

FACULTAD DE CIENCIAS



Trabajo Fin de Carrera

**ENTORNO DE INSTRUMENTACIÓN PARA LA
LOCALIZACIÓN DE FUENTES ACÚSTICAS**

Tania Pila Mier

Director: José Carlos Palencia Gutiérrez

Licenciatura en Física

Octubre 2012

Índice General

1. Capítulo1: Introducción	3
1.1 Antecedentes y objetivos	3
1.2 Instrumentación electrónica	5
1.3 Instrumentación computerizada	7
1.4 El sonido: características físicas	8
1.4.1 Intensidad y amplitud	8
1.4.2 Frecuencia y tono	9
1.4.3 Timbre y composición armónica	9
1.4.4 Desfase	10
1.5 Métodos de localización de fuentes sonoras	11
2. Capítulo 2: Algoritmo de localización de fuentes acústicas	13
2.1 Descripción del algoritmo	13
2.2 Ecuaciones de las hipérbolas correspondientes a los micrófonos	14
2.2.1 Hipérbola de los micrófonos m1 y m2	15
2.2.2 Hipérbola de los micrófonos m2 y m3	16
2.3 Determinación de la posición de la fuente sonora a partir de ambas hipérbolas	17
3. Dispositivo experimental	19
3.1 Montaje, calibración y acondicionamiento del sistema de micrófonos	21
3.1.1 Amplificación de las señales eléctricas	23
3.1.2 Filtrado de las señales eléctricas	25
3.2 Adquisición de señales	26
3.3 Procesado software	30
3.3.1 Filtrado software de las señales	30
3.3.2 Búsqueda de frentes de onda	32
3.3.3 Cálculo de las deltas y localización de la fuente sonora	32

4.	Resultados	32
4.1	Resultados golpe	34
	4.1.1 Resultados sin filtro por software	34
	4.1.2 Resultados con filtro software	36
	4.1.3 Efectos de la frecuencia del filtro software	38
4.2	Resultados silbido	39
4.3	Resultados voz	41
5.	Conclusiones	44
	Bibliografía	46
	Anexo I: Código Matlab para localización de la fuente	47
	Anexo II: Tarjeta de adquisición de datos PCI-9111HR	51
	Anexo III: Hoja características amplificador TL_81	53

Capítulo 1: Introducción

1.1 Antecedentes y objetivos

El objetivo de este trabajo es el diseño e implementación de un sistema de instrumentación electrónico, basado en computador, y su aplicación para la localización de fuentes de sonido en un recinto.

Aplicaciones en robótica y medicina han hecho que la recepción del sonido haya sido intensamente estudiada desde el punto de vista de *cómo escucha un humano*. Los seres humanos somos capaces de determinar con un considerable grado de precisión la dirección de la fuente sonora. Los oídos operan como dos receptores autónomos entre sí, de forma que no existe interferencias entre ellos y los sonidos que reciben independientemente crean efectos diferentes en distintas partes del cerebro. El método de localización se basa en la audición binaural y viene determinado por dos factores:

- 1 Intensidad relativa en los dos oídos
- 2 Intervalo de tiempo de llegada a los dos oídos.

Para frecuencias bajas, inferiores a 1.000 Hz, la detección de la dirección del sonido se realiza mediante diferencia de fase entre la llegada de las ondas sonoras al oído izquierdo y derecho, ya que la intensidad que recibe uno y otro difiere en una cantidad despreciable, mientras que en los casos en que las frecuencias superan esta cantidad, la dirección se determina mediante la intensidad del sonido recibida en cada oído. Queda en un supuesto intermedio las frecuencias medias para los que la localización se realiza por una combinación entre los dos métodos: intensidad y diferencia de fase.

Se debe tener en cuenta además, que la fase con la que las ondas sonoras son recibidas por los oídos se ven afectadas por la distancia entre los oídos, la orientación de la cabeza y la longitud de onda del sonido.

Los sonidos de bajas frecuencias tienen longitudes de onda relativamente grandes con respecto a las dimensiones de la cabeza. El estudio de la difracción determina que cuando la

longitud de la onda es suficientemente grande con respecto al obstáculo que encuentra la onda, ésta se difracta fácilmente y no se genera una "sombra acústica" Por el contrario, cuando las longitudes de onda son pequeñas, se produce poca difracción y por lo tanto existe una sombra acústica mayor. Para frecuencias de 500 Hz la longitud de onda del sonido es de unos 69 cm, unas tres veces el diámetro promedio de una cabeza humana. La difracción es poca. Para frecuencias de 4 kHz (longitud de onda del orden de los 8.5 cm) la sombra acústica es importante. De esto puede deducirse que la cabeza es un obstáculo únicamente para frecuencias altas (longitudes de onda pequeñas), por lo tanto actuaría como un filtro paso bajo.

En cuanto a la consideración de la longitud de onda del sonido, tomando tonos puros de baja frecuencia, es decir, gran longitud de onda, la diferencia de fase entre el sonido recibido por cada oído es una parte pequeña de la longitud de onda mientras que al aumentar la frecuencia, disminuye por tanto la longitud de onda y la diferencia de fase aumenta. Si consideramos la relación entre frecuencias bajas con sus longitudes de onda correspondientes, y frecuencias más altas, vemos que según aumentamos la frecuencia, disminuye la longitud de onda que se hace del orden de la distancia entre los oídos. Por lo tanto, para frecuencias altas no se puede obtener la dirección de la fuente sonora a partir de la diferencia de fase entre los oídos.

En recintos cerrados, existen reflexiones sonoras por lo que el sonido recibido en los oídos procede inicialmente de la fuente sonora y posteriormente se aprecia la señal recibida tras las sucesivas reflexiones en las paredes del recinto de forma que los tiempos de recepción así como la dirección son diferentes. Para poder discernir la dirección de procedencia del sonido, hay que tener en cuenta que el camino mas corto es la línea recta por lo que el sonido directo llega antes y es el que se analiza por medio de localización binaural.

Cuando el sonido es puro, y se ha producido en un ambiente reverberante (ambiente producido por los sonidos reflejados en las paredes del recinto) la localización de la fuente es muy complicada ya que los dos efectos: directo y reflejado coinciden en tono pero no en intensidad, sin embargo para sonidos discretos, las reflexiones son percibidas con cierto retraso por lo que se facilita la localización.

1.2 Instrumentación electrónica

La instrumentación electrónica es la parte de la Electrónica que se ocupa de medir magnitudes de cualquier clase, eléctricas o no, utilizando para ello los recursos que ofrece la Electrónica. Al mismo tiempo, la instrumentación electrónica puede dividirse en dos procesos, la medida y el control de procesos.

La medición consiste en comparar cuantitativamente la variable medida y que se desea cuantificar con un estándar predefinido y de ahí, obtener conclusiones sobre el fenómeno a estudiar.

Los objetivos de la medida pueden ser diversos:

- Vigilancia o seguimiento de procesos (medida de la temperatura ambiente, contadores de gas y de agua, monitorización clínica, ...).
- Control de procesos (termostatos, control del nivel de un depósito).
- Verificación de especificaciones. En la ciencia experimental, las medidas en prototipos son necesarias para verificar los resultados de los modelos desarrollados en ordenador.

La instrumentación trata los sistemas integrados cuya finalidad es medir magnitudes físicas de un sistema externo, elaborar la información asociada a ellas y presentarla a un operador. En la siguiente figura, se describe gráficamente el proceso de un sistema de medida:

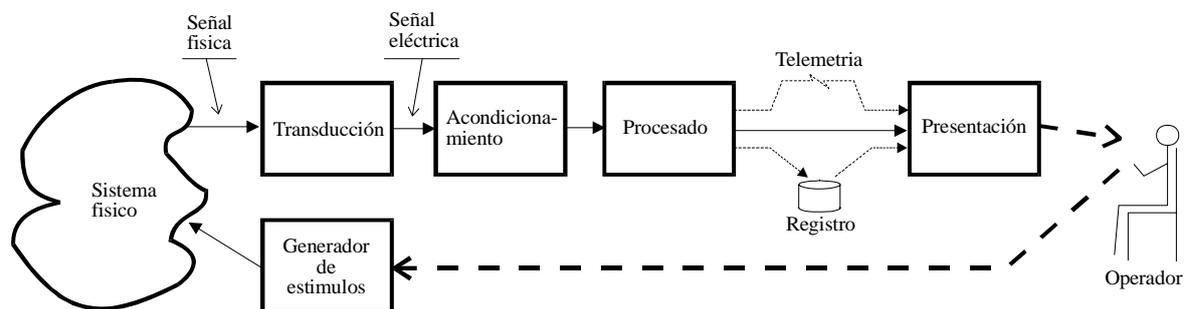


Figura 1-1. Sistema de medida

Como podemos observar, la medida implica cuatro pasos:

- 1) La adquisición de la información, realizada por un elemento sensor o transductor.
- 2) El acondicionamiento de la señal de salida del transductor.
- 3) El procesado de esta información.
- 4) La presentación de los resultados.

El otro aspecto de la instrumentación electrónica, la instrumentación de control o control de procesos ha derivado en un campo de trabajo mucho más amplio denominado ingeniería de control en el que se engloba la robótica, el control de procesos y los autómatas.

Las características por las que la **tecnología electrónica** es la más utilizada por los sistemas de instrumentación, son:

- Las señales eléctricas permiten manejar señales en un rango dinámico de tiempos muy amplio (10^{15}), desde los picosegundos (10^{-12} s) hasta horas (10^3 s).
- Las señales eléctricas pueden ser transmitidas muy fácilmente a través de cables metálicos, sistemas radiados, o fibra óptica.
- Las señales eléctricas pueden ser amplificadas por circuitos electrónicos de forma muy eficiente, y pueden manejarse rangos de señal muy amplios (10^{12}), desde los nanovoltios (10^{-9} V) hasta los kilovoltios (10^3 V).
- Los sistemas electrónicos permiten complejas transformaciones funcionales de las señales eléctricas.
- Las señales eléctricas son las más apropiadas para ser introducidas en los computadores, los cuales representan el medio más potente de registro, transformación y presentación de la información.
- La tecnología electrónica actual presenta mejor relación prestaciones /costo.

Sin embargo, también posee alguna desventaja:

- Presenta un rango de temperaturas limitado desde -50 °C hasta 175 °C.
- Son equipos sensibles a la radiación de alta energía.
- Requiere una fuente de potencia para su operación.
- Los componentes electrónicos activos suelen presentar deriva por envejecimiento

1.3 Instrumentación computerizada

Actualmente muchos de los equipos de instrumentación están basados en un computador. El computador resuelve todos los aspectos relativos al procesado de la señal, al registro, a la transferencia y a la presentación de la información. A estos equipos basados en computador, se suelen llamar instrumentación inteligente.

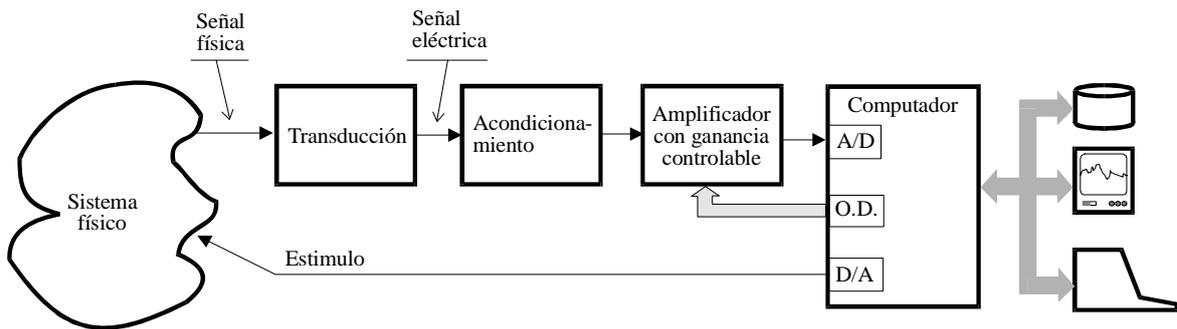


Figura 1-2. Sistema de instrumentación basado en computador

La principal diferencia entre un equipo de instrumentación convencional, y un equipo inteligente es que mientras que en el convencional se mide una variable, y el dato que resulta debe ser procesado por el operador, en la instrumentación inteligente, la señal es procesada de forma global por el computador, y este elabora la información que se necesita

La instrumentación computerizada requiere la presencia de transductores, y circuitos analógicos que acondicionen la señal a los niveles adecuados para ser codificada en las mejores condiciones por el convertido A/D.

Con la incorporación del computador se hace posible procesar de forma sofisticada las señales que se adquieren a efectos de acondicionarla y extraer de ella la información. Así mismo, hace posible todo tipo de procesado estadístico de los datos que se obtienen.

El computador proporciona una amplia gama de recursos para almacenar la información que se adquiere, así como para presentarla utilizando técnicas numéricas y gráficas.

1.4 El sonido

El sonido es una onda longitudinal que estimula el sentido del oído. La velocidad con que se propaga depende del material que sirve como medio de transporte y cualquier alteración de las propiedades del mismo, como su temperatura, densidad, etc., hace variar la velocidad de propagación. Por ejemplo, la velocidad del sonido en el medio V_s , varía como una función de la temperatura según la expresión:

$$V_s = V_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{T}{273.15}}$$

donde V_0 es la velocidad en el medio a 0°C , y T es la temperatura del medio.

En el caso del aire, la velocidad del sonido a 0°C centígrados y 1 atmósfera de presión, es 331 m/s, pero disminuye hasta 343 m/s en un ambiente con temperatura promedio de 20°C .

Características físicas del sonido

Todos los sonidos pueden describirse determinando tres características de su percepción: el tono, la intensidad y el timbre. Estas características corresponden a tres características físicas: la frecuencia, la amplitud y la composición armónica o forma de onda.

1.4.1. Intensidad:

Es el flujo medio de energía por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación. La distancia a la que se puede oír un sonido depende de su intensidad. Si tomamos ondas esféricas, como el sonido, que se propagan desde una fuente puntual, la intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, suponiendo que no se produzca ninguna pérdida de energía debido a efectos de absorción. En la propagación real del sonido en la atmósfera, los cambios de propiedades físicas del aire como la temperatura, presión o humedad producen la amortiguación y dispersión de las ondas sonoras, por lo que generalmente la ley del inverso del cuadrado no se puede aplicar a las medidas directas de la intensidad del sonido.

La intensidad está relacionada con la amplitud, que es el grado de movimiento de las moléculas de aire en una onda; cuanto más grande es la amplitud de la onda, más intensamente golpean las moléculas en el tímpano y más fuerte es el sonido percibido.

1.4.2 Frecuencia y tono

Cada sonido se caracteriza por su velocidad específica de vibración, que impresiona de una manera determinada en el sentido auditivo. Esta propiedad es lo que conocemos como tono. Los sonidos de mayor o menor frecuencia se denominan respectivamente, agudos o graves. Cuanto mayor es la frecuencia, más alto es el tono, por lo que el sonido es más agudo. El rango de frecuencias en las que el sonido es audible por el ser humano se encuentra entre 20Hz y 20kHz, dependiendo del sujeto.

La frecuencia tiene una relación inversa con el concepto de longitud de onda (ver gráfico), a mayor frecuencia menor longitud de onda y viceversa. La frecuencia f es igual a la velocidad v de la onda, dividido por la longitud de onda, λ :

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

1.4.3 Timbre y composición armónica

El timbre es la característica del sonido que nos permite diferenciar sonidos de igual frecuencia e intensidad. Los sonidos que escuchamos están compuestos por varias ondas simultáneas, pero que nosotros percibimos como uno. El timbre depende de la cantidad de armónicos que tenga un sonido y de la intensidad de cada uno de ellos, por lo que el timbre está ligado a la composición armónica. Los armónicos son una serie de vibraciones secundarias que acompañan a una vibración primaria o fundamental del movimiento ondulatorio producido al hacer vibrar un cuerpo. La frecuencia de los armónicos siempre es un múltiplo de la frecuencia más baja, llamada frecuencia fundamental o primer armónico. A medida que las frecuencias son más altas, los segmentos en vibración son más cortos y los tonos sonoros están más próximos los unos de los otros.

1.4.5 Desfase.

El **desfase** entre dos ondas es la diferencia entre sus dos fases. Habitualmente, esta diferencia de fases, se mide en un mismo instante para las dos ondas, pero no siempre en un mismo lugar del espacio.

Se puede medir el desfase como:

- Un ángulo (en radianes o en grados o aún en giros).
- Un tiempo (en segundos o como un múltiplo o una fracción del período).
- Una distancia (en metros o como un múltiplo o una fracción de la longitud de onda).

Se puede hablar de desfase de cualquier tipo de onda o fenómeno periódico. En el caso de ondas o fenómenos de período diferente, el desfase puede carecer de interés.

Para los fenómenos no periódicos, solo se puede hablar de *avance* o *retardo*. En nuestro análisis, como veremos posteriormente, no tenemos ondas de periodo constante por lo que realmente lo que vamos a calcular es el retardo entre las señales captadas por los micrófonos.

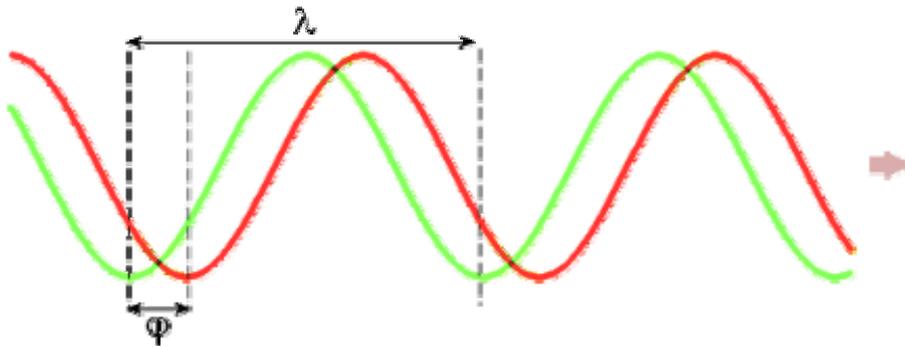


Figura 1-3. Representación del desfase entre dos ondas

1.5 Métodos de localización de fuentes sonoras

La energía de las ondas sonoras (y por tanto la intensidad del sonido) disminuye con el cuadrado de la distancia a la fuente sonora. La intensidad de percepción de un sonido por el oído depende también de su distancia a la fuente sonora. La energía vibratoria emitida por la fuente se distribuye uniformemente en ondas esféricas cuya superficie aumenta proporcionalmente al cuadrado de sus radios y la energía que recibe el oído es, por consiguiente, una fracción de la energía total emitida por la fuente, tanto menor cuanto más alejado está el oído. Esta intensidad disminuye, aproximadamente, 3dB cada vez que se duplica la distancia a la que se encuentra la fuente sonora. En la práctica, la absorción y la reflexión del sonido (por superficies blandas y duras) puede jugar un papel en un emplazamiento particular y modificar los resultados.

Diversos estudios han intentado reproducir la “escucha humana” mediante la colocación de micrófonos con fines médicos en personas ciegas o deficientes visuales. Sin embargo, el estudio de la localización de sonidos y detección de su dirección está siendo estudiado principalmente en la robótica móvil, localización de hablantes en entornos de videoconferencia, equipos radar-sonar para sistemas de navegación o sistemas automáticos de vigilancia.

Existen dos grandes áreas dedicadas a la detección de la dirección del sonido:

- *Simulation of Head Related Transfer Functions (HRTF)* se refiere a la forma en que el ser humano usa la información que llega a los oídos para determinar la dirección del sonido. Se han desarrollado diversas técnicas que intentan simular HRTF para lograr que el ordenador localice la fuente sonora.
- *Time Delay Estimation (TDE)* realiza el estudio mediante diferencias de tiempo con el que el sonido llega a un conjunto de micrófonos. Es recomendable especialmente cuando se utilizan las señales que provienen de varios sensores y se realiza la implementación en tiempo real, con independencia de las condiciones ideales de fuentes y entorno.

Existen otras técnicas para la localización de fuentes acústicas que emplean, por ejemplo, estimación espectral de alta resolución, utilizadas para desarrollar esquemas de localización que hacen uso de matrices de correlación de señal.

- En el año 2005, R. Rodríguez y A. Betancourt presentaron una técnica para el modelado de la escucha humana mediante diferencia de fase en cada oído simulado con un par de micrófonos colocados en un robot móvil. El método se basaba en obtener el azimut o ángulo de incidencia de una fuente acústica considerando que los micrófonos rotan entre $-\pi/2$ y $\pi/2$. El sonido es capturado con una tarjeta de sonido y aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) para filtrar el ruido y procesar las frecuencias óptimas.
- Durante el mismo periodo, R. Alzate, G. Castellanos, G. Acebedo, y M. Sánchez de la Universidad Nacional de Colombia presentaron un trabajo para localizar fuentes acústicas pasivas utilizando la técnica de estimación para tiempos diferenciales de llegada (TODA) mediante función de autocorrelación aplicada sobre la información detectada por cuatro micrófonos. El sistema aplicado para la adquisición de señales fue introducir las señales captadas por una pareja de micros mediante una tarjeta externa preamplificada de sonido y la señal de la otra fue introducida por el terminal line-in de su tarjeta de sonido tras ser amplificada por un sistema de sonido profesional. La fuente incidente en este caso, de tipo sinusoidal, fue generada por el ordenador. Los resultados pusieron de manifiesto el rango apropiado de frecuencias según la distancia de los micrófonos, y un estudio de los resultados en función del volumen de la señal y componentes de frecuencia individual.

En un estudio posterior, R. Alzate y G. Castellanos implementaron un algoritmo empleando tiempo diferencial de llegada y filtros Kalman que proporcionan robustez a la estima de la localización. Se utiliza como en el caso anterior, correlación cruzada para calcular en este caso el ángulo de incidencia con una distribución de tres micrófonos separados 20cm y obteniendo el azimut comprendido entre $-\pi/2$ y $\pi/2$. En este estudio se pone de manifiesto la dependencia de los errores en el resultado con la distancia entre los micrófonos y la fuente de sonido.

Capítulo 2. Algoritmo de localización de fuentes acústicas.

2.1 Descripción del algoritmo

El trabajo presentado en esta memoria se enmarca dentro de las técnicas *Time Delay Estimation*, calculando la distancia a la fuente a partir del retraso entre las señales recibidas en diferentes micrófonos. El sistema diseñado consiste en tres micrófonos colocados en posiciones fijas de un plano, formando un triángulo rectángulo.

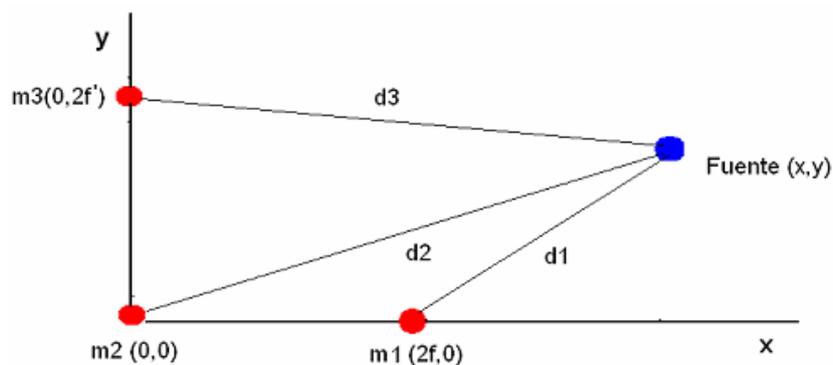


Figura 2-1. Sistema de micrófonos diseñado

El algoritmo procesa la información obtenida por cada micrófono y, a partir de esa información, obtiene el retraso entre los frentes de onda de las señales acústicas recibidas por cada par de micrófonos. Ese retraso nos permitirá conocer la diferencia de distancias entre la fuente de sonido y cada uno de esos dos micrófonos.

La fuente de sonido se encontrará en el lugar geométrico de los puntos del plano cuya diferencia de distancia (a sendos micrófonos) corresponda con el valor medido. Este lugar geométrico corresponde a una hipérbola cuyos focos se localizan en cada uno de los dos micrófonos. Si realizamos la misma operación con otro par de micrófonos, obtendremos otra hipérbola, con los focos situados en las posiciones de los nuevos micrófonos. Dado que la fuente de sonido es la misma, su posición vendrá determinada por la intersección entre ambas hipérbolas. Podremos discriminar entre los cuatro posibles puntos de intersección de las dos hipérbolas si tenemos en cuenta los signos de los retrasos entre pares de micrófonos (o lo que es lo mismo, si las señales están retrasadas o adelantadas).

Este método de medición es muy sensible a los errores cometidos en la determinación de los retrasos entre las señales de los micrófonos, sobre todo si la fuente sonora está alejada. Una forma de reducir esos errores consistiría en la utilización de un mayor número de micrófonos y determinación de posibles regiones de localización de la fuente en las “areas” de inserción de las hipérbolas. Dado el carácter académico de este trabajo, hemos decidido sacrificar esa exactitud frente a la sencillez del diseño, puesto que no se pretende competir con las implementaciones comerciales de este tipo de sistemas.

2.2 Ecuaciones de las hipérbolas correspondientes a los micrófonos

A continuación, vamos a deducir las expresiones analíticas que caracterizarán cada hipérbola, teniendo en cuenta las posiciones de cada micrófono dentro de nuestro sistema.

Como ya hemos comentado, una hipérbola es el lugar geométrico de los puntos del plano cuya diferencia de distancias entre dos puntos fijos, F y F', llamados focos, es constante.

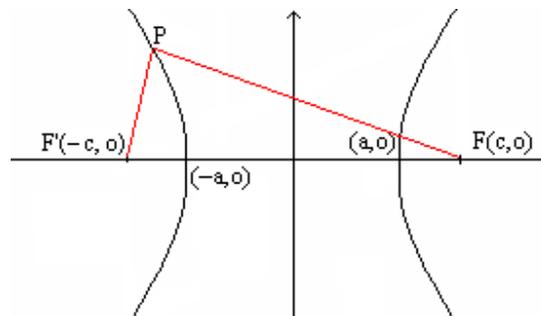


Figura 2-2. Representación de una hipérbola con focos F y F'

Consideremos los focos situados sobre el eje x, a distancia c del origen, en los puntos F = (c,0) y F' = (-c,0), y obtengamos el lugar geométrico de los puntos del plano cuya diferencia de distancia a ambos focos sea constante (por conveniencia, llamaremos a esa distancia 2a). Cualquier punto P = (x, y) de la hipérbola tiene que verificar que su diferencia de distancias a los focos, PF - PF', sea igual a 2a, esto es:

$$\sqrt{(x+c)^2 + (y-0)^2} - \sqrt{(x-c)^2 + (y-0)^2} = 2a$$

Operando la ecuación anterior y expresándola en forma canónica, llegamos a la expresión:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{c^2 - a^2} = 1$$

Procediendo de manera análoga, vamos a obtener las expresiones de las dos hipérbolas, la primera correspondiente a los micrófonos m_1 y m_2 , y la segunda correspondiente a los micrófonos m_2 y m_3 . Tal como vemos en la Figura 2-1, tomaremos como origen de coordenadas la posición del micro m_2 , de forma que las coordenadas de los tres micrófonos serán $m_1=(2f, 0)$, $m_2=(0,0)$ y $m_3=(0,2f)$.

2.2.1 Hipérbola de los micrófonos m_1 y m_2

Si los micrófonos estuvieran colocados simétricamente respecto al origen, tendríamos:

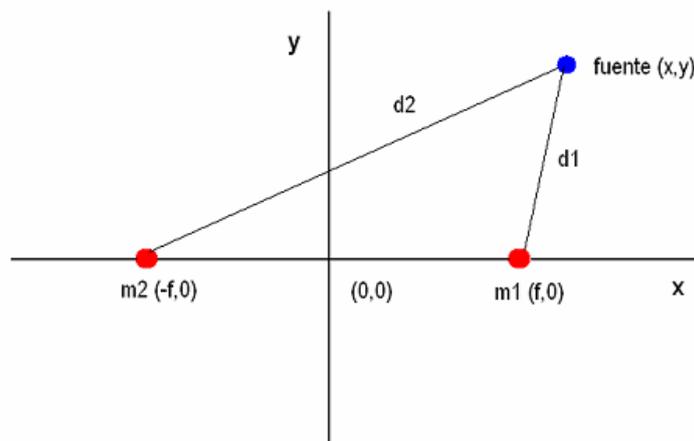


Figura 2-3. Micrófonos m_1 y m_2 simétricos respecto al origen

que nos conduciría a la expresión:

$$\sqrt{(x+f)^2 + y^2} - \sqrt{(x-f)^2 + y^2} = d$$

siendo d igual a la diferencia entre las distancias a los dos micros, $d = d_1 - d_2$

Expresada en forma canónica, tenemos:

$$\frac{x^2}{(d/2)^2} - \frac{y^2}{f^2 - (d/2)^2} = 1$$

Haciendo una translación para que el micrófono m_2 se sitúe en el origen de coordenadas

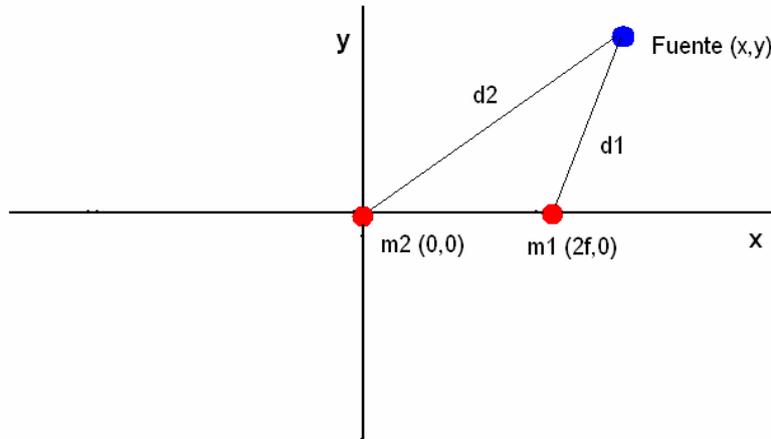


Figura 2-4. Sistema con m_2 en el origen de coordenadas

Llegamos a la ecuación de la primera hipérbola:

$$\frac{(x - f)^2}{(d/2)^2} - \frac{y^2}{f^2 - (d/2)^2} = 1$$

2.2.1 Hipérbola de los micrófonos m_2 y m_3

En este caso, tendremos en cuenta que los micrófonos están colocados en el eje de ordenadas. Si los micrófonos estuvieran colocados simétricamente respecto al origen, tendríamos:

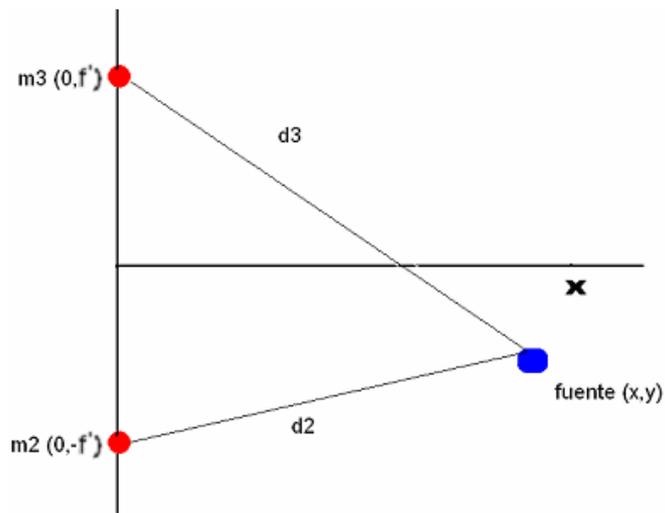


Figura 2-5. Micrófonos m_2 y m_3 simétricos respecto al origen

que nos conduciría a la ecuación:

$$\sqrt{x^2 + (y - f')^2} - \sqrt{x^2 + (y + f')^2} = d'$$

siendo d' la diferencia entre las distancias a los dos micros, $d' = d_2 - d_3$

o, expresada en forma canónica:

$$\frac{x^2}{(d/2)^2 - f'^2} - \frac{y^2}{(d/2)^2} = 1$$

Si hacemos la translación, considerando que el micrófono m_2 esta en el origen de coordenadas:

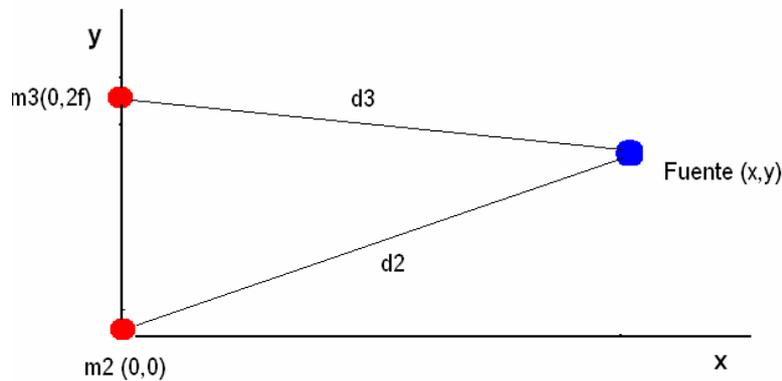


Figura 2-6. Sistema con m_2 en el origen de coordenadas

Llegamos a la ecuación de la segunda hipérbola:

$$\frac{x^2}{(d/2)^2 - f'^2} - \frac{(y - f')^2}{(d/2)^2} = 1$$

2.3 Determinación de la posición de la fuente sonora a partir de ambas hipérbolas

Una vez obtenidas las expresiones de las dos hipérbolas, podemos localizar la fuente sonora simplemente encontrando el punto donde se cortan ambas curvas. La resolución exacta de ese sistema de ecuaciones es analíticamente posible, aunque las expresiones son demasiado largas para mostrarlas aquí (ver código Matlab en el Anexo I).

El problema que se nos plantea es que la resolución de ese sistema de ecuaciones conduce a la obtención de un máximo de 4 puntos de corte. Evidentemente, sólo uno de ellos tiene físicamente sentido.

Para poder discriminar entre esas 4 soluciones y encontrar cuál de ellas es la solución correcta, sólo tenemos que considerar el signo de cada uno de los dos retrasos medidos. Si el retraso d_1 , medido con los micrófonos m_1 y m_2 , es positivo, significa que la fuente de sonido se encuentra más cerca del micrófono m_2 , por lo que la fuente de sonido se encontrará en la rama izquierda de la primera hipérbola. Si, por el contrario, el retraso d_1 es negativo, la rama correcta será la derecha. De igual manera, si el retraso d_2 , medido con los micrófonos m_2 y m_3 , es positivo, elegiremos la rama superior de la segunda hipérbola y, en caso contrario, la rama inferior. La siguiente figura muestra ese espacio de soluciones:

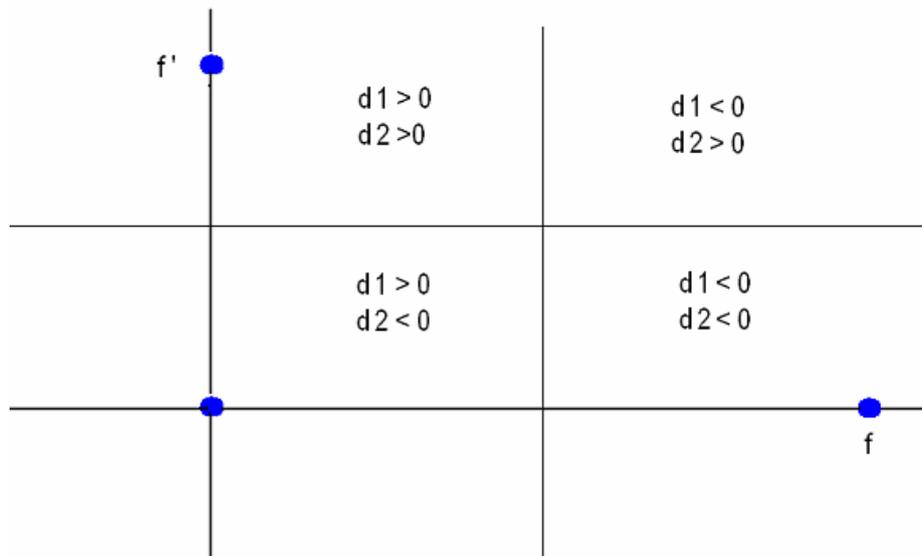


Figura 2-7. Espacio de soluciones en función del signo de los retrasos

Capítulo 3: Dispositivo experimental

Como se ha visto en el capítulo 2 de esta memoria, el punto clave para la localización de la fuente sonora es la determinación de los retrasos entre los frentes de onda captados por cada micrófono. En este capítulo describiremos el dispositivo experimental diseñado para este fin, teniendo en cuenta cada una de las etapas del proceso.

El esquema del dispositivo hardware se puede ver en el gráfico siguiente:

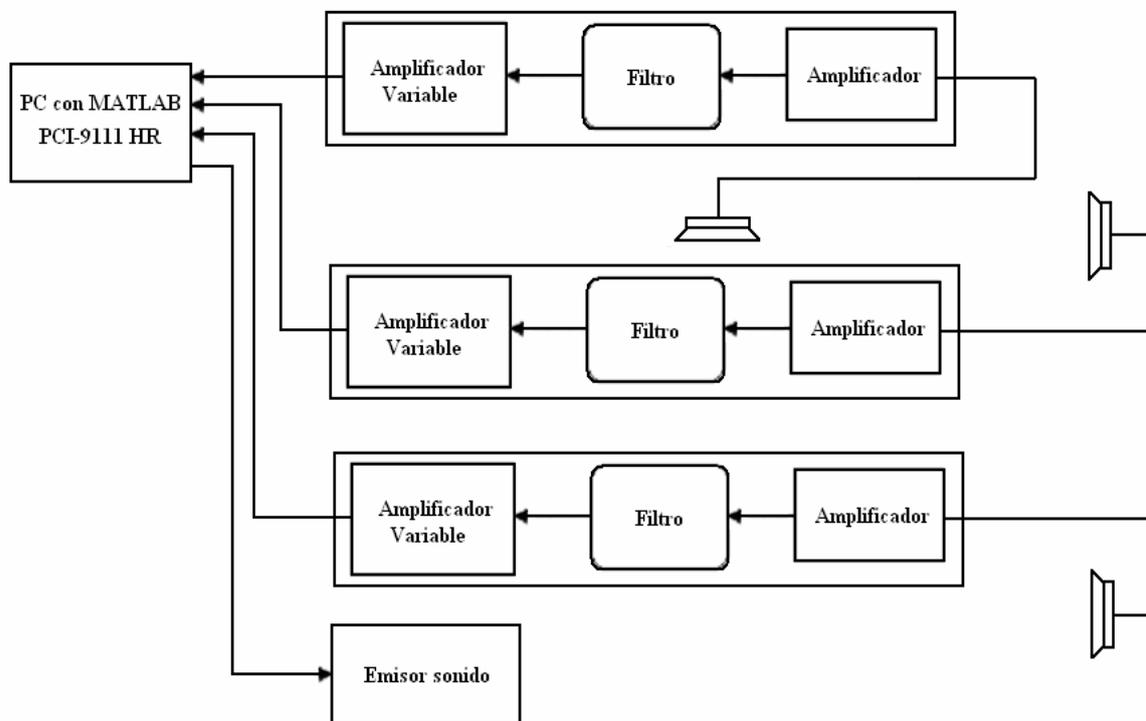


Figura 3-1. Dispositivo experimental diseñado

Consta de los siguientes elementos:

- Micrófonos, como receptores de la señal a localizar.
- Amplificadores y filtros para el acondicionamiento de las señales captadas por los micrófonos.
- Tarjeta de adquisición de datos, con la que captaremos las formas de onda desde el computador

- Computador, para controlar y coordinar el funcionamiento del dispositivo experimental, capturar los datos y realizar el tratamiento que nos permita determinar la posición de la fuente sonora.
- Fuente de sonido continua para calibrar los micrófonos y realizar los estudios de respuesta frecuencial de los mismos.

El diseño y aplicación de cada uno de los elementos hardware del dispositivo, reflejados en el esquema anterior, puede englobarse dentro de las siguientes etapas del algoritmo:

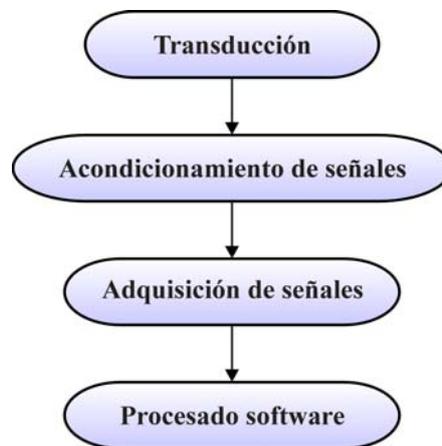


Figura 3-2. Etapas del algoritmo de localización

- Transducción: montaje y calibración de los micrófonos.
- Acondicionamiento de señales: las señales obtenidas por cada micrófono deben ser amplificadas y filtradas, de forma que tengan los parámetros eléctricos y la información adecuada para poder ser tratadas en las etapas posteriores.
- Adquisición de señales: utilizaremos una tarjeta de adquisición de datos que nos permita digitalizar las señales analógicas correspondientes a cada micrófono.
- Procesado software: implementación del programa Matlab que realizará el control del dispositivo experimental y ejecutará el software necesario para la determinación de la posición de la fuente sonora.

A continuación, explicaremos de una forma más detallada cada una de esas etapas.

3.1 Montaje, calibración y acondicionamiento del sistema de micrófonos

Para tomar las señales vamos a utilizar como elementos receptores tres micrófonos. El planteamiento inicial para la realización de este estudio fue la utilización de micrófonos de escritorio para ordenador, por su fácil implementación, coste y reproductividad. Sin embargo el alcance de éstos y la recepción del sonido unidireccional provocaron que desechásemos la idea. Por ello, en esta etapa, utilizaremos micrófonos capacitivos omnidireccionales, cuyo esquema de conexión se muestra a continuación:

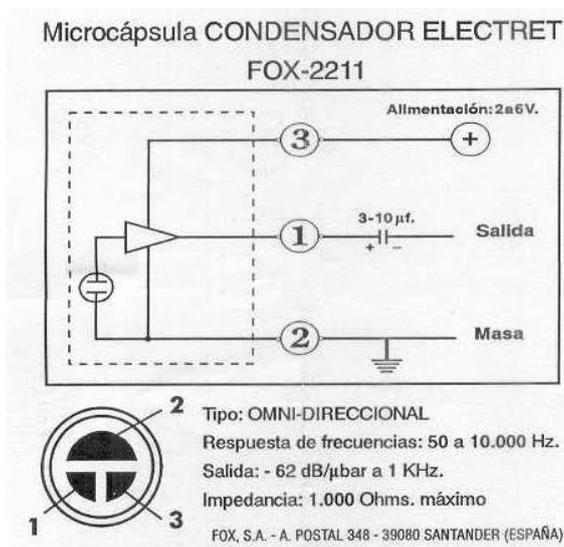


Figura 3-3. Esquema de conexión del micrófono FOX-2211

Una vez montados, analizamos el comportamiento de los micrófonos para su posterior calibración. Para ello, vamos a observar sus respuestas ante diversas frecuencias generadas por una fuente de sonido continua, tomando en unos casos la posición de los micros fija y otras fijando la frecuencia de la fuente y variando la distancia.

La respuesta frecuencial de cada micro tiene especial influencia en la modulación y amplificación de los datos de entrada. Si cada micrófono registrara respuestas frecuenciales diferentes, resulta necesaria la correcta adaptación de las señales en conjunto.

En principio, la respuesta frecuencial de cada uno de ellos debería ser similar, es decir, la salida debería ser muy parecida para sonidos de la misma frecuencia. Sin embargo, en la práctica, las señales obtenidas muestran que esto no es exactamente así. En la siguiente gráfica se representa el comportamiento de cada uno de los micrófonos para diversas frecuencias generadas por una fuente de sonido constante.

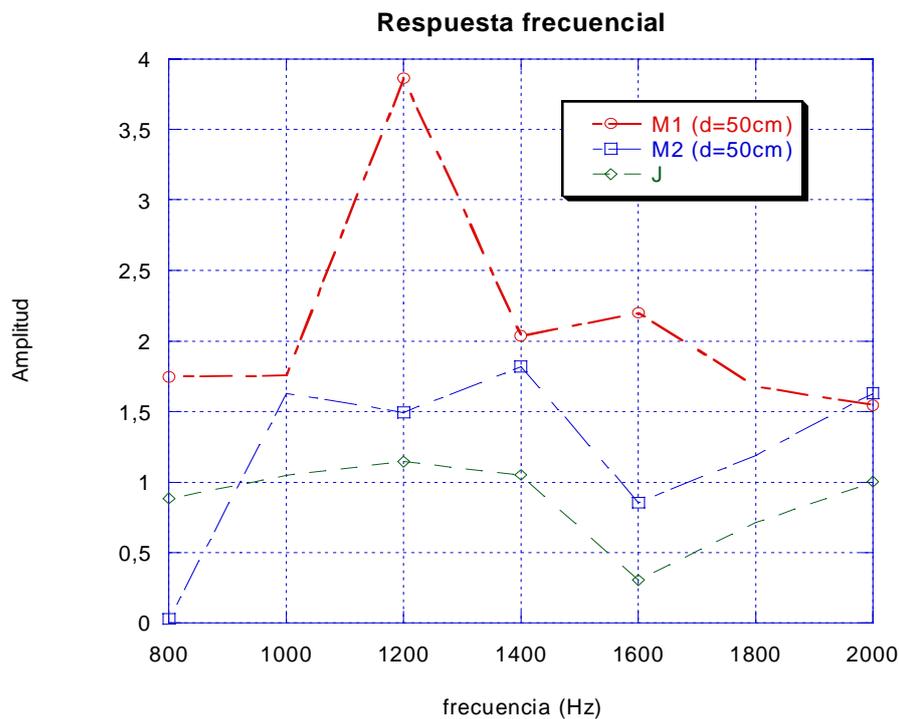


Figura 3-4. Respuesta frecuencial de los tres micrófonos

Como se puede ver, los micrófonos presentan diferentes sensibilidades a diferentes frecuencias. Sin embargo, este comportamiento es debido, en gran parte, a las condiciones en las que se han realizado las medidas. En particular, el efecto de las reverberaciones y de las interferencias producidas por las paredes del recinto hacen que las condiciones no sean las ideales. Una opción más recomendable sería el estudio del comportamiento de los micrófonos en un entorno acústicamente ideal, lo cual no es el caso, por lo que hemos optado por analizar su respuesta a diferentes frentes de onda. En la siguiente figura se muestra el resultado ante un silbido emitido a varios metros de distancia de los micrófonos:

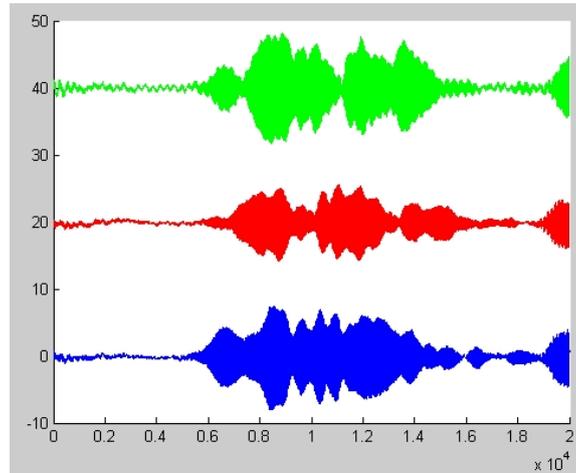


Figura 3-5. Respuesta de los micrófonos ante un silbido

Como se puede observar, efectivamente hay diferencias en la respuesta frecuencial de cada micrófono, especialmente en el micro 2, por lo que es necesario realizar una etapa de adaptación de las señales en cada micrófono. También hay que tener en cuenta que la medición no se realiza en un entorno aislado, por lo que existe cierto ruido de fondo que habrá que eliminar.

Esta adaptación, por tanto, consistirá en la amplificación y filtrado de las señales eléctricas obtenidas a la salida de cada micrófono. A continuación se explica en detalle cada uno de estos elementos.

3.1.1 Amplificación de las señales eléctricas

Las primeras pruebas de este estudio se realizaron visualizando las señales obtenidas por cada micrófono con un osciloscopio. Esta primera introducción dio como resultado que la señal generada por el micrófono tenía poca una amplitud para poder ser tratada con un computador, por lo que se optó por colocar a la salida del micro un amplificador. La configuración tomada es la de amplificador operacional inversor en su consideración ideal por ser la más sencilla.

El amplificador operacional utilizado fue el TL081. Este modelo esta basado en tecnología JFET, dado que su alta ganancia y amplio rango de voltaje de operación lo hace muy adecuado para el tratamiento de señales analógicas. Sus características principales son:

- Ancho de banda muy alta.
- Impedancia de entrada prácticamente infinita.
- Impedancia de salida nula.
- Tensión de desplazamiento entre las entradas inversora y no inversora casi nula.
- Tiempo de conmutación despreciable
- Corrientes de polarización muy pequeñas.

El esquema del circuito implementado fue el siguiente:

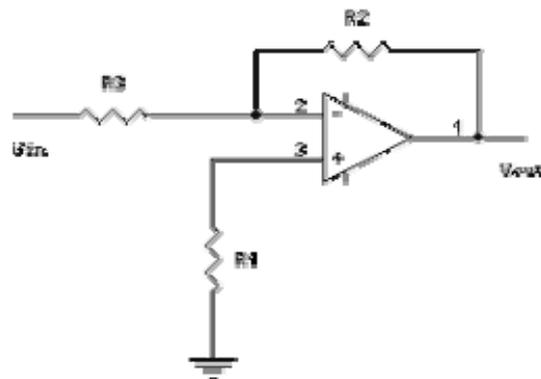


Figura 3-6. Amplificador inversor

En este tipo de amplificador, la tensión de salida es proporcional a la tensión de entrada, siendo el factor de proporcionalidad una constante que definimos con las resistencias R1 y R2. Este simple amplificador operacional puede atenuar o amplificar las señales aplicadas a su entrada y tiene una ganancia negativa, por lo que invierte la fase de la señal (en nuestro caso, este hecho no afectará al objetivo de la medición). La expresión de la ganancia es:

$$V_0 = -V_i \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

La resistencia R_3 compensa los posibles efectos de las intensidades de polarización residuales presentes en las entradas del ampop (lo que conlleva una impedancia de entrada elevada pero no infinita). Esta resistencia R_3 se calcula a partir del paralelo de R_1 y R_2 :

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

3.1.2 Filtrado de las señales eléctricas

Las señales acústicas captadas por los micrófonos son una mezcla de distintas señales y distintas frecuencias que deforman la onda original: su frecuencia y amplitud. Este efecto se introduce en la señal por diversos factores: los aparatos utilizados en las medidas, ruido atmosférico, sonido ambiente, etc. Para paliar estos efectos, hemos implementado diversos filtros de forma que limpiemos las señales de ruido para quedarnos con la señal de interés.

Si consideramos las muestras iniciales, obtenidas directamente de los micrófonos, vemos que el ruido producido por el entorno introduce una salida deformada respecto a la salida de la señal. Para eliminar este efecto, y obtener únicamente frecuencias óptimas correspondientes a las señales producidas, colocamos un filtro de paso bajo en el circuito a la salida del primer amplificador. El filtro está compuesto por una resistencia y un condensador cuya salida se conecta a la entrada del amplificar siguiente.

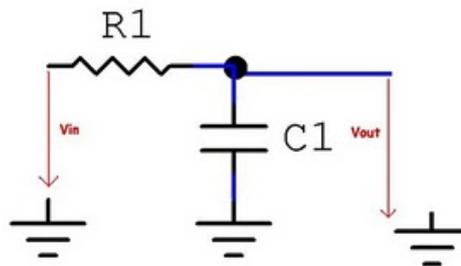


Figura 3-7. Filtro paso-bajo

Elijiendo los valores adecuados de resistencia y condensador podemos eliminar las componentes de alta frecuencia indeseadas. Hemos optado por utilizar un filtro muy sencillo (de primer orden) porque en el procesamiento software realizaremos también un filtrado para quedarnos con las señales de frecuencia más significativa.

3.2 Adquisición de señales.

Una vez acondicionadas las señales eléctricas generadas por los micrófonos, deberemos digitalizar las señales analógicas para que el computador pueda trabajar con ellas

Para la adquisición de las señales generadas por los micrófonos y los circuitos de adaptación hemos instalado una tarjeta de adquisición de datos (en este caso, la tarjeta PCI9111 de Adlink Technology Inc), que es uno de los mecanismos estándares de adquisición de señales en sistemas de instrumentación computerizada. El control y manejo de esta tarjeta se ha realizado utilizando las librerías Matlab suministradas por el fabricante.

La adquisición de datos o adquisición de señales, consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otras electrónicas (sistema digital). Consiste, en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en un computador. Se requiere una nueva etapa de acondicionamiento, que adecua la señal original a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ).

La utilización de este tipo de componentes permite la automatización de las medidas, deseable cuando se deben registrar muchos datos, cuando el registro debe hacerse durante mucho tiempo o, simplemente, cuando se desea más objetividad y fiabilidad en las medidas, tanto si se realizan en el laboratorio como si se trata de controlar el proceso que genera las variables medidas.

Los buses estándar de adquisición de datos son redes de interconexión que permiten realizar transferencia de datos entre las unidades que forman un sistema electrónico, de forma que en un instante de tiempo sólo dos de estas unidades se comunican entre sí.

En nuestro trabajo, se utiliza la tarjeta de adquisición de datos, para recoger las señales de los tres micrófonos previamente acondicionadas y que el computador sea capaz de obtener la distancia entre ellos con un algoritmo en Matlab debidamente implementado.

Estas señales analógicas, se han tomado a través de una de tarjeta de IO instalada en un computador con arquitectura PC por su fácil instalación y captura de señal. El modelo elegido ha sido la PCI9111, de la empresa Adlink Technology Inc, tarjeta avanzada de adquisición de datos basada en la arquitectura de bus de 32 bits, más conocida como de bus PCI con 1 canal de salida analógico de 12 bits de resolución, 16 canales de entrada analógicos multiplexados de 12 bits de resolución, 16 bits digitales de entrada y 16 bits digitales de salida.

Esta tarjeta permite un muestreo de señales de hasta 100 KHz, tanto en analógico como en digital y un rango de entrada configurable a los valores $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 2.5V$, $\pm 1.25V$, $\pm 0.625V$

MATLAB ofrece un lenguaje de programación de alto nivel y una extensa colección de librerías matemáticas y gráficas. Dispone de un Instrument Control ToolBox que consiste en un conjunto de funciones (M-file) y adaptadores (interface driver adaptors) que permiten transferir información entre MATLAB y los instrumentos que soportan la interfase. Así podremos obtener las señales de los micrófonos, representarlas gráficamente en el computador y realizar el cálculo que de lugar a la localización de las fuentes.

El toolbox de adquisición de datos comprende tres componentes: las funciones Mfile, adquisición de datos y los drivers de comunicación del hardware. El flujo de información a través de estos componentes se muestra en la figura 3.8.

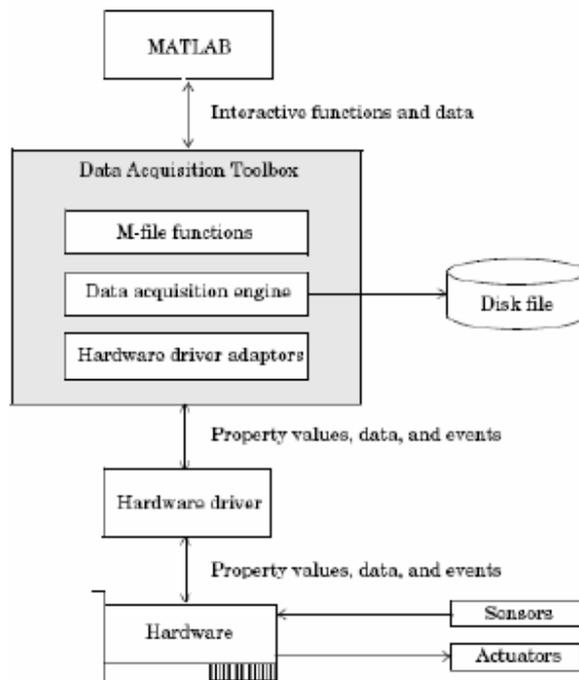


Figura 3-8. Esquema del funcionamiento del Toolbox de Matlab.

Como ejemplo, el siguiente código Matlab permite la adquisición y representación de las señales presentes en uno de sus canales de entrada analógicos:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ADLINK_INFO=saqhwinfo('madlink')
Hwinfo=daqhwinfo;
Adqpters=hwinfo.InstalledAdaptors

%Creamos un objeto de entrada analógica(ai)
ai_device=analoginput('mwadlink',0)
ai0=addchannel(ai_device,0)
get sample(ai_device,0)
set (ai_device,'Sample Rate;N)
%% Con N nº de muestras por Segundo en el canal

set ai_device,'Samples PerTrigger;N2)
%% N2 número de muestras por trigger

stat(ai_device)
ai_data=getdata(ai_device)
plot(ai_data)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

La tarjeta PCI-9111HR viene equipada con 2 conectores de 20 pines insertados en la placa y un conector tipo D en la parte que da al exterior del ordenador. Estos conectores son los CN1, CN2 y CN3. Gráficamente se muestra a continuación cada uno de los conectores correspondientes en primer lugar a las entradas digitales, salidas digitales y por último aparece el conector CN3 utilizado en este estudio.

A) Conector CN1 (Entrada digital)

Leyenda:

DI n: Entrada digital. Canal *n*.

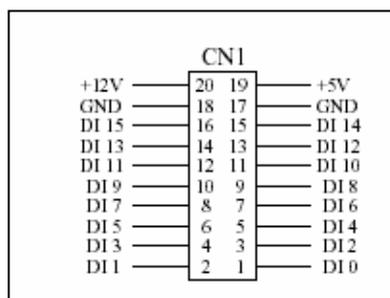


Figura: Asignación de pines para las entradas digitales

B) Conector CN2 (salida digital)

Leyenda:

DO n: Salida digital. Canal *n*.

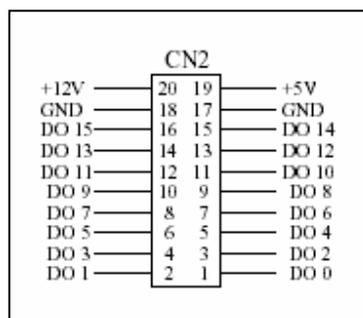


Figura: Asignación de pines para la salida digital

C) Conector CN3 (Entrada/Salida analógica y Extensión entrada/salida digital)

Leyenda:

AI n: Entrada analógica. Canal *n*.

DA out: Canal de salida analógico.

ExtTrg: Señal externa de trigger.

EDI n: Extensión Entrada digital.

Canal *n* (0-3).

EDO n: Extensión Salida digital.

Canal *n* (0-3).

N.C.: Sin conexión.

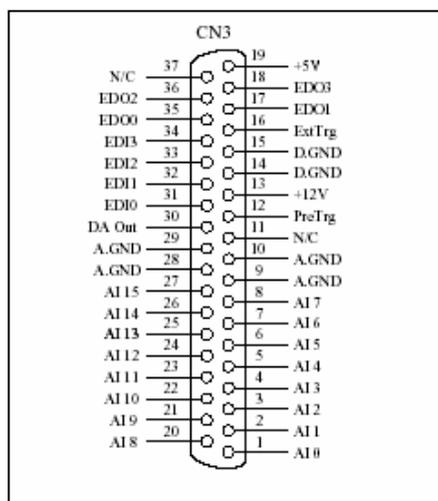


Figura: Asignación de pines para el conector tipo D de 37 pines

3.3 Procesado software

Una vez que el computador ha adquirido las formas de ondas provenientes de los micrófonos y los circuitos de adaptación, estamos en condiciones de implementar un algoritmo que nos permita calcular la posición de la fuente acústica. El esquema del algoritmo implementado en Matlab es el siguiente:

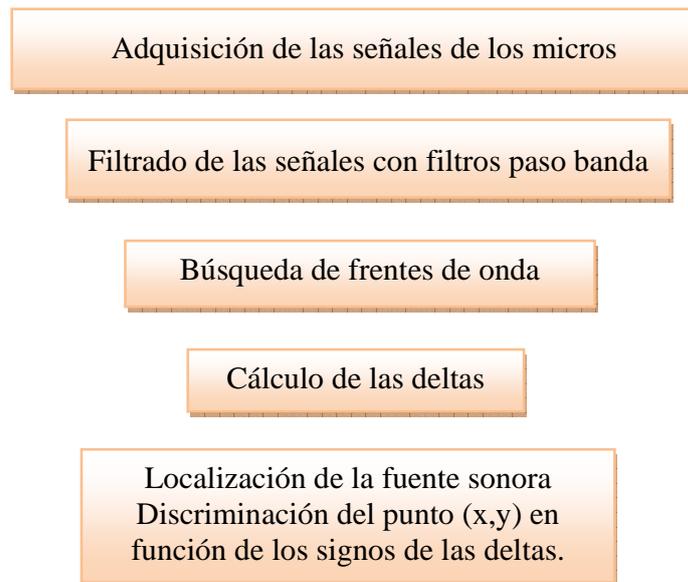


Figura 3-9. Algoritmo diseñado para calcular la posición de la fuente

3.3.1 Filtrado software de las señales

Aunque en la fase de adaptación hardware se implementó un filtro paso-bajo para uniformizar la respuesta frecuencial de los micros y eliminar las componentes de alta frecuencia, es conveniente realizar un segundo filtrado (en este caso software) que nos permita quedarnos con las frecuencias más significativas de la señal acústica recibida y eliminar los armónicos secundarios, que aportan poca información.

Esta discriminación de frecuencias se puede realizar mediante la Transformada de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) que consiste en la transformación de una señal del dominio temporal al dominio frecuencial. Trabajando con la señal en el dominio frecuencial, podemos modificarla y modularla por lo que es muy utilizada en una amplia variedad de

aplicaciones, como filtrado digital, procesado de imagen y sonido, etc. Para este tipo de procesamiento de señales discretas se utiliza la Transformada de Fourier discreta, DFT, ya que permite analizar las frecuencias presentes en la señal no periódica muestreada. La transformada de Fourier discreta puede calcularse de modo muy eficiente mediante el algoritmo FFT (Transformada de Fourier Rápida).

Sean x_0, \dots, x_{n-1} números complejos. La transformada discreta de Fourier (DFT, por sus siglas en inglés) se define como:

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-\frac{2\pi i}{n} jk} \quad j = 0, \dots, n-1$$

La evaluación directa de esa fórmula requiere $O(n^2)$ operaciones aritméticas. Mediante un algoritmo FFT se puede obtener el mismo resultado con sólo $O(n \log n)$ operaciones. En general, dichos algoritmos dependen de la factorización de n . La idea que permite esta optimización es la descomposición de la transformada a tratar en otras más simples y éstas, a su vez, hasta llegar a transformadas de 2 elementos donde k puede tomar los valores 0 y 1. Una vez resueltas las transformadas más simples hay que agruparlas en otras de nivel superior que deben resolverse de nuevo y así sucesivamente hasta llegar al nivel más alto. Al final de este proceso, los resultados obtenidos deben reordenarse.

A partir de las componentes frecuenciales obtenidas por la Transformada de Fourier, nos quedaremos con las componentes de mayor coeficiente y eliminaremos el resto. Dado que la transformada discreta de Fourier inversa es análoga a la transformada discreta de Fourier, con distinto signo en el exponente y un factor $1/n$, cualquier algoritmo FFT puede ser fácilmente adaptado para el cálculo de la transformada inversa.

El tipo de filtro elegido para discriminar esas frecuencias de mayores coeficientes y eliminar el resto es el filtro FIR (*Finite Impulse Response* o *Respuesta finita al impulso*). Se trata de un tipo de filtro digital en el que si la entrada es una señal impulso la salida tendrá un número finito de términos no nulos. Se prefirió este tipo de filtro digital ya que son más rápidos que los IIR (*Infinite Impulse Response*) y tienen una respuesta de fase lineal.

Para la implementación en Matlab se utilizó la instrucción `fir1` que permite obtener filtros de fase lineal. Las pulsaciones se introducen normalizadas a la mitad de la frecuencia de muestreo $f_s/2$, conocida como frecuencia de Nyquist. La tasa o frecuencia de muestreo es el número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua para producir una señal discreta, durante el proceso necesario para convertirla de analógica en digital. En nuestro caso la frecuencia de muestreo fue la máxima permitida por la tarjeta de adquisición de datos (100Khz/3). Se denota como N el orden del filtro de forma que cuanto mayor sea este parámetro mas brusco es el corte entre las frecuencias permitidas y las que no lo son.

3.3.1 Búsqueda de frentes de onda

Una vez obtenidas las formas de onda filtradas, tenemos que localizar los frentes de cada onda, que nos permitirán calcular los retrasos entre las señales captadas por cada micrófono y, con ello, localizar la posición de la fuente sonora.

Estos frentes de onda se pueden localizar buscando el instante en que cada señal supere un determinado umbral configurable. Esta transición brusca, correspondiente al frente de onda, se puede localizar mejor si trabajamos con la derivada de la señal, en lugar de con la señal original. Una aproximación muy sencilla de la derivada de una señal discreta consiste en sustituir cada muestra n por la diferencia entre su valor y el valor de la muestra anterior. Además, dado que las señales provienen de diferentes micrófonos, es conveniente normalizarlas, simplemente dividiendo cada muestra por el valor máximo de la señal.

3.3.1 Cálculo de las deltas y localización de la fuente sonora

Una vez localizados los frentes de onda de cada señal ya podemos calcular los valores de los retrasos entre las señales que, como ya indicamos en el capítulo 2, son la clave para el algoritmo de localización de la fuente acústica. La implementación en Matlab de dicho algoritmo se puede ver en el anexo de este trabajo.

Capítulo 4: Resultados

En este capítulo vamos a mostrar los resultados de aplicar el entorno implementado a diferentes configuraciones particulares. Para la realización del experimento colocamos los micrófonos separados en el plano sobre la mesa de trabajo. En este punto del estudio, era determinante comprobar como afectaba la distancia entre los micros a los resultados obtenidos ya que los posibles acoplamientos para distancias pequeñas eran bastante probables.

Las distancias finales tomadas para las distancias entre los micros, e implementadas en el código de Matlab, fueron:

$f1=407$ cm. (distancia micro1 a micro2)

$f2=215$ cm. (distancia micro2 a micro3)

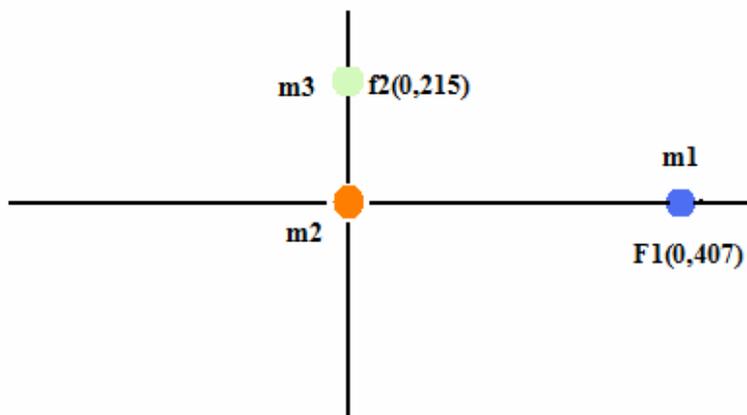


Figura 4-1. Representación de la disposición de los micros en el plano

La intención inicial era comprobar el funcionamiento del sistema con distintos tipos de sonido y frecuencias. Para esto, probamos con tres tipos de sonidos con sus diferentes rangos de frecuencias ya que, en principio tras el amplificado y filtrado realizado en las señales captadas por los micros, podíamos tomar sonidos en el rango 1-10Khz.

De esta forma, vamos a trabajar con tres tipos de señales:

- Golpe: Realizado con dos herramientas. Con esto conseguimos bruscamente una serie de picos máximos en la onda.
- Silbido: Sonido más o menos uniforme, sin variaciones importantes en frecuencia.
- Voz: Realizado únicamente con la palabra “hola”.

Para todas ellas realizamos las pruebas con las fuentes de sonido en las mismas posiciones, recogidas en la siguiente tabla:

Punto	Coordenada X /cm	Coordenada Y /cm
Punto_1	292	0
Punto_2	167	100
Punto_3	120	194
Punto_4	0	108
Punto_5	484	155

4.1 Resultados golpe

Como comentábamos en el punto anterior, según avanzábamos con las pruebas íbamos modificando la implementación del sistema en función de las dificultades encontradas. Una de estas mejoras fue la inclusión en el código de Matlab de los filtros por software. A continuación vamos a presentar los resultados para el “golpe”, obtenidos inicialmente sin filtro por software y en un segundo apartado con el filtro incorporado al código.

4.1.1 Resultados sin filtro por software

En este apartado, hemos considerado la señal tal como se registra tras su paso por el circuito. Los resultados obtenidos para el “golpe” son los siguientes:

punto	Coordenada X /[cm]	Coordenada Y/[cm]	Error X	Error Y
Punto_1	imaginario	imaginario		
Punto_2	217.89	106.35	26.14 %	3.26 %
Punto_3	imaginario	imaginario		
Punto_4	-538.82	-117.27	493.4 %	208,58 %
Punto_5	imaginario	imaginario		

Podemos concluir a tenor de los resultados que es necesario implementar un filtro en el código que filtre la señal y facilite al sistema la localización de los primeros máximos en las señales.

Desde un punto de vista gráfico, la salida de los tres micrófonos recogida por la tarjeta de adquisición de datos es la siguiente.

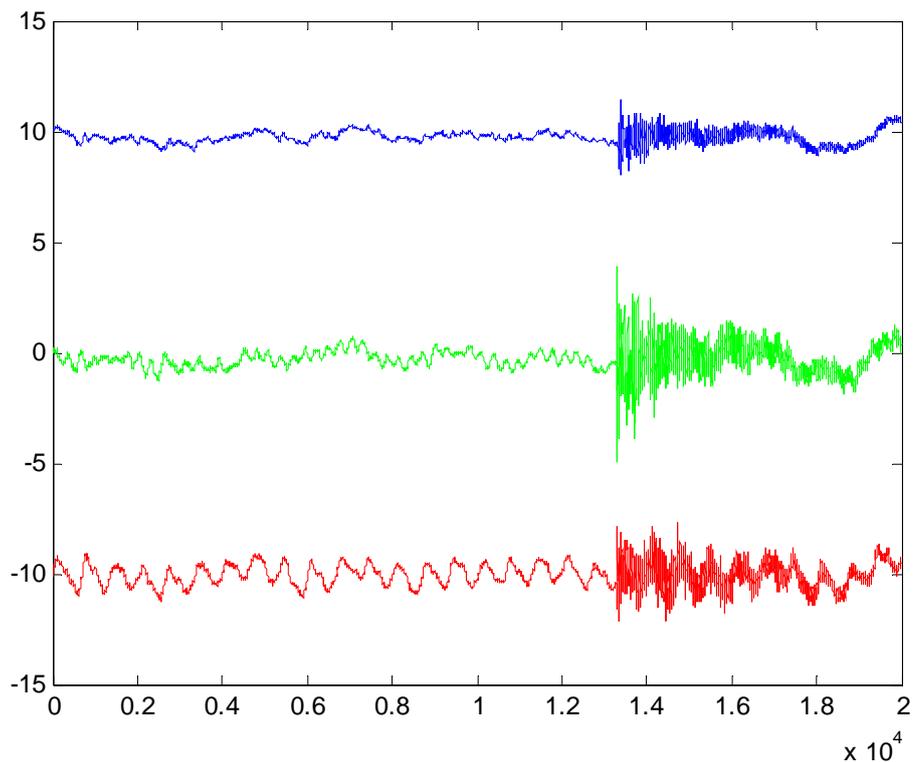


Figura 4-2. Señales captadas por los micros para el punto “Punto_s3”

En la imagen se puede observar, por un lado, el efecto del ruido mayor para el micro3, y cómo la cercanía del micro2 al punto de emisión del sonido provoca que esta señal sea la que mayor amplitud registre. El efecto del ruido puede provocar el error en la localización del primer máximo en cada señal que desencadena el incorrecto resultado para la colocación de la fuente.

4.1.2 Resultados con filtro software

Tras la colocación del filtro software, y tomando como referencia los puntos detallados en el apartado anterior, veremos los resultados obtenidos para la localización de la fuente acústica con las siguientes consideraciones:

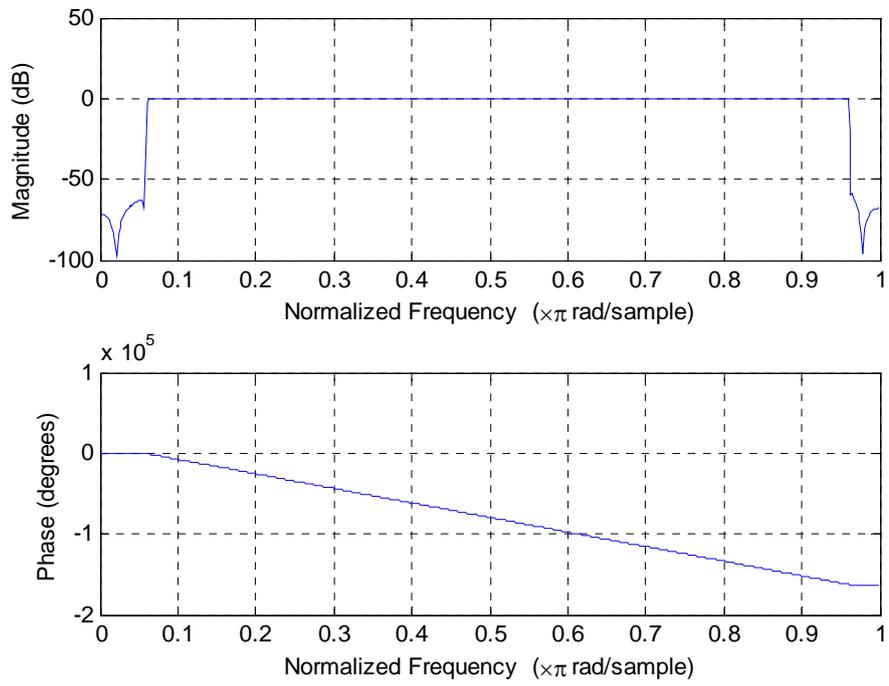
Orden del filtro $N=20$
Umbral= 0.15
Rango filtro por software: [1000/16600, 16000/16600]

Siendo W_n la frecuencia de corte normalizada con respecto a la frecuencia de Nyquists, ($0 \leq W_n \leq 1$).

Como umbral tomamos la amplitud de la onda a partir de la cual buscamos los máximos. Para esto, se realizaron numerosas pruebas, ya que con la respuesta frecuencial de cada micro, y en función de la distancia entre foco emisor y micrófono, los receptores más próximos a la fuente en cada punto tomado registrarían amplitudes mayores que los otros dos, lo que limita la elección del umbral.

La segunda opción hubiese sido tomar tres niveles de umbral diferentes para cada micrófono pero complicaría el algoritmo al considerar el umbral dependiente de la distancia micro-receptor para cada localización del foco emisor. Por ello, resultaba conveniente normalizar las señales.

Un apartado común a todos los puntos analizados va a ser la representación gráfica en Matlab del filtro por software introducido en el código y que se puede ver en la siguiente figura.



En este caso, la salida gráfica de las señales recogidas por los micrófonos, tras pasar por el filtro por software, es la siguiente:

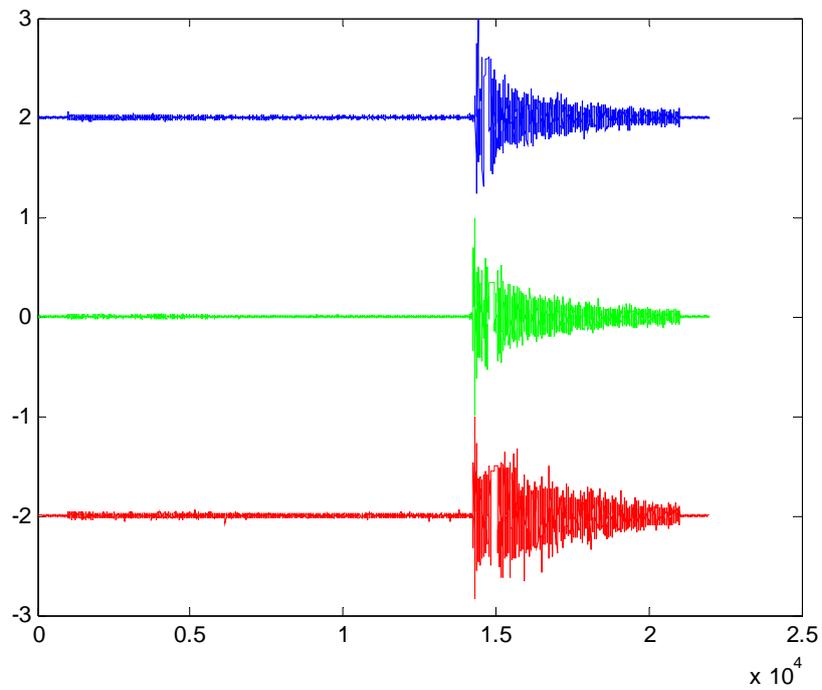


Figura 4-2. Señales para el punto “Punto_3” tras aplicar el filtro paso-banda

Podemos comparar esta gráfica con la del apartado anterior. En ella se observa el filtrado del ruido que precede al cambio brusco en la anchura de la señal y, además, cómo las tres señales aparecen ahora con una amplitud similar, en lugar de ver la señal verde (micro2) mayor por estar más cerca ese micro del punto de emisión del sonido. Esta normalización entre las tres señales facilita la localización del primer máximo, el cálculo correcto de las delta1 y delta2 y, por lo tanto, de la localización de la fuente de sonido.

Los resultados obtenidos de localización de fuente acústica para los cinco puntos considerados son los siguientes:

punto	Coordenada X /[cm]	Coordenada Y/ [cm]	Error X	Error Y
Punto_1	288.16	-17.630	1,31 %	6.04 %
Punto_2	166.90	101.85	0,05 %	0.95 %
Punto_3	119.05	191.40	0,41 %	1.14 %
Punto_4	31.11	112.09	28.8 %	3.79 %
Punto_5	466.67	155.44	3,41 %	0.08 %

A tenor de los resultados, diferencias máximas en la localización de la fuente emisora menores al 4% podemos concretar por un lado, la idoneidad de la colocación del filtro BP en el código de Matlab y la correcta selección de wn1. Además de esto, provocar un cambio brusco en la amplitud de las señales facilita la localización del primer máximo en cada una de las señales.

4.1.3 Efecto de la frecuencia del filtro por software

Comentábamos en el punto anterior, la importancia de la correcta selección de wn1. Para ver de forma efectiva cómo afecta este parámetro a los resultados, la variamos tomando para el estudio las mismas señales recogidas por el micro que en el apartado anterior.

Resultados cambiando la frecuencia del filtro:

$$Wn1 = [5200/16666, 12000/16666];$$

punto	Coordenada X/[cm]	Coordenada Y/[cm]	Error X	Error Y
Punto_1	287.71	6.85	1,47 %	2.35 %
Punto_2	166.90	101.85	0,05 %	0.95 %
Punto_3	116.97	197.41	1.32 %	1.49 %
Punto_4	8.22	116.06	7.61 %	7.47 %
Punto_5	526.96	171.72	8,45 %	3.29 %

Si analizamos los resultados y los comparamos con los obtenidos en el punto anterior, podemos concluir que la elección adecuada del rango de w_n1 da como resultado la localización de la fuente con menor error en sus resultados.

4.2. Resultados silbido

En este segundo estudio tomamos un tipo diferente de sonido para evaluar los resultados obtenidos cuando no tenemos un aumento brusco en la amplitud de la onda percibida por los micrófonos. El método elegido fue mediante silbido provocado en las mismas localizaciones e intentando que su intensidad fuese constante.

Para este caso, viendo las diferentes frecuencias que presentaban las señales, hemos cambiado el rango de frecuencias del filtro a $Wn1 = [500/16666, 3500/16666]$.

A continuación vemos las señales recogidas por los micrófono para un silbido producido, aproximadamente, en el mismo punto que el golpe del apartado anterior.

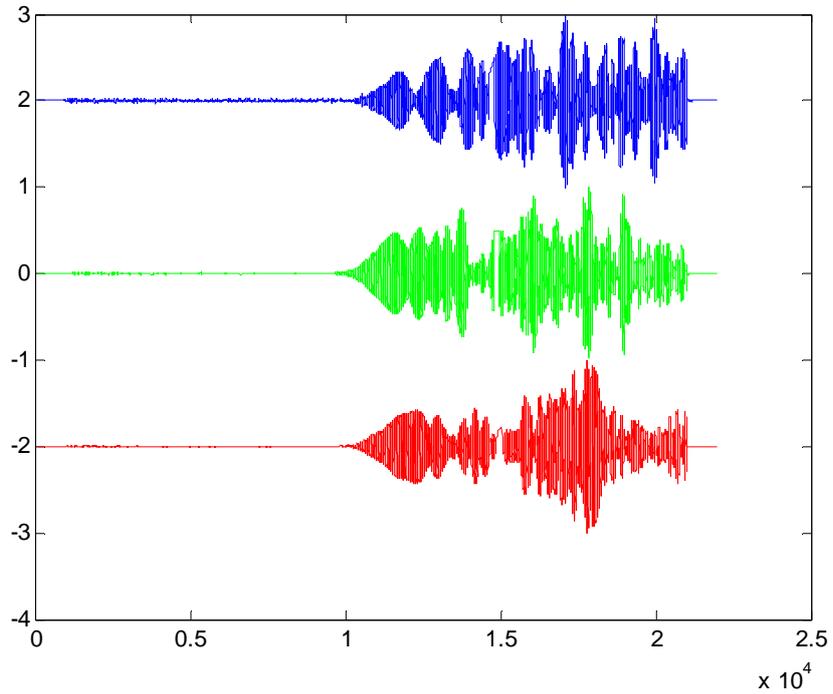


Figura 4-3. Señales captadas por los micros para el punto “silbido2”

Si ampliamos la gráfica obtenida con la señal registrada por cada micrófono podemos observar la ausencia de un máximo nítido. La señal recogida es más bien una envolvente en la que tomar los primeros máximos de la onda para el cálculo de las deltas, y con ello el retraso entre las señales registradas por los micros, resulta más difícil.

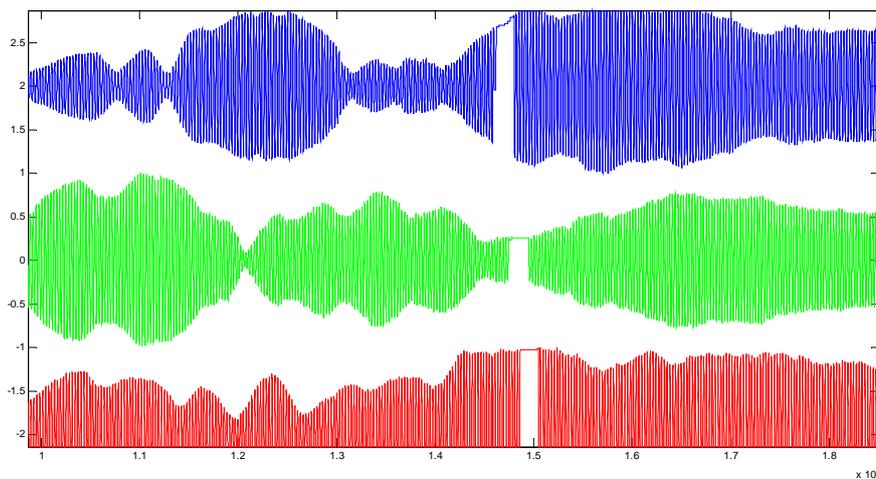


Figura 4-4. Ampliación de las señales captadas por los micros para el punto “silbido2”

Podemos observar cómo no tenemos una única onda sino un conjunto de ellas. A pesar de esto, mostramos los resultados obtenidos en la siguiente tabla:

punto	Coordenada X /[cm]	Coordenada Y/[cm]	Error X	Error Y
Punto_1	287.71	6.85	1.47 %	2.35 %
Punto_2	125.3415	-595.2566	21.4 %	357.18 %
Punto_3	116.97	197.41	1.33 %	1,49 %
Punto_4	imaginario	imaginario		
Punto_5	526.96	171.72	8.45 %	3.29 %

Se puede deducir, a la vista de los resultados, que la localización de los máximos se complica al no tener como en el caso del golpe una única frecuencia a localizar ni un punto de partida en la señal que presente un cambio brusco y simplifique por ello la localización del máximo.

4.3 Resultados voz

Para que la voz humana sea comprensible, es indispensable la presencia de armónicos cuya frecuencia se halle entre 500 y 3500 Hz. Por otra parte, la energía de la voz está contenida en su mayor parte en las bajas frecuencias y su supresión resta potencia a la voz que suena delgada y con poca energía.

Por este comportamiento frecuencial de la voz humana, para realizar el estudio con la palabra “hola” se ha tomado un rango de frecuencias en el intervalo [500, 3500] Hz.

Obtenemos, en este caso, las siguientes representaciones de las señales captadas por los micros:

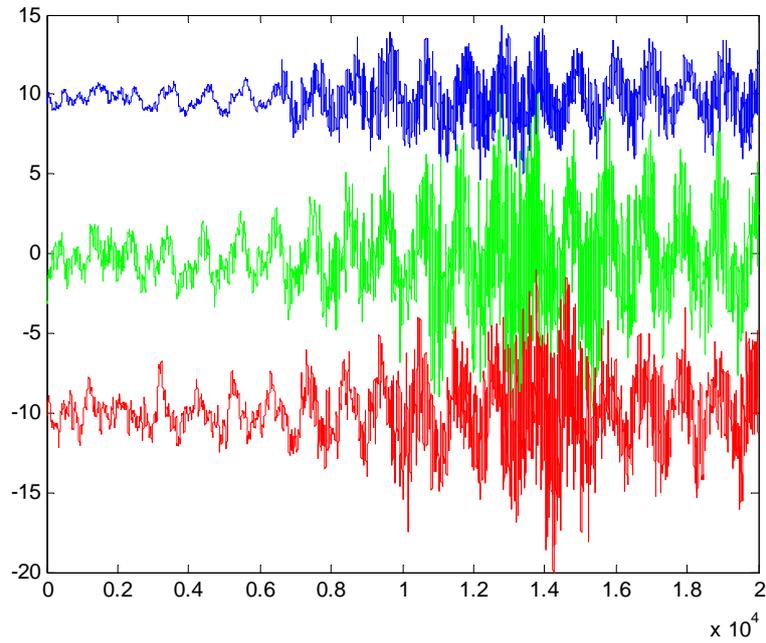


Figura 4-5. Representación de las señales captadas por el micro sin filtrado por software.

Podemos observar, como diferenciación de las gráficas analizadas anteriormente, como el micro1 no mantiene la misma tendencia que sus compañeros, ya que la zona con mayor amplitud de señal en los dos últimos no se aprecia en el primero. Además, observamos la distribución de la onda variante en frecuencia según avanza la recepción de la palabra.

La señal, tras pasar el filtro, puede verse a continuación:

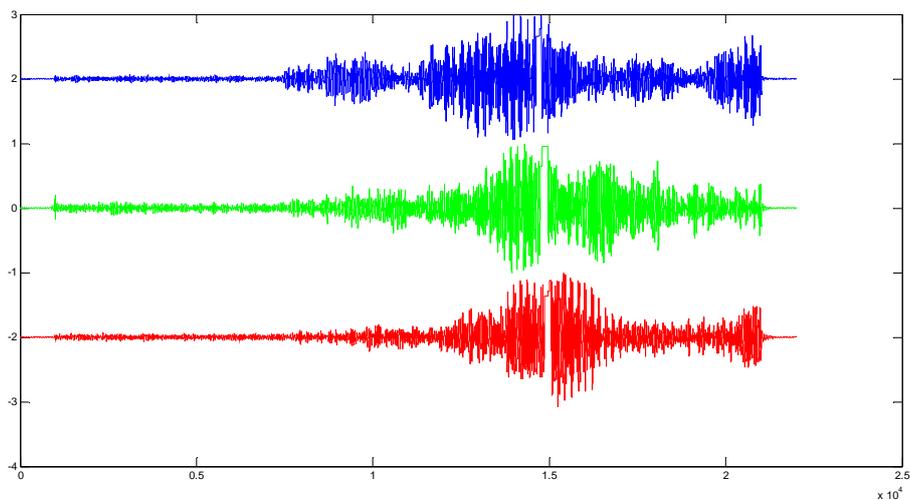
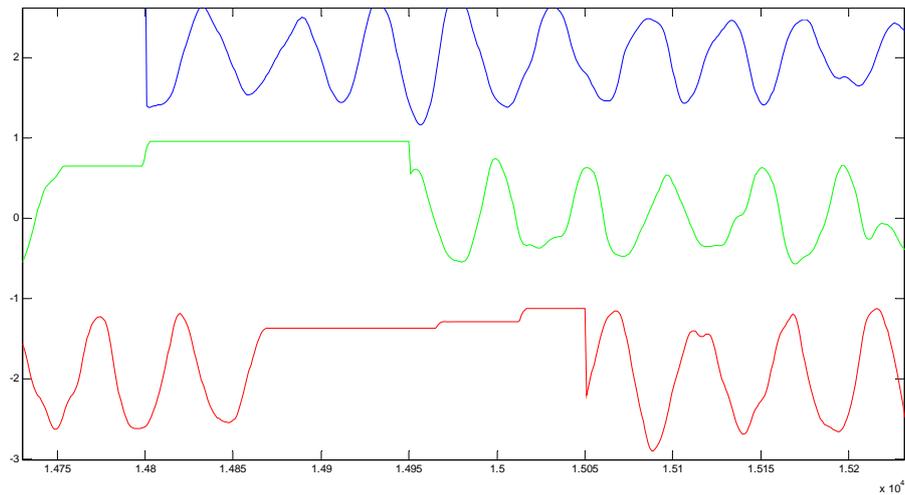


Figura 4-6. Representación de las señales filtradas.

Si analizamos la salida, vemos en la señal azul un primer máximo en torno al punto $i=7000$ que no podemos observar en las otras dos señales. Intentamos por tanto, ampliar la señal hasta localizar un máximo en cada señal con el que forzaremos al programa a tomar para realizar el cálculo de las posiciones del generador de sonido.



Implementamos la búsqueda del primer máximo en los siguientes intervalos para cada micro:

Micro/señal	i mínima	i máxima
Micro1/azul	14800	14900
Micro2/verde	14960	15090
Micro3/roja	1500	15100

En este caso, intentando forzar al sistema para que tome estos máximos localizados tampoco conseguimos un resultado óptimo de la localización de la fuente. Los resultados para cada posición de la fuente emisora no son mostrados al no haber obtenido resultados reseñables.

Capítulo 5: Conclusiones

En este trabajo fin de carrera se ha diseñado y construido un entorno de instrumentación electrónico computerizado, aplicado a la localización de fuentes acústicas en un recinto. La implementación se ha realizado tanto a nivel hardware (instalación de una tarjeta de adquisición de datos, micrófonos, filtros y amplificadores) como a nivel software (instalación de drivers de control de la tarjeta y programación en Matlab)

Para ello, hemos construido un sistema de tres micrófonos en el plano e implementado diversas etapas de acondicionamiento, amplificación y filtrado de las señales recibidas por los tres micros, capturadas desde el computador mediante una tarjeta de adquisición de datos. El algoritmo de localización de la fuente sonora, programado en Matlab, se basa en el cálculo de los retardos entre las tres señales capturadas (Time Delay Estimation), y la intersección de las parábolas obtenidas a partir de esos retardos. Por esta razón, uno de los parámetros críticos que afecta a los resultados obtenidos es la localización correcta de los frentes de onda y sus retrasos relativos correspondientes. Con ese fin, hemos realizado diferentes tratamientos hardware y software que faciliten su localización.

Hemos considerado tres tipos de sonido: golpe, silbido y voz humana. Veíamos en un primer apartado cómo la señal del golpe presentaba un aumento más abrupto en la amplitud de la señal y, por lo tanto, la localización de esos frentes de onda era más sencilla y precisa. Sin embargo, el análisis de las señales recogidas por los micrófonos cuando el sonido es un silbido no tienen la respuesta esperada, seguramente por la transición suave en la amplitud de las señales. Esto es debido por un lado a la ausencia de un máximo claro en cada señal pero también puede ser debido a la respuesta frecuencial de los micros que, como veíamos en el apartado 3.1, no es homogénea entre los receptores.

Como último resultado analizado está la voz, tomando para ello la palabra “hola”. Previo al comienzo de la emisión de la palabra vemos una señal plana, ya que hemos filtrado previamente el ruido de la sala, pero el cambio en la amplitud de las señales resulta muy difícil de localizar, por lo que no hemos conseguido obtener resultados satisfactorios.

Seguramente, los resultados mejorarían bastante si utilizáramos micrófonos más sensibles y con una respuesta frecuencial más homogénea. Sin embargo, no hemos optado por explorar esta posibilidad, ya que no pretendemos construir un sistema profesional sino explorar, desde un punto de vista académico, la construcción y posibilidades de aplicación de un sistema de instrumentación electrónico.

También sería interesante ver como se comporta el sistema en un entorno más abierto, puesto que el laboratorio donde realizamos el trabajo era de dimensiones reducidas y aparecían rápidamente fenómenos de reflexión y reverberación que dificultaban enormemente la localización de los frentes de onda (especialmente en el caso del silbido y la voz humana)

Bibliografía y referencias

1. <http://es.wikipedia.org/wiki/Desfase>
2. <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/2299.pdf>
3. <http://www.foroselectronica.es/f111/amplificador-operacional-inversor-1906.html>
Índice General
4. http://www.adlinktech.com/PD/web/PD_detail.php?pid=28; (ver anexo I.)
5. <http://www.tecnun.es/asignaturas/tratamiento%20digital/tema9.pdf>
6. http://lab51g6.blogspot.com/2010_10_01_archive.html

Anexo I: Código Matlab para localización de fuente acústica por computador.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Tomamos el ejemplo de la muestra Punto_3, que se corresponde con el
golpe en su tercera localización.

load 'Punto_s3';

xg1=ai_data(:,1)
xg2=ai_data(:,2)
xg3=ai_data(:,3)

%Orden del filtro
N = 20;

% Implementación del filtro por software paso banda

Wn1 = [1000/16666,16000/16666];
BP = fir1(N,Wn1);
figure(1);
freqz(BP);
sal1 = conv(BP,ai_data(:,1));

Wn1 = [1000/16666,16000/16666];
BP = fir1(N,Wn1);
figure(1);
freqz(BP);
sal2 = conv(BP,ai_data(:,2));

Wn1 = [1000/16666,16000/16666];
BP = fir1(N,Wn1);
figure(1);
freqz(BP);
sal3 = conv(BP,ai_data(:,3));

sal1=sal1/max(sal1);
sal2=sal2/max(sal2);
sal3=sal3/max(sal3);

figure(1)
plot(ai_data(:,1)+10,'blue')
hold on
plot(ai_data(:,2),'green')
hold on
plot(ai_data(:,3)-10,'red')

figure(2)
plot(sal1+2,'blue')
```

```

hold on
plot(sal2, 'green')
hold on
plot(sal3-2, 'red')

% A partir de la respuesta de los micros obtenemos el retraso entre ellos
% y con esos datos calculamos delta1 y delta2 que sustituiremos después
% en las ecuaciones de las parabolas

figure(3)

%Azul canal 1 (micro 1)
i=1;
C=sal1;
% Buscamos valores de la respuesta del micro1 mayores que determinado
valor
umbral=0.7;
while (C(i)<umbral)
    i=i+1;
end
% Localizamos el primer máximo en el micro1
while (C(i)<C(i+1))
    i=i+1;
end
% Nos quedamos con el primer maximo del micro1
azul=i;
display (azul);

%Verde canal 2 (micro 2)
i=1;
C=sal2;
% Buscamos valores de la respuesta del micro2 mayores que determinado
valor
while (C(i)<umbral)
    i=i+1;
end
% Localizamos el primer maximo del micro2
while (C(i)<C(i+1))
    i=i+1;
end
% Nos quedamos con el primer maximo del micro2
verde=i;
display (verde);

%Rojo canal 3 (micro 3)
i=1;
C=sal3;
% Buscamos valores de la respuesta del micro2 mayores que determinado
valor
while (C(i)<umbral)
    i=i+1;
end
% Localizamos el primer maximo del micro3
while (C(i)<C(i+1))
    i=i+1;

```

```

end
% Nos quedamos con el primer maximo del micro2
rojo=i;
display (rojo);

%Calculo las distancias experimentales a partir de los retrasos obtenidos
delta1=(azul-verde)*30e-6*340*100
delta2=(verde -rojo)*30e-6*340*100

%f= (407;0) distancia entre micro 1 y micro2
%f2= (0,215) distancia entre micro2 y micro3

f=407;

f2=215;

%% Calculamos los cuatro puntos de corte y discrimino del punto en
función del signo de delta1 y delta2
f3=f/2;
f4=f2/2;
d3=delta1/2;
d4=delta2/2;

x(1)=(d4*f3^2*d3^2*f4^2-d4^3*f3^2*d3^2-f4^2*d3*f3^2*d4^2+f4*d3*(-f3^2*(-
f3^2+d3^2)*d4^2*(d3^2*d4^2-f4^2*d3^2-2*d3*d4^3+2*f4^2*d4*d3+d4^4-
d4^2*f3^2+f4^4-2*f4^2*d4^2+f4^2*f3^2))^(1/2)+d4^4*f3^2*d3-
f4^2*d4*f3^4+d4^3*f3^4)/d4/(f4^2*d3^2-f4^2*f3^2+d4^2*f3^2)/f3;
x(2)=(d4*f3^2*d3^2*f4^2-d4^3*f3^2*d3^2-f4^2*d3*f3^2*d4^2-f4*d3*(-f3^2*(-
f3^2+d3^2)*d4^2*(d3^2*d4^2-f4^2*d3^2-2*d3*d4^3+2*f4^2*d4*d3+d4^4-
d4^2*f3^2+f4^4-2*f4^2*d4^2+f4^2*f3^2))^(1/2)+d4^4*f3^2*d3-
f4^2*d4*f3^4+d4^3*f3^4)/d4/(f4^2*d3^2-f4^2*f3^2+d4^2*f3^2)/f3;
x(3)=-(-d4*f3^2*d3^2*f4^2+d4^3*f3^2*d3^2-
f4^2*d3*f3^2*d4^2+d4^4*f3^2*d3+f4*d3*(-f3^2*(-f3^2+d3^2)*d4^2*(d3^2*d4^2-
f4^2*d3^2+2*d3*d4^3-2*f4^2*d4*d3+d4^4-d4^2*f3^2+f4^4-
2*f4^2*d4^2+f4^2*f3^2))^(1/2)+f4^2*d4*f3^4-d4^3*f3^4)/d4/(f4^2*d3^2-
f4^2*f3^2+d4^2*f3^2)/f3;
x(4)=-(-d4*f3^2*d3^2*f4^2+d4^3*f3^2*d3^2-f4^2*d3*f3^2*d4^2+d4^4*f3^2*d3-
f4*d3*(-f3^2*(-f3^2+d3^2)*d4^2*(d3^2*d4^2-f4^2*d3^2+2*d3*d4^3-
2*f4^2*d4*d3+d4^4-d4^2*f3^2+f4^4-
2*f4^2*d4^2+f4^2*f3^2))^(1/2)+f4^2*d4*f3^4-d4^3*f3^4)/d4/(f4^2*d3^2-
f4^2*f3^2+d4^2*f3^2)/f3;

y(1)=-(-f3^2*f4*d4^2-d3^2*f4^3+f3^2*f4*d3*d4+f4^3*f3^2+d3^2*f4*d4^2-
d3^3*f4*d4-(-f3^2*(-f3^2+d3^2)*d4^2*(d3^2*d4^2-f4^2*d3^2-
2*d3*d4^3+2*f4^2*d4*d3+d4^4-d4^2*f3^2+f4^4-
2*f4^2*d4^2+f4^2*f3^2))^(1/2))/(f4^2*d3^2-f4^2*f3^2+d4^2*f3^2);
y(2)=-(-f3^2*f4*d4^2-d3^2*f4^3+f3^2*f4*d3*d4+f4^3*f3^2+d3^2*f4*d4^2-
d3^3*f4*d4+(-f3^2*(-f3^2+d3^2)*d4^2*(d3^2*d4^2-f4^2*d3^2-
2*d3*d4^3+2*f4^2*d4*d3+d4^4-d4^2*f3^2+f4^4-
2*f4^2*d4^2+f4^2*f3^2))^(1/2))/(f4^2*d3^2-f4^2*f3^2+d4^2*f3^2);
y(3)=-(-f3^2*f4*d4^2-d3^2*f4^3-
f3^2*f4*d3*d4+f4^3*f3^2+d3^2*f4*d4^2+d3^3*f4*d4-(-f3^2*(-
f3^2+d3^2)*d4^2*(d3^2*d4^2-f4^2*d3^2+2*d3*d4^3-2*f4^2*d4*d3+d4^4-

```

```

d4^2*f3^2+f4^4-2*f4^2*d4^2+f4^2*f3^2))^(1/2))/(f4^2*d3^2-
f4^2*f3^2+d4^2*f3^2);
y(4)=-(-f3^2*f4*d4^2-d3^2*f4^3-
f3^2*f4*d3*d4+f4^3*f3^2+d3^2*f4*d4^2+d3^3*f4*d4+(-f3^2*(-
f3^2+d3^2)*d4^2*(d3^2*d4^2-f4^2*d3^2+2*d3*d4^3-2*f4^2*d4*d3+d4^4-
d4^2*f3^2+f4^4-2*f4^2*d4^2+f4^2*f3^2))^(1/2))/(f4^2*d3^2-
f4^2*f3^2+d4^2*f3^2);
x
y

% Busco el punto (x,y) entre las 4 posibilidades en función de los
% valores de delta1 y delta2

if(delta1>0)&(delta2>0)
    for i=1:1:4
        if(x(i)<f/2)&(y(i)>f2/2)
            xsol=x(i)
            ysol=y(i)
        end
    end
end

if(delta1>0)&(delta2<0)
    for i=1:1:4
        if(x(i)<f/2)&(y(i)<f2/2)
            xsol=x(i)
            ysol=y(i)
        end
    end
end

if(delta1<0)&(delta2<0)
    for i=1:1:4
        if(x(i)>f/2)&(y(i)<f2/2)
            xsol=x(i)
            ysol=y(i)
        end
    end
end

if(delta1<0)&(delta2>0)
    for i=1:1:4
        if(x(i)>f/2)&(y(i)>f2/2)
            xsol=x(i)
            ysol=y(i)
        end
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%

```

Anexo II: Tarjeta adquisición de datos PCI-9111HR

La tarjeta escogida para la comunicación entre el ordenador y el sistema diseñado es la PCI-9111HR de Adlink Technology Inc . La PCI-9111 es una tarjeta avanzada de adquisición de datos basada en la arquitectura de bus de 32 bits, más conocida como de bus PCI. El diseño de alto rendimiento y el estado actual de la tecnología hace que esta tarjeta sea ideal para el registro de datos y análisis de señales, así como en áreas de la medicina o el control de procesos.

Características.

La PCI-9111HR proporciona las siguientes características avanzadas:

- 32-bit Bus PCI.
- 16-bit de resolución de entrada analógica.
- Auto escaneado de canales hasta un máximo de 256 canales.
- Hasta 100 KHz de índice de muestreo tanto en analógico como en digital.
- 16 canales individuales analógicos de salida.
- Señales de entrada bipolares.
- Velocidad programable: x1, x2, x4, x8, x16.
- Rangos de entrada: +/-10V, +/-5V, +/-2.5V, +/-1.25V, +/-0.625V
- 16 canales de salida digitales y 16 canales de entrada digitales.
- 4 extensiones para salidas y entradas digitales en el conector de 37 pines.
- 3 contadores programables de 16-bit independientes.
- 3 A/D modos de trigger: software, programable y pulso externo.
- Control Pre-trigger y Post-trigger.
- Convertidor integrado de corriente continua a corriente continua para estabilizar
- La fuente analógica.
- Conector tipo D de 37 pines.
- Tamaño compacto: Mitad de tamaño de una PCB normal.

Aplicaciones.

- Control de encendido de industrias y laboratorios.
- Gestión de energía.
- Comunicaciones.
- Compatible con canales de entrada digitales como TTL.
- Control de seguridad.
- Realizar test.
- Medida de la anchura y periodo de pulsos.

- Contadores de frecuencias y eventos.
- Generación de pulsos y formas de onda.
- Driver para interfaz BCD

Entrada/salida digital

- Número de canales: 16 compatibles con TTL de salida y entrada.
- Voltaje de entrada
- Low: Min. 0V; Max. 0.8V
- High: Min.+2.0V; Max. 5.5V
- Carga de entrada
- Low: +0.8V @ -0.2mA max.
- High: +2.7V @ +20mA max.
- Voltaje de salida
- Low: Min. 0V; Max. 0.4V
- High: Min. 2.4V; Max. 5.5V
- Driving Capacity
- Low: Max. +0.5V a 8.0mA (Sink)
- High: Min. 2.7V a 0.4mA (Source)

Especificaciones generales.

- Conector tipo D de 37 pines.
- Rango operacional de temperatura: 0oC ~ 60oC.
- Temperatura de almacenaje: -20oC ~ 80oC.
- Humedad: 5 ~ 95% sin condensación.
- Consumo de energía: +5V @ 570mA.
- Dimensiones: Tamaño compacto, sólo 175mm x 105mm.

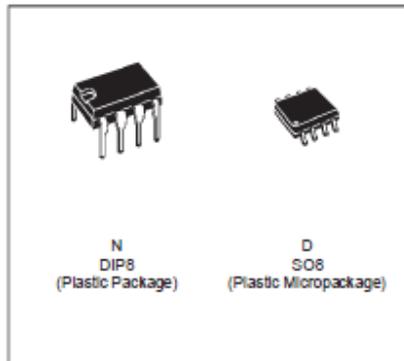
Anexo III: Hoja de características del amplificador TL081



TL081 TL081A - TL081B

GENERAL PURPOSE J-FET SINGLE OPERATIONAL AMPLIFIER

- WIDE COMMON-MODE (UP TO V_{CC}^+) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE : 18V/ μ s (typ)



DESCRIPTION

The TL081, TL081A and TL081B are high speed J-FET input single operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

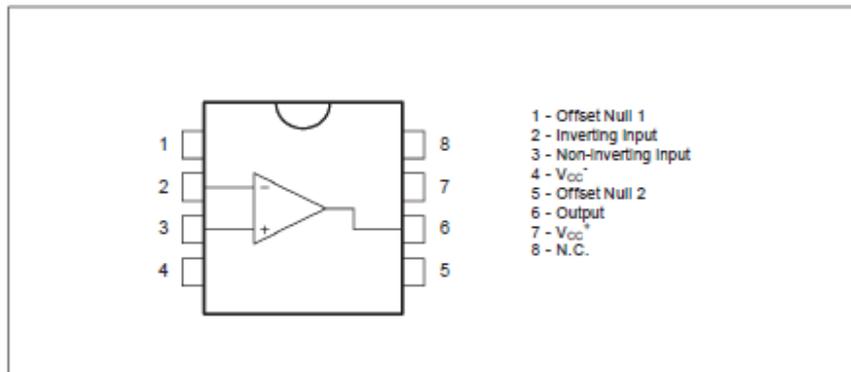
The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient.

ORDER CODES

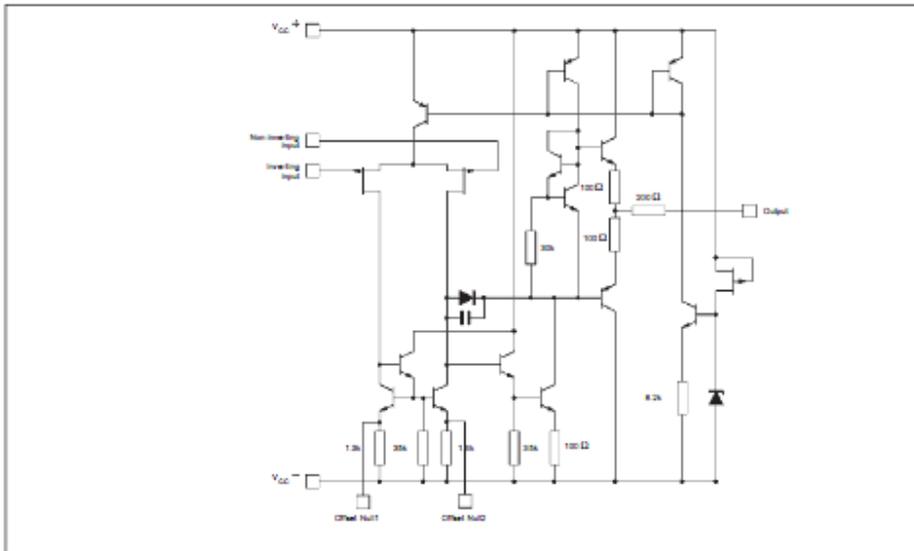
Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
TL081M/A/M/BM	-55°C, +125°C	•	•
TL081I/AI/BI	-40°C, +105°C	•	•
TL081C/AC/BC	0°C, +70°C	•	•

Examples : TL081CD, TL081IN

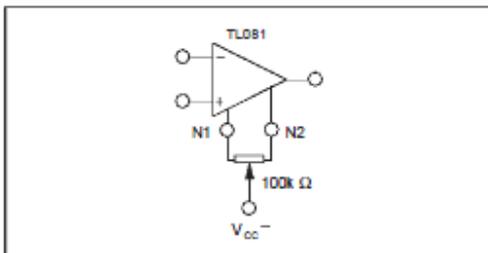
PIN CONNECTIONS (top view)



SCHEMATIC DIAGRAM



INPUT OFFSET VOLTAGE NULL CIRCUITS



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value
V_{CC}	Supply Voltage - (note 1)	± 18
V_i	Input Voltage - (note 3)	± 15
V_{id}	Differential Input Voltage - (note 2)	± 30
P_{tot}	Power Dissipation	680
	Output Short-circuit Duration - (note 4)	Infinite
T_{oper}	Operating Free Air Temperature Range	TL081C,AC,BC TL081A,I,BI TL081M,AM,BM 0 to 70 -40 to 105 -55 to 125
T_{stg}	Storage Temperature Range	-65 to 150

- Notes:
1. All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages. The zero reference level is the midpoint between V_{CC+} and V_{CC-} .
 2. Differential voltages are at the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
 3. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
 4. The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to the absolute maximum ratings.

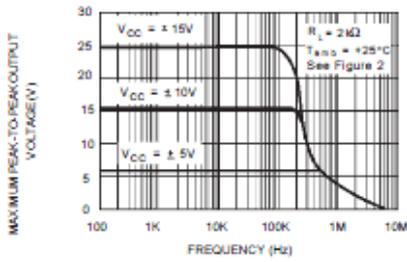
ELECTRICAL CHARACTERISTICS

V_{CC} = ±15V, T_{amb} = 25°C (unless otherwise specified)

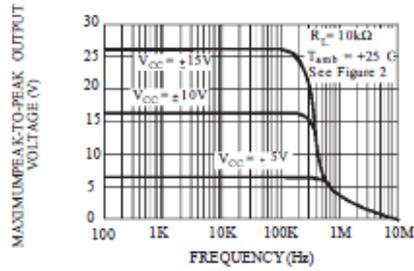
Symbol	Parameter	TL081M,AC,AL, AM,BC,BI,BM			TL081C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
V _{io}	Input Offset Voltage (R _S = 50Ω) T _{amb} = 25°C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}		3 3 1	10 6 3 13 7 5		3	10 13	mV
DV _{io}	Input Offset Voltage Drift		10			10		μV/°C
I _{io}	Input Offset Current * T _{amb} = 25°C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}		5	100 4		5	100 4	pA nA
I _b	Input Bias Current * T _{amb} = 25°C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}		20	200 20		20	400 20	pA nA
A _{vd}	Large Signal Voltage Gain (R _L = 2kΩ, V _O = ±10V) T _{amb} = 25°C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}	50 25	200		25 15	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio (R _S = 50Ω) T _{amb} = 25°C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}	80 80	86		70 70	86		dB
I _{CC}	Supply Current, no Load T _{amb} = 25°C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}		1.4	2.5 2.5		1.4	2.5 2.5	mA
V _{com}	Input Common Mode Voltage Range	±11	+15 -12		±11	+15 -12		V
CMR	Common Mode Rejection Ratio (R _S = 50Ω) T _{amb} = 25°C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}	80 80	86		70 70	86		dB
I _{os}	Output Short-circuit Current T _{amb} = 25°C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}	10 10	40	60 60	10 10	40	60 60	mA
±V _O PP	Output Voltage Swing T _{amb} = 25°C T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}							V
SR	Slew Rate (V _{in} = 10V, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, unity gain)		8	16		8	16	V/μs
t _r	Rise Time (V _{in} = 20mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, unity gain)			0.1		0.1		μs
K _{OV}	Overshoot (V _{in} = 20mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, unity gain)			10		10		%
GBP	Gain Bandwidth Product (f = 100kHz, T _{amb} = 25°C, V _{in} = 10mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF)	2.5	4		2.5	4		MHz
R _i	Input Resistance		10 ¹²			10 ¹²		Ω
THD	Total Harmonic Distortion (f = 1kHz, A _V = 20dB, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, V _O = 2V _{PP})		0.01			0.01		%
e _n	Equivalent Input Noise Voltage (f = 1kHz, R _s = 100Ω)		15			15		nV √Hz
∅ _m	Phase Margin		45			45		Degrees

* The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every 10°C increase in the junction temperature.

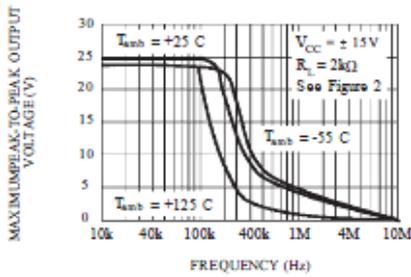
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS FREQUENCY



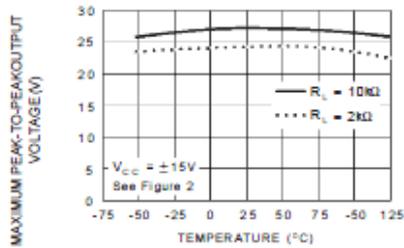
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS FREQUENCY



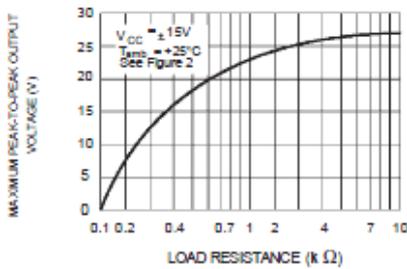
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS FREQUENCY



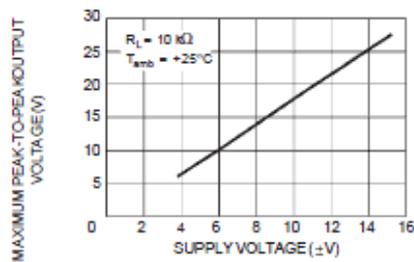
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS FREE AIR TEMP.



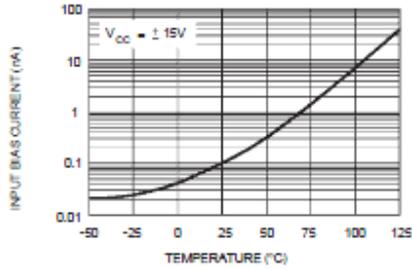
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS LOAD RESISTANCE



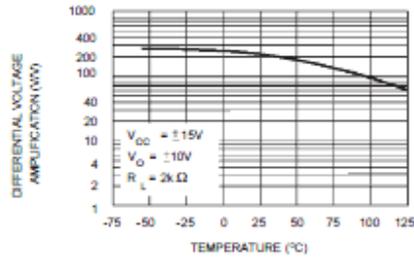
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS SUPPLY VOLTAGE



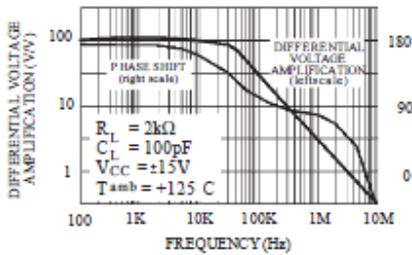
INPUT BIAS CURRENT VERSUS FREE AIR TEMPERATURE



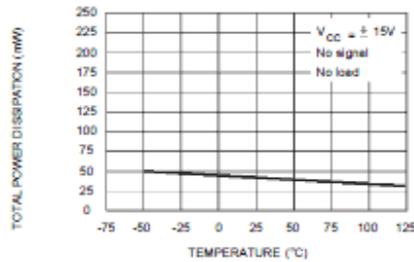
LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION VERSUS FREE AIR TEMPERATURE



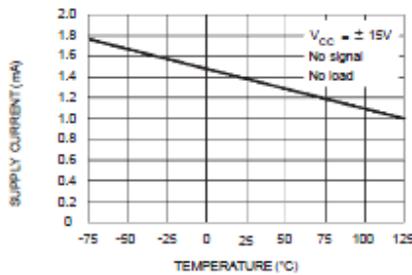
LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION AND PHASE SHIFT VERSUS FREQUENCY



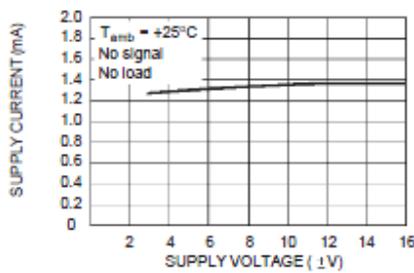
TOTAL POWER DISSIPATION VERSUS FREE AIR TEMPERATURE



SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER VERSUS FREE AIR TEMPERATURE

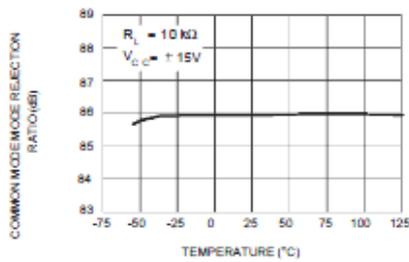


SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER VERSUS SUPPLY VOLTAGE

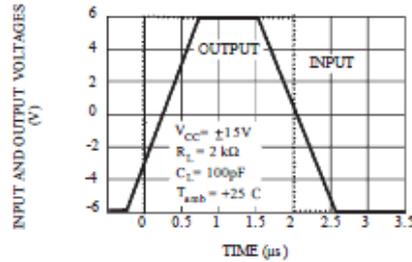


TL081 - TL081A - TL081B

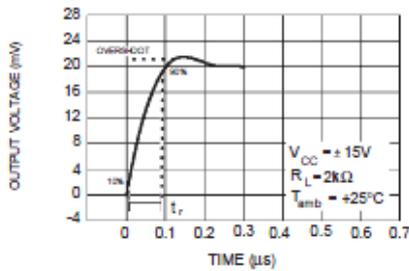
COMMON MODE REJECTION RATIO VERSUS FREE AIR TEMPERATURE



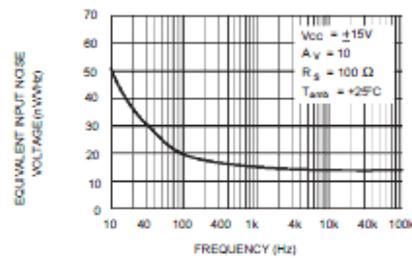
VOLTAGE FOLLOWER LARGE SIGNAL PULSE RESPONSE



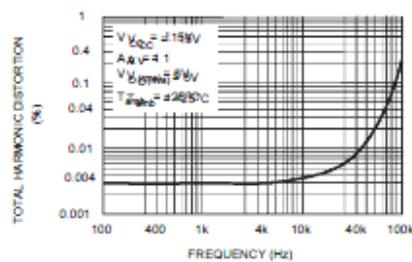
OUTPUT VOLTAGE VERSUS ELAPSED TIME



EQUIVALENT INPUT NOISE VOLTAGE VERSUS FREQUENCY



TOTAL HARMONIC DISTORTION VERSUS FREQUENCY



PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

Figure 1 : Voltage Follower

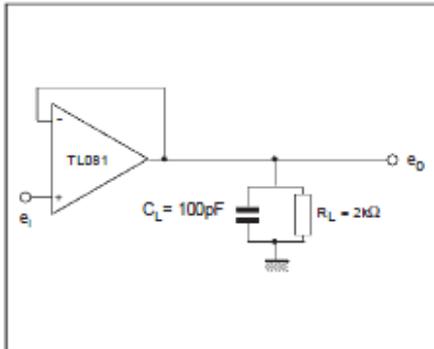
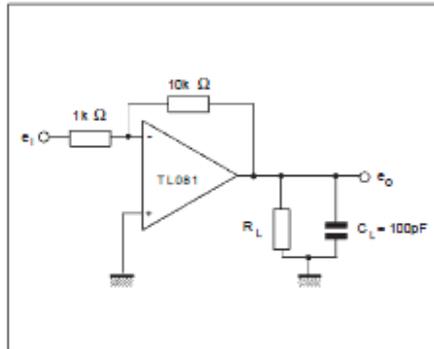
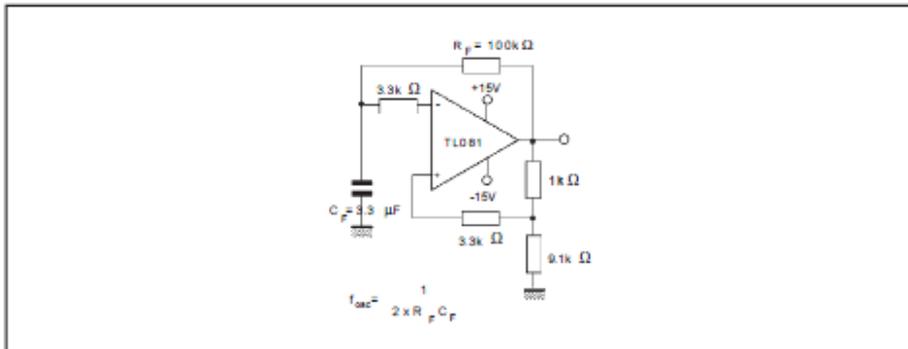


Figure 2 : Gain-of-10 Inverting Amplifier

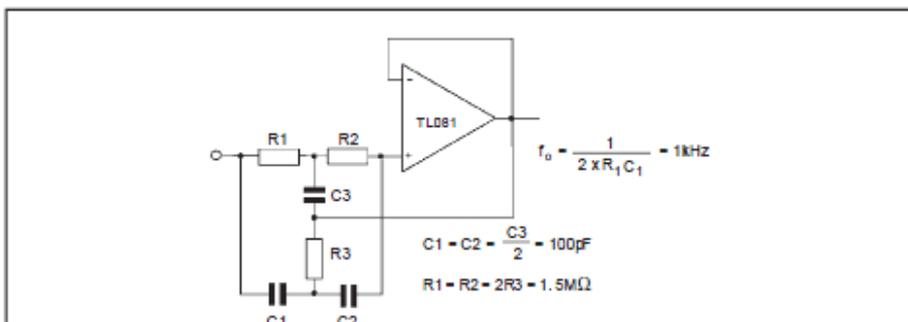


TYPICAL APPLICATIONS

(0.5Hz) SQUARE WAVE OSCILLATOR

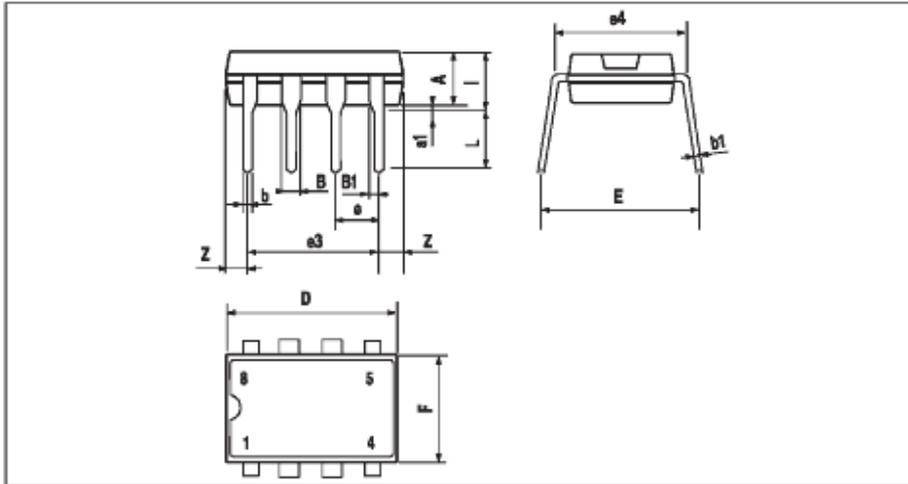


HIGH Q NOTCH FILTER



TL081 - TL081A - TL081B

PACKAGE MECHANICAL DATA
8 PINS - PLASTIC DIP



Dimensions	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A		3.32			0.131	
a1	0.51			0.020		
B	1.15		1.65	0.045		0.065
b	0.356		0.55	0.014		0.022
b1	0.204		0.304	0.008		0.012
D			10.92			0.430
E	7.95		9.75	0.313		0.384
e		2.54			0.100	
e3		7.62			0.300	
e4		7.62			0.300	
F			6.6			0.260
i			5.08			0.200
L	3.18		3.81	0.125		0.150
Z			1.52			0.060