



$$W_x = \frac{M \cdot \text{máx}}{2}$$

Entornos invisibles

(de la ciencia y la tecnología)

Camping musical



Capítulo 12

$$\sigma_{ad} = 1.600 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \Rightarrow \sigma_{ad} = 16.000 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$$

Guía didáctica

Autor | Javier Luzuriaga

Autoridades

Presidente de la Nación

Dra. Cristina Fernández de Kirchner

Ministro de Educación

Dr. Alberto E. Sileoni

Secretaria de Educación

Prof. María Inés Abrile de Vollmer

Directora Ejecutiva del Instituto Nacional de Educación Tecnológica

Lic. María Rosa Almandoz

Director Nacional del Centro Nacional de Educación Tecnológica

Lic. Juan Manuel Kirschenbaum

Director Nacional de Educación Técnico Profesional y Ocupacional

Ing. Roberto Díaz

Ministerio de Educación.

Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

Saavedra 789. C1229ACE.

Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

República Argentina.

2011

Director de la Colección:

Lic. Juan Manuel Kirschenbaum

Coordinadora general de la Colección:

Claudia Crowe

Diseño didáctico y corrección de estilo:

Lic. María Inés Narvaja

Ing. Alejandra Santos

Coordinación y producción gráfica:

Augusto Bastons

Diseño gráfico:

María Victoria Bardini

Augusto Bastons

Martín Alejandro González

Federico Timerman

Ilustraciones:

Diego Gonzalo Ferreyro

Martín Alejandro González

Federico Timerman

Administración:

Cristina Caratozzolo

Néstor Hergenrether

Colaboración:

Jorgelina Lemmi

Psic. Soc. Cecilia L. Vázquez

Dra. Stella Maris Quiroga

“Colección Encuentro Inet”.

Director de la Colección: Juan Manuel Kirschenbaum.

Coordinadora general de la Colección: Claudia Crowe.

Queda hecho el depósito que previene la ley N° 11.723. © Todos los derechos reservados por el Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

Reproducción autorizada haciendo mención de la fuente.

Industria Argentina

ADVERTENCIA

La habilitación de las direcciones electrónicas y dominios de la web asociados, citados en este libro, debe ser considerada vigente para su acceso, a la fecha de edición de la presente publicación. Los eventuales cambios, en razón de la caducidad, transferencia de dominio, modificaciones y/o alteraciones de contenidos y su uso para otros propósitos, queda fuera de las previsiones de la presente edición -Por lo tanto, las direcciones electrónicas mencionadas en este libro, deben ser descartadas o consideradas, en este contexto-.

Colección Encuentro Inet

Esta colección contiene las siguientes series (coproducidas junto con el Instituto Nacional de Educación Tecnológica - INET):

- La técnica
- Aula-taller
- Máquinas y herramientas
- Entornos invisibles de la ciencia y la tecnología

DVD 4 | Aula-taller

Capítulo 1
Biodigestor

Capítulo 2
Quemador de biomasa

Capítulo 3
Planta potabilizadora

Capítulo 4
Probador de inyecciones

DVD 5 | Aula-taller

Capítulo 5
Planta de tratamiento de aguas residuales

Capítulo 6
Tren de aterrizaje

Capítulo 7
Banco de trabajo

Capítulo 8
Invernadero automatizado

DVD 6 | Máquinas y herramientas

Capítulo 1
Historia de las herramientas y
las máquinas herramientas

Capítulo 2
Diseño y uso de
Máquinas Herramientas

Capítulo 3
Diseño y uso de
Herramientas de corte

Capítulo 4
Nuevos paradigmas en el mundo
de las máquinas herramientas y
herramientas de corte

DVD 7 | Entornos invisibles (de la ciencia y la tecnología)

Capítulo 1
Parque de diversiones

Capítulo 2
Cocina

Capítulo 3
Red de energía eléctrica

Capítulo 4
Campo de deportes

DVD 8 | Entornos invisibles (de la ciencia y la tecnología)

Capítulo 5
Estadio de Rock

Capítulo 6
Estructuras

Capítulo 7
Chacra orgánica

Capítulo 8
Bar

DVD 9 | Entornos invisibles (de la ciencia y la tecnología)

Capítulo 9
Estación meteorológica

Capítulo 10
Restaurante

Capítulo 11
Seguridad en obras de construcción

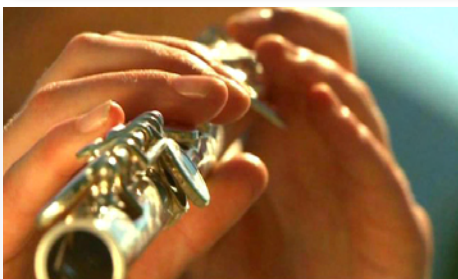
Capítulo 12
Camping musical

Capítulo 13
Hospital

Índice | Camping musical

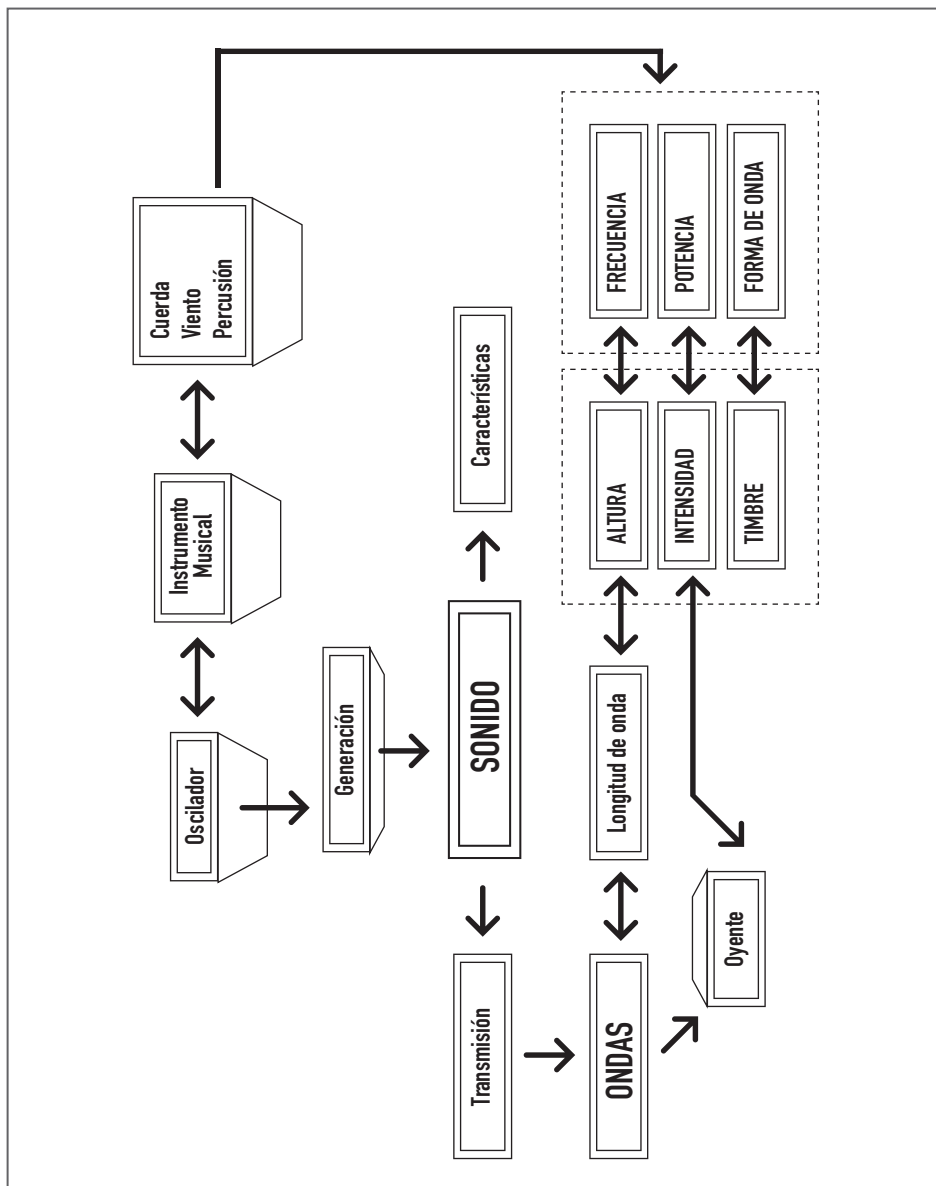
12.1. Red conceptual	08
12.2. Introducción	09
♦ 12.2.1. Consigna central y motivadora	09
• 12.2.1.1. Intentemos entender lo más simple	09
• 12.2.1.2. Instrumentos de cuerda	17
• 12.2.1.3. Instrumentos de viento	19
• 12.2.1.4. Instrumentos de percusión	20
12.3. Entornos Invisibles de la Ciencia y la Tecnología - Sala de Conciertos	22
♦ 12.3.1. Actividades	22
• 12.3.1.1. Medición de la velocidad del sonido	22
• 12.3.1.2. Errores y tratamiento estadístico	25
♦ 12.3.2. Ondas	27
♦ 12.3.3. Frecuencia del sonido	29
♦ 12.3.4. Timbre de los sonidos	34
• 12.3.4.1. Timbre usando el Visual Analyser	38
• 12.3.4.2. Oscilador armónico	39
• 12.3.4.3. Cuerda vibrante	41
• 12.3.4.4. Caja de resonancia	41
12.4. Construcción de un cordófono sencillo con caja de resonancia hecha de lata	42
12.5. Instrumentos de viento	46
♦ 12.5.1. Vibraciones en columnas de aire	46
♦ 12.5.2. Mecanismos de excitación	48
♦ 12.5.3. Construcción de instrumentos de viento sencillos	50
• 12.5.3.1. Flauta dulce	51
• 12.5.3.2. La quena	51
• 12.5.3.3. Flauta travesera	52
• 12.5.3.4. Siku	52
12.6. Apéndice I : Tabla de frecuencias de las notas musicales	53

Imágenes del capítulo



12. Camping musical

12.1. Red conceptual



12.2. Introducción

En esta sección presentamos una ampliación de algunos conceptos usados en el programa.

Este ícono representa actividades o sugerencias de trabajo con los alumnos. →



Se adjunta una guía práctica, en donde se sugieren actividades ilustrativas con formato de experimentos, los conceptos involucrados.

Como complemento, se agrega una copia de dos artículos publicados en la revista *Desde la Patagonia, difundiendo saberes* (año 3 núm. 4 diciembre 2006, pp 42-46, 47-51) publicada por el Centro Regional Bariloche de la Universidad Nacional del Comahue:

1. El primero, es sobre la física de los instrumentos de cuerda y,
2. el segundo, una entrevista a Raúl Pérez (el luthier que aparece en el video), sobre construcción de instrumentos.

Para temas afines y, como obra un poco más extensa, se puede consultar la siguiente bibliografía: *La física de los instrumentos musicales*, J. Luzuriaga y R. O. Pérez, Eudeba, 2006¹.

12.2.1. Consigna central y motivadora

¿Cómo se produce la música que escuchamos? ¿Por qué sus sonidos nos resultan agradables?

La primera pregunta, tiene mucho que ver con la ciencia y la tecnología.

La segunda, es en realidad la más difícil, porque entran muchos factores subjetivos ya que a todos no nos gusta la misma música. Pero, saber un poco más sobre el sonido desde el punto de vista físico ayuda, un poco, a entender qué factores entran en el placer que nos da la música, ese encadenamiento de sonidos que podemos llegar a disfrutar tanto.



Figura 1

12.2.1.1. Intentemos entender lo más simple

Estamos rodeados de sonidos, los escuchamos constantemente.

¹ En el 2006 se ha distribuido en escuelas, gratuitamente, por el Ministerio de Educación, por lo que es posible que haya un ejemplar en la biblioteca de su escuela pública.

Desde el punto de vista de la física, el sonido se compone de pequeñas **variaciones en la presión del aire que nos rodea**. Estas variaciones de presión llegan a nuestro oído viajando a través del aire, el oído las detecta,

se analizan utilizando varios mecanismos complejos en el oído interno y el cerebro, hasta que nos damos cuenta: esa es la voz de alguien, o sonó el timbre o suena un instrumento musical.

También hay sonido, por supuesto, aunque no haya nadie para oírlo, las variaciones de presión existen igual, aunque no haya una persona para oírlas. Siempre es posible detectarlas con aparatos. Es parecido a la luz del Sol que existe, aunque sea de noche, simplemente, no la vemos porque está iluminando el lado opuesto de la Tierra.

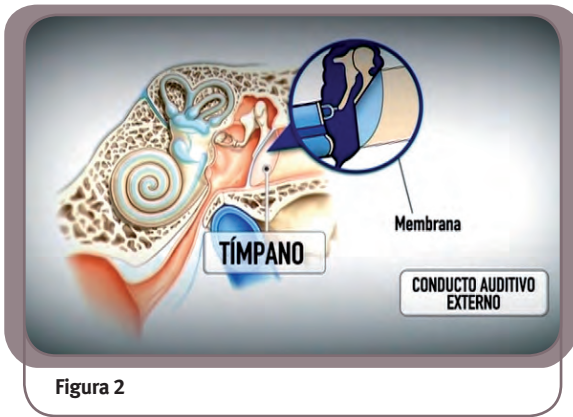


Figura 2

El sonido viaja desde su fuente, sea una voz, un ruido o un instrumento musical, en forma de una onda que se propaga por el aire.

Un ejemplo familiar de ondas son las que vemos en un estanque quieto, al tirar una piedra. Se puede ver que el agua sube y baja y la perturbación viaja de la piedra a la orilla a través del agua. Sin embargo, hay algo importante y es que la perturbación se desplaza, pero el agua no. Se ve que el agua sube y baja en pequeñas olas, pero si hay una hoja o un corcho flotando en el agua, la onda no lo mueve.

Otro ejemplo, son las ondas que se hacen a veces en los estadios de fútbol, cuando los espectadores se mueven por turno. La onda viaja pero, cada espectador, se queda en su lugar.

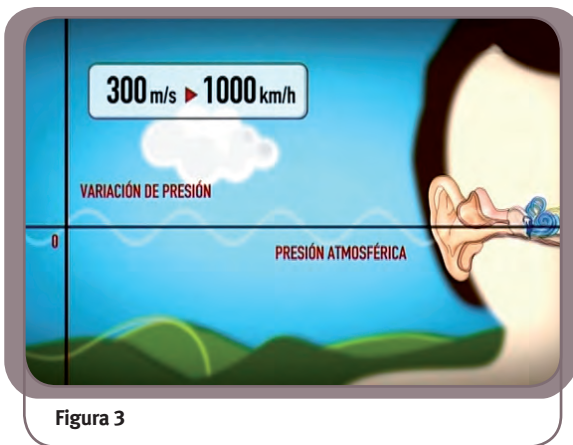


Figura 3

En el sonido pasa algo parecido pero, ¡cuídalo!, que no es idéntico. Por empezar la perturbación no se ve y lo que viaja no son las ondas de la superficie del agua o el movimiento de los espectadores, sino las pequeñas variaciones de presión. Eso es lo que llamamos sonido, una vez que las ondas llegan y son detectadas por nuestro oído. La presión sube y baja en el aire en forma repetida como las ondas en el agua.

La **velocidad del sonido** es también mucho mayor que las ondas del agua. Estamos acostumbrados a pensar que el sonido nos

llega de modo instantáneo porque la velocidad es, aproximadamente, 300 metros por segundo (un poco más que mil kilómetros por hora). Así, sólo se percibe un retardo cuando el sonido

se produce muy lejos. Por eso, se ve el relámpago antes de oír el trueno y un golpe fuerte, como el de una persona martillando o hachando, se nota retrasado con respecto al momento que lo vemos. Si la persona que golpea está a unos 100 metros, el sonido tarda un tercio de segundo en llegar y lo notamos perfectamente. Si estamos a 1 metro, en cambio, tarda 3 milésimas de segundo y, no es perceptible por nuestros sentidos.

Hay dos cosas para notar aquí:

1. El relámpago se ve antes de oír el sonido porque la luz es muy rápida, viaja a 300 mil **kilómetros** por segundo, esto es 300 **millones** de metros por segundo, aproximadamente, o sea un millón de veces más rápido que el sonido.
2. El segundo factor que diferencia la luz y el sonido, es que el sonido necesita un medio para propagarse. Dijimos que son ondas de presión del aire y, por eso, en el vacío no hay sonido. Las ondas de sonido también pueden viajar en otros medios, tales como el agua, la roca, u otros sólidos. La luz puede propagarse en el vacío, por eso vemos el Sol, pero de ninguna manera podríamos oír las enormes variaciones de presión que se producen en la superficie del Sol, porque entre el Sol y la Tierra, no hay ningún medio, sólido, líquido o gas, que nos transmita ese sonido. El ruido en la superficie del Sol debe ser enorme, y nos volvería sordos, si por algún milagro, pudiéramos sobrevivir en la superficie del Sol, que se encuentra a unos 5.000 grados de temperatura.

No cualquier variación de presión repetida se escucha como sonido. Para que sean percibidas como sonido, las variaciones de presión, deben ser bastante rápidas, tienen que repetirse más de 16 veces por segundo, por lo menos.

Pero si son demasiado rápidas, dejan de escucharse también.

Si la variación es muy rápida, más de 16.000 (dieciséis mil) veces por segundo, nuestro oído no la detecta, aunque pueden ser oídos por los perros, o los murciélagos que pueden percibirlos. Estos llamados ultrasonidos pueden ser detectados por aparatos de medición y se utilizan en algunos dispositivos como los ecógrafos.

Decimos que un sonido tiene una determinada **frecuencia** que viene a ser la cantidad de veces que varía la presión en un segundo. Se usa una unidad de medida, el Hertz, que indica cuántas veces por segundo vibra la presión. Entonces, si las variaciones de presión se repiten a menos de 16 Hertz, o sea 16 veces por segundo, como dijimos antes, no la percibimos como sonido. Para los humanos, esto se llama la **región infrasónica**. Entre 16 Hertz y 16.000 Hertz es la región de sonido normal y, más arriba de 16.000 Hertz, es la región ultrasónica, la que usan el **sonar** de los submarinos y los ecógrafos para obtener imágenes del interior del cuerpo en medicina. También los murciélagos y los delfines usan ultrasonido para detectar obstáculos con un sistema de ecolocación muy parecida al **sonar**.

En la música, la frecuencia tiene mucho que ver con la nota musical que se produce. Es lo que fija la nota musical que estamos escuchando.

Lo que se escucha es muy distinto según la frecuencia de la vibración. Por ejemplo, un sonido que suene a 50 ciclos por segundo, (o sea que las variaciones de presión se repiten 50 veces en un segundo) se escucha como un sonido muy grave, como un zumbido que es lo que se oye, a veces, en aparatos eléctricos. En este caso, hay alguna vibración sonora asociada a la corriente de la usina que es alterna y vibra 50 veces por segundo. El zumbido no es intencional, ocurre que alguna parte del aparato emite sonido porque vibra con la corriente y mueve el aire.

Un sonido que identificamos enseguida como más agudo que el anterior, por ejemplo, se oye cuando la vibración es a 440 ciclos por segundo. Ésta es la frecuencia normal en el tono de teléfono libre, el que se oye antes de discar. También, en música, se usa este sonido. Por convención se fija la frecuencia de la nota musical LA en 440 Hertz y se fija como patrón, el que se usa para ajustar la nota de todos los instrumentos. Se llama a esta nota musical el LA 440 porque, justamente, lo produce algo que vibra 440 veces por segundo. El diapasón que usan los músicos para afinar es una barra metálica doblada en forma de U con un mango y cuando se la golpea, vibra 440 veces por segundo ya que está construida para que vibre así.

Aunque no podemos ver, directamente, con nuestros ojos las variaciones de presión, existen aparatos que nos permiten registrar esas variaciones y visualizarlas de una manera indirecta. Este es el caso de un micrófono que puede captar las variaciones de presión en cada instante y las transforma en impulsos eléctricos. La señal eléctrica se puede mostrar en la pantalla de una computadora, se puede grabar en cinta, disco o lo que sea, porque la tecnología actual para manejar señales electrónicas está muy desarrollada y permite una gran variedad de opciones.

Si representamos la presión detectada por el micrófono en un eje vertical y el tiempo en el horizontal, las señales correspondientes se ven como ondas de este aspecto:

Las formas de estas ondas corresponden a funciones muy conocidas en **la matemática**. Son iguales a las funciones seno y coseno que se estudian en trigonometría aunque, en trigonometría, se define la función seno o coseno de una manera que no tiene que ver con el sonido, ni el sonido tiene ninguna forma geométrica evidente. En las ecuaciones de movimiento de muchos sistemas físicos aparecen las mismas formas matemáticas que en trigonometría. Se puede pensar que es una casualidad o se puede pensar que la estructura matemática es una propiedad de muchos sistemas físicos. Es un hecho que nos ayuda a predecir, a calcular y, en cierta forma, a comprender en forma más exacta las leyes físicas que se expresan en forma matemática.

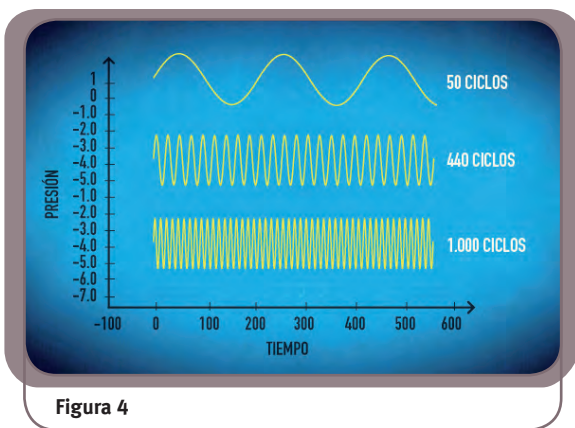


Figura 4

Es un hecho que nos ayuda a predecir, a calcular y, en cierta forma, a comprender en forma más exacta las leyes físicas que se expresan en forma matemática.

En el caso del sonido, con una sola frecuencia, la forma que visualizamos al mirar las variaciones de presión que capta el micrófono, es igual a la que veríamos si tomamos una tabla de senos o cosenos y dibujáramos, en un papel, el seno del ángulo en el eje "y" y el valor del ángulo en el eje x, yendo de ángulo cero a 360 grados. Las funciones trigonométricas son periódicas, es decir, que se repiten si pasamos el ángulo de 360 grados (una vuelta completa) y seguimos con ángulos mayores. Al fin y al cabo, un ángulo de más de 360 grados corresponde a dar una vuelta o dos vueltas (etc.) completas en un círculo y, luego, agregar "el ángulo que sobra". El sonido, también es periódico, la forma de la onda se sigue repitiendo en el tiempo.

En estos sonidos, de forma sinusoidal en las variaciones de presión, se oye una sola frecuencia por vez. En música o física se los llama **tonos puros**. Tienen la particularidad de tener **una sola frecuencia**. En general, los sonidos naturales (o incluso los musicales que son, en verdad, sonidos bastante artificiales, producto de instrumentos muy elaborados) no son tonos puros.

Sin embargo, para que una nota musical sea reconocida, debe tener una nota definida. Usando notas puras, se puede construir una escala musical.

Los músicos y los físicos utilizan, a menudo, lenguajes diferentes para referirse a cosas muy parecidas. Mientras un físico hablaría de la **frecuencia** del sonido, el músico la llamaría **altura**, y los sonidos graves serían bajos (para el físico de baja frecuencia) mientras que los agudos serían altos (de alta frecuencia).

Esta escala suena diferente que lo mismo tocado en guitarra porque los sonidos no son frecuencias puras. Es como si varias frecuencias puras sonaran a la vez. Deberíamos imaginarnos que hay una frecuencia pura que suena con más volumen y, luego, la acompañan otras, más agudas, pero con menor volumen que son los llamados armónicos de la nota principal. Si miramos la forma de onda no vemos los armónicos por separado, lo que distinguimos es una onda con forma más complicada que los senos y cosenos de un tono puro. Y cada instrumento musical tiene un equilibrio diferente de los armónicos por eso suena distinto una flauta de una guitarra, aunque toquen la misma nota.

Se pueden visualizar ondas más complejas, por ejemplo, una onda triangular, tipo diente de sierra. Es una propiedad matemática de las ondas complejas que se puede construir sumando ondas de una sola frecuencia (tonos puros). Para el caso particular de la "diente de sierra" hay que sumar una onda pura que se repita con la misma frecuencia con que se repite la onda triangular, y sumarle una onda del doble de la frecuencia pero con amplitud tres veces menor; luego, otra de 3 veces la frecuencia, pero amplitud 5 veces menor. La resultante se parece bastante al diente de sierra, pero todavía quedan bastantes ondulaciones que no estaban en el original. Si agregamos más ondas, con los pesos adecuados, se van pareciendo cada vez más ambas ondas. Hay que agregar, una onda de 4 veces la frecuencia pero un séptimo de la amplitud, y otra de 5 veces la frecuencia y un noveno de la frecuencia, y se puede seguir indefinidamente, pero como los agregados son de cada vez menos amplitud, los cambios son cada vez menores. Se puede pensar también que la onda diente de sierra se puede descomponer en tonos puros y, a estos tonos puros que sumados dan la onda en cuestión, se los suele llamar armónicos del tono complejo.

La composición de los armónicos que mencionamos es lo que origina la característica del sonido que los músicos llaman el **timbre**. Cuando uno dice que el timbre de una guitarra y un piano o una flauta son distintos, es porque cada nota que emiten va acompañada con diferen-

tes armónicos, producidos por la forma en que está construido el instrumento.

En el lenguaje de los físicos, el **timbre** de un instrumento, está dado por la descomposición en

frecuencias, a veces, llamado el espectro de Fourier del sonido, en honor a Jean Baptiste Fourier (físico francés que fue el que descubrió que las ondas complejas podían expresarse como suma de ondas de frecuencias puras. En realidad Fourier estaba estudiando problemas de conducción del *calor* pero una vez más, su análisis matemático resultó aplicable a otros problemas físicos como la acústica).

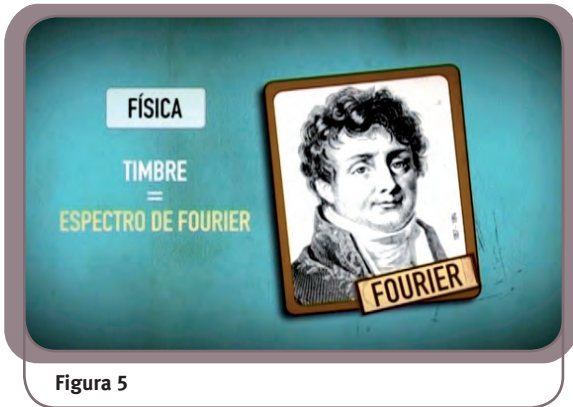


Figura 5

Aunque también hay una diferencia que notamos en cómo crece el sonido de cada nota, cuánto dura y cómo decae. Eso lo

identificamos y tiene que ver con la forma en que se produce el sonido. En la flauta la nota se mantiene pareja mientras sopla el flautista, puede durar todo lo que dure el aire en sus pulmones. En la guitarra, una vez que se soltó la cuerda, el sonido sólo puede ir disminuyendo. En el violín pueden pasar las dos cosas. La manera normal de tocar es con un arco que entrega energía mecánica al frotar las cuerdas y hacerlas vibrar constantemente. Esta energía mecánica produce energía sonora al vibrar la cuerda y se producen notas continuas de duración bastante larga y volumen pareja. Si en cambio, tocamos la cuerda con el dedo, como en una guitarra, (es el llamado *pizzicato* por los músicos) el sonido es más corto y decae desde el principio porque el dedo le dio energía a la cuerda al pulsarla y, luego, esta energía se va disipando al vibrar la cuerda produciendo energía sonora que se va propagando en el aire.

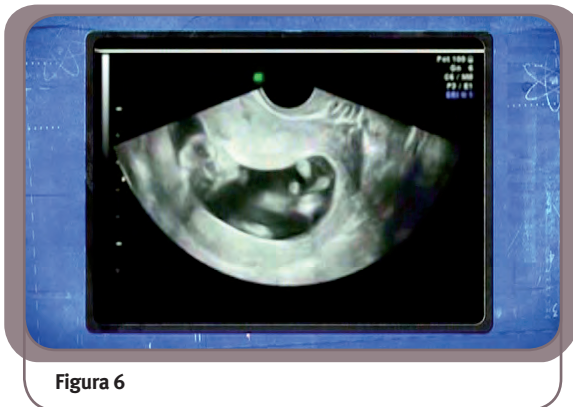


Figura 6

Nuestro oído es capaz de identificar los **armónicos** para distinguir el instrumento en cuestión. No podemos decir "El primer armónico vale tanto, el segundo armónico tanto, y, por eso, escucho un violín..." No, la cosa es menos consciente pero, sin pensarlo en detalle, en seguida reconocemos los instrumentos y, si se entrena el oído, como hacen los músicos, se llega a identificar los distintos violines o guitarras. La diferencia de timbre es lo que hace que, por ejemplo, algunas guitarras suenen mejor que otras.

Y no hace falta ningún entrenamiento para reconocer a las personas por su voz. Esto lo hace milagrosa y prácticamente, nuestro cerebro sin esfuerzo. Una parte importante de la información que usamos es, justamente, esta habilidad del oído y cerebro de analizar los armónicos que vibran en cualquier sonido complejo.

Pero no se oye una nota musical si alguien habla normalmente. ¿Por qué?

Esto es cierto. Si las frecuencias de vibración del sonido son todas de parecida importancia no se reconoce ninguna como fundamental y no se percibe una nota. Los tambores, platillos y la mayoría de los **instrumentos de percusión** vibran de muchas formas, todas mezcladas y con parecida intensidad. El oído no escucha ninguna frecuencia que se destaque y, por eso, no identifica ninguna. El instrumento es muy importante para el ritmo y no para la melodía. En la conversación hablada tampoco resaltamos ninguna frecuencia pero, para cantar, modificamos la garganta, las cuerdas vocales y hasta la forma de la boca para resaltar, justamente, una frecuencia dada que coincide con la nota musical que queremos reproducir. Esto también se puede entrenar y, por supuesto, cada cantante tiene su timbre de voz característico. No suena lo mismo Carlos Gardel que Charly García.

Entonces, es necesario que haya una frecuencia principal y los armónicos sean más débiles para que escuchemos una nota musical.

Vemos, entonces que, para producir la melodía, es necesario producir sonidos de frecuencias más o menos definidas.

Hay otro elemento en el sonido y es **la intensidad o volumen sonoro**. Esto tiene que ver con cuánta energía por unidad de tiempo se emite en él. Esta energía viene de las variaciones de presión que acompañan a un sonido. Estrictamente, la energía está dada por la variación de presión elevada al cuadrado. El sonido más débil que podemos detectar es de 2×10^{-10} veces la presión atmosférica (o sea 10 mil millones de veces más chica que la presión atmosférica).

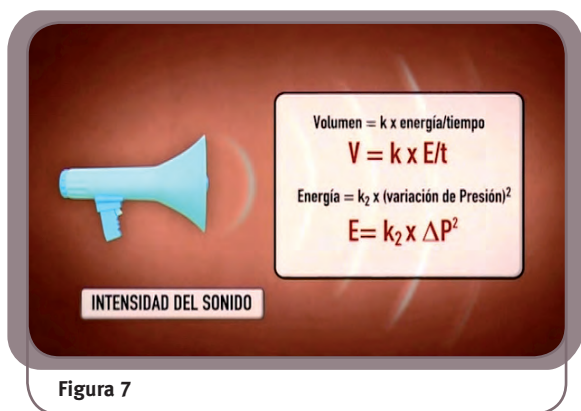


Figura 7

Es fácil ver que, para gritar, necesitamos más energía que para susurrar. Nuestro oído detecta sonidos muy débiles y tolera sonidos muy fuertes, aunque existe un tope, que se llama el umbral del dolor cuando las variaciones de presión corresponden a un milésimo de la presión atmosférica en donde, justamente, se siente molestia o dolor por lo fuerte del sonido. Se puede tolerar este dolor, pero no conviene hacerlo ya que estos sonidos muy fuertes dañan el oído en forma gradual e irreversible. Por eso hay normas para personas que deben trabajar en ambientes ruidosos como los elementos protectores.

La forma de medir la energía sonora, es usar una escala relativa, donde se define el decibel, (abreviado db) y en esta escala, el umbral de audición en cero decibeles, y el umbral de dolor en 120 db. Cada vez que la intensidad aumenta 100 veces se suman 20 decibeles, si disminuye 100 veces, se restan 20 decibeles.

La forma de medir la energía sonora, es usar una escala relativa, donde se define el decibel, (abreviado db) y en esta escala, el umbral de audición en cero decibeles, y el umbral de dolor en 120 db. Cada vez que la intensidad aumenta 100 veces se suman 20 decibeles, si disminuye 100 veces, se restan 20 decibeles.

La intensidad, también, se usa en música para dar variedad a una determinada pieza musical, si se toca todo al mismo volumen es aburrido. Las variaciones de volumen agregan además posibilidades expresivas. La música ambiental en ascensor, supermercados y lugares donde no se quiere realmente llamar la atención, suele estar procesada para que siempre tenga el mismo volumen así suena como un fondo y el cliente no se distrae escuchando la música.

Vimos hasta aquí las características de los sonidos. Estos tres elementos: **altura, intensidad y timbre**, se tienen que combinar para producir música. La esencia de la música está en la variedad. En última instancia lo que se quiere transmitir es alguna forma de mensaje musical y, para eso, hace falta variedad en las notas y los timbres de los diferentes instrumentos, por eso es que los instrumentos de la orquesta tienen formas y tamaños tan variados. Más variedad permite mensajes más ricos y complejos.

Por tal motivo, los instrumentos que producen sonidos musicales son muy variados y cumplen diferentes roles dentro de la orquesta. También deben cumplir con las leyes de la física; por eso, no se pueden juntar todos los roles en un mismo instrumento. No se pueden combinar un bombo y una flauta en un solo instrumento, sus requerimientos son muy distintos ni tampoco se podría encontrar un ejecutante que toque a la vez un violín y un piano.

Empecemos, entonces, por la construcción de los instrumentos que producen la melodía, que es la parte de la música en donde reconocemos las notas. Por lo tanto, estos instrumentos deben ser capaces de producir notas definidas.

Por supuesto que no toda la música es **melodía** sino que hay también **ritmo**, dado por cómo varían estas notas en el tiempo, pero empecemos a ver los instrumentos que tienen que producir una nota definida para participar de la melodía.

Lo que queremos es algo que vibre, con una frecuencia (nota) bien definida y que transmita esa vibración al aire. Hay varias maneras de hacer esto:

- 1) Hacer vibrar una cuerda, que es lo que hacen todos los cordófonos, o instrumentos de cuerda. En la orquesta de cámara se usan violines, violas, violoncelos y contrabajos, y se pueden sumar una guitarra o un piano. Todos estos son ejemplos de cordófonos.
- 2) Hacer vibrar una columna de aire, como los instrumentos de viento, desde la flauta a la trompeta. En la orquesta se usan trompetas, corno inglés o francés, oboes, clarinetes y fagot, trombones y dependiendo de la música a tocar, saxofones o tuba.
- 3) Hacer vibrar un cuerpo sólido, como las barras del xilofón o el cuerpo de una campana.

Para hacer algo que vibre, a una frecuencia definida, la naturaleza ayuda porque, por suerte, hay varios elementos que vibran y mantienen la frecuencia. Un ejemplo elemental, aunque no sirva para hacer música es un objeto pesado, atado a un resorte que puede ser algo tan simple como un bloque sujeto con una gomita.

Con esto nadie hace música pero tiene algunas de las propiedades que son útiles y sirve para entender mejor los casos más complicados de los instrumentos.

Una propiedad interesante de este sistema es que, aunque se aumente el recorrido del movimiento, siempre tarda lo mismo en ir y volver.

Esto es diferente de lo que uno hace si recorre una cuadra o dos cuadras en auto, en general, para dos cuadras tarda más, a menos que vaya el doble de rápido.

Justamente, en un sistema elástico como el resorte y la gomita, *aumenta* la velocidad cuando aumenta la distancia, de tal manera que siempre tardo lo mismo en recorrer el camino de ida y el de vuelta. Un sistema como éste se llama un **oscilador armónico** en Física. Se conoce muy bien cuáles son las ecuaciones matemáticas que gobiernan su comportamiento pero, aquí, nos interesa, sobre todo, la propiedad que tiene de ir y volver en tiempos iguales, que es lo que hace que produzca sonidos de frecuencia definida.

Es importante que tarde lo mismo en ir y volver porque, entonces, si construimos un oscilador armónico que tarde medio segundo en ir y volver, en un segundo va y viene dos veces, por lo que su frecuencia es siempre dos ciclos por segundo, sin importar si lo muevo mucho o poco.

En un instrumento musical, esto es importante, porque la frecuencia está asociada a la nota, como dijimos. Si al tocar más fuerte o más despacio (que es lo mismo que mover el oscilador mucho o poco) cambiáramos la frecuencia, el instrumento sería imposible de tocar. Es decir, es importante que la nota (frecuencia), sea siempre la misma si toco fuerte o débil (si cambio la intensidad).

Si se cambia un poco el oscilador, por ejemplo haciéndolo más pesado, todo va a tardar más, ahora la frecuencia es más baja (va y viene menos veces por segundo) como se ve si agregamos peso.

Y si le ponemos un resorte más "duro" qué es lo que pasa si agregamos una gomita más, todo ocurre más rápido y la frecuencia aumenta.

12.2.1.2. Instrumentos de cuerda

Pero los instrumentos rara vez usan resortes y gomitas, aunque hay muchos que usan un oscilador armónico un poco más complicado que es la **cuerda vibrante**.

Una cuerda tirante, tensada de alguna manera, se porta como un resorte. Si apartamos la cuerda con el dedo y luego sacamos el dedo, la cuerda vibra.

Si alguno afinó una guitarra, alguna vez, sabe que, para que la nota "suba" o sea para que aumente su frecuencia y el sonido se haga más agudo, hay que tensar más la cuerda. Al ten-

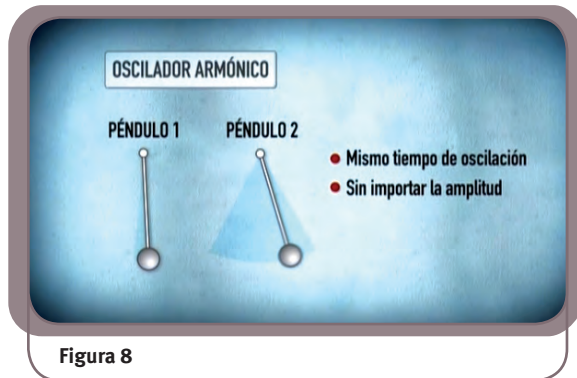


Figura 8

sar la cuerda estamos aumentando la fuerza del resorte en forma parecida a lo que hacíamos al poner otra gomita. Todo vibra más rápido y la nota es más aguda. Al contrario, si queremos bajar la nota, aflojamos la cuerda.

Por otro lado, se puede ver que las cuerdas más graves son más gruesas y que, en las tres cuerdas más graves de la guitarra, se agrega un "entorchado" que le agrega peso, como al poner dos bloques para que la cuerda sea más pesada y vibre más despacio.

La cuerda puede vibrar de varias maneras, a diferencia del bloque y la gomita y éstas tienen distintas frecuencias. Se puede hacer vibrar esta cuerda tensa al doble de la frecuencia; y en este caso, la forma de la cuerda al vibrar es distinta, tiene dos "vientres" en lugar de uno. O a tres veces la frecuencia y, entonces, aparecen tres vientres. Y así siguiendo. El sonido de frecuencia más baja es el fundamental, el que da la nota que escuchamos y los otros cambian el timbre.

Estos son los modos "puros" y, en general, vibran varios de estos modos a la vez. El instrumentista puede cambiar un poco la forma de vibrar de la cuerda y esto cambia el timbre. Por ejemplo, tocando la cuerda en el centro, se resalta más el fundamental y, si se toca en el extremo, con la uña, se resaltan más los modos más agudos y el sonido parece "más metálico" o más brillante.

La cuerda vibra, pero eso sólo no alcanza para producir sonido. El inconveniente es que se mueve una cantidad muy pequeña de aire junto con la cuerda, entonces, las variaciones de presión que llegan a nuestro oído son muy chicas y el sonido es muy débil.

Para aumentar la cantidad de aire que se mueve, todos los **cordófonos** tienen una *caja de resonancia*, o sea el cuerpo del instrumento que vibra junto con la cuerda. La caja es elástica y vibra también, empujada por la cuerda.



Figura 9

No vemos el movimiento de la caja porque se mueve menos que la cuerda pero, al tener mucha más superficie, mueve más aire y, así, se consigue que el instrumento tenga mayor sonido. La función principal de la caja es ésta: mover más aire y de esta manera aumentar el volumen sonoro del instrumento que, sin la caja sonaría muy poco. La caja no proporciona energía pero resuena empujada por la energía de vibración de la cuerda que transmite una fracción mayor de esa energía al aire.

Las vibraciones de la caja son todavía más complejas que las de la cuerda y, también,

afectan el timbre del instrumento y su sonoridad general. Los materiales que se usan, la flexibilidad de las maderas, el tiempo de estacionamiento y mil detalles de la construcción de la caja, importan mucho para la calidad del instrumento. Por eso el oficio de luthier es un arte donde la experiencia y la atención a los detalles son importantísimos.

Las formas que se les pueden dar a las cajas son muy grandes y van mucho más allá de la diferencia entre guitarras y violines.

Una cosa para observar es que los instrumentos más graves son siempre mayores, para que todo vibre más lento es conveniente hacerlo mayor...

12.2.1.3. Instrumentos de viento

Hay otra familia entera de instrumentos que usa un mecanismo distinto para sonar, porque lo que vibra es una columna de aire encerrada dentro de un tubo.

Una columna de aire tiene propiedades parecidas a las de un resorte, es elástica, como se puede ver si se empuja un inflador de bicicleta, tapando la salida del aire. El émbolo "rebota" un poco. Como el aire también tiene peso se porta un poco como el bloque con la gomita y también vibra como un oscilador armónico si encerramos el aire dentro de un tubo.

Otra manera de ver esto es pensar que le damos un empujón a una porción de aire dentro del tubo. Esto es como apretar el aire con mayor presión para que viaje dentro del tubo. Cuando llega a la punta del tubo, la presión varía, y hay una zona de baja presión que rebota para atrás, dentro del tubo, y una zona de alta presión que se desparrama, como una onda, para fuera del tubo. En el otro extremo del tubo, ocurre algo parecido pero, ahora, cuando llega la parte de baja presión. Rebota una parte de alta presión hacia atrás del tubo, y saldría una onda de baja presión al aire del recinto. Cada reflexión da una variación de presión, y es un poco más débil que la anterior, porque se pierde energía ya que cada vez hay menos presión dentro del tubo en cada rebote.

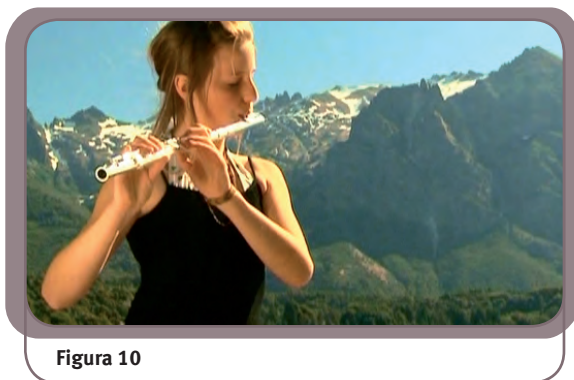


Figura 10

Como se pierde energía al bajar la presión en cada rebote, hay que darle energía al sistema, como se hace en una **flauta**, con el soplo del flautista. En una flauta dulce la embocadura produce un chorro de aire en forma de lámina que produce el primer aumento de presión. El rebote y la posterior bajada de presión modifican el chorro que se acopla a la variación de presión, con lo cual la presión se modula al mismo ritmo con que va y viene el aire en el tubo. Esta variación es muy rápida, la variación de presión del aire se mueve a la velocidad del sonido que vale 330 metros por segundo, aproximadamente. Entonces, en un tubo de algunos centímetros se producen variaciones de cientos de veces por segundo que nuestro oído interpreta como sonido. En las flautas travesas no hay boquilla, pero el flautista forma el chorro con sus labios, lo que se consigue con bastante tiempo de práctica. Lo mismo pasa con la quena, que no tiene boquilla.

Las maneras de vibrar de un tubo también son varias y se pueden sacar armónicos si se sopla más fuerte.

Se pueden usar tubos abiertos o cerrados, así tenemos instrumentos como el siku que usa tubos cerrados en una punta y las flautas que funcionan como tubos abiertos en los dos extremos. Se puede ver que los tubos más largos tienen un sonido más grave, lo cual es lógico si pensamos que en un tubo más largo el aire tarda más en ir y volver, por lo que ocurren menos variaciones de presión en un segundo por lo que la frecuencia es más baja. Por el contrario, tubos cortos dan frecuencias más largas. En un siku, simplemente, se usa un tubo cortado al largo adecuado para cada frecuencia, o sea para cada nota.

En una flauta o en una quena se agujerea el caño. Si el agujero está destapado es como si el caño fuera más corto y el sonido más agudo. Colocando los agujeros convenientemente, se puede conseguir afinar el instrumento.

Hay muchas maneras de mover el aire dentro del tubo, en la familia de las trompetas, (o del resto de esta familia de instrumentos, los **bronces**) los labios del trompetista son los que vibran y el tubo modifica el sonido. Si bien los detalles son, relativamente, complejos y se usan muchos armónicos del tubo para tocar, también se puede variar la longitud efectiva de la trompeta usando las llaves o pistones que tienen esta familia de instrumentos. Aquí también es muy evidente que los instrumentos agudos, como la trompeta, son más chicos que los instrumentos graves, como la tuba. Otra cosa que se observa es que no importa doblar el tubo, el sonido es siempre el mismo. Hay instrumentos de tubo recto, como el alpenhorn suizo, o el erke del norte argentino que funcionan en forma similar a las trompetas y son tubos rectos; lo que ocurre es que ocupan mucho espacio están bien para tocar en espacios abiertos pero son incómodos en el recinto cerrado de una orquesta.

Un detalle importante de los bronces es que se usan más los modos superiores del tubo, que el modo fundamental, la llamada *nota pedal* que, en la práctica, no se usa musicalmente. Los tubos son largos pero, al usar los armónicos superiores tocan notas más agudas que los que tocaría una flauta imaginaria de esa longitud.

12.2.1.4. Instrumentos de percusión

Al golpear un objeto, en general, este vibra y produce sonido cuando la vibración mueve el aire, esto pasa porque todo cuerpo sólido es elástico en alguna medida. Según sus propiedades elásticas y su forma va a vibrar de distinta manera. Eligiendo el material y la forma, también, se puede hacer que vibre una frecuencia determinada que es lo que se hace con el xilofón, por ejemplo.

Si el cuerpo es más complejo vibran muchas frecuencias a la vez cuando se lo golpea. Es lo que pasa en un platillo y en el parche tenso de un tambor. Suenan tantas frecuencias a la vez que no se percibe una nota musical sino un sonido complejo que se utiliza como elemento rítmico en la música. Hay variaciones y el parche se "afina" también en algunos tambores y en los timbales de

la orquesta. O en los tambores hindúes que tienen una afinación sofisticada. No dan una melodía en la forma en que nosotros estamos acostumbrados pero la riqueza de sonidos que producen es notable. Esto es un ejemplo más de que hay infinidad de maneras de hacer música en diferentes culturas y momentos de la historia, aparte de la gran cantidad de formas: clásicas, folklóricas, de rock o de tango que conviven en nuestra época y en nuestro pequeño rincón del planeta.

Y con esto volvemos a la pregunta inicial

¿Por qué nos gusta la música?

No creo que podamos resolver el fondo de esta pregunta subjetiva pero sabemos un poco más de que, mecanismos físicos, intervienen en cómo producimos los sonidos que oímos. Hasta aquí vimos que, en la música, intervienen la **frecuencia**, la **potencia** y los **armónicos** de los sonidos y, vimos también, un pantallazo de cómo se pueden producir estos sonidos en algunos instrumentos.

Con estos elementos se construye el mensaje musical, estos son los ladrillos con los que se construye el edificio de la música. Pero, cada instrumento, mezcla los elementos de diferente manera con lo que se enriquece el mensaje. Y, como en cada época o cultura, hay preferencias que, en general, van cambiando en el tiempo, los mismos instrumentos musicales evolucionan y cambian, aunque los elementos físicos, frecuencia, volumen y de composición en armónicos (en el lenguaje de los físicos) o altura, intensidad y timbre (en el lenguaje de los músicos) siempre están presentes y son los mismos, aunque cambien las maneras en que se combinan o se expresan en cada instrumento.

Por eso, la historia no termina aquí. Los instrumentos de la orquesta tienen muchos años de historia (siglos incluso), y han ido perfeccionándose todo el tiempo. Pero, siempre surgen instrumentos nuevos, para nuevos tipos de música. El ejemplo más difundido es seguramente la guitarra eléctrica del rock. La moda o el gusto de la gente juegan su papel también, ya que algu-

nos instrumentos antiguos pueden sonar tan bien como los modernos y se siguen usando pero, en general, restringidos a grupos de entusiastas a los que les gusta cómo suenan y no siguen la moda. Un ejemplo de esto podría ser el laúd, un instrumento de sonido hermoso, pero con poco volumen (tal vez por eso dejó de ser importante después del Barroco).

Hay muchas formas de construir instrumentos y lo único seguro es que se van a seguir inventando formas nuevas, ya



Figura 11

sea, como evolución de las actuales o usando técnicas y formas nuevas, como las eléctricas/ electrónicas que brinda la tecnología actual.

12.3. Entornos Invisibles de la Ciencia y la Tecnología - Sala de Conciertos

En el presente apartado, además de la práctica de la guía donde se sugieren actividades experimentales, se adjunta teoría en donde se complementa con más de detalle los conceptos mostrados en el video.

12.3.1. Actividades

Advertencia: es fundamental ensayar las experiencias antes de llevarlas al aula para limar asperezas y adquirir práctica. En el texto se advierte acerca de algunos posibles problemas pero no se pueden detallar todas las dificultades de la vida real y **la experiencia previa con los experimentos es irremplazable.**

12.3.1.1. Medición de la velocidad del sonido

Concepto: el sonido tarda en propagarse, como ilustra el video en la escena en que Tomás está haciendo. La idea de esta experiencia es medir el tiempo de propagación del sonido en una distancia conocida y así calcular su velocidad.



Figura 12

Elementos necesarios:

1. Un cronómetro digital (no es necesario nada muy especial, muchos relojes pulsera digitales baratos tienen una función cronómetro que mide centésimas de segundo, y esta precisión sobra, como veremos).
2. Un espacio de por lo menos 30 m, tranquilo y libre de obstáculos (una cancha de fútbol sería ideal y si se pueden usar 100 metros o el largo total de la cancha, mejor).
3. Una soga de 10 a 20 m de largo, para medir distancia.
4. Un sistema para hacer ruido que se vea claramente. Dos maderas que se golpean entre sí funcionan muy bien. Opción para el que se anime: uno o varios petardos.

Tener en cuenta varios detalles importantes:

- A. Hay que largar el cronómetro en el momento que vemos el choque y detenerlo en el momen-

to en que percibimos el sonido: La distancia se mide, previamente, con la soga a su vez ésta se ha medido anteriormente de alguna manera ya sea en la ferretería que la vendió o en el aula con un metro, regla o con cualquier otro elemento. Este es un pequeño problema de medición (o de calibración de nuestra `soga de medida`) que puede dar lugar a una discusión sobre patrones de medida, etc. No es necesaria mucha precisión, porque la medida de tiempo tiene un error considerable.

- B. La velocidad del sonido es, simplemente, la distancia que medimos con la soga, dividido el tiempo que medimos en nuestro cronómetro.**

Lo que se hace es medir una distancia conocida y poner a una persona con las dos maderas a una distancia de 30 m (ó 100 m o cualquier distancia intermedia), y pedirle que las haga chocar en alguna posición donde veamos el momento del choque (si mueve los brazos rígidamente sobre su cabeza con una madera en cada mano para hacerlas chocar se ve muy bien desde lejos).

¿Cuál es la razón de la diferencia de los tiempos medidos?

El problema es el tiempo de reacción de nuestros movimientos corporales. El tiempo de reacción típico es de unos 0,20 segundos, un poco mayor que el que queremos medir. En realidad, si nos atrasamos exactamente lo mismo al largar y detener el cronómetro, el retraso no importa, porque lo que nos atrasamos al arrancar lo compensamos al detener el reloj, pero el tiempo de reacción es variable también.

Esto nos lleva a otro sub-experimento, el de medir tiempos de reacción. No es estrictamente sobre física del sonido, pero es un tema interesante en sí. Además, sirve para una discusión de utilidad para la vida cotidiana.

¿Cómo medir el tiempo de reacción?

Se puede usar el mismo cronómetro que usamos antes. Y la medida es simplemente largar el cronómetro y detenerlo en el momento que cambia el número de los segundos. Es decir, largar el cronómetro y cuando veo que el número 1 de los segundos pasa al 2, detengo el cronómetro. Luego miro cuántas centésimas de segundo se pasó el cronómetro del tiempo en que quise detenerlo. Veremos que al repetir esto muchas veces se observa que la cantidad fluctúa bastante entre cada medida. (En mi caso alrededor de 25 centésimas de segundo, 20, 35, 40, etc.). Hay que tener en cuenta que se `entrena` uno mismo y que se va mejorando (es decir, acortando el tiempo de respuesta al acostumbrarnos). Por eso, en la medición de velocidad del sonido también hay que repetir varias veces hasta entrenarse un poco.

Lo más difícil es la medición del tiempo. Es un tiempo muy corto. Como el sonido recorre unos 300 m por segundo, tarda 0.1 s en recorrer los 30 m que sugerimos como mínimo. Es muy difícil parar y arrancar el cronómetro, hay que estar atento y reaccionar rápido. También vamos a observar que si repetimos la medición muchas veces, los números variarán bastante. Una manera en que el autor hizo este experimento fue con un grupo de alumnos que les pidió que midieran todos los que poseían un cronómetro en su reloj pulsera, mientras otro del grupo hacía sonar las maderas. Luego, se promediaron los tiempos y se obtuvo un valor más exacto.

Pero existe una variante de baja tecnología que también nos permite medir el tiempo de reacción y que usa otro concepto, el de movimiento uniformemente acelerado y la aceleración de la gravedad que también se podría aprovechar para repasar.

La distancia d recorrida por un cuerpo uniformemente acelerado (que parte del reposo) es:

$$d = \frac{1}{2} at^2$$

donde a es la aceleración y t es el tiempo.

Un cuerpo en caída libre se mueve con movimiento uniformemente acelerado y la aceleración es la de la gravedad que vale 980 cm/s^2 .

Por lo tanto, en la primera décima de segundo recorre:

$$d = 0,5 \times 980 \text{ cm/s}^2 \times 0,12 \text{ s}^2 = 4,9 \text{ cm}$$

Advertencia: el movimiento no es lineal, en dos décimas de segundo se recorren 19,6 cm.

Entonces, para hacer un `reaccionómetro` podemos usar un listón de madera, de un par de centímetros de ancho, espesor cualquiera y unos 30 a 45 cm de longitud en donde marcamos distancias correspondientes a diferentes tiempos.

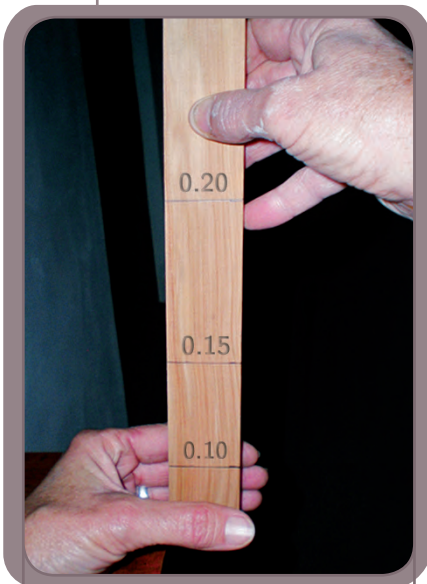


Figura 13. `Reaccionómetro` y modo de uso. Una persona se prepara para atrapar la tabla (con la mano apoyada en una mesa que fija su posición) y otra la deja caer sin previo aviso. Notar las marcas de tiempo

A continuación se incorpora una tabla cada 5 centésimas de segundo:

DISTANCIA (CM)	TIEMPO (S)
1,2	0,05
4,9	0,10
11,0	0,15
19,6	0,20
30,6	0,25
44,1	0,30

El experimento requiere de dos personas: Una larga el listón de madera, sin aviso previo, y la otra tiene que detenerlo. La persona que `ataja` debe colocar el ante-

brazo sobre una mesa, abrir el pulgar y el índice lo justo para que la madera pase por el medio; y se larga el listón de manera que el `origen de coordenadas`, es decir, la punta del listón desde la cual marcamos las distancias, queda al ras del dedo. El atajador cierra los dedos en cuanto percibe que la madera se mueve y observa, simplemente, en cuál marca detuvo el movimiento. Se puede interpolar entre marcas, o marcar más puntos en el listón (cada centésima para una mejor precisión).

Este experimento sencillo, es tal vez más gráfico y didáctico que el de medir con el reloj. Veremos que sólo, por casualidad, se detiene la varilla antes de los 5 cm que corresponden a una décima de segundo.

Posibles reflexiones para la vida cotidiana:

Un auto a 100 km/h recorre 27,7 metros en un segundo ($100\text{km/h} = 27,7 \text{ m/7 s}$). El tiempo de tomar una decisión es bastante mayor que el de los reflejos como los que medimos y está entre 5 y 10 veces, es decir, hasta decidir frenar, se tarda entre medio y un segundo, así que un auto a 100 km/h recorre entre 15 a 30 metros (cerca un cuarto de cuadra) antes de que apretemos el freno. A esto hay que sumarle más de 30 metros de frenada hasta detenerse; por eso, se necesita tener por lo menos 60 metros de visibilidad si queremos estar seguros de poder frenar ante un obstáculo.

Se puede reflexionar también sobre los tiempos involucrados en los deportes. Por ejemplo, ver cuánto tiempo tiene un jugador de tenis para pegarle a la pelota, cuánto en el fútbol, ya sea para atajar un penal o para calcular dónde buscar una pelota larga, etc.

Un dato de nuestro funcionamiento fisiológico que tiene que ver con esto: el tiempo de disparo de nuestras neuronas es de algunas milésimas de segundo. Si una tarea como cerrar los dedos lleva 2 centésimas de segundo, es decir, 20 milésimas de segundo, se habrán disparado entre 10 y 20 neuronas para realizar el acto de registrar el movimiento, y cerrar los dedos. Es importante el hecho de que la decisión ya está `tomada` no hay que pensar, es más, estamos a la espera del suceso y sabemos de antemano qué vamos a hacer. Por eso frenar un auto lleva más tiempo, si el obstáculo aparece de sorpresa.

Se ve que la mayoría de los movimientos deben ser `pre-programados`, por tal motivo hay que entrenarse en el deporte. El tiempo no alcanza para pensar cada movimiento por separado.

Buscar las velocidades típicas de pelotas de tenis y fútbol en alguna parte o directamente tratar de medirlas.



12.3.1.2. Errores y tratamiento estadístico

Estas reflexiones valen para todos los experimentos propuestos y son parte importante de cualquier medición en Ciencias Naturales.

La precisión absoluta es imposible. Por eso cualquier cantidad de medida tiene asociado un error de observación. Lo mejor que podemos hacer es apreciar cuánto vale ese error, o imprecisión de la medida y tenerlo en cuenta a la hora de tomar decisiones o hacer teorías sobre los datos adquiridos.

Por eso, se podría decir que la física (y esto vale también para otras ciencias) no es una ciencia exacta, sino aproximada.

En nuestro ejemplo, sabemos que nuestros reflejos limitan la precisión.

Una solución práctica para mejorar esta precisión es medir muchas veces y sacar promedio. La idea es que, algunas veces, se mide de más, otras, de menos y al promediar se compensan estos errores. Ya que lo que se hace es sumar todas las medidas y dividir por el número de mediciones, una medida `corta` sumada a una `larga` da un resultado más cercano al `verdadero`. Y podemos arreglarnos sin saber cuál es el resultado `verdadero`, lo que tenemos es lo mejor que se puede conseguir y nos conformamos con eso, o buscamos un método mejor (en

el caso de velocidad del sonido, hay métodos mejores, pero más difíciles y caros).

Pero podemos hacer más.

Es importante evaluar el error del método. No vamos a entrar en una discusión detallada del cálculo de errores experimentales que excede el alcance de estos experimentos simples, sino hacer un análisis simplificado que permite acotar el error.

En realidad, lo que podemos hacer es estudiar los casos más desfavorables y considerar que nuestro valor está entre estos dos números.

Si de la lista de valores de tiempo que medimos y luego promediamos, tomamos el valor más chico y usamos ese único valor para calcular la velocidad, tendremos un valor máximo de nuestra medición para la velocidad del sonido. Lo mismo si tomamos el valor máximo del tiempo, ése nos va a dar el mínimo de la velocidad del sonido (recordar que el tiempo va dividiendo, por lo tanto, dividir por algo mayor achica el resultado). Entre estos dos valores estaría la velocidad del sonido.

Nota 1: si se desea comparar con la velocidad medida por otros, el valor aceptado de la velocidad del sonido es (en metros por segundo) $331 + 0,6 \times \text{temperatura ambiente en grados celsius}$. Es decir, 343 metros por segundo a 20 grados. La precisión de nuestro método no alcanza para medir la variación con temperatura, así que no hay que preocuparse mucho por la temperatura exacta.

No conviene, tampoco, desanimarse si nuestro promedio está un poco lejos de este valor `aceptado`. Es más importante que los dos valores extremos cubran el intervalo, es decir, que nuestro valor máximo sea mayor que 343 y el mínimo sea menor que 343. Hay que tener cuidado de no `encandilarse` con el valor aceptado. Si imaginamos que ésta es la primera vez que se mide la cantidad en cuestión, podemos ver la importancia de un primer número aproximado, aunque, luego, se pueda mejorar la precisión.

Nota 2: aquí no consideramos el error al medir la distancia, porque lo consideramos mucho menor que el del tiempo. Para incorporarlo se puede estimar, a ojo, una distancia mínima y una máxima, digamos que 10 cm en los 30 metros y repetir el cálculo de velocidad tomando la máxima distancia dividido el mínimo tiempo (esto da la cota superior) y la mínima distancia dividido en el máximo tiempo (cota inferior). Estos son, siempre, sobre estimaciones del error, la estadística nos permite acotar mejor el error, pero no vamos a entrar en eso aquí.

Nota 3: es posible que aparezcan valores `extremos`, tales como alguien que se distrajo y midió el triple de tiempo que el promedio o un tercio. Es permisible desechar algunos de estos valores extremos. Esta decisión es difícil, porque no hay un criterio estricto y automático. Hay que recurrir al sentido común y a otros datos, por ejemplo si el propio operador del cronómetro duda de esta medida en particular. También hay métodos de análisis estadísticos pero, en este tema, subsiste un poco de subjetividad siempre. Suerte, y tengan cuidado.

12.3.2. Ondas

Concepto: longitud de onda y movimiento ondulatorio, relación entre frecuencia, velocidad del sonido y longitud de onda.

En el video se explica que el sonido viaja en forma de onda, en esta sección proponemos algunas maneras de visualizar ondas y ampliamos un poco el concepto:

a) Visualización de onda con un grupo de personas:

Elementos necesarios:

- 1) grupo de entre 10 y 30 personas y,
- 2) un espacio para que entren todas en fila.

Una forma de generar una ola es hacer una fila, unos al lado de otros, con un brazo estirado horizontalmente hacia delante. **La persona de una de las puntas mueve lentamente el brazo hacia arriba y abajo y, la siguiente persona, copia el movimiento** cuando ve que el brazo del primero se levanta, la siguiente hace lo propio respecto al segundo, etc. Es una copia de la `ola` que se hace a veces en los estadios.

Otra manera de generar una onda es poner a las personas en fila, pero uno atrás de otro, a una distancia un poco menor que la longitud de un brazo. El último de la fila empuja suavemente al de adelante, y éste al que está adelante suyo, así sucesivamente. Aquí, también, se propaga una onda, pero ahora el movimiento de las personas es paralelo a la dirección de propagación. Si el empujón es suave, no deberían mover los pies ni tampoco debería haber movimientos en las personas, sin embargo, esta onda llamada ahora longitudinal, viaja también.

El sonido en el aire es una onda longitudinal y su propagación es muy parecida a la onda generada en este último ejemplo. Las moléculas de aire se empujan unas a otras en forma similar a lo que hace nuestra fila de gente que se empuja. Incluso hay una tendencia a volver al equilibrio, después que pasó la onda, igual que en la fila.

Hacer notar dos cosas:

- 1) Las personas no cambian de lugar, sin embargo, el movimiento de la onda es claramente perceptible.
- 2) Los brazos se mueven perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Esto se llama una onda transversal.



b) Longitud de onda, velocidad y frecuencia:

Concepto: relación entre longitud de onda, velocidad de propagación y frecuencia.

En el ejemplo anterior, la onda se propaga con velocidad muy variable, según la velocidad de respuesta de cada persona al mover el brazo o empujar.

Una diferencia muy grande con el sonido es que la velocidad del sonido es *fija* y, para el aire a temperatura ambiente, es de unos 340 m/s como ya medimos antes. En aire el sonido se

En el Apéndice I, damos una tabla con las frecuencias de las notas musicales que se usan en nuestra música occidental y sus correspondientes *longitudes de onda*. La longitud de onda es, ligeramente, variable con la temperatura (porque es variable la velocidad del sonido) pero, para cada nota musical, la frecuencia es la que figura en la tabla por definición. **Nuestro oído es sensible a la frecuencia**, no a la longitud de onda. Aunque existe una arbitrariedad a la hora de definir la escala musical y de hecho se pueden usar otras escalas. La que se presenta en el apéndice es la llamada *“bien temperada”*, usando el LA 440 como patrón. En el libro *La física de los instrumentos musicales*, indicado en la bibliografía, hay una breve discusión sobre las escalas musicales.

propaga como una onda longitudinal. En un medio sólido, como la madera de una guitarra, se pueden propagar ondas transversales. Para que se propague una onda transversal es necesario que el medio tenga la rigidez (relativa, porque *tiene* que haber una cierta elasticidad) de un sólido; las ondas transversales no se propagan en líquidos y gases. En la corteza terrestre, que es sólida, se propagan los dos tipos de onda. Esto es importante en los terremotos ya que las dos ondas tienen diferente velocidad de propagación y, por eso, en puntos lejanos se suelen percibir dos temblores, el primero cuando llegan las ondas longitudinales, las más rápidas y, el segundo, cuando llegan las transversales, más lentas.

Pero volvamos al sonido en aire.

Imaginemos una perturbación periódica en un punto que se propaga por el aire en forma de onda. Por ejemplo, la nota de una flauta que viaja por el aire. Supongamos que la nota es un Do 5 que es la nota

que suena en una flauta dulce al tapar todos los agujeros. La frecuencia con que vibra esta nota es de 523,25 ciclos por segundo (o Hertz), es decir, el aire dentro de la flauta se comprime y descomprime 523,25 veces por segundo. Cada vibración dura entonces $1/523,25$ segundos = 0,00191 s, es decir, muy cerca de 2 milisegundos. En el tiempo de una vibración, la onda recorre una distancia igual a la velocidad por el tiempo que tarda la vibración, en este caso:

$$\text{Distancia} = 340 \text{ m/s} \times 0,00191 \text{ s} = 0,649 \text{ m} = 64,9 \text{ cm}$$

Esta distancia se llama la *longitud de onda*, de esta onda particular. Y más adelante veremos que tiene importancia al diseñar instrumentos de viento.

La longitud de onda se puede visualizar en las ondas que se forman al tirar una piedra en un estanque quieto. La distancia entre dos valles, o entre dos crestas de la ola, es la longitud de onda asociada. En este caso tenemos dos ventajas a la hora de percibir la longitud de onda, la velocidad es baja y la onda se ve, lo cual no ocurre con el sonido. Sin embargo, el oído sí percibe las ondas para determinar la nota musical que es **la frecuencia** (asociada a una longitud de onda) lo que **determina la nota musical que percibimos**.

12.3.3. Frecuencia del sonido

Concepto: la frecuencia del sonido determina la nota musical que oímos.

La primera característica del sonido que se discute en el video es la frecuencia.

a) Escuchar la escala de una flauta dulce

Elementos necesarios:

Flauta dulce.

La flauta dulce más común es de unos 30 cm de largo, está afinada en Do, de manera que, con todos los agujeros tapados suena un Do 5 que tiene una frecuencia de 523,25 Hz, (como vimos en los párrafos anteriores).

En la tabla de frecuencias del Apéndice I, se le asocia un número a cada nota, empezando por Do 0 y llegando hasta Do 8. Este número indica lo que los músicos llaman la **octava** (el nombre proviene del hecho de que hay 7 notas en la escala musical, y la **octava** nota repite el nombre de la nota en otra octava). Por ejemplo, si en nuestra flauta **vamos destapando los agujeros de a uno**, tenemos la nota Do 5 si están todos tapados, Re 5 si destapamos el primero, Mi 5 destapando también el segundo y, así, seguimos con el Fa 5, Sol 5, La 5, Si 5. **Veremos que cada nota suena más aguda que la anterior**. Y, cuando destapamos el último agujero (de arriba, el agujero del lado de abajo de la flauta lo dejamos tapado), llegamos a una nota más aguda, que es el Do 6.

¿Por qué llamamos otra vez Do (con otro número) a esta nota más aguda?

Es porque la notamos "similar" de alguna manera. Esto es un hecho subjetivo, sin embargo para la gente con entrenamiento musical le resulta muy natural. No está muy clara la razón última de por qué percibimos una semejanza.

Pero lo que sí está bien comprobado es que la frecuencia de una nota como el Do 6 es el doble que el de la misma nota en la "octava de abajo" en este caso el Do 5. Es decir, que la frecuencia del Do 6 es $2 \times 523,25 = 1.046.5$ Hz. Esto se puede observar en la tabla igual que el hecho de que, al cambiar la octava, la frecuencia se duplica, vale para todas las notas.

En la música barroca, cuando se empezó a usar, intensivamente, la escala bien temperada, era más común usar un La de 435 ó 430

Hz, un poco más grave que el actual. El aumento de frecuencia, al usar La 440, se traslada luego a todas las notas y resulta en un sonido más "brillante", en verdad más agudo.

Por ejemplo, tal como se dice en el video, **por convención se toma el La 4, de frecuencia 440 Hz como patrón para definir la escala.**

En la flauta no podemos escuchar este La, sin embargo, tenemos el de la octava siguiente, es decir el La 5. Que si se fijan en la tabla tiene una frecuencia de 880 Hz, es decir justo el doble que el La 4 de 440 Hz (llamado también La 440, por el valor de la frecuencia).



Sin embargo, se pueden tocar sin problema todas las piezas escritas en el barroco con nuestra escala actual.

Esto sucede así porque lo que nuestro oído reconoce con mayor facilidad es la relación entre frecuencias (o notas). Por eso una melodía tocada `traspuesta´ (como dicen los músicos), es decir, donde tocamos la misma relación de notas pero arrancando de una más aguda (o grave), suena igual, pero más aguda (o grave). En el canto ocurre igual. La misma canción es reconocible, ya sea que la cante un hombre de voz muy grave o una mujer de voz muy aguda. Reconocemos la diferencia de altura pero la canción es claramente la misma.

Por eso **lo importante es la relación entre frecuencias.**

Y una propiedad de la escala musical, presente en música occidental pero también en la de otras culturas, es que se prefieren (o suena más agradable) si hay una relación entre las frecuencias de las notas que suenan.

Ya vimos que una nota y otra `una octava más arriba´ están relacionadas porque la más aguda tiene el doble que la más grave (por ejemplo el La 440 y el La 880) pero también el Do de 523,25 de la flauta (tapando todos los agujeros) tiene un Do al doble de esta frecuencia, de 1046,5 Hz (destapando todos). Y así para todas las notas si subimos una octava, la frecuencia se duplica.

Hay otra relación entre frecuencias si hablamos de lo que en música se llama una `quinta´. Aquí contamos cinco notas a partir de la original. Por ejemplo, arrancamos del Do y contamos Do, Re, Mi, Fa, Sol. Son cinco notas, por eso el Sol es la quinta del Do. Si arrancamos en Re, la quinta es un La y así siguiendo, si queremos. La relación entre frecuencia de todas `las quintas´ que podemos formar es de 1,5. Esto quiere decir que la frecuencia del Sol es

una vez y media (1,5 veces) la frecuencia del Do (siempre dentro de la misma escala, se entiende). **Si subimos una quinta, la frecuencia es una vez y media mayor.**

Pasa algo similar con las `terceras´ (en este caso se cuentan tres notas y la tercera del Do es un Mi). Allí la relación de frecuencias es de 1,25 o, si se quiere, de 5/4. O sea que el Mi tiene una frecuencia 1,25 veces mayor y vibra uno y un cuarto (5/4) veces más rápido que el Do. **Si subimos una tercera, la frecuencia es una vez y cuarto mayor.**

Parece que por alguna razón (no del todo clara) de nuestro oído y nuestra psiquis, nos resulta más agradable escuchar sonidos que tengan estas relaciones, es decir, cuyas frecuencias sean fracciones simples (en los dos ejemplos anteriores la quinta tiene una relación de 3/2 (1,5) en frecuencia y la tercera 5/4 (1,25) con la nota de partida.

Un último detalle musical. Si suenan **juntas** tres notas con **frecuencias relacionadas por enteros pequeños**, como el Do, Mi, Sol de nuestro ejemplo (primera, tercera y quinta) **el sonido resulta más agradable** que si tomamos tres notas cualquiera. Esto los músicos lo llaman un **acorde**. Hay otro tipo de acordes, menores, mayores etc., pero eso se puede discutir en forma multidisciplinaria con el profesor de música y ver las relaciones de frecuencias apelando a la tabla adjunta.

Un detalle importante: en la escala bien temperada, los acordes no son exactos y, en realidad, si hacen la cuenta, la relación de frecuencias es de 1,498, suficientemente cerca de 1,5 como para que al oído no le importe.

- De manera que se sugiere **intentar ver si el Do 5 y el Do 6 nos suenan más parecidos**

entre sí que el Do 5 y el Si 5, por ejemplo.

- Otra prueba que se sugiere es tapar todos los agujeros y soplar más fuerte. Si se practica un poco se le puede sacar un sonido más agudo a la flauta. Esta nota, es de nuevo el Do 6, así, hemos llegado a la misma nota de otra manera.

Existe además una relación entre la longitud de onda de la nota producida y el largo de la flauta. Notar que la longitud de onda que figura en la tabla para el Do 5 es de 65,9 cm. Si medimos la distancia entre el agujero del silbato de la flauta y el extremo inferior del tubo, vemos que la distancia es, aproximadamente, la mitad de esta longitud de onda. Es decir que, dentro del tubo de la flauta, `cabe justo` media longitud de onda. Por ahora no discutimos más este fenómeno, lo trataremos al hablar de construcción de instrumentos de viento.

La primera característica del sonido que se discute en el video es la frecuencia.

b) Comparación de notas en flauta y guitarra

Elementos necesarios:

- 1) Guitarra
- 2) una flauta (como la de la actividad anterior).

Las notas que toca la guitarra, sin pisar las cuerdas, es decir tocando `al aire` como suele decirse, son:

Mi 2 = 82 Hz 6ta. cuerda al aire (por convención se numera como `sexta` a la cuerda más grave)

La 2 = 110 Hz 5ta. al aire

Re 3 = 147 Hz 4ta. al aire

Sol 3 = 196 Hz 3ra. al aire

Si 3 = 247 Hz 2da. al aire

Mi 4 = 330 Hz 1ra. al aire (la más aguda o `primera` es la cuerda que queda abajo, en la posición normal de tocar la guitarra)

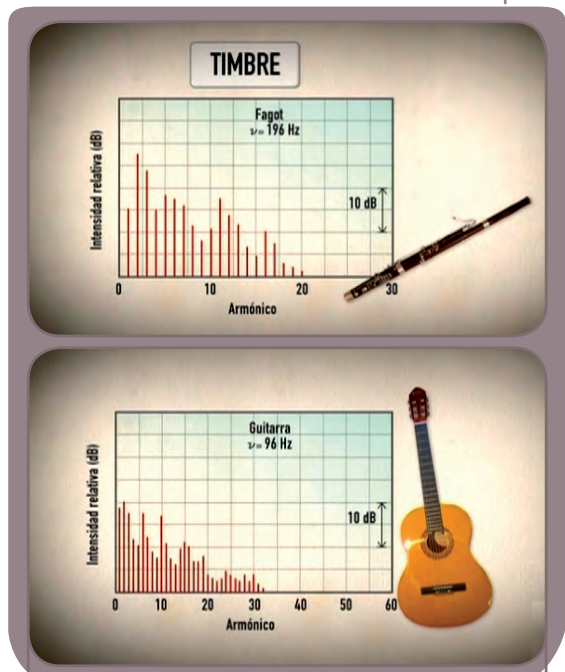


Figura 13

Si comparamos con la flauta vemos, que en general, **las frecuencias producidas por la guitarra son menores**, es decir, **la guitarra suena más grave que la flauta**. Se nota tanto en el valor numérico, que se ve en la tabla, como en el número de octava que les asignamos.

En la guitarra se aumenta la frecuencia al ir "pisando" la cuerda con el dedo. Si apoyamos el dedo en la primera división (estos se llaman los "trastes" de la guitarra), nos movemos un semitono. Es decir, eligiendo **la cuerda más aguda, la primera**, (por convención, también, la cuerda más aguda es llamada "prima" o primera) al pisar la cuerda en el primer traste, pasamos de Mi 4 (al aire) a Fa 4 (pisando). En el siguiente traste, el segundo, se escucha Fa #, es decir "Fa sostenido". Si haciendo esta cuenta (guiados por la tablita) seguimos hasta el traste **quinto, debe sonar el La 440 o La 4**.

Verificar esto escuchando ambos sonidos.

Se puede comparar esta nota con el tono de un teléfono fijo, **deberían ser iguales**, ya que el tono de teléfono libre se suele poner en 440 ciclos por segundo.

Es posible "afinar" la cuerda si está fuera de este tono. Si nos parece que la cuerda está sonando demasiado grave se puede subir la nota (asociada a la frecuencia de vibración) estirando la cuerda con la clavija y, si está sonando demasiado agudo, hay que aflojar la clavija para que el sonido se haga más grave.

Una prueba que se sugiere es tocar el La de la flauta (de 880 Hz) y compararlo con el La 440 que suena en la guitarra, de nuevo hay una octava de diferencia.

Si se consiguen más flautas, se puede intentar hacer sonar acordes de tres notas separadas por terceras y quintas, comparando con tríos de notas sin esta relación. Ver si de verdad nos suenan mejor. Por supuesto, esto es subjetivo y, en parte, cultural. La música que oímos hace uso de estos acordes y, lógicamente, tenemos costumbre de oírlos, aunque no seamos músicos. También, es éste un tema para practicar lo multidisciplinario, y hablarlo con el profesor de música.

c) Mediciones de frecuencia usando una pc

Elementos necesarios:

- 1) Computadora personal (PC compatible en este caso)
- 2) Programa bajado de Internet. Existe un programa, llamado Visual Analyser², que se puede descargar gratuitamente del sitio: <http://www.sillanumsoft.org/>
- 3) Flauta, guitarra o algún otro instrumento musical.

El programa Visual Analyser permite visualizar ondas de sonido en la pantalla y medir su frecuencia y el espectro sonoro.

Veamos **primero la medición de frecuencia**: una vez cargado e iniciado el programa, es necesario seleccionar la entrada de micrófono (en las pestañas que aparecen en el borde superior está en una pequeña ventana desplegable) y, luego, hacer clic en la pestaña "Freq. Meter" la cuarta desde la izquierda. La primera pestaña a la izquierda es un interruptor que activa la captura de sonidos, si dice ON es que está en OFF (y viceversa) esta convención un poco



²Ha sido desarrollado por Alfredo Accattatis, de Italia, y es software completamente libre, ofrecido a través de la Universidad Tor Vergata, de Roma.

extraña indica lo que va a hacer si uno lo aprieta, no lo que está haciendo en el momento.

El programa corre en una Computadora Personal (PC) y sólo necesita un micrófono del tipo que se venden para PC.

Sugerimos esta actividad como complemento, porque permite que hagamos nuestras propias mediciones de los valores de la frecuencia. Tiene el inconveniente de que hay que dedicarse a entender y manejar el programa. Para esto es preferible tener alguna experiencia en el manejo de osciloscopios, aunque no es imprescindible. Daremos sólo una somera descripción de los pasos a seguir para manejar el programa, dejando al lector/experimentador la tarea de explorar los detalles de este aparato virtual.

Cuidado, no es esperable una precisión de más de un hertz, lo cual permite una comparación no muy exacta con la tabla de notas y frecuencias (Apéndice I), pero se aprecia, que la frecuencia sube con las notas (la frecuencia de una quinta es aproximadamente 1,5 veces la de la nota de partida, etc.).

Si tuvo suerte, aparece una ventana, bastante grande, donde hay un número que fluctúa. Ésa es la medición de frecuencia, en Hertz. A la izquierda hay una serie de puntos que indican la precisión de la medida. El valor predeterminado es 10 Hz, demasiado poco para nuestro uso, se sugiere usar 0,61 Hz (el quinto empezando desde arriba) o 1,25 Hz, (el cuarto). Cuanta más precisión más hay que mantener la nota durante más tiempo para una buena medida, así que se sugiere experimentar un poco.

Se recomienda repetir varias veces las pruebas anteriores anotando los valores de frecuencia medidos.

El autor ha probado medir con este método dos flautas dulces, de las económicas, de plástico. Se muestran los resultados en la tabla inferior: una de las flautas es marca Yamaha, la otra Melos. Se ve que la Melos suena un poco más aguda pero, más o menos se conserva esta diferencia en todo el rango. La precisión no es muy alta, en general, redondeé al primer número entero. Esta es la precisión esperable aunque, tal vez, con cuidado y un mejor flautista se consiga mejor precisión. El micrófono usado, tampoco era de lo mejor.

NOTA	FRECUENCIA DE TABLA	FLAUTA YAMAHA	FLAUTA MELOS
Do 5	523,25	525,6	535
Re 5	587,33	581	595
Mi 5	659,26	654	665
Fa 5	698,46	695	708
Sol 5	783,99	782	798
La 5	880	893	888
Si 5	987,77	995	1008
Do 6	1046,5	1092	1106

Una cosa para observar en el Visual Analyser es, además de la frecuencia, la forma de onda. Observen la ventana superior de la pantalla y, allí, se va a ver la forma de la onda. De acuerdo a la forma de soplar se observa que puede cambiar bastante y se puede jugar con eso. La forma que se ve es un gráfico de las variaciones de presión captadas por el micrófono, en función del tiempo, para tiempos muy cortos. Se puede ajustar el tiempo del eje horizontal, usando los controles de la pantalla, es preferible que esto lo haga por prueba y error el lector, ya que una explicación detallada sería larga y mucho menos eficaz.

Se puede probar usar la voz, y ‘cantar’ alguna nota para ver tanto la frecuencia como la forma de la onda.

Este medidor de frecuencia no es tan útil para un instrumento como la guitarra ya que necesita notas sostenidas durante mucho tiempo, como la flauta. Pero el programa sirve para ver la forma de onda. Algunos instrumentos electrónicos para afinar la guitarra pueden dar el número de la frecuencia y si se puede conseguir uno de esos aparatos se pueden hacer mediciones.

Notar que hay un botón que dice 'capture waveform' que permite guardar la forma de onda, congelar la pantalla.

12.3.4. Timbre de los sonidos

Elementos necesarios:

- 1) guitarra
- 2) flauta

Concepto: aunque suene la misma nota, los sonidos pueden sonar diferentes, de acuerdo a lo que se llama el timbre del sonido.

Tocar la misma nota en flauta y en guitarra.

Esto se puede hacer pisando la primera cuerda en el octavo traste que debería ser, según nuestra tablita y, si la guitarra está bien afinada, un Do 5. En la flauta el Do 5 corresponde tener todos los agujeros tapados.

Tratar de oír la semejanza de ambos sonidos (la misma nota) y corregir la afinación si no llegaron a sonar igual. Pedir ayuda a alguien con buen oído para esto, si es necesario...

Pero también se puede ver que si bien la nota es la misma, los instrumentos son, claramente, diferenciables. Por un lado la flauta puede sostener el sonido durante más tiempo y en forma más pareja.

Pero, además, los sonidos son, claramente, diferentes, aunque con algo en común, la nota fundamental.

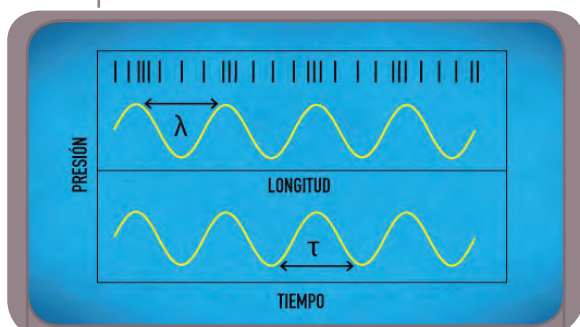


Figura 14. Variación de presión en función del tiempo en un punto del espacio, (o equivalentemente en función de la distancia en un instante de tiempo fijo). En el gráfico, en función del tiempo, marcamos el período τ , inversamente proporcional a la frecuencia $f = 1/\tau$. Para la onda, en función de la distancia, se indica la longitud de onda λ . Las líneas de la parte superior son un esbozo, más pictórico, de la densidad del aire, empujado de un lado al otro. Cuanto más apretadas representan mayor densidad

Lo que está cambiando no es la nota fundamental, sino otras que la acompañan. Estos son los llamados armónicos del sonido y a continuación va una explicación del timbre y los armónicos.

La diferencia de timbre entre dos instrumentos es lo que hace que percibamos como distinto su sonido o la voz de diferentes personas, aunque estén diciendo la misma cosa o tocando la misma melodía.

La diferencia de **timbre** percibida tiene que ver con dos cosas diferentes: por un lado el timbre depende del conjunto de frecuencias llamado el **espectro de Fourier** que acompañan la nota principal; por otro, depende de cómo evoluciona el volumen de cada nota en el tiempo.

En los llamados tonos puros la variación de presión es de forma sinusoidal, como se ve en la figura 14.

El tono del teléfono, que mencionamos antes, se parece, un poco, a este sonido puro. No suena muy interesante. Recordemos que es una variación periódica y se repite 440 veces por segundo.

En música se usan sonidos un poco más complejos que la sinusoides (figura 14), la forma de las variaciones de presión puede ser distinta, por ejemplo como la figura 3, parte inferior.

Esta forma triangular, o de diente de sierra, también se repite o sea que es periódica, siendo igual a sí misma después de un tiempo τ . A este período τ , le corresponde una frecuencia $f = 1/\tau$.

El análogo de cada color del arco iris sería cada sinusoides pura.

Éstas, a veces, se llaman los armónicos presentes en una onda. Veamos en más detalle el caso de la figura 15.

En este ejemplo, la construcción de una onda tipo diente de sierra, veamos qué es lo que pasa si sumamos tres sinusoides de la siguiente manera:

Una onda de amplitud 1 y frecuencia $f = 1/\tau$ igual al período del diente de sierra, más otra con menor amplitud, en este caso multiplicamos la amplitud por 0,33333 y le damos a la onda una frecuencia dos veces mayor, o sea $2f$. A ésta le sumamos otra sinusoides más, pero multiplicada su amplitud por $1/5$ y con frecuencia $3f$, o sea, 3 veces mayor que la original. De manera que, en total, tenemos tres ondas sumadas, con diferentes amplitudes y frecuencias.

El resultado de la suma se muestra, también, en la figura 15. Vemos que la nueva onda muestra algunas ondulaciones que corresponden a las frecuencias más altas pero, también, se va pareciendo más a la diente de sierra que a la sinusoides de frecuencia f .

Lo interesante es que **se puede construir la forma de la onda (y cualquier otra) sumando sinusoides** como las de la figura 3. Esto lo descubrió un matemático francés del siglo XIX, llamado Jean Baptiste **Fourier**.

El nombre **espectro de Fourier**, no tiene nada que ver con el fantasma de Jean Baptiste. Viene de la óptica, por semejanza con la luz blanca, que puede ser separada, en un **espectro** de colores puros mediante un prisma.

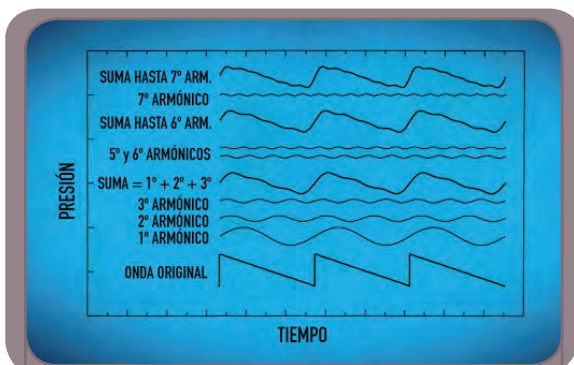


Figura 15. Superposición de sinusoides que aproximan una onda tipo diente de sierra. En general, las ondas de mayor frecuencia tienen menos amplitud, pero esto no es cierto en cualquier función arbitraria

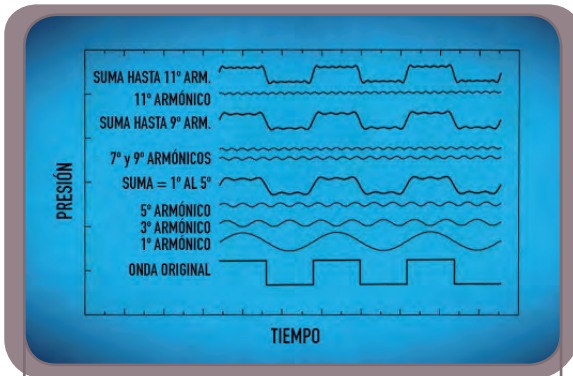


Figura 16. Superposición de sinusoides que aproximan una onda cuadrada. Nótese que sólo se usan múltiplos impares de la fundamental, por la simetría de la onda original

de forma casi “cuadrada” por sinusoides. Aquí, también, se superponen ondas del doble, triple, cuádruple..., de la frecuencia original, como hicimos antes, pero hay que usar diferentes amplitudes que las usadas para la “diente de sierra”.

Cualquier forma de onda se puede fabricar sumando sinusoides puras. Lo único que hace falta es elegir bien las amplitudes respectivas para la onda de frecuencia doble, triple, etc. En el ejemplo de la onda cuadrada las amplitudes de los armónicos sucesivos son, 1, 0, 1/3, 0, 1/5, 0, 1/7, 0, 1/9, así consecutivamente. Notar que empezamos por el fundamental y no se suman, (o lo que

es lo mismo, se multiplican por cero), los armónicos con frecuencia doble, cuádruple, etc. debido a la forma particular de la onda cuadrada, (o la simetría de la onda diríamos, si usamos una expresión matemáticamente más precisa).

Para una forma de onda cualquiera existe una fórmula matemática que nos permite encontrar las amplitudes que la reproducen. No es el caso repetirla aquí, pero se puede encontrar en los libros de física o matemática más avanzada y, en la época de la computación, no es difícil evaluarla numéricamente.

Pero ¿qué tiene que ver esto con la percepción del timbre?

Lo que ocurre es que el oído tiene, en su estructura, una especie de analizador de Fourier, un sistema que permite indagar una onda complicada en sus componentes más simples.

El sistema que usa el oído es muy complejo. Tanto que todavía es tema de investigación. Se sabe que se realiza en la zona del oído interno, en la parte conocida como el *caracol* que, justamente, tiene dicha forma. En los primeros experimentos se estudiaba el caracol de animales muertos pero, hoy en día, es posible, con la electrónica miniaturizada, usar animales vivos sin destruir el oído, ni comprometer su vida.

Se encontró que hay una diferencia muy grande en la vibración del oído vivo o muerto, porque el mecanismo no es pasivo, hay dispositivos de realimentación que se usan para mejorar la sensibilidad del sistema, de descomponer frecuencias.

Y la cosa se parece más todavía, si seguimos sumando ondas de mayor frecuencia y de menor amplitud, como se muestra en la misma figura, en la parte superior, donde se ve el efecto de sumar otros dos términos, uno con frecuencia $4f$ y amplitud multiplicada por $1/7$ y otro de frecuencia $5f$ y amplitud multiplicada por $1/9$. Añadiendo un armónico más de frecuencia $6f$ y amplitud $1/11$, se tiene la última aproximación mostrada.

Este tipo de aproximación puede hacerse para otras formas de onda.

Por ejemplo, en la figura 16 se puede observar el resultado de aproximar una onda,

O sea que, lo que hace el oído cuando reconoce el timbre de un sonido, es analizar las amplitudes relativas de cada una de las componentes `simples` o sinusoidales, (los componentes armónicos), y comparar, mentalmente, cada sonido. Por supuesto que no somos conscientes del detalle. No decimos `acá la primera armónica vale tanto, la segunda tanto y, entonces, es un violín` sino que existe un proceso mental no consciente que integra toda esa información y pensamos `ese es un violín`, o `esa es la voz de Fito, esa es la de Charly`.

Una de las razones por las que se piensa que identificamos notas de diferentes octavas como `la misma` pero en otro tono es que, para el analizador de frecuencias del oído y el cerebro, resultan parecidos, porque se superponen sus armónicos o componentes de Fourier. En efecto, si una nota tiene el doble de frecuencia de otra, es más aguda, pero su frecuencia coincide con la del primer armónico de la nota más grave. El primer armónico de la nota aguda coincide con el cuarto armónico de la grave y, así, sucesivamente.

En general, la amplitud mayor corresponde al de la nota que reconocemos, el llamado tono fundamental y los armónicos superiores van teniendo amplitud cada vez menor, como en los ejemplos que mostramos. Hay excepciones y, por lo menos, un efecto un poco extraño. Ocurre que, a veces, el oído `agrega el fundamental` o sea `oímos` una nota que no existe. Esto pasa cuando hay una serie de armónicos de un fundamental que no está presente y, entonces, nuestro cerebro `reconstruye` una onda que nos suena como la correspondiente al fundamental.

Hay una segunda característica que fija el timbre que, también, tiene gran importancia. De alguna manera, percibimos el tiempo que tarda la nota en llegar a su máxima intensidad, cuánto tiempo se mantiene sonando más o menos pareja y, luego, cómo decae y vuelve el silencio. Tal vez la manera de imaginar esto más fácilmente sea pensar en el tañido de una campana. El sonido crece muy de golpe (casi parece que aparece de la nada) pero, luego, queda en el aire un tiempo muy largo y se apaga de manera muy paulatina. Con una flauta pasa algo totalmente distinto, el sonido se mantiene casi constante y desaparece de golpe.

Se suele llamar `ataque` al crecimiento inicial, `sostén` al período intermedio, y `decaimiento` a eso mismo. La flauta tiene un sostén largo porque el flautista le entrega energía al instrumento en forma continua. Mientras sopla, por supuesto. Cuando deja de soplar la energía se agota rápido. En cambio en la campana, se entrega energía de golpe y se va perdiendo de a poco, mientras se apaga el sonido. Representando gráficamente un sonido arbitrario, haría algo como se muestra en la figura 5 en forma simplificada.

Representando gráficamente un sonido arbitrario, haría algo como se muestra en la figura 17 en forma simplificada.

En algunos instrumentos se puede cambiar la forma de entregar energía y, eso, cambia el timbre. En el violín, lo normal es frotar la cuerda con el arco, como es bien sabido. En ese caso el sostén de la nota es largo porque el arco mantiene vibrando a la cuerda y se escucha el timbre normal del violín. Pero, también, a veces, la partitura requiere el `pizzicato`, que no es otra cosa que mover la cuerda con el dedo, como se hace en la guitarra. En este caso el sonido es bien distinto y suena

más como una guitarra, con poco y nada de sostén y un decaimiento más notorio.

Los intérpretes utilizan las posibilidades que brinda el poder cambiar de timbre según como se sopla, se frota o se pulse el instrumento. Y no es muy difícil oír el efecto uno mismo. Se puede hacer la prueba con una guitarra (charango, violín o el cordófono que tengan a mano). Basta con pulsar la cuerda con la yema del dedo o con la uña y se ve que el sonido es distinto. Todavía se ve mayor diferencia si se pulsa con la yema cerca del agujero que tiene la tapa de la guitarra y con la uña cerca de los extremos del hilo. Y hay una diferencia según el extremo que se elija, el del extremo del mango o el del "puente", en la tapa de la guitarra, aunque la diferencia, entre ellos, es un poco más sutil. Todo esto lo usan los guitarristas que tocan, a veces, con la uña, a veces con las yemas, para dar diferentes impresiones auditivas.

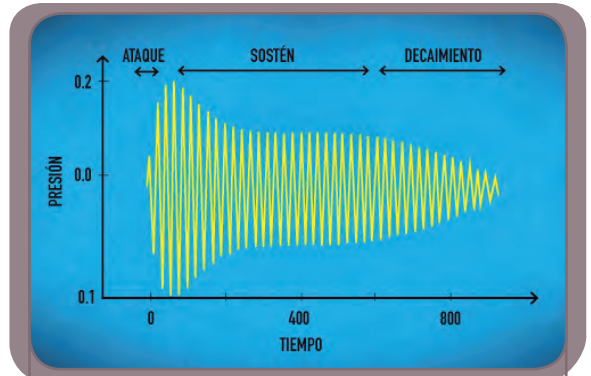


Figura 17. Una onda sonora más general. La nota la da la frecuencia (oscilaciones más rápidas) y el timbre lo forman la envolvente que crece, se sostiene y decrece, más la forma detallada de cada pico y valle (en este caso son sinusoidales, de manera que no hay más que un armónico)

Pero de todas maneras, aunque se toque en *pizzicato* en un violín, la misma nota que en una guitarra, los vamos a escuchar distintos. Esto es porque, en ambos instrumentos, se amplifican distintos armónicos o sea que es, ligeramente, distinta la suma de amplitudes que forman la nota. Y esta diferencia de "espectro de Fourier" la reconoce el oído. Las diferencias pueden ser sutiles y, por supuesto, cuánto más entrenemos el oído más se puede distinguir.

La diferencia de timbre entre el violín y la guitarra se debe a la construcción de ambos. La cuerda mueve la caja al sonar y su forma y propiedades elásticas de la misma son diferentes, por lo que amplifican, selectivamente, algunos armónicos.

Si se consigue un violín, cello o viola, se puede escuchar la diferencia de timbre y hacer el experimento de tocar la guitarra con el arco del violín. El instrumento no está construido para ser frotado con arco, por eso cuesta un poco encontrar la forma de frotar cómodamente, pero la guitarra suena.

12.3.4.1. Timbre usando el Visual Analyser

La **pantalla inferior** del Visual Analyser funciona como **anализador de Fourier** y puede ser usado para estudiar el timbre de los instrumentos.

Damos algunas sugerencias someras pero, seguramente, un experimentador interesado puede sacarle mucho más al aparato, analizando los instrumentos que tenga a mano, o su propia voz.

En sus opciones de inicio (default), la ventana inferior está en escala logarítmica. Conviene sacar eso, para mi gusto, lo cual se consigue haciendo click en el cuadradito tildado (a la derecha de la pantalla) que dice Log, para sacar el tilde. Hay un lugar para el eje vertical (Y) y otro para el horizontal.

¿Qué significan los ejes?

El horizontal está marcado en frecuencias, e indica justamente un valor de frecuencia detectado. El eje Y de alguna manera cuantifica la proporción de frecuencia en ese intervalo. Sería proporcional a la 'componente de Fourier' o a la composición armónica que se explicó en la sección anterior. Es proporcional a lo fuerte que suena el armónico presente en el sonido captado por el micrófono.

De manera que si el sonido detectado tiene una componente fuerte de un determinado armónico va a aparecer un pico en la frecuencia correspondiente. Un sonido 'puro', por ejemplo, sólo tiene una frecuencia. Y, por lo tanto, se vería un solo pico en la frecuencia en cuestión.

Si pusiéramos una onda tipo 'diente de sierra', como la que mencionamos anteriormente, se deberían ver picos con las relaciones que mencionamos, es decir, un pico para la frecuencia fundamental, un pico de una altura de valor

0.33 por la del fundamental, aproximadamente, y el doble de su frecuencia, uno del triple de frecuencia y 1/5 de la altura etc. Es decir, cada pico es proporcional al llamado coeficiente de Fourier (equivalente al peso relativo del armónico correspondiente).

La actividad propuesta es hacer sonar diferentes instrumentos y visualizar su espectro de Fourier.

Se recomienda ajustar los ejes (hay una función 'hold' que se obtiene haciendo click en una ventanita que, justamente dice, 'hold'. Lo que hace esto es ir acumulando los coeficientes que quedan en la pantalla aún después de que dejó de sonar la fuente de sonido. Para volver a cero hay que volver a hacer click.

El cuadradito que está abajo dice 'lines' debe estar marcado para que funcione el 'hold', cuidado.

¡Suerte con la exploración y que la disfruten!

12.3.4.2. Oscilador armónico

En el video se menciona y se muestra un oscilador armónico, vamos a proponer una versión muy sencilla y que sirve para ver esto cualitativamente.

Se trata de una goma y un peso pero, para que sea práctico, las proporciones deben ser un poco diferentes de las mostradas en el video, como se muestra en la foto de la figura 18.

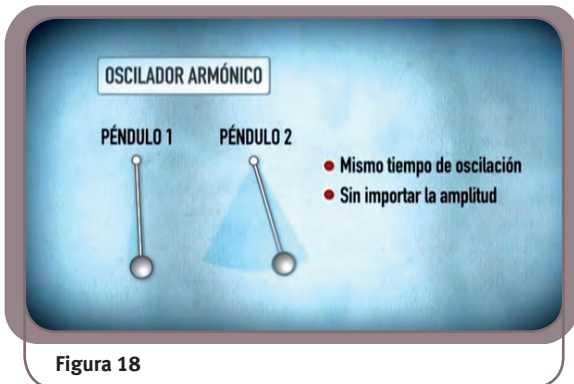


Figura 18

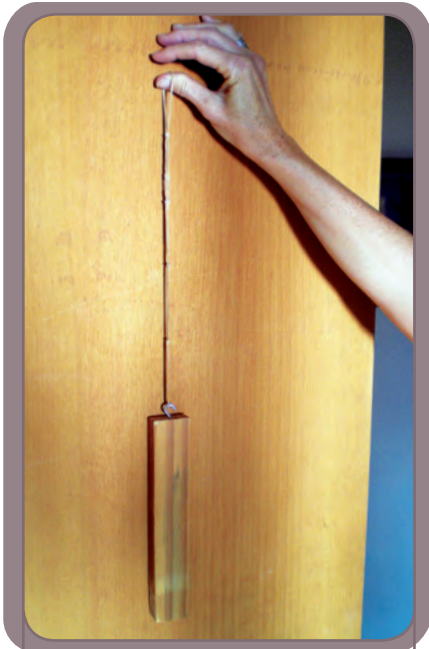


Figura 19. Masa y resorte. Se usan gomitas de las comunes, que se compran en librerías, y pedazos de madera que pueden tener casi cualquier forma

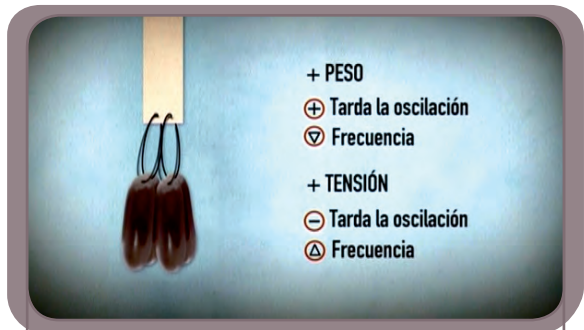


Figura 20



Figura 21

Debido a que la goma no es un resorte ideal (el desplazamiento no es muy lineal con la fuerza aplicada) este sistema no da para comparaciones muy cuantitativas, pero sirve para ver el comportamiento cualitativo.

Para operar el aparato se sube y se baja la mano que lo sostiene hasta que lo hacemos oscilar con una amplitud grande. Vemos que esto sucede si ajustamos la frecuencia del movimiento a la frecuencia propia del oscilador. Otra forma de ver una frecuencia propia es estirar el resorte con la otra mano y dejarlo oscilar solo, pero en este aparato casero se obtiene una oscilación que dura muy poco.

Para ver que la **frecuencia disminuye con la masa** se pueden adicionar más maderas. Tal vez haya que aumentar la masa más que el doble para que el cambio se perciba a simple vista, ya que la frecuencia disminuye según la raíz cuadrada de la masa.

Para ver que la frecuencia **aumenta con la fuerza** del resorte se pueden agregar gomitas `en paralelo` es decir una tira igual, al lado de la anterior. Con esto el resorte se refuerza y la frecuencia de vibración aumenta.

Otra prueba que se puede hacer es la de **percibir el fenómeno de resonancia**: intentemos mo-

ver la mano muy rápido, a frecuencia mucho mayor que la que observamos para el oscilador. Veremos que nuestra mano se mueve pero, la masa del oscilador, se mueve mucho menos que cuando sincronizamos nuestro movimiento con el del oscilador. Y lo mismo ocurre si movemos la mano muy despacio (en este caso es natural mover mucho la mano, hay que fijarse de moverla poco, lo mismo que antes cuando sincronizamos).

12.3.4.3. Cuerda vibrante

Una cuerda vibrante es un oscilador también. Es el elemento primordial que produce una vibración de frecuencia definida en todos los cordófonos o instrumentos de cuerda.

La cuerda puede vibrar de más de una forma, según la manera de pulsar la cuerda se resaltan más algunos armónicos. Tocando con la uña cerca de los extremos de la cuerda se excitan los armónicos superiores, tocando en el medio con la yema, se excita principalmente el fundamental. En el artículo adjunto se describe algo más de la física de cuerdas vibrantes y nos remitimos a él (ver nota de la revista *Desde la Patagonia, difundiendo saberes*, remitida en la bibliografía).

12.3.4.4. Caja de resonancia

La caja de resonancia es fundamental para transmitir la vibración de la cuerda. Para comprobar esto se puede hacer un experimento muy simple.

Elementos necesarios:

- 1) un listón de madera de unos 30 cm
- 2) un par de clavos de tamaño mediano
- 3) una bandeja de telgopor como se usan en envases de comida
- 4) algunas bandas elásticas de las comunes, usadas en oficinas o comercios para sujetar papeles, etc.

En la figura 22 se muestra la manera de estirar la gomita entre los clavos y cómo poner una sobre la bandeja de telgopor. Como una imagen vale más que mil palabras se estima innecesario dar más instrucciones, la imagen es auto-explicativa.

La idea es, simplemente, pulsar la gomita tensa igual que la cuerda de la guitarra. En la tabla con clavos, el sonido es muy débil, casi hay que poner el oído al lado para percibir algo.



Figura 22. Gomas tensadas en un soporte y en una bandeja de plástico (telgopor) de las que se usan en supermercados



Figura 23



Figura 24

En cambio, con la bandeja que hace de caja de resonancia, el sonido es bastante más fuerte; hasta perceptible a un metro, sin dificultad.

Si se tiene una mesa de madera adecuada se nota también que el sonido de la tabla apoyada en la mesa es más fuerte que con la tabla sujeta entre los dedos. Esto es similar al mecanismo del piano, donde se usa una tabla que está en contacto con el marco de metal donde están tensas las cuerdas, ésa es toda la caja de resonancia que necesita el piano.

Si la mesa absorbe mucho sonido, es posible que no se note gran diferencia al apoyar la madera con la gomita. Por eso, es mejor una tabla de madera que una superficie de aglomerado, por ejemplo.

12.4. Construcción de un cordófono sencillo con caja de resonancia hecha de lata



Figura 25. Vista superior del banjo latoso. Notar que los trastes están a distancias desiguales y que hay tres cuerdas que se sujetan en el borde inferior de la lata, sobre un clavo en U clavado en el mango. El puente es la madera que se ve en el centro de la tapa que está sujeto por la presión de las cuerdas

Si se dispone de tiempo, un poco de paciencia y ganas de experimentar, se puede construir un instrumento que sirva para ilustrar algunos conceptos, como caja de resonancia, largo de cuerdas necesario, etc.

No es para oídos exigentes, pero es divertido de construir y mostrar a los amigos.

Se presentan algunas fotos del instrumento y se dan algunos detalles de construcción pero, esto es sólo un ejemplo de lo que se puede hacer. Es bueno que cada uno use su criterio e imaginación y construya usando algunas de estas

ideas, pero se puedan variar muchas cosas y construir algo que suene. Podríamos bautizar nuestro instrumento como `banjo latoso` ya que es de lata y se parece un poco en la forma al banjo (figura 25). Se utiliza una lata de dulce de batata, porque sus dimensiones son adecuadas (con una lata de pintura de 5 litros, o de 10 litros, puesta a lo largo del mango también sonaría).

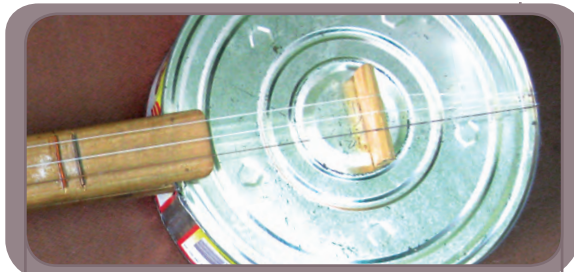


Figura 26. Vista del puente y las cuerdas

El largo de la cuerda, entre el puente y la cejuela superior, es de 50 cm. La cejuela es una pequeña pieza de madera, con ranuras para que pasen las cuerdas, en la parte superior del mango, donde está el clavijero.

El puente (figura 26) es una madera, también con ranuras, que apoya en la tapa, en este caso, sin cementar en la tapa, se mantiene por la tensión de las cuerdas.

La madera del mango es un listón de pino, de 79 cm de largo total, 5cm ancho, 2 cm de espesor. Sobre el mango va encolada la tastiera, es decir, el lugar donde se pegan los trastes que son los que determinan el largo de la cuerda al pisar con el dedo. La tastiera se compró en una casa de molduras, y es, en realidad, un contramarco que se vende para los bordes de puertas o ventanas. Tiene 40 cm de largo y el mismo ancho que el mango, 5 cm.



Figura 27. Vista inferior del instrumento. La lata no tiene fondo y se ve cómo el mango corre por toda la parte inferior del instrumento. Pasa a través de un agujero en el borde de la lata donde se recortó con un abrelatas. Se deja una pestaña que se dobla y sirve para sujetar el mango (notar las tres tachuelas que clavan la pestaña a la madera del mango)

El clavijero es uno viejo de guitarra y sólo se usa uno, ya que le pusimos sólo tres cuerdas al instrumento.

Para colocar el clavijero hay que talar los agujeros y ayudarse con una escofina para hacer la ranura por donde van las cuerdas. Estas son las herramientas más complejas que se necesitan.

Como se ve en las fotos, el puente apoya en la tapa y las cuerdas lo empujan hacia abajo, en forma parecida al violín. Las cuerdas se sujetan en su parte inferior atándolas en un clavo en U que se fija, directamente, en el mango. Éste llega por debajo de la tapa hasta un borde de la misma (ver foto con vista inferior). Diametralmente opuesto al borde donde se apoya el mango, con un abrelatas se ha hecho una ventana por donde pasa el mismo a través del costado de la lata. Aparte del clavo en U se colocan un par más de clavos comunes para sujetar la lata y el mango (fig. 27).

El detalle más importante, musicalmente hablando, es el de colocar los trastes para que el cordófono afine. No es muy difícil calcular las distancias con una calculadora.

Va la receta, y recomendaciones:

1. Hay que tomar la longitud de la cuerda al aire (en este caso los 50 cm, entre puente y cejuela).

En mi caso usé cuerdas viejas, las que sobran de cambiar las cuerdas de una guitarra. Se pueden usar cualquiera de las sobrevivientes de un cambio de cuerdas.

Un ajuste de bastante importancia es la posición del puente. Ya que va a presión, se puede mover para buscar el punto en que la tapa vibre con mejor sonido o con más volumen. De hecho, estos ajustes de puente, cuerdas y tastiera sirven para darse cuenta cómo puede variar el comportamiento de un instrumento con pequeños cambios, una leve idea de los desafíos que enfrenta el luthier a la hora de perfeccionar un cordófono.

2. Se divide esta longitud por 1,12246, longitud que debe haber entre el puente y el primer traste. En el ejemplo $50 \text{ cm} / 1,12246 = 44,54 \text{ cm}$. También se puede medir desde la cejuela, lo cual da $50 - 44,54 = 5,46 \text{ cm}$.

3. Con esta longitud, al pisar el dedo en este traste, se sube la nota que suena en un tono, es decir, se pasa a la nota siguiente de la escala (si la cuerda sonaba en Do, por ejemplo, al pisar en el traste que acabamos de `fabricar` suena un Re).

La construcción de los trastes es simple. En mi caso usé alambre grueso de cobre porque es más fácil de trabajar (se puede usar alambre común de hierro, también).

Marqué con una sierra canaletas en la tastiera, y allí van pegados los trastes con poxipol. Hay que tener un poco de cuidado de que la altura quede pareja, para que no interfieran entre sí al pisar las cuerdas. También hay que regular la altura de puente y cejuela con cuidado, ya que se deben cumplir dos condiciones un poco contradictorias. Las cuerdas deben estar lo suficientemente separadas para no chocar con los trastes en su vibración normal (se dice que la guitarra `trastea` si choca la cuerda). Y por otro lado, si están muy separados hay que hacer mucha fuerza para pisar la cuerda y es más difícil de tocar.

4. Para la siguiente nota, el Mi, hay que subir otro tono dividimos la nueva longitud (44,54 cm) por el mismo número anterior, es decir $44,54 / 1,12246 = 39,68 \text{ cm}$. El segundo traste, entonces, debe estar a 39,68 cm del puente.
5. El tercer traste, análogamente, se pone a $39,68 / 1,12246 = 35,35 \text{ cm}$ y la nota que sonaría en nuestro ejemplo hipotético es un Mi.
6. Ahora hay un cambio. Entre las notas Do y Re, Re y Mi de la escala hay un tono entero de diferencia. En cambio entre el Mi y el Fa, hay un semitono. Entonces, al ser menor la diferencia se divide por un número menor, en este caso 1,0595. Entonces, la cuenta que hay

que hacer es $35,35 / 1,0595 = 33,36$. Como regla nemotécnica, después de las notas terminadas en ` (Mi, Si) viene un semitono, en todas las demás la distancia es de un tono.

7. Luego se repite este esquema hasta que se llega al final de la tastiera, siempre **dividiendo el largo anterior** por 1,12246 si hay un tono de diferencia y por 1,0595 si hay un semitono.

En realidad, se puede pensar que la escala tiene 12 semitonos y que elegimos una sub-escala de 7 tonos en cada pieza. En la guitarra hay un traste en todos los semitonos, por eso, si comparamos

el mango de una guitarra con el que acabamos de describir, vemos que, en la guitarra, los trastes tienen un espaciamiento más parejo. En nuestro instrumento se nota a simple vista cuál corresponde a un tono completo y cuál al semitono. Es decir, las distancias entre Re y Mi, por ejemplo, son mayores que entre Mi y Fa y, eso, se nota a simple vista. Se podría agregar, por ejemplo, un traste más entre el Re y el Mi y sería un `Re sostenido`. En la guitarra están presentes los sostenidos de todas las notas, por eso, es la distancia más pareja entre trastes.

La idea de eliminar semitonos en nuestro banjo latoso es simplificar la forma de tocar pero, si se desea, se pueden poner trastes cada semitono. En ese caso la receta consistiría en dividir cada vez el largo de la cuerda por 1,0595.

¿Cuál es el fundamento de esta receta?

Se basa en que, por un lado, la frecuencia con que vibra una cuerda es inversamente proporcional a la longitud. Por ejemplo, una cuerda de la mitad de longitud vibra al doble de la frecuencia, si todo lo demás (**tensión y densidad**) es igual.

La escala bien temperada se construye de manera que la frecuencia de cualquier nota sube un semitono cuando su frecuencia se multiplica por 1,0595 (este número es igual a la raíz doceava de dos, es decir, si multiplicamos por sí mismo 1,0595 doce veces, obtenemos el número dos se puede comprobar en la calculadora, aunque por el redondeo introducido no va a dar dos exactamente).

Entonces al dividir la longitud de la cuerda por nuestro número mágico: 1,0595 acortamos su longitud y subimos su frecuencia un semitono. El número que usamos para subir un tono (1,2246) equivale a multiplicar dos veces por un semitono, lo cual equivale a subir un tono.

El banjo latoso tiene tres cuerdas; ahora, habría que ver cómo se afinan entre sí. Una forma es hacer que la segunda cuerda esté afinada a una quinta de la cuerda más grave y, la tercera



Figura 28. Detalle del mango

La lógica de la escala bien temperada se explica en el libro *La física de los instrumentos musicales*, citado en la bibliografía, y remitimos al lector curioso a ese libro.

De todos modos, si quieren afinar de otra forma es perfectamente lícito. El instrumento tiene pocas normas constructivas, salvo el gusto y capricho del constructor.

cuerda una octava arriba de la más grave.

Para afinar las cuerdas entre sí hay que tocar la cuerda más grave pisando en el cuarto traste con el dedo. Luego, se ajusta la tensión de la segunda cuerda para que suene igual que la primera que estamos pisando con el dedo. En este punto,

su frecuencia es igual que la quinta nota que toca la cuerda grave (se cuenta Do, Re, Mi, Fa, Sol, por ejemplo, y, como la primera nota va al aire, la quinta (Sol en este ejemplo) se encuentra al pisar el cuarto traste).

Si pisamos el séptimo traste de la cuerda grave podemos ajustar la primera cuerda (la más aguda) para que suene igual. Una vez hecho esto la cuerda aguda suena una octava por encima de la más grave.

Lo dicho hasta aquí es suficiente, lo demás es ingenio e inventiva del constructor.

¡Suerte y disfrute su banjo latoso!

12.5. Instrumentos de viento



Figura 29

Todos los instrumentos de viento son, esencialmente, una columna de aire que vibra y difieren, entre sí, por la forma y el tamaño que adopta la columna; y por la forma en que se excita la vibración del aire.

12.5.1. Vibraciones en columnas de aire

Si tenemos un tubo lleno de aire y producimos variaciones de presión en el interior, tendremos modos que vibran con mayor amplitud cuando cumplamos ciertas condiciones para la longitud de onda del sonido que se propaga dentro del tubo.

Tomemos como ejemplo un tubo abierto en sus dos extremos como se muestra en el video. Allí, la presión puede rebotar a un lado y al otro del tubo, de esta forma se puede formar lo que se llama una onda estacionaria dentro del mismo. El aire va a subir y a bajar su presión periódicamente y, esto, produce sonido.

Si graficamos las variaciones de presión vemos que, en las puntas, al estar el aire no confinado por las paredes del tubo, va a ser más difícil producir cambios en la presión. En este caso, la pre-

sión tiene un *nodo* en cada punta que tienen antinodos, o sea, regiones de mayor presión, en el medio. Esto hace que los modos normales tengan un aspecto como el que muestra la figura 31.

El aire va y viene dentro del tubo, como se explica en el video pero, veamos otra perspectiva del mismo fenómeno, que quizás resulte más sencilla: la frecuencia de los modos normales puede encontrarse haciendo el siguiente razonamiento:

Se sabe la velocidad de propagación del sonido en el aire, también, que la longitud de onda de la onda estacionaria es el doble que la longitud del tubo (en una longitud de onda `cabén` dos antinodos, no uno) y como ya sabíamos:

$$\lambda \times f = v$$

La velocidad del sonido en el aire, a temperatura ambiente, es aproximadamente de 340 *m/seg*.

En el primer modo, `cabe` media longitud de onda, por lo que $\lambda = 2 \times L$, entonces, la frecuencia del mismo es

$$f_{\{1\}} = v / \lambda = 340 / \{2 \times L\}$$

(con la longitud expresada en metros y la frecuencia en Hertz)

Los modos sucesivos aparecen porque se pueden poner dos antinodos dentro del tubo tres y, así, siguiendo.

La frecuencia de estos modos va aumentando al doble, triple, etc. siguiendo una serie armónica. La llamamos serie armónica cuando las sucesivas frecuencias son múltiplos enteros una de otra.

En algunos casos, como en una barra elástica que vibra, las frecuencias crecen como números NO enteros y, así, pasa en el xilofón.



Figura 30

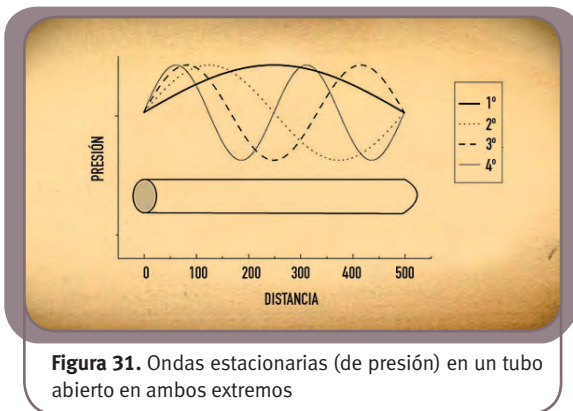


Figura 31. Ondas estacionarias (de presión) en un tubo abierto en ambos extremos

Existe una pequeña corrección dada por la temperatura que tiene alguna importancia, a discutir en un rato.

La dependencia de la temperatura que afecta la velocidad del sonido, a su vez, influye en la frecuencia de resonancia, aunque la corrección no es muy grande. Esto hace que la dependencia sea suave y no muy significativa para las variaciones normales de la temperatura.

Sin embargo, el oído es capaz de detectar variaciones de frecuencia bastante pequeñas. `Suenan desafinados` si escuchamos dos notas ligeramente distintas a la vez. Es por eso que, en general, los instrumentos de viento se afinan sobre el “pucho”, antes del concierto y se `precalientan` detrás del escenario para que lleguen a un equilibrio de temperatura antes del concierto y no por la mitad de la pieza (el instrumento se calienta ligeramente con el trabajo que hace el aire en su interior).

Cualquier tubo abierto en sus dos extremos va a tener la frecuencia dada por la fórmula anterior y, como se ve, ésta es inversamente proporcional a la longitud del tubo. En particular, en una flauta dulce, por ejemplo, la boquilla es un extremo abierto y un agujero destapado es otro, de manera que destapando agujeros uno a uno, se van cambiando las frecuencias de resonancia y, por lo tanto, también las notas.

Por supuesto, esta explicación es demasiado simple y, la realidad, siempre se encarga de complicarnos la vida, ya que hemos despreciado una corrección por el `efecto de borde`. Lo que ocurre es que el punto donde la presión tiene el antinodo no es justo, justo, el borde del tubo, sino que, en realidad, el antinodo está `un poco más allá`. Cuanto vale ese poco depende del diámetro del tubo y es, en general, del orden de ese diámetro. Cuando el tubo no es cilíndrico sino un poco cónico, las cosas se complican aún más.

En general el constructor sabe, aproximadamente, dónde van los agujeros de la flauta y, después, termina de afinar agrandando y modificando los agujeros `in situ`.

Si el tubo tiene un extremo cerrado, como ocurre en el `siku`, entonces, hay un nodo en el fondo y el modo fundamental corresponde a un cuarto de longitud de onda. Por eso, el tubo de un siku que toque la misma nota que una flauta, debe tener la mitad de la longitud de la flauta, para tocar la misma nota.

No se pueden excitar los instrumentos de viento como el piano o la guitarra, es decir, uno no puede `pegar un golpe e irse` dejando que el sistema (o sea la cuerda del piano o guitarra) vibre por sí solo. Lo que ocurre es que la vibración en un tubo (y todos los de viento son un tubo, de una forma u otra) decae muy rápidamente y el sonido moriría casi antes de que nuestro oído lo percibiera. Por eso, todos estos instrumentos se excitan en forma continua.

O por lo menos, durante todo el tiempo que el ejecutante sea capaz de soplar.

12.5.2. Mecanismos de excitación

Hay varias formas de conseguir que el tubo resuene. La más simple es la que utiliza el `siku` o, la que muchos hemos usado para hacer `silbar` una botella: se sopla en un tubo cerrado, de chanfle al borde.

Es necesaria una mínima habilidad para conseguir que el aire excite el modo normal, pero no es muy difícil. La vibración se origina porque el chorro de aire que pega en el borde produce turbulencia que genera variaciones de presión que, en principio, serían al azar. Sin embargo, como hay un modo resonante, éste se excita y las variaciones de presión empiezan a ser periódicas. La turbulencia, entonces, se modifica y se refuerzan las vibraciones en fase con la resonancia. Esto da una realimentación positiva y, finalmente, se obtiene una nota bien definida. El hecho de que el tubo sea cerrado hace que haya un antinodo de presión en la punta cerrada, lo cual modifica la fórmula a usarse en la frecuencia. Ahora cabe un cuarto de onda en el tubo y la frecuencia es la mitad de la correspondiente al tubo abierto.

La quena utiliza casi el mismo método, aunque se hace un corte extra en la caña para facilitar el sonido y, en este caso, el tubo es abierto, con longitud variable según el agujero que destapemos.

Las flautas traveseras utilizan un agujero en la pared del tubo en donde se sopla tangencialmente a él, de forma que, también, estamos impulsando un chorro de aire contra un borde rígido, para producir turbulencia y excitar nuestro resonador.

Tanto las flautas dulces como el órgano utilizan, en el fondo, el mismo mecanismo de impulsar aire contra un borde pero, en este caso, se utiliza la sofisticación adicional de colocar una boquilla que hace de guía para el chorro de aire (así uno no se tiene que preocupar por la posición de los labios). Por eso, se puede sacar sonido al primer intento, lo que no pasa en los casos anteriores.

Estuvimos hablando como si siempre se excitara el modo fundamental del tubo (la nota) y los armónicos dieran, solamente, el timbre; sin embargo, existe la posibilidad de excitar con mayor amplitud el primer armónico, el segundo (o, a veces, números todavía mayores); y esto se consigue soplando, en general, más fuerte o colocando los labios en forma distinta. De esta manera todas las frecuencias se multiplican por dos y, como vimos al principio, esto implica que las notas sean iguales pero `trasladadas una octava`, es decir, que la melodía va a ser reconocida de forma clara, pero notoriamente más aguda. Este mecanismo multiplica las posibilidades musicales de las flautas y afines, permitiendo tocar más notas de las que sería posible si sólo se trabajara en el modo fundamental. En algunos instrumentos se facilita este `octavado` añadiendo un agujero que se tapa y destapa con el pulgar.

En instrumentos como el pífano o el `txistu` vasco que tienen pocos agujeros porque se tocan con una mano y el ejecutante toca un tambor con la otra, el octavado y el agujero del pulgar son fundamentales.

El silbido funciona en forma similar. Si uno cierra los labios, los estira y, luego, sopla el aire forzándolo a salir, en principio va a obtener un; prrr! muy poco musical (por lo que se recomienda hacer el experimento en privado), pero con práctica se puede regular la tensión de los labios y la presión del aire hasta obtener la frecuencia deseada (mucha gente puede silbar el `arroz con leche` sin demasiado esfuerzo). Aquí los labios actúan como cuerdas bajo tensión, con la frecuencia fijada por la tensión de estirar los labios, la masa está dada por la masa del labio que vibra y el chorro de aire es el `mecanismo de excitación`.

En los instrumentos de bronce, trompeta, trombón, etc, además del material del tubo se cambia de sistema de excitación de la vibración. En este caso todo está en los labios del trompetista que forma la nota en base a la tensión de los labios y a la fuerza con que impulsa el aire a través de ellos.

Cuando se agrega el tubo de la trompeta lo que hace el trompetista es variar la tensión de sus labios para que la frecuencia coincida con la de alguna de las frecuencias propias de la columna de aire. Para cambiar la nota, busca la resonancia de alguna otra frecuencia propia, lo que se hace esencialmente a puro labio. Las `llaves` de casi todos los bronce son un ajuste `grueso` que permite cambiar la longitud efectiva del tubo. Se cambia la frecuencia del modo fundamental y se buscan nuevas notas excitando los nuevos armónicos superiores.

De hecho, muchos bronce no usan, musicalmente, el modo fundamental y se tocan excitando los modos superiores.

La vara del `trombón a vara` es otra forma de variar la longitud del tubo para cambiar sus resonancias.

Nótese que los bronce utilizan una `bocina` en la punta para mejorar el acople del aire que vibra `dentro` y fuera del tubo. Esto también cambia la reacción del aire sobre los labios y facilita la afinación y búsqueda del tono.

Importa poco, sin embargo, las vueltas que se le pueden dar al tubo. Esto no cambia la presión en forma perceptible y, por lo tanto, las frecuencias de resonancia y el contenido de armónicos van a ser los mismos. Por eso se retuerce el tubo, por razones de espacio.

12.5.3. Construcción de instrumentos de viento sencillos

Vamos a describir los instrumentos empezando por aquéllos que resultan más fáciles de tocar, aunque sean un poco más complicados de construir.

Elementos necesarios:

- Tubos de plástico (Un tubo, fácil de trabajar es el de plástico negro, de pared relativamente delgada, usado para riego y cañerías de agua fría. Es bastante blando como para que se pueda cortar con un cuchillo bien afilado. También es lo bastante rígido como para que la flauta no se doble. Teniendo acceso a herramientas como taladros y sierras para metal se pueden usar materiales más duros, como metal o plásticos más gruesos, caños de calefacción o agua caliente).
- Una cuchilla afilada, tipo `cutter` de hoja descartable o, si se consigue, una gubia curva.
- Un taladro manual o eléctrico también puede ser útil, aunque no es imprescindible.

Se pueden evitar los materiales industriales usando cañas huecas, como se hacía tradicionalmente. En algunos lugares se consiguen directo del campo o de un baldío, en otros es más fácil ir a la ferretería o el corralón que vende caño plástico.

12.5.3.1. Flauta dulce

Construcción:

Nivel de dificultad: media.

Sacar sonido: fácil una vez que se ajusta y se encuentran las dimensiones correctas de la boquilla.

Observación: para esta flauta conviene la medida de caño llamada "de media" (pulgada de diámetro, se sobreentiende).

Procedimiento: Se hace un corte en el tubo de las dimensiones que muestra la figura 32 (las medidas son en cm y el dibujo no está a escala).

El corte diagonal debe tener un bisel, donde se forme la turbulencia del chorro de aire. Deben eliminarse las "rebarbas" del bisel con algún cuchillo filoso o el instrumento afilado que prefieran. La longitud del corte es, aproximadamente, un centímetro y unos cuatro a siete mm de profundidad.

El siguiente paso es lijar o cortar un corcho (o un tarugo de madera) de forma que quede más o menos como muestra la figura 32.

Se pueden hacer agujeros de la forma y a las distancias aproximadas que muestra el dibujo, (figura 32) para obtener una flauta con alguna posibilidad musical. Es necesario retocar los agujeros para afinar la flauta. Hay que empezar cambiando el agujero inferior, el más lejano a la boca e ir subiendo.

Conviene hacer, primero, agujeros de unos 8 milímetros e ir agrandándolos. Este proceso hace la nota más aguda hay que aumentar el tamaño si la nota suena baja. Agrandar no es problema y, si uno se pasa, (la nota suena más aguda de lo que queremos) se puede achicar pegando un pedazo de cinta adhesiva que tape parcialmente el agujero con lo cual la nota baja.

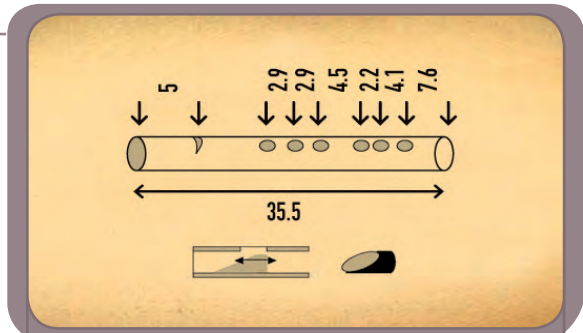


Figura 32. Construcción de embocadura tipo flauta dulce y posición de los agujeros, las medidas son en centímetros. Se sugiere usar caño de riego o agua fría de media pulgada de diámetro y empezar con agujeros de unos 8 milímetros de diámetro. Detalle, construcción del tapón biselado

Es difícil que salga sonido al primer intento. Hay que estar preparado para volver a lijar el corcho (o usar uno nuevo y empezar otra vez) hasta obtener la forma correcta.

12.5.3.2. La quena

Construcción:

Nivel de dificultad: sencilla

Sacar sonido: difícil, hace falta paciencia y perseverancia

Procedimiento: Se hace un corte de unos 6 a 7 mm de profundidad, en diagonal y en la parte superior del tubo, formando un bisel que debe ser "limpio", parejo y sin rebarras. (figura 33).
Observación: Es necesario soplar suavemente formando un canal con los labios que dirija el chorro de aire contra el bisel. Hace falta bastante paciencia y un poco de suerte. Probar primero con todos los agujeros destapados porque es un poco más fácil sacar sonido y, luego, ir tapando de a uno y probar de nuevo todas las veces que sea necesario.

12.5.3.3. Flauta travesera

Construcción:

Nivel de dificultad: Sencilla

Sacar sonido: difícil, paciencia y perseverancia recomendadas

Procedimiento: se hace un agujero de unos 5 a 8 mm de diámetro en la pared del tubo (figura 33). Es conveniente biselar un poco el agujero en la zona en que se sopla, sobre todo. El extremo del tubo cercano al agujero se tapa con un corcho y, a veces, es necesario retocar un poco su posición para que suene más fácil. Soplar transversalmente tratando de conseguir un chorro "laminar" y apoyando el labio inferior sobre la flauta. Como en el caso de la quena, cuesta pero es muy satisfactorio cuando sale el sonido.

Se puede hacer agujeros en el tubo, usando la figura 32 como guía; para esta flauta o la quena, y valen las mismas recomendaciones que en lo anterior para la afinación. Es recomendable usar caños un poco más anchos, de tres cuartos pulgadas en la flauta travesera y, también, se puede alargar el tubo para un sonido más grave. Para tapar el caño de tres cuartos de pulgada cerca de la embocadura se puede usar un corcho de botella de vino que tiene el diámetro justo.

Asimismo experimentar con escalas no tradicionales poniendo los agujeros a capricho del constructor. Jugar siempre es bueno.

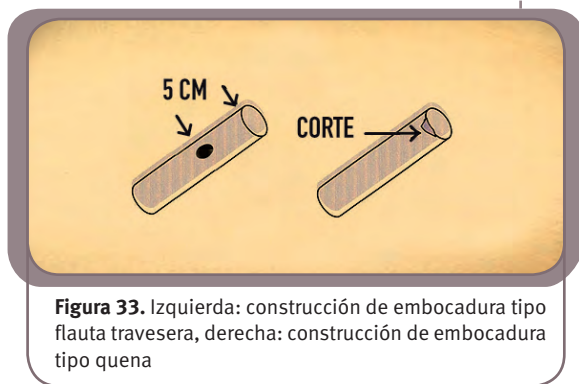


Figura 33. Izquierda: construcción de embocadura tipo flauta travesera, derecha: construcción de embocadura tipo quena

12.5.3.4. Siku

El siku típico de la música del Altiplano de Bolivia y Perú es un instrumento sencillo de construir y, aparentemente, ha sido desarrollado en forma independiente allí y en Eurasia, ya que los griegos antiguos tenían la llamada flauta de Pan que es casi el mismo instrumento.

Construcción:

Procedimiento: cortar varios tubos, ponerles un tapón (que puede ser el nudo que tiene una caña, un muy buen tubo prefabricado por la Naturaleza), y soplar. En verdad, hay que construirles algún soporte: se pueden poner los tubos en una fila, o en dos alternadas y, como es de imaginar, hay que elegir la longitud para que las resonancias coincidan con las notas de la escala.

Más fácil que buscar cañas, para la mayoría de los que vivimos en zonas urbanas, es comprar caño de riego negro, de media pulgada y tapar una punta con un corcho. Esto tiene la facilidad adicional de que se puede terminar de afinar moviendo un poco el corcho hacia arriba y abajo para cambiar la longitud del tubo.

Las longitudes para tener una escala completa se dan en la tabla siguiente.

NOTA	FRECUENCIA (HZ)	LONGITUD (CM)
DO	523,3	15,8
RE	587,3	14,0
MI	659,3	12,5
FA	698,5	11,8
SOL	784,0	10,5
LA	880,0	9,4
SI	987,8	8,35
DO	1046,6	7,9

Notar que esta es la misma escala que vimos en la flauta dulce.

Si duplicamos el largo de todos los tubos se obtiene un siku afinado una octava más abajo y, si los juntamos, tenemos entonces dos octavas completas.

En verdad, conviene luego afinar mejor el instrumento a oído porque siempre hay un pequeño efecto de borde que hace que la longitud efectiva del tubo sea un poco mayor que su longitud nominal.

Nuevamente, se recuerda que estas son indicaciones como para empezar y que, a medida que se tome confianza, se podrán optimizar los instrumentos con mejores ajustes o, eventualmente, ensayar combinaciones no convencionales.

Suerte y que los disfruten...

12.6. Apéndice I : Tabla de frecuencias de las notas musicales

con LA = 440 Hz, (escala 'bien temperada')

NOTA/OCTAVA #: SOSTENIDO B: BEMOL	FRECUENCIA (HERTZ: 1/S)	LONGITUD DE ONDA (CM)	NOTA/OCTAVA #: SOSTENIDO B: BEMOL	FRECUENCIA (HERTZ: 1/S)	LONGITUD DE ONDA (CM)
Do 0	16,35	2.100	Re 0	18,35	1.870
Do# 0/Reb 0	17,32	1.990	Re# 0/Mib 0	19,45	1.770

NOTA/OCTAVA #: SOSTENIDO B: BEMOL	FRECUENCIA (HERTZ: 1/S)	LONGITUD DE ONDA (CM)	NOTA/OCTAVA #: SOSTENIDO B: BEMOL	FRECUENCIA (HERTZ: 1/S)	LONGITUD DE ONDA (CM)
Mi 0	20,60	1.670	Do 4	261,63	132
Fa 0	21,83	1.580	Do# 4/Reb 4	277,18	124
Fa# 0/Solb 0	23,12	1.490	Re 4	293,66	117
Sol 0	24,50	1.400	Re# 4/Mib 4	311,13	111
Sol# 0/Lab 0	25,96	1.320	Mi 4	329,63	105
La 0	27,50	1.250	Fa 4	349,23	98,8
La# 0/Sib 0	29,14	1.180	Fa# 4/Solb 4	369,99	93,2
Si 0	30,87	1.110	Sol 4	392,00	88,0
Do 1	32,70	1.050	Sol# 4/Lab 4	415,30	83,1
Do# 1/Reb 1	34,65	996	La 4	440,00	78,4
Re 1	36,71	940	La# 4/Sib 4	466,16	74,0
Re# 1/Mib 1	38,89	887	Si 4	493,88	69,9
Mi 1	41,20	837	Do 5	523,25	65,9
Fa 1	43,65	790	Do# 5/Reb 5	554,37	62,2
Fa# 1/Solb 1	46,25	746	Re 5	587,33	58,7
Sol 1	49,00	704	Re# 5/Mib 5	622,25	55,4
Sol# 1/Lab 1	51,91	665	Mi 5	659,26	52,3
La 1	55,00	627	Fa 5	698,46	49,4
La# 1/Sib 1	58,27	592	Fa# 5/Solb 5	739,99	46,6
Si 1	61,74	559	Sol 5	783,99	44,0
Do 2	65,41	527	Sol# 5/Lab 5	830,61	41,5
Do# 2/Reb 2	69,30	498	La 5	880,00	39,2
Re 2	73,42	470	La# 5/Sib 5	932,33	37,0
Re# 2/Mib 2	77,78	444	Si 5	987,77	34,9
Mi 2	82,41	419	Do 6	1.046,50	33,0
Fa 2	87,31	395	Do# 6/Reb 6	1.108,73	31,1
Fa# 2/Solb 2	92,50	373	Re 6	1.174,66	29,4
Sol 2	98,00	352	Re# 6/Mib 6	1.244,51	27,7
Sol# 2/Lab 2	103,83	332	Mi 6	1.318,51	26,2
La 2	110,00	314	Fa 6	1.396,91	24,7
La# 2/Sib 2	116,54	296	Fa# 6/Solb 6	1.479,98	23,3
Si 2	123,47	279	Sol 6	1.567,98	22,0
Do 3	130,81	264	Sol# 6/Lab 6	1.661,22	20,8
Do# 3/Reb 3	138,59	249	La 6	1.760,00	19,6
Re 3	146,83	235	La# 6/Sib 6	1.864,66	18,5
Re# 3/Mib 3	155,56	222	Si 6	1.975,53	17,5
Mi 3	164,81	209	Do 7	2.093,00	16,5
Fa 3	174,61	198	Do# 7/Reb 7	2.217,46	15,6
Fa# 3/Solb 3	185,00	186	Re 7	2.349,32	14,7
Sol 3	196,00	176	Re# 7/Mib 7	2.489,02	13,9
Sol# 3/Lab 3	207,65	166	Mi 7	2.637,02	13,1
La 3	220,00	157	Fa 7	2.793,83	12,3
La# 3/Sib 3	233,08	148	Fa# 7/Solb 7	2.959,96	11,7
Si 3	246,94	140	Sol 7	3.135,96	11,0

NOTA/OCTAVA #: SOSTENIDO B: BEMOL	FRECUENCIA (HERTZ: 1/S)	LONGITUD DE ONDA (CM)	NOTA/OCTAVA #: SOSTENIDO B: BEMOL	FRECUENCIA (HERTZ: 1/S)	LONGITUD DE ONDA (CM)
Sol# 7/Lab 7	3.322,44	10,4	Do 8	4.186,01	8,2
La 7	3.520,00	9,8	Do# 8/Reb 8	4.434,92	7,8
La# 7/Sib 7	3.729,31	9,3	Re 8	4.698,64	7,3
Si 7	3.951,07	8,7	Re# 8/Mib 8	4.978,03	6,9