

Práctica de Ondas Mecánicas

Objetivos.....	2
Pre - requisitos para realizar la práctica	2
Bibliografía recomendada en referencia al modelo teórico.....	2
Competencias a desarrollar por el alumno	3
Introducción teórica	3
a) Desarrollo: Tubo de agua y diapasón.....	4
b) Desarrollo: Tubo con émbolo, generador y osciloscopio.....	6
c) Variante con generador y osciloscopio simulado con PC	7
Procedimiento experimental A.....	7
Procedimiento experimental B.....	8
Procedimiento experimental C.....	8
Anexo A: Onda estacionaria en cuerda	9
Anexo B: Cuerdas y tubos	12
Anexo C: Elementos de transformada rápida de Fourier (FFT).....	15

Determinación de:

- ▶ Modos estacionarios de ondas en un tubo, con un extremo abierto y otro cerrado, variando la frecuencia y manteniendo constante la longitud del tubo.
- ▶ Modos estacionarios de ondas en un tubo, con un extremo abierto y otro cerrado, variando la longitud del tubo y manteniendo constante la frecuencia.
- ▶ La velocidad del sonido en el aire, a frecuencia constante.
- ▶ Modos estacionarios de ondas en cuerdas de frecuencia variable, longitud y tensión constante.
- ▶ Modos estacionarios de ondas en cuerdas de tensión variable, frecuencia y longitud constante.

Pre-requisitos para realizar la práctica

Modelo de ondas mecánicas.

Cálculo y estimación de incertezas.

Resolución y discusión en el grupo del problema 12 de la página 44 de la guía de problemas http://www.fi.uba.ar/materias/6201/GUIAPROBLr4_mar07.pdf

Bibliografía en referencia al marco teórico

Ver bibliografía indicada en la página de la materia

<http://www.fi.uba.ar/materias/6201/bibliografia.htm>

Se sugiere consultar:

Ingard V., Kraushaar W. "Introducción al estudio de la mecánica, materia y ondas". España, Reverté, 1973.

Resnick, R.; Halliday, D; Krane, K. "Física", vol.1, 10º ed. y posteriores. C.E.C.S.A., México, 1999.

Roederer, J. "Mecánica Elemental". EUDEBA, 2002.

Sears; Zemansky; Young; Freedman. "Física Universitaria", vol.1, 11º ed. Pearson, México, 2004.

Simulaciones:

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/MovOndulatorio.html>

Bibliografía complementaria

Crawford, F. "Ondas". Berkeley Physics Course, volumen 3. España, Reverté, 1971.

Roederer, J. "Acústica y psicoacústica de la música". Ricordi, 1997.

Welti R. "Introducción a la física de las ondas. Ondas mecánicas, óptica física y fenómenos de propagación". Universidad Nacional de Rosario, 1999.

Tipler, P; Mosca, G. "Física, para la ciencia y la tecnología", vol. 1, 5º ed. Reverté, Barcelona, 2005

Competencias que el alumno puede desarrollar

- ✓ Identificar y analizar las fuentes de incertezas que intervienen en el proceso de medición.
- ✓ Calcular y expresar medidas con sentido físico.
- ✓ Comparar el estudio de un mismo fenómeno a través de diferentes arreglos experimentales.
- ✓ Proponer mejoras en el desarrollo de trabajos experimentales.
- ✓ Trabajar en grupo.
- ✓ Contrastar los datos experimentales con el modelo teórico.
- ✓ Adquirir habilidad en el control de variables para obtener los modos estacionarios en cuerdas y en tubos
- ✓ Conocer las nociones básicas del funcionamiento, de las cuerdas y los tubos, en instrumentos musicales.

Introducción teórica

Un sistema sonoro (en el caso de este experimento, una columna de aire) vibra por resonancia cuando capta la energía, que le entrega un objeto que oscila, con una cierta frecuencia igual a una de las frecuencias propias o naturales de ese sistema. Al vibrar por resonancia el tipo de ondas que se establecen en el tubo son estacionarias.

Dado que esta onda es alimentada continuamente por la fuente que excita al sistema, si el tubo fuera ideal sin pérdidas, la onda estacionaria dentro del mismo crecería en amplitud, indefinidamente. Dado que el tubo tiene pérdidas, la amplitud de la onda estacionaria crece hasta que la potencia disipada es igual a la potencia de alimentación al sistema.

Aún así, la amplitud de la onda para una frecuencia de resonancia es notablemente mayor al resto de las frecuencias y es por eso que cuando la frecuencia emitida es igual a una frecuencia de las propias del sistema se aprecia un aumento de la intensidad (volumen del sonido).

Las ondas sonoras se pueden describir como **ondas de presión** y también como **ondas de desplazamiento**.

Corrección de la medición de la velocidad, por temperatura:

La velocidad del sonido a una temperatura de t grados centígrados es:

$$V_t = V_0 \sqrt{1 + \alpha t} \quad (2)$$

donde:

V_t : velocidad del sonido a la temperatura de t .

V_0 : velocidad del sonido a la temperatura de 0 °C.

t : temperatura en grados centígrados.

α : constante, se tomará de valor $\alpha = \frac{1}{273.14} \frac{1}{^\circ\text{C}}$

Justificar la relación indicada en (2).

Si se indica la temperatura con una escala Kelvin se puede expresar una relación de proporcionalidad entre velocidades y las raíces de las temperaturas absolutas.

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \quad (3)$$

Actividad

Ondas de presión ; ondas de desplazamiento (estacionarias)

Escribir sus expresiones, indicar cómo se relacionan y hacer los gráficos correspondientes a las elongaciones en función de la posición.

Desarrollo de la práctica

Medición de la velocidad del sonido, por resonancia

a) Mediante un tubo de agua y un diapasón de frecuencia conocida.

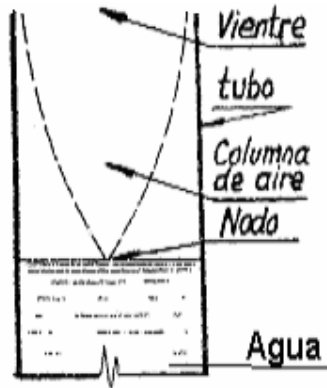
En las cercanías de la boca del tubo se forma un vientre y en el fondo un nodo, ¿por qué? (identificar de qué magnitud física se trata) (Fig. 1). Por consiguiente, cuando el tubo está en resonancia la longitud de la columna de aire resulta igual a un múltiplo impar de cuartos de longitud de la onda estacionaria:

$$L = \frac{(2k+1)}{4} \lambda \quad \text{con } k=1,2,3,\dots \quad (1)$$

En otras palabras, habrá resonancia si la longitud del tubo (columna de aire) es igual a:

$$\frac{\lambda}{4}, \quad \frac{3}{4}\lambda, \quad \dots \quad \frac{5}{4}\lambda, \quad \dots \quad \text{etc.}$$

Justificar la relación indicada en (1)



(En el tubo real el vientre se produce unos centímetros por fuera del tubo).

Fig. 1

➤ **Materiales**

- Diapasón
- Tubo de agua

➤ **Procedimiento**

La experiencia se realiza con un diapasón de frecuencia conocida y una probeta de altura adecuada conteniendo agua, cuyo nivel se varía con otro tubo (agregando agua, ver fig.2) o una ampolla (principio de vasos comunicantes), lo que significa ir variando la longitud de la columna de aire (tubo sonoro). Al hacer vibrar el diapasón, en las cercanías de la boca del tubo, se perciben refuerzos en la intensidad del sonido para determinadas posiciones.

Analizar previamente

- ¿Qué parámetros λ , f , L (longitud del tubo), V de la onda, se mantienen constantes en la realización de esta experiencia?
- ¿Cuál es la dependencia de las variables que identifica?
- ¿Es esperable obtener la frecuencia fundamental y sus respectivos armónicos, para una determinada longitud de columna de aire? Justificar.
- Como en general el vientre de vibración no coincide con la boca de la probeta, ¿es conveniente tomar una longitud de onda menor que $\frac{3}{4} \lambda$? Realizar una estimación del error que se comete, al considerar solamente la primera posición de resonancia.
- Analizar cómo y cuántas mediciones se van a realizar.

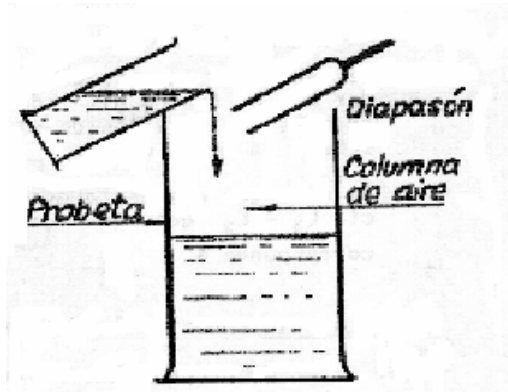


Fig. 2

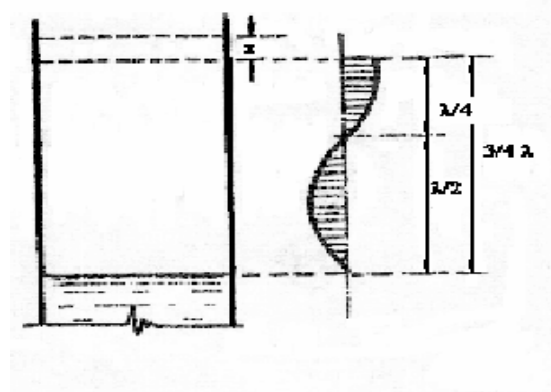


Fig. 3

- ✓ Calcular la longitud de onda. Si se miden varios valores de λ , ¿es correcto tomar el promedio de dichas mediciones como valor representativo? Discutir en el grupo.
- ✓ ¿Cómo se calcula la velocidad del sonido con los valores medidos?
- ✓ Finalmente utilizando la ecuación (3), se mide la temperatura ambiente, corroborar el valor que se obtiene de la velocidad del sonido a 0°C , con sentido físico, en condiciones normales y comparar con un valor tabulado. Por ejemplo el valor a 0°C que menciona el libro de física que se utilice.

b) Mediante un tubo con émbolo, generador de sonido y osciloscopio.

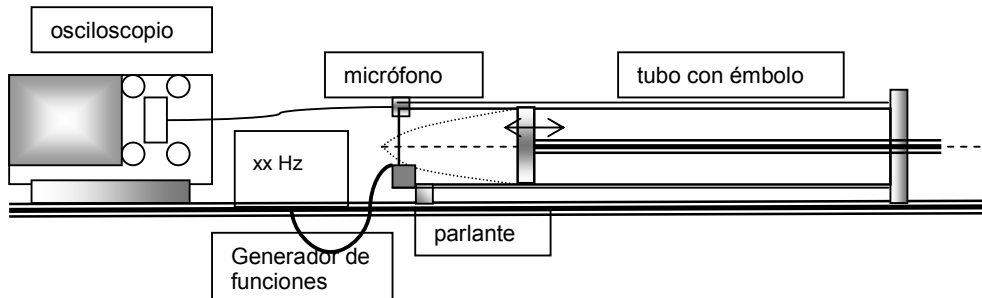
Tubo de Kundt

Dispositivo para generar ondas estacionarias en un tubo de longitud variable mediante desplazamiento del fondo. La fuente sonora senoidal se logra a través de un parlante y de un generador de funciones. Con un osciloscopio, utilizando un micrófono, se observan los refuerzos y atenuaciones del sonido.

➤ Materiales

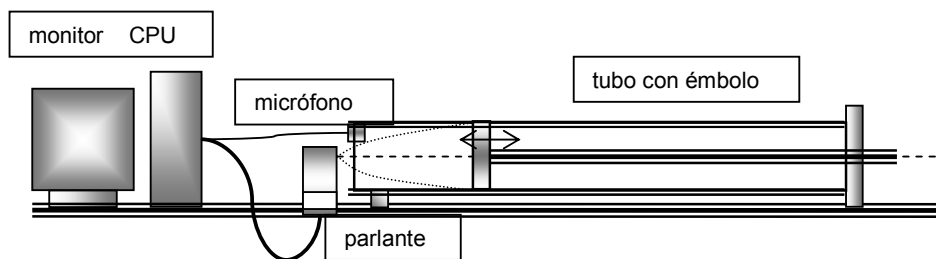
- Osciloscopio, generador de funciones, micrófono corbatero.
- Parlantes potenciados.
- Un tubo de acrílico de diámetro 4 cm y largo 1 m, con un émbolo que se puede deslizar mediante una varilla manualmente. Soportes para el tubo.

Esquema del Dispositivo



c) Variante con generador de sonido y osciloscopio simulado con ordenador.
(Ver Anexo B).

Esquema del Dispositivo



Procedimiento

Experiencia A

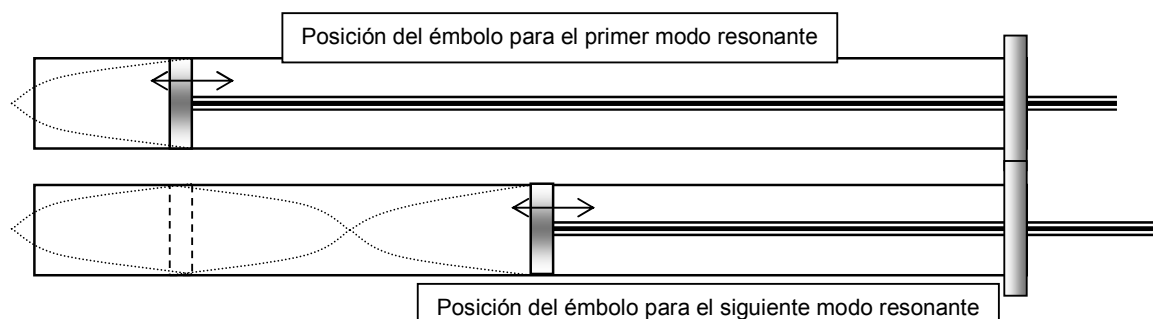
- Montar el dispositivo teniendo en cuenta que se va a mover la varilla para variar la posición del émbolo. Se utiliza el generador de funciones o el generador de sonido de la PC, con la forma emitida de función senoidal.
- Comenzar con una longitud de tubo de aproximadamente 60 cm. Hacer la observación, para frecuencias variables de entre 900 y 1200 Hz. Observar sobre la pantalla del osciloscopio o de la PC la forma y la intensidad indicada en la pantalla del simulador de osciloscopio.
- Luego desplazar el émbolo a una longitud de 70 cm y realizar nuevas observaciones para varias frecuencias, entre 600 y 900 Hz, sin variar la posición del émbolo.
- Realizar un diagrama de las observaciones. Anotar las longitudes medidas y la frecuencia con la que se ha trabajado.

Experiencia B

- Montar el dispositivo teniendo en cuenta que se va a mover la varilla para variar la posición del émbolo. Se utiliza el generador de funciones o el generador de sonido de la PC, forma de función sinusoidal.
- Realizar la observación, para una **frecuencia fija** que se selecciona entre 2000 y 3000 Hz. Observar sobre la pantalla del osciloscopio o de la PC la forma y la intensidad indicada en la pantalla del simulador de osciloscopio, que representa el sonido captado por el micrófono.
- Luego desplazar el émbolo desde una posición próxima a la boca, alejándolo lentamente. Observar si se producen variaciones de intensidad en la pantalla del osciloscopio.
- Si se produce un refuerzo, se habrán encontrado una de las longitudes de tubo para la cual se produce resonancia. Tomar nota de esa longitud y se continúa moviendo el émbolo hasta encontrar la siguiente.
- ¿Se puede predecir dónde se ubicará el émbolo para el siguiente modo de resonancia?
- Realizar un diagrama de las observaciones. Anotar las longitudes medidas y la frecuencia con que se ha trabajado.

Experiencia C

- Con las observaciones del experimento anterior, ¿es posible calcular la velocidad del sonido?
- Observar la figura siguiente y obtener la relación que vincula las mediciones con la velocidad del sonido.



- El hecho de que la temperatura modifique la velocidad del sonido es importante en instrumentos de viento, ya que se ve afectada la frecuencia emitida por un tubo de longitud dada.

Actividades para pensar y reconocer en relación con los instrumentos musicales de viento.

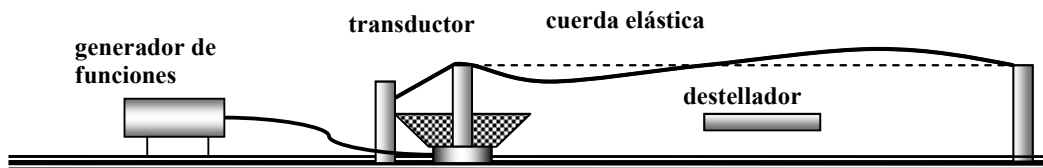
- Una trompeta en Si bemol tiene tres llaves que el trompetista utiliza para variar la nota que ejecuta. Las llaves modifican la longitud del tubo de la trompeta, mediante un cambio de recorrido por las curvas del mismo, ¿cómo se relaciona esta acción con la frecuencia de la nota que se emite?
- ¿Los tubos de un órgano son todos de la misma longitud?, ¿y los de un sicus?
- ¿Cómo logra un flautista variar la nota que ejecuta?
- ¿Cuáles de las variables mencionadas cambian al pulsar una llave u otra de un clarinete o un saxo: v , λ , f ?

Anexo A: Onda estacionaria transversal, en cuerda

➤ Materiales

- Generador de funciones.
- Un transductor de oscilaciones eléctricas a mecánicas, montado sobre soporte de acrílico.
- Un tramo de 2 m de elástico forrado en hilo poliéster.
- Un soporte para tensar el extremo de la cuerda elástica.
- Una lámpara destelladora con control de intervalos.
- Cinta métrica de 2m.

➤ Esquema del Dispositivo



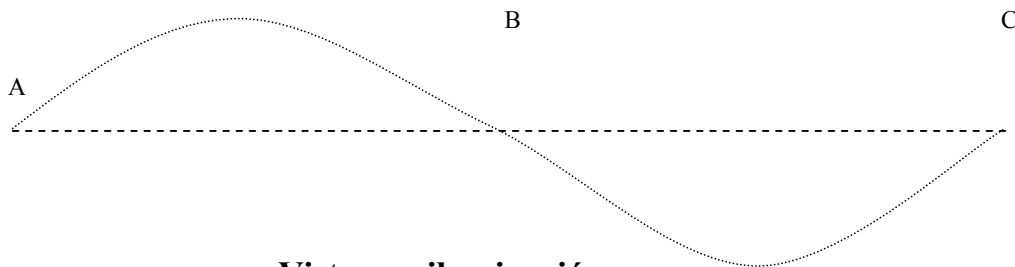
Dispositivo para generar ondas estacionarias en una cuerda tensa. Se pueden variar la longitud de la cuerda, la tensión y la frecuencia de la oscilación.

La fuente del movimiento se logra a través de un generador de funciones, conectado a un amplificador y a un transductor electromecánico. La observación se puede realizar a simple vista con iluminación normal y también con ayuda de iluminación destellante.

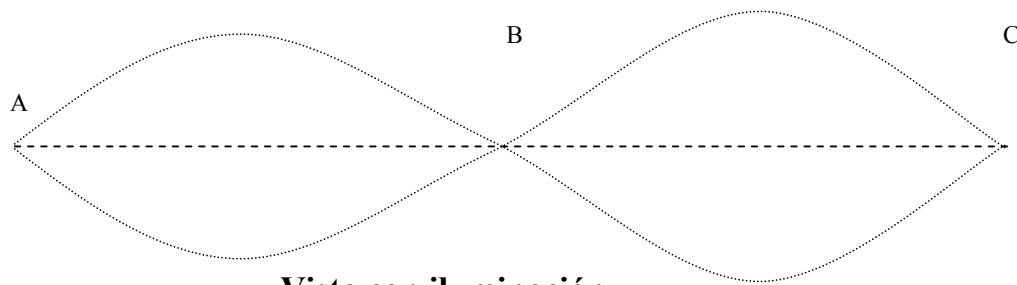
➤ **Procedimiento**

- Montar el dispositivo teniendo en cuenta que el soporte de la cuerda elástica de la derecha pueda desplazarse.
- Cuidar que la perilla de amplitud del generador de funciones no sobrepase $\frac{3}{4}$ de su escala, para evitar sobrecargas.
- Comenzar con una longitud de cuerda de aproximadamente 70 cm y hacer la observación, para una frecuencia de entre 12 y 20 Hz (cuidar de ejercer una tensión moderada sobre la cuerda).
- Realizar sucesivas observaciones variando la longitud de cuerda, por ejemplo 80 cm; 90 cm; 100 cm.
- Mediante la lámpara destelladora se puede observar la forma que toma la cuerda en su movimiento (modo de oscilación). Determinar la cantidad de nodos que se producen en cada caso.
- Realizar un diagrama de las diferentes formas que se observan. Anotar las longitudes medidas y la frecuencia para el transductor.

El diagrama es similar al siguiente:



**Vista con iluminación
destellante**



**Vista con iluminación
normal**

- ¿Cómo se definen los puntos A, B, C, para la onda estacionaria?
- Conocida la distancia entre A y C, ¿qué parámetro de la onda se mide?
- Cabe aclarar que en el experimento la onda establecida es conocida como onda estacionaria y no hay velocidad neta de propagación. ¿Qué representa entonces la velocidad que se puede obtener con la frecuencia y la longitud de onda medidas?

Comentarios

- En estos experimentos, no se ha variado la densidad lineal (masa por unidad de longitud) de la cuerda, pero esa variable es importante con respecto a la velocidad de propagación v .

¿Cuál es la relación entre la tensión de la cuerda y la velocidad?

- En una guitarra por ejemplo se logra tener seis cuerdas casi igualmente tensionadas, y con ellas sostener dos octavas entre el Mi de la sexta y el Mi de la primera, mediante el hecho de que cada cuerda posea una densidad lineal diferente. Las cuerdas de mayor densidad lineal se colocan en las octavas de tonalidad más grave.

Actividades para pensar y reconocer en relación con los instrumentos musicales de cuerdas

- Con una clavija de la guitarra se logra variar la tensión en la cuerda, sin cambiar la longitud que media entre los huesos de la caja de ella y el clavijero, ¿cómo se relaciona esta acción con la frecuencia a la que oscila la cuerda?
- ¿Las cuerdas de un piano son todas de la misma longitud?, ¿y las de la guitarra? ¿Influye la longitud de una cuerda en el sonido percibido?, ¿y la masa de las cuerdas?
- ¿Cuáles de las variables mencionadas cambia al pulsar una cuerda de guitarra en un determinado traste V , λ , f ?
- Si toca una cuerda levemente en su centro mientras la frota con el arco un violinista puede producir una nota exactamente una octava arriba de aquella

para la cual la cuerda se afinó, es decir, una nota con una frecuencia exactamente el doble. ¿Cómo es esto posible? (En la guitarra se logra un efecto parecido)

- Algunos instrumentos de cuerda tienen pares de cuerdas iguales. Cuando se puntea una cuerda, la otra comienza a vibrar a la misma frecuencia, aunque no fue tocada. ¿Cómo es esto posible?

Anexo B: Ondas en Cuerdas y Tubos (con el uso PC)

En esta propuesta se integra la computadora en las modalidades de adquisición de datos y simulación a una práctica tradicional de laboratorio. Se utiliza material para la enseñanza de ondas mecánicas (cuerdas y tubos), incorporando el uso de programas adecuados para generar funciones y recuperar datos con la utilización de la placa de sonido de la PC.

➤ **Materiales**

- Específico para cada experiencia: tubo de Kundt, ondas en cuerdas (Anexo A).
- PC con placa de sonido y parlantes potenciados. Programas para generar oscilaciones senoidales y simulador de osciloscopio de libre adquisición en Internet.

➤ **Procedimiento**

Además de los indicados en las prácticas correspondientes.

*PC utilizada como osciloscopio*¹

Se utiliza para recolección de datos el soft Oscilloscope for Windows v. 2.51 disponible en www.mitedu.freemove.co.uk/Prac/winscope.htm, con la placa de sonido.

La fuente sonora senoidal (por simplicidad) se logra a través de los parlantes potenciados de una PC. En el caso de elegir otra forma de onda el tubo podría funcionar como “filtro pasa banda”. Se observan los refuerzos y atenuaciones mediante un micrófono conectado a la PC y el software correspondiente.

¹ Osciloscopio de dos canales y analizador de espectro, Winscope 2.51 diseñado por Konstantin Zeldovich. Ancho de banda de 20 a 20000 Hz. Ancho de buffer 50 ms. Entorno Windows 95 o posterior; placa de sonido; 300 Kb instalación y 150 Kb operación.

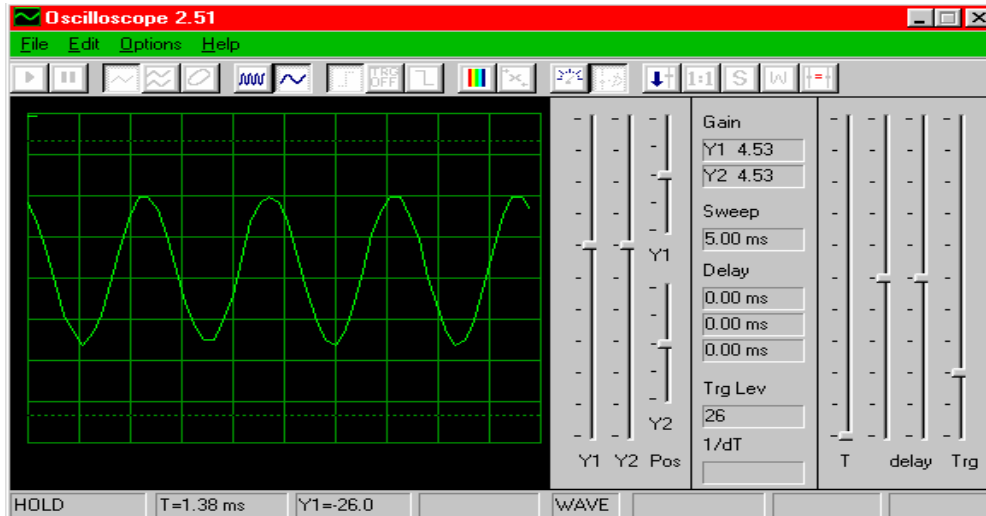


Foto1

En la figura se observa el modo “onda” de los datos ingresados. El botón en barras de colores (FFT) permite observar el analizador de espectro

La placa de sonido se utiliza como un convertidor analógico-digital, y, en el entorno Windows, se muestra un frente del osciloscopio con dos canales, que puede setearse para trabajarlo con base de tiempo.

Permite graficar oscilaciones y analizar el espectro sonoro mediante transformada rápida de Fourier *FFT* (ANEXO C). El espectro que corresponde a la señal senoidal de arriba se ve en la siguiente foto.

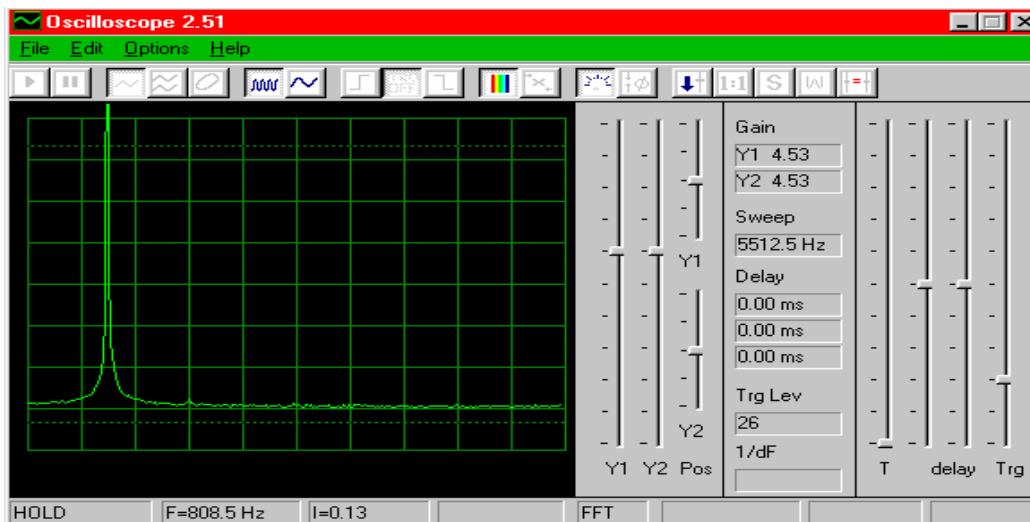


Foto2

Especificaciones del generador de sonido²:

Osciladores: para onda senoidal, triangular, cuadrada y ruido blanco. Rango de frecuencias: cuatro octavas.

Filtros: tipo pasa bajo y pasa alto 12/24 dB/octava, control de resonancia (este dispositivo puede afectar la medición por atenuación).

El soft simula un sintetizador analógico y se utiliza en el entorno Windows. Permite ejecutar varias notas simultáneamente, pero se ha privilegiado un tono puro senoidal. Este soft permite utilizar el teclado de la PC como teclado de piano. Se percibió el fenómeno de batido mediante la ejecución de dos notas adyacentes en el teclado del piano.

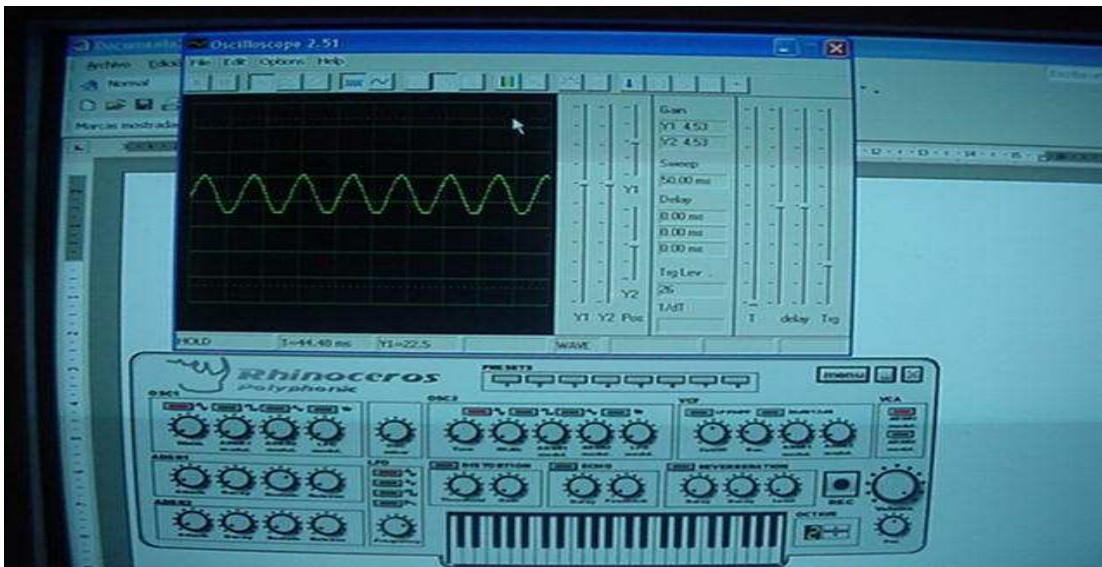


Foto 3

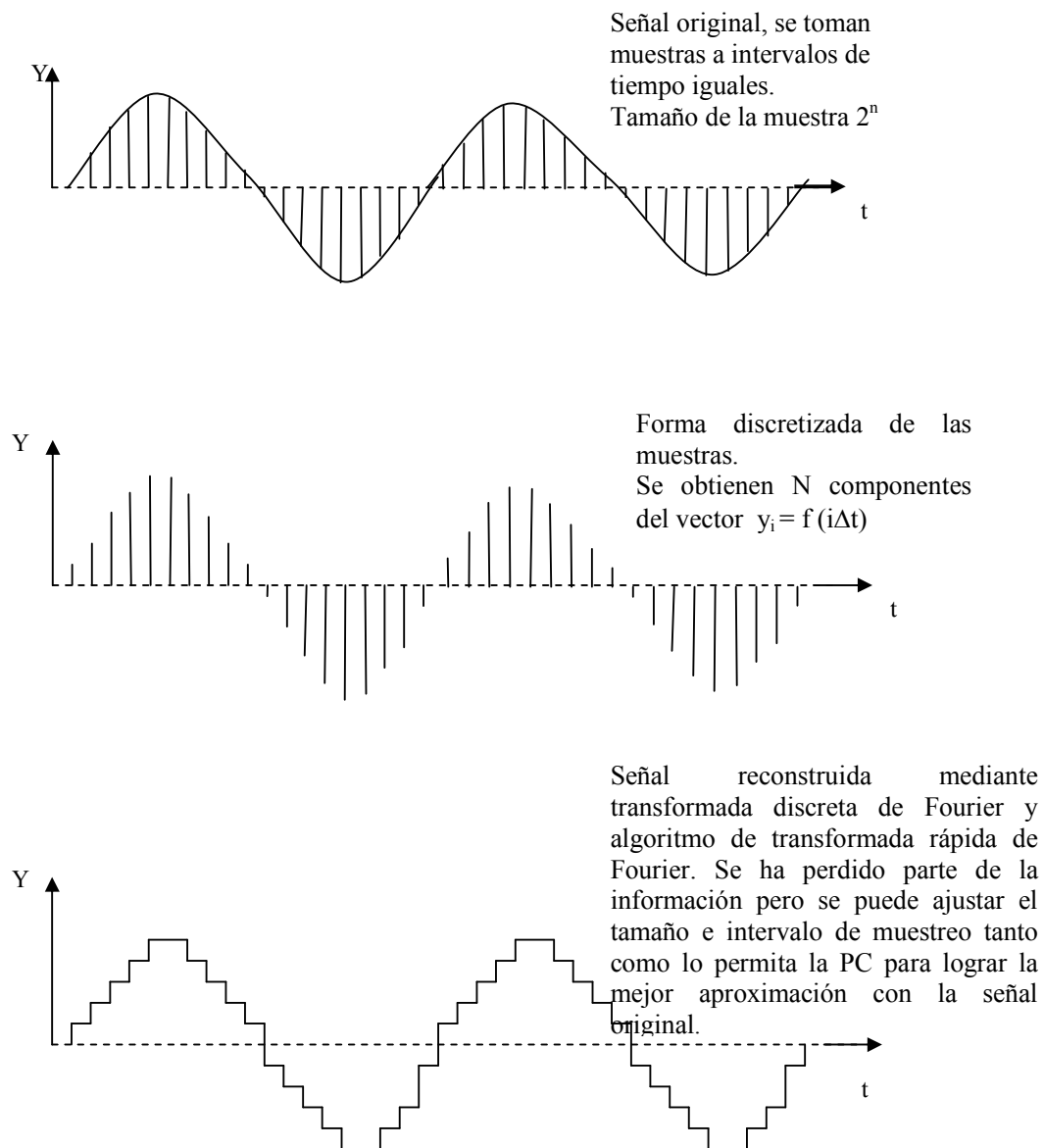
En la foto se muestra la pantalla del sintetizador y del osciloscopio tomando la oscilación en modo "onda"

² Requiere: procesador Pentium, 32 MB de memoria y espacio de disco 15 MB, placa de sonido. Entorno Windows 98, Internet explorer 5.0

Anexo C:

Elementos de “Transformada Discreta de Fourier y Transformada Rápida de Fourier (FFT)”.

El programa que utiliza la PC para mostrar el osciloscopio utiliza el algoritmo FFT para graficar el espectro de frecuencias de la señal. La idea es discretizar la señal y mediante una transformada discreta verificar qué frecuencias y con qué amplitudes recomponer la señal analizada. El proceso someramente se ilustra a continuación.



De la señal analógica se hace una conversión analógico-digital durante un tiempo de recolección. La información se codifica en cifras de 12 o de 14 bits. La frecuencia más alta que se puede codificar depende del tiempo del intervalo de muestreo. La idea se basa en el supuesto, de que es posible ajustar la forma de la función analizada, discretizando:

$$y_k = \sum c_j w_N^{jk} \text{ donde } c_j \text{ son coeficientes de Fourier (discreto) y } w_N = e^{2\pi i/N}.$$

La PC calcula los coeficientes c_j a partir de los vectores de muestreo y luego mediante un proceso de antitransformación, considerando coeficientes de subíndice par y de subíndice impar, grafica el espectro. La frecuencia mayor del espectro que se logra graficar es la mitad de la frecuencia que se muestrea (criterio Nyquist).

El analizador por “Transformada Rápida de Fourier” (FFT) procesa lotes de muestreo, toma datos en un buffer, después procesa este lote con el algoritmo de transformada discreta y luego grafica el espectro resultante. Se pueden dar “fugas”, por ejemplo que una señal senoidal pura se vea en el espectro como un pico, con un pequeño ancho de banda en vez de mostrarse como una línea vertical de una única frecuencia. Por lo tanto el espectro es aproximado, aunque se pueda controlar el ajuste, para que los resultados sean aceptables en la práctica.