

Producción de ondas sonoras en el silbato del Tren “La Trochita”

Guillermo Artero Willhuber ¹

¹Estudiante del Profesorado de Física, ISFD N°804 de Esquel, Roque Sáenz Peña N° 2352CP 9200, Chubut, Argentina.

E-mail: guillermoawillhuber@gmail.com

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Resumen

El presente es un trabajo de investigación teórica y experimental sobre la producción de ondas sonoras, ésta labor se ha enfocado sobre un recurso que integra y representa la cultura de los habitantes de la ciudad de Esquel. Se incluye además el devenir histórico que explica de alguna manera la incidencia del recurso en la conformación de la idiosincrasia local, asimismo se enfrenta al estudiante de Física a una experiencia de aprendizaje que vuelve a la mente sucesivas veces al tomar contacto de manera casual con todo lo relacionado al recurso en la vida cotidiana.

Palabras clave: Aprendizaje significativo contextualizado, Ondas, Sonido, Modelización, Vórtices.

Abstract

This is a theoretical and experimental work about sound waves production. It has focused on a resource that integrates and represents the Esquel citizen's culture. It also includes the historical evolution that explains in some way the impact of the resource in shaping local idiosyncrasies. also Physics student experience remind the work every time he make contact with anything related to resource in everyday life.

Keywords: Significant Contextualized Learning, Waves, Sound, Modeling, Vortex.

I. INTRODUCCIÓN

A. El Viejo Expreso Patagónico “La Trochita”.



FIGURA 1. La “Trochita” a disposición del público en la estación de tren de la Ciudad de Esquel.

La “Trochita” (Figura 1) fue parte de la red de trenes impulsada por el Gobierno Nacional con la Ley N° 5559 de fomento de los territorios Nacionales el 28 de Agosto de 1908. Las obras se iniciaron en 1922 y concluyeron el 25 de Mayo de 1945. El Tren integraba los 2090 Km. ferroviarios que unieron el interior del País con el puerto de Bs. As. El “Viejo Expreso”, significó la quiebra de los molinos Harineros Galeses y rompió con el aislamiento de los transportes en carretas. Movilizado por locomotoras Baldwin (Belgas) y Henschel (Alemanas), se caracterizaba por ser de trocha angosta, de menor peso y dimensiones especiales, lo cual obligó a la instalación de talleres de autoabastecimiento de repuestos en Cerro Mesa y El Maitén. El trazado de las vías se debatió entre la zona boscosa, para el transporte maderero y la zona ganadera de la meseta, decidiéndose sobre esta última, propiedad de la Compañía Inglesa Argentine Southern Land C.O. y Compañía Tierras del Sud, quienes lo utilizaron para extraer lana y ganado en pie

hacia Bs. As. con fines de exportación. En el año 1990 el estado Nacional destinó los trenes a las provincias para reducir los gastos de ramales deficitarios. De este modo el tren, originalmente utilizado para transporte social y comercial, pasó al ámbito del servicio turístico en las ciudades de Esquel y El Maitén, además, en la actualidad es Monumento Cultural Nacional. Los aportes positivos que dejó en la región fueron: el crecimiento y desarrollo urbano de las Ciudades de El Maitén, Jacobacci y Esquel, además, brindó fuentes de trabajo, facilitó la comunicación, la reducción de tiempos y abasteció nuevos mercados. Actualmente es visitado por turismo mundial y continúa siendo fuente de trabajo de operarios, empresas turísticas, comerciantes, artistas y artesanos. (Oriola 2004)

II. DESARROLLO

A. Descripción del problema

Los viajes e historia de la “Trochita” han desarrollado en la población de Esquel un fuerte sentido de pertenencia a través de los años. Los docentes del I.S.F.D. N°804 de Esquel proponen la Formación de profesores de Física utilizando recursos con estas características. En este trabajo, se pretende explicar en primer lugar y desde el punto de vista del estudiante ¿Cómo se valora el aprendizaje de la Física con recursos históricos y fuerte sentido de pertenencia? En segundo lugar, se pretende brindar un modelo teórico de base experimental que explique (Lombardi 2010) (Chamizo 2010) (Justi 2011) ¿Cómo es la producción de sonido del silbato de la “Trochita”? En las Figura 2 se aprecian a la izquierda el silbato que funciona en la Locomotora y a la derecha, el utilizado en laboratorio de experiencias de Física.



FIGURA 2. El silbato de bronce de la “Trochita” y la copia de PVC construida para el laboratorio de Física.

B. Fundamentos teóricos

Las ondas sonoras son ondas mecánicas longitudinales que se propagan perturbando las partículas de un medio gaseoso que tiene masa y elasticidad. Transportan energía transferida por trabajo mecánico de la fuente emisora sobre medio, produciendo un movimiento ondulatorio que avanza y se repliega periódicamente. La propagación es esférica, con centro en la fuente de emisión y rapidez v . El avance de la fuente emisora provoca una compresión del medio y cuando ésta se repliega provoca una expansión del mismo (Young - Freedman 2009) Cuando han pasado una compresión y expansión completas, se cumple un ciclo o período T en segundos (s), la cantidad de ciclos por segundo es la frecuencia de la onda f en Hertz (Hz) y la distancia entre perturbaciones sucesivas se llama Longitud de onda λ en metros (m) (Rocamora 2006) Las mencionadas variables se relacionan de la siguiente manera:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

El cálculo analítico de la rapidez del sonido v para una onda “considerando al aire como un gas ideal, depende únicamente de la temperatura, de la siguiente forma” (Rocamora, 2006):

$$v = 332 \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \quad (2)$$

Donde T es la temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) y v la rapidez del sonido en metros por segundo (m/s) para un gas ideal.

En el interior de instrumentos de viento se produce una onda estacionaria causada por la emisión de un flujo de aire a través de una rendija hacia el borde de un tubo cerrado (Figura 3). La frecuencia de la onda f en Hz depende de la longitud de tubo en m y de la rapidez v en m/s del sonido en aire, por lo tanto:

$$f = \frac{v}{4l} \quad (3)$$

Además, hay una predisposición a la formación de vórtices que fluctúan por la división del fluido hacia cada lado del borde del tubo. Esto depende de la velocidad v_j de salida del aire por la rendija o de la magnitud d . Los vórtices emiten tonos de borde, según sean v_j y d , la frecuencia de tono de borde f_{tb} es:

$$f_{tb} = \frac{0,2v_j}{d} \quad (4)$$

La constante $0,2$ es un valor característico del N° de Strouhal para producción de vórtices. Por otro lado, v_j disminuye drásticamente al formarse los mismos, la rapidez de vórtices se aproxima a valores $v_v = 0,4v_j$.

III. METODOLOGÍA

Para trabajar a salvo del vapor a alta presión se construyó un silbato de PVC rígido, se registraron las dimensiones del silbato original en el taller de la estación. Allí se halló un plano de silbato Baldwin, éste fue útil para analizar funcionamiento y estructura que se muestran en la Figura 3. Todas las unidades de base y derivadas son aquí representadas según el Sistema Métrico Legal Argentino SIMELA.

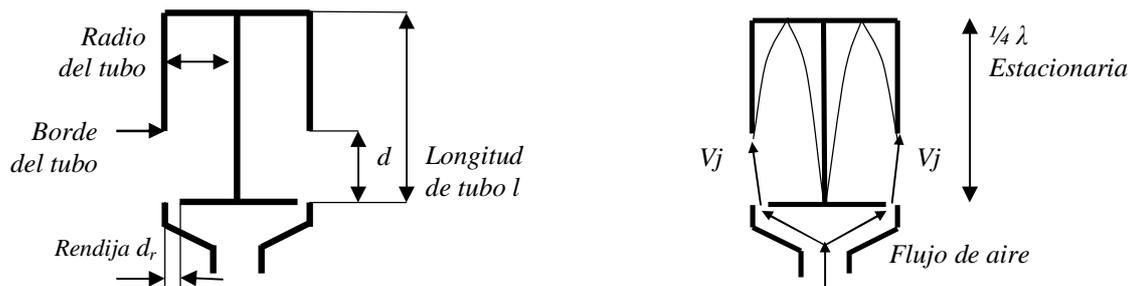
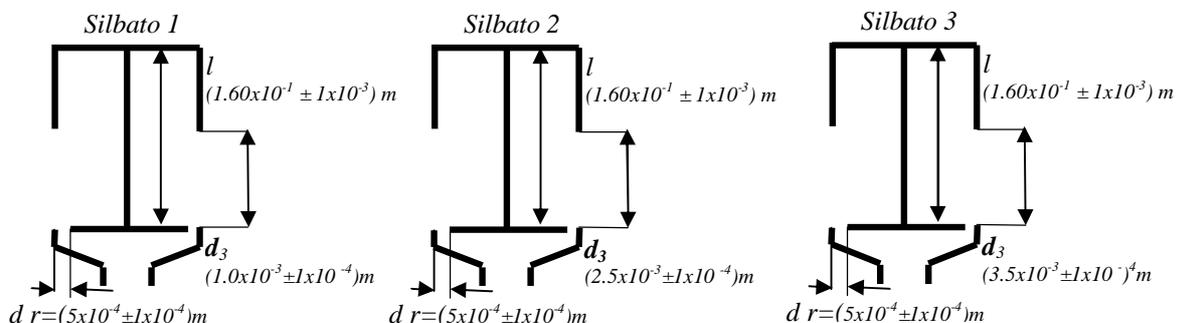


FIGURA 3. Corte seccional mostrando estructura y detalles básicos de funcionamiento del silbato.-

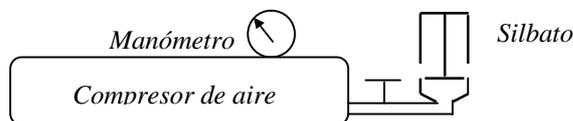
El silbato funcionando en la máquina, fue la referencia para crear la reproducción. El mismo tiene una longitud interior del tubo $l = (0,160 \pm 0,001) m$, la abertura $d = (0,035 \pm 0,001) m$ y trabaja a una presión entre $P = (833578 \pm 9806) N/m^2$ y $P = (1176816 \pm 9806) N/m^2$ de vapor saturado insuflado por una rendija de $(0,0005 \pm 0,0001) m$. Para el silbato de PVC se utilizaron 3 modelos variando d ; se construyó con un diámetro interno de $(0,063 \pm 0,001) m$ para una presión de trabajo entre $(49034 \pm 9806) N/m^2$ y $(196136 \pm 9806) N/m^2$ de aire insuflado por una rendija de $(0,0005 \pm 0,0001) m$. Se determinaron cifras significativas y, de aquí en más, algunos valores se presentan en notación exponencial. Las medidas correspondientes a los diseños se muestran en la Figura 4:



¹ Datos recabados de la producción de Eduardo P. Castillo sobre análisis acústico y mecánico para el diseño de flautas. Y visita de sitios de Internet citados en VII. "Bibliografía", Pag. 6.

FIGURA 4. Dimensiones del silbato de PVC con sus variantes en función de la abertura d .

El Silbato de PCV se conectó mediante un tubo y llave de paso a un compresor de $0,025\text{ m}^3$ provisto de un manómetro analógico con error del orden de los $P = (\pm 9.8 \times 10^3)\text{ N/m}^2$ y un termómetro con incertezas de $T = (\pm 1)^\circ\text{C}$. El esquema diseñado para el trabajo experimental se muestra en la Figura 5:

**FIGURA 5.** Se muestra el montaje del dispositivo utilizado para producir el sonido en laboratorio de Física.

Se calculó analíticamente la frecuencia estacionaria en el tubo a partir de los datos de temperatura del ambiente y longitud l . Se las comparó con los datos registrados por los software "Da Tuner Lite" de Google plus y Audacity², instalados en un teléfono celular y netbook, que registraron datos con incertezas del orden de los $\pm 25\text{ Hz}$. Para medir el caudal entregado por el compresor a través de la rendija en función de t , se utilizó una cámara de polietileno vacía sobre el silbato, se cargó el compresor hasta alcanzarla presión $P = (1.9 \times 10^5 \pm 9.8 \times 10^3)\text{ N/m}^2$ para luego vaciar toda la carga en la cámara. Se cubió el aire en un cajón regulable rectangular. Las descargas y el manómetro fueron grabados, por ello, se dispuso del tiempo y se obtuvo la descarga porcentual según la caída de presión. También se cuantificó el caudal, la rapidez v_j y v_v para obtener f_{ib} . Todos los cálculos incluyen propagación de errores (Maiztegui - Gleiser 1980) Para establecer cuál es la fuente de propagación de la onda viajera en el aire, se colocó primero un paño envolviendo las paredes del tubo y, luego, el mismo trapo alrededor (y separado $0,01\text{ m}$) de la abertura d , se descargó el compresor y se debatieron las hipótesis sobre el tema. Se consideró importante relacionar el movimiento de fluido con el sonido porque éste aporta trabajo sobre el sistema.

IV. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La rapidez del sonido v , necesaria para averiguar la frecuencia f teórica de la onda estacionaria en el tubo fue calculada reemplazando en (1) el dato experimental de temperatura $t = (24 \pm 1)^\circ\text{C}$:

$$v = (346.2 \pm 0.3) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5)$$

Con este dato se dispuso a calcular su frecuencia teórica reemplazando v en (2):

$$f = (540.9 \pm 3.8)\text{ Hz} \quad (6)$$

El silbato 3 no emitió sonido registrables por lo tanto se dejó para un futuro trabajo a mayores presiones. Para modelizar el caudal emitido por el tanque al sistema fue necesario fijar un valor aproximado de la sección S de la rendija como diferencia de superficies de 2 círculos concéntricos:

$$S = (4.9 \times 10^{-4} \pm 2 \times 10^{-5})\text{ m}^2 \quad (7)$$

En la Tabla N°I se presenta el conjunto de datos experimentales y derivados para el Silbato N° 1:

² El acceso a Ambos Softwares se encuentra indicado en VII ."Bibliografía", Pag. 6.

TABLA I. Datos e incertezas experimentales y derivados a $(24 \pm 1)^\circ\text{C}$ para Silbato N° 1 de abertura d_1 .

Datos Silbato N° 1																				
f estacionaria teórica ± 3.8 Hz	540.9				Período T onda estacionaria en s				0.0018											
$\Delta t \pm 1$ s	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10
$\Delta Q / \Delta t$ Caudal $\pm 4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	4.80E-03	3.60E-03		3.60E-03		3.00E-03		2.40E-03		2.40E-03		6.00E-04		6.00E-04		1.20E-03		1.20E-03		
$v_j = \pm 1.87$ m/s	970.50	727.88		727.88		606.56		485.25		485.25		121.31		121.31		242.63		242.63		
$v_v = \pm 0.75$ m/s	388.20	291.15		291.15		242.63		194.10		194.10		48.53		48.53		97.05		97.05		
f onda en el aire ± 25 Hz	-	2171.35				1419.10				942.65				466.83						
Período T onda en el aire en s	-	5.E-04				7.E-04				1.E-03				2.E-03						
Forma de la onda viajera																				
$f_{ib} \pm 1500$ Hz	19410.0	14557.5	14557.5	12131.3	9705.0	9705.0	2426.3	2426.3	4852.5	4852.5										
T vórtice en s	5.E-05	7.E-05	7.E-05	8.E-05	1.E-04	1.E-04	4.E-04	4.E-04	2.E-04	2.E-04										
Viscosidad y v_j	Dominio total de v_j				Mayor dominio de v_j por sobre la viscosidad															

El valor inicial de frecuencia se relaciona con el caudal aportado en el intervalo $t_i=0$ s y $t_f=1$ s, asimismo, con la inercia del fluido en la ruptura. Las presiones del tanque y atmosférica se estabilizan en el tiempo.

En la Tabla N° II se presenta el conjunto de datos experimentales y derivados para el Silbato N° 2:

TABLA II. Datos e incertezas experimentales y derivados a 24° C de temperatura para tubo de abertura d_2 .

Datos Silbato N° 2																				
f estacionaria teórica ± 3.8 Hz	540.9				Período T de onda estacionaria en s				0.0018											
$\Delta t \pm 1$ s	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10
$\Delta Q / \Delta t$ Caudal $\pm 4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	4.80E-03	3.60E-03		3.60E-03		3.00E-03		2.40E-03		2.40E-03		6.00E-04		6.00E-04		1.20E-03		1.20E-03		
$v_j = \pm 1.87$ m/s	970.50	727.88		727.88		606.56		485.25		485.25		121.31		121.31		242.63		242.63		
$v_v = \pm 0.75$ m/s	388.20	291.15		291.15		242.63		194.10		194.10		48.53		48.53		97.05		97.05		
f onda en el aire ± 25 Hz	-	550.05		515.08				-												
T onda en el aire en s	-	0.00182		0.00194				-												
Forma de la onda viajera																				
$f_{ib} \pm 450$ Hz	9705.0	7278.8	7278.8	6065.6	4852.5	4852.5	1213.1	1213.1	2426.3	2426.3										
T vórtice en s	1.E-04	1.E-04	1.E-04	2.E-04	2.E-04	2.E-04	8.E-04	8.E-04	4.E-04	4.E-04										
Viscosidad y v_j	Dominio moderado de v_j				Mayor dominio de la viscosidad															

V. CONCLUSIONES

El Modelo de funcionamiento de un silbato bien proporcionado en sus magnitudes, trabajando a flujo estacionario constante, se puede explicar de la siguiente manera; desde un tanque, al presurizar gas a alta

velocidad por un rendija sobre el borde de un silbato cerrado se generan vórtices que ponen a vibrar la columna de aire en el interior generando una onda estacionaria. En la abertura del mismo, los tonos de borde causados por los vórtices intervienen en el timbre del instrumento. La onda estacionaria empuja y repliega el medio elástico alrededor del silbato produciendo una onda que se propaga en el aire con aproximadamente con su misma frecuencia. En la descarga inicial, la frecuencia f_{ib} aumenta por la rapidez e inercia del gas liberado afectando la onda viajera hasta que rápidamente se estabiliza con la amortiguación de las presiones. El Silbato N°2 con abertura d_2 en el intervalo de tiempo entre $t=0s$ y $t=4s$, representa bien este tipo de funcionamiento. En la Figura 6 se explica gráficamente el modelo:

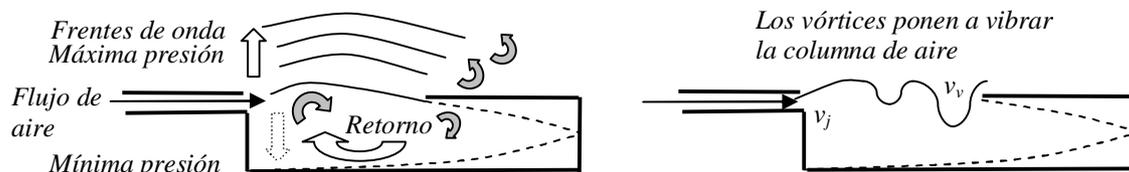


FIGURA 6. Corte seccional mostrando el modelo de funcionamiento del Silbato2 y la emisión de frentes de onda.-

Las frecuencias $f = (550.5 \pm 25)$ Hz y $f = (515.8 \pm 25)$ Hz obtenidas experimentalmente para el Silbato N°2 dentro del mencionado intervalo, incluyen la frecuencia teórica $f = (540.9 \pm 3.8)$ Hz y su error experimental a una temperatura de $24 \pm 1^\circ\text{C}$. La variable para la determinación de las condiciones de contorno es la presión de trabajo $P = (9.8 \times 10^4 \pm 9.8 \times 10^3)$ N/m². A valores inferiores de P , hay menor aporte de energía al sistema y el silbato pierde su capacidad de emitir sonido.

El análisis de los datos del Silbato N°1 en la Tabla N° I nos informa que efectivamente la f_{ib} es variable dependiente de la distancia $d_{I=}$ ($1.0 \times 10^{-3} \pm 1 \times 10^{-4}$) m y de v_j , sobretodo en el momento de la ruptura donde f_{ib} fluctúa entre 19400Hz y 12000Hz. La razón por la cual se cree que se registran elevadas frecuencias experimentales iniciales (del orden de los 2000Hz) se piensa que está relacionada con f_{ib} dado que el período de cada ciclo ronda los valores de 5×10^{-5} s para d_I y v_j lo que indica una mayor entrega de energía por unidad de área e intervalo de tiempo. Luego, al disminuir los valores de v_j y del período, la onda de tono de borde pierde potencia quedando por debajo de la onda estacionaria. Al momento de registrar datos sobre este silbato se notó una percepción muy desagradable y con acoples en el sonido.

Futuras investigaciones apuntarán a preguntas sobre la relación cuantitativa de los vórtices sobre las frecuencias, el material del silbato y el timbre, es decir, temas que aquí han quedado sin responder.

Desde el rol de estudiante se siente que ha cambiado cronológicamente el modelo mental (Chamizo 2010) (Justi 2011) sobre el funcionamiento del silbato y que probablemente continuará cambiando. Además, se destaca que el trabajo se transformó en algo muy importante a nivel personal. Por otro lado, se pudo apreciar la constante interacción con diversos grupos sociales interesados en participar y que de alguna u otra manera hicieron su contribución en esta síntesis, del mismo modo, la interacción con todo el grupo docente y desarrollo de las cátedras están volcadas en ésta producción completamente interrelacionadas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece en especial a los profesores, Néstor Camino, Marianela Zaninetti, Laura Niklitschek y Valeria Di Marco, asimismo al personal no docente y compañeros estudiantes del Profesorado de Física del ISFD N° 804 de Esquel-Chubut, por el apoyo otorgado durante la realización de este trabajo. Se agradece especialmente a la Gerencia de la estación de "La Trochita" en la ciudad de Esquel-Chubut y a todo el personal que allí trabaja por la predisposición y colaboración para construir este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Chamizo, J. (2010). *Una tipología de los modelos para la enseñanza de las ciencias*. Paper otorgado por la Cátedra Investigación Educativa I ISFD N°804 Esquel, Chubut.

Justi, R. (2011). *Didáctica de la Física y la Química. Las concepciones del modelo de los alumnos, la construcción de modelos y el aprendizaje de las Ciencias*, Sevilla, España. Editorial Graó de IRIF, S.L.

Lombardi, O. (2010) *Los modelos como mediadores entre la teoría y realidad*. En Didáctica de las Ciencias Naturales, Galagovsky, L. (coord). Buenos Aires: Lugar Editorial 2003. pp. 82-93

Maiztegui, A. P. y Gleiser, R. J. (1980). Introducción a las mediciones de laboratorio, Cap. III-7 *Propagación de incertezas*, pp. 54-76. Buenos Aires: Editorial Kapeluz 1980.

Oriola, J. (2004). Esquel... del telégrafo al pavimento, pp. 173-192. Impreso en el congreso de la Nación.

Perilla, C. E. y Pinilla Sepulveda, A. E. (2004) Revista de Ingeniería. *Análisis del comportamiento dinámico acústico y comprobación computacional mediante CFD para el diseño de flautas transversas modernas*. 20(1), pp. 4-13.

Rocamora, M. (2006) Universidad de la República Oriental del Uruguay, Facultad de Artes, Escuela de Música, *Apuntes de acústica Musical*. pp. 1-9. Paper otorgado por la Catedra Laboratorio de Experiencias Avanzadas de física, ISFD N°804 Esquel, Chubut.

Young, H., D. y Freedman, R. A. (2009). *Física Universitaria*, Vol. I, Cap. XV, XVI, pp. 487-569. 12^a Edición, México: Addison-Wesley.

Tonos de borde, sitios visitados el día 25/6/15

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/music/edge.html>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/music/edge3.html>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/music/edge2.html>

Publicación de simulaciones de perfiles de ondas producidas por fluidos, visita el día 25/6/15

<http://www.cfd.tu-berlin.de/~panek/cfd/Simulation.html>

PDF Análisis experimental desprendimientos o vórtices de Karman, visitado el Día 01/07/15.

<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2001/7-Tecnologicas/T-023.pdf>

Número de Strouhal, rev.ing. no.20 Bogotá Jun./Dec. 2004

https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Strouhal Visita el día 01/07/15.

Software de sonido Audacity descargado el día 25/6/15

http://sourceforge.net/projects/audacity/?source=typ_redirect