

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO - ACÚSTICO
Y COMPROBACIÓN COMPUTACIONAL PARA EL DISEÑO DE
FLAUTAS TRAVERSAS

Eduardo Perilla Castillo* y Álvaro Enrique Pinilla Sepúlveda**

RESUMEN: El presente artículo muestra la evaluación y diseño de una flauta traversa tradicional a través de análisis experimentales y computacionales de Ingeniería. Este trabajo requirió del estudio de los parámetros dinámicos y acústicos que gobiernan el comportamiento de este tipo de instrumento. Una flauta, como instrumento musical, debe tener ciertas cualidades sonoras y anatómicas para una ejecución placentera por parte del ejecutante así como por el oyente. El estudio de la generación de vórtices causada por la entrada de aire en el tubo se encontró ser de gran importancia, como se muestra en este artículo. Criterios básicos de diseño son presentados para la mejora y construcción de instrumentos musicales de viento, tales como órganos de tubo, quenás y ocarinas, solo por nombrar algunos.

ABSTRACT: This paper shows the evaluation and design of traditional traverse flute through experimental and computational engineering analysis. This work required the study of the dynamic and acoustic parameters that govern the behavior of this type of instrument. A flute, as a musical instrument, must have certain sonorous and anatomical qualities for a pleasant performance by the player, as well as to the listener. The study of vortex generation caused by air entrainment in the tube is found to be of great importance, as it is shown in this paper. Basic engineering design criteria are presented for the improvement and construction of wind musical instruments, such as pipe-organs, quenás, ocarinas, to quote just a few.

Recibido el 11 de marzo de 2004, aprobado el 1 de octubre de 2004.

Palabras clave: Aeroacústica, Flauta, CFD Computational Fluid Dynamics.

*

**Ing. Mec., Magíster en Ingeniería Mecánica,
Universidad de los Andes**

**

**Ph.D., M. Sc., Ing. Mec., Profesor Titular,
Universidad de los Andes**

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los instrumentos musicales utilizan para su funcionamiento: una fuente de energía mecánica vibracional, una cámara que modifica e irradia el sonido y un mecanismo que cambia su tono musical dominante por un nuevo tono emitido.

Los instrumentos de viento aprovechan la energía cinética del aire como fuente generadora de vibraciones. Entre esta categoría se encuentran los de la familia de la flauta, como son la ocarina, la flauta de pan, la quena, el órgano de tubos y la flauta travesa. Estos instrumentos usan como fuente de energía un chorro de aire que choca contra un elemento de borde filoso generando así el sonido, y una columna cónica o cilíndrica que lo modifica. El control de tono es dado por el cierre o apertura de los dedos o llaves de varios agujeros a lo largo de la longitud del tubo.

El presente trabajo muestra la evaluación del diseño de flautas a partir de un estudio teórico-experimental de los factores dinámicos y acústicos que determinan su funcionamiento, así como del empleo de herramientas computacionales para modelar fluidos en movimiento y validar la teoría y los resultados obtenidos experimentalmente.

Las fases involucradas en el desarrollo del trabajo se pueden ordenar de la siguiente manera:

- Análisis teórico-experimental del comportamiento dinámico del aire desde que es soplado por el ejecutante hasta que es convertido en un sonido dentro del instrumento.

- Análisis teórico-experimental de los parámetros acústicos que gobiernan el comportamiento de los sonidos producidos.

- Utilización de la herramienta computacional CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para la validación de los modelos teóricos y experimentales de este tipo de instrumento.

- Construcción de prototipos para realizar verificaciones experimentales.

2. DINÁMICA DEL INSTRUMENTO

2.1 Generalidades

Una flauta se compone de los siguientes elementos básicos: un generador de vibraciones que utiliza una fuente de energía mecánica, en este caso un chorro de aire que golpea un borde; un resonador que amplifica las vibraciones y las modifica para crear el sonido del instrumento; y un mecanismo de agujeros que cambia su tono musical dominante por un nuevo tono emitido.

2.2 Elemento generador de sonido

El elemento generador de la flauta es el borde del agujero de la embocadura contra el cual el soplo del ejecutante es dirigido. Cuando la corriente de aire encuentra el borde a muy baja velocidad, ésta se divide en dos corrientes comportándose como flujo laminar, pero el aire no entra en vibración. Para que entre en vibración es necesario que la corriente de aire fluctúe rápidamente a una velocidad adecuada,

de manera que se produzcan vórtices a los dos lados del borde.

2.2.1 Naturaleza del movimiento del aire cuando sale de la boca

Cuando el ejecutante sopla el chorro de aire a la salida de la boca predispone unos vórtices que ayudarán a la formación de vórtices mayores cuando éste choque contra el borde filoso, haciendo que el aire vibre produciéndose el sonido [Fletcher, N. 1998]. El chorro de aire emergerá del orificio de la boca en forma de una onda sinusoidal continua y creciente (ver figura 1).

El perfil de velocidad inicial a la salida del orificio tiene forma de copa de sombrero pero tiende luego a mostrar un comportamiento en forma de campana, formándose vórtices a partir de sus bordes. Esto también genera el desarrollo de turbulencia. Su evolución se muestra en la validación realizada en CFD (Figura 2).

2.2.2 Sonido producido por la corriente de aire cuando choca contra un borde [2]

El proceso de producción de vórtices en la estela de un cuerpo es periódico y se caracteriza por la presencia de una fuerza fluctuante en la dirección normal al movimiento. El número de Strouhal describe este proceso con la siguiente ecuación (1) [White, F. 2003]

$$St = \frac{w \cdot L}{U} \quad (1)$$

Donde: St = Número Adimensional de Strouhal

w = Frecuencia en la formación de vórtices

L = Longitud característica

U = Velocidad del fluido

El número de Strouhal es una función del número de Reynolds. En el rango entre $200 < Re < 200\,000$ se asume equivalente a 0.2. Cuando el chorro de aire choca contra un borde filoso sin columna de aire (Figura 3), los vórtices producidos hacen que el aire vibre con una determinada frecuencia.

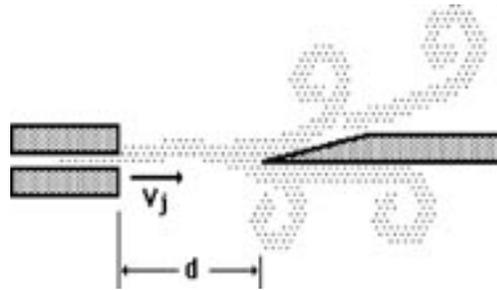


Figura 3. Sistema orificio-borde sin columna de aire

La frecuencia del tono de borde está dada por el número de vórtices que golpean el borde por segundo. La frecuencia producida estará entonces relacionada con la velocidad del chorro de aire [Richardson, B. 1929] y con la distancia del orificio al borde con la siguiente ecuación (2).

$$f = \frac{0.2 \cdot V_j}{d} \quad (2)$$



Figura 1. Validación realizada mediante CFD del comportamiento sinusoidal creciente de un chorro de aire a la salida de un orificio.

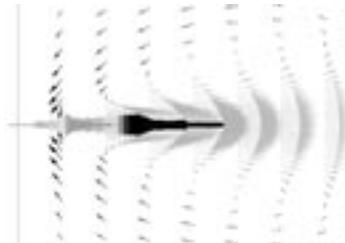


Figura 2. Validación mediante CFD de la evolución del perfil de velocidad y de la formación de vórtices del chorro de aire a la salida del orificio.

En el laboratorio se experimentó con humo y se hizo uso de un modelo realizado en CFD en estado transiente y se pudo comprobar la naturaleza del aire cuando choca contra un borde (Figura 4). Puede observarse mediante la utilización de humo la formación de vórtices durante una corta secuencia de movimiento.

Sin embargo la frecuencia emitida de esta manera no es la que domina el tono del sonido final de la flauta. En principio el sistema orificio-borde sólo tiene como función hacer que el aire comience a vibrar. El tono del sonido definitivo está determinado por el elemento resonador que amplifica y modifica esta frecuencia, en este caso por la columna de aire

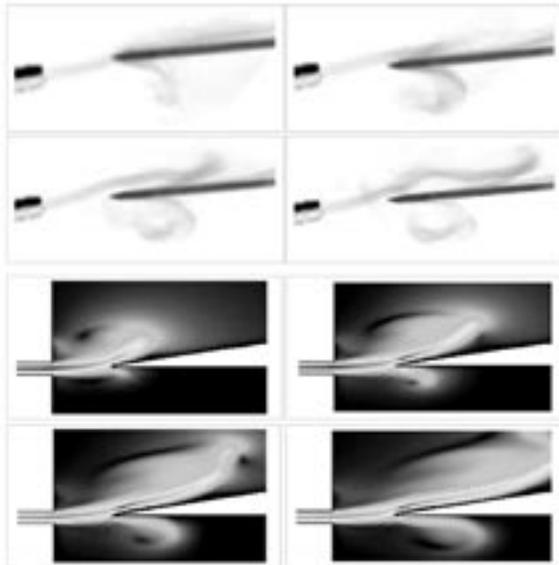


Figura 4. Formación de vórtices sistema orificio-borde. Cada fotografía tiene una diferencia aproximada de 0.25 segundos. Experimento con humo (arriba) y computacional CFD (abajo).

que vibra dentro del tubo que hace de resonador.

2.3 Elemento resonador del sonido [4]

La frecuencia producida por el sistema orificio-borde debe poder ser modificada de alguna manera para producir un determinado sonido musical. En la flauta, el tubo dispuesto con algunos agujeros actuará como elemento modificador cambiando la frecuencia de salida, y como amplificador, entregando el sonido con un determinado volumen de presión sonora.

Debido a que el tubo comprime el aire adentro, el aire actúa como un resorte; cuando la corriente de aire comienza a fluctuar dentro y fuera del tubo este resorte de aire recibe una rápida sucesión de pequeños empujones y comienza a vibrar, sin embargo no vibra a la misma frecuencia que el borde de la embocadura. Los empujes dados por la vibración en el agujero de la embocadura son lo suficientemente fuertes para hacer que el resorte de aire se mueva, pero no lo suficientemente fuertes para controlar el ritmo de vibración del resorte de aire. La corriente de aire usa la energía impartida con esos empujones para comenzar a vibrar a su propio ritmo natural. Este ritmo natural está determinado por la longitud del resorte de aire.

Debido a la naturaleza de la compresión del resorte de aire, éste puede retener una porción de la energía impartida aumentando la fuerza. Rápidamente domina las fluctuaciones débiles en la embocadura y hace que se sincronice con su propio ritmo. Cuando

esto sucede, los empujes dados por las fluctuaciones en la embocadura ocurren simultáneamente con cada contracción del resorte de aire produciendo una nota musical. Esta nota puede ser alterada levemente por ajustes en la respiración y el movimiento de los labios, pero para cambiarla totalmente, la longitud de la columna debe ser alterada.

2.3.1 Sonido producido en un sistema borde-orificio con columna de aire

En un sistema borde-orificio con columna de aire, la presión creada por la interacción del chorro de aire cuando choca con el borde retro-alimenta en dirección del orificio tiende a empujar la corriente hacia arriba. Lo contrario ocurre cuando la corriente se mueve hacia el lado de arriba haciendo que el proceso se repita. Como resultado del movimiento periódico de la corriente de aire de lado a lado se produce un determinado sonido. Los demás factores que influyen en el valor de la frecuencia producida finalmente, son la velocidad del flujo de aire y la distancia entre el orificio y el borde.

2.3.2 Validación mediante CFD del comportamiento del aire en sistema orificio-borde-columna

Para validar el comportamiento del aire en un sistema orificio-borde-columna se empleó una velocidad de entrada de 30 m/s en tubo de longitud $L = 0.1$ m. Se observó que los valores de presión varían en muy bajos niveles arriba y abajo de la presión atmosférica.

3 ACÚSTICA DEL INSTRUMENTO

3.1 Frecuencias de resonancia [2] [6]

Las frecuencias de resonancia de las columnas de aire dependen de la velocidad del sonido en el aire así como de la geometría de la columna. Las ondas de presión longitudinales se reflejan en un tubo de acuerdo a su terminación, cerrada o abierta, generando nodos y anti-nodos (nodos de presión y nodos de desplazamiento).

Una columna de aire con los dos extremos abiertos vibra en su modo fundamental de tal forma que la longitud de la columna de aire es la mitad de la longitud de la onda sonora. Cada extremo funciona como un anti-nodo. La frecuencia producida está dada por [Benade, 470]:

$$f_1 = \frac{V_{sonido}}{2L} \quad (3)$$

El movimiento del aire dentro de un tubo abierto en su primer modo de resonancia no causa variaciones apreciables de presión en los extremos. El nodo del centro mantiene variaciones muy bajas de presión por encima y por debajo del valor de la presión atmosférica sin desplazamiento, mientras que los nodos de los bordes se desplazan. La ecuación (4) presenta la frecuencia de resonancia corregida para un tubo [Kinsler et al, 201].

$$f_n = \frac{n \cdot c}{2(l + 8d/3\pi)} \quad (4)$$

Siendo:

c = Velocidad del sonido

l = Longitud del tubo

d = Diámetro del tubo

n = Número de armónico 1,2,3...

Es necesario tener en cuenta un factor que es importante a la hora de obtener las frecuencias de un tubo y es la velocidad del sonido. La velocidad del sonido en el aire depende de la temperatura. La velocidad del sonido para aire seco está dada aproximadamente por [Kinsler et al, 117]:

$$V = 331.4 + 0.6 \cdot T_c \quad (5)$$

3.2 Resultados experimentales en el tubo

Para realizar las pruebas acústicas y dinámicas se hizo necesaria la construcción de un prototipo. Éste posee una cámara de expansión que simula la forma en la cual el aire sale de la boca (apartado 2.2.1) y que corrige la forma como entrega el aire un compresor (no continua y con mucho ruido). Se construyeron también varias boquillas para realizar pruebas cuyos resultados se muestran a continuación.

3.1.1 Frecuencia de resonancia en un tubo

Se realizaron varias pruebas para diferentes velocidades de chorro (velocidad de soplado). Se midió frecuencia e intensidad de sonido comprobando las ecuaciones teóricas planteadas por (3) y (4) que se utilizaran posteriormente en el cálculo para el diseño de una flauta.

3.1.2 Comparación entre diferentes formas de borde

Las formas triangulares presentan un mejor comportamiento con respecto a los primeros armónicos. Las formas cuadradas y circulares presentan un mejor desempeño cuando se quieren encontrar armónicos altos más fácilmente.

3.1.3 Agujeros en el tubo

La nota tañida es cambiada abriendo uno o varios agujeros, cambiando la longitud efectiva del tubo. Para ilustrar la situación más simple, se considerará un solo agujero en el tubo. Sumando las admitancias producidas por cada agujero se llega a la siguiente relación que proporciona el valor de la longitud efectiva:

$$L_{efectiva} = L_{tubo} - \frac{S_1 (D + \Delta)^2}{S_1 (D + \Delta) + S \cdot l} \quad (6)$$

Siendo:

Z_{ent} = Impedancia acústica de entrada

S = Área transversal del tubo

l = Altura del agujero

D = Distancia del agujero al extremo

S_1 = Área agujero

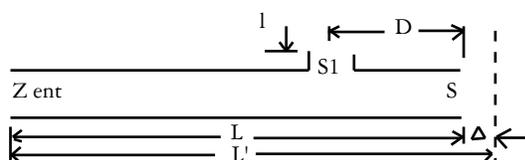
L = Longitud tubo

L' = Longitud corregida de tubo

Corrección final del tubo:

$$\Delta \approx 0.3 \cdot d \approx 0.003 m \quad [3]$$

figura 9. Disposición del tubo con un agujero abierto



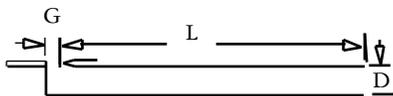
3.1.4 Distancia de la salida del aire al borde

Cuando la distancia entre la salida de aire y el borde es mayor el comportamiento de los primeros armónicos se hace más duradero y estable para una misma velocidad y caudal de aire.

3.1.5 Relación entre la longitud y el diámetro del tubo

Después de las pruebas hechas en tubos con relaciones diferentes entre longitud y diámetro se obtuvo que en relaciones de L/D bajas de aproximadamente 10 a 25 (tubo con $L = 1.6$ m $d = 0.075$ m) el tubo presenta muy poca disposición para funcionar en el primer armónico, mientras que deja mayor maniobrabilidad para los armónicos mayores. Las relaciones entre L/D medias de aproximadamente 25 a 40 (flauta dulce, flauta travesa) presentan una mejor disposición para funcionar en el primer y segundo armónico, pero limitan un poco la producción de los armónicos más altos. Un tubo con relación L/D alta, mayor a 40 presenta la mejor disposición para trabajar en el primer armónico pero es difícil encontrar armónicos mayores.

Relación entre el diámetro, la longitud y la distancia al borde del tubo.



4 DISEÑO DE FLAUTAS

4.1 Procedimiento de diseño

- Se supone un número de agujeros (por ejemplo 6) y la frecuencia de las notas que se quieren obtener.

- Se define el valor de la velocidad de sonido.
- Se calculan las longitudes ideales del tubo para cada nota empezando desde la nota con frecuencia más alta hasta llegar a la frecuencia base (mínima frecuencia) Ecuación (2).
- Se escoge una frecuencia de corte. Para instrumentos como la flauta pueden escogerse valores entre 1400 y 1800 Hz [Benade, A.]
- Se determina el espesor de pared promedio del tubo y su diámetro en la localización aproximada de cada agujero.
- Se escogen las dimensiones de los agujeros (b) y espaciamientos entre ellos (s) que sean ergonómicamente ejecutables por las manos del flautista común y que sean consistentes con la frecuencia de corte local. A veces es preciso ajustarlas dependiendo de las demás variables.
- Desde la base del instrumento, trabajando hacia arriba, se aplican las correcciones para cada agujero relativo a la longitud ideal, partiendo con las correcciones de longitud Ds , para el primer agujero abierto se calcula la corrección con D_0 .
- Se calculan las correcciones de los agujeros cerrados, sumando los efectos para todos los que estén tapados en cada digitación.
- Se iteran consecuentemente los dos últimos pasos planteados hasta encontrar los valores adecuados de longitud efectiva.

4.2 ECUACIONES EMPLEADAS

• Para encontrar la posición y tamaño final de los agujeros se utilizan las siguientes ecuaciones [Benade, 445-450 y Fletcher et al]

• Corrección de la longitud efectiva del tubo:

$$D_s = \frac{l_b}{(b/d)^2 + l_b \cdot (1/D)} \quad (7)$$

Donde $l_b = t + 0.75 b$ (8)

• Corrección por agujero abierto

$$D_o = s \cdot \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \left[\left(1 + 4 \cdot (l_b/s) \cdot (d/b)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (9)$$

• Correcciones por agujero cerrado:

$$D_c = \left(\frac{1}{4} \right) \cdot t \cdot (b/d)^2 \quad (10)$$

• Corrección por todos los agujeros cerrados:

$$\Delta = \frac{0.6 \cdot d}{2} \quad (11)$$

• Para calcular la distancia L_{ce} que se necesita restar cuando se agrega un agujero de embocadura se utiliza la ecuación:

$$L_{ce} = \frac{0.25 \cdot \pi \cdot b_e^2}{A_e (t + 0.75 \cdot b_e)} \quad (12)$$

Siendo.

b_e = Diámetro del agujero de la embocadura

A_e = Área del agujero en la embocadura

t = Espesor de pared

d = Diámetro interior del tubo

b = Diámetro de los agujeros

s = Distancia entre agujeros

• Un parámetro físico importante es la frecuencia de corte "cut-off frequency" F_c , que marca el límite entre las frecuencias bajas, que son reflejadas hacia atrás por los agujeros formando resonancias fuertes (o patrón de radiación isotrópica en que la energía se irradia igualmente en todas direcciones), y las frecuencias altas que escapan libremente por los agujeros abiertos (o patrón de radiación direccional). F_c se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$F_c = \frac{c}{2 \cdot \pi} \cdot (b/d) \left(\frac{1}{(l_b \cdot s)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (12)$$

Si esta expresión se evalúa para todos los agujeros y si los números son consistentes, entonces se trata de una aproximación útil. Teóricamente cualquier ins-

trumento que posea agujeros comparte esa característica acústica. Enseguida es necesario iterar varias veces las longitudes hasta que los valores hallados se estabilicen. Un ejemplo del cálculo se muestra elaborado en [1] (ver referencias).

4.3 Construcción y prueba de la flauta

A partir de los resultados encontrados basados en el cálculo anterior se procedió a construir varias flautas con el fin de probar su entonación. Fueron construidas en tubos de P.V.C. por ser un material común y de fácil consecución. Los resultados mostraron que estas flautas tienen una alta calidad de entonación (entre el 95% y 98%).

Además, los músicos¹ que las han interpretado han manifestado que tienen alta calidad tonal así como un timbre excepcional.

5 CONCLUSIONES

De acuerdo a las pruebas obtenidas y a los modelos realizados se puede concluir lo siguiente:

- Es posible diseñar una gran variedad de instrumentos musicales que empleen el principio de la flauta y mejorar los que se conocen en el país y que son hechos de una forma muy artesanal como los instrumentos de viento andinos (chirimías, quenas, flautas de pan, etc). Además es factible realizar el mantenimiento de otros que funcionan con el mismo principio como los órganos de tubo.
- Aunque este trabajo está dirigido hacia el estudio de la creación, generación y dispersión del sonido en

el aire en un instrumento musical de viento, su teoría puede aplicarse a otros campos de la Ingeniería. Conociendo cómo pueden producirse vibraciones dentro de tuberías que manejan fluidos es posible también evitarlas, como es el caso de las tuberías que transportan gas y los sistemas de aire acondicionado.

- Aunque los programas CFD modelan muy acertadamente el comportamiento dinámico del aire, todavía no pueden predecir resultados acústicos en un tubo, es posible que en futuro sean una herramienta de gran utilidad en el diseño de este tipo de instrumentos.
- Los resultados obtenidos en los modelos realizados con el software CFD comprueban en gran manera la teoría propuesta y los resultados dinámicos experimentales. Esta herramienta puede ser trascendental en el diseño y perfeccionamiento de diversas partes de los instrumentos de viento como los bordes y las boquillas.
- Aunque en teoría el aire dentro de un tubo puede hacerse vibrar a cualquier armónico n , en la práctica solo se puede alcanzar hasta un armónico determinado. Esto depende en buena parte de la relación de longitud y diámetro en el tubo, así como de la velocidad que se induce en el borde. Los tubos con alta relación L/D son pobres en armónicos en comparación con los tubos estrechos. De otro lado, es a menudo difícil encontrar el tono fundamental en un tubo estrecho, tiende a formarse rápidamente más de un nodo dentro del tubo lo que hace que el tono cambie (suba al siguiente armónico).

- La distancia del orificio al borde influye y genera ajustes de entonación. Para un tubo estrecho (flauta con todos los agujeros cerrados), es recomendable hacer que la distancia desde la boca hasta el borde sea la máxima posible, para encontrar estabilidad en el tono fundamental. También puede abrirse un poco más la boca en razón de mantener el caudal con menor velocidad y dominar así el tono. Por el contrario cuando se pretende encontrar un tono alto en un tubo de alta relación L/D, o el tercer o cuarto armónico en un tubo estrecho, es recomendable disminuir al máximo la distancia de la boca al borde y cerrar el orificio de la boca al mínimo con el fin de trabajar a una velocidad más alta.
- La frecuencia varía en gran manera con respecto a la temperatura (en diez grados centígrados la frecuencia de vibración de un tubo puede variar en 10 Hz), por esto los flautistas deben precalentar el instrumento antes de tañerlo para evitar variaciones no esperadas de tono durante la ejecución.
- Los bordes triangulares producen mayor estabilidad en el tono cuando el instrumento se trabaja en su tono fundamental, sin embargo es posible utilizar otras geometrías de borde si se quieren encontrar rápidamente armónicos más altos, por ejemplo en el tubo de un órgano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Perilla, E.
Análisis del comportamiento dinámico-acústico y comprobación computacional para el diseño de flautas traversas.
Tesis, Universidad de Los Andes 2004.
- [2] Benade, A.
Fundamentals of Musical Acoustics
Dover Publications, Inc. Second Revised Edition.
New York, 1990
- [3] Fletcher, N.
The Physics of Musical Instruments
Springer-Verlag. Second Edition. New York, 1998.
- [4] Richardson, B.A.
The Acoustics of Orchestral Instruments and of the organ
E. Arnold & Co. 1st. Edition, London, 1929.
- [5] Baines, A.
Woodwind Instruments and Their History
Dover Publications, Inc. First Edition, New York, 1991.
- [6] Kinsler, L and Austin, F.
Fundamentals of Acoustics
John Wiley & sons, Inc. Second Edition. New York, 1964.
- [7] Schichting, H.
Teoría de la Capa Límite
Ediciones URMO Quinta Edición. Barcelona, 1972
- [8] White, F.
Fluid Mechanics
Mc Graw-Hill. Boston MA, 2003.
- [9] http://iwk.mdw.ac.at/Forschung/pdf_dateien/2003e_WK-KK_AAA_WaveFluidProp.pdf
- [10] <http://wwwhoppe.math.uni-Augsburg.de/Siebert/Paper/flute.html>
- [11] <http://www.fluid.tue.nl/GDY/acous/acous.html>
- [12] <http://hyperphysics.phy-str.gsu.edu/hbase/waves/opecol.html#c2>
- [13] http://www.cwo.com/ph_kosel/designs.html