

3. Implementación del prototipo

En esta parte describiremos la forma de construir el prototipo y las características con las que contará, cuáles son las funciones que cada subsistema debe cumplir y la forma de conjuntarlos.

3.1 Tubo acústico

El tubo acústico nos servirá para conducir y aislar las ondas sonoras que provienen de la computadora y que se perciben a través de la bocina. De esta manera reducimos las interferencias del medio sobre la onda. Además de que al ser de sección pequeña comparada con su longitud (1 a 10) se considera que las ondas que viajan a través de él son planas, esta consideración simplifica enormemente el tratamiento del sonido, pues pasa de una onda esférica en tres dimensiones, a una onda plana de una sola dimensión.

Existen experimentos anteriores en los cuales se utiliza un tubo similar, por ejemplo en el tubo de Kundt, pero la diferencia se centra en el hecho de que dicho tubo está cerrado por ambos extremos y convierte a la onda que proviene de la bocina en una onda estacionaria, utiliza además una especie de polvo fino (polvo de corcho o talco) para crear una huella de la onda y determinar de esta manera su longitud.

En nuestro caso, el tubo estará abierto por un extremo y en el otro lado estará la bocina, de manera que el micrófono se desplazará por el lado abierto. Se generará de este modo una onda viajera y es la que percibiremos a través del micrófono.

Para el caso de la resonancia puede también obstruirse el extremo contrario y generar una onda cuya frecuencia cumpla¹⁵:

$$f = \frac{c}{4L} \quad (\text{Tubo cerrado por ambos extremos}) \quad \text{Ec. (35)}$$

O en su defecto, mantener un extremo abierto y entonces se debe cumplir:

$$f = \frac{c}{2L} \quad (\text{Tubo abierto en un extremo}) \quad \text{Ec.(36)}$$

¹⁵ Pérez Miñana José, Compendio práctico de Acústica. Editorial Labor. Barcelona España 1969. p. 115

3.1.1 Parámetros del tubo acústico

Diámetro, longitud y pared

En la construcción de nuestro prototipo utilizamos un tubo de acrílico, pudiendo ser también de *PVC* como en algunos experimentos, pero aprovecharemos que la pared de acrílico es de mayor espesor [3 mm] y más resistente, aunque el prototipo no esté sometido a grandes esfuerzos (salvo en la resonancia) es conveniente que tenga una buena resistencia mecánica.

Para la selección del tubo debemos tener en cuenta el rango de frecuencias que vamos a utilizar. Si nuestro objetivo es medir la velocidad del sonido y como el espectro audible va de aproximadamente 20 a 20 000 [kHz] debemos seleccionar sólo una parte del rango pues necesitaríamos dos tubos para abarcar todo el espectro.

Para bajas frecuencias tenemos que la longitud de onda es muy grande, por ello necesitaríamos que el tubo fuera bastante largo (en el caso más crítico de 20 [Hz] necesitaríamos uno con una longitud de 2.125 [m] como mínimo) pero esto haría que el prototipo fuera difícil de almacenar y maniobrar además de que para nuestros fines no es necesario registrar todas las frecuencias, pues la velocidad de propagación del sonido no es función de la frecuencia¹⁶.

De acuerdo a los valores comerciales de los diámetros de tubo de acrílico y los diámetros de bocinas, seleccionamos el valor de 4 pulgadas (0.1 [m]). Dado que la longitud del tubo debe ser por lo menos 10 veces el diámetro, utilizamos un tubo de 1[m] de longitud.

De acuerdo al criterio de la siguiente ecuación, el diámetro del tubo debe ser mucho menor que la longitud de onda que deseamos conocer¹⁷:

$$a \leq \frac{\lambda}{1.71} \quad \text{Ec. (37)}$$

a: diámetro del tubo

Con el tubo de 0.1 [m] de diámetro y 1 [m] de longitud podemos trabajar un rango de frecuencias que va desde los 200 hasta los 2000 [Hz]. Para frecuencias superiores a los 2000 Hz tendríamos que utilizar un tubo de menor diámetro y longitud. Al aumentar la frecuencia disminuye la longitud de onda y eso haría que las distancias a registrarse fueran muy pequeñas, del orden de algunos centímetros.

¹⁶ Roosing Thomas. Springer Handbook of Acoustics. Edit. Springer New York. U.S.A. 2007. p. 143

¹⁷ Estimación de la velocidad del sonido en el aire, Universidad de Sevilla p.4

3.1.2 Diseño

El tubo acústico se diseñó de acuerdo al siguiente esquema:

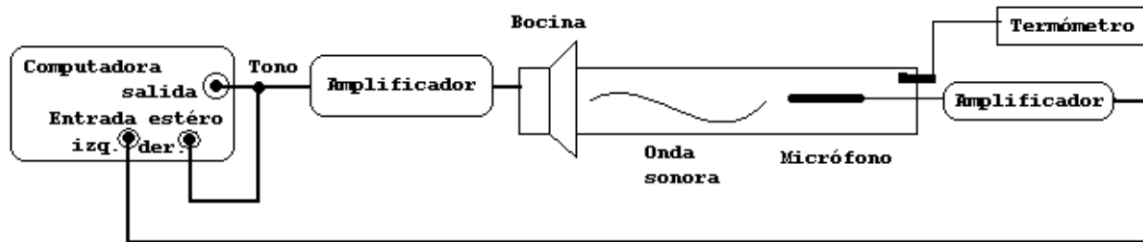


Figura 19. Esquema del tubo acústico

El diseño está basado en el Tubo de Kundt, con la diferencia de que no se tiene una membrana sujeta a un pistón de frecuencia fija ni está cerrado completamente el tubo, no se produce una onda estacionaria pues la medición de la longitud de onda se hará a partir del desplazamiento del micrófono dentro del tubo y no de la “huella” dejada por el talco en el Experimento de Kundt.

La interfase en la computadora (que incluye las figuras de Lissajous, una representación en tiempo y unos indicadores de desfase) nos permitirá determinar cuando el micrófono se haya desplazado el equivalente a media longitud de onda del tono que estamos enviando.

En el diseño del prototipo se contemplan las siguientes etapas, ver también la figura:

- a) Generación de la onda conocida (tono)
- b) Amplificación de potencia y salida hacia el interior del tubo
- c) Recepción de la onda a través del micrófono
- d) Amplificación de la onda captada y retorno para proceso
- e) Visualización de la onda
- f) Medición del desplazamiento del micrófono
- g) Sensado de la temperatura

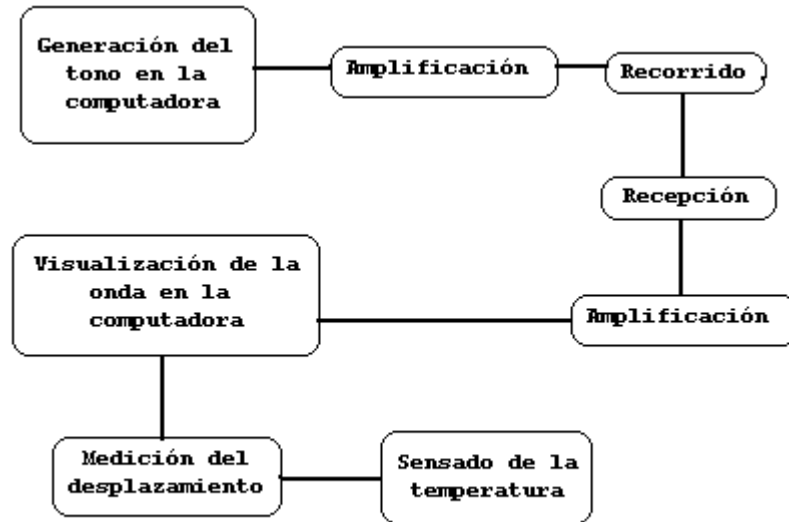


Figura 20. Etapas de operación del prototipo

- a) En la etapa de generación de onda, se requiere un tono, esto es, una señal senoidal de frecuencia fija y previamente determinada que debe generarse en la computadora y que será enviada a través de un canal en la salida estéreo de la tarjeta de sonido de la misma computadora. Esta salida tendrá aproximadamente entre 500 [mV] y 1[V].
- b) En la etapa de amplificación de potencia se le dará a la señal el voltaje y la corriente necesarios para que pueda salir por la bocina, viajar a través del tubo y captarse en el micrófono, procurando que la amplificación sea lo más nítida posible.
- c) En la etapa de recepción en el micrófono tendremos una onda con un desfase respecto a la que proviene de la bocina, el micrófono deberá ser lo suficientemente pequeño para que se pueda desplazar en el interior del tubo sin tocarlo y captar la señal con el menor ruido posible.
- d) La segunda etapa de amplificación correspondiente al micrófono será capaz de darle el voltaje necesario a la señal recibida de manera que pueda regresar a la computadora por un canal de su entrada estéreo para el procesamiento.
- e) Una vez que la señal captada por el micrófono ya se encuentra en la computadora, se procesará mediante el programa de cómputo expresamente construido para que la onda generada dentro de la misma computadora y la onda recibida por el micrófono puedan ser visualizadas y comparadas.
- f) Cuando ya se hayan comparado las ondas de salida y entrada, será necesario realizar una medición, en nuestro trabajo esta medición se hará con una regla con resolución en milímetros, pero de forma adicional se propone un sistema teórico mediante el cual podría hacerse esta medición de manera automática.

- g) Una vez conocida la longitud de onda será necesario registrar también la temperatura a la cual se realizó el experimento, esto debido a que la velocidad del sonido es función de la temperatura, este valor se podrá conocer con el termómetro digital implementado en el prototipo para este fin.

3.1.3 Construcción

De acuerdo al diseño del tubo acústico (variación del tubo de Kundt) para su construcción se requiere de:

- Un soporte general. En este caso es una tabla que sujeta el tubo, los amplificadores, a la bocina y la caja de control. Su principal finalidad es que no existan “piezas sueltas” que generen errores o pérdidas.
- Un tubo de acrílico de 0.1 [m] de diámetro, 1[m] de longitud y 3 [mm] de espesor.
- Una bocina de 0.1 [m] de diámetro con la potencia e impedancia adecuados para el amplificador.
- Un amplificador de potencia capaz de alimentar a la bocina para que ésta transmita los tonos que deseamos estudiar a través del tubo y que el micrófono los pueda captar. Debe ser además regulable en cuanto a la amplitud, pues se desea que sólo el micrófono capte el sonido, ya que un tono “puro” provoca una sensación desagradable al oído y a la larga ocasiona fatiga auditiva.
- Un preamplificador de micrófono. Este deberá ser capaz de dotar del voltaje necesario a la señal que percibe el micrófono para que la computadora pueda comparar el tono generado y el tono recibido, a su vez, se pretende también que ambas ondas tengan la misma amplitud para que las figuras de Lissajous se aprecien mejor. Dado que el micrófono se aleja y se acerca a la bocina, este desplazamiento genera una “atenuación” o “crecimiento” de la amplitud por lo tanto, el preamplificador también deberá modificar la amplitud de la señal que proviene del micrófono.
- Un micrófono de tipo electret, para que pueda desplazarse en el interior del tubo sin problemas, con su respectiva guía y su cable de conexión.
- Un termómetro. Para conocer el valor de la temperatura del ambiente en el que estamos llevando a cabo el experimento. Esto es importante pues variaciones de cinco a diez grados hacen una diferencia considerable en el valor de la velocidad del sonido.

Se desea que el prototipo no sea muy voluminoso, pues en experimentos previos, se observó que si el tubo es demasiado largo (2 [m] o más) se hace complicado su almacenamiento e incluso su operación pues se requieren lugares abiertos y el prototipo

está pensado para operarse dentro de laboratorios cerrados cuyas dimensiones no son tan extensas.

El prototipo, que se muestra en figura 21, debe contar con una caja de control que contenga todos los circuitos para que estos se protejan y que permita al usuario un fácil manejo del experimento.

De esta caja también parten los cables de conexión con la computadora. Esta comunicación se hará a través de la tarjeta de sonido de la propia computadora por el canal *line in* (estéreo). En un canal se envía el tono que reproduce el amplificador y en el otro, el tono que se recibe en el micrófono.



Figura 21. Vista lateral del prototipo

El tubo acústico se montó sobre una base de madera de 2.5 [cm] de espesor y 1.80 [m] de longitud, con dos soportes para el tubo y dos para la guía del micrófono. En el primer soporte se montó la bocina y se selló completamente dentro de una caja para evitar pérdidas. En el segundo soporte se montó el sensor del termómetro. (Ver figura 22)

Sujeta a la base de madera va también la caja de control, en ella se encuentran los dos amplificadores con sus controles de volumen, sus entradas, sus salidas y el termómetro digital.

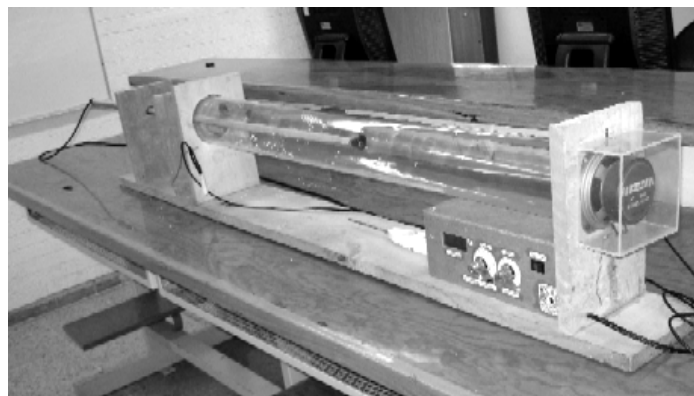


Figura 21a. Prototipo (Variación del tubo de Kundt)

La guía del micrófono es de tubo galvanizado y permite el desplazamiento del micrófono dentro del tubo de acrílico a través de los soportes auxiliares.

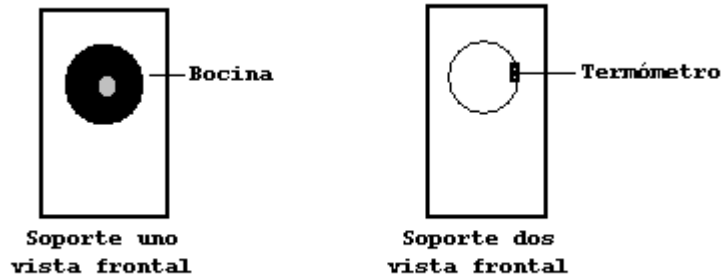


Figura 22. Vista frontal de los soportes del tubo

3.2 Alimentación

Para operar los amplificadores y el termómetro digital es necesaria una fuente que nos proporcione el voltaje y la corriente que necesitamos en cada uno de los circuitos.

Debido a que para construir una fuente simétrica se requiere una mayor cantidad de circuitos y considerando que el primer amplificador no requiere demasiada potencia, decidimos implementar una fuente de voltaje positivo con una corriente máxima de 1 [A].

Esta fuente será pequeña y se diseñara de forma que proporcione la potencia que cada uno de los circuitos requiere.

3.2.1 Requerimientos

De acuerdo a las especificaciones de gran número de amplificadores comerciales, estos se diseñan para operar con voltajes positivos de al menos 12 [V] o simétricos de ± 6 [V], llegando incluso a alimentaciones de hasta 32 [V].

Decidimos implementar en nuestro prototipo el amplificador comercial TDA 2030 que requiere una alimentación de al menos 12 [V].

También emplearemos un circuito para preamplificar la señal que proviene del micrófono y cuya alimentación puede ser desde 8 hasta 12 [V], utilizaremos este último voltaje por practicidad.

El termómetro requiere de 9 [V] para su operación, así que empleando el mismo voltaje de la fuente (12[V]) podemos reducir hasta 9 [V] para que el termómetro opere adecuadamente.

Como el único circuito que demandaría una corriente importante es el amplificador de potencia y de acuerdo a sus especificaciones, la corriente demandada estará por debajo de 1[A].

3.2.2 Diseño

De acuerdo a las especificaciones del TDA 2030 para una alimentación de 12 [V] y una bocina de 8 [Ω] se espera un consumo de corriente de 500 [mA] en promedio por lo que la fuente deberá entregar 12 [V] y al menos 500 [mA]. Deseamos obtener también un rizo del 10%, contamos con un transformador de 12 [V] a 1 [A].

Para determinar el valor del capacitor de la fuente usamos la siguiente fórmula:

$$C = \frac{5I}{fV_{\max}} \quad \text{Ec.(38)}$$

C: capacitor de la fuente;

f: frecuencia;

I: corriente;

V_{\max} = Voltaje máximo

$$V_{\max} = V_i * 1.4142$$

$$V_i = 12 \text{ [V]}$$

$$V_{\max} = 12(1.4142) = 16.97 \text{ [V]}$$

$$C = \frac{5(0.5)}{60(16.97)} = 0.002455$$

$$\underline{C = 2\ 455 \text{ [}\mu\text{F]}} \quad \text{Ec. (38a)}$$

3.2.3 Implementación

La fuente será implementada de acuerdo al siguiente diagrama:

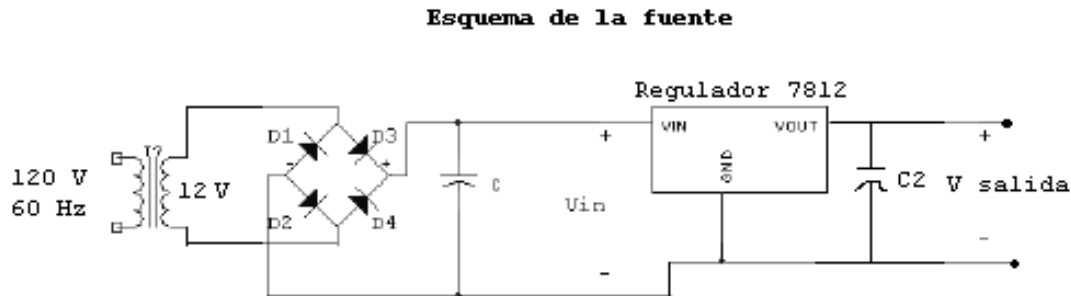


Figura 23. Diagrama de la fuente de voltaje

Para su construcción usaremos lo siguiente:

- 1 puente de diodos de 1 [A]
- 1 transformador de 120 a 12 [V] a 1 [A]
- 1 regulador de la serie 7812
- 1 capacitor de 2700 [μ F]
- 1 capacitor de 0.1 [μ F]

Primero se arma el circuito en la tableta de prueba, se verifica que provea los 12 [V] que se requieren y se le conecta una resistencia de 8 [Ω] para tratar de que dé más de 500 [mA] de corriente.

Una vez que supera las pruebas de voltaje y corriente está lista para ser implementada en el circuito impreso.

3.3 Amplificador de potencia

Como se mencionó anteriormente, emplearemos un amplificador comercial de circuito integrado que nos proporcionará la potencia suficiente para que la onda sonora pueda viajar por el tubo y sea percibida por el micrófono.

El TDA2030 es un amplificador capaz de suministrar hasta 14 [W] dependiendo de la alimentación y la bocina que se emplee. La configuración que nosotros aplicaremos

(alimentación positiva únicamente y una bocina de 8 [Ω]) se especifica en la nota de aplicación del mismo circuito, ver la figura 24.

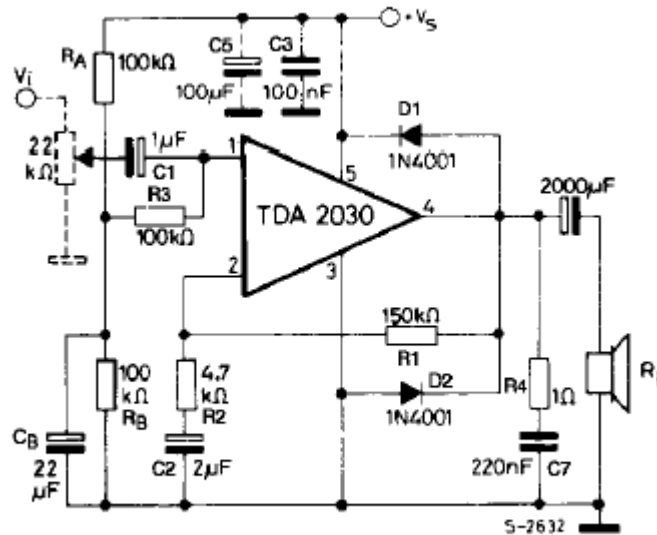


Figura 24. Diagrama del amplificador TDA2030

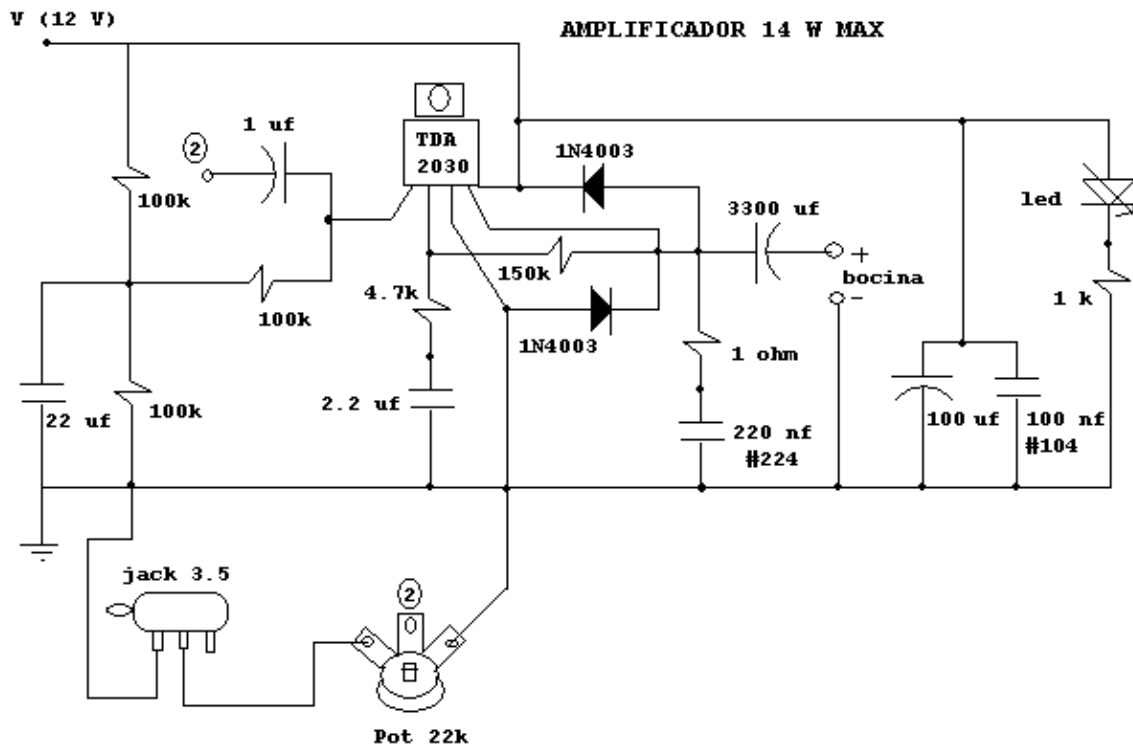


Figura 25. Diagrama del amplificador implementado

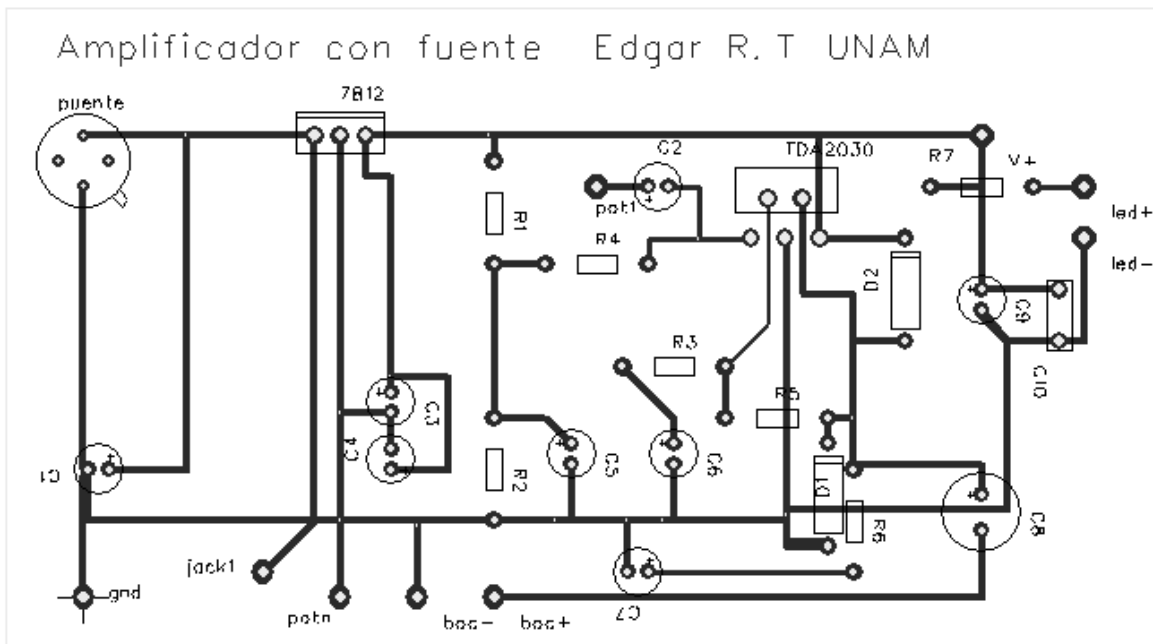


Figura 26. Circuito impreso de fuente con amplificador

El amplificador es monoaural, de tal manera que solamente maneja un canal, como la señal que proviene de la computadora también lo es, a la salida del amplificador solamente tenemos una señal.

El amplificador TDA2030 cuenta también con un control de volumen, este nos servirá para regular la amplitud de la onda que viaja por el tubo para que no se sature ni se distorsione y pueda ser captada por el micrófono.

El circuito se muestra en la figura 25 y el impreso de la tableta fenólica se muestra en la figura 26.

3.3.1 Potencia de operación

De acuerdo con las especificaciones de la bocina:

Potencia máxima: 50 [W]

Impedancia: 8 [Ω]

Respuesta en frecuencia: 20 a 25000 [Hz]

Sensibilidad: 1 [W] / 1 [m]: 89 [dB]

De la Ec. (19) $P = I^2 Z$

$$I = \sqrt{\frac{P}{Z}} \qquad \underline{I_T = 2.5 A} \qquad \text{Ec (19a)}$$

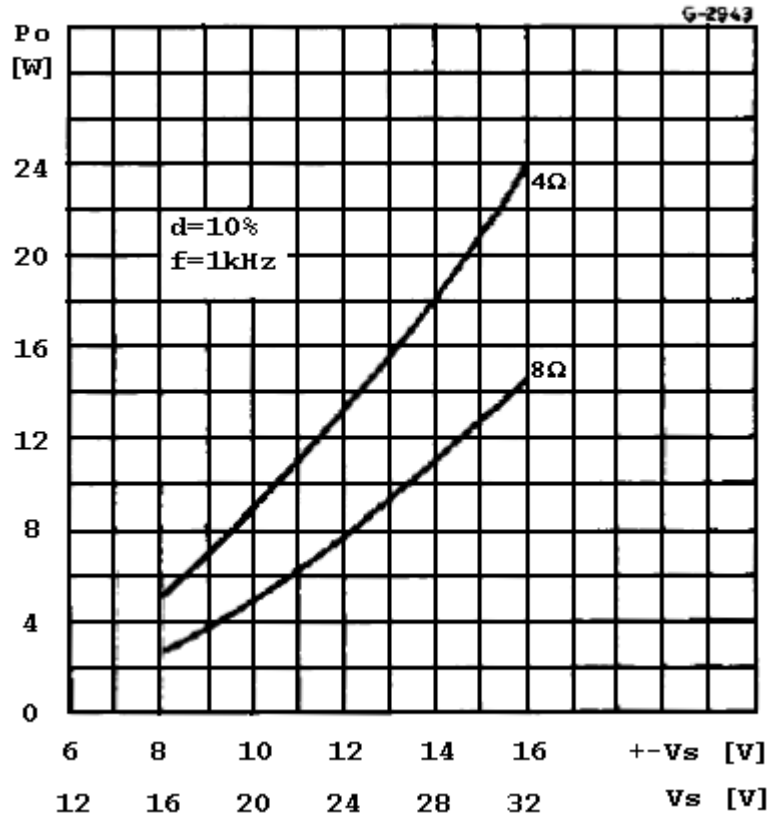


Figura 27. Potencia de salida vs. Voltaje de alimentación TDA2030

Esta es la corriente teórica que la bocina puede soportar,. Pero de acuerdo a la especificación del TDA2030, tratándose de una bocina de 8 [Ω] y con una alimentación de 12 [V] tendríamos alrededor de 2 [W] de potencia (ver figura 27).

Con esta nueva potencia práctica del amplificador:

$$I = \sqrt{\frac{2[W]}{8[\Omega]}} = 500[mA] \qquad \text{Ec (19b)}$$

Este valor está por debajo de la corriente que puede suministrar la fuente (1 [A] máx) de modo que el amplificador y la bocina operarán sin problemas y sin riesgo de quemarse.

3.4 Preamplificador para el micrófono

El preamplificador nos va a servir para darle el voltaje suficiente a la señal que proviene del micrófono y que la interfaz pueda procesarla. Debido a que al desplazarse el micrófono dentro del tubo existe una variación en la amplitud de la onda, el preamplificador debe ser capaz de compensar esa variación de modo que la onda que capta el micrófono tenga la misma amplitud que la señal que se envía por la bocina.

3.4.1 Diseño del preamplificador

En otros experimentos previos, se utilizaron micrófonos de medición comerciales. Pero en nuestro caso, deseamos que todo el equipo de medición sea barato y de ser posible propio. Entonces nos dimos a la tarea de implementar un preamplificador para micrófono.

En el caso del micrófono utilizamos un *electret*, debido en gran parte a su bajo costo y fácil operación, como es de suponerse, este micrófono tiene también cierta esperanza de vida, de modo que en algún momento (algunas décadas) será necesario cambiarlo. Otra ventaja del *electret* es que por su tamaño puede deslizarse fácilmente en el interior del tubo, también registra un buen rango de frecuencias (50 a 15000 [Hz]), adecuado para nuestros fines si consideramos que nuestro rango estimado de trabajo es de entre 200 y 2000 [Hz].

Como la señal que proviene directamente del micrófono es débil, será necesario preamplificarla para que la computadora pueda leerla y procesarla. Una opción podría ser mandar la señal del *electret* directamente a la computadora por la entrada de micrófono, pues las tarjetas de sonido de las computadoras cuentan con un preamplificador, sin embargo, nos conviene mandar ambas señales (micrófono y bocina) por la línea estéreo de la entrada *line in* (cualquier computadora cuenta con una) para procesarlas. De este modo, en lugar de usar dos entradas distintas utilizando sólo un canal por entrada, utilizamos una sola entrada con sus dos canales (izquierdo y derecho).

Por supuesto que, al variar la posición del micrófono dentro del tubo, mientras más alejado esté el micrófono de la bocina, más débil será la amplitud de la señal que reciba. La amplitud también cambia en función de la posición del micrófono dentro del tubo. Por ello, es necesario *compensar* estas diferencias de amplitud que el micrófono capta y que deben ser mínimas, de modo que la señales recibidas de la bocina y el micrófono tengan la misma magnitud (o lo más cercanas posible), esto ayudará a una mejor visualización en las figuras de Lissajous dentro del programa.

El preamplificador de la computadora puede compensar estas diferencias pero es necesario salir del programa para cambiar la selección del volumen. Por esta razón, nuestro preamplificador del micrófono debe tener un control de volumen externo e independiente para que pueda ser modificada la amplitud de la señal en cualquier momento sin necesidad de salir de la aplicación del programa.

Para implementar nuestro preamplificador utilizamos un amplificador operacional comercial: el LM833.

Este circuito integrado se comporta como la mayoría de los amplificadores operacionales conocidos (741, TL081), con la diferencia de que al estar diseñado para trabajar con señales de audio, tiene poco ruido y baja distorsión.

Como lo que nos interesa es amplificar únicamente el voltaje de la señal que proviene del micrófono, podemos utilizar el amplificador operacional en una configuración sencilla sin necesidad de aplicarle una etapa de potencia (o ganancia de corriente), lo que además podría dar como resultado que se quemara la tarjeta de sonido de la computadora.

Entre las múltiples configuraciones del amplificador operacional, utilizaremos la de amplificador inversor, por su sencillez y utilidad.

Es cierto que en esta configuración, existe un desfase entre la señal recibida a la entrada y la señal de salida, para ser exactos de 180 grados (invertida) por lo que la señal de salida no solo será mayor en voltaje sino que además tendrá un desfase.

En nuestro experimento nos interesa conocer la fase de las señales de la bocina y el micrófono pero a decir verdad, lo que nosotros veremos y distinguiremos será únicamente la diferencia de fase que exista entre la señal del micrófono y de la bocina que se ven en el programa.

Entre la señal o tono que emite la computadora y la que sale por la bocina existe un retardo o diferencia de fase, pues al pasar por el amplificador de potencia, la señal se “atrassa” cierta cantidad de tiempo, dependiendo de las características internas de los elementos del amplificador mismo.

Otra fuente de retraso es el tiempo en el que llega la señal a la computadora y el tiempo que tarda el programa en mostrar dicha señal. Pero al visualizarse en la interfaz del programa, ambas señales quedan compensadas, de tal modo que, cuando en la pantalla de la computadora vemos que las señales están en “fase”, lo están solamente para el programa que las procesa, al recorrer el micrófono hasta la posición de “desfase de 180 grados” las señales se habrán recorrido exactamente 180 grados entre sí respecto a la posición, pues todos los retardos entre los amplificadores siguen siendo los mismos.

3.4.2 Implementación del preamplificador

El circuito del preamplificador es el que se muestra en la figura:

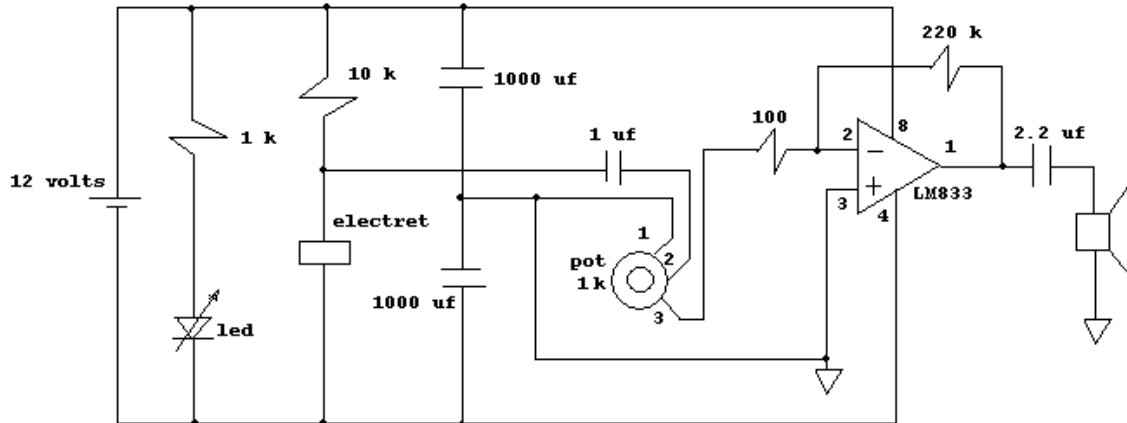


Figura 28. Preamplificador de micrófono

Para alimentar el circuito empleamos la fuente de 12 [V], pero colocamos un arreglo de capacitores en serie, para tener un voltaje positivo y otro negativo, respecto a un punto de referencia neutro. Esto porque el amplificador necesita una alimentación simétrica.

De acuerdo a la Ecuación 32, la ganancia de voltaje A_v sería:

- Para cuando el potenciómetro está en $R = 0 [\Omega]$, $Z = 100 [\Omega]$

$$A_{v_{\max}} = \frac{220000}{100} = 2200 \quad \text{Ec. (32a)}$$

- Para cuando el potenciómetro está en $R = 1000 [\Omega]$, $Z = 1100 [\Omega]$

$$A_{v_{\min}} = \frac{220000}{1100} = 200 \quad \text{Ec. (32b)}$$

A la entrada del amplificador colocamos un capacitor de 1[uf] para eliminar la componente de corriente directa debida a la polarización del micrófono *electret* y a la salida colocamos un capacitor de 2.2 [µf] para eliminar la componente de directa debida a la polarización del amplificador operacional.

Dentro del circuito instalamos un *led* para indicar el funcionamiento del preamplificador.

El electret está polarizado con una resistencia de 10 [kΩ].

De acuerdo a la Ecuación 25, la corriente de salida es directamente proporcional al voltaje de salida e inversamente proporcional a la resistencia R2.

Como V_e depende de la posición del micrófono y de la potencia de la bocina, debemos tener cuidado de no colocar el amplificador a su máxima potencia ni el preamplificador a su máximo nivel para no tener un voltaje de salida demasiado alto y en consecuencia distorsionado (recortado).

Necesitamos que la salida del preamplificador sea de alrededor de 1 [V] (esto se logra mediante el control de ganancia del preamplificador y la posición del micrófono dentro del tubo), el amplificador recibe como máximo 1[V] de entrada, por lo que la señal para comparar es también de 1 [V]. Se desea que, para una mejor visualización de las figuras de Lissajous y en general de las ondas en el tiempo y su comparación, las amplitudes sean iguales.

Para un voltaje de salida del preamplificador de 1 [V] tendríamos:

$$I_s = \frac{1[V]}{220[k\Omega]} = 4.5[\mu A] \quad \text{Ec. (25a)}$$

Es una corriente pequeña que no representa riesgo para la tarjeta de sonido de la computadora. (Siempre se buscará mantener el voltaje del preamplificador en 1 [V] aunque podría llegar hasta los 10 [V] sin que esto represente peligro para la tarjeta de sonido.)

3.5 Termómetro digital

3.5.1 Justificación

De entre las muchas formas que podemos medir la temperatura seleccionamos el termómetro digital debido a que elimina los errores de resolución y paralaje y porque tenemos también forma de proveer potencia al circuito adicional del termómetro.

La medición de la temperatura se justifica por el hecho de que la velocidad del sonido cambia de acuerdo a la temperatura del medio donde se propaga.

Si la velocidad del sonido a cero grados es 331.5 [m/s] y realizamos la medición en un ambiente que está a 20 [°C], tendríamos que:

$$\% E = \left| \frac{c_{teo} - c_{exp}}{c_{teo}} \right| \times 100 \quad \text{Ec.(39)}$$

c_{teo} = Velocidad teórica a 0 [°C]= 331.5 [m/s]

c_{exp} = 343.4 [m/s] (en un ambiente a 20 [°C], con el prototipo)

$$\% E = \left| \frac{331.5 - 343.5}{331.5} \right| \times 100 = 3.61 \quad \text{Ec. (39a)}$$

A este error hay que sumarle los que también existen en la apreciación y comparación de las ondas en el tiempo y en la medición de la distancia.

3.5.2 Implementación

Para realizar la medición de la temperatura empleamos el termómetro digital que aparece como nota de aplicación del circuito integrado (C.I) ICL 7106.

El C.I. ICL 7106 es un convertidor analógico digital con salida a *display* líquido que se alimenta con 9 [V].

Esto representa varias ventajas:

- ❑ Al contar con una fuente de 12 [V] podemos reducir hasta 9 [V] mediante un regulador y así alimentar el circuito del termómetro.
- ❑ Como ya cuenta con una salida a decodificador y un controlador para *display* líquido, sólo será necesario conectar el display sin agregar ningún otro circuito adicional.
- ❑ Posee un rango de trabajo de 0 a 200 [mV] o de 0 a 2 [V] por lo que podemos emplear un sensor cuya salida esté dentro de estos rangos.

Para detectar la temperatura emplearemos el C.I LM35 que es un sensor cuya lectura esta dada ya en grados Celsius y que tiene una respuesta (teóricamente lineal) de 10 [mV] por cada grado.

El esquema del termómetro se muestra en la siguiente figura:

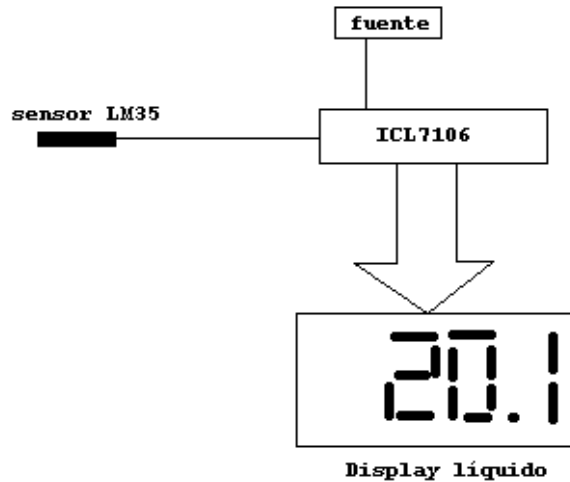


Figura 29. Termómetro digital con ICL7106

Para que el ICL7106 opere como lo deseamos debemos configurarlo de acuerdo a lo siguiente:

- Escala de 0 a 2 [V]
- Voltaje de alimentación de 9 [V]

Seguimos la nota de aplicación del mismo C.I. tal como se muestra en la figura 30.

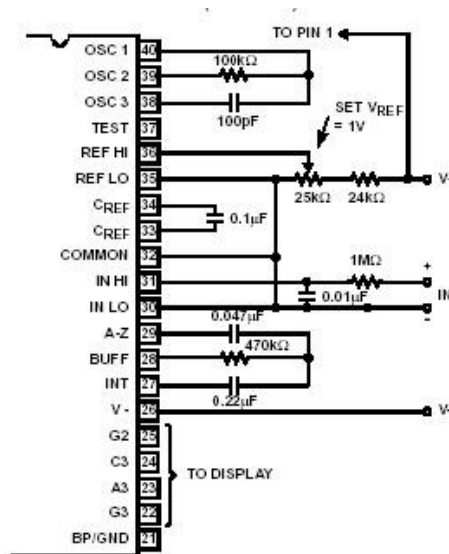


FIGURE 15. ICL7106 AND ICL7107: RECOMMENDED COMPONENT VALUES FOR 2V FULL SCALE

Figura 30. Configuración del ICL7106 de escala 0 a 2 [V]

Después de seguir la recomendación de los valores para configurar el ICL7106, es necesario realizar otros ajustes al circuito para que opere de manera correcta. Se debe reducir la tensión de 12 a 9 [V], polarizar el sensor LM35, colocar el *display* y un *led* para indicar el funcionamiento del circuito.

Las conexiones totales de los circuitos integrados y los valores de los componentes pasivos se muestran en el siguiente diagrama:

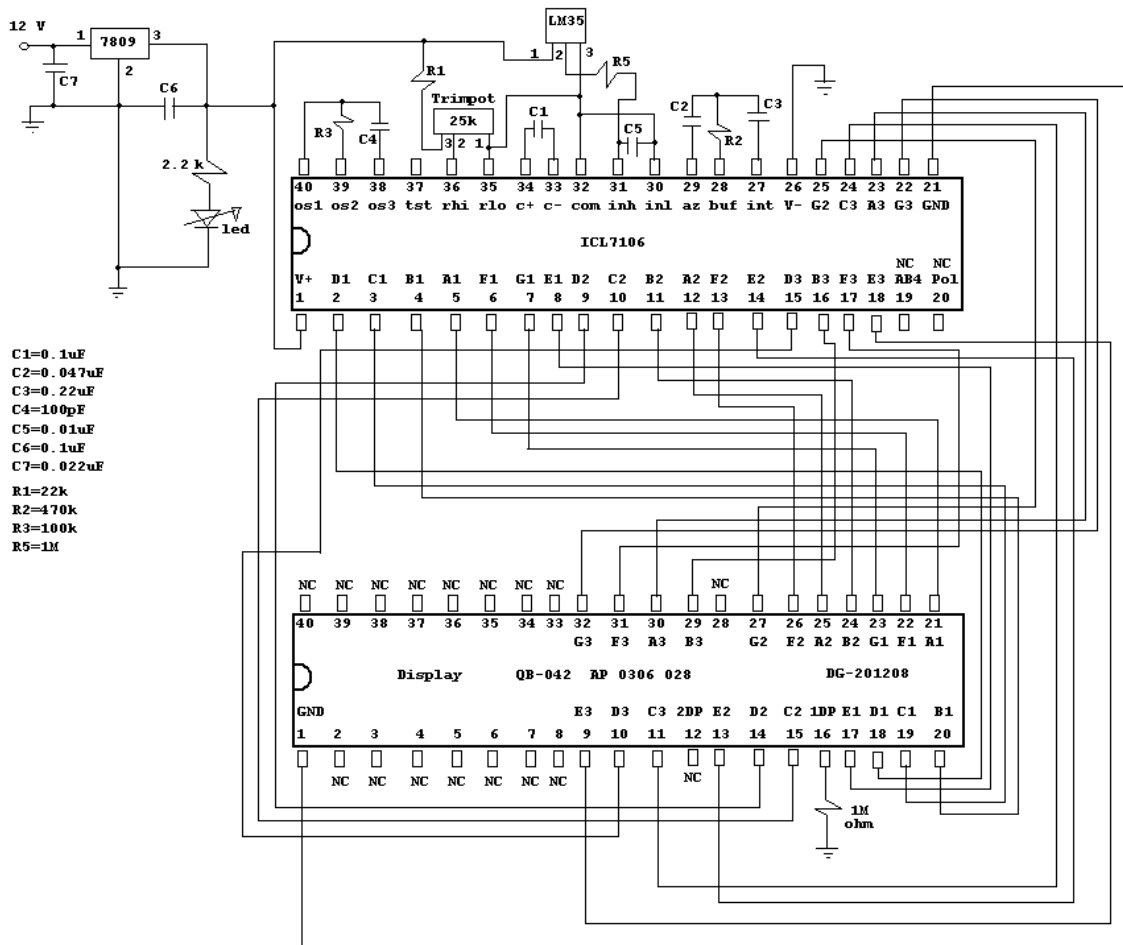


Figura 31. Diagrama del termómetro digital

Después de alambrear el circuito en una tableta de práctica y verificar su funcionamiento de manera general, se procederá a imprimir en tableta fenólica el circuito del termómetro digital.

El circuito impreso mide aproximadamente 10 x 15 [cm], irá dentro de la caja de control y no será manipulable de ningún modo por el usuario. Únicamente se podrá consultar el valor de la temperatura en el display.

3.5.3 Calibración

Los ajustes necesarios se harán después de calcular la sensibilidad del termómetro. Para este fin será necesario hacer una serie de mediciones de temperatura utilizando como termómetro de referencia un termopar.

Para tal efecto, se calentó agua dentro de un recipiente y se colocaron el termómetro digital y el termopar juntos, ver la figura 32.

El termopar se utilizó como instrumento patrón.

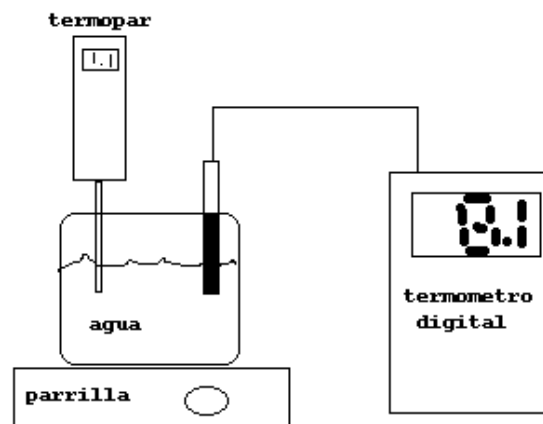


Figura 32. Calibración del termómetro

Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Termopar [°C]	Termómetro digital [°C]
20	20.9
25	25.4
30	30.7
35	35.9
40	40.3
45	46.6
50	50
55	56.4
60	63

Tabla 1. Valores de temperatura obtenidos para la calibración

Utilizando el programa *Matlab*, obtuvimos el modelo matemático del termómetro digital.

El modelo se muestra gráficamente en la figura 33.

```
>> x=[20,25,30,35,40,45,50,55,60]
x =
    20    25    30    35    40    45    50    55    60

>> y=[20.9,25.4,30.7,35.9,40.3,46.6,50,56.4,63]
y =
    20.9000    25.4000    30.7000    35.9000    40.3000    46.6000    50.0000
    56.4000    63.0000

>> p=polyfit(x,y,1)
p =
    1.0357   -0.4044

>> plot(x,y,'ro')

>> X =[20:5:60]
X =
    20    25    30    35    40    45    50    55    60

>> Y = 1.0357*X - 0.4044;
>> hold on
>> plot(X,Y)
```

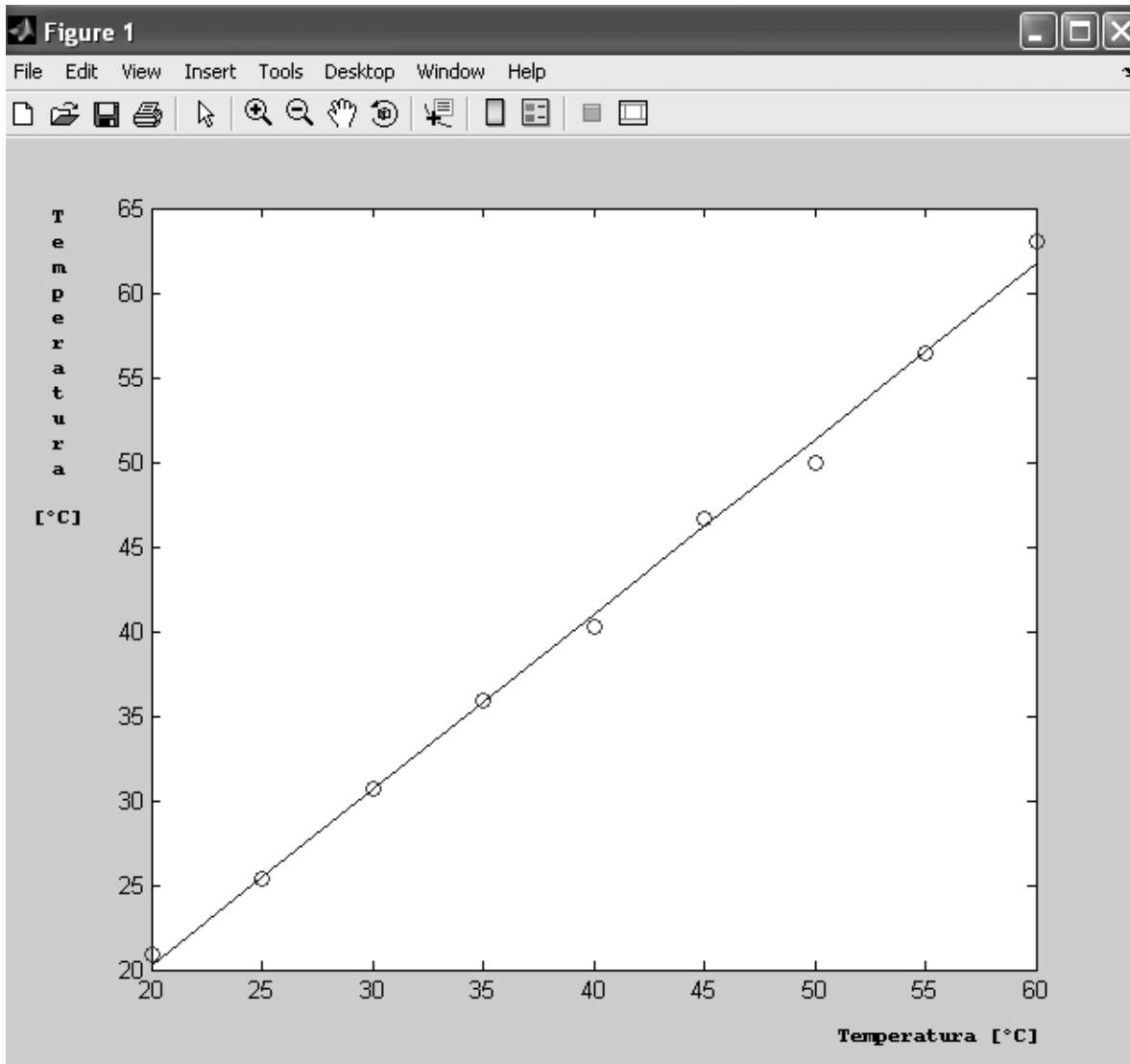


Figura 33. Modelo matemático del termómetro digital.

Para conocer la sensibilidad ideal del termómetro tenemos:

$$S = \frac{\Delta T_{td}}{\Delta T_{tp}} \quad \text{Ec.(40)}$$

S: Sensibilidad

ΔT_{td} : incremento de la temperatura del termómetro digital

ΔT_{tp} : incremento de la temperatura del termopar

Para el rango indicado, la sensibilidad ideal del termómetro digital es:

$$S = \frac{63 - 23.9}{60 - 20} = 0.9775 \quad \text{Ec.(40a)}$$

La sensibilidad real del termómetro digital está dada por el modelo matemático obtenido en Matlab:

$$S = 1.0357 T - 0.4044 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{Ec. (41)}$$

T: Temperatura

Con este modelo calibramos el termómetro digital y registramos la temperatura ambiente.

3.6 Propuesta para la medición de la distancia de manera automática

Para realizar la medición de la longitud de onda en el experimento, medimos directamente sobre la guía, la distancia que el micrófono recorrió dentro del tubo.

De manera adicional, proponemos un sistema para medir la distancia de forma automática, esto es, que en la interfaz de la computadora aparezca directamente la longitud de onda del tono que estamos utilizando.

Para ello, necesitaremos un circuito adicional muy similar al empleado en los ratones de computadora. Este circuito nos dará una(s) señal(es) (tren(es) de pulsos) que enviaremos a la computadora a través de la tarjeta de adquisición de datos de la marca *Texas Instruments*. Ello debido a que el software *LabVIEW* está diseñado para trabajar conjuntamente con las tarjetas de adquisición de datos de su propia marca.

Esta tarjeta es capaz de manejar señales analógicas y digitales por lo que no habría ningún inconveniente en la toma y envío de los datos, además se comunica con la computadora a través del puerto *USB*.

Posteriormente, el software del *LabVIEW* procesará esos datos para dar una medida de la longitud de onda de manera completamente automática.

Podemos también decir, que en este caso, el alumno quizás ya no tendría que hacer mucho, porque al desplazar el micrófono dentro del tubo, el programa daría la longitud de onda y la velocidad del sonido, entonces debido a su gran simplicidad, los alumnos podrían perder interés en el experimento.

Como además, el costo de la tarjeta es algo elevado (alrededor de 4 mil pesos) y su compra es por pedido especial, consideramos que la propuesta no se implementará ya que también es deseable que el prototipo sea independiente de accesorios adicionales.

De cualquier forma, y para complementar el trabajo, exponemos la manera en que esta medición se haría automáticamente. Se pretende que al desplazar el micrófono dentro del tubo, se genere una señal que la computadora pueda procesar.

3.6.1 Diseño del sistema para medir la distancia de manera automática

Proponemos el siguiente esquema (no se implementó en el prototipo).

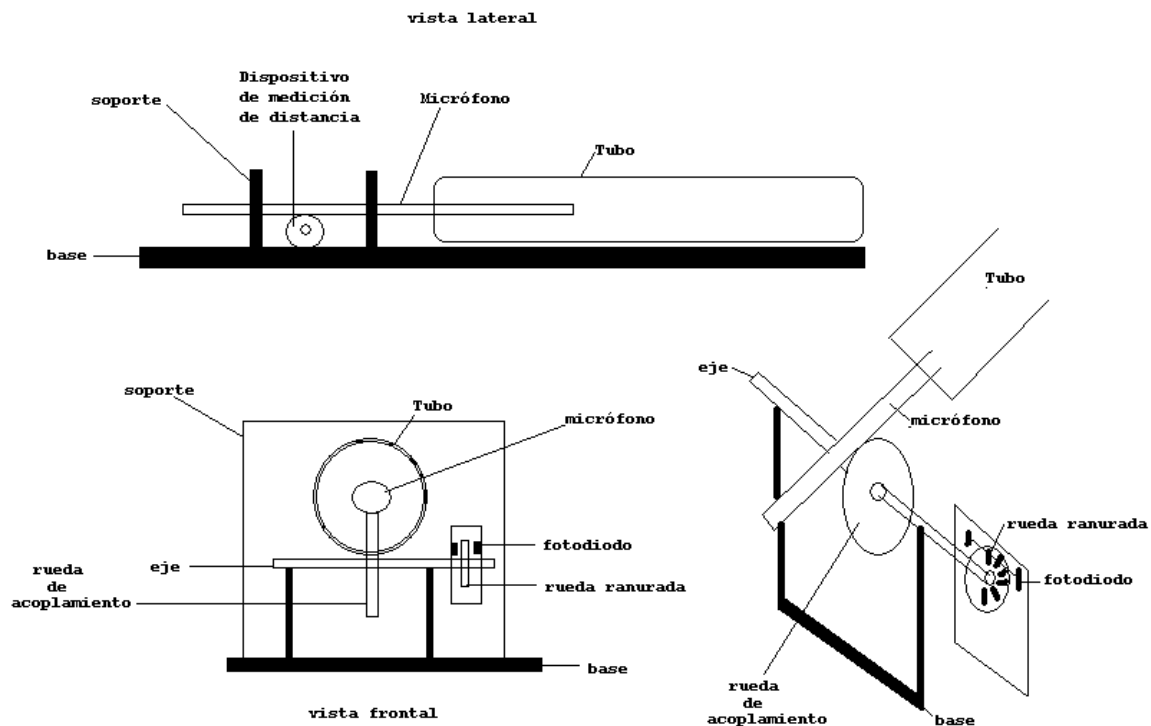


Figura 34. Esquema para la medición de la distancia de manera automática

- El micrófono se acopla a una rueda cuyo eje es común a una rueda ranurada.
- La rueda ranurada se mueve conforme el micrófono se desplaza dentro del tubo.
- El movimiento de la rueda ranurada genera dos trenes de pulsos mediante un par de fotodiodos y fototransistores (circuitos de emisión y recepción).

- Las señales (trenes de pulsos) enviadas a la computadora a través de la tarjeta de *Texas Instruments* son procesadas por el programa para determinar la longitud de onda y mostrar automáticamente el valor de la velocidad del sonido que se tiene en ese ambiente.

La longitud mínima del desplazamiento depende del radio de la rueda y del número de ranuras de la misma.

Si empleamos una rueda ranurada como la que poseen los ratones tenemos que:

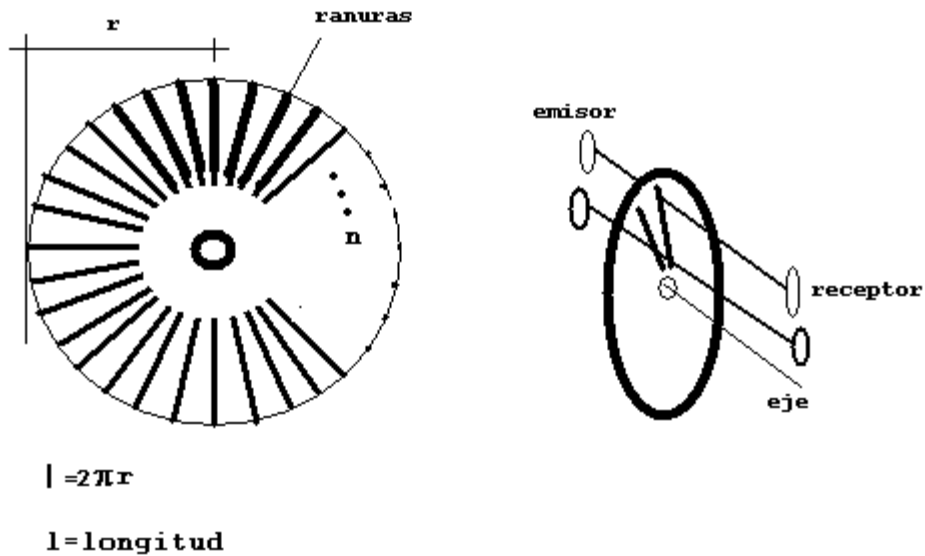


Figura 35. Rueda ranurada del ratón de computadora

Características de la rueda:

- 1.5 [cm] de diámetro $r = 0.75$ [cm]
- 50 ranuras $n = 50$

Para conocer el desplazamiento mínimo que es capaz de registrar la rueda empleamos la siguiente ecuación:

$$l = \frac{2\pi r}{n} \qquad \text{Ec. (42)}$$

l = longitud

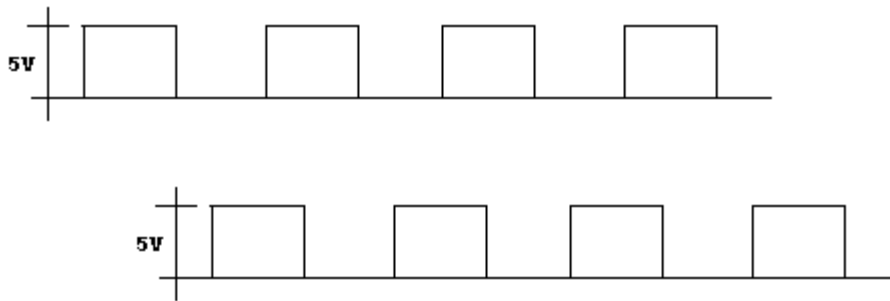
r : radio

n : número de ranuras

El paso mínimo de la rueda es:

$$l = \frac{2\pi(0.75)}{50} = 0.943[mm] \quad \text{Ec.(42a)}$$

Cada vez que gira la rueda, se interrumpen los rayos luminosos que provienen de los fotodiodos, de manera que se generan dos trenes de pulsos digitales, ver figura.



Para conocer el desplazamiento del tubo basta multiplicar el número de ranuras contadas por el paso mínimo:

$$L = nl \quad \text{Ec.(43)}$$

La distancia que recorre el micrófono por cada vuelta completa que da la rueda está determinada por la siguiente ecuación:

$$L = 2\pi r \quad \text{Ec.(44)}$$

El circuito que genera los trenes de pulsos es el siguiente:

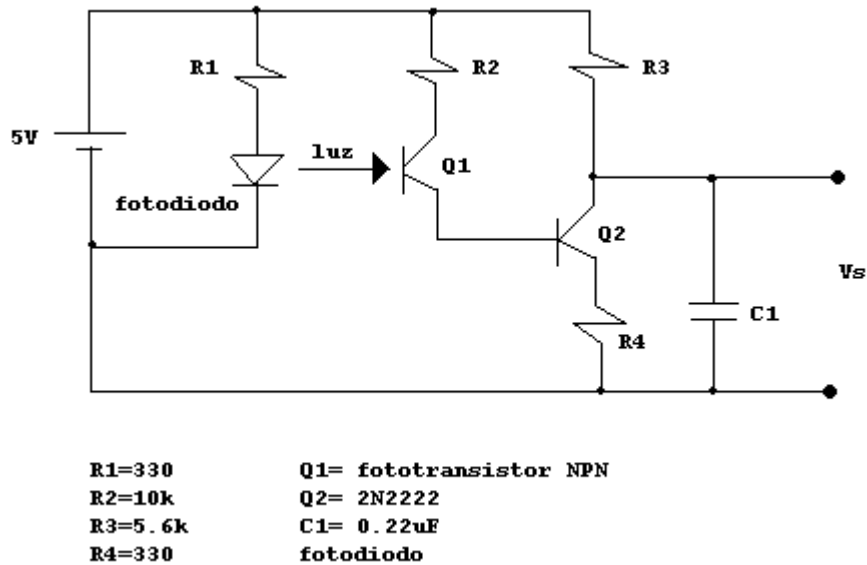


Figura 37. Circuito que genera los trenes de pulsos

Si queremos conocer el sentido de giro y determinar si el micrófono avanza o retrocede es necesario enviar dos trenes de pulsos a la tarjeta de Texas.

La tarjeta envía las señales a la computadora y el software se encargará de procesarlas para decir cuanto avanzó o retrocedió el micrófono y calcular la longitud de onda.

El software se programa de manera que cuente los pulsos para saber cuanto se desplazó el micrófono, como son dos señales las que recibe, verifica cual es la señal que ingresó primero y eso determina la dirección del movimiento.

El diagrama de bloques del proceso se muestra a continuación:

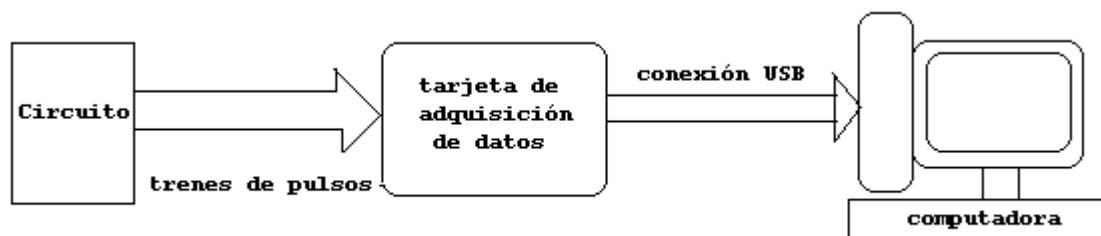


Figura 38. Diagrama del proceso de medición automática de la distancia