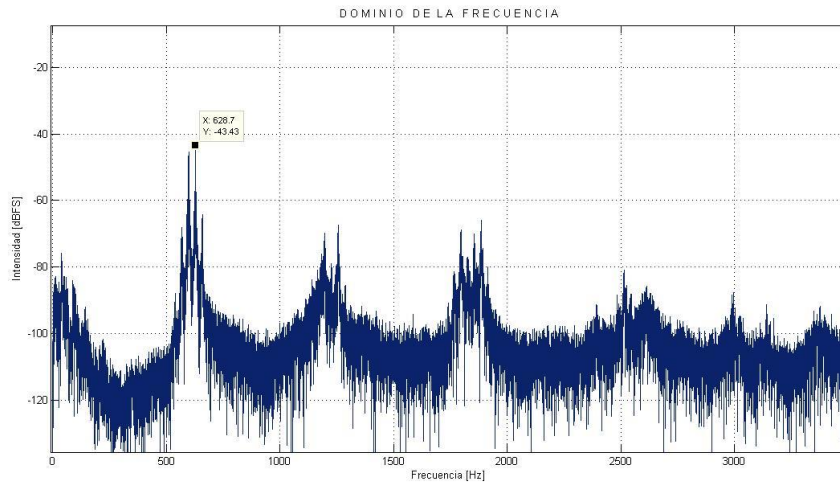
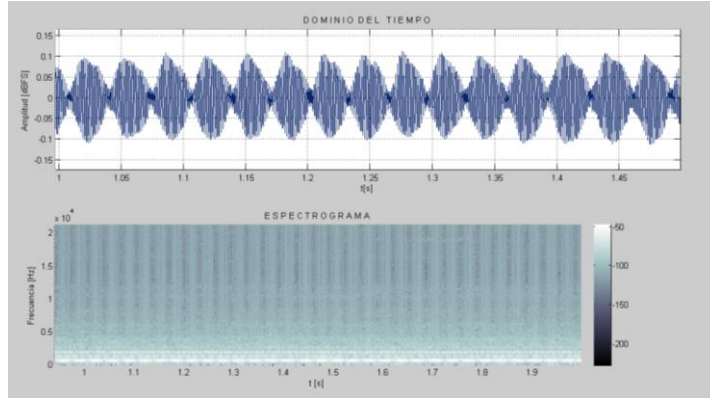
Segundo Parcial



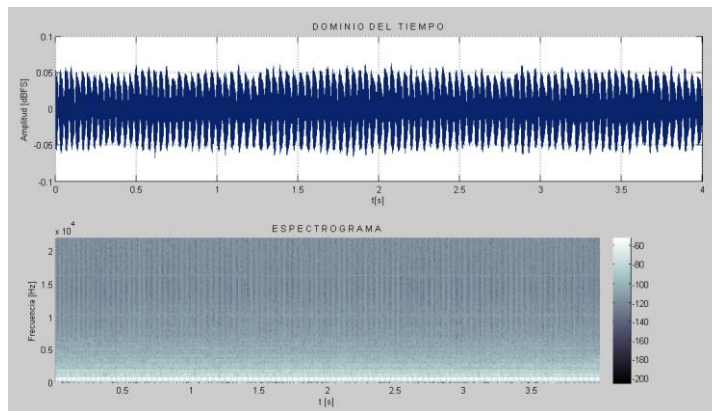


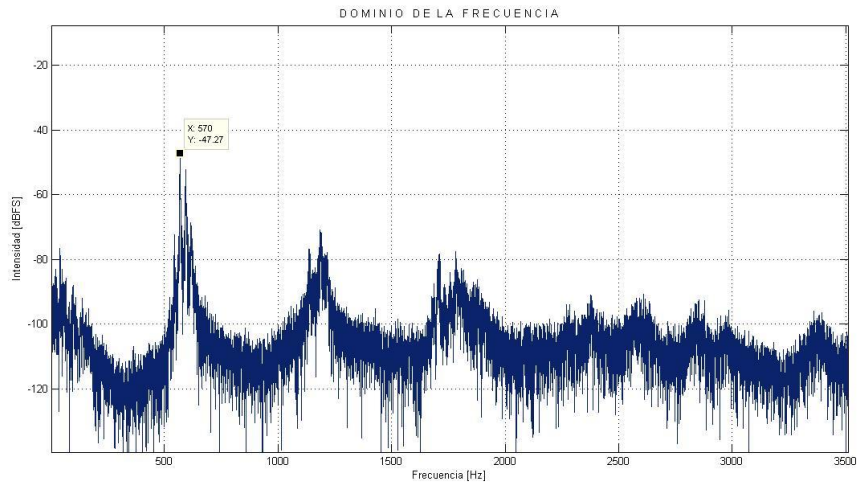
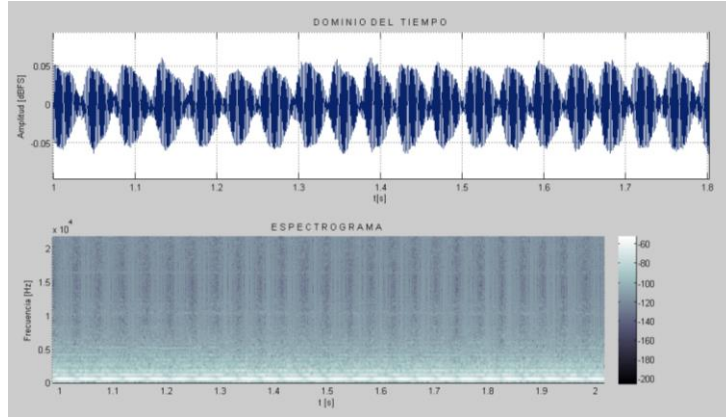
Sonido Medio



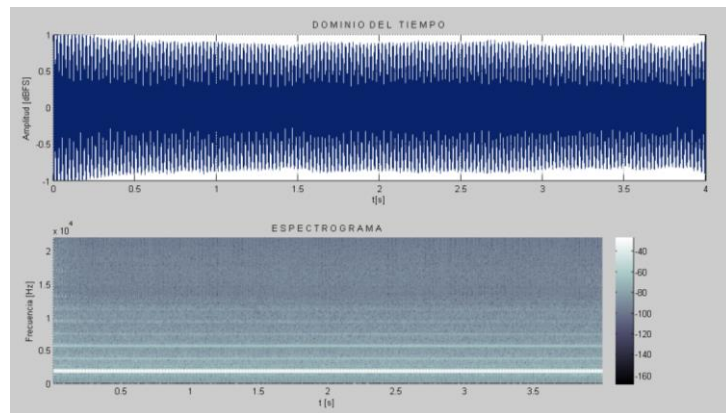


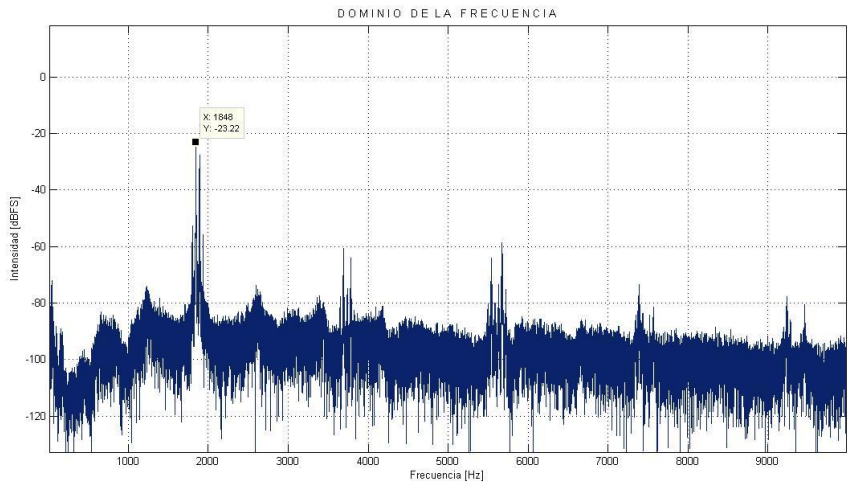
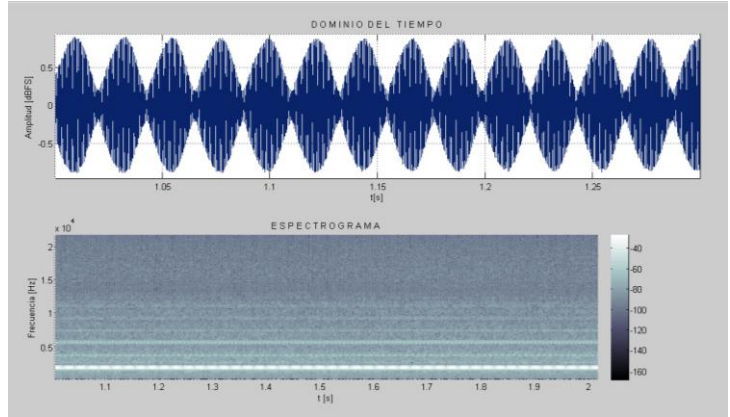
Sonido Suave





Tercer Parcial

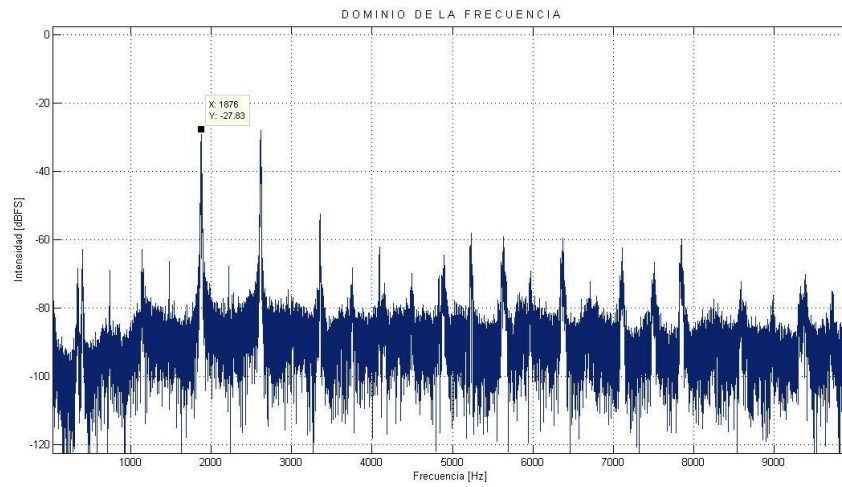
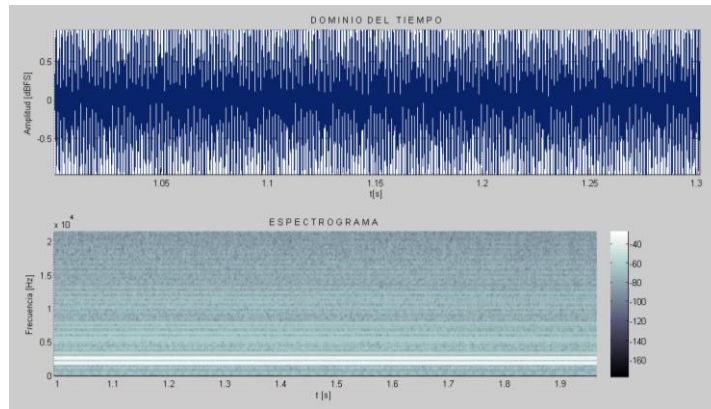
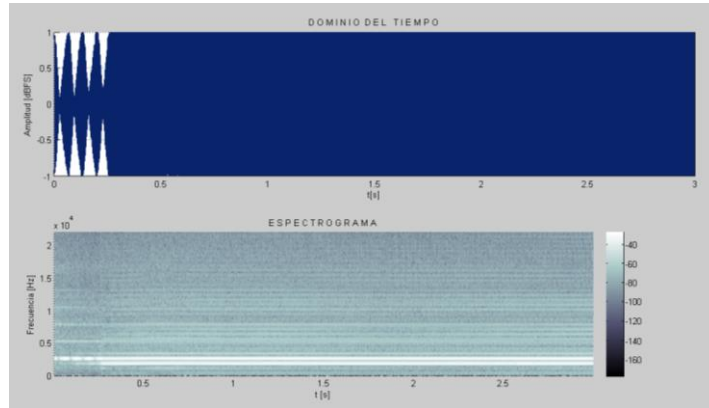




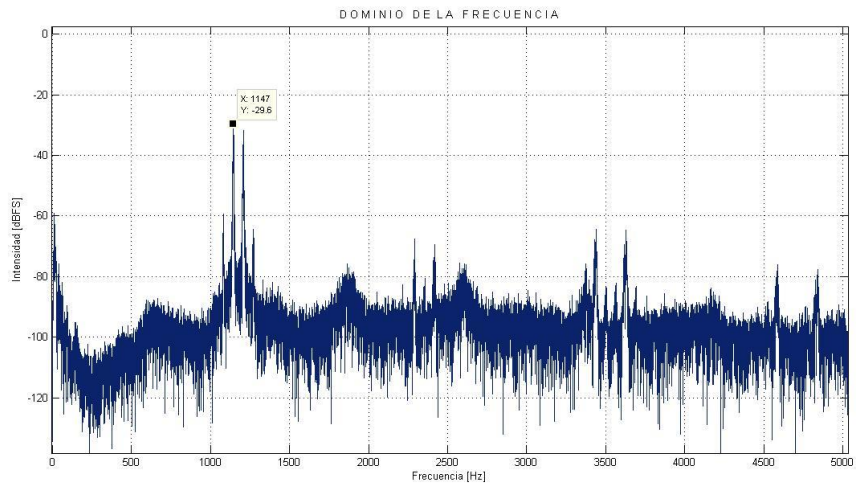
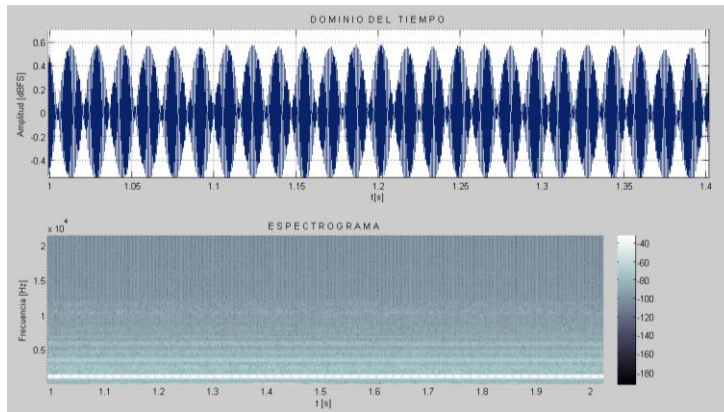
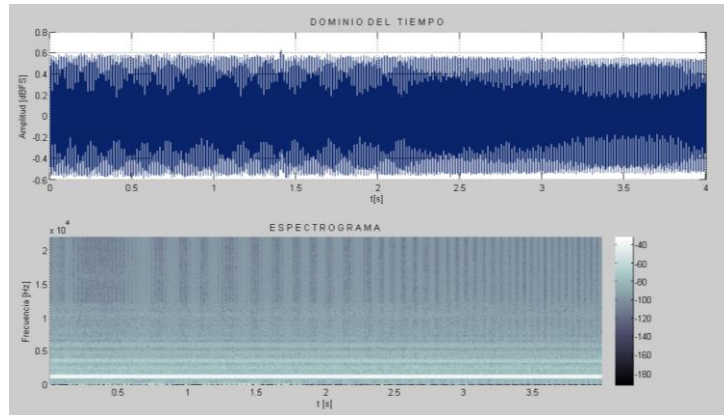
Flautas 2 y 3 obturando 3 orificios de la F3



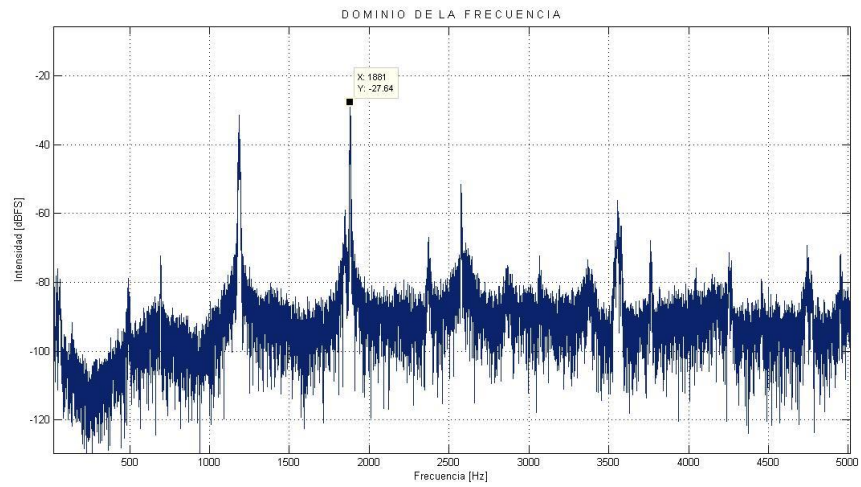
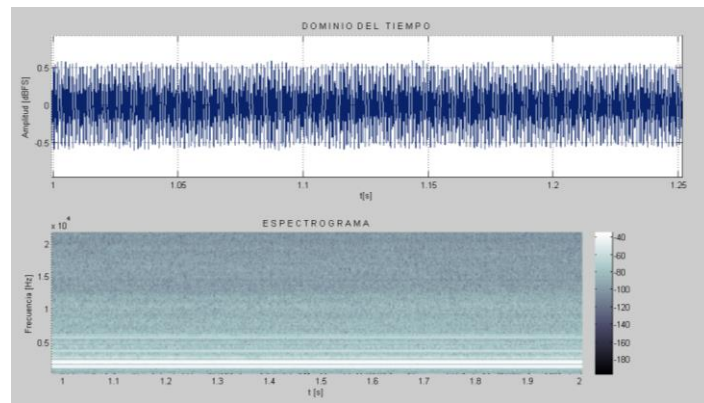
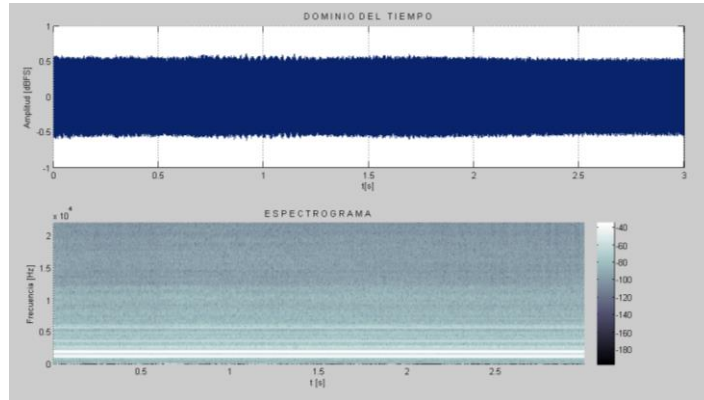
Cuarto Parcial



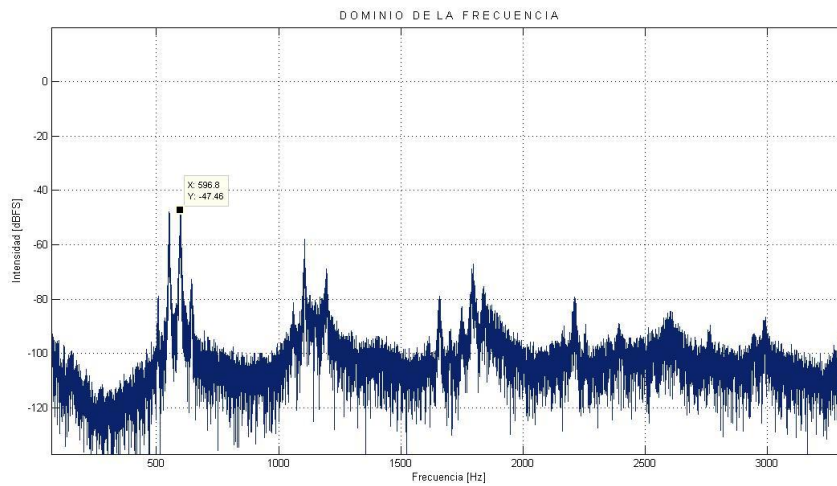
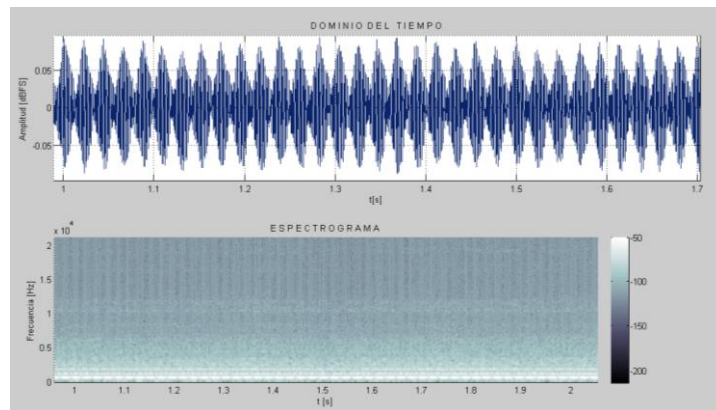
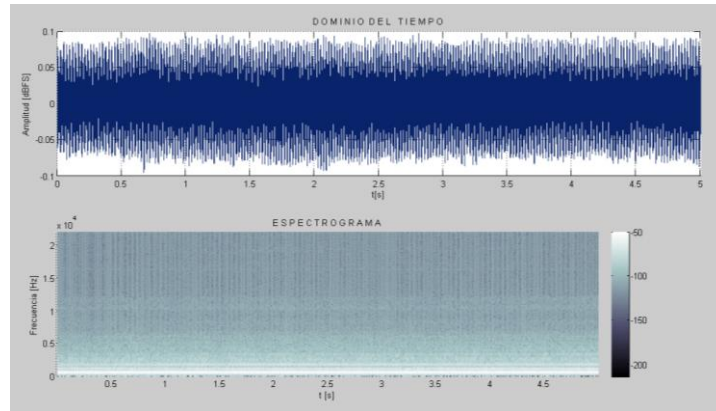
Segundo Parcial



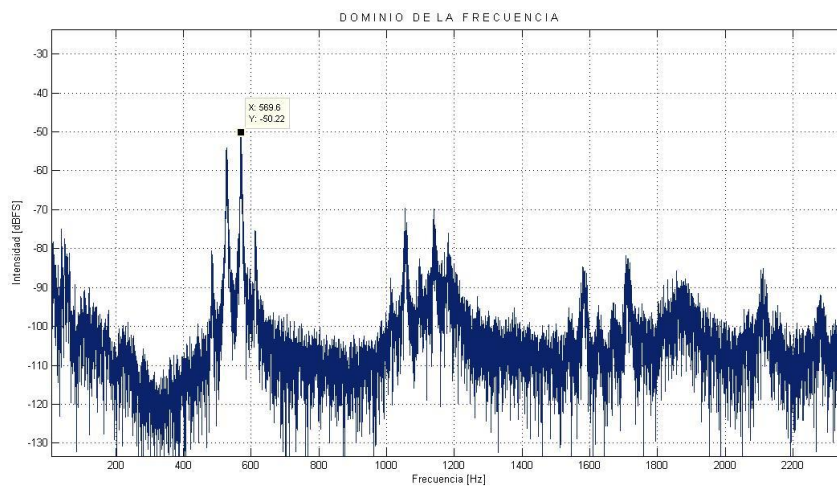
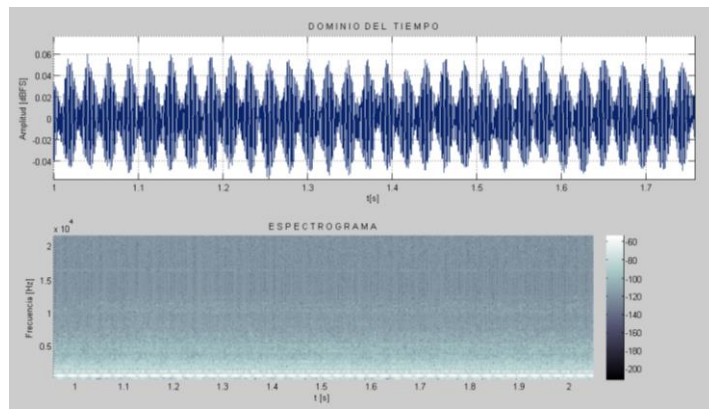
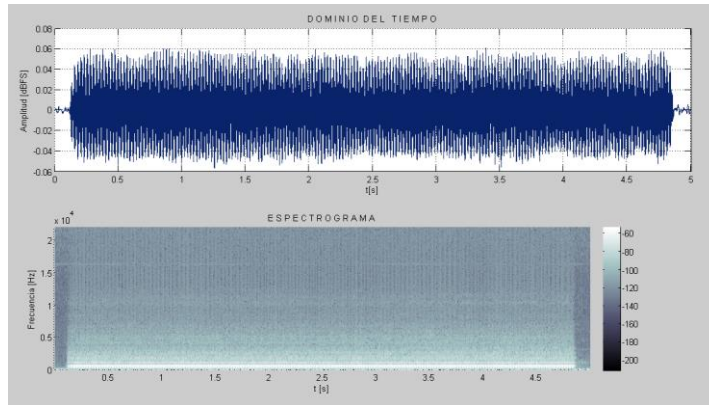
Tercer Parcial



Sonido Medio



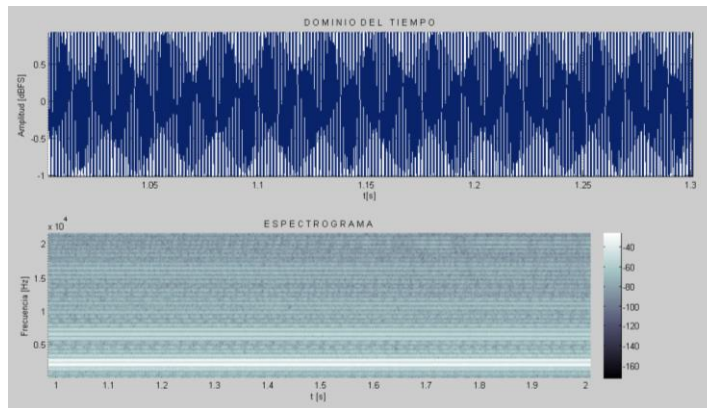
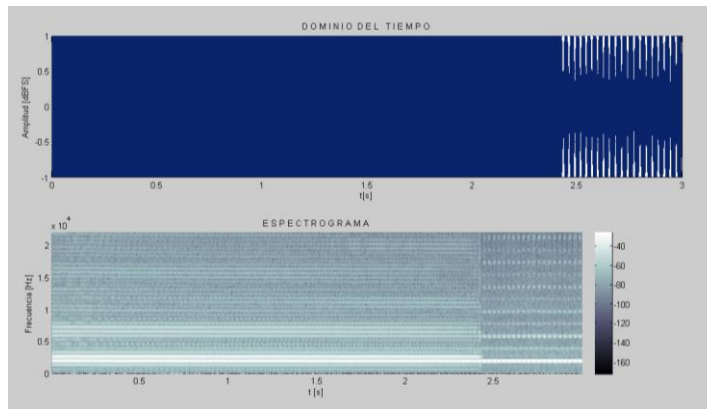
Sonido Suave

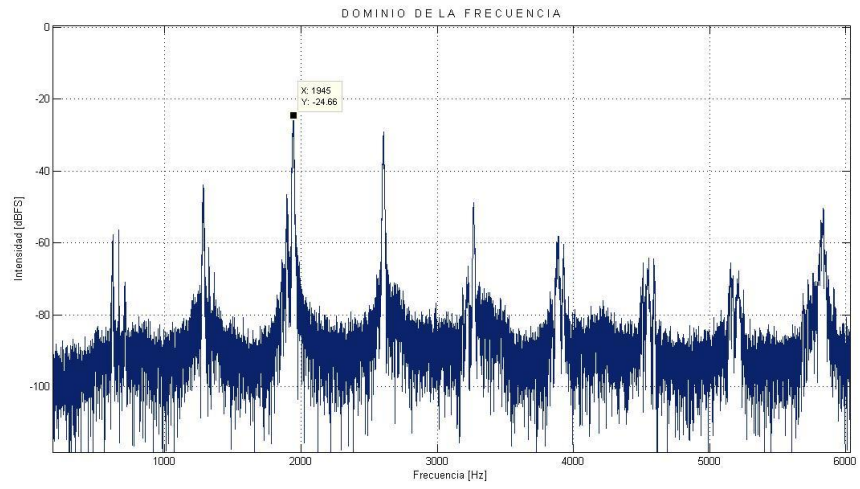


Flautas 2 y 3 orificios destapados

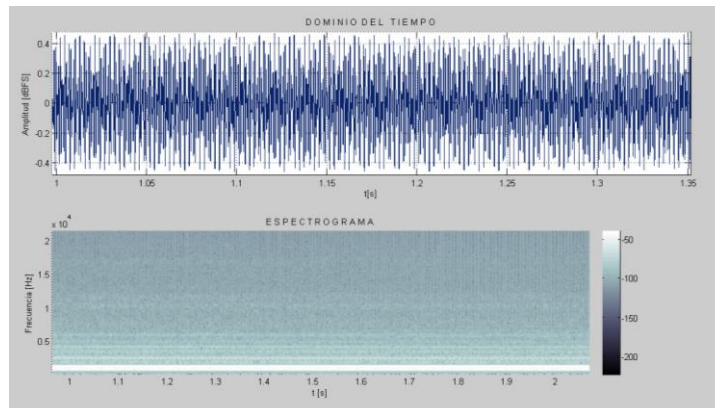
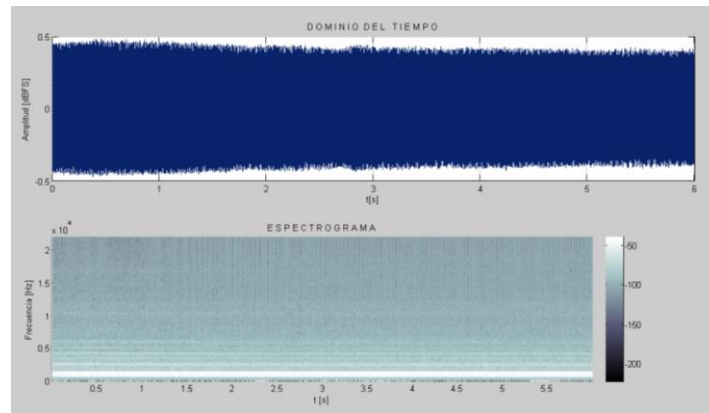


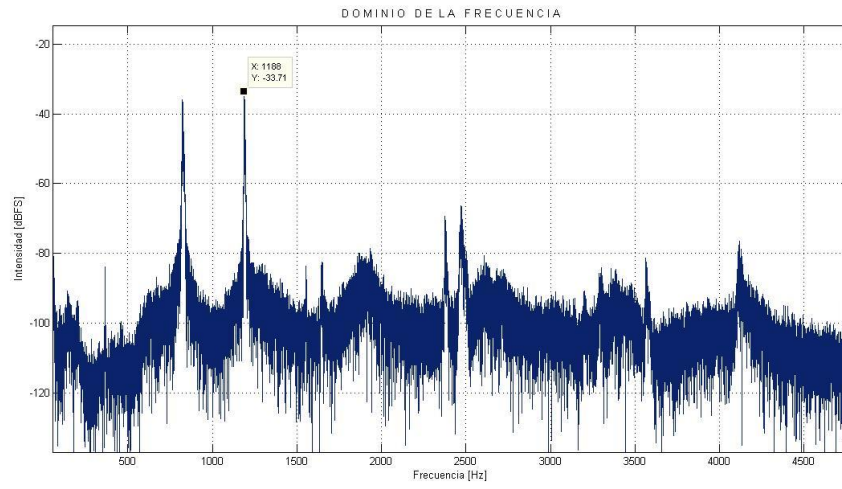
Cuarto Parcial



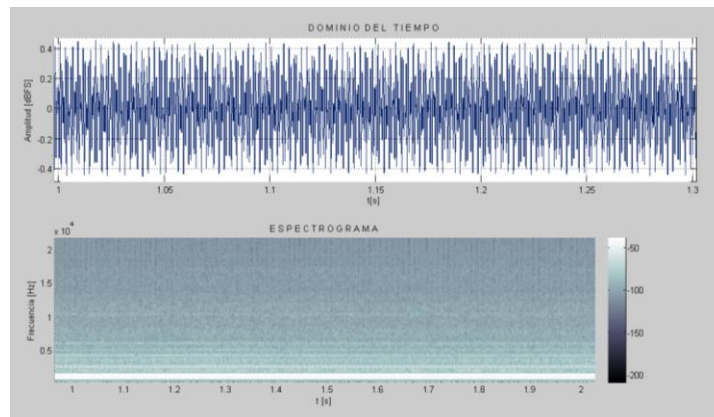
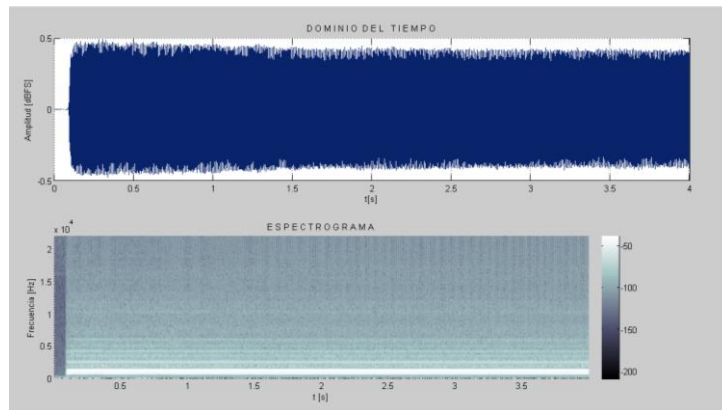


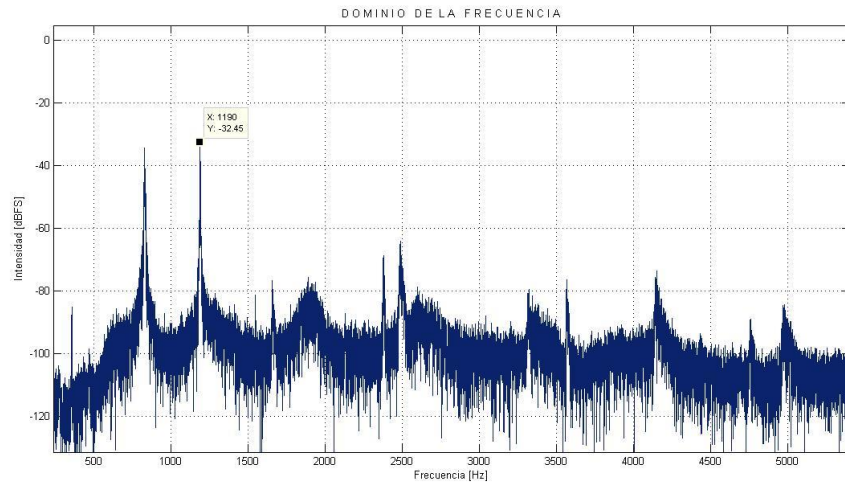
Primer Parcial



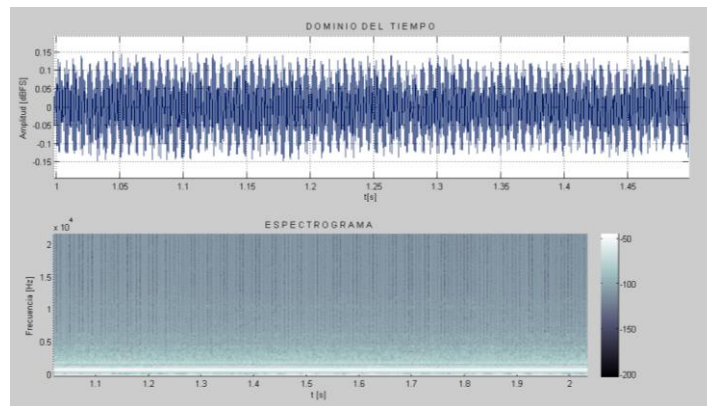
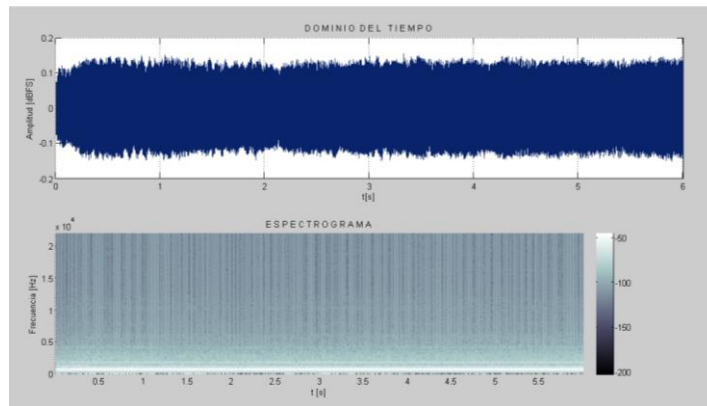


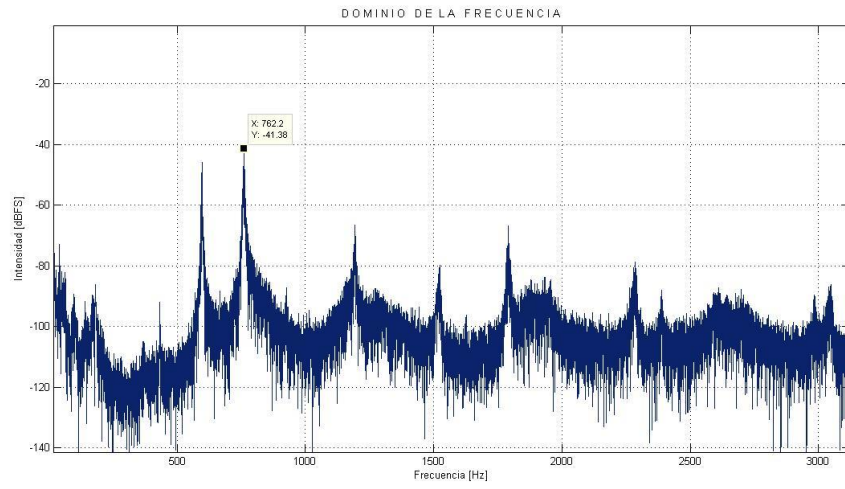
Segundo Parcial



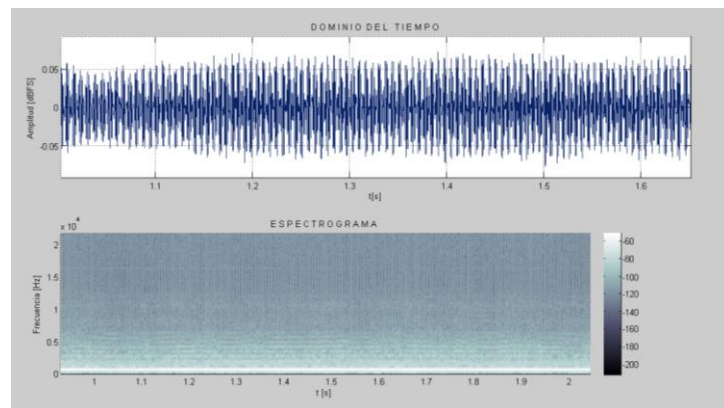
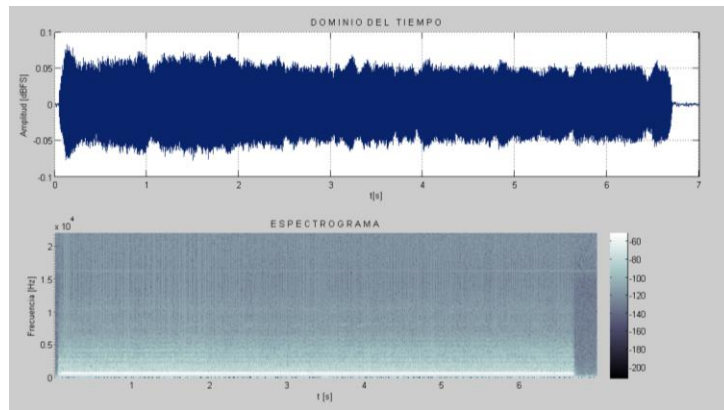


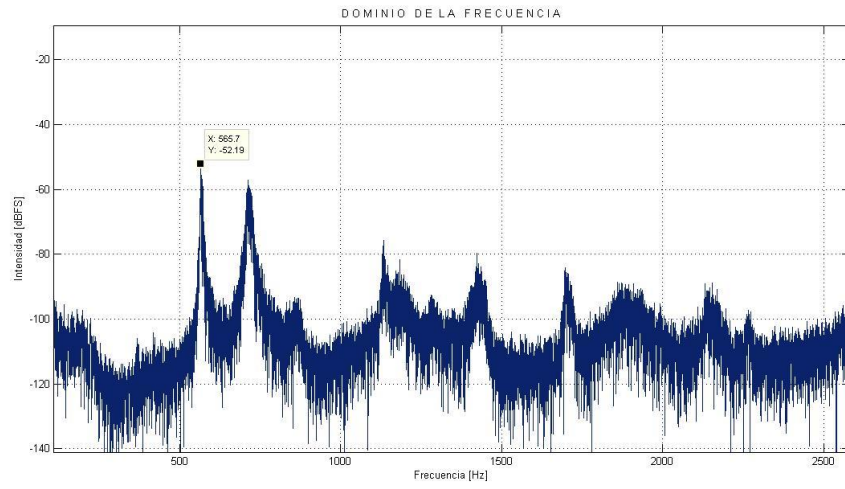
Sonido Medio



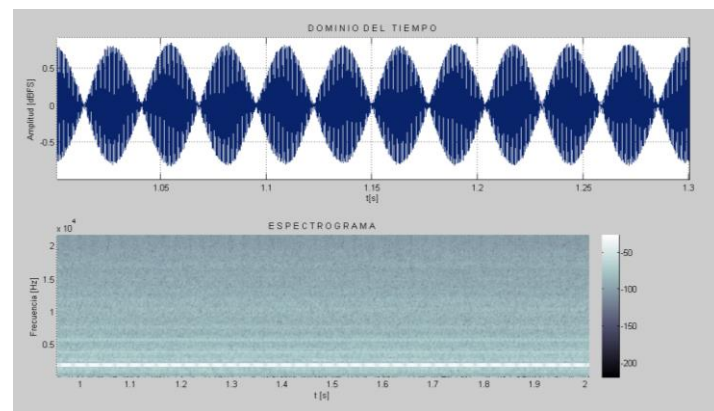
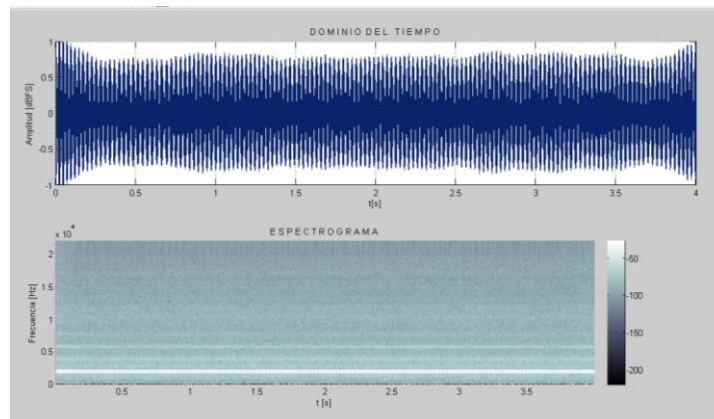


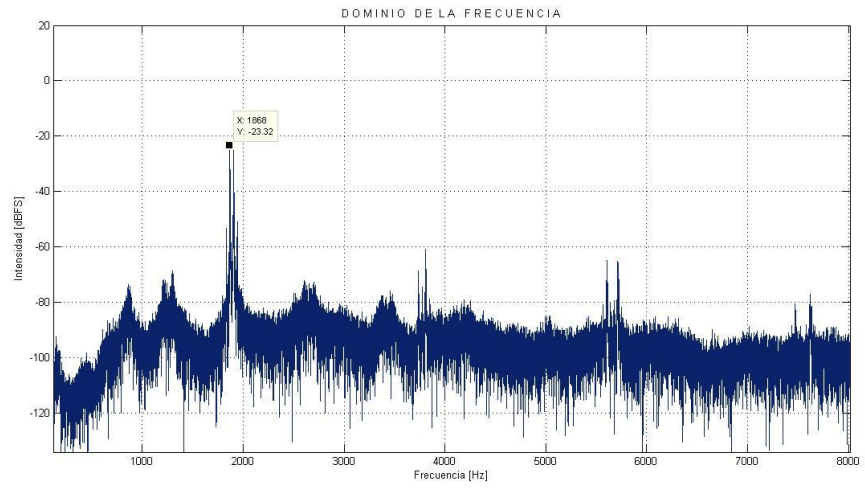
Sonido Suave





Tercer Parcial

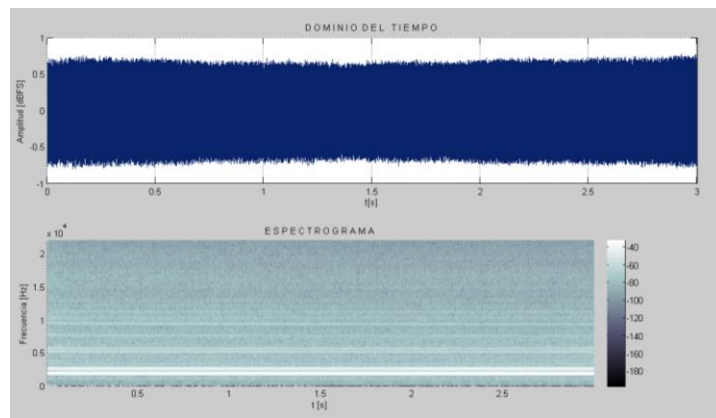


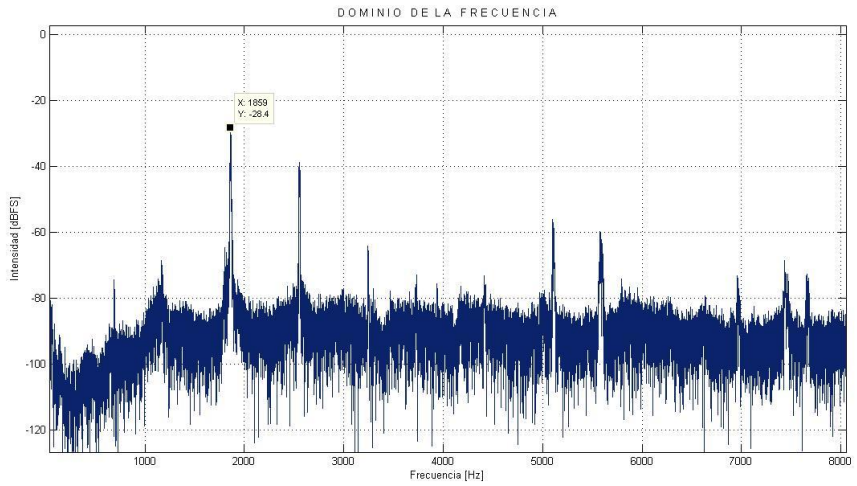
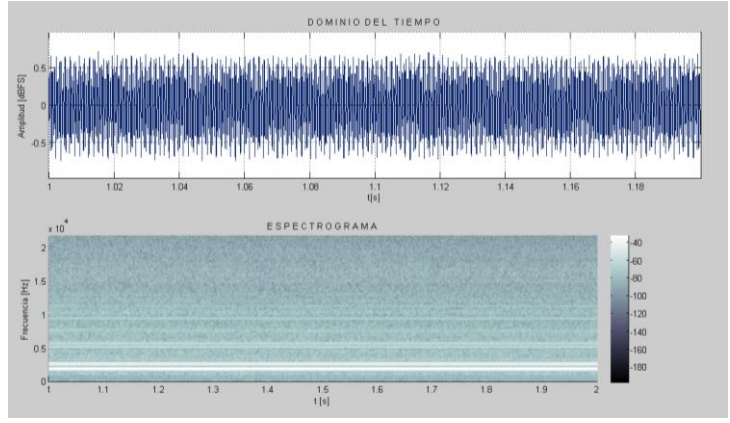


Flautas 2 y 3 orificios tapados

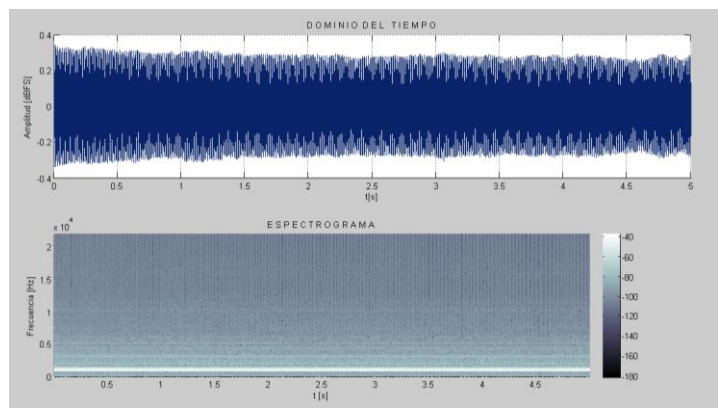


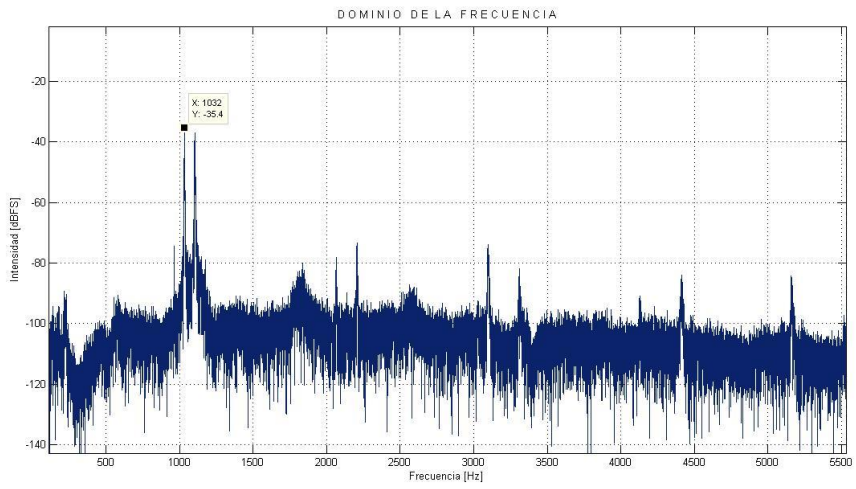
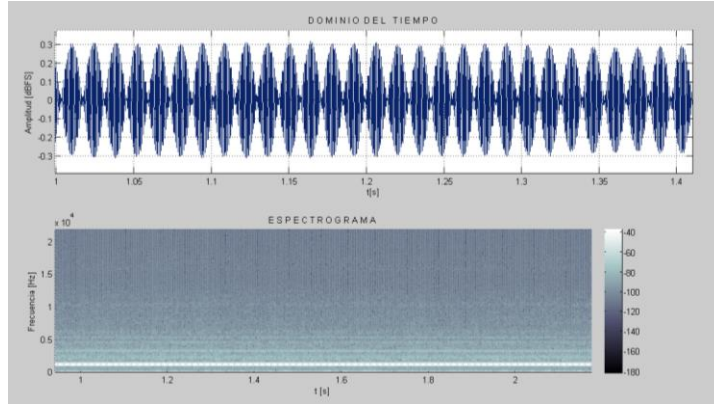
Cuarto Parcial



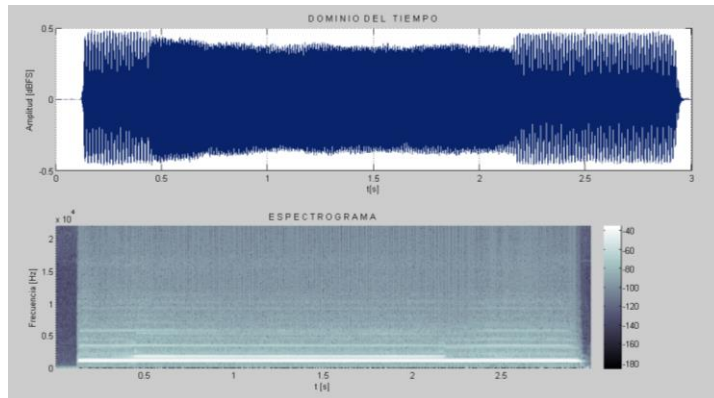


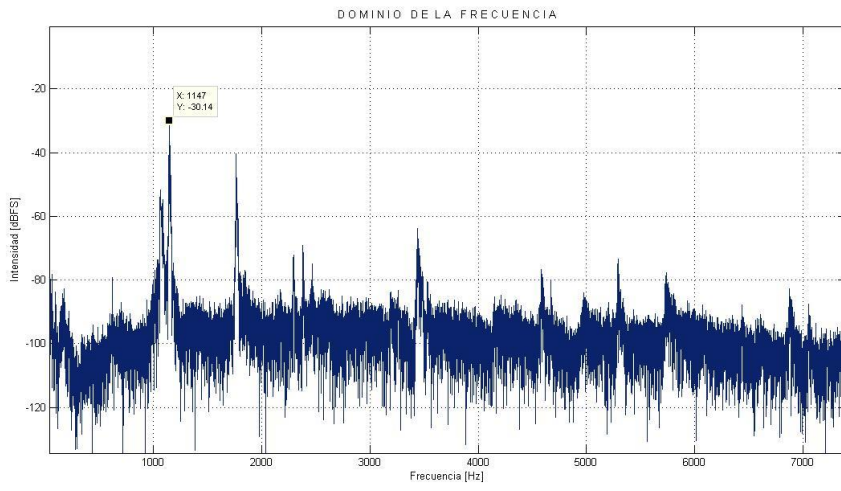
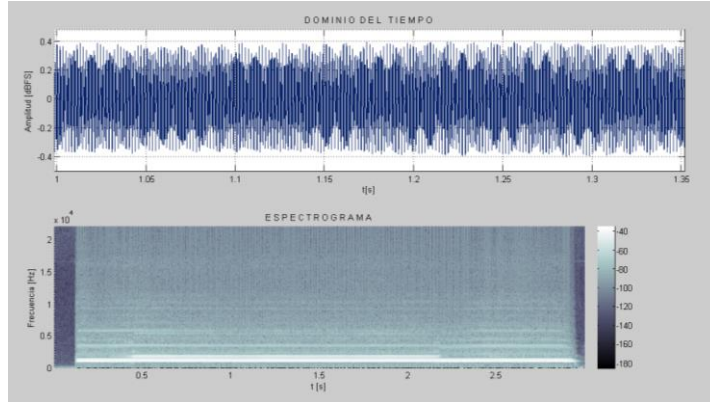
Primer Parcial



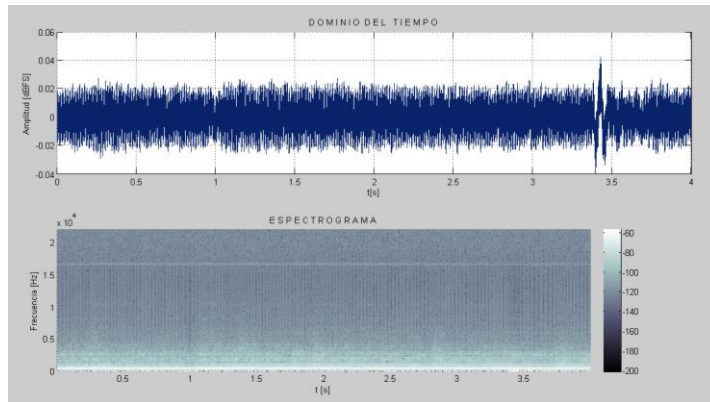


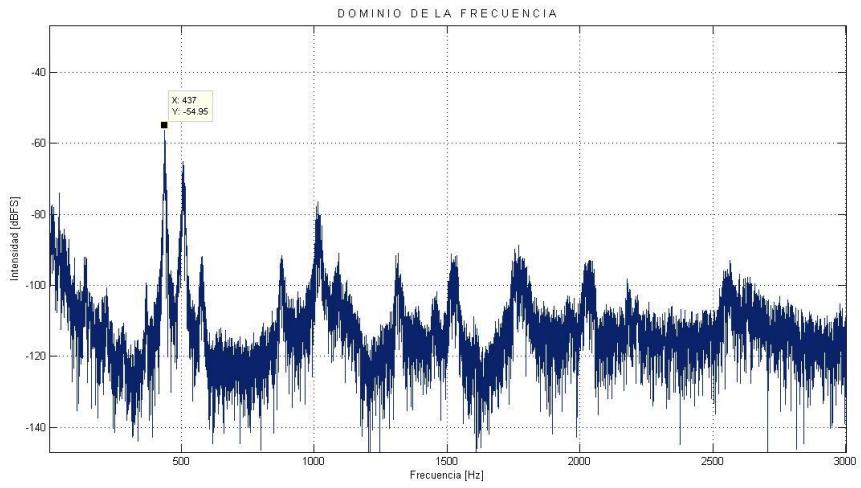
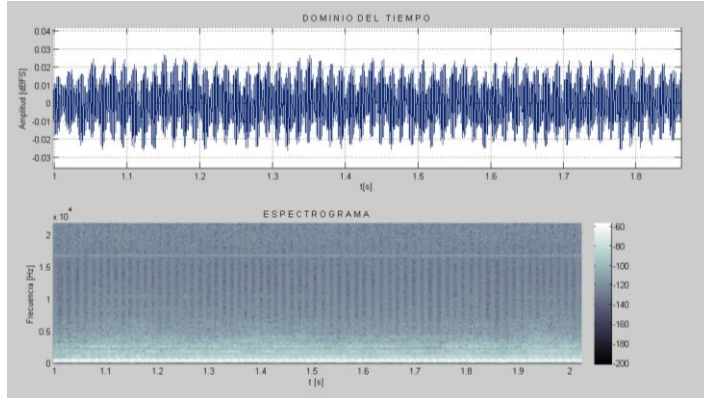
Segundo Parcial



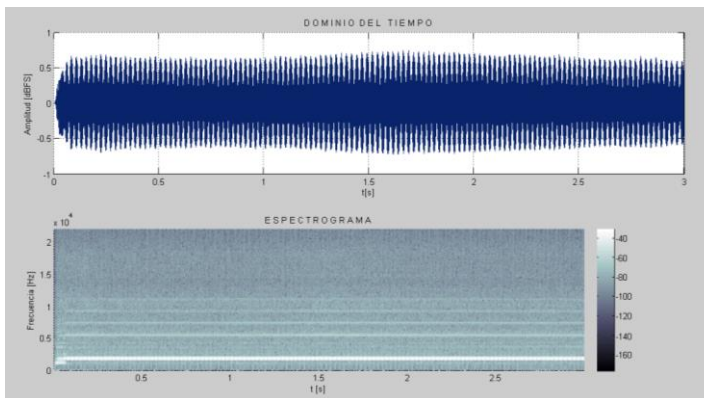


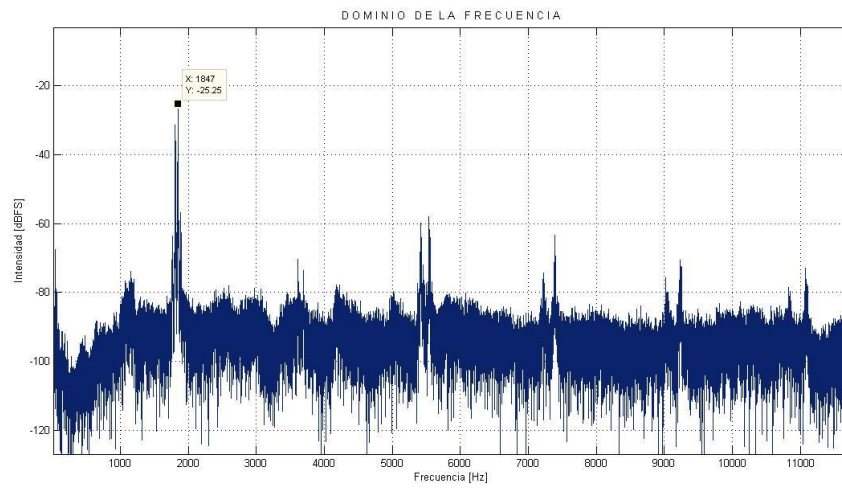
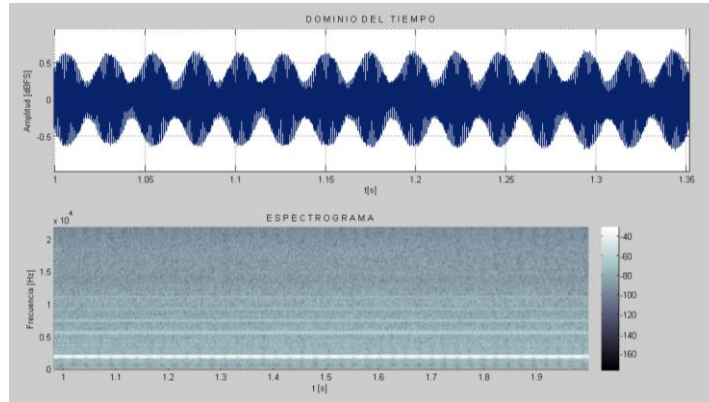
Sonido Suave



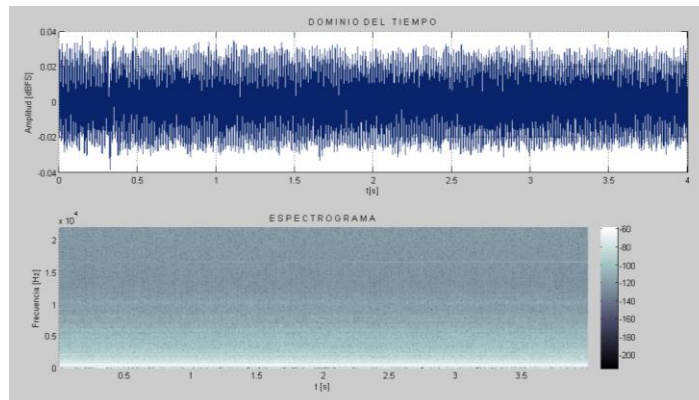


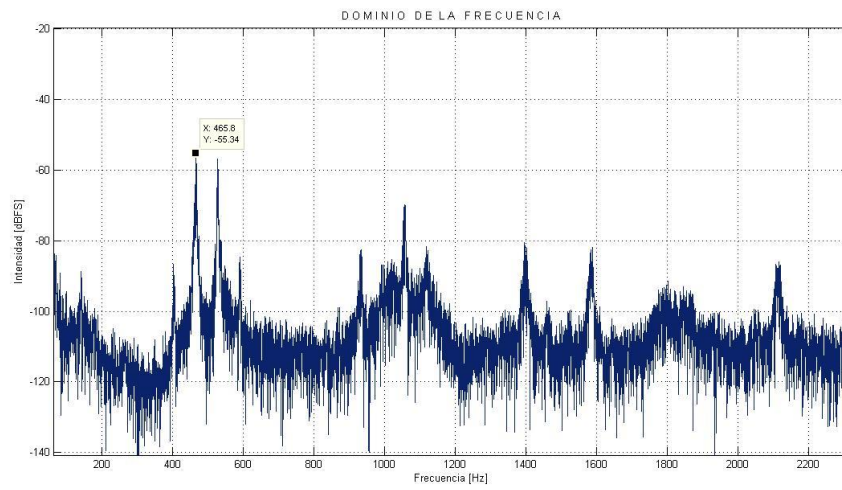
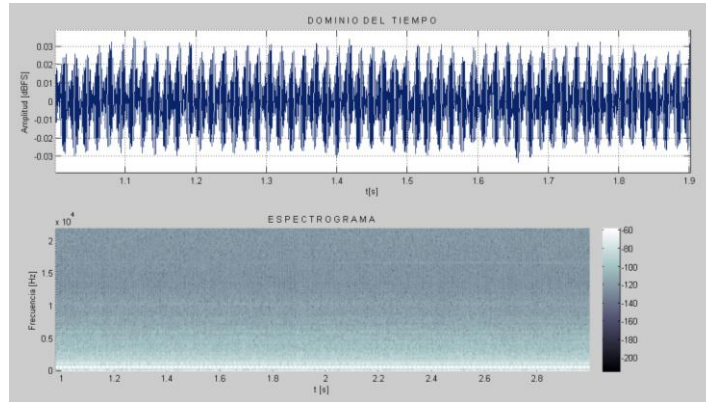
Tercer Parcial





Sonido Medio



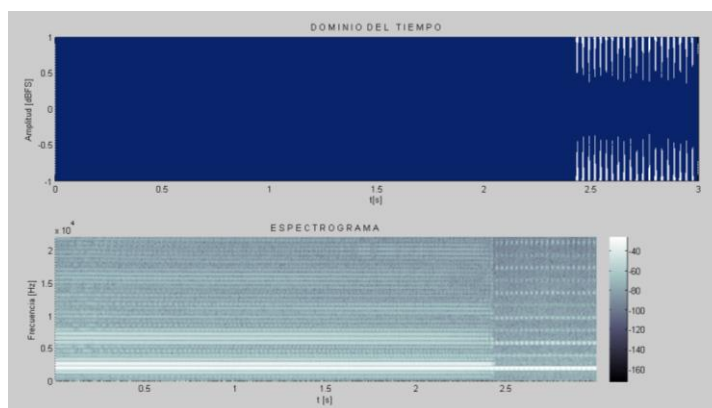


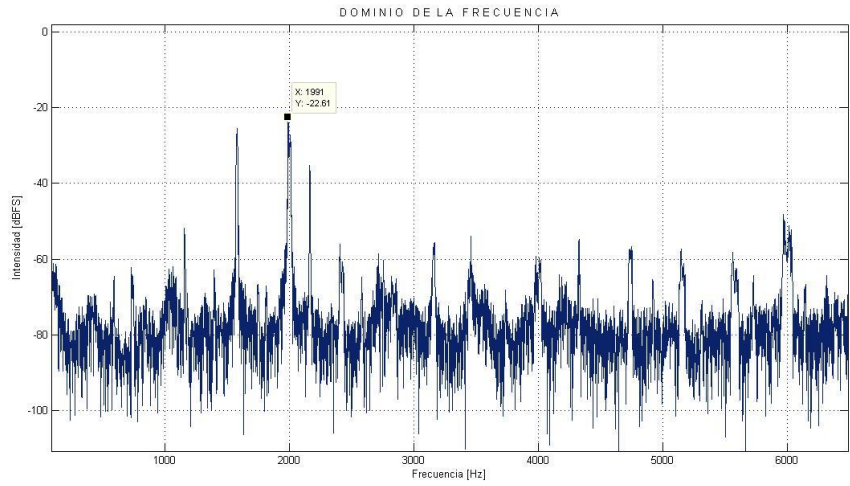
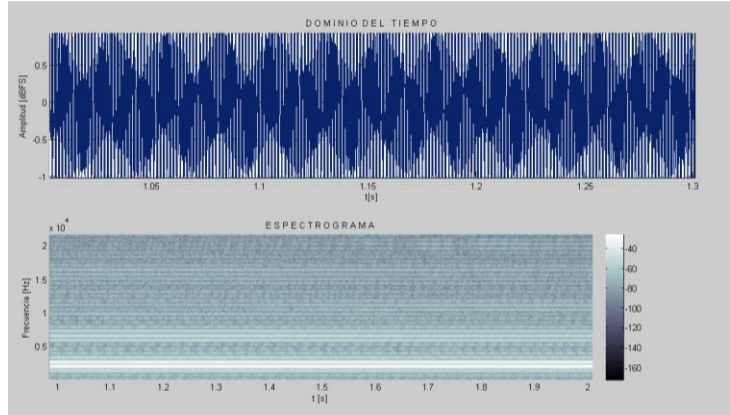
GRABACIÓN 4: FLAUTAS 1 Y 3

Flautas 1 y 3 destapadas

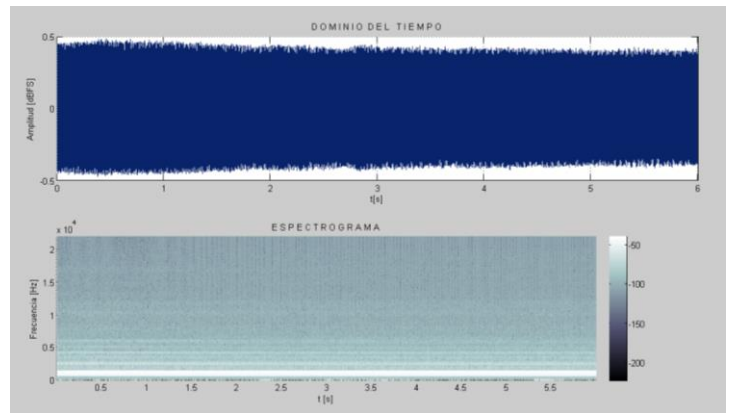


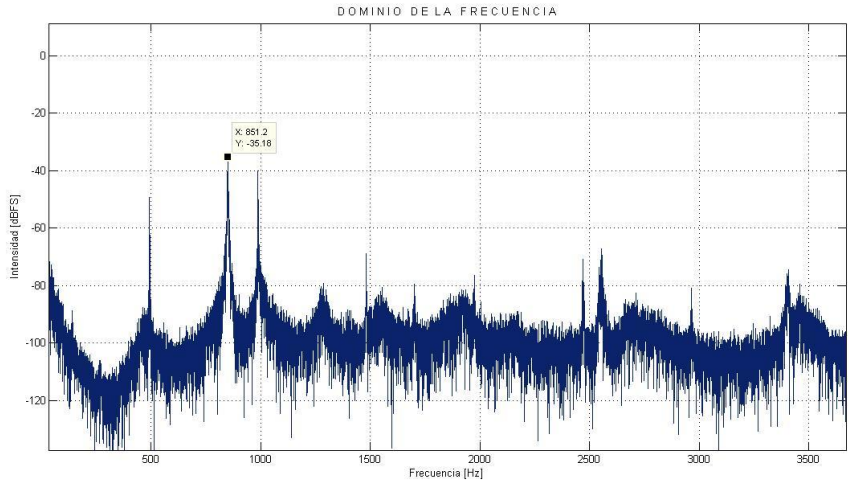
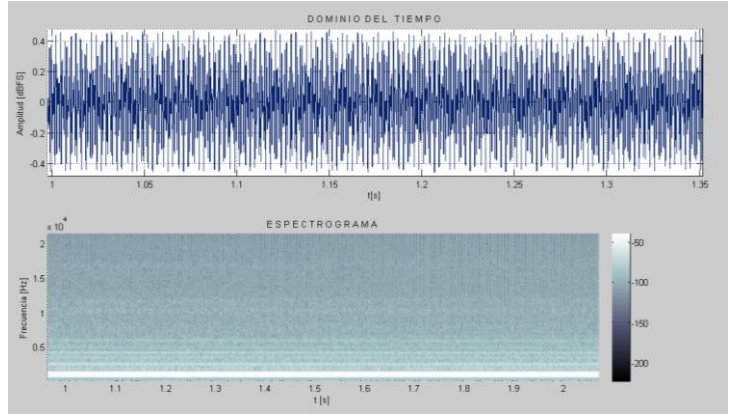
Cuarto Parcial



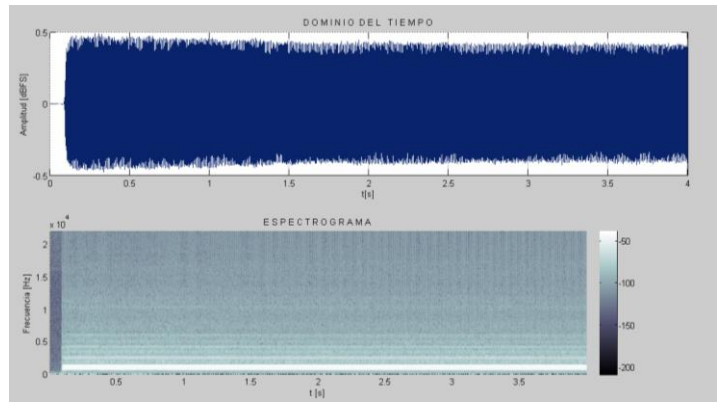


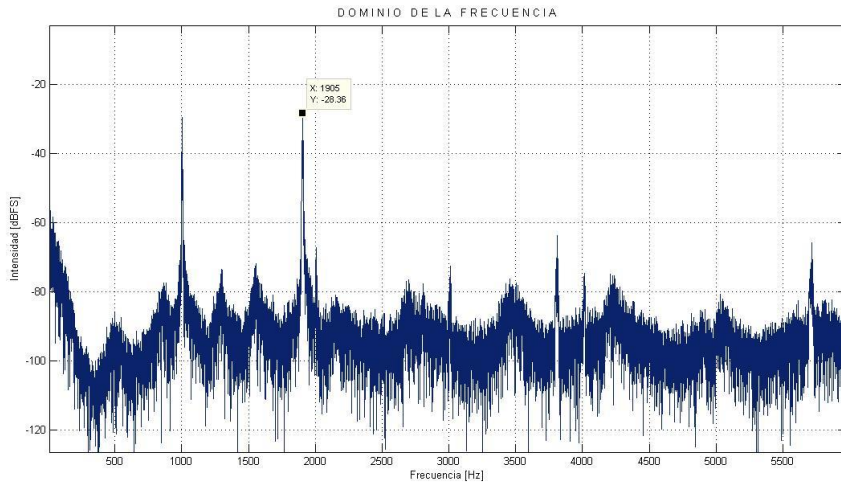
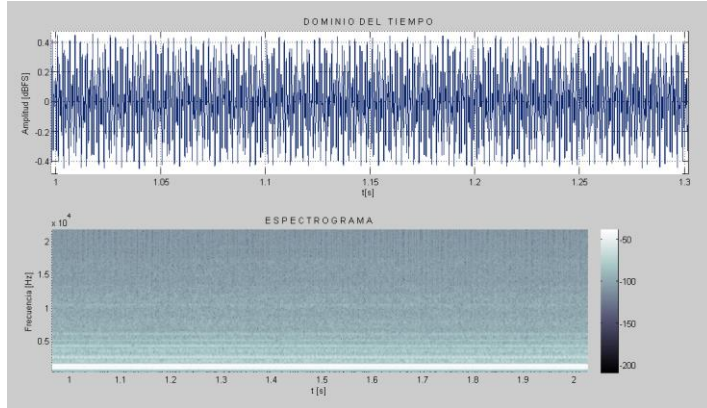
Primer Parcial



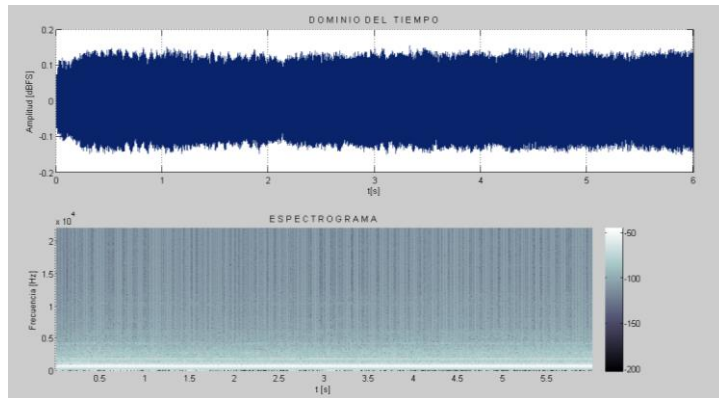


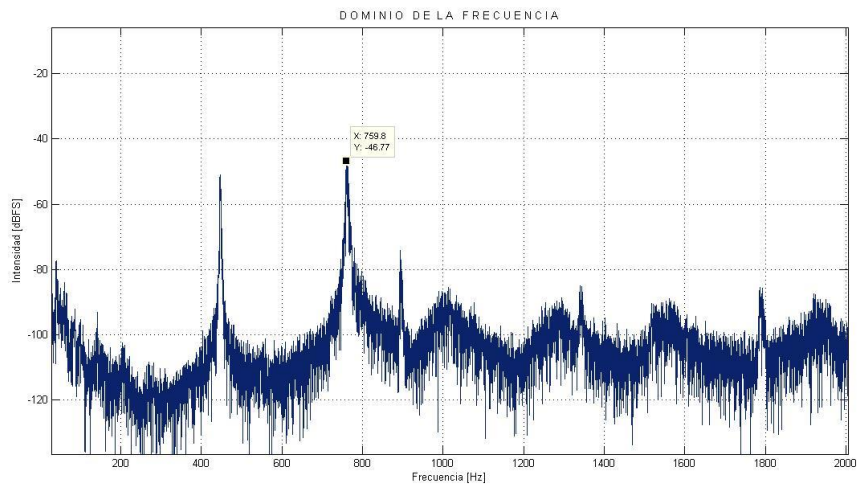
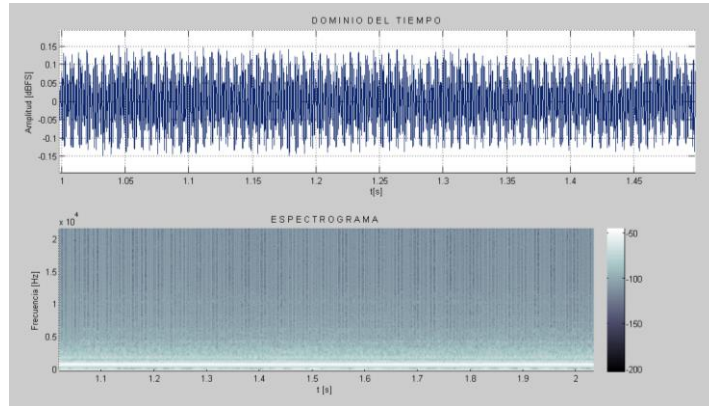
Segundo Parcial



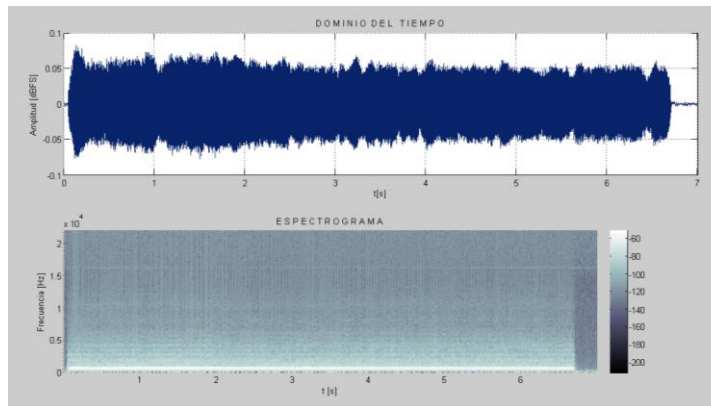


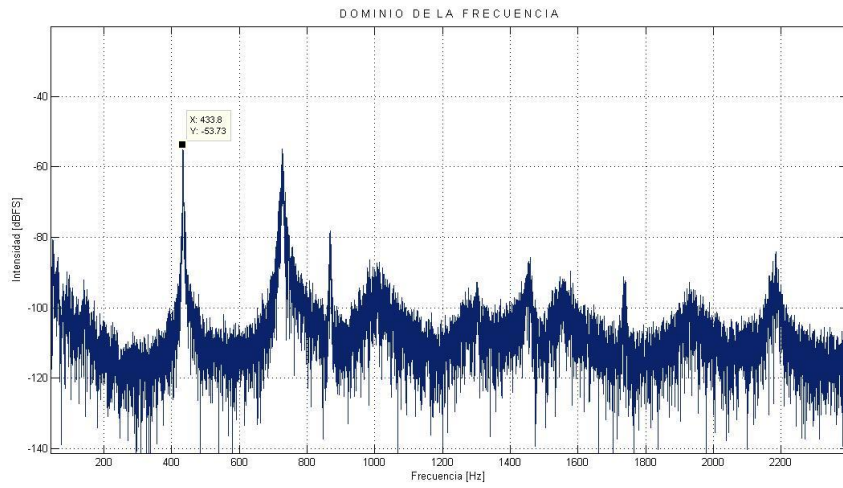
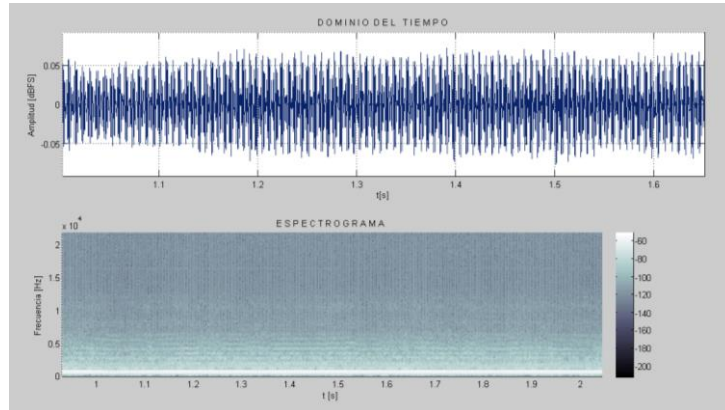
Sonido Medio



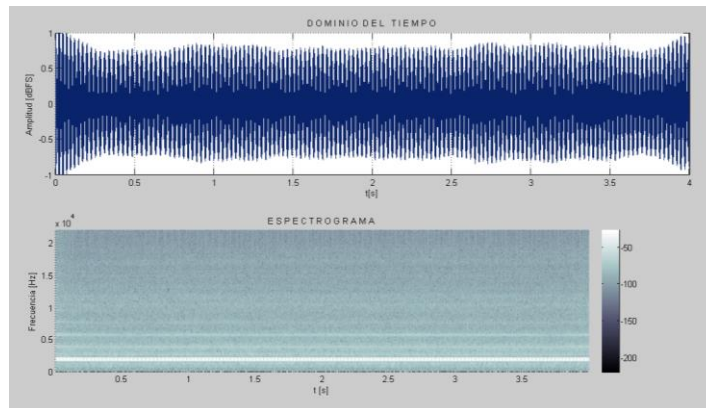


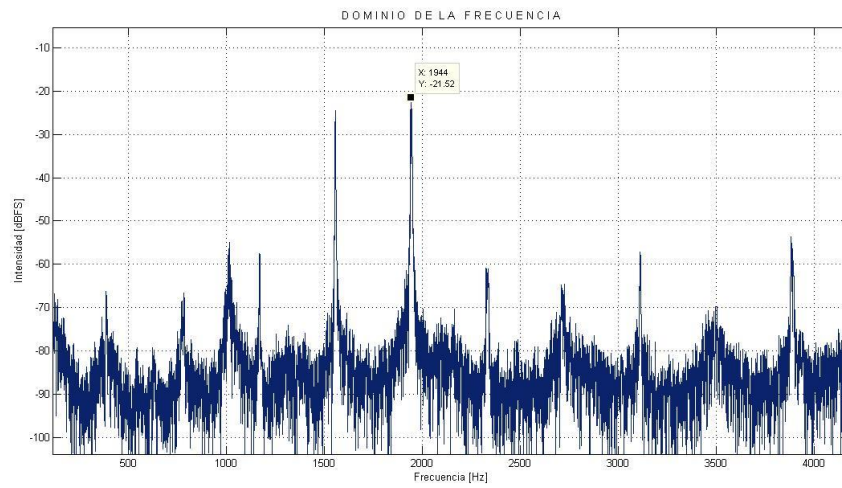
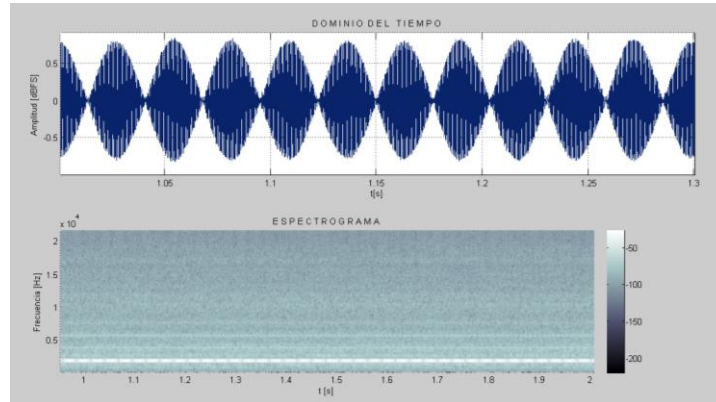
Sonido Suave





Tercer Parcial

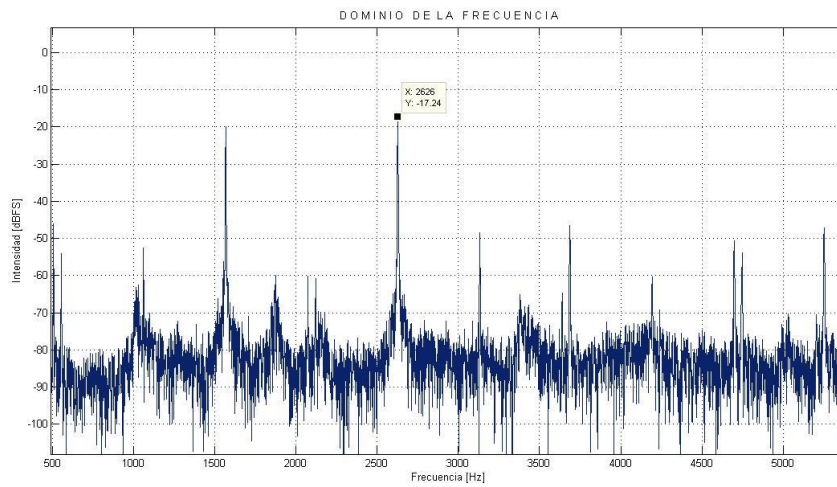
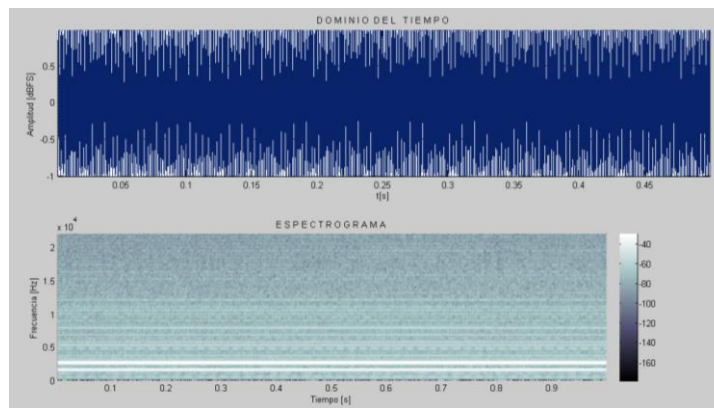
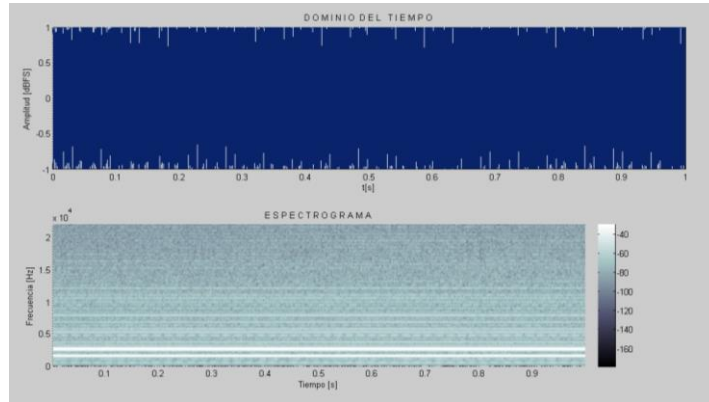




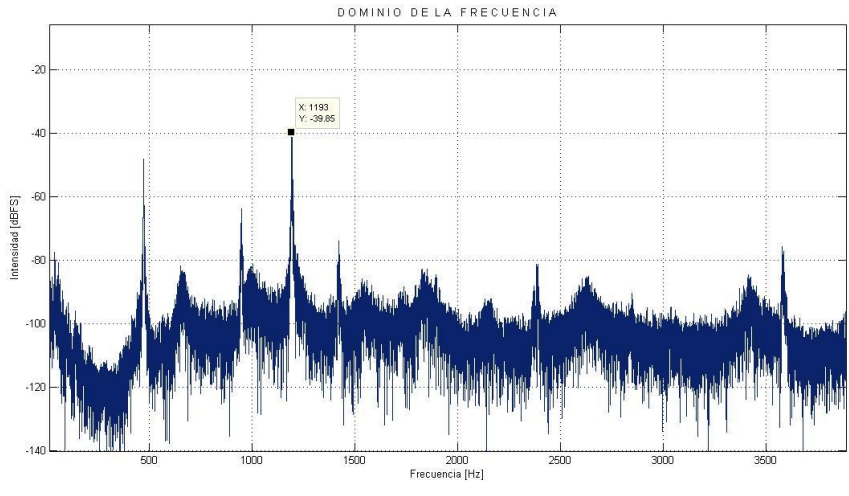
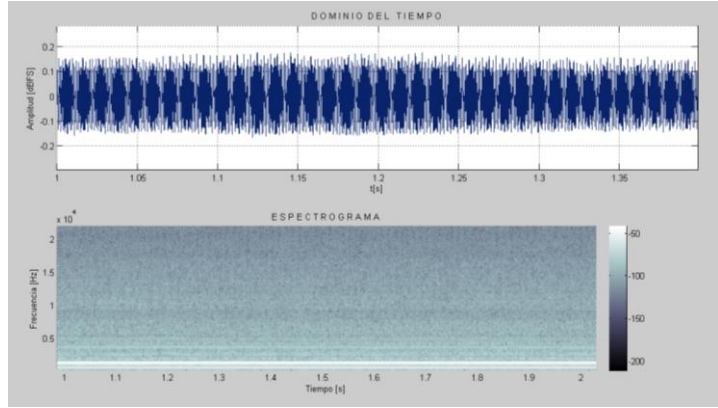
Flautas 1 y 3 destapando orificio 1 de la flauta 3



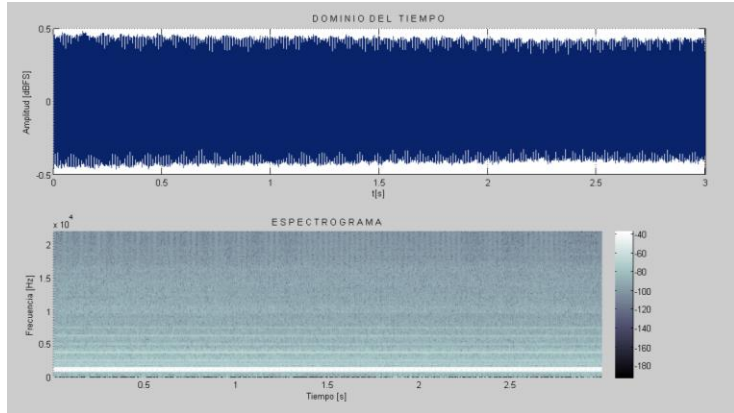
Cuarto Parcial

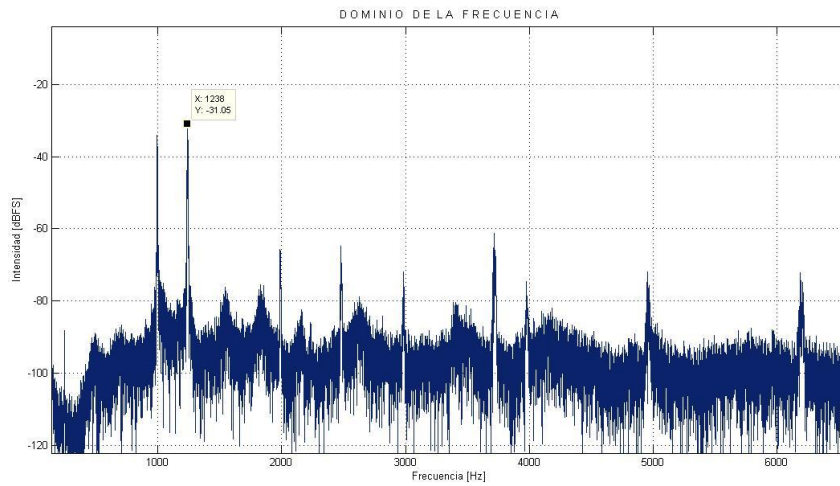
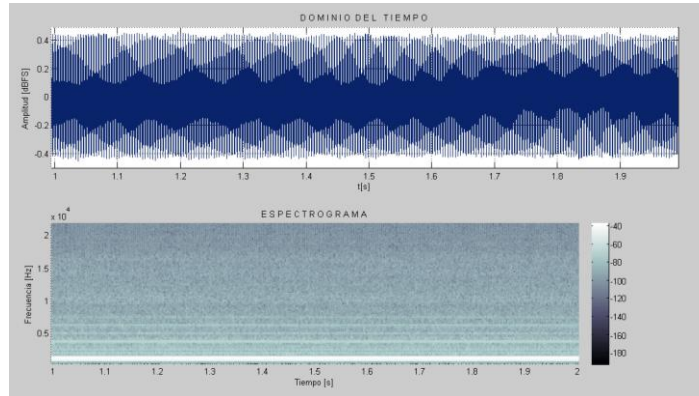


Primer Parcial

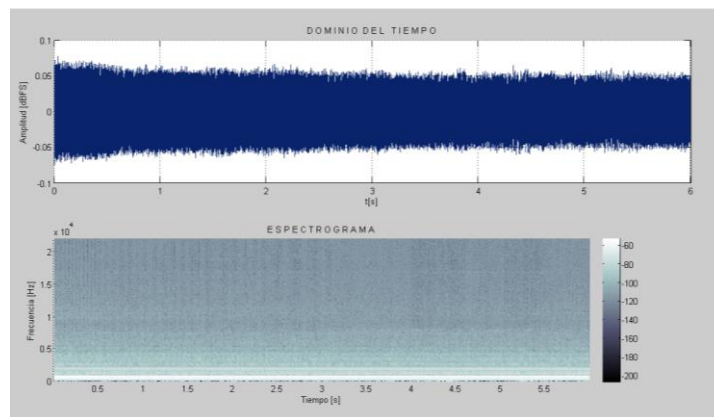


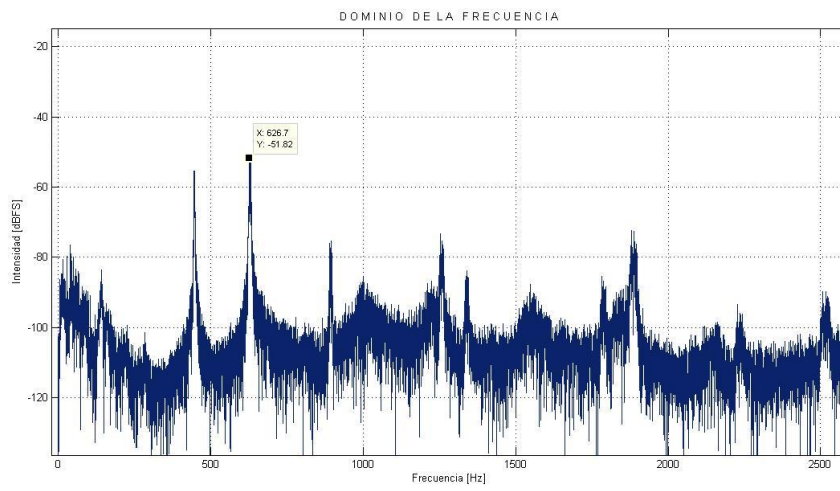
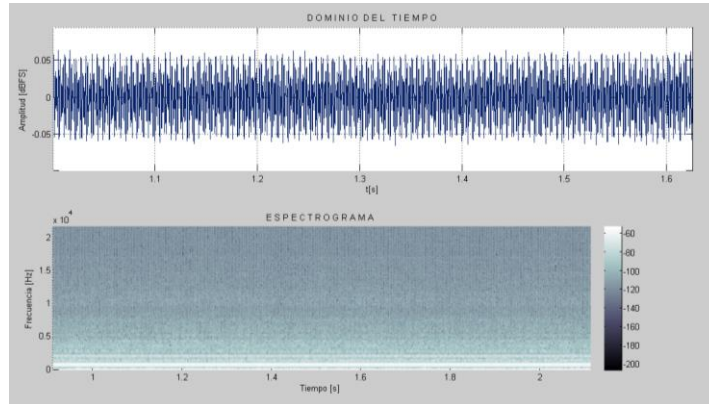
Segundo Parcial



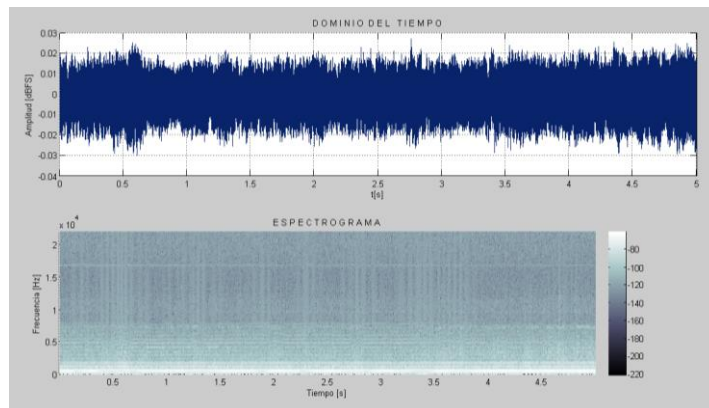


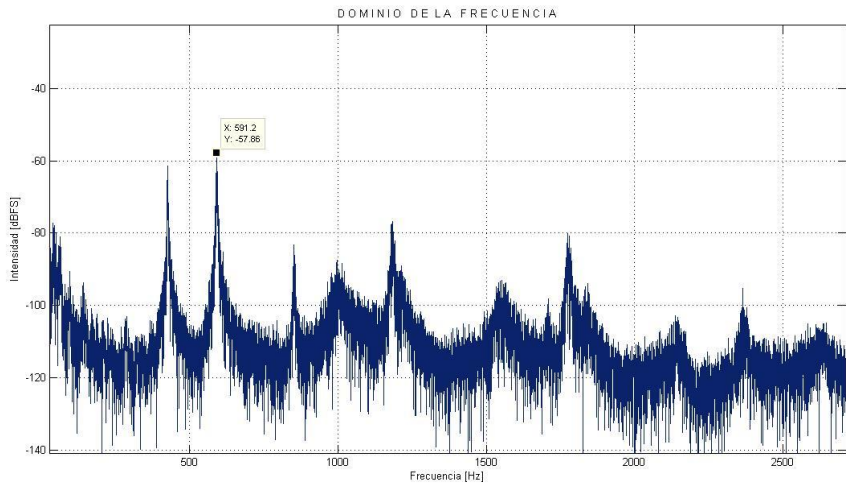
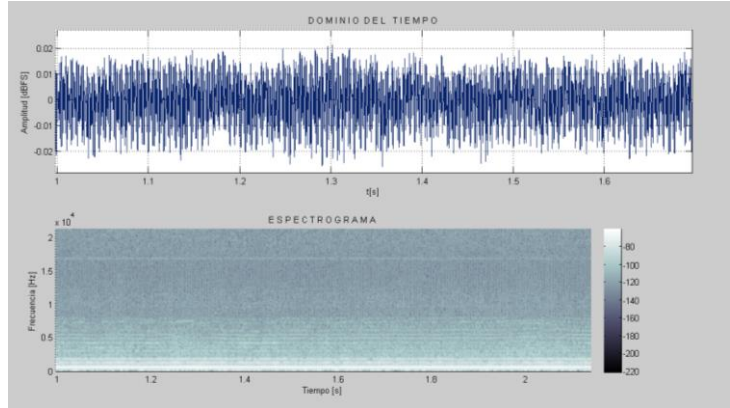
Sonido Medio



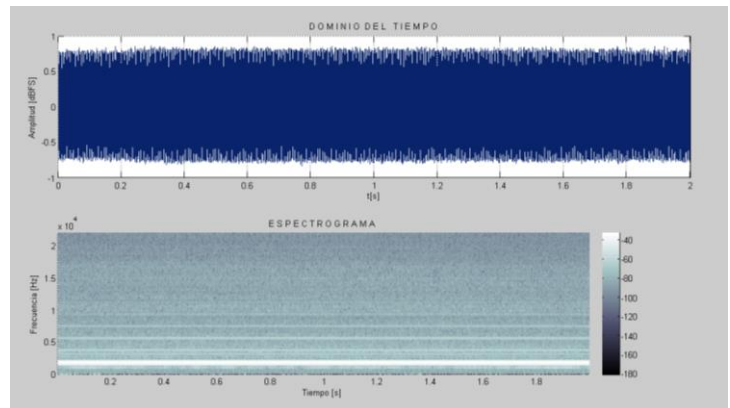


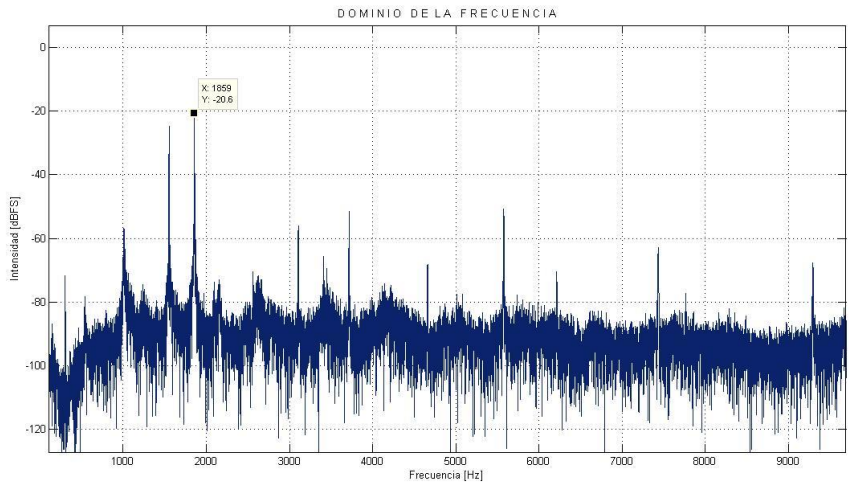
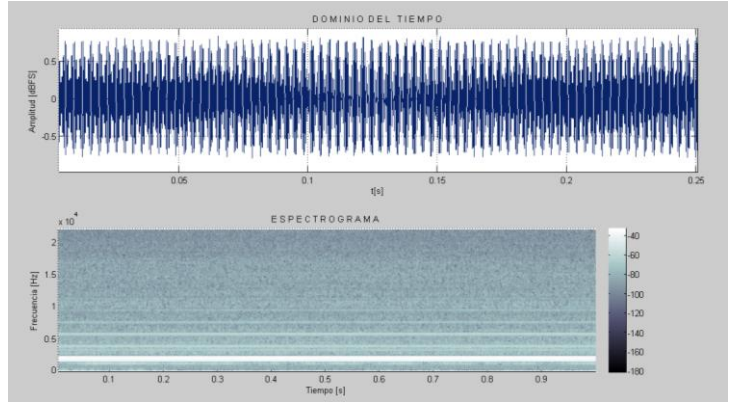
Sonido Suave





Tercer Parcial

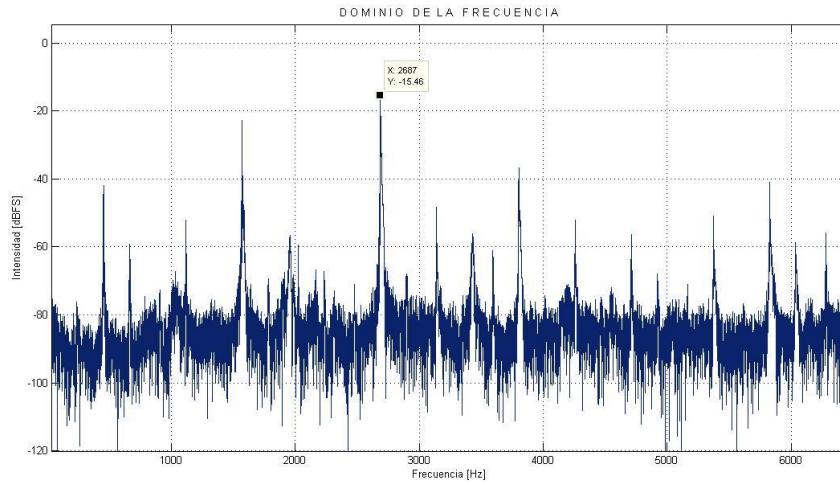
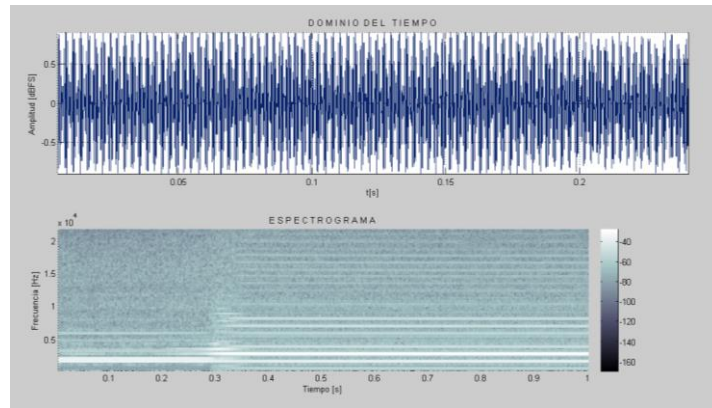
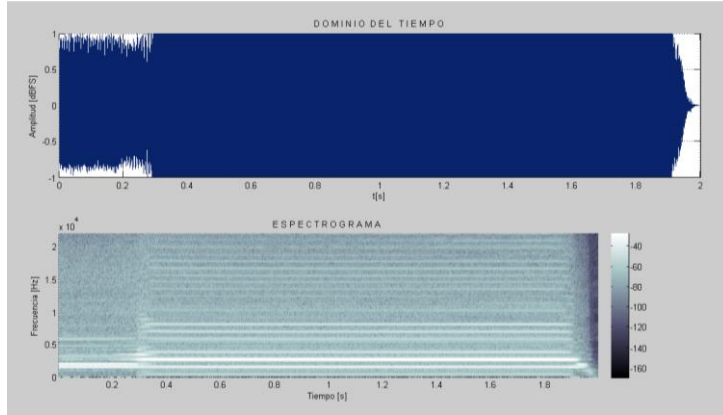




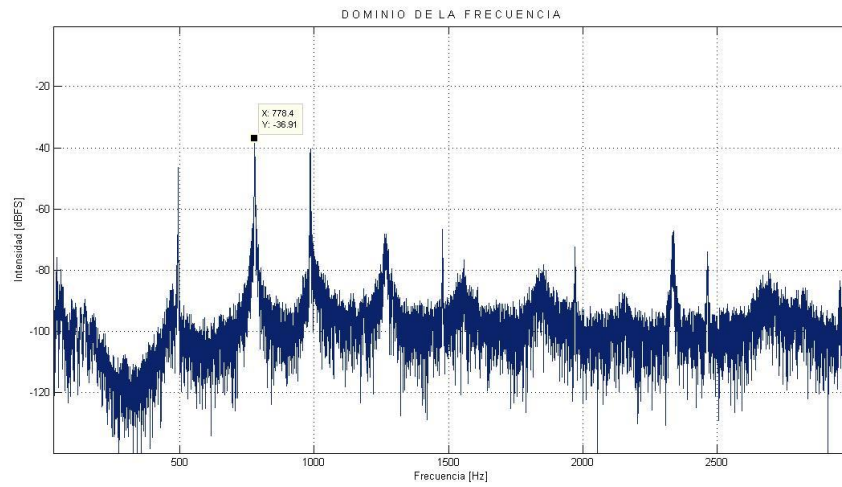
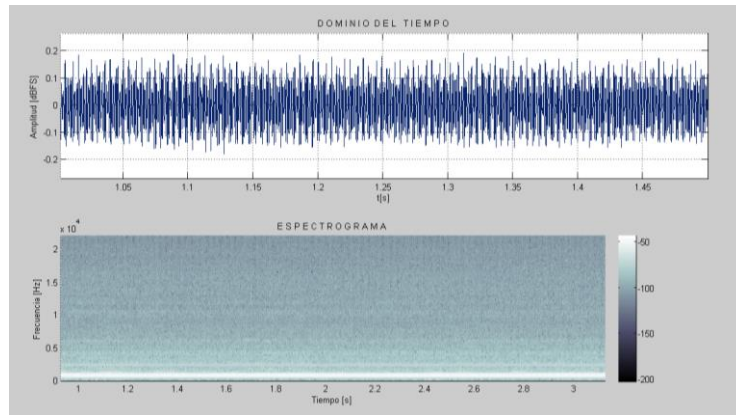
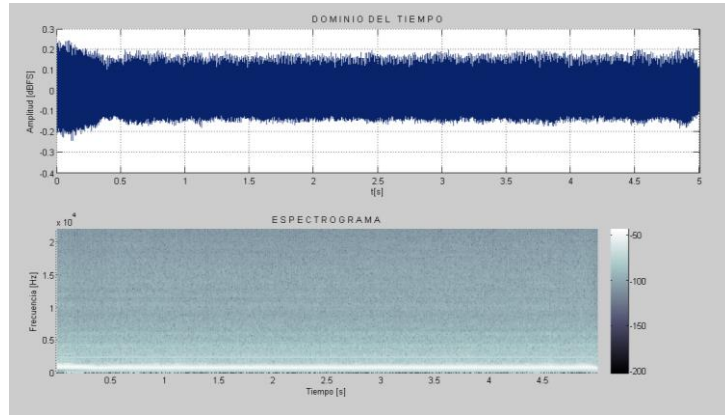
Flautas 1 y 3 destapando orificio 5 y 6 de la flauta 3



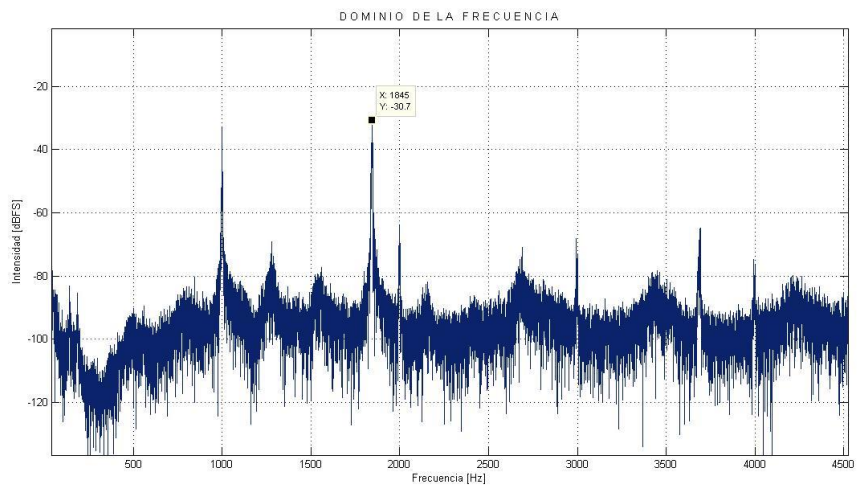
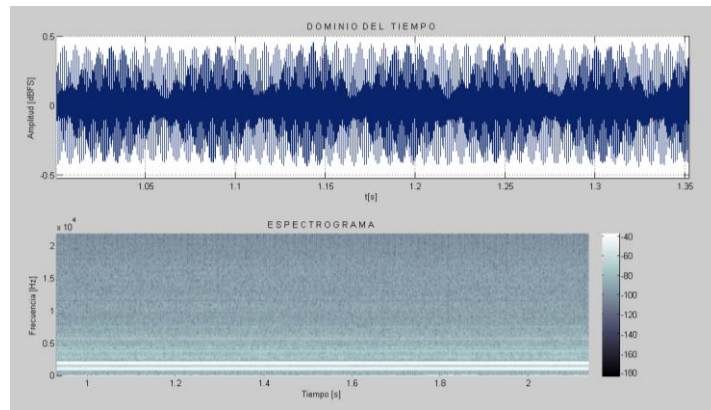
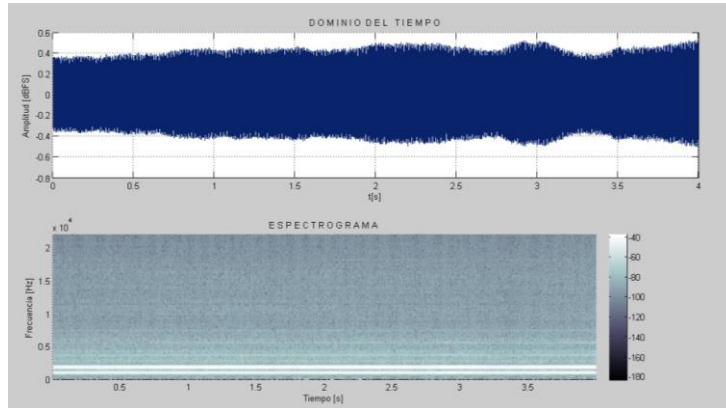
Cuarto Parcial



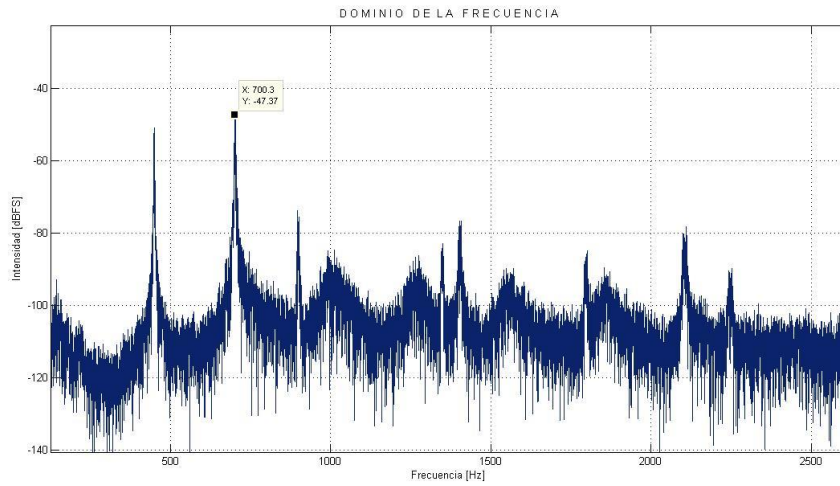
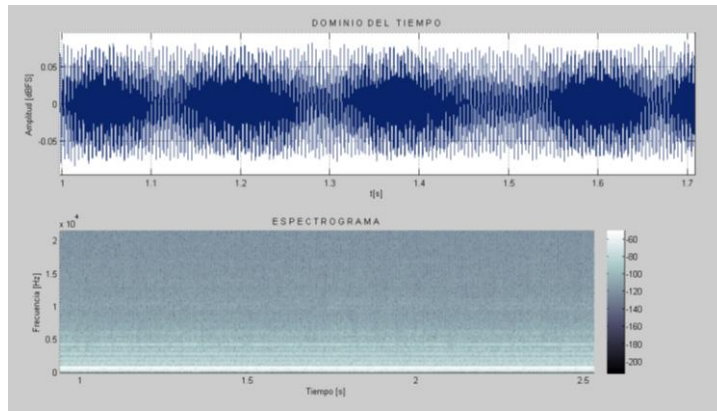
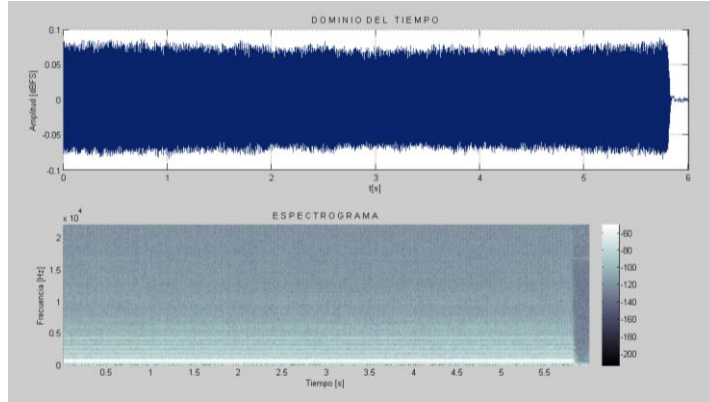
Primer Parcial



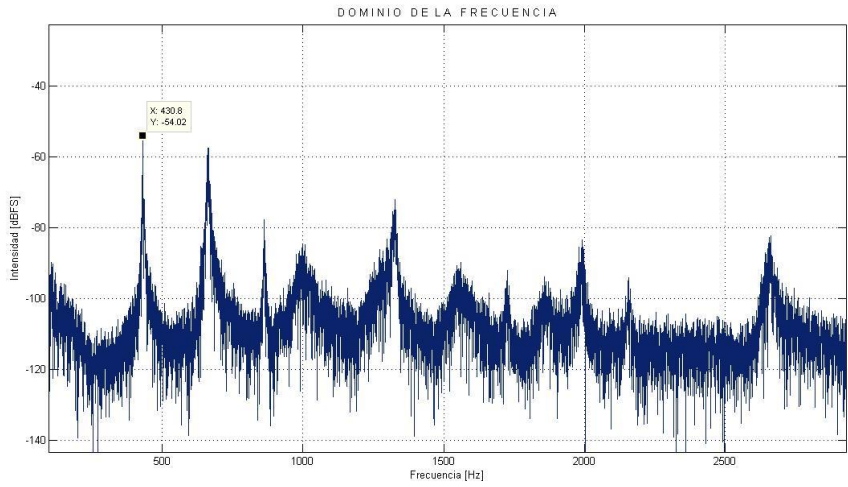
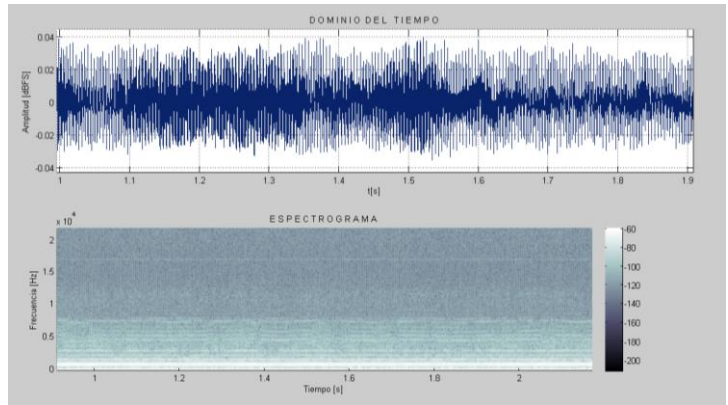
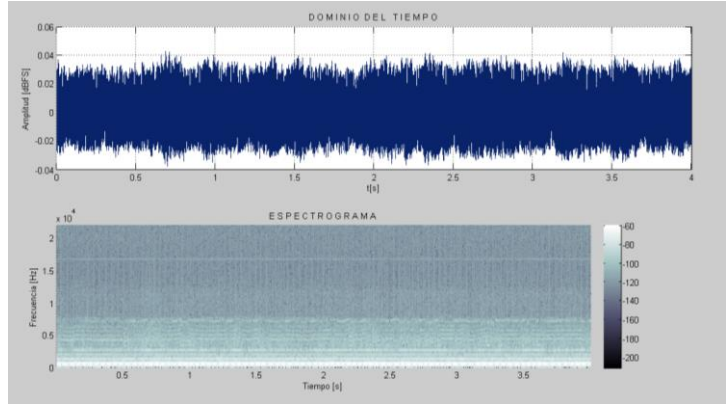
Segundo Parcial



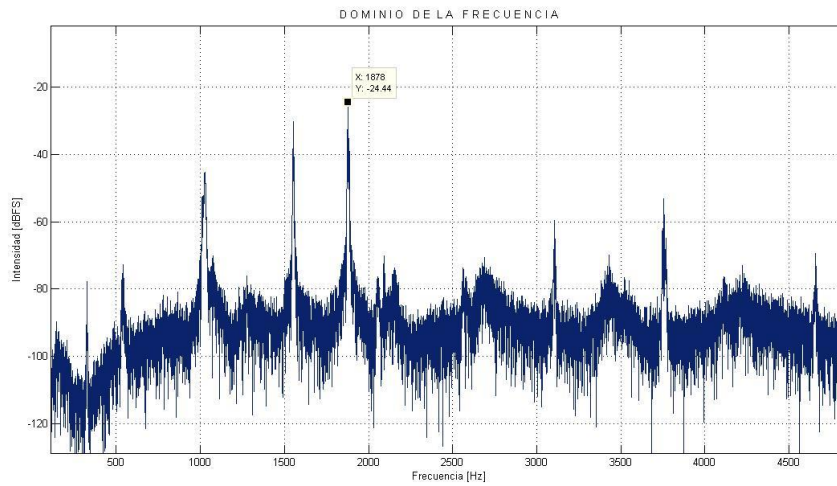
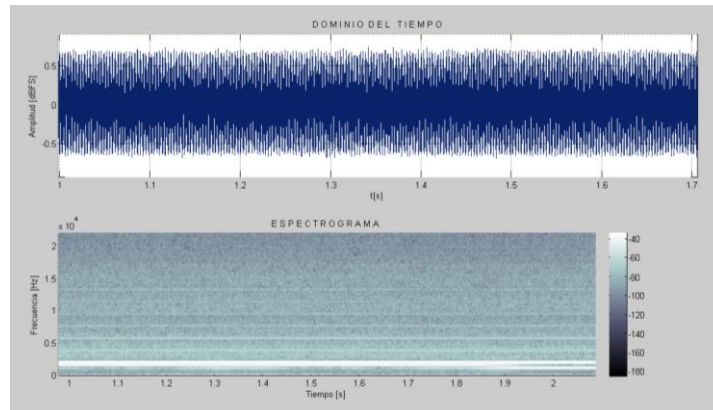
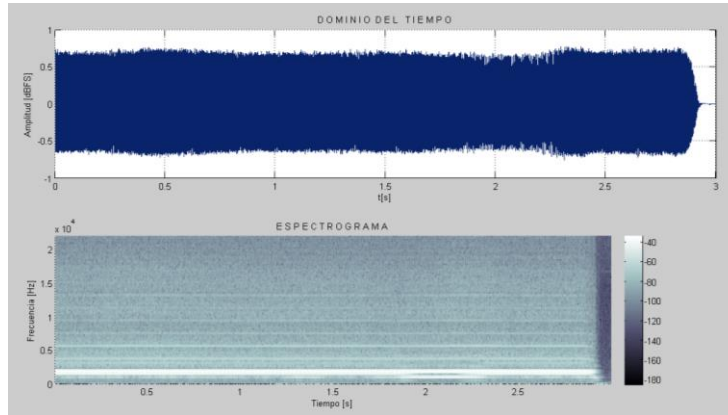
Sonido Medio



Sonido Suave



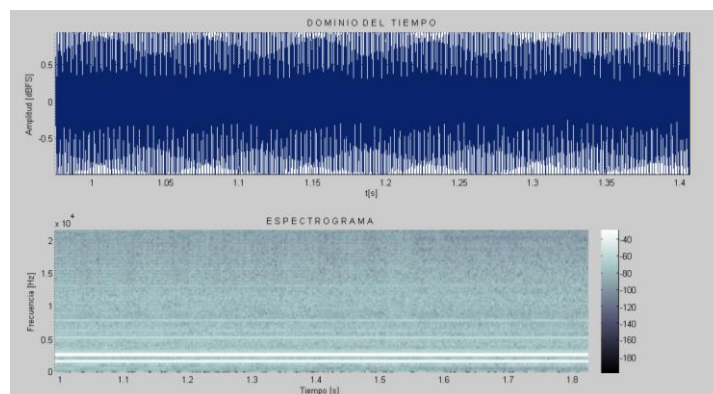
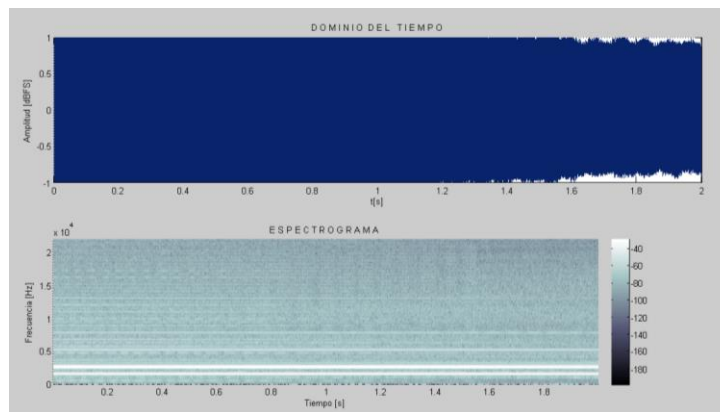
Tercer Parcial

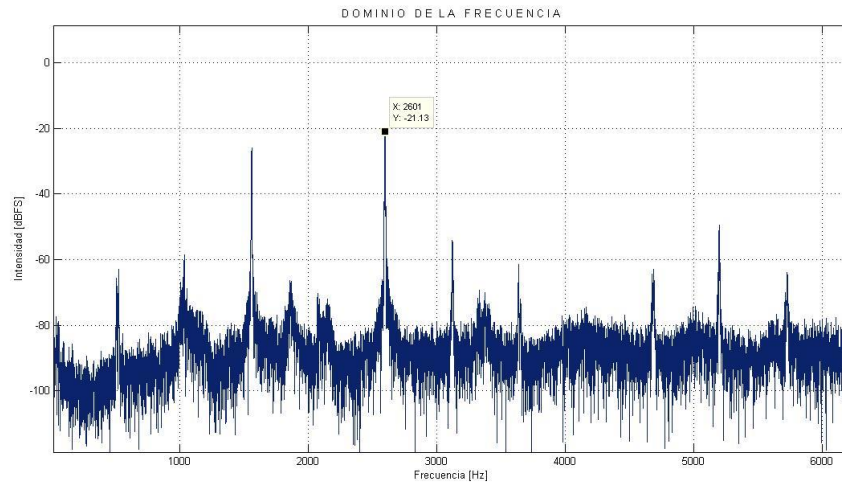


Flautas 1 y 3 destapando la flauta F1

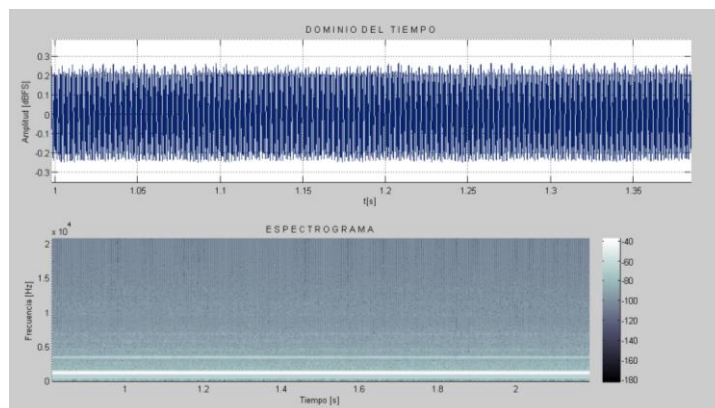
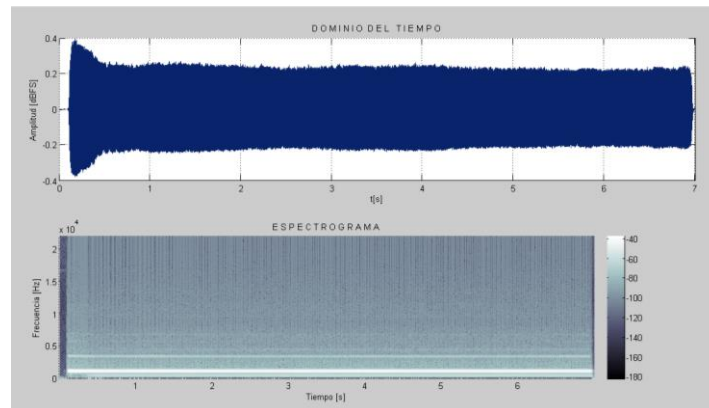


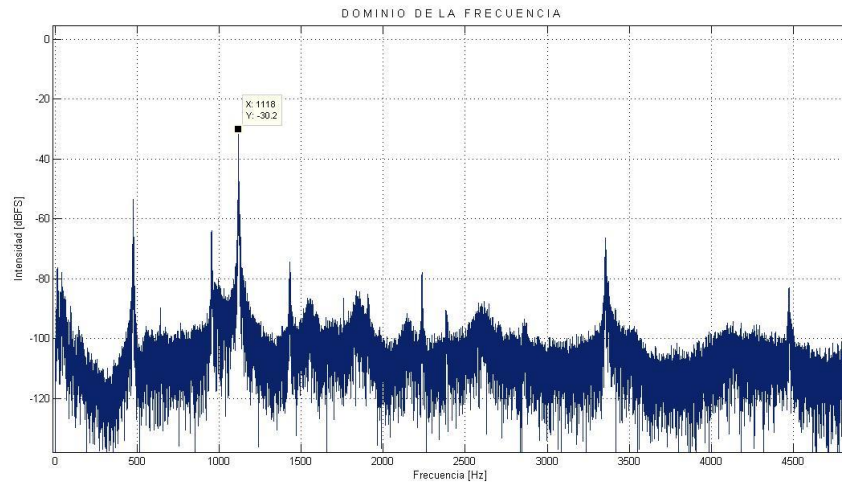
Cuarto Parcial



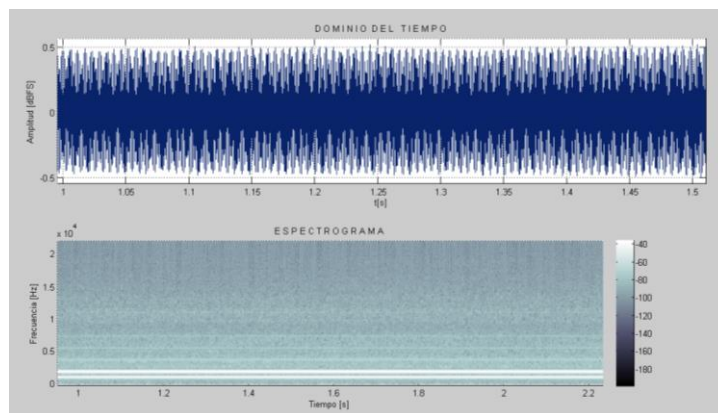
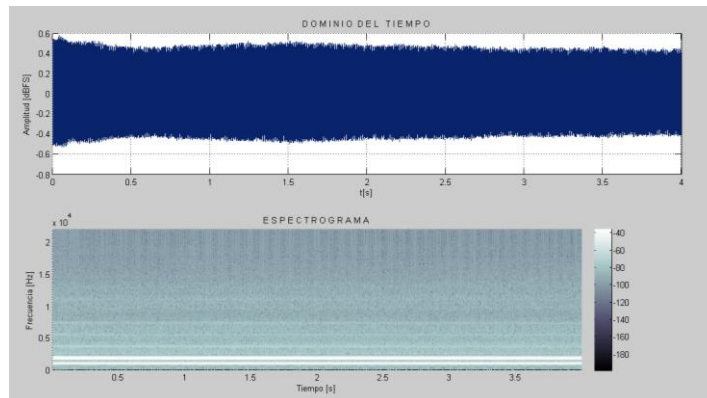


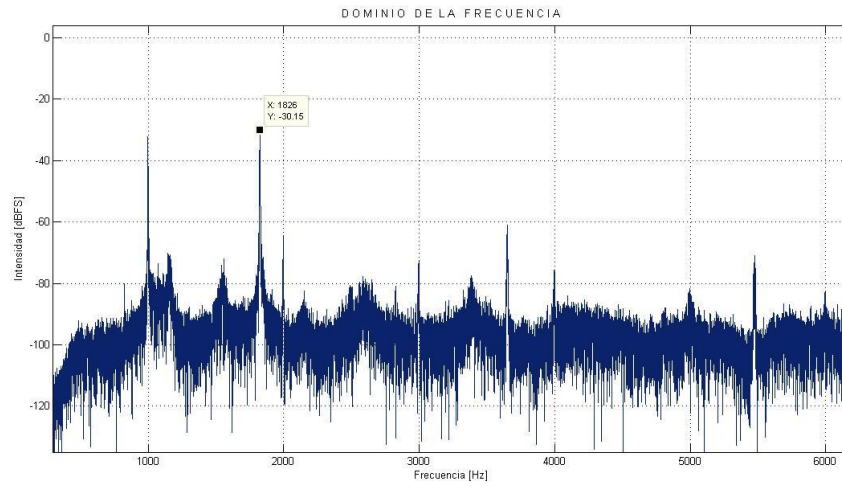
Primer Parcial



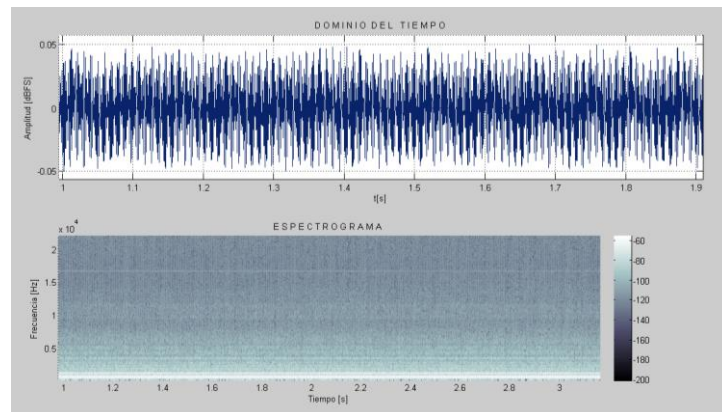
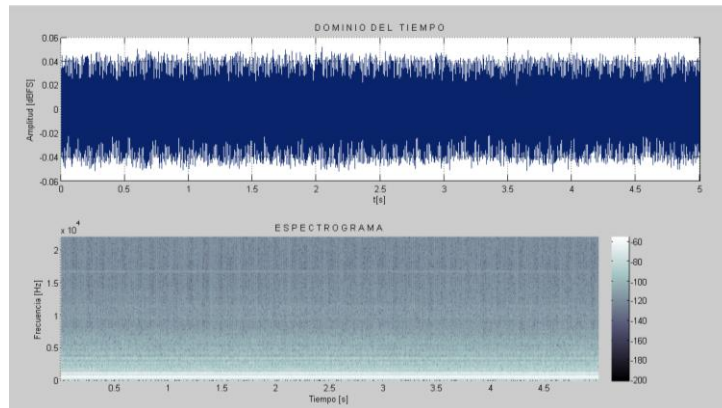


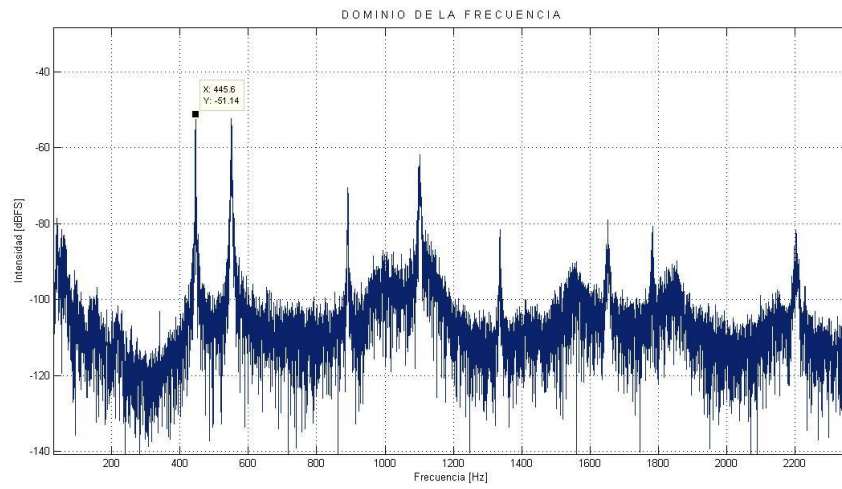
Segundo Parcial



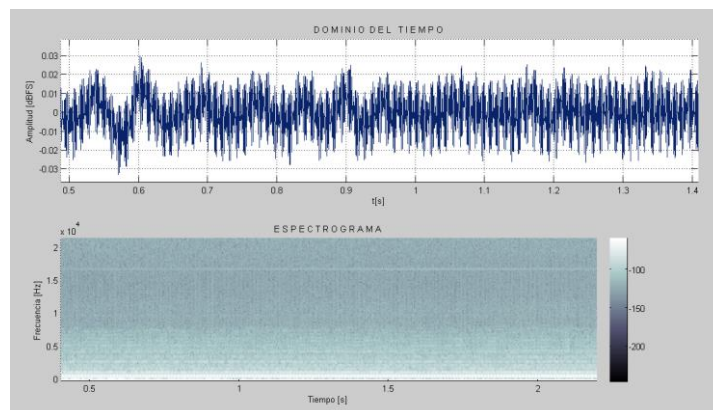
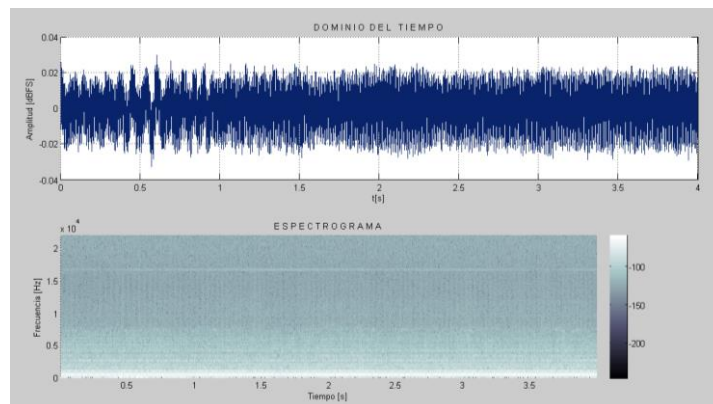


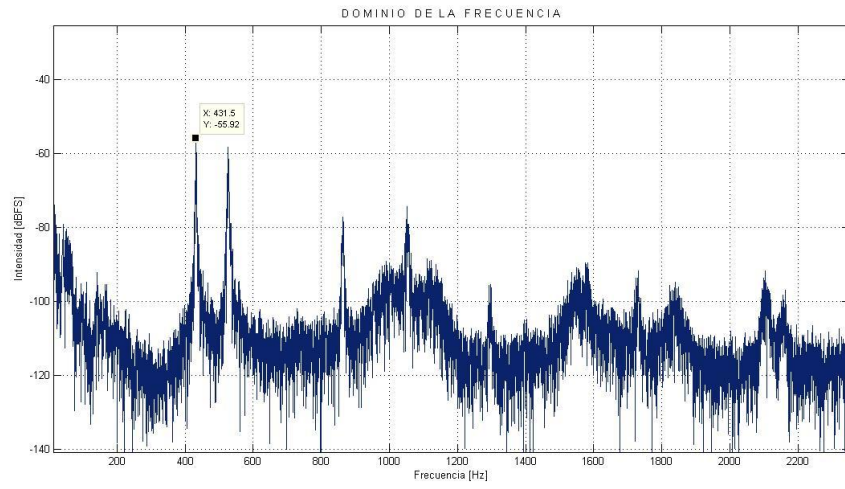
Sonido Medio



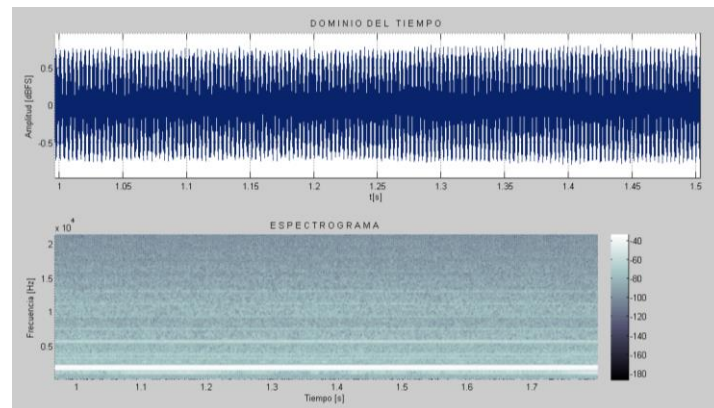
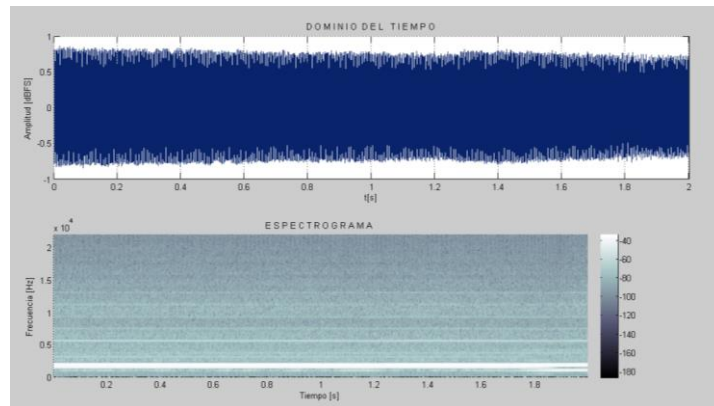


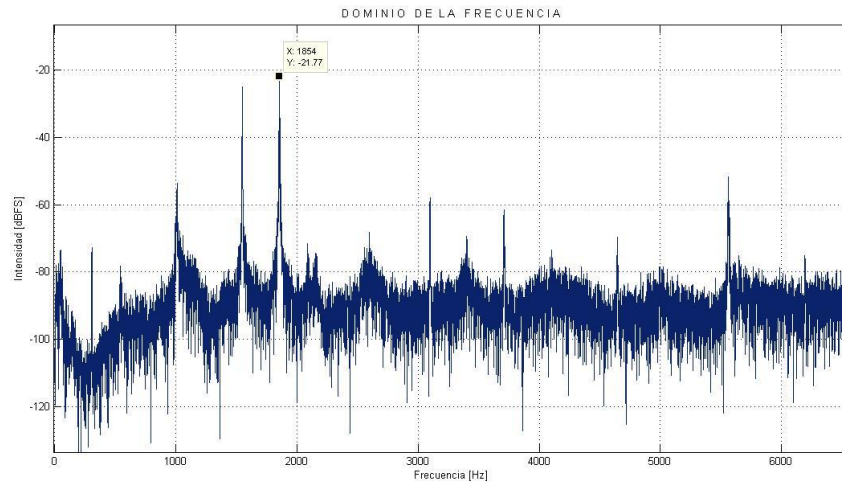
Sonido Suave





Tercer Parcial

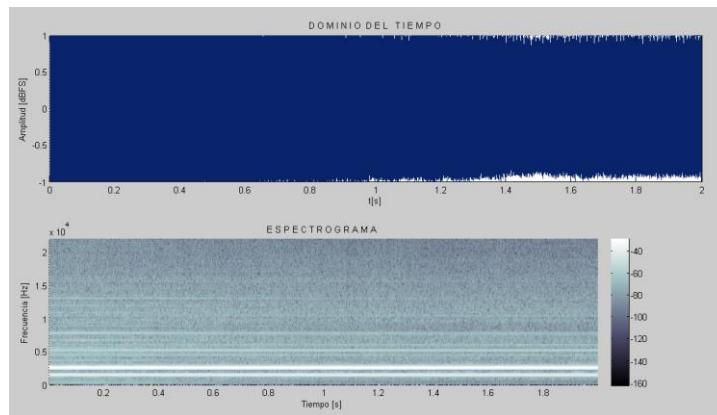


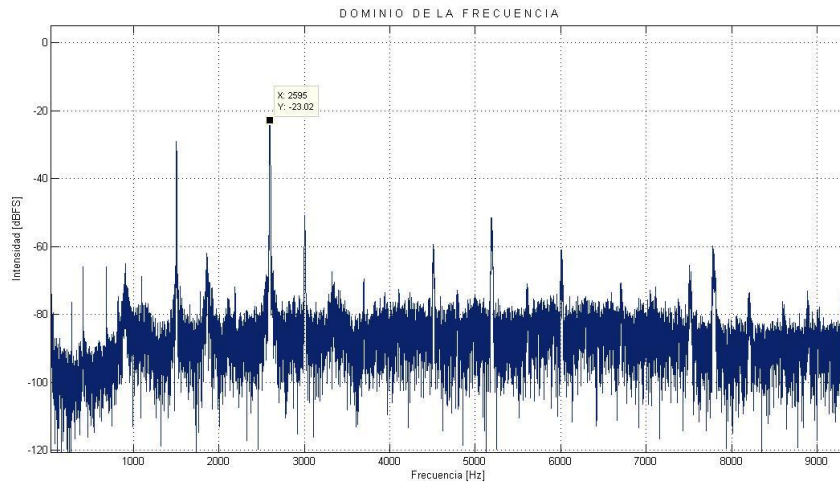
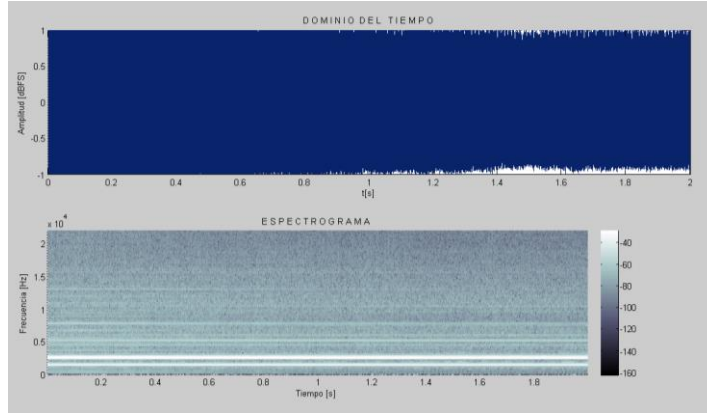


Flautas 1 y 3 orificios tapados

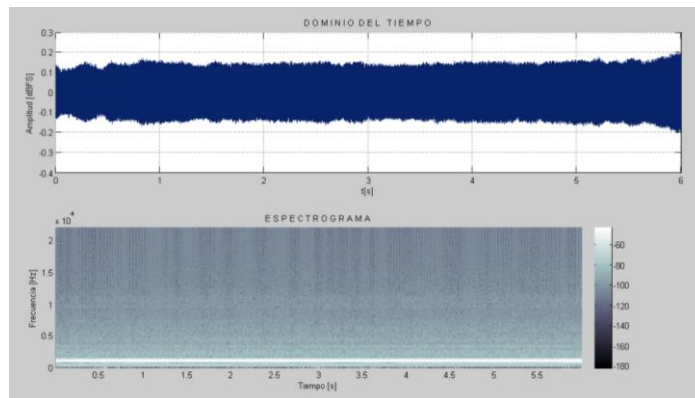


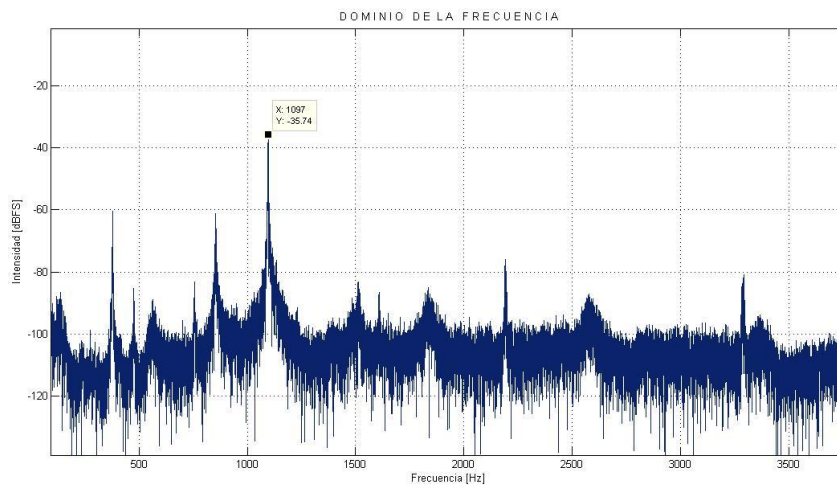
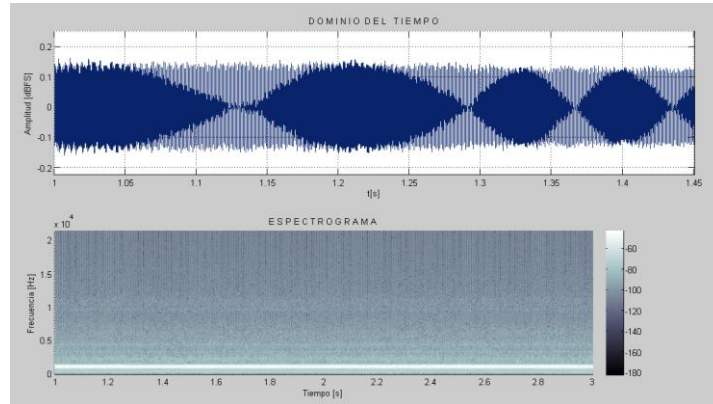
Cuarto Parcial



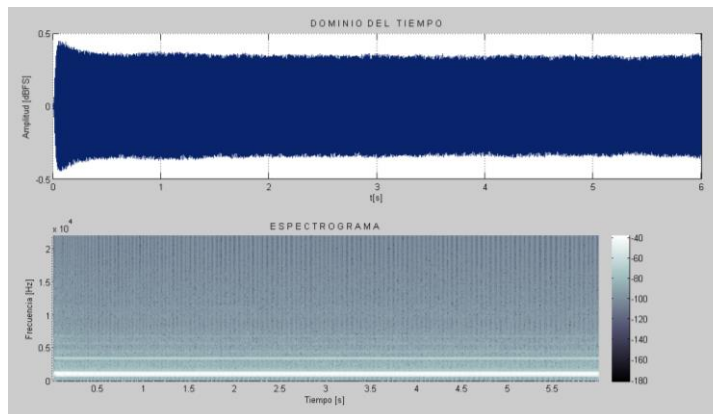


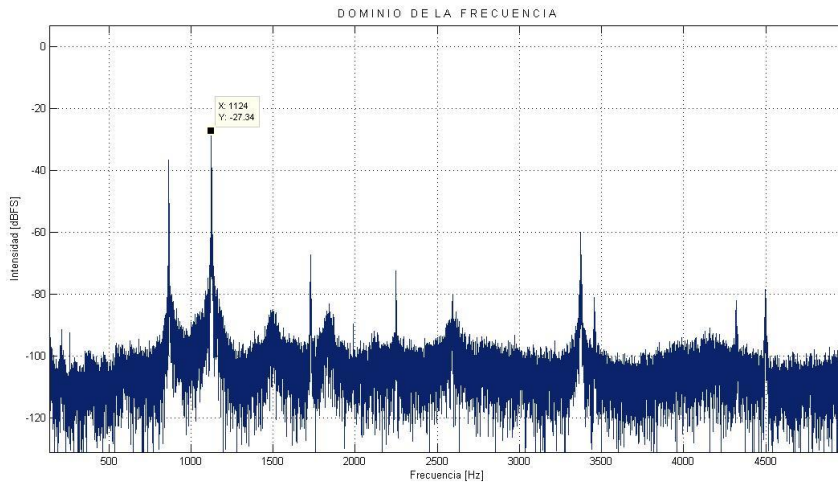
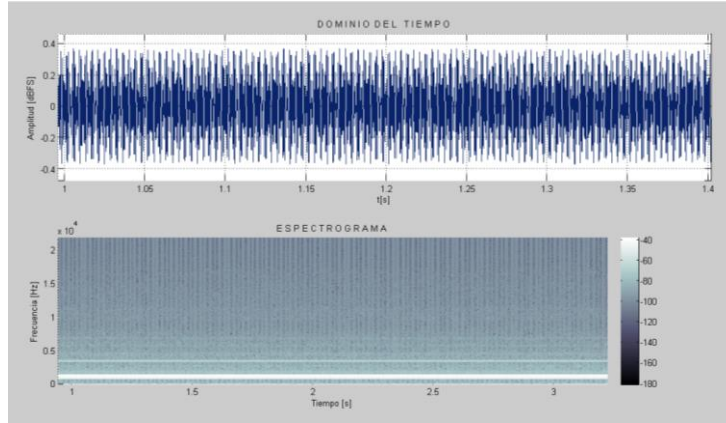
Primer Parcial



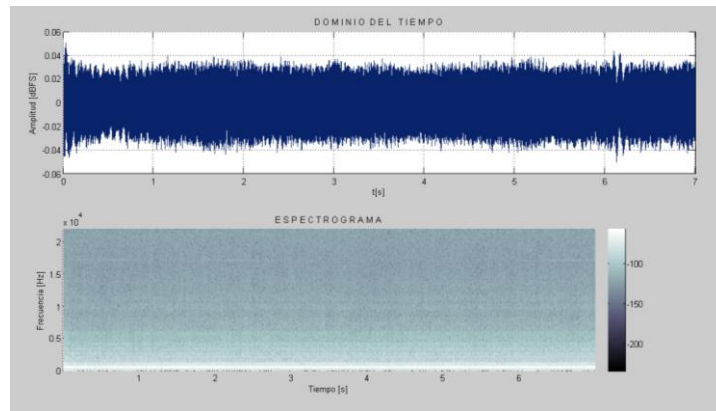


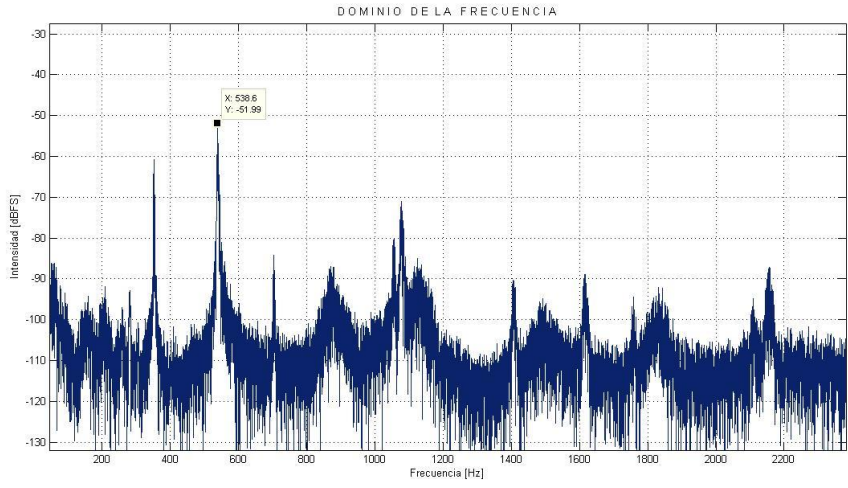
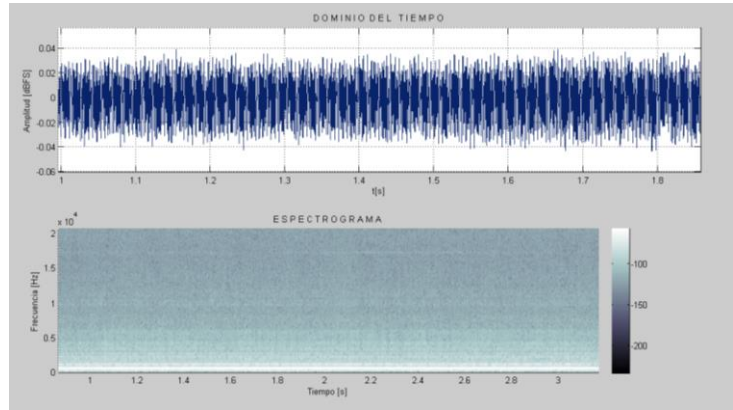
Segundo Parcial



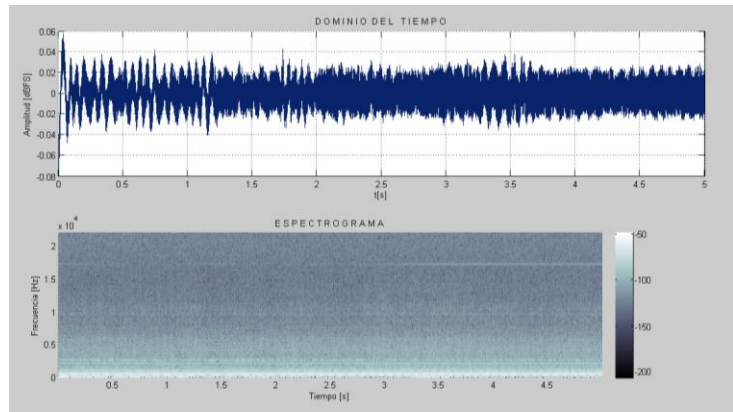


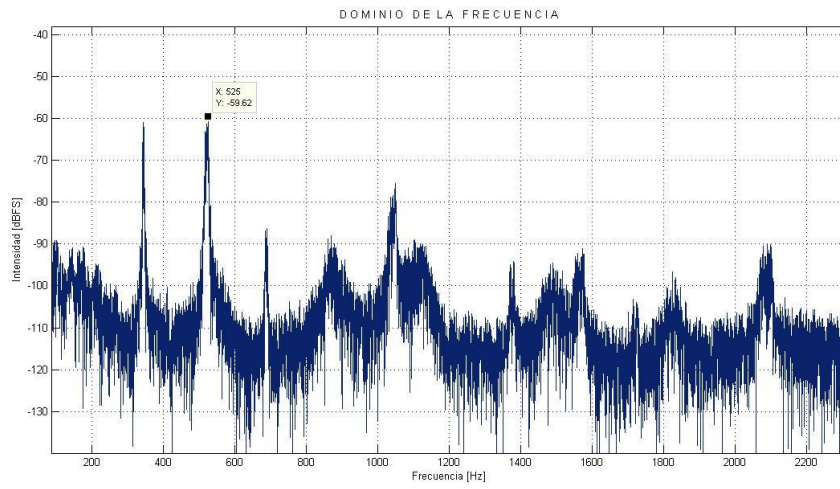
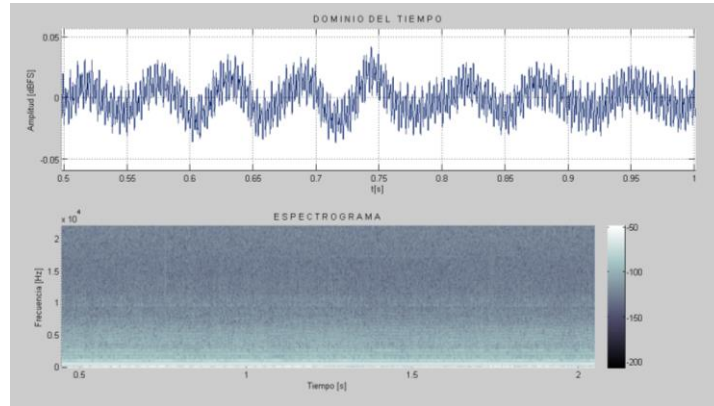
Sonido Medio



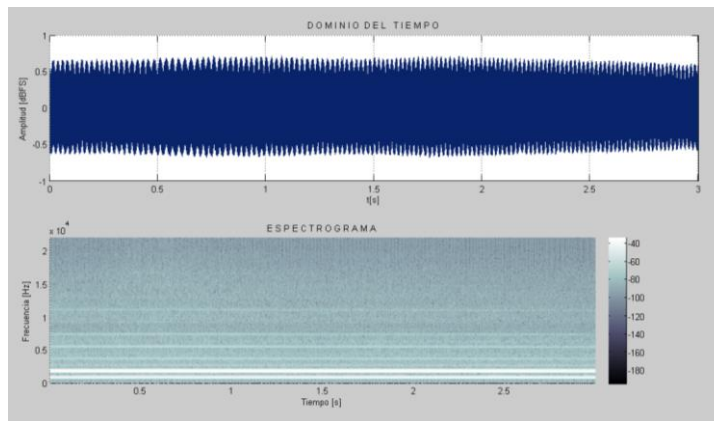


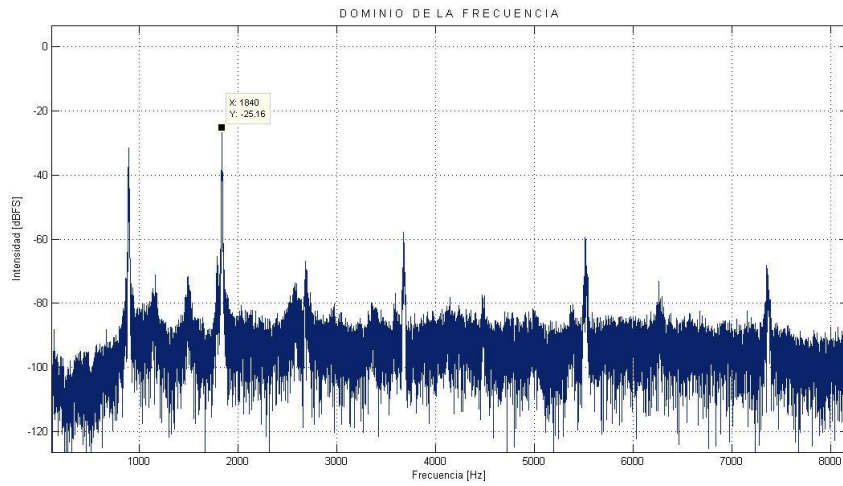
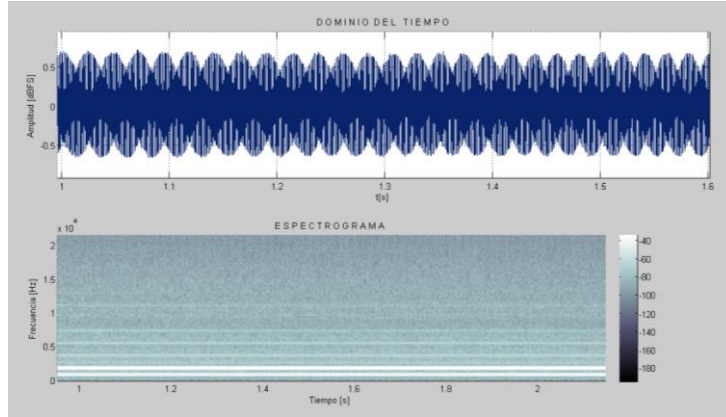
Sonido Suave





Tercer Parcial



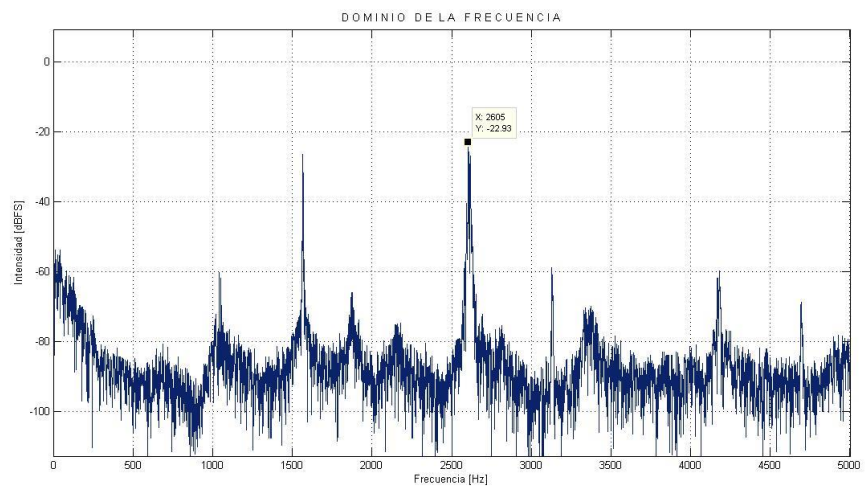
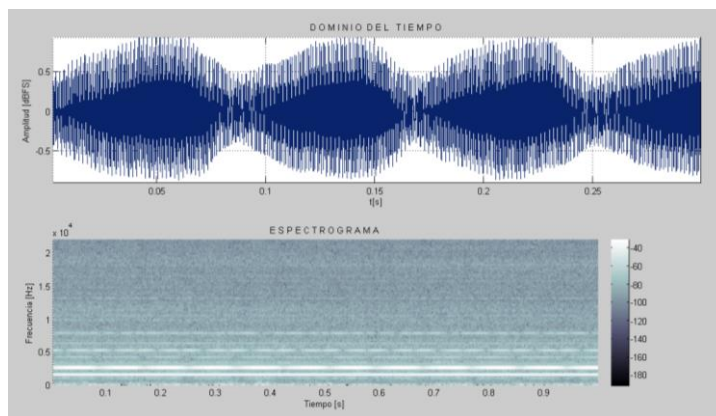
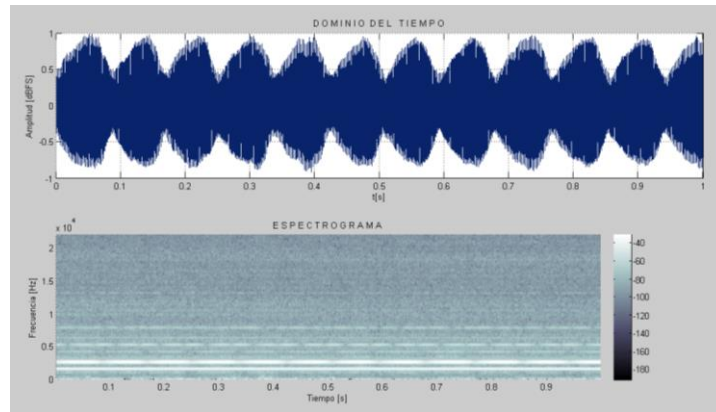


GRABACIÓN 5: LAS TRES FLAUTAS

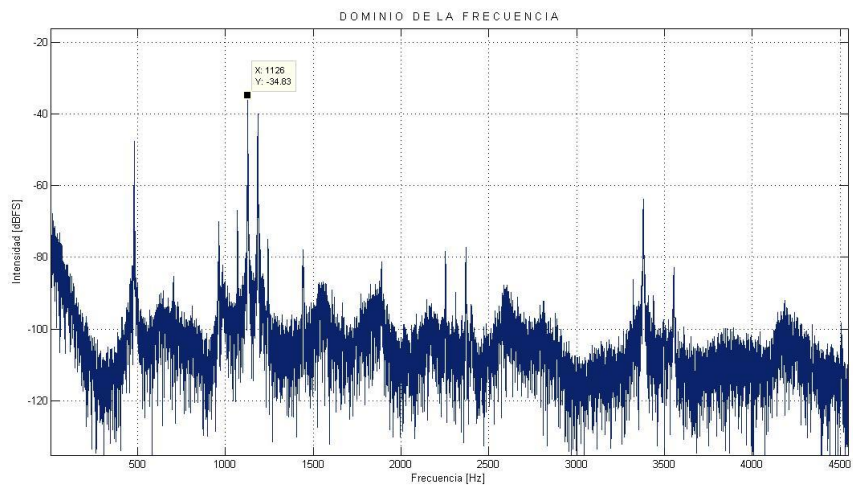
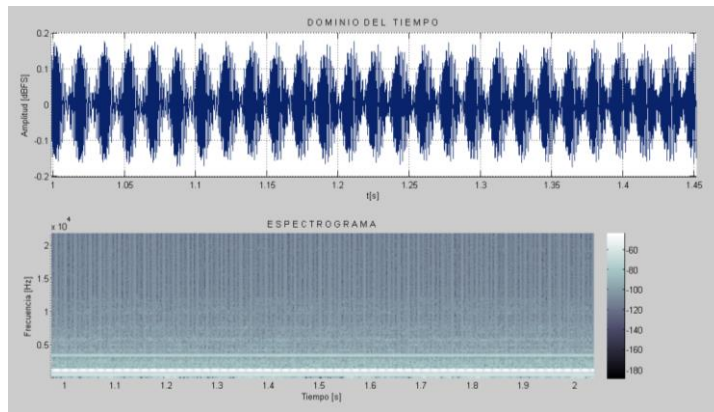
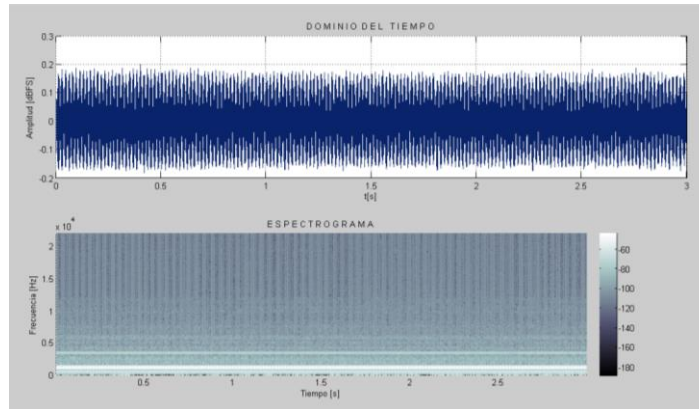
Obturando completa la F3 destapadas F1y F2



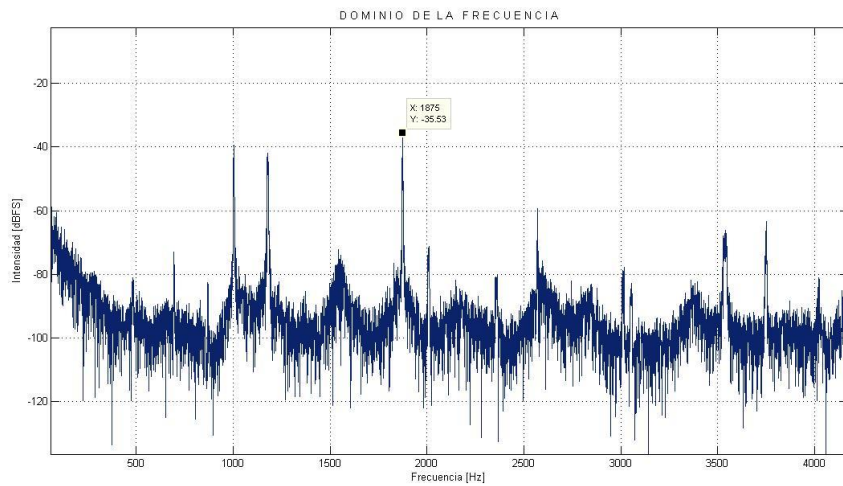
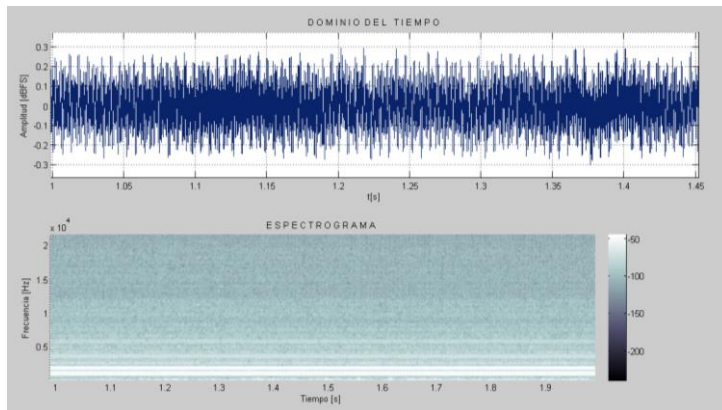
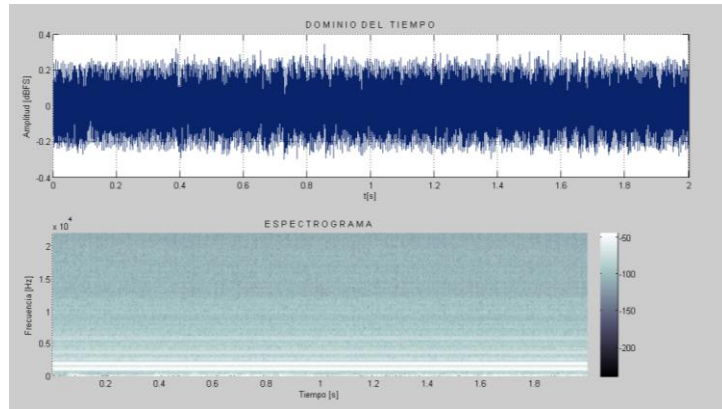
Cuarto Parcial



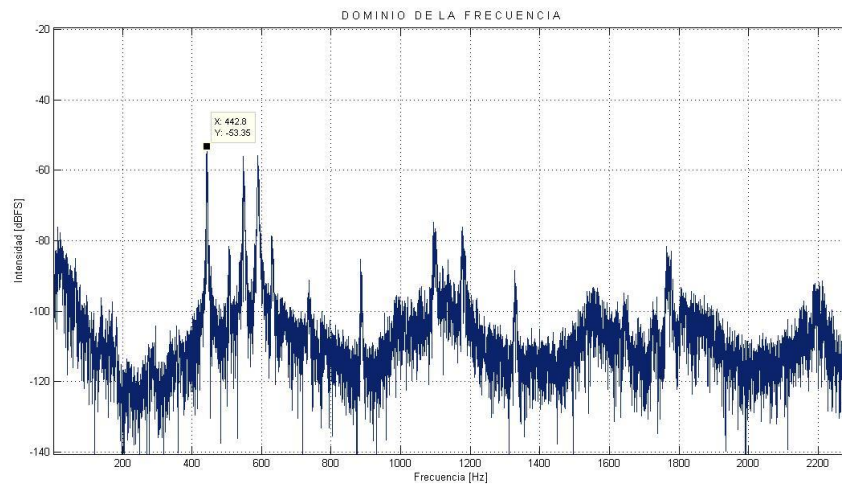
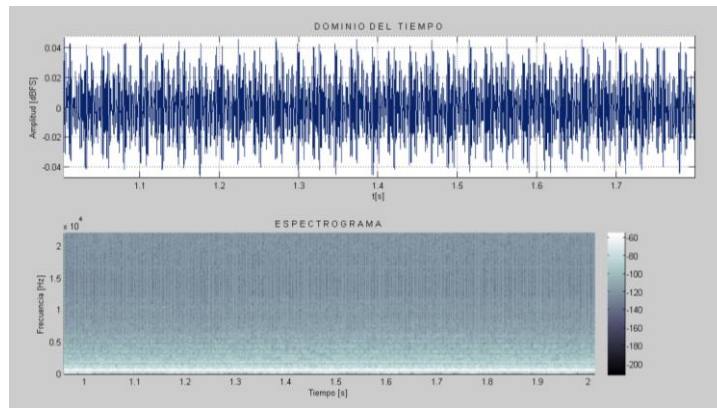
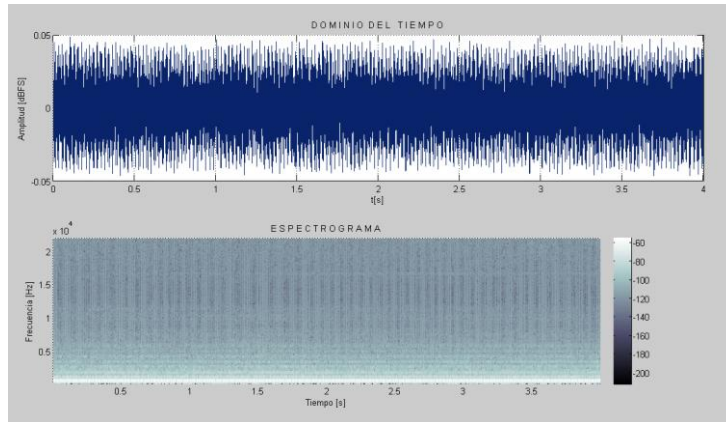
Primer Parcial



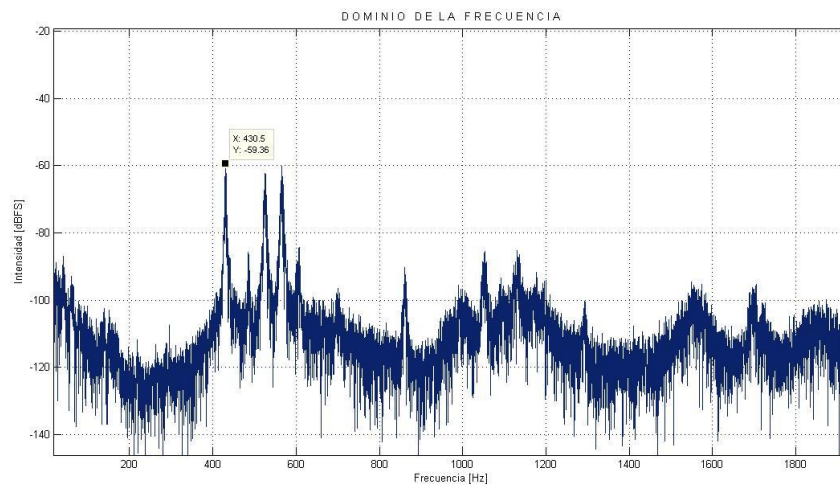
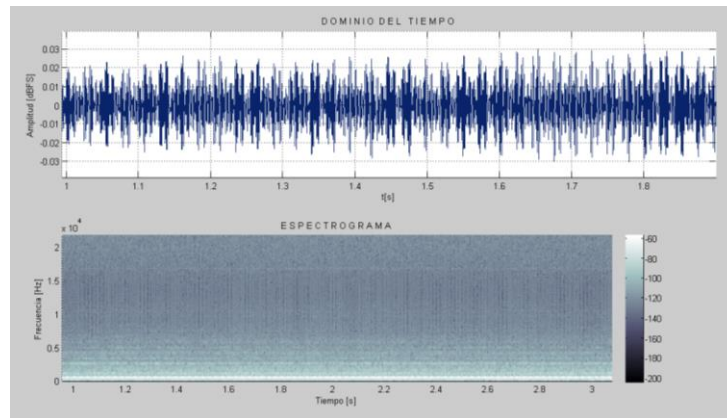
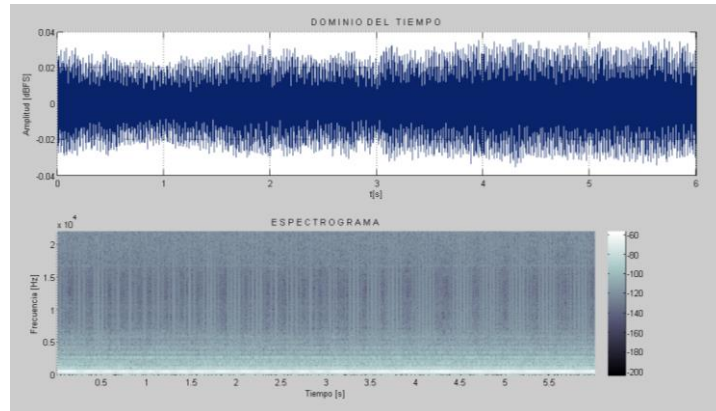
Segundo Parcial



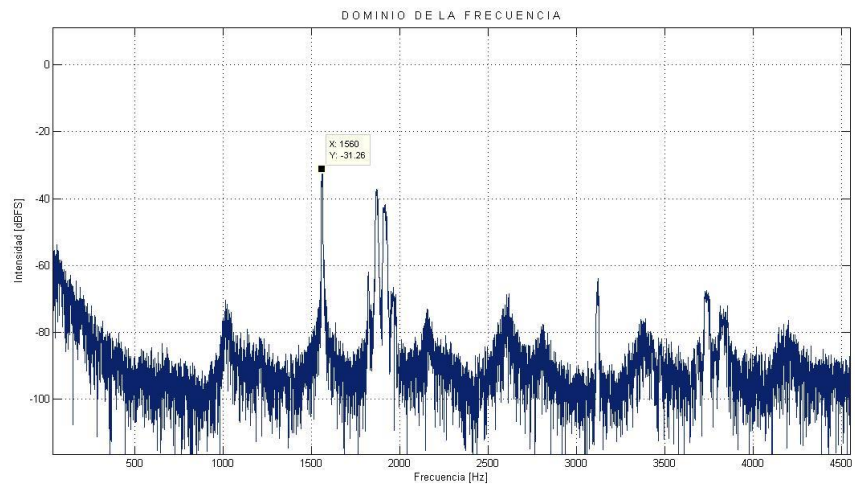
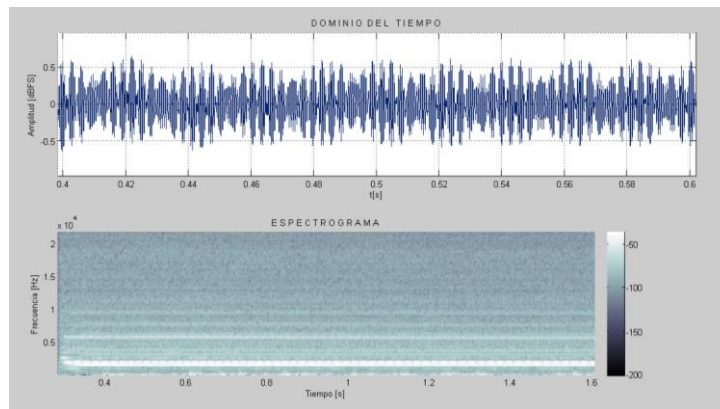
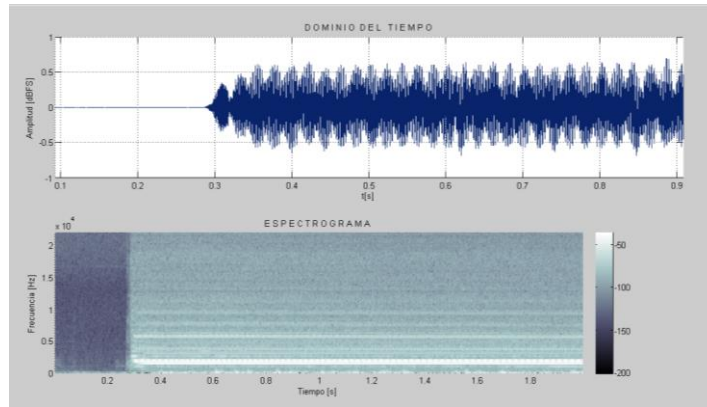
Sonido Medio



Sonido Suave



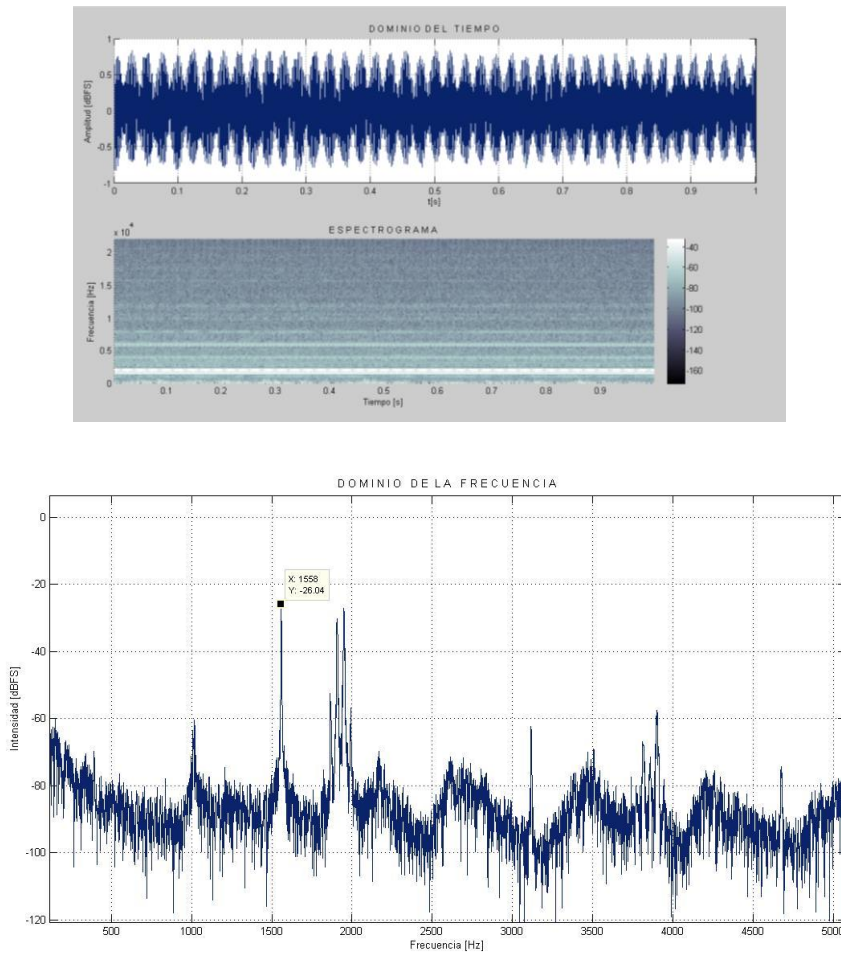
Tercer Parcial



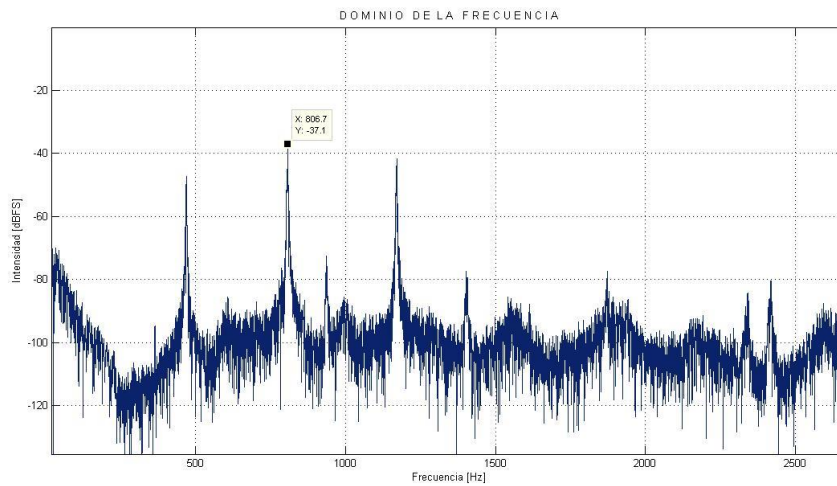
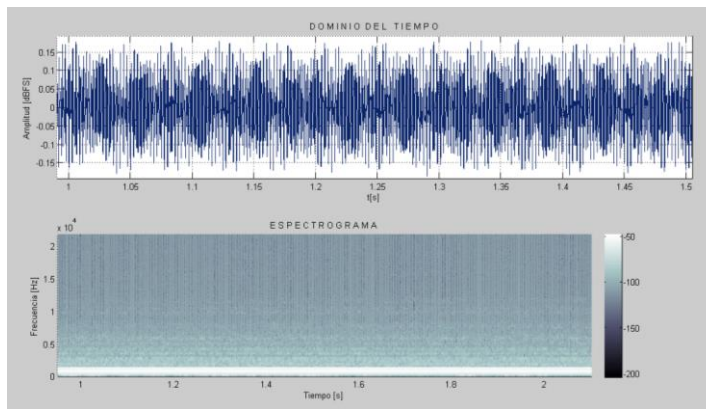
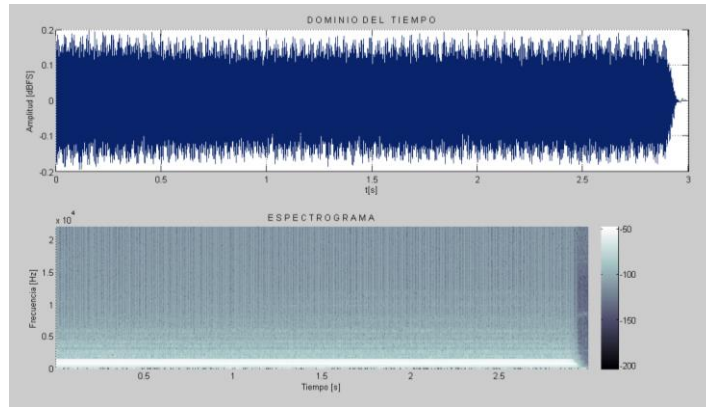
Destapadas las 3 flautas



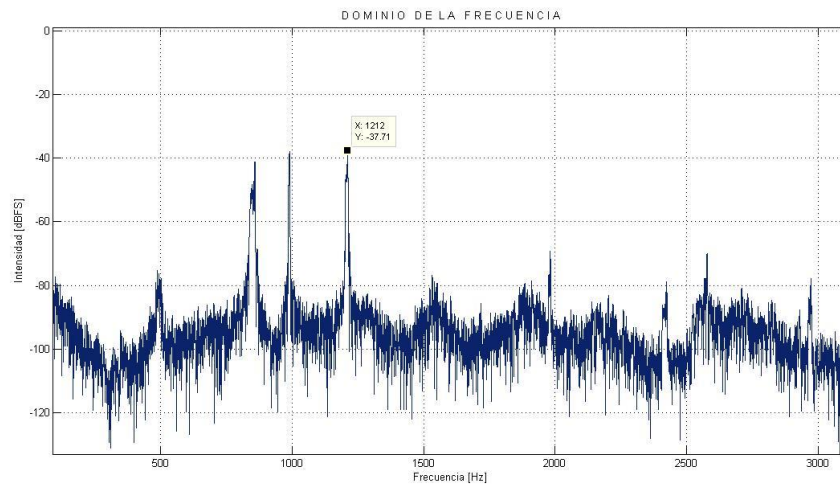
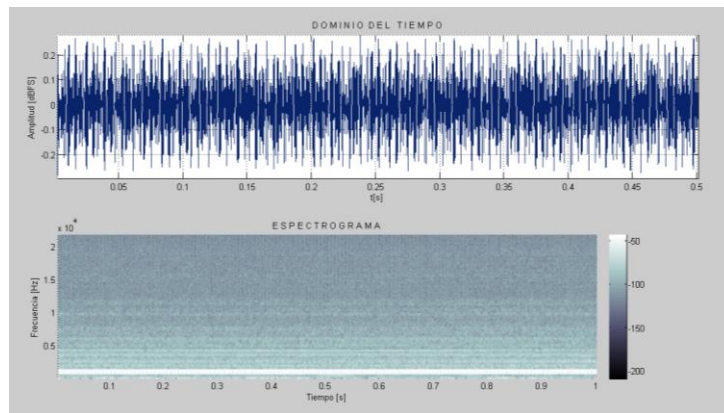
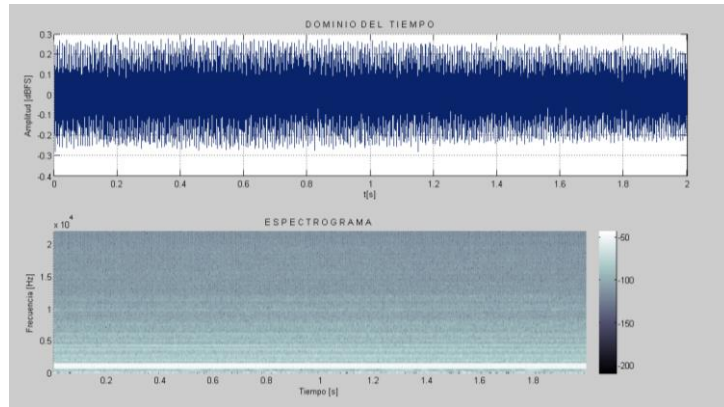
Cuarto Parcial



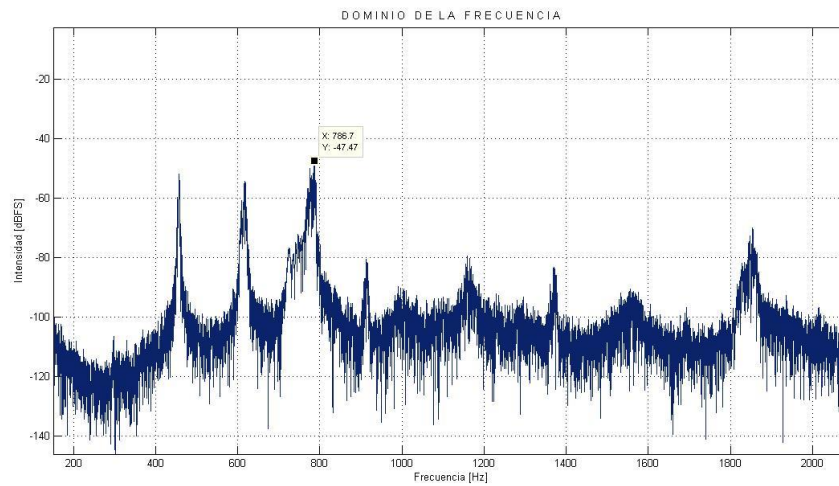
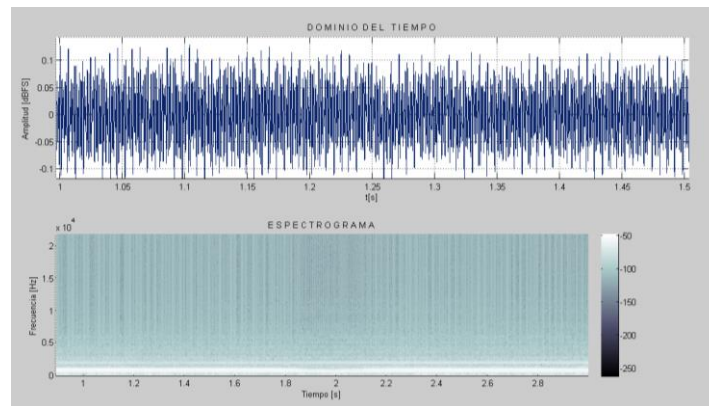
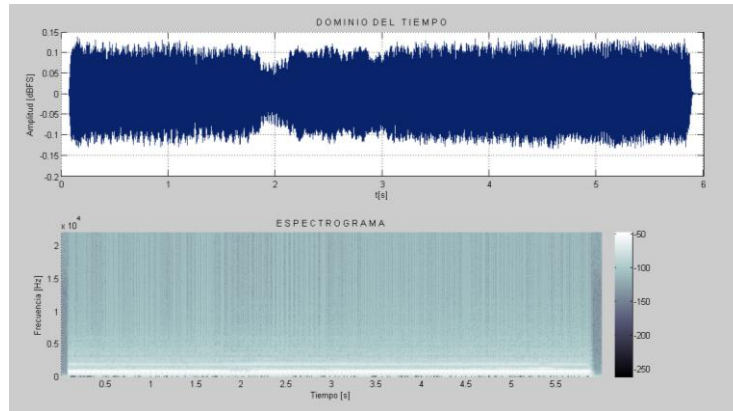
Primer Parcial



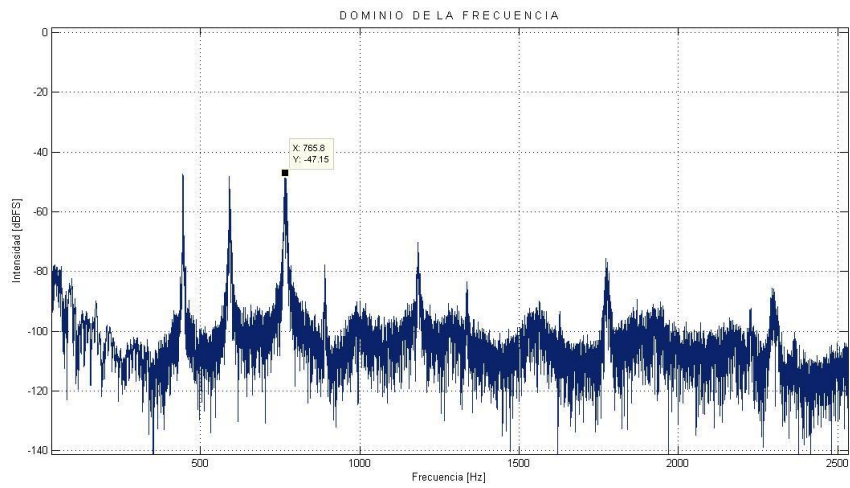
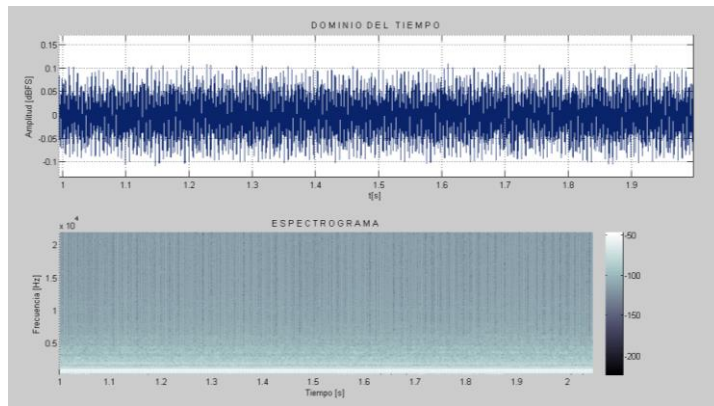
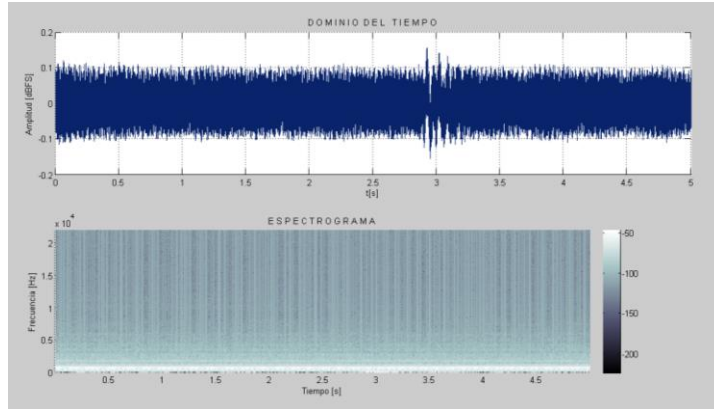
Segundo Parcial



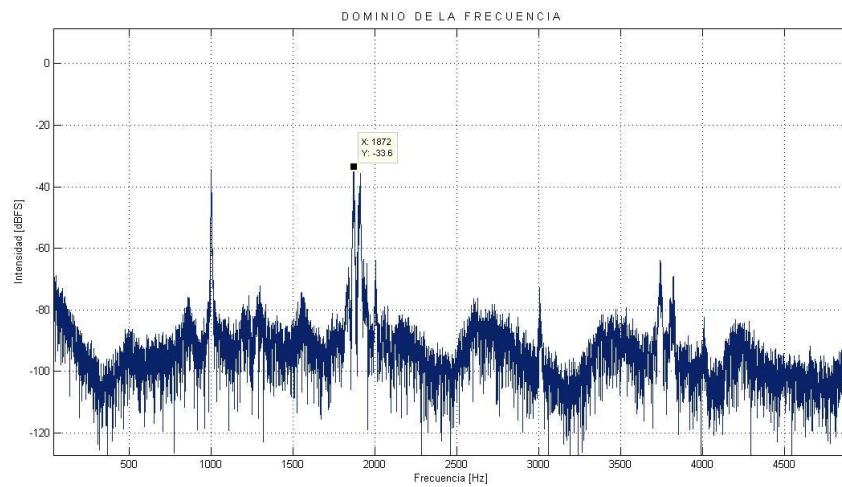
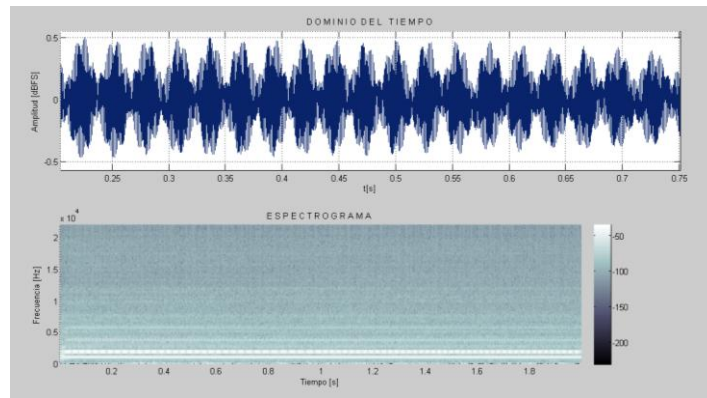
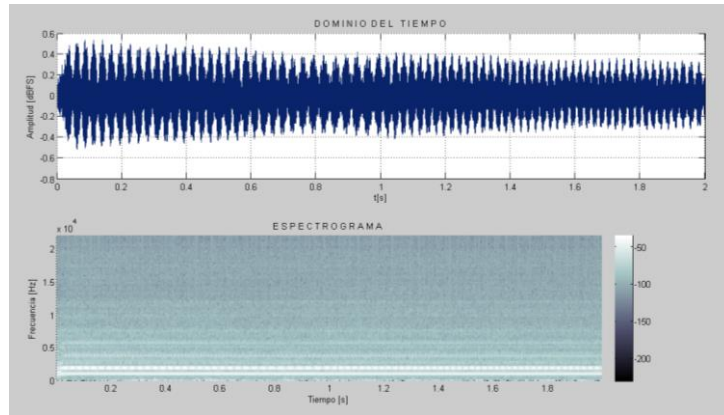
Sonido Medio



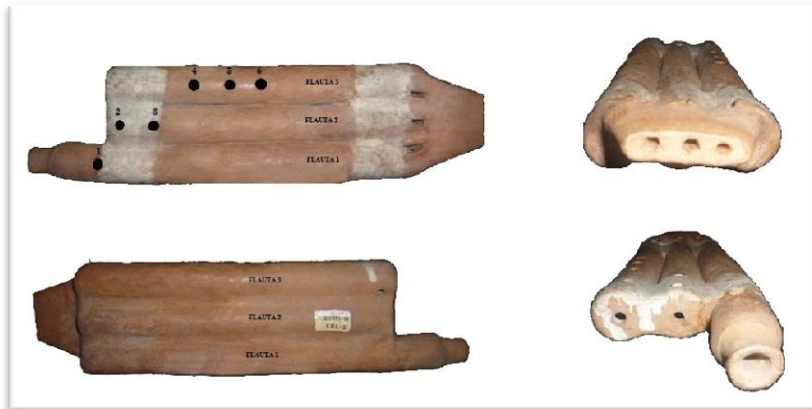
Sonido Suave



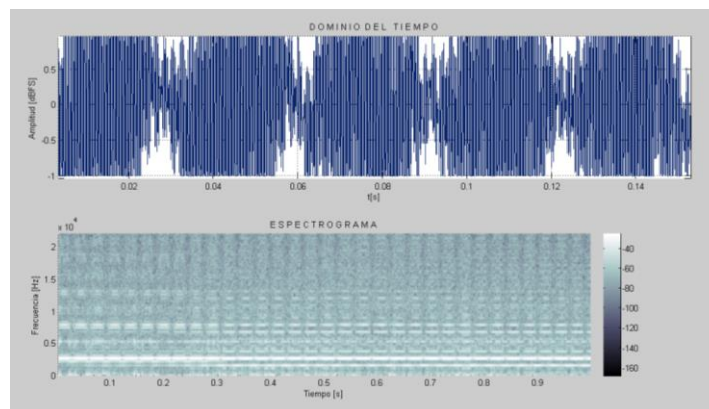
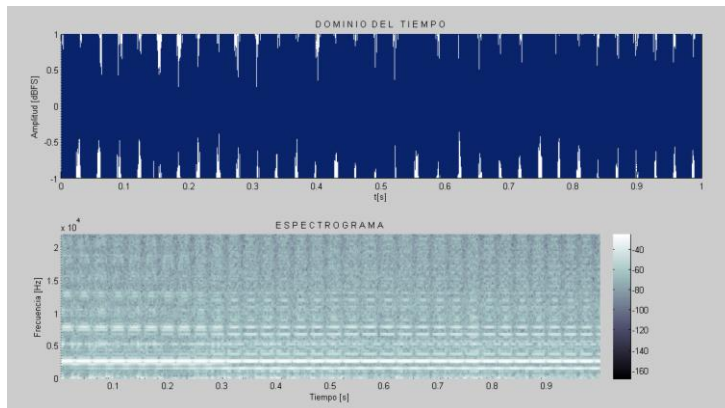
Tercer Parcial

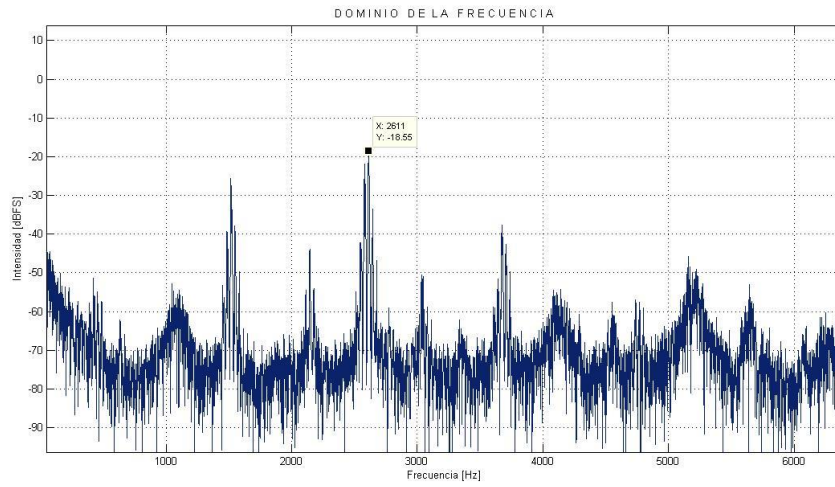


Obturando las 3 flautas

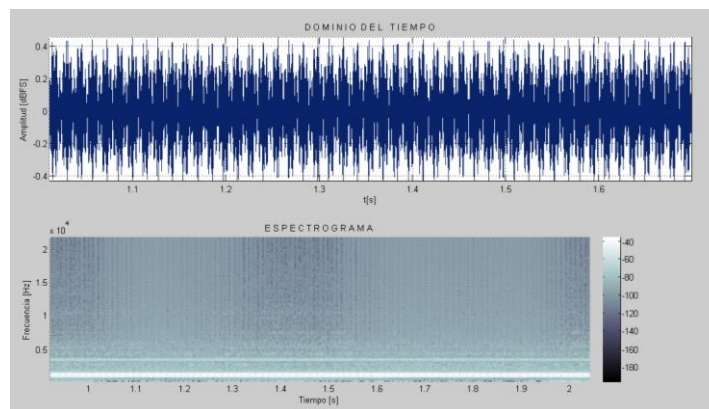
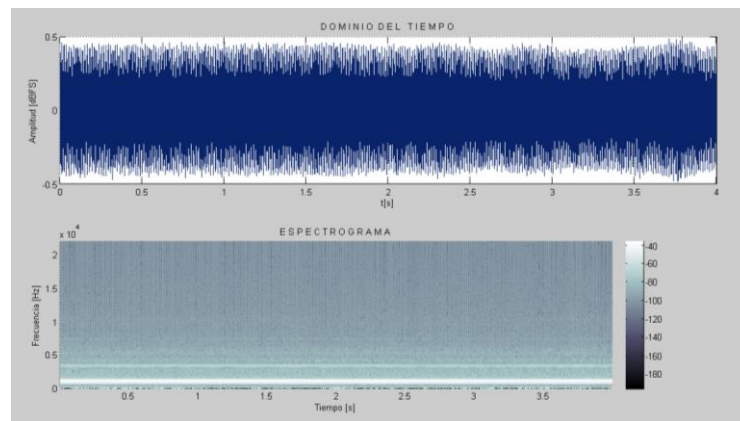


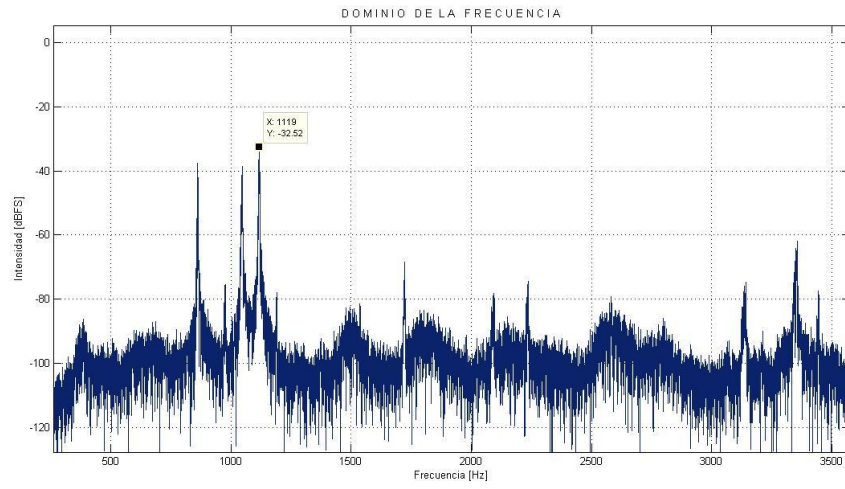
Cuarto Parcial



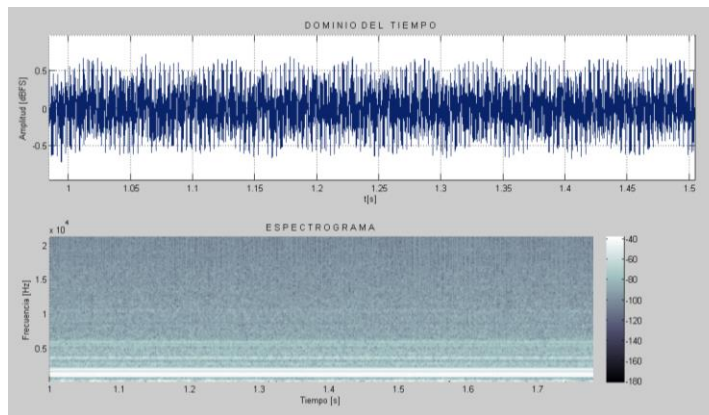
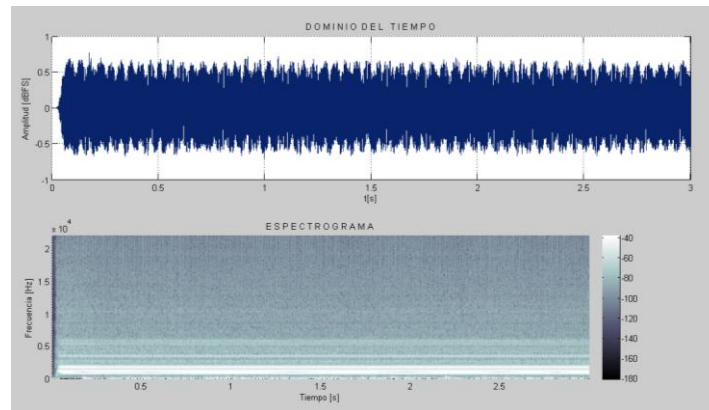


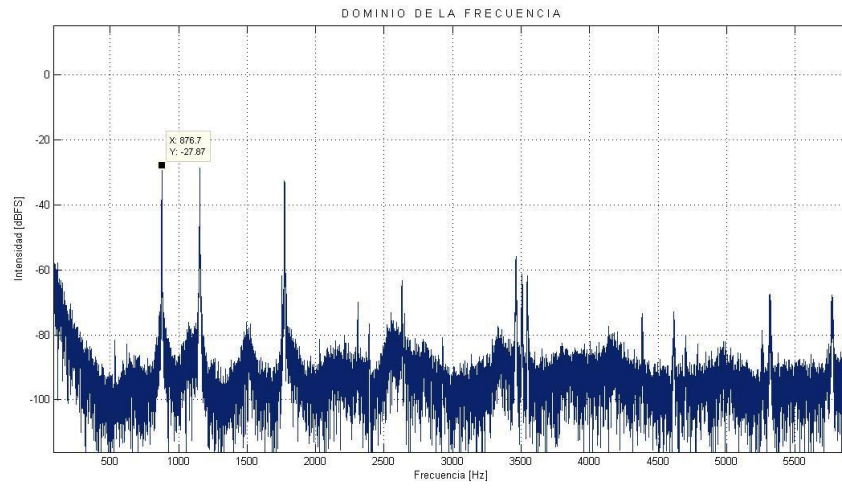
Primer Parcial



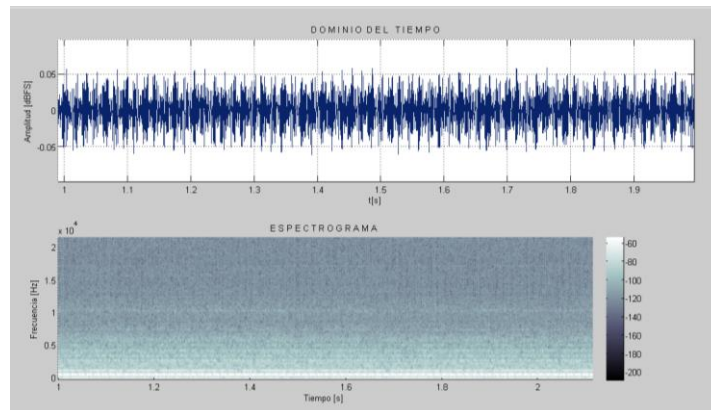
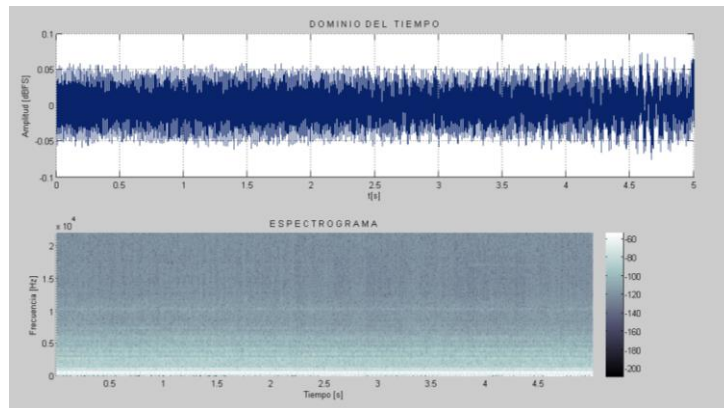


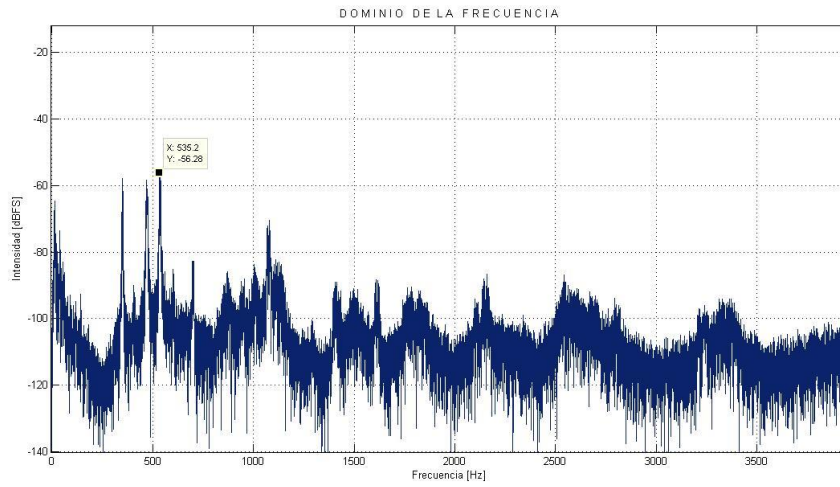
Segundo Parcial



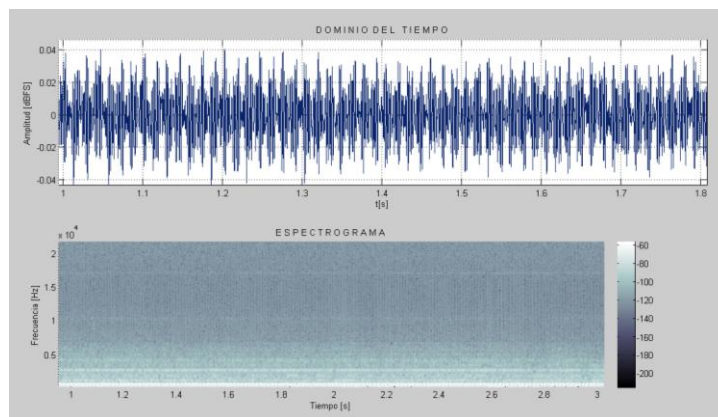
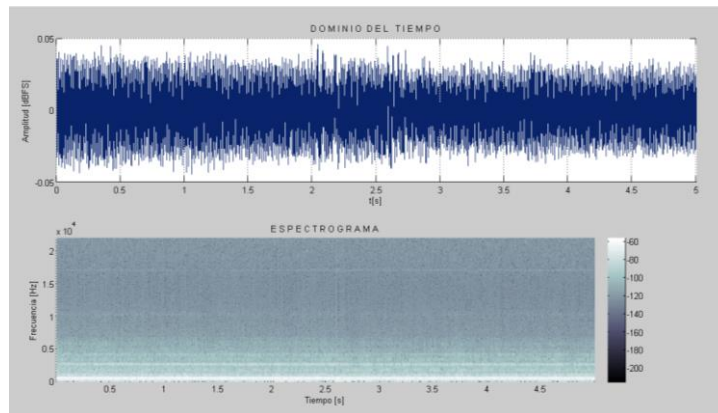


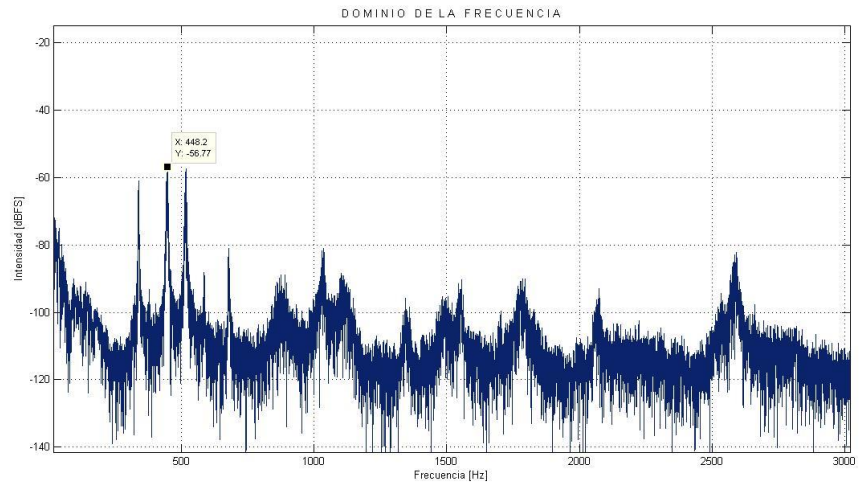
Sonido Medio



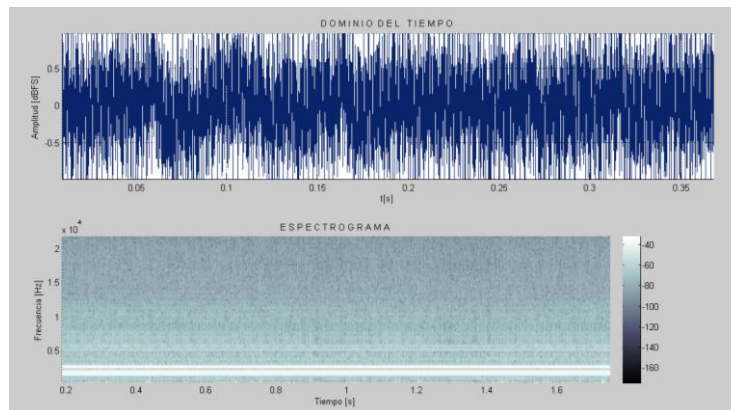
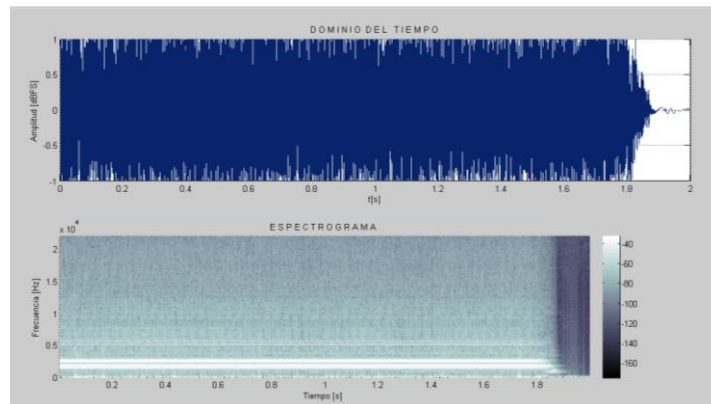


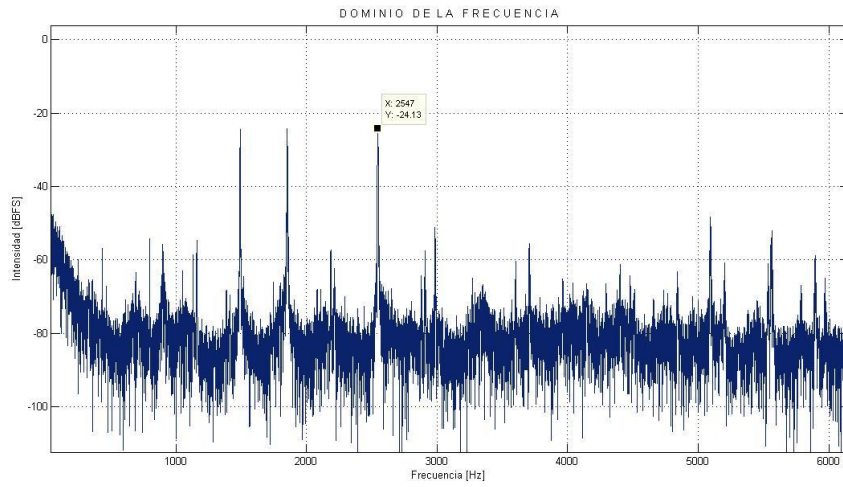
Sonido Suave





Tercer Parcial

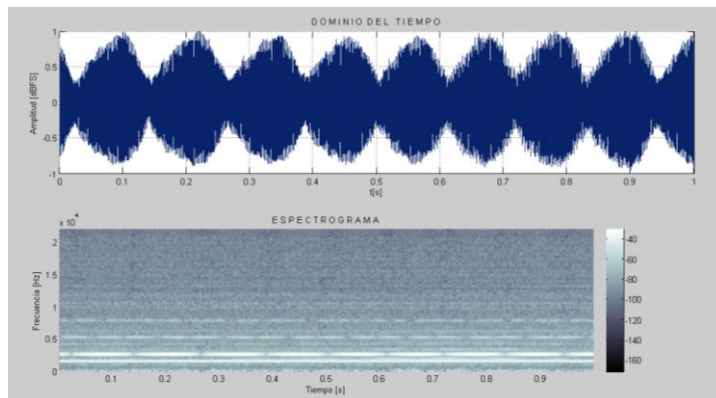


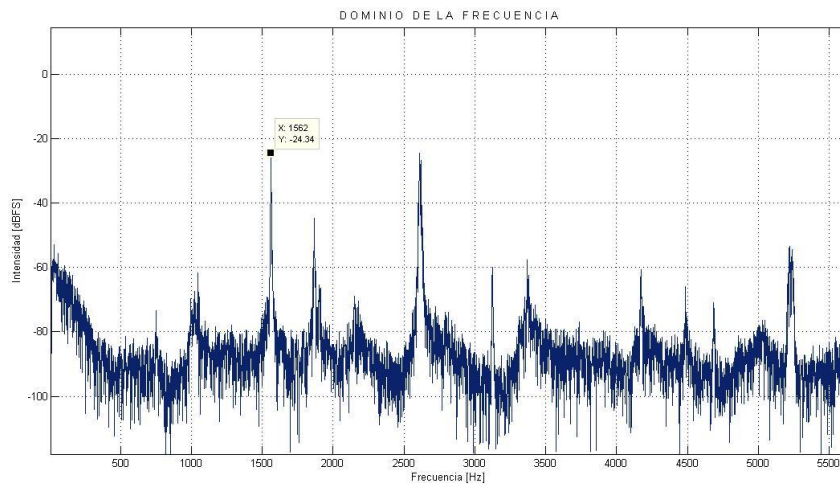
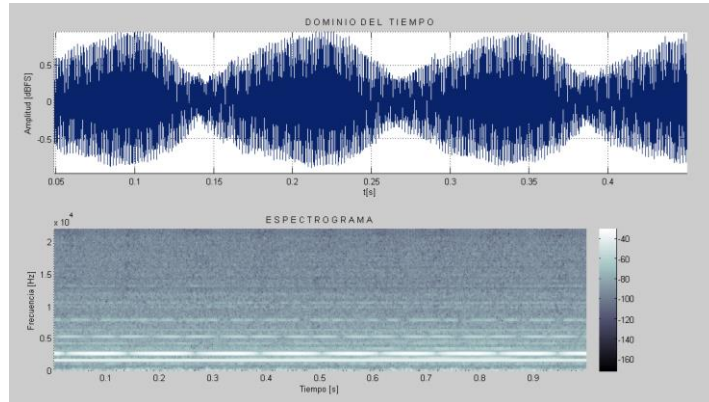


Obturando 4 y 5 de la F3 destapadas F1 y F2

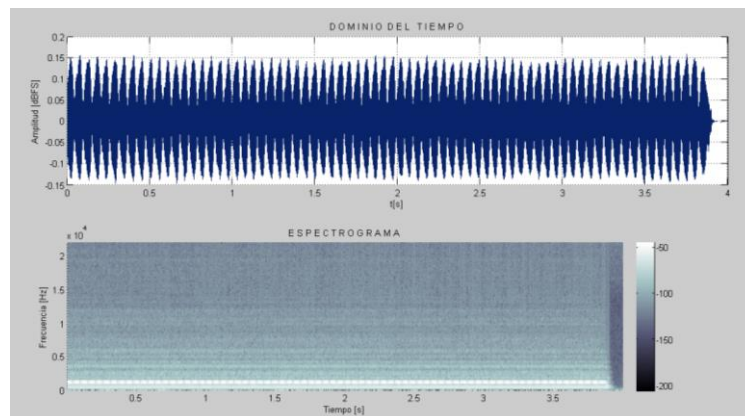


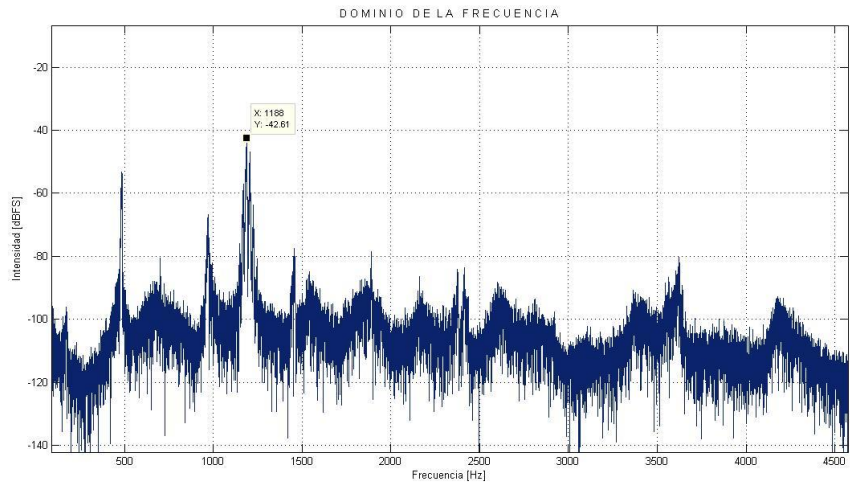
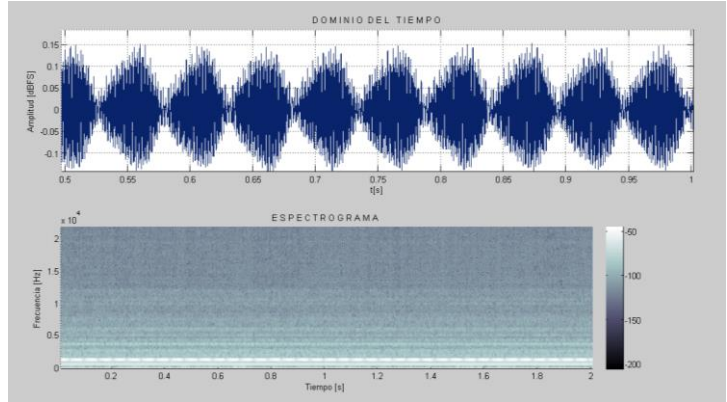
Cuarto Parcial



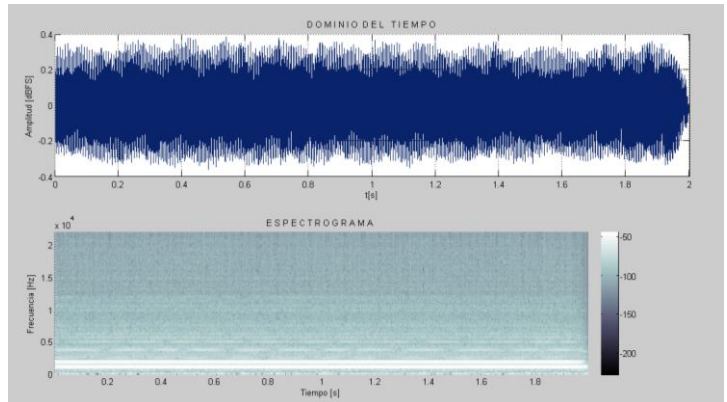


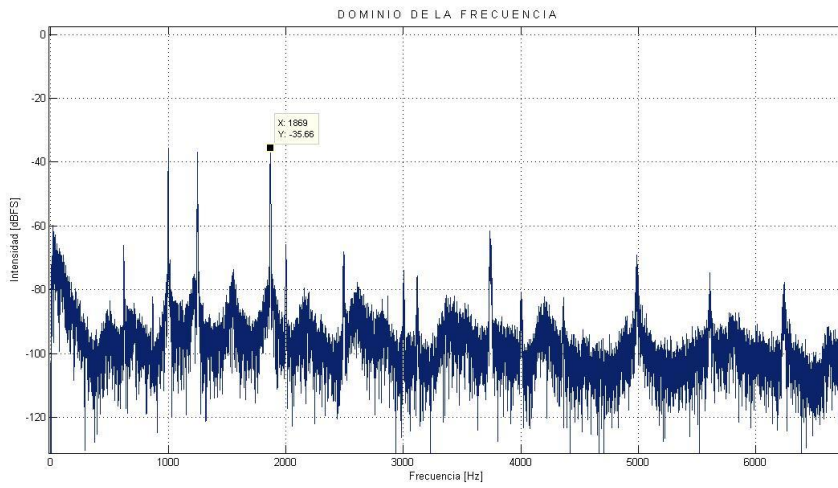
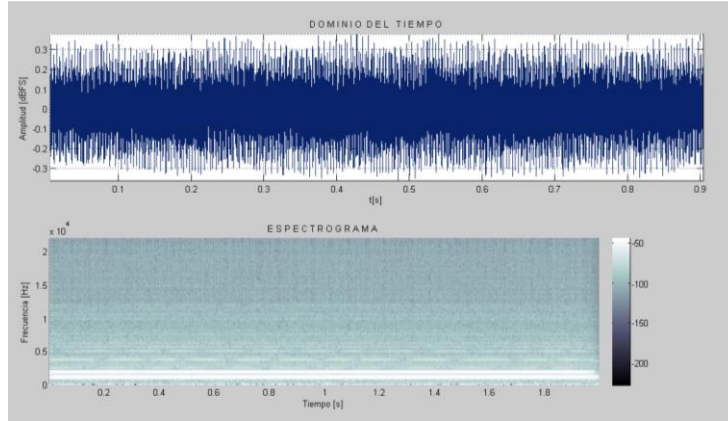
Primer Parcial



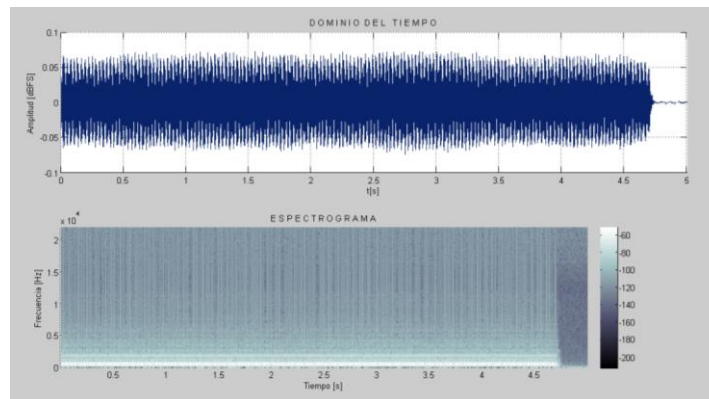


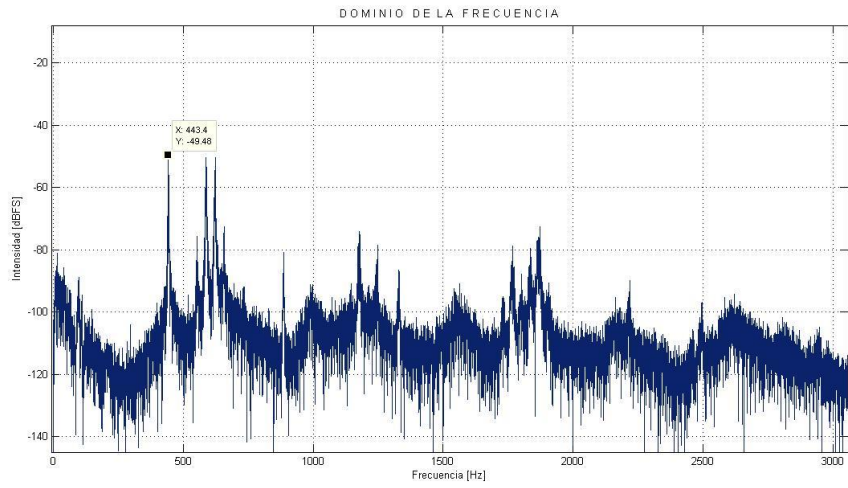
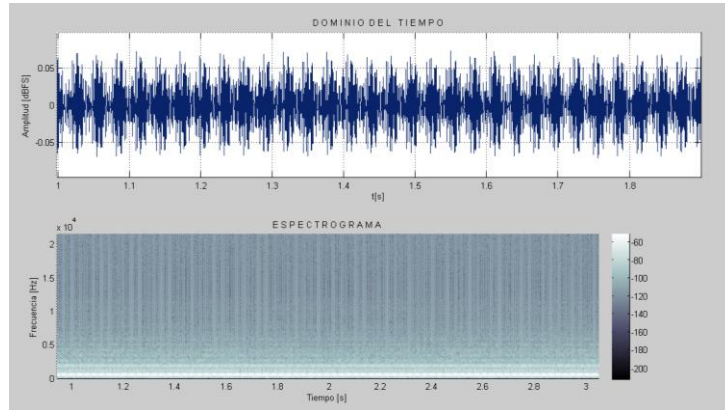
Segundo Parcial



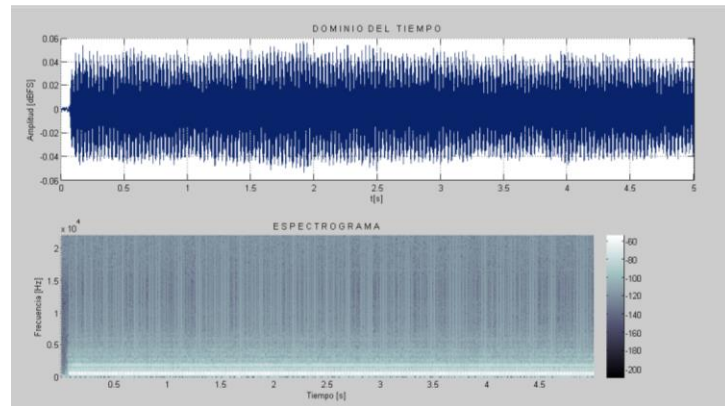


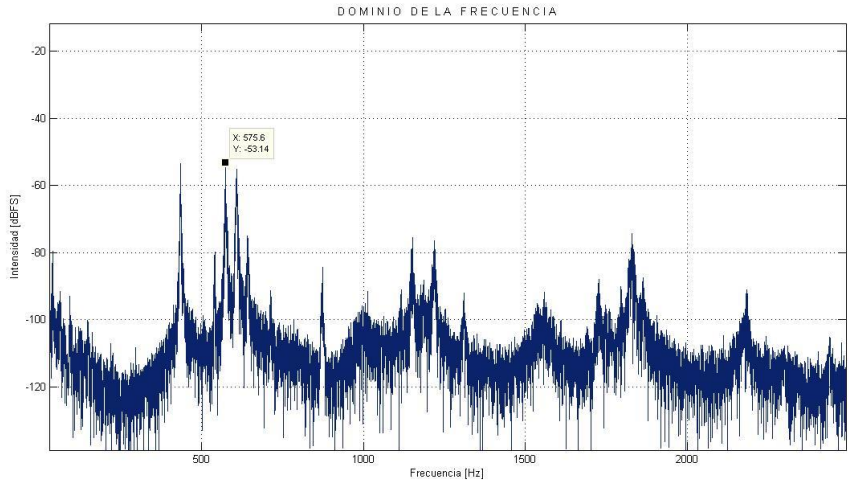
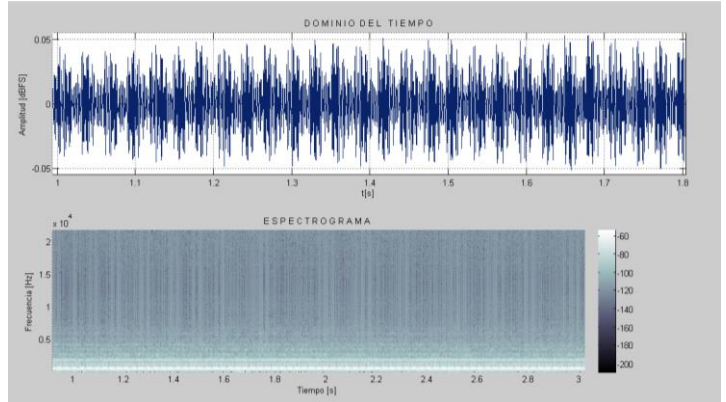
Sonido Medio



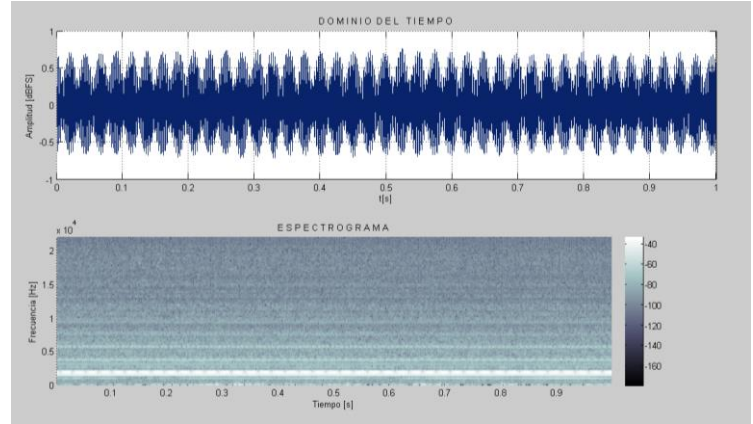


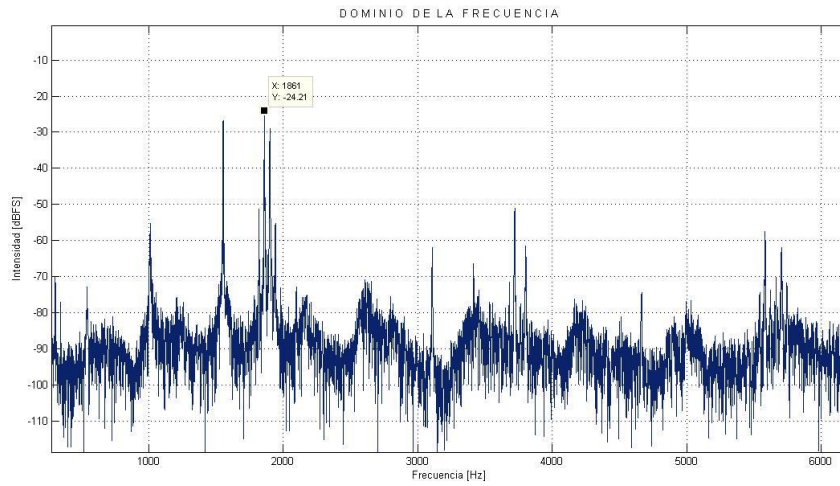
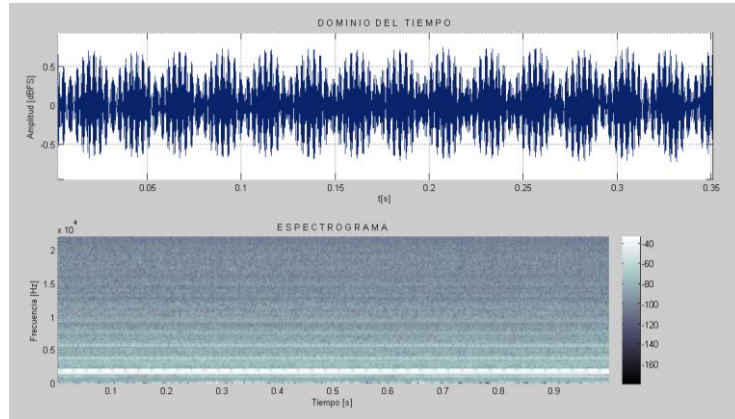
Sonido Suave





Tercer Parcial

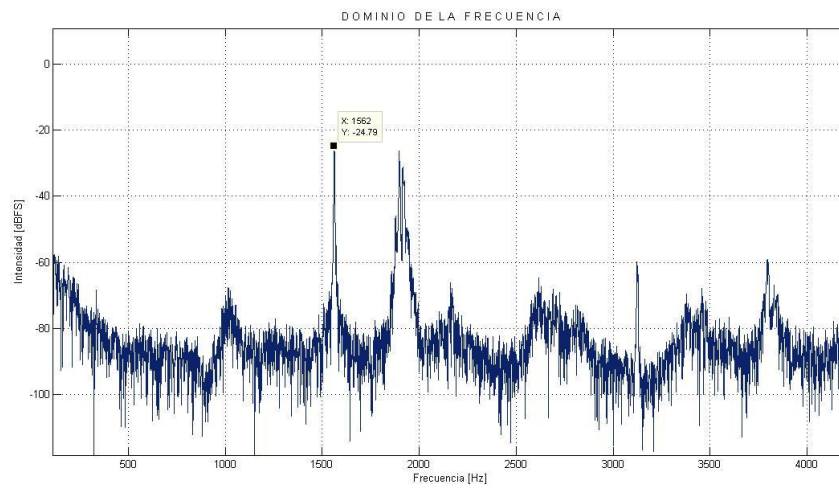
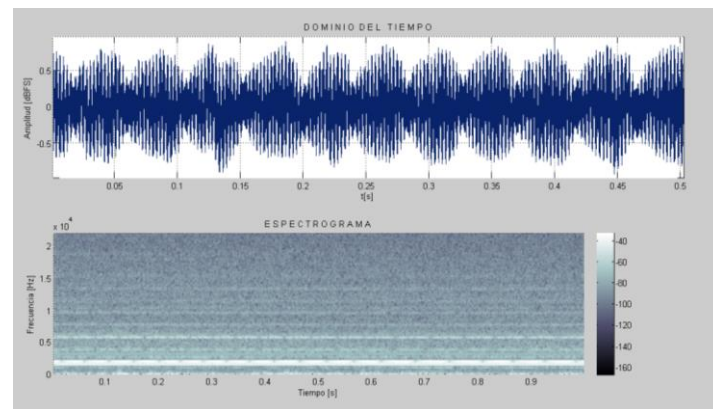
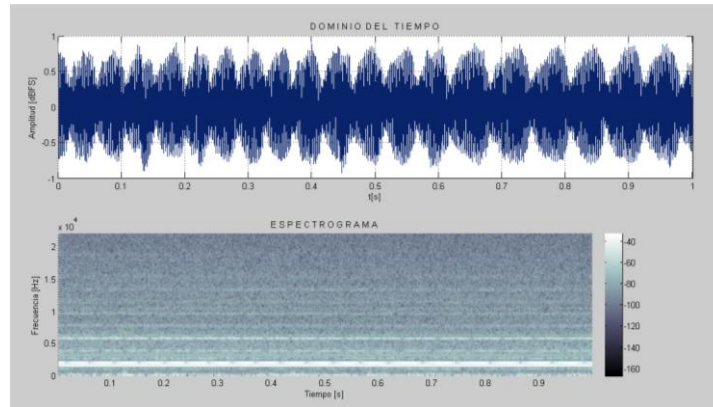




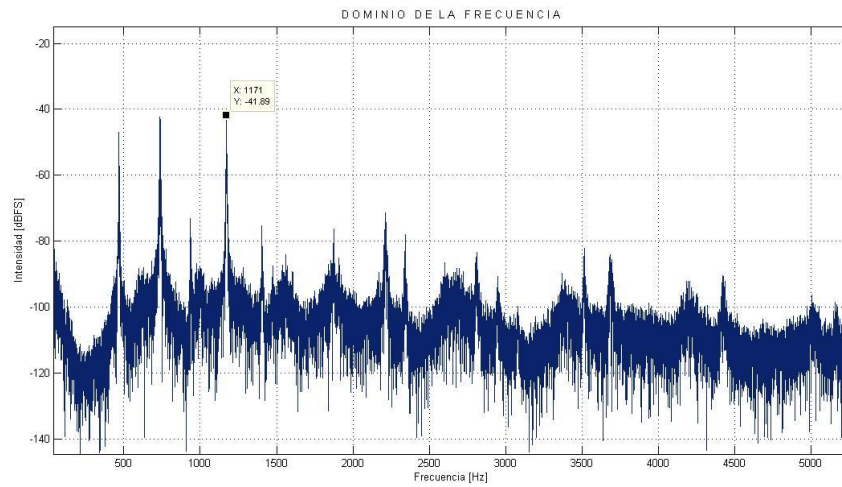
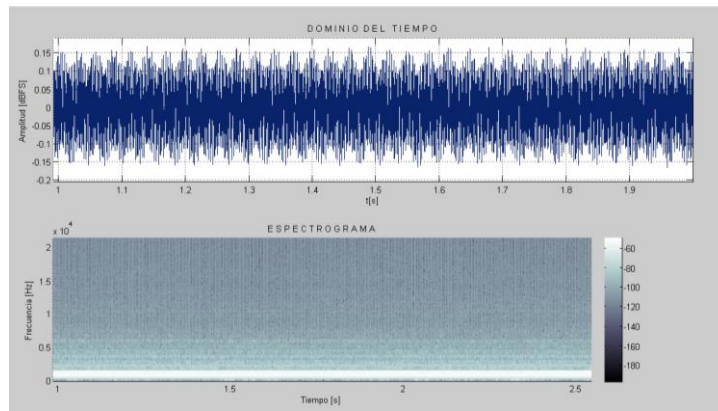
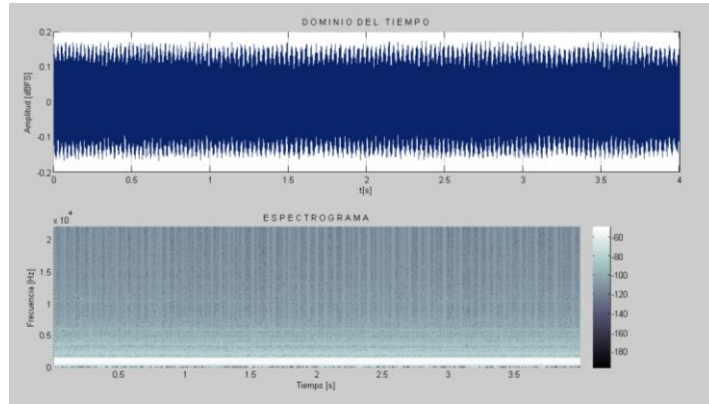
Obturando 4 de la F3 destapadas y simultáneas F1 y F2



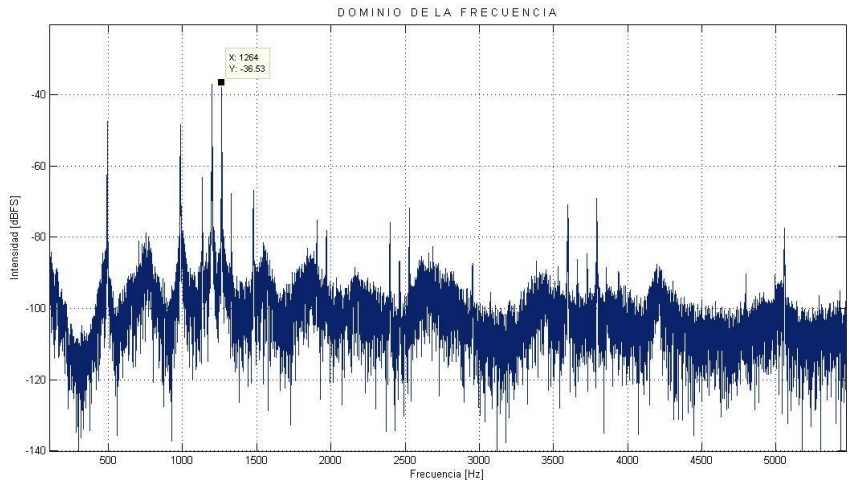
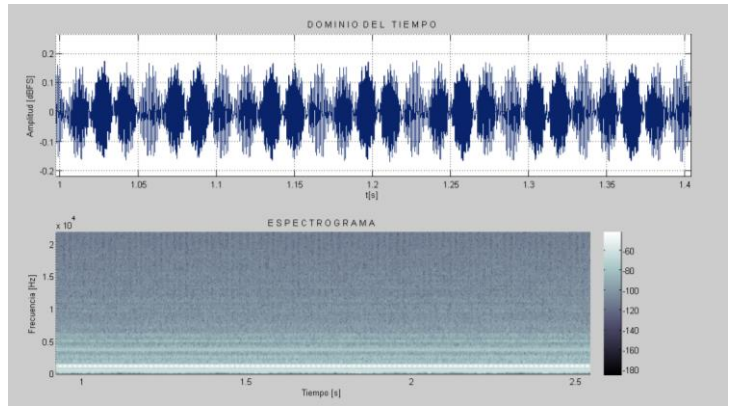
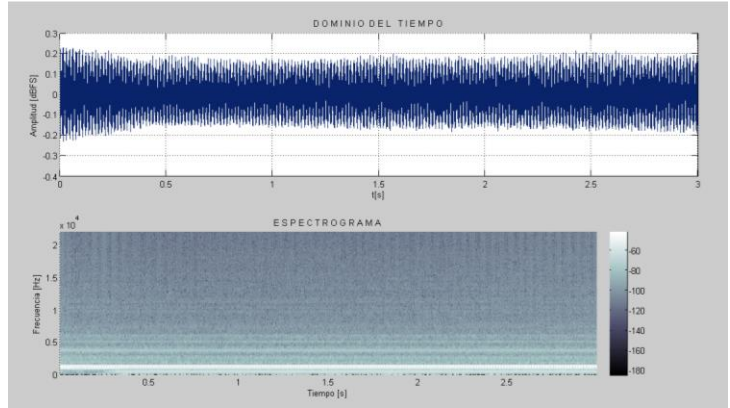
Cuarto Parcial



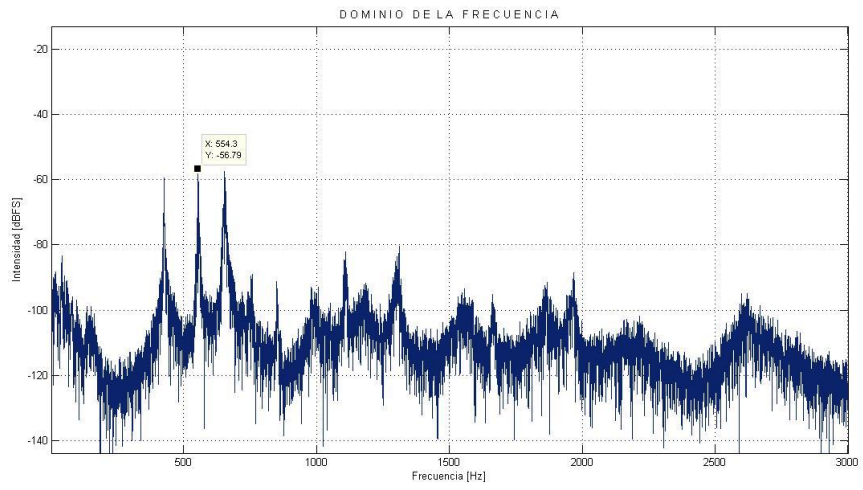
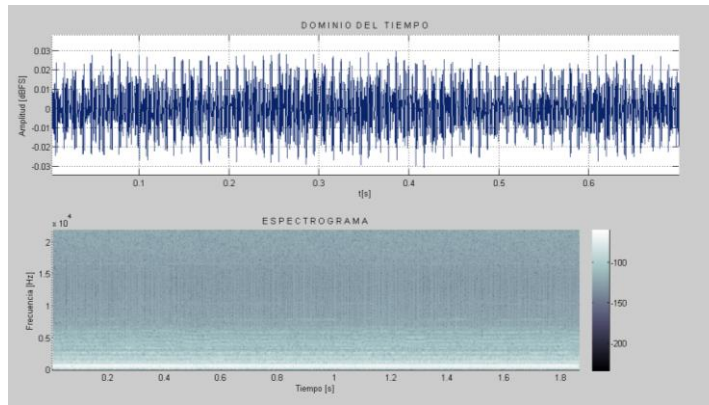
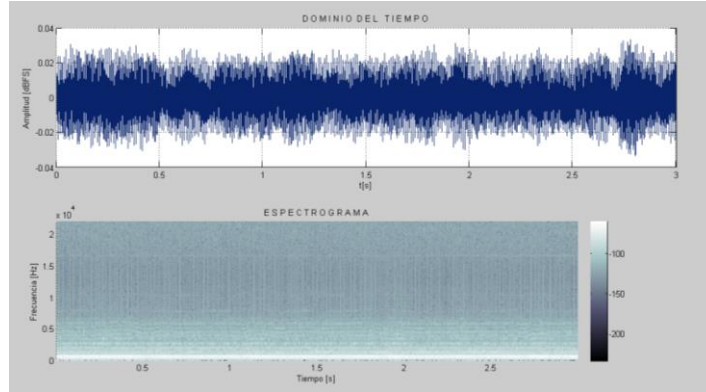
Primer Parcial



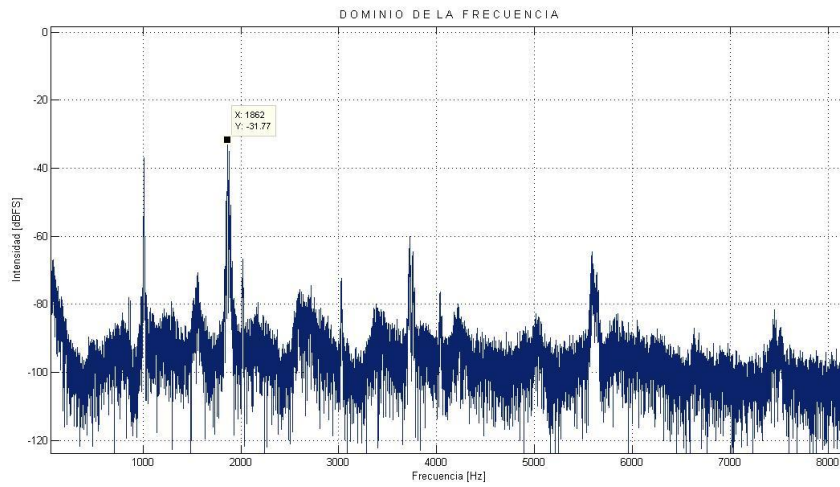
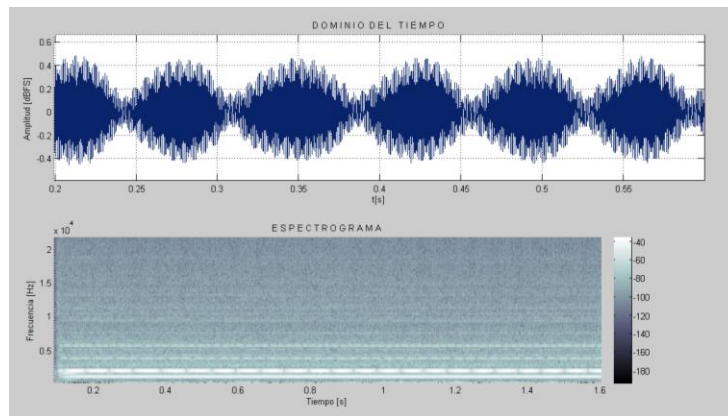
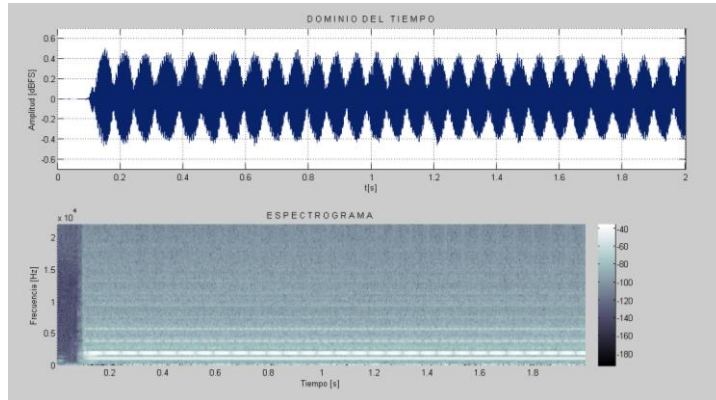
Segundo Parcial



Sonido Suave



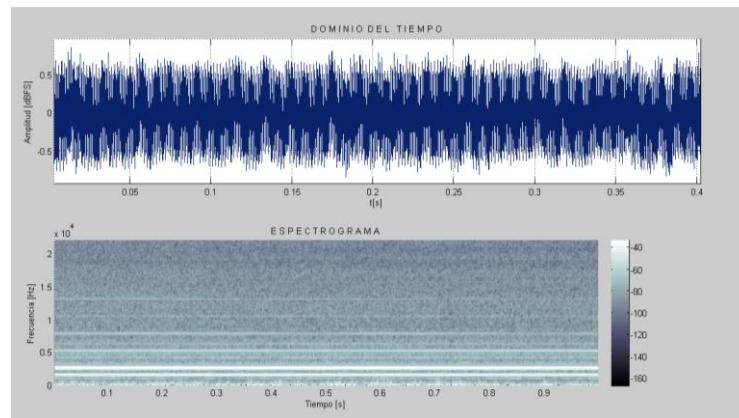
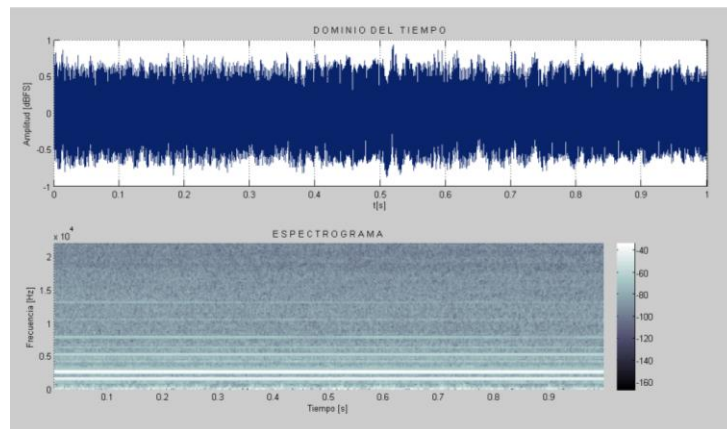
Tercer Parcial

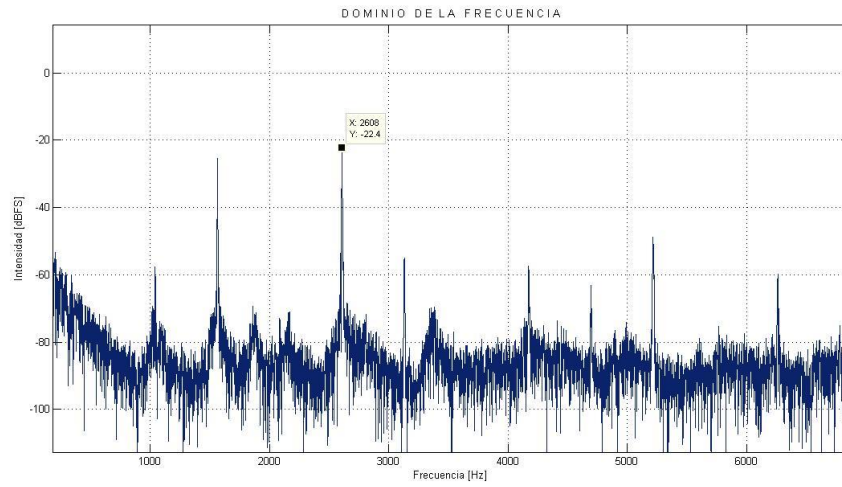


Obturando F3 y el orificio 3 de la F2

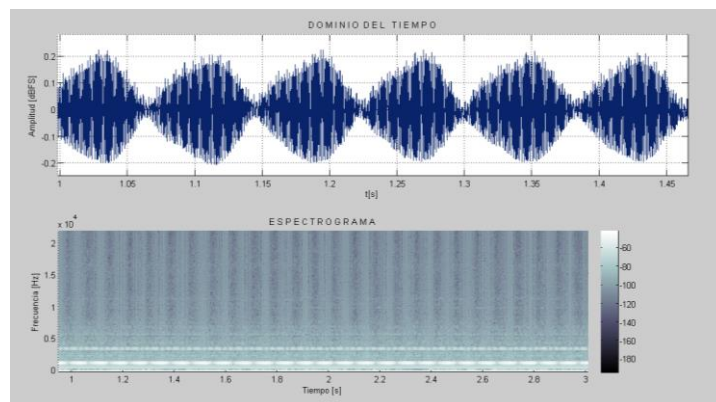
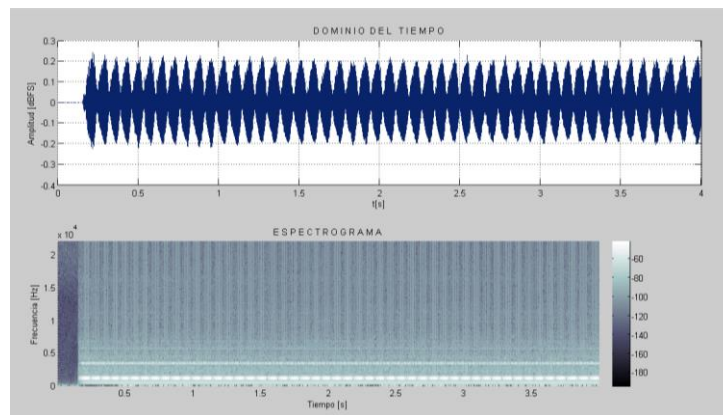


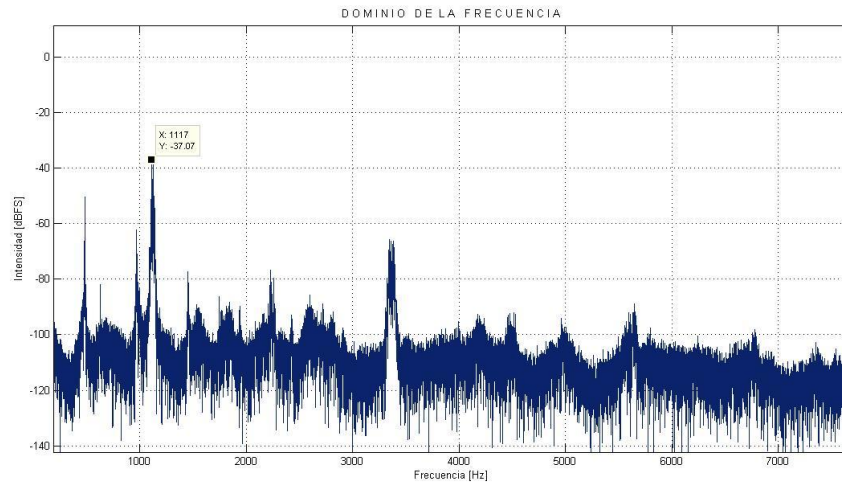
Cuarto Parcial



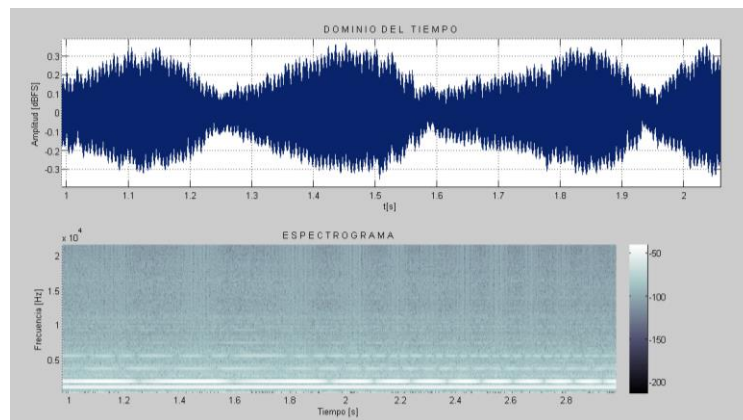
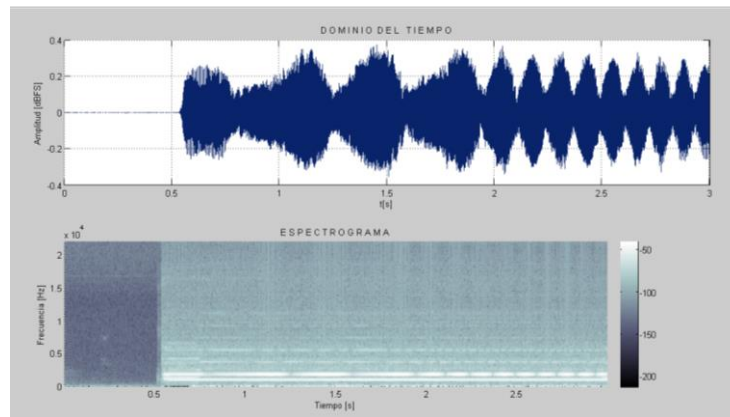


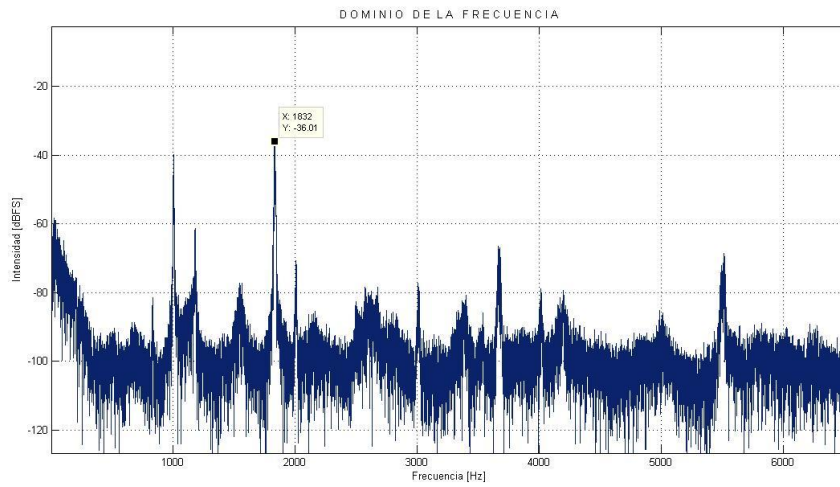
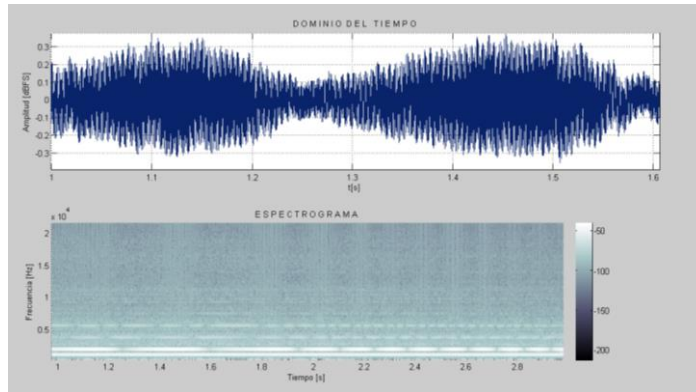
Primer Parcial



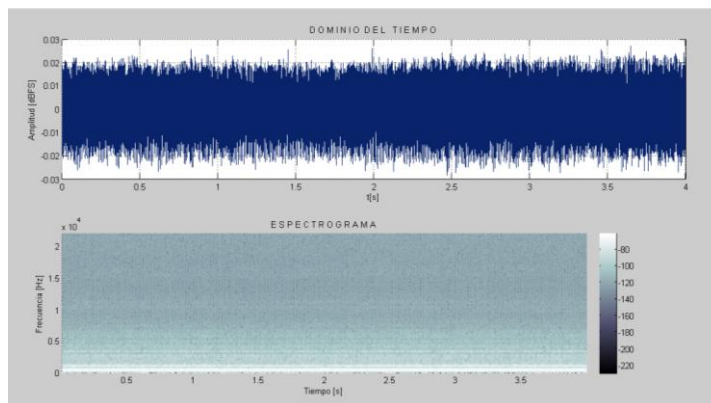


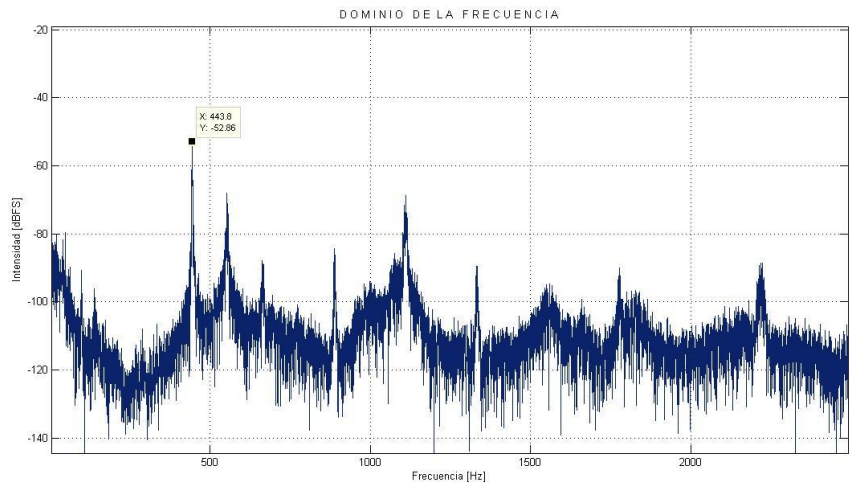
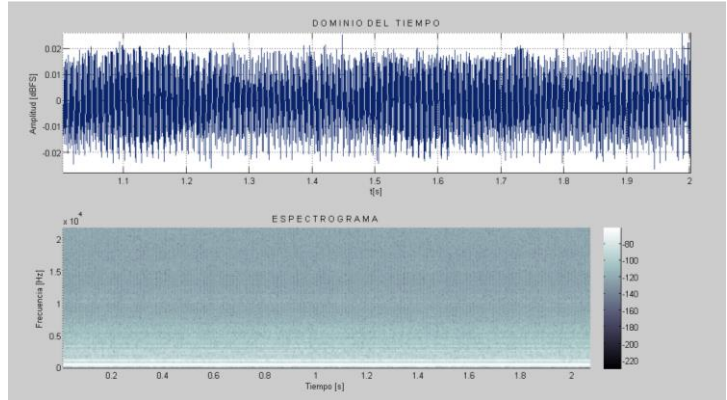
Segundo Parcial



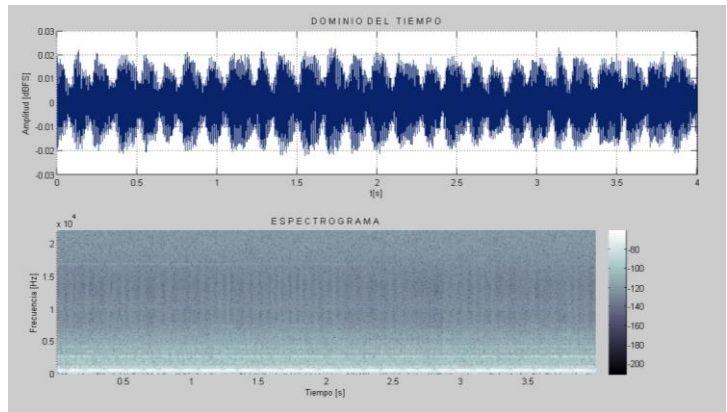


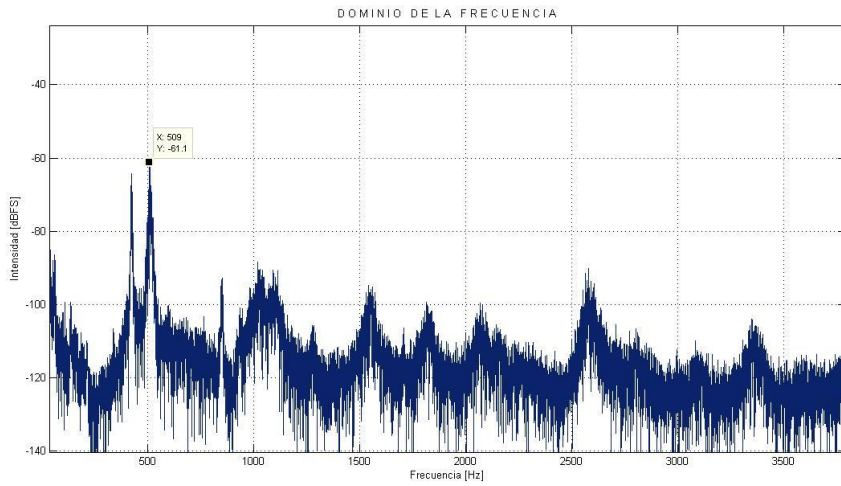
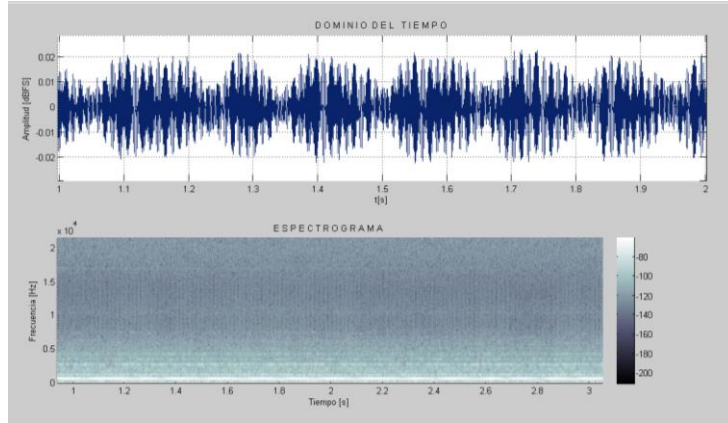
Sonido Medio



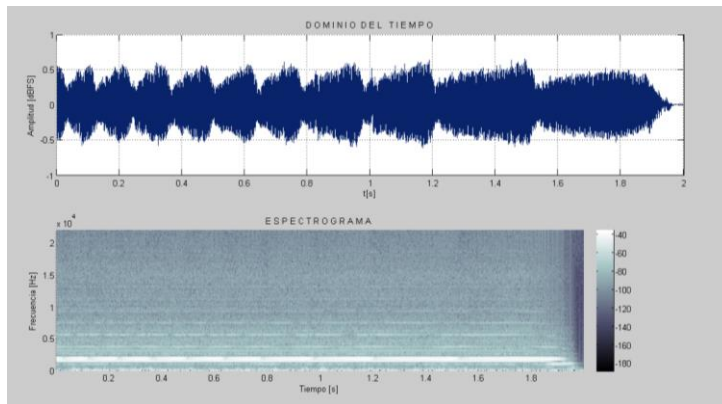


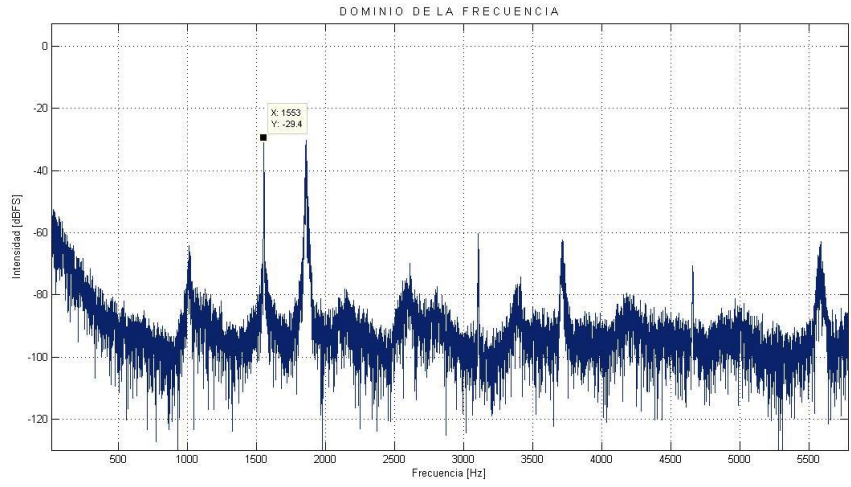
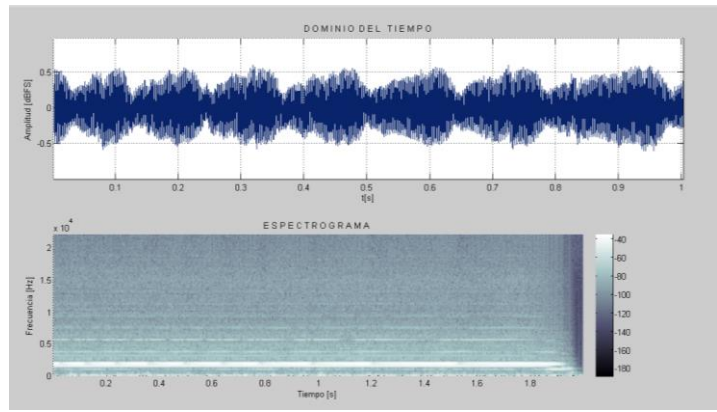
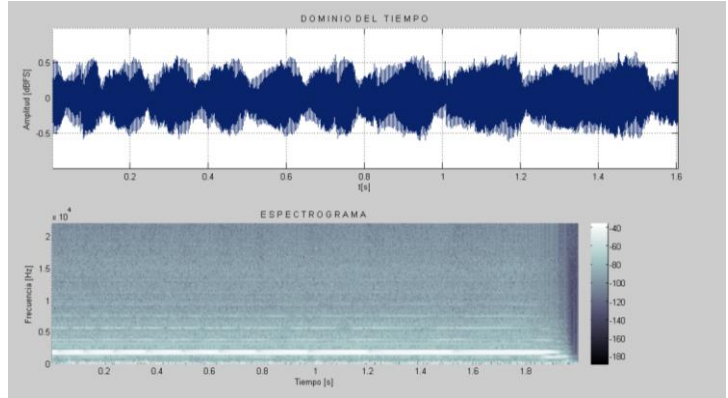
Sonido Suave





Tercer Parcial

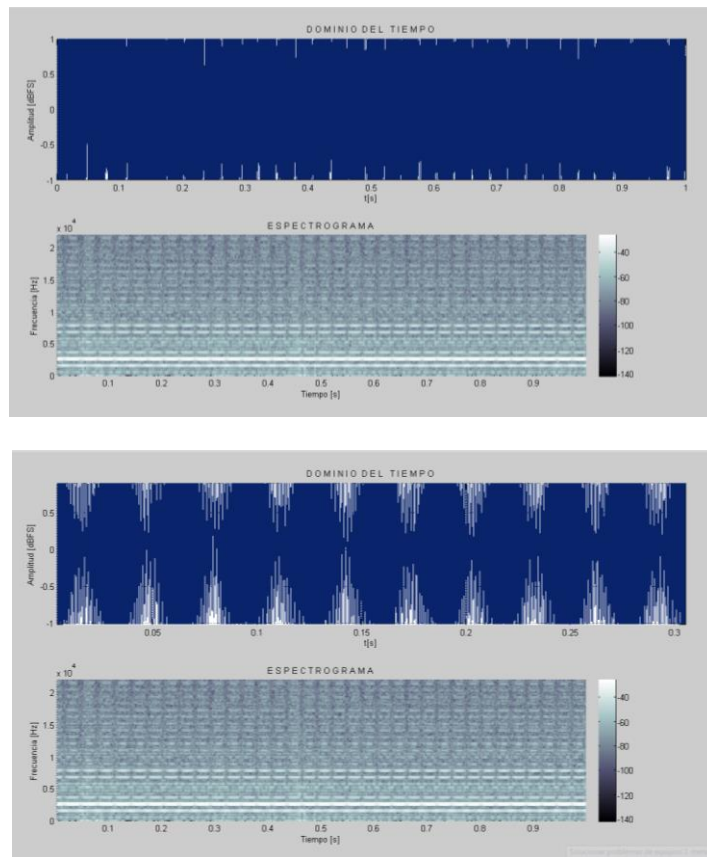


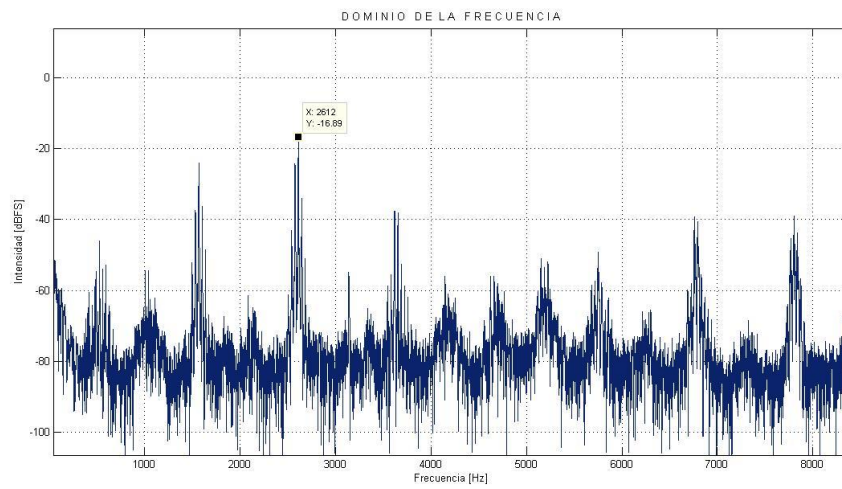
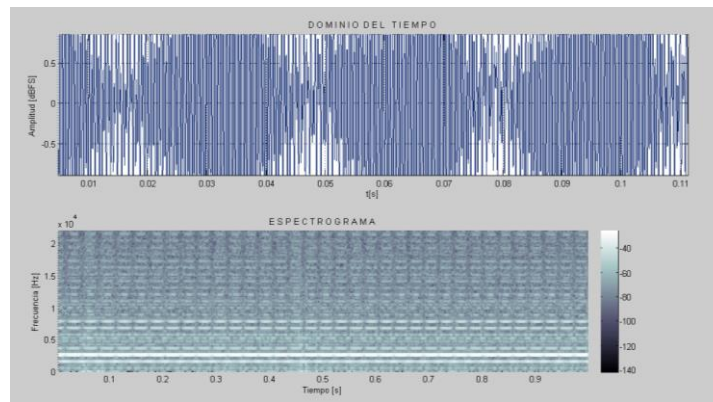
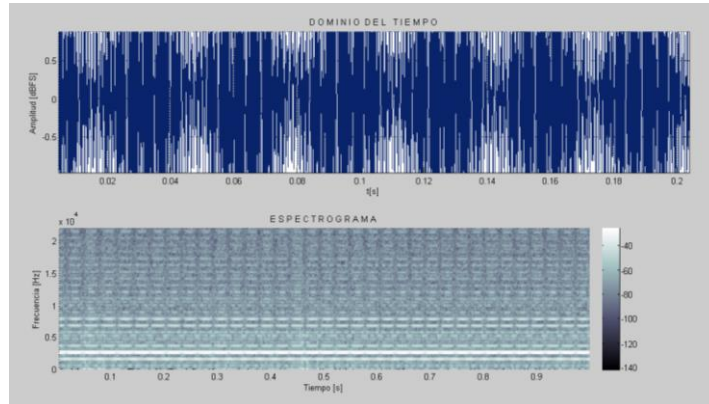


Orificio1 de la F1destapado

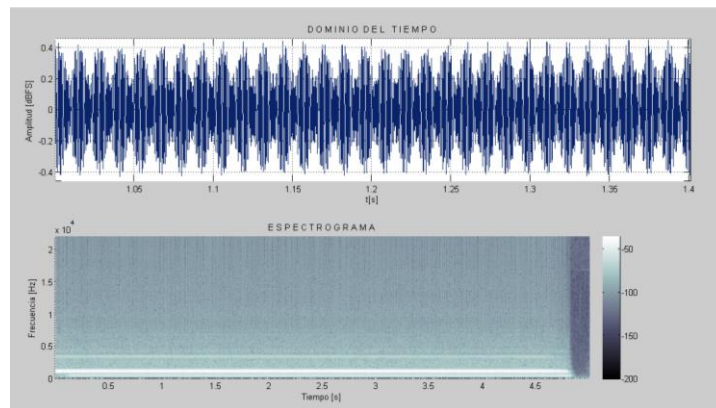
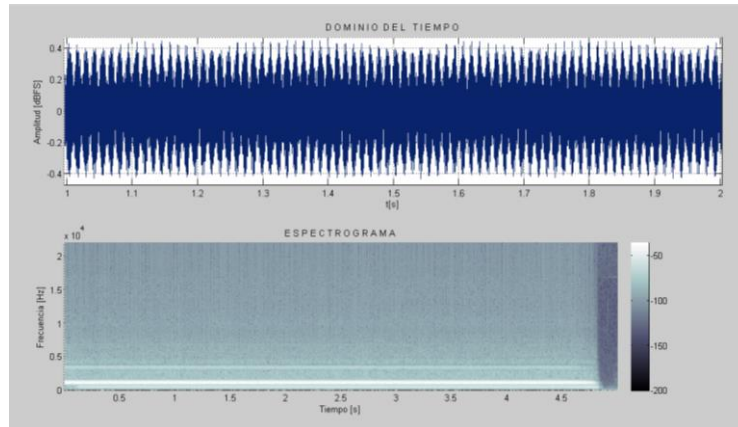
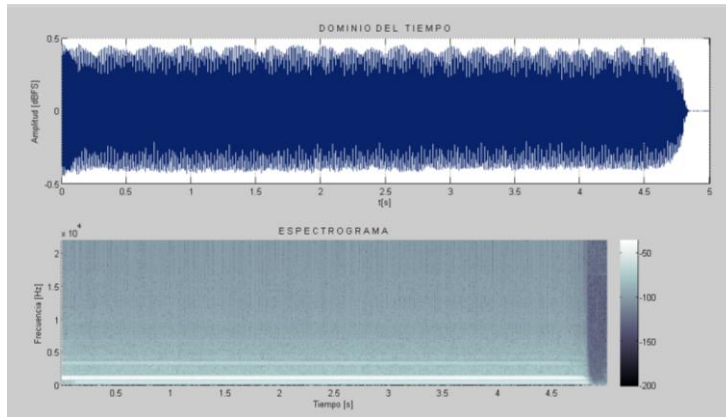


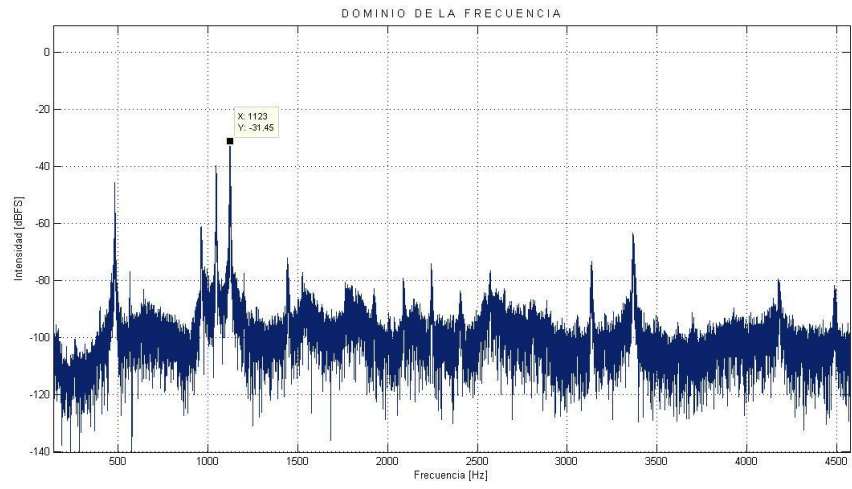
Cuarto Parcial



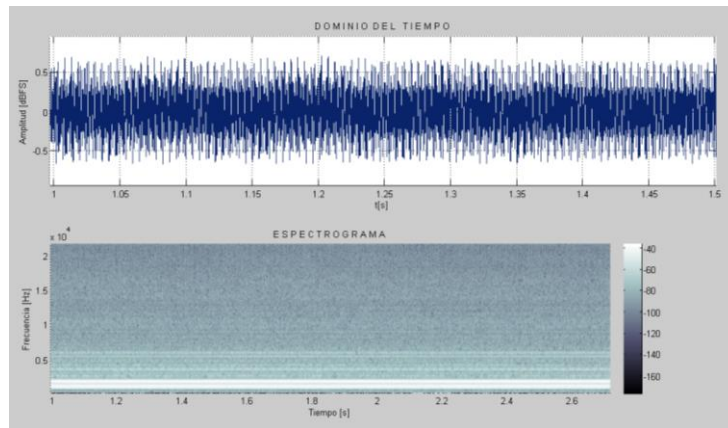
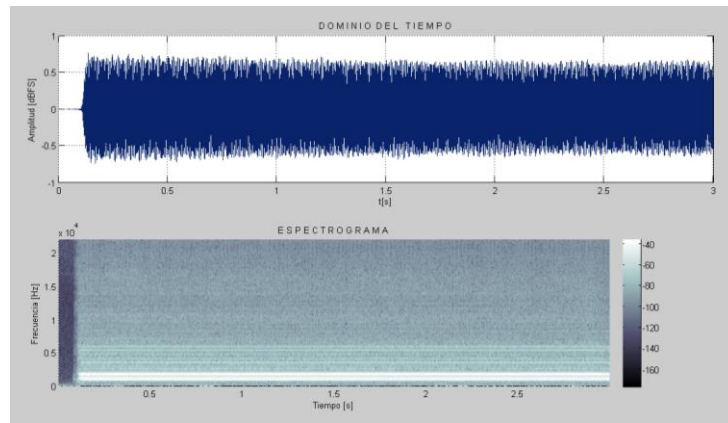


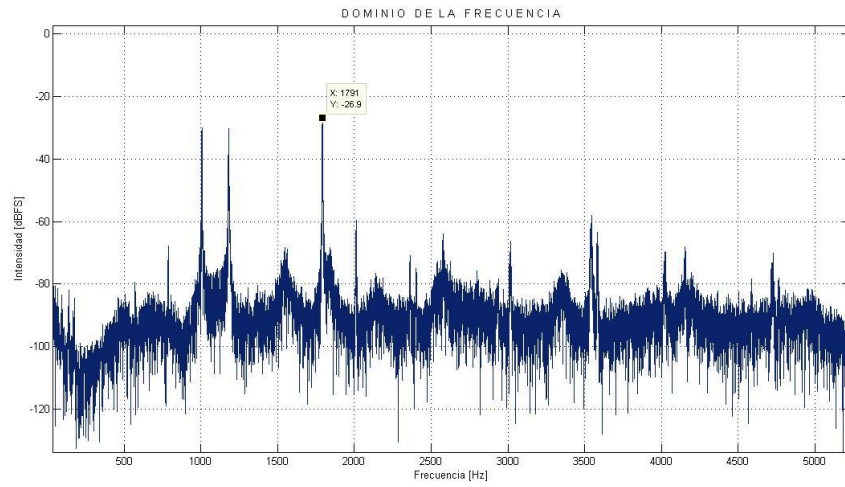
Primer Parcial



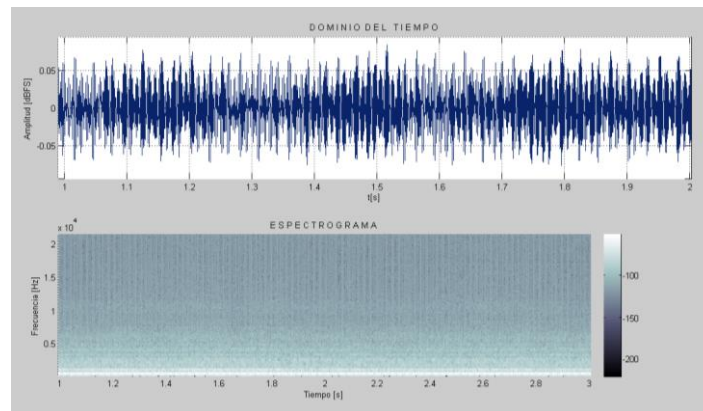
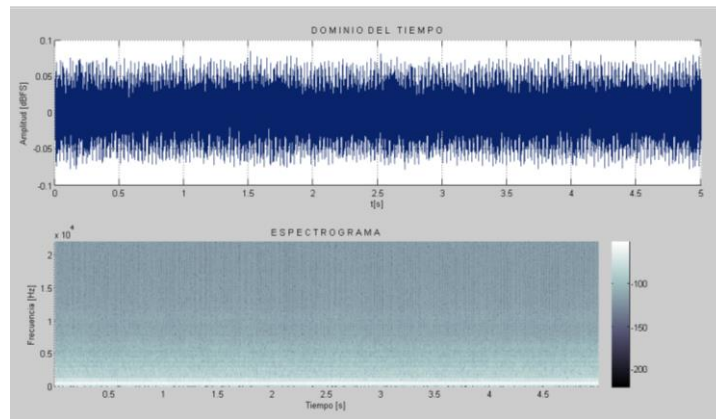


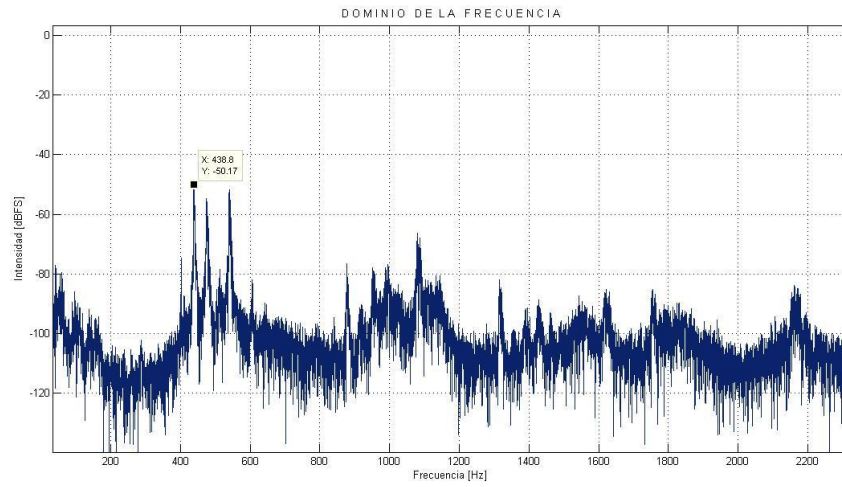
Segundo Parcial



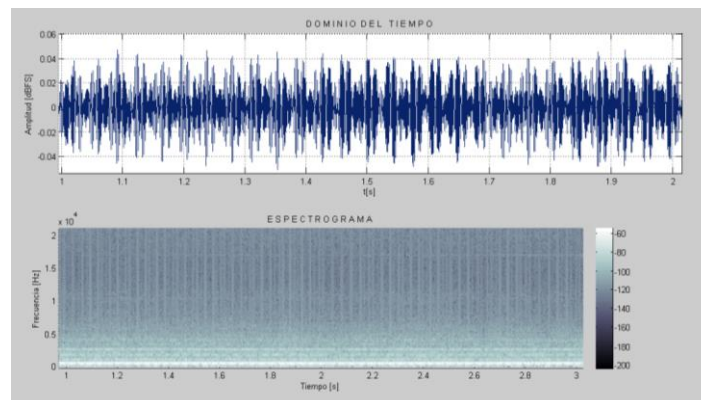
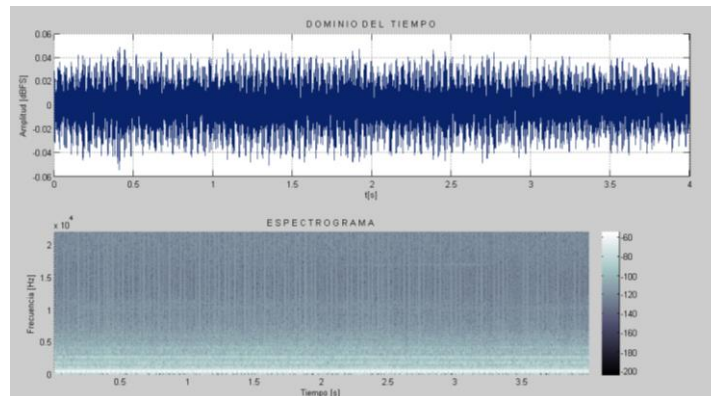


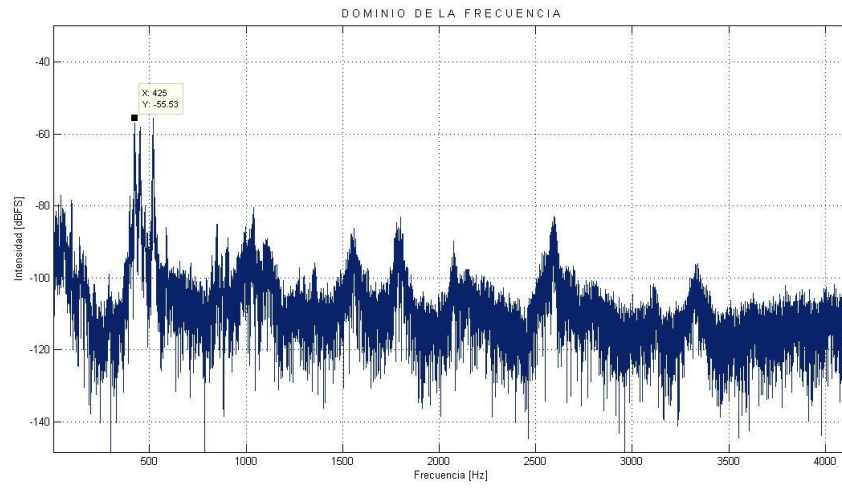
Sonido Medio





Sonido Suave





Tercer Parcial

