



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SONOMETRO
INTEGRADOR DE BAJO COSTO UTILIZANDO PLACAS RASPBERRY

AUTOR

JOSÉ LUIS BALSECA CORONEL

AÑO

2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SONÓMETRO
INTEGRADOR DE BAJO COSTO UTILIZANDO PLACAS RASPBERRY

Trabajo de titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos
para optar por el título de Ingeniero en Sonido y Acústica.

Profesor Guía
MSc. Miguel Ángel Chávez Avilés

Autor
José Luis Balseca Coronel

Año
2018

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo Desarrollo y evaluación de un prototipo de sonómetro integrador de bajo costos utilizando placas Raspberry, a través de reuniones periódicas con el estudiante José Luis Balseca Coronel, en el semestre 2018-1, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

Miguel Ángel Chávez Avilés

Máster en Ingeniería de Construcción Sostenible

CI:1710724848

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado el trabajo Desarrollo y evaluación de un prototipo de sonómetro integrador de bajo costos utilizando placas Raspberry de José Luis Balseca Coronel, en el semestre 2018-1, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Héctor Merino Navarro
Máster en Postproducción Digital
CI:1756785562

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

José Luis Balseca Coronel

CI:1716723711

DEDICATORIA

A mi madre, por ser la luz en el camino durante toda mi vida. A mi padre Manuel, por cuidarme desde el cielo. Y a Batman por salvar ciudad Gótica.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo desarrollar y evaluar un prototipo de sonómetro integrador, utilizando como fuente de procesamiento, una placa Raspberry Pi 3 modelo B y un micrófono de bajo costo como transductor.

Para el desarrollo del prototipo se usó un micrófono pre amplificado, en conjunto con una pantalla táctil especial para monitorear los resultados obtenidos. Para la parte programática se usó lenguaje Python dentro del sistema operativo del Raspberry Pi, Raspbian. Por otra parte, la evaluación de la precisión presentada por el prototipo se realizó mediante medición de ruido rosa durante varios períodos de tiempo y a diferentes frecuencias en un estudio de grabación de la Universidad de las Américas y se realizó un análisis de los resultados relevantes.

ABSTRACT

The objective of this project is to develop and evaluate a prototype of an integrating sound level meter using a Raspberry Pi 3 model B as the processing source and a low-cost microphone as the transducer.

For the development of the prototype, a pre-amplified microphone was used with a special touch screen to monitor the results obtained. For the programmatic part, Python language was used inside the operating system of the Raspberry Pi, Raspbian. On the other hand, the precision evaluation presented by the prototype was made by the measurement of pink noise for several periods of time and different frequencies in a recording studio of the Universidad de las Americas and a summary of the relevant results was made.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1) Antecedentes.....	1
1.2) Hipótesis.....	1
1.3) Marco referencial.....	2
1.4) Alcance.....	2
1.5) Justificación.....	3
1.6) Objetivos.....	4
1.6.1) Principal.....	4
1.6.2) Específicos.....	4
2. Marco teórico.....	4
2.1) Niveles de presión sonora.....	4
2.1.1) Ponderación A y C.....	5
2.2) Instrumentos de medición acústica.....	6
2.2.1) Sonómetro.....	6
2.2.2) Micrófonos.....	8
2.3) Conversión analógica a digital.....	9
2.4) Descriptores de ruido.....	9
2.5) Programación en Raspberry Pi.....	9
2.6) Ruido rosa.....	10
2.7) Normativa IEC 61672-1.....	10
2.7.1) Objeto de la normativa.....	11
2.7.2) Condiciones ambientales de referencia.....	11
2.7.3) Generalidades.....	11
2.7.4) Ponderaciones frecuenciales.....	12
2.7.5) Linealidad de nivel.....	14
2.7.6) Estabilidad durante el funcionamiento continuo.....	14
2.7.7) Presentación de resultados.....	14
3. Diseño y evaluación.....	14
3.1) Dispositivos.....	15
3.1.1) Micrófono USB CAD U9.....	15

3.1.2) Sonómetro WENSN WS1361	15
3.1.3) Raspberry Pi 3	16
3.2) Verificación	17
3.3) Consideraciones de medición.....	17
3.4) Diseño de prototipo.....	18
3.5) Proceso de evaluación	19
3.6) Programa integrador de niveles de presión sonora	19
3.7) Algoritmo del programa integrador	19
3.8) Calibración.....	22
3.9) Obtención de datos digitales	22
3.10) Procesamiento de datos	23
3.11) Ponderación A y C.....	23
3.12) Exportación de datos a archivos externos.....	23
3.13) Recinto.....	24
4. Resultados	24
4.1) Calibración.....	24
4.2) Resultados de respuesta en frecuencia	25
4.2.1) Error de respuesta en frecuencia.....	27
4.3) Análisis global de resultados	29
5. Análisis económico.....	31
5.1) Tabla de costos	31
5.2) Análisis costo/error	32
6. Conclusiones y recomendaciones	34
6.1) Conclusiones	34
6.2) Recomendaciones.....	34
REFERENCIAS.....	36
ANEXOS	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas de Fletcher y Munson.	5
Figura 2 - Curvas de corrección por frecuencia para filtros A, B y C.....	6
Figura 3 - Etapas del sonómetro.	8
Figura 4 - Esquema de un micrófono de condensador.....	8
Figura 5 - Proceso de conversión analógica a digital.	9
Figura 6 - Ponderaciones Frecuenciales y límites de aceptación.....	13
Figura 7 - Micrófono CAD U9.	15
Figura 8 - Sonómetro WENSN WS1361.....	16
Figura 9 - Placa de procesamiento Raspberry Pi 3.	17
Figura 10 - Fotografía del prototipo ensamblado y funcionando.	18
Figura 11 - Diagrama de flujo del algoritmo del programa.	20
Figura 12 - Nivel de presión sonora promedio obtenido en dB por frecuencia del micrófono CAD U9 y CESVA SC310.	25
Figura 13 - Nivel de presión sonora promedio obtenido en dB por frecuencia del micrófono CAD U9 y CESVA SC310.	26
Figura 14 - Error absoluto promedio en dB de micrófono CAD U9 y sonómetro WENSN sobre sonómetro CESVA.	28
Figura 15 - Error absoluto promedio en dB de micrófono CAD U9 y sonómetro WENSN sobre sonómetro CESVA.	28

1. Introducción

1.1) Antecedentes

El estudio e investigación de la acústica y sonido es un proceso en el cual se realiza la medición de parámetros físicos, psicológicos y/o biológicos. Para ello se ha necesitado de instrumentos de precisión que sean capaces de cumplir con las distintas normas de calidad expuestas internacionalmente. Dentro de éstos se tiene a los sonómetros, los cuales son los más usados para mediciones de ruido y sirven esencialmente para cuantificar niveles de sonido durante varios periodos de tiempo. De esta forma, se puede determinar el cumplimiento de normas, así como también para generar mapas de ruido.

Una de las mayores limitaciones de los sonómetros es que al ser un instrumento de gran precisión, su costo es elevado, al menos cuando se quiere conseguir los requisitos de un sonómetro de primera clase (Baranski, 2014). También hay que tomar en cuenta que las variadas condiciones ambientales hacen un reto la calibración de dichos dispositivos (Mydlarz, Salamon, Bello, 2017) que a su vez, dependiendo del lugar, su facilidad de compra está condicionada por la escasez de distribuidores. Es por ello que se ha visto la necesidad de crear métodos alternativos de medición o de construcción de prototipos de sonómetros integradores de bajo costo. Por lo cual, se ha identificado a las placas de procesamiento Raspberry Pi como una alternativa accesible en costo en el mercado.

Las placas Raspberry Pi han sido usadas en varias aplicaciones de sonido como medidores de presión instantánea (García, Castell, Solano, Cobos, & Navarro, 2015) y gracias a su tamaño, será de fácil transporte y manejo.

1.2) Hipótesis

El sonómetro diseñado y construido a partir de una placa de procesamiento Raspberry Pi 3 podría llegar a presentar una precisión que cumpla con los estándares de un sonómetro de clase 2 presentado en la norma UNE-EN 61672-1.

1.3) Marco referencial

El diseño del sonómetro integrador utilizando una placa Raspberry Pi fue tomado en cuenta según los resultados de trabajos anteriores como los de Noriega-Linares y Navarro (2016), usando el código de programación fuente en lenguaje Python.

Para la implementación se utilizarán los distintos puertos de entrada USB con los que se cuenta en la placa Raspberry Pi, los cuales permitirán la conexión e implementación de manera rápida.

Todo el proceso de diseño, prueba e implementación será realizado en una sala de grabación de la Universidad de las Américas donde se podrá determinar su exactitud o incertidumbre, comparándolo con el sonómetro CESVA SC310 disponible en dicho recinto, con diferentes ensayos acústicos.

Si bien es cierto que las aplicaciones móviles en *smartphones* también pueden ser una alternativa viable. Se debe considerar que, al tener gran variedad de *smartphones*, no se puede tener una aplicación ni sensibilidad del micrófono unificada (Kardous, Shaw, 2014)

1.4) Alcance

El proyecto consiste en determinar la precisión de un sonómetro diseñado y construido con una placa de procesamiento Raspberry Pi 3 basado en lenguaje de programación Python. El transductor a utilizar será un micrófono de tipo electret y será sometido a calibraciones mediante instrumentos profesionales.

El parámetro a determinar y evaluar principalmente será el L_{eq} , el cual es el nivel de presión sonora equivalente durante un periodo de tiempo. Los resultados obtenidos serán en ponderación tipo A y C.

La precisión será obtenida mediante la comparación con equipos y/o sonómetros convencionales.

Principalmente, este prototipo permitirá la accesibilidad de equipamiento acústico con un mayor campo de personalización y control en su funcionamiento por el ajuste de código fuente según la necesidad del operador.

1.5) Justificación

La conveniencia de este proyecto radica en la innovación, desarrollo y sustentabilidad, debido a que se tiene una escasa distribución de equipamiento acústico a nivel nacional.

El desarrollo de un sonómetro integrador utilizando placas Raspberry Pi puede traer el beneficio de tener acceso a equipamiento personalizado y dependiendo su evaluación, se podrá determinar la precisión que éste presente frente a sonómetros convencionales.

Se ha escogido como placa de procesamiento a la placa Raspberry Pi 3 ya que el lenguaje de programación nativo, Python, cuenta con varias librerías especializadas en el procesamiento de sonido y tiene una comunidad bastante amplia y activa.

Por el lado funcional, la placa Raspberry Pi 3 tiene una ventaja de procesamiento frente a otras placas como el Arduino o microcontroladores debido que cuenta con un procesador ARM de 4 núcleos con una velocidad de procesamiento de hasta 1.2GHz, la cual supera significativamente a la competencia. Posee también una ventaja de conexión digital ya que posee 4 entradas USB y una salida HDMI, las cuales permitirán la conexión de micrófonos USB de manera directa y de monitores de imagen sin tener que pasar por una etapa de conversión análogo a digital o viceversa; etapa la cual es inevitable con otro tipo de microcontroladores. Usualmente con las otras opciones de microcontroladores o Arduino, se necesita de una computadora para poder visualizar los resultados, pero con una placa Raspberry ya no será necesario, debido a que posee entradas y salidas análogas que permiten la conexión con pantallas táctiles diseñadas específicamente para este modelo de Raspberry y eso también significa su fácil transporte en las mediciones acústicas.

Servirá de base para el crecimiento de investigaciones futuras y de empleo de recursos más eficientes y/o efectivos, aprovechando nuevas tecnologías relacionadas con la Ing. Acústica. Además, se tendrá un impacto local, nacional y regional sobre las distintas aplicaciones que este tipo de prototipo puede brindar al menos en el campo educativo.

1.6) Objetivos

1.6.1) Principal

Desarrollar y evaluar el sonómetro integrador desarrollado a partir de placas de procesamiento Raspberry Pi.

1.6.2) Específicos

Desarrollar un código de programación eficiente tomando como referencia las diferentes librerías de programación para Python.

Identificar la precisión del prototipo a través de prácticas y pruebas tomando como referencia de niveles la norma IEC 61672-1

Analizar en el ámbito económico el costo-beneficio sobre el prototipo diseñado.

2. Marco teórico

2.1) Niveles de presión sonora

Cuando se produce un cambio de presión en el medio, en este caso el aire, la variación de presión se propaga en forma de ondas y a medida que se aleja de la fuente pierde su intensidad. Para poder cuantificar estas variaciones de presión se tienen en cuenta dos variables: amplitud y frecuencia de onda.

La amplitud es representada en la unidad de medida Pascal (Pa) y según la frecuencia de la onda, el oído humano puede escuchar desde los 20 μ Pa hasta los 200 Pa. Debido a esta diferencia de presión tan grande, la cuantificación del

nivel se lo ha hecho con una relación logarítmica, donde se toma como referencia la presión mínima audible. La ecuación logarítmica es:

$$NPS = 20\log\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde P_{ref} es la presión de referencia y P es la presión de la onda sonora medida.

Hay que tomar en cuenta que el oído humano no escucha de la misma manera en todo el rango auditivo. Gracias al estudio de Fletcher y Munson en el año 1933, se logró determinar curvas de sonoridad a distintas frecuencias y cómo el ser humano realmente percibe el sonido. Como se puede apreciar en la Figura 1, cada curva lleva el nombre de fon y empieza desde los 0 FON hasta los 120 FON, los cuales son el umbral de audición y el umbral de dolor respectivamente.

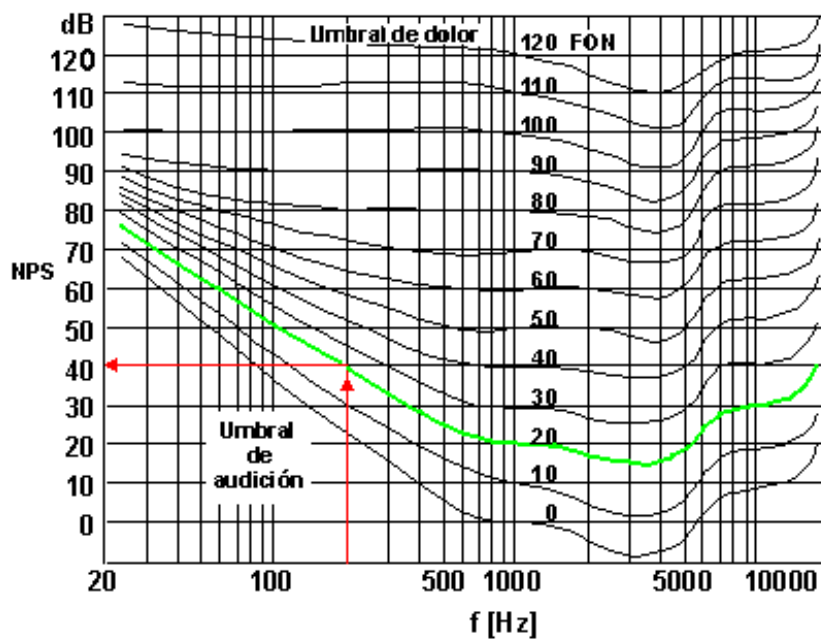


Figura 1 - Curvas de Fletcher y Munson.

Tomado de FCEIA, s.f.

2.1.1) Ponderación A y C

Para poder distinguir la molestia que se le produce al oído humano, se han creado filtros de ponderación como lo son los filtros de ponderación A, B y C. Cada filtro tiene un uso específico y los que se usarán para este proyecto serán

los filtros de ponderación A y C, que corresponden a la curva de 30 y 100 fones respectivamente como se lo puede observar en la Figura 2.

La ponderación A es una de las más comunes y es usado para control de ruido urbano. Mientras que la ponderación C tiene un uso común en la evaluación de ruido ocupacional y también se utiliza en ruido urbano para valorar el contenido de baja frecuencia.

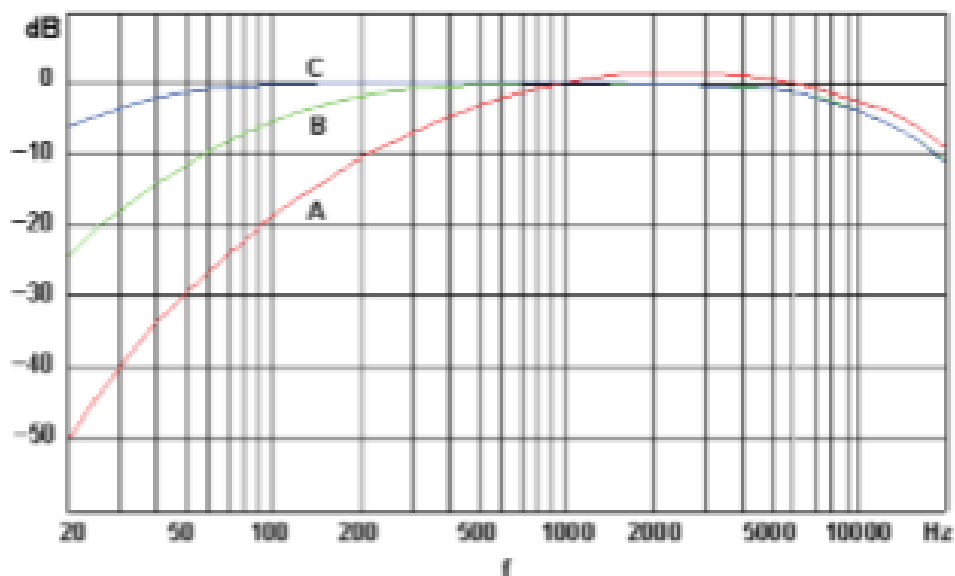


Figura 2 - Curvas de corrección por frecuencia para filtros A, B y C.

Tomado de FCEIA, s.f.

2.2) Instrumentos de medición acústica

A continuación, se detallan los distintos instrumentos que se utilizarán para el desarrollo y evaluación del prototipo.

2.2.1) Sonómetro

Dentro de la instrumentación para la realización de ensayos acústicos, uno de los más utilizados es el sonómetro. El sonómetro es el encargado de registrar los cambios de presión en el aire y cuantificarlos en una escala logarítmica con respecto a un nivel de referencia instantáneamente. El sonómetro es un transductor que muestra una conversión acústica-mecánica-eléctrica en valores

digitales y ponderados según el modelo. Consta de varias etapas y su precisión depende de los componentes y la calidad del micrófono. Existen sonómetros que cumplen con parámetros definidos dentro de la norma UNE-EN 61672-1 en donde se puede clasificar como sonómetros clase 1, que son los más precisos, o sonómetros clase 2, que tienen menor precisión.

Uno de los mayores retos para tener un sonómetro preciso es poder calibrarlos y que cumplan con los niveles permitidos en cada banda de frecuencia. Para ello se tienen calibradores profesionales y niveles de referencia establecidos dentro de la misma norma UNE-EN 61672-1, para que todos los sonómetros clase 1 o clase 2 presenten resultados estandarizados.

2.2.1.1) Etapas del sonómetro

Como se mencionó en el apartado anterior, el sonómetro consta de varias etapas que se dedican a la transducción de energía/electricidad hasta poder presentar valores cuantificados digitalmente y ponderados durante un transcurso de tiempo como se muestra en la Figura 3.

Dentro de la primera etapa se tiene el micrófono, el cual se encarga de captar ondas sonoras y transformarlas en impulsos eléctricos, los cuales pasan por una etapa de pre amplificación y pueden ser procesados en su siguiente etapa.

Posteriormente, los impulsos eléctricos son filtrados y, según el modelo, ponderados.

En la etapa final, los impulsos eléctricos filtrados pasan por una nueva amplificación y un detector RMS. El detector RMS va a permitir que los niveles puedan ser mostrados en un terminal digital o ser almacenados en una memoria.

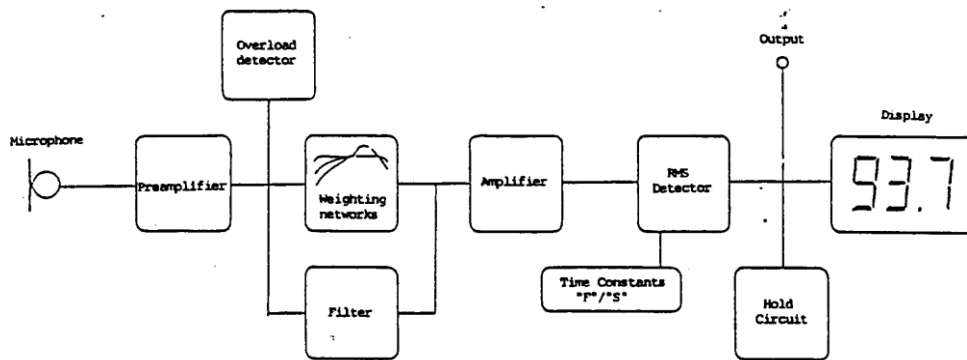


Figura 3 - Etapas del sonómetro.

Tomada de Chan, s.f.

2.2.2) Micrófonos

Existen varios tipos de micrófonos con distintas aplicaciones. En cuanto a la aplicación en sonómetros, los más usados son los de tipo condensador ya que según la norma IEC 61094-1, presentan propiedades que los hacen sensibles y precisos. El funcionamiento de este tipo de micrófonos se basa en la carga de capacitores, de los cuales uno permanece estático y otro se puede mover libremente. Este movimiento, como se lo puede apreciar en la Figura 4, es el que produce una diferencia de carga eléctrica y, por lo tanto, ese es el fenómeno que produce la señal del micrófono.

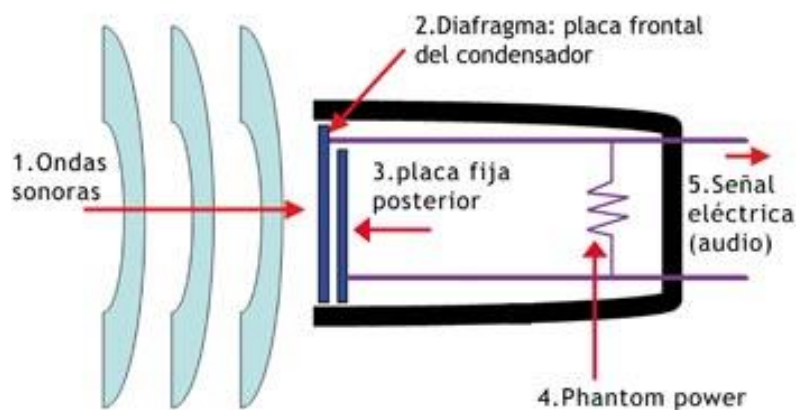


Figura 4 - Esquema de un micrófono de condensador.

Tomada de García, s.f.

2.3) Conversión analógica a digital

Para que las variaciones registradas por un micrófono puedan ser digitalizadas, deben pasar por un proceso de conversión de señal analógica a digital como se muestra en la Figura 5. Para ello, se tienen varios componentes y sistemas que, por cuestiones de portabilidad y versatilidad, solamente se usaron micrófonos como el CAD U9 o el sonómetro WENSN WS1361 que ya tengan incorporada esta fase de conversión y mediante el Raspberry procesar esta información.

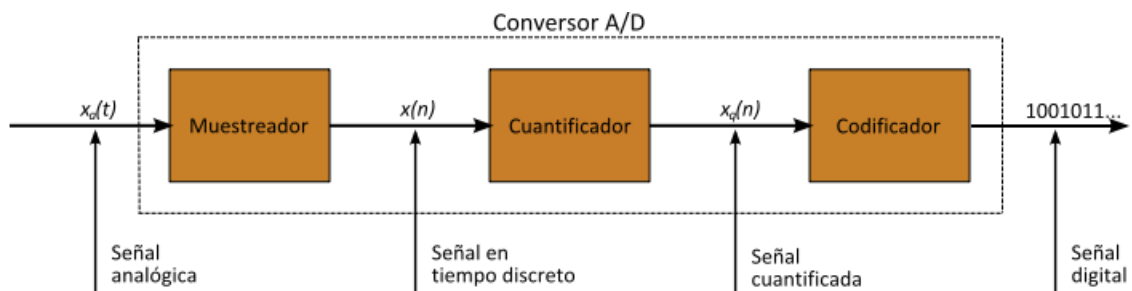


Figura 5 - Proceso de conversión analógica a digital.

Tomada de Elastix, s.f.

2.4) Descriptores de ruido

Al tratarse del desarrollo de un prototipo se han tomado en cuenta ciertos descriptores de ruido que poseen los sonómetros convencionales. Los descriptores que se consideran son los siguientes: nivel de presión instantáneo, Nivel de presión promedio L_{eq} y nivel de presión ponderado L_{Aeq} y L_{Ceq} . Es decir, la integración de niveles de presión sonora ponderados durante niveles instantáneos en el tiempo.

2.5) Programación en Raspberry Pi

La placa de procesamiento Raspberry Pi 3 model B, es el que será utilizado para el proyecto. Esta placa utiliza un sistema operativo gráfico, el cual puede ser visualizado mediante un cable HDMI o una pantalla externa propia de Raspberry.

El sistema operativo está basado en Linux, una derivación llamada Raspbian OS. En dicho sistema operativo se manejarán las funciones del Raspberry y se

realizará la programación de las funciones del mismo. El lenguaje de programación para el Raspberry será Python, con el cual se tiene acceso a una gran variedad de librerías de programación pre establecidas y enfocadas en el procesamiento de audio.

Al ser del tamaño de una tarjeta de crédito, el Raspberry Pi se vuelve un componente ideal para el desarrollo y evaluación del proyecto.

2.6) Ruido rosa

Es un tipo de ruido que contiene todo el espectro audible, en el cual se tiene un decrecimiento de 3dB por octava y esto hace que, energéticamente hablando, todas las bandas de frecuencia tengan el mismo nivel.

Como tiene la característica de ser un ruido “balanceado” en el nivel energético en todas sus bandas de frecuencia, este tipo de ruido es usado en varias aplicaciones como mediciones acústicas y simulación de ruido de fondo.

2.7) Normativa IEC 61672-1

La normativa IEC 61672-1 será la guía para el desarrollo y evaluación del prototipo ya que detalla las especificaciones técnicas, de funcionamiento y de calibración de los sonómetros y también indica los límites permitidos de variación para la clasificación de sonómetros tipo 1 y tipo 2.

También detalla otros aspectos como lo son las condiciones ambientales y la corrección del nivel según la ponderación en bandas de octava y de tercios de octava.

Esta normativa nos permitirá identificar qué tan preciso es el prototipo propuesto y qué factores pueden mejorarlo para futuros trabajos de desarrollo.

2.7.1) Objeto de la normativa

La normativa presenta las especificaciones técnicas del funcionamiento electroacústicos para tres tipos de sonómetros. Para el presente proyecto, se ha utilizado como referencia las especificaciones para un sonómetro integrador-promediador que mide niveles de sonido ponderados en frecuencia promediados en el tiempo.

2.7.2) Condiciones ambientales de referencia

La normativa indica las siguientes condiciones ambientales de referencia: 23° C para la temperatura del aire, 101.325 kPa para la presión estática y 50% de humedad relativa.

Debido a que el proyecto se realizó en una sala de grabación donde dichas condiciones ambientales no se pueden controlar o cumplir, se las tomará como posibles factores que influyeran un error en los resultados de las mediciones.

2.7.3) Generalidades

Dentro de esta sección, la normativa establece que los sonómetros pueden ser solamente de los dos tipos mencionados anteriormente. Ciertos sonómetros clase 2 pueden incorporar algunas capacidades de medida de clase 1 pero seguirán siendo de clase 2.

Ambos tipos de sonómetros deben presentar al menos la ponderación frecuencial A y Z.

Los sonómetros deben presentar un rango de niveles con un control de rango adecuado y estos datos deberán ser presentados en su manual.

El nivel de referencia acústica deberá ser preferentemente 94 dB para una frecuencia de 1 kHz.

El micrófono debe ser desmontable para poder permitir la inserción de señales eléctricas de ensayo en la entrada del pre amplificador.

Al no tener datos sobre la respuesta en frecuencia, patrón polar ni sensibilidad del micrófono CAD U9 o del sonómetro WENSN, no se tomará en cuenta las especificaciones técnicas para la respuesta direccional o reflexión y difracción.

2.7.4) Ponderaciones frecuenciales

La normativa presenta los valores en decibelios de los límites de aceptación para ser considerados como sonómetros clase 1 o clase 2, al igual que las correcciones para las distintas ponderaciones frecuenciales como se puede ver en la Figura 6.

Frecuencia nominal Hz	Ponderaciones frecuenciales dB			Límites de aceptación, dB	
				Clase de funcionamiento	
	A	C	Z	1	2
10	-70,4	-14,3	0,0	+3,0; -∞	+5,0; -∞
12,5	-63,4	-11,2	0,0	+2,5; -∞	+5,0; -∞
16	-56,7	-8,5	0,0	+2,0; -4,0	+5,0; -∞
20	-50,5	-6,2	0,0	±2,0	±3,0
25	-44,7	-4,4	0,0	+2,0; -1,5	±3,0
31,5	-39,4	-3,0	0,0	±1,5	±3,0
40	-34,6	-2,0	0,0	±1,0	±2,0
50	-30,2	-1,3	0,0	±1,0	±2,0
63	-26,2	-0,8	0,0	±1,0	±2,0
80	-22,5	-0,5	0,0	±1,0	±2,0
100	-19,1	-0,3	0,0	±1,0	±1,5
125	-16,1	-0,2	0,0	±1,0	±1,5
160	-13,4	-0,1	0,0	±1,0	±1,5
200	-10,9	0,0	0,0	±1,0	±1,5
250	-8,6	0,0	0,0	±1,0	±1,5
315	-6,6	0,0	0,0	±1,0	±1,5
400	-4,8	0,0	0,0	±1,0	±1,5
500	-3,2	0,0	0,0	±1,0	±1,5
630	-1,9	0,0	0,0	±1,0	±1,5
800	-0,8	0,0	0,0	±1,0	±1,5
1 000	0	0	0	±0,7	±1,0
1 250	+0,6	0,0	0,0	±1,0	±1,5

Frecuencia nominal Hz	Ponderaciones frecuenciales dB			Límites de aceptación, dB	
				Clase de funcionamiento	
	A	C	Z	1	2
1 600	+1,0	-0,1	0,0	±1,0	±2,0
2 000	+1,2	-0,2	0,0	±1,0	±2,0
2 500	+1,3	-0,3	0,0	±1,0	±2,5
3 150	+1,2	-0,5	0,0	±1,0	±2,5
4 000	+1,0	-0,8	0,0	±1,0	±3,0
5 000	+0,5	-1,3	0,0	±1,5	±3,5
6 300	-0,1	-2,0	0,0	+1,5; -2,0	±4,5
8 000	-1,1	-3,0	0,0	+1,5; -2,5	±5,0
10 000	-2,5	-4,4	0,0	+2,0; -3,0	+5,0; -∞
12 500	-4,3	-6,2	0,0	+2,0; -5,0	+5,0; -∞
16 000	-6,6	-8,5	0,0	+2,5; -16,0	+5,0; -∞
20 000	-9,3	-11,2	0,0	+3,0; -∞	+5,0; -∞

NOTA Las ponderaciones frecuenciales se calcularon mediante el uso de las expresiones analíticas del anexo E con la frecuencia f calculada a partir de $f = (f_n) [10^{0,1(n-30)}]$ con $f_n = 1\ 000$ Hz y n un entero entre 10 y 43. Los resultados fueron redondeados a la décima de decibelio.

Figura 6 - Ponderaciones Frecuenciales y límites de aceptación.

Tomado de AENOR, 2014.

2.7.5) Linealidad de nivel

La extensión del rango de funcionamiento lineal debe ser al menos de 60 dB a 1 kHz y los valores medidos de las variaciones de linealidad de nivel no deben exceder ± 0.8 dB para los sonómetros de clase 1 y ± 1.1 dB para los sonómetros de clase 2.

Los cambios de nivel de entre 1 dB y 10 dB deben ser el mismo en el nivel de sonido mostrado. Los límites permitidos para este objetivo de diseño no deben superar ± 0.3 dB para los sonómetros de clase 1 y ± 0.5 dB para los sonómetros de clase 2.

2.7.6) Estabilidad durante el funcionamiento continuo

Dentro de este apartado, la normativa explica que el sonómetro debe ser capaz de funcionar continuamente en campos de nivel de sonido moderado sin cambios significativos en la sensibilidad. También explica que las diferencias entre los niveles medidos al inicio y al final de la práctica no deben superar ± 0.1 dB para los sonómetros de clase 1 y ± 0.3 dB para los de clase 2.

2.7.7) Presentación de resultados

El dispositivo debe permitir presentar resultados con una resolución de 0.1 dB en un rango de presentación de al menos 60 dB. Se debe especificar el método de obtención de datos digitales si estos provienen de una salida digital.

3. Diseño y evaluación

Para el diseño y evaluación del dispositivo se tomaron en cuenta la calidad y costo del micrófono, poder de procesamiento de la placa Raspberry y componentes externos para la visualización de la interfaz gráfica.

Los distintos componentes y micrófonos fueron escogidos con un bajo costo en comparación con componentes profesionales y se explicará a continuación sus especificaciones y procedimiento de uso.

3.1) Dispositivos

El proceso de diseño posee dos partes principales: el micrófono con el cual se registrarán los distintos cambios de presión en los ensayos acústicos y la placa de procesamiento Raspberry en donde se realizará la integración y ponderación de resultados.

Al tener amplificadores y convertidores analógico-digital (A/D) integrados en el micrófono, no se necesita diseñar un convertidor o amplificador adicional. Con ello se tiene una gran ventaja de diseño y portabilidad.

3.1.1) Micrófono USB CAD U9

Este transductor es un micrófono compacto con salida USB. Posee una patrón omnidireccional y respuesta en frecuencia de 50 Hz hasta los 18 kHz. Posee una resolución de 16 bits a 44.1 kHz.



Figura 7 - Micrófono CAD U9.

Tomado de CAD, s.f.

3.1.2) Sonómetro WENSN WS1361

Es un sonómetro que permite una conexión directa USB para monitoreo en tiempo real con el Raspberry. Tiene una respuesta en frecuencia de 31.5 Hz a 8.5 kHz y permite ponderar el nivel de presión en ponderación A o C. Posee un micrófono de tipo electret omnidireccional con un rango de medición de hasta 130 dB. Se suele usar para medir ruido de tráfico o ruido industrial y cuenta con una certificación de tipo 2 según la normativa IEC 651. Este tipo de sonómetro

no cuenta con la opción de integración en el tiempo, pero debido a su comunicación USB permite realizar la ponderación e integración en el Raspberry de los datos obtenidos internamente. Cabe recalcar que este sonómetro servirá como referencia de precisión y costo/beneficio debido a su bajo costo frente al prototipo diseñado.

Debido a su costo accesible y comunicación USB, se ha elegido este sonómetro para la evaluación del prototipo del proyecto. Además, cuenta con una certificación ANSI 1.4, la cual es una normativa americana que especifica las características técnicas con las que debe operar un sonómetro o instrumento de medición acústica.



Figura 8 - Sonómetro WENSN WS1361.

Tomado de WENSN, s.f.

3.1.3) Raspberry Pi 3

La placa Raspberry Pi 3 model B presenta un poder de procesamiento de 1.2 GHz de cuatro núcleos, contando con 1 Gb de RAM y 4 puertos de entrada USB, los cuales permitirán la comunicación entre el transductor y la placa.



Figura 9 - Placa de procesamiento Raspberry Pi 3.

Tomado de Raspberry, s.f.

3.2) Verificación

Para la verificación del prototipo se colocó el micrófono en el calibrador CESVA CB006, acorde a lo que indica la normativa IEC 61672-1, es decir, que el nivel medido del calibrador a 1KHz en el prototipo y sonómetro convencional sea de 94dB. Se puede aceptar una variación de hasta ± 0.3 dB según la norma IEC 651.

3.3) Consideraciones de medición

Debido a las limitaciones de los micrófonos y de los altavoces, las mediciones se realizarán desde los 100 Hz hasta los 8KHZ con saltos de tercio de octava durante un tiempo de 60 segundos.

Para obtener mediciones precisas y descartar la posibilidad de ondas estacionarias, se realizarán las mediciones en 3 posiciones distintas. También se tomará en cuenta las distancias entre superficies y fuente-micrófono como lo indica la normativa UNE ISO 1996-2 "Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental".

Se realizará también una medición con ruido rosa para determinar la precisión sin tonos puros.

Es necesario resaltar que el sonómetro WENSN entrega solamente niveles ponderados A y C, es decir, solamente niveles que son corregidos por los valores que indica la norma IEC 61672-1 sobre los registros iniciales. Es por ello que los

valores no corregidos, conocidos también como ponderación Z, no se los podrá mostrar en los resultados.

3.4) Diseño de prototipo

Como se planteó anteriormente, el diseño del prototipo tiene que ser versátil, de fácil transporte y de costo accesible. Es por ello que se ha optado que el prototipo tenga el siguiente diseño:

- Poseer un micrófono pequeño omnidireccional con convertidor A/D incluido, en este caso sería una opción bastante adecuada el CAD U9.
- Pantalla táctil de 3.5" para un fácil manejo al momento de medir niveles.
- Fuente de poder portátil de 10.000 mAh, pequeña y versátil que asegura al menos 2 horas de funcionamiento al Raspberry.
- Caja plástica protectora para Raspberry.

Una vez armado el prototipo con todos los componentes mencionados, se tiene ensamblado un prototipo versátil que cumple con las expectativas y tiene un muy fácil manejo para la aplicación que se le quiere dar.

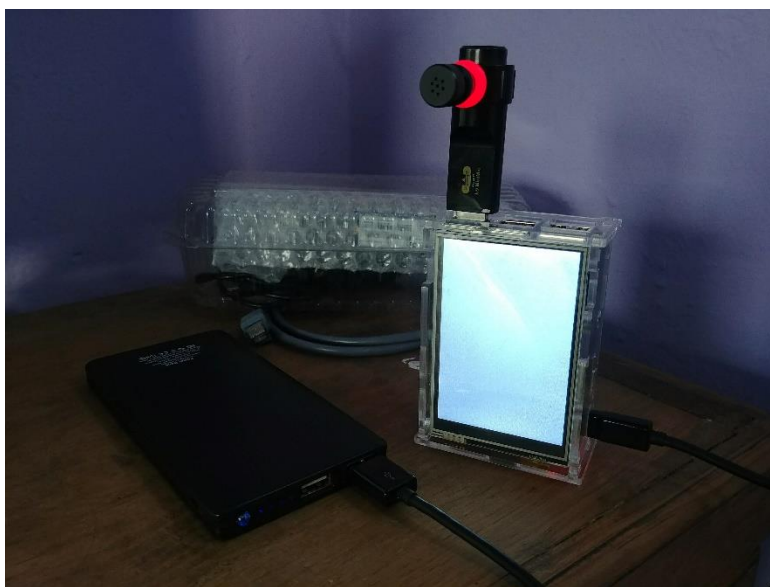


Figura 10 - Fotografía del prototipo ensamblado y funcionando.

3.5) Proceso de evaluación

Para poder evaluar la precisión del prototipo, se realizaron todas las mediciones en conjunto con un sonómetro de clase 1, en este caso el CESVA SC310, y comparar sus resultados. Se tomarán en cuenta los límites establecidos dentro de la normativa IEC 61672-1.

3.6) Programa integrador de niveles de presión sonora

Para la programación del prototipo se han tomado en cuenta algunos factores que faciliten la precisión al momento de realizar las mediciones, como lo es la calibración y las ponderaciones para una señal sin filtros.

Las librerías que ofrece Python serán de gran ayuda para reducir líneas de código y optimizar la rapidez del programa.

3.7) Algoritmo del programa integrador

El código consta de tres partes principales, que facilitaron la detección de errores y optimización del código. Se tiene: calibración, obtención de datos digitales del micrófono y procesamiento de datos.

Para la parte de la interfaz gráfica se tiene solamente la interfaz de Python mientras se visualiza los datos que se obtienen en cada segundo.

Como se puede observar en la Figura 11, el algoritmo consta de varias etapas de verificación del funcionamiento adecuado del dispositivo y una vez obtenidos los datos procede a guardarlos en un archivo.

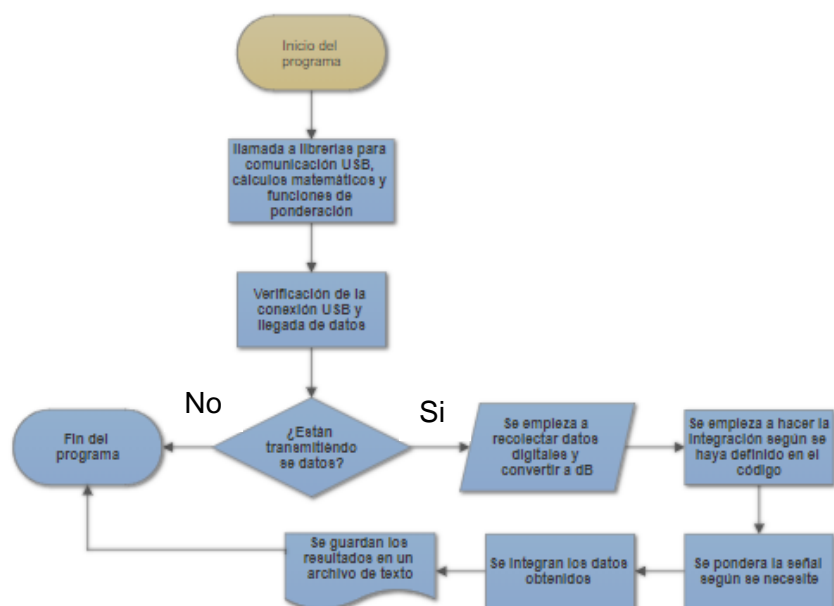


Figura 11 - Diagrama de flujo del algoritmo del programa.

En el código de programación, dentro de la parte inicial, se muestran las siguientes instrucciones:

```

“Import numpy
import math
import pyaudio
import analyse
import datetime
import time
from subprocess import call
from scipy.signal import lfilter
from A_weighting import A_weighting
from C_weighting import C_weighting”

```

En esta sección de código se especifican las librerías que se necesitan para poder procesar las señales de sonido. Se necesitarán librerías de tipo matemáticas, de procesamiento de audio, de ponderaciones de señales de audio y de funciones externas para que no ocupen mucho espacio en el código principal.

Posteriormente, se indican los valores de configuración externos como lo es la frecuencia de muestreo, tamaño de buffer y los canales que se van a grabar. Además, se hace un llamado a la función donde se realiza una calibración.

```

"# calibration
meteor_calibration_100 = 0.31 #dB offset, at gain 100% / 22 dB
meteor_calibration_50 = 0 #db offser, at gain 50% / 12 dB
calibration = meteor_calibration_100

pyau = pyaudio.PyAudio()
stream = pyau.open(format=pyaudio.paInt16, channels=1 , rate=44100,
input=True, frames_per_buffer=8192, input_device_index=2)"

```

A continuación, se empiezan a recolectar los datos digitales de las señales de audio medidas o se verifica si el dispositivo no está en funcionamiento con la siguiente instrucción:

```

"    # Read raw microphone data:

    try:

        rawsamps = stream.read(samples)

    except IOError, ioe:

        print "IOError: " + str(ioe)

        continue

```

"

Finalmente, se procesan todos los datos recolectados y se promedia para obtener valores equivalentes Leq y se guardan en la memoria interna con la siguiente instrucción.

```

"    #Compute leq:

```



```

leq = compute_leq(chunk) + calibration

conv=pow(10,leq/10)

integra.append(conv)

#print "Leq" + str(t) + "s = " + str(leq) + " dB"

print "LAeq " + str(t) + "s = " + str(lAeq) + " dB(A)"

print "LCeq " + str(t) + "s = " + str(lCeq) + " dB(C)"

print "Leq " + str(t) + "s = " + str(leq) + " dB"

```

```

text_file.write("LAeq "+str(lAeq)+" LCeq "+str(lCeq)+" Leq
"+str(leq)+"\n")

```

Por cuestiones prácticas, no se presentan todas las líneas de código en este apartado, pero se las puede encontrar en la sección de anexos.

3.8) Calibración

Para el proceso de calibración se ha implementado dentro del código un factor de corrección global. Es decir, un factor de corrección que permita sumar o restar el nivel medido para poder alcanzar un nivel deseado. Esto permite que, al momento de conectarlo con un calibrador, se pueda tener un factor de corrección exacto que asegure el nivel que se requiere según la normativa IEC 61672-1, que en este caso serían 94 dB a 1 kHz.

3.9) Obtención de datos digitales

Para la obtención de datos digitales del micrófono en el Raspberry, se han incluido una serie de librerías que permiten la comunicación por medio del puerto USB y obtener los datos de una manera rápida y sencilla. Existe una limitación con esta sección del programa ya que puede haber una sobrecarga de información en el buffer debido a la serie de valores que tiene que procesar y

guardar el Raspberry, así que se debe delimitar un periodo de tiempo para la obtención de datos en segundos y asignar una cantidad de memoria para procesar los datos.

3.10) Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos es necesario tener claro qué variables o indicadores son necesarios en cada medición. Para el caso práctico de la evaluación del prototipo, se realizará el cálculo de los niveles ponderados, integración de los valores durante 60 segundos y finalmente, la exportación de los resultados a un archivo de texto en donde se puedan visualizar fácilmente.

3.11) Ponderación A y C

Para el cálculo de las ponderaciones A y C se ha tomado como referencia las fórmulas que indica la normativa IEC 61672-1 y se las han guardado como una función externa de Python para que se las pueda llamar dentro del programa principal fácilmente.

$$C(f) = 10 \lg \left[\frac{f_4^2 f^2}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_4^2)} \right]^2 \text{ dB} - C_{1000}$$

(Ecuación 2, ponderación C)

$$A(f) = 10 \lg \left[\frac{f_4^2 f^4}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_2^2)^{1/2}(f^2 + f_3^2)^{1/2}(f^2 + f_4^2)} \right]^2 \text{ dB} - A_{1000}$$

(Ecuación 3, ponderación A)

Posteriormente, se llama a la función cada vez que se quiera obtener un resultado ponderado de manera rápida y eficaz.

3.12) Exportación de datos a archivos externos

Finalmente, una vez que ya se tengan los resultados deseados, se han agregado unas pocas líneas de código para crear un archivo de texto externo y se muestre de manera ordenada todos los resultados obtenidos.

3.13) Recinto

Para el proceso de evaluación del prototipo, se realizaron las mediciones en la sala de grabación de la Universidad de las Américas "TM1" con el equipo disponible.

Hay que tomar en cuenta que este recinto presenta varias irregularidades en las superficies y existe una cantidad grande de objetos dentro del mismo, lo cual genera una buena difusión del sonido, pero se pueden tener problemas debido al gran tamaño de la sala.

4. Resultados

El proceso de evaluación fue bastante extenso, ya que consta de: calibración, definir posiciones de medición, medición, obtención de resultados y finalmente una nueva verificación de nivel en los micrófonos.

Para las mediciones de ruido rosa se utilizó una fuente omnidireccional y un generador de ruido rosa profesional. Para las mediciones de tonos puros se utilizó un altavoz Yamaha DSR115 y un generador de tonos de una aplicación Android.

4.1) Calibración

Antes de empezar con el proceso de medición y obtención de resultados se realizó una calibración del sonómetro WENSN y del Micrófono CAD U9 con un calibrador profesional CESVA CB006.

Para el caso del sonómetro WENSN, se midió un nivel de 93 dB inicialmente y después de la calibración, el nivel más cercano a los 94db que se pudo calibrar mediante hardware fue a 93.8 dB a 1 kHz y con el factor de corrección digital fue 94 dB a 1 kHz.

Para el caso del micrófono CAD U9, se midió un nivel inicial de 93.5 dB y con el factor de corrección digital, se pudo llegar a calibrar en un valor exacto de 94 db a 1 kHz.

El sonómetro clase 1 que se utilizó como referencia fue el CESVA SC310 y presentó un nivel de 93.9 dB a 1 kHz con el calibrador.

4.2) Resultados de respuesta en frecuencia

Los resultados obtenidos mostrarán un promedio de todas las posiciones por frecuencia y, posteriormente, se detallará el error presentado en comparación con el sonómetro CESVA SC310.

Cabe recalcar que no es necesario presentar los resultados de ponderación A o C para el prototipo con el micrófono CAD U9, debido a que son unos resultados corregidos, según la norma IEC 61672-1, de los resultados obtenidos con ponderación Z, es decir, de los datos sin correcciones. Mientras que para el prototipo con el micrófono del sonómetro WENSN, se presentará el resultado de la ponderación A debido a que este sonómetro no permite la entrega de resultados en ponderación Z.

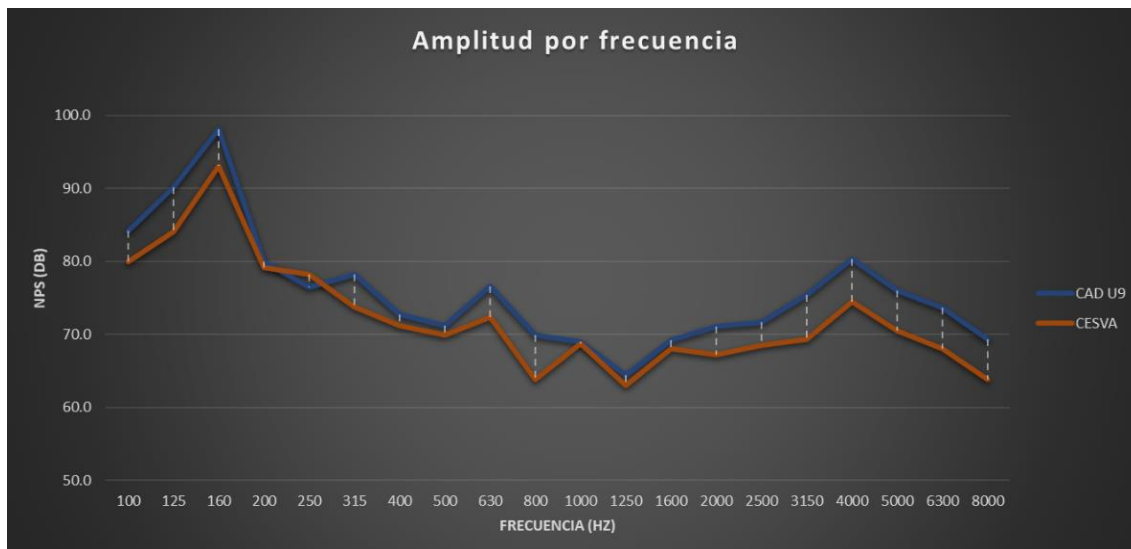


Figura 12 - Nivel de presión sonora promedio obtenido en dB por frecuencia del micrófono CAD U9 y CESVA SC310.

Con los resultados de la Figura 12, se puede observar que la gran mayoría de error significativo se encuentra por encima de los 1600 Hz. Igualmente, que el

resultado a 1000 Hz coincide con la calibración que se realizó inicialmente, es decir, que el nivel medido, tanto con el prototipo como con el sonómetro CESVA, a dicha frecuencia es el mismo. Además, esto sugiere que probablemente, debido a que el micrófono no responde de manera plana, el factor de corrección deba modificarse para cada frecuencia, tomando en cuenta factores como sensibilidad o patrón polar del micrófono.

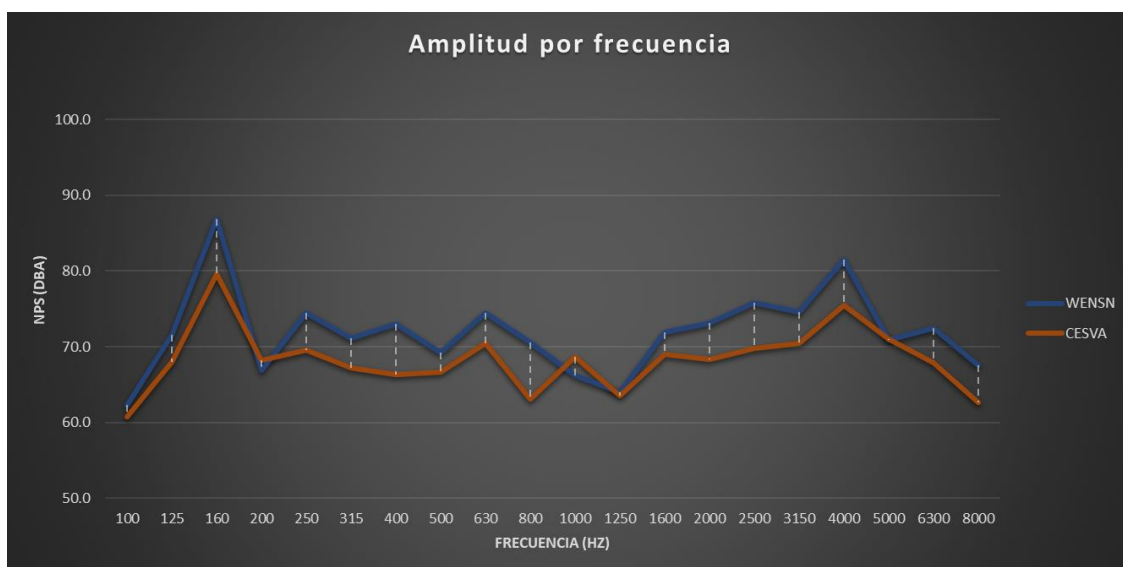


Figura 13 - Nivel de presión sonora promedio obtenido en dB por frecuencia del micrófono CAD U9 y CESVA SC310.

Por otro lado, en la Figura 13 podemos ver que, al igual que con el micrófono CAD U9, el nivel medido con el micrófono WENSN y CESVA cerca de los 1000 Hz es bastante similar. Esto vuelve a sugerir que el factor de corrección está correctamente implementado al momento de la calibración, pero probablemente necesite un ajuste por frecuencia medida. La Figura 13 puede aparentar que se tiene un mayor error que la Figura 12, pero debido a la escala, la Figura 13 realmente tiene un error menor que se explicará a continuación.

Tabla 1.

Resultados de nivel en dB para medición de ruido rosa con micrófono CAD y CESVA.

CAD U9	Cesva SC310
64.6	58.6

En la tabla 1 se puede observar el resultado de la medición realizada para ruido rosa. Existe una diferencia considerable que se puede deber a que el micrófono CAD U9 está registrando toda su respuesta en frecuencia de 50 Hz a 18 kHz, mientras que para el sonómetro CESVA solo se está tomando en cuenta el rango frecuencial de 100 Hz a 8 kHz. Esto se debe a que el prototipo no cuenta con filtros frecuenciales y es una de las limitaciones que se presenta en este tipo de medición.

Tabla 2.

Resultados de nivel en dBA para medición de ruido rosa con micrófono WENSN y CESVA

WENSN	Cesva SC310
68.1	53.9

En la tabla 2 se puede observar el resultado de la medición realizada específicamente para ruido rosa. Al igual que con el micrófono CAD U9, existe una diferencia considerable con el sonómetro WENSN ya que, de igual manera, está registrando niveles por encima o por debajo de las frecuencias tomadas en cuenta para el CESVA, es decir, de 100 Hz a 8 kHz.

Los resultados por frecuencia, posición y ponderación podrán ser encontrados en la sección de anexos.

4.2.1) Error de respuesta en frecuencia

En este apartado se detallará el error absoluto y el error relativo promedio, tomando como referencia los resultados del sonómetro CESVA, que se tiene para las mediciones de respuesta en frecuencia tanto para tonos puros como para ruido rosa.

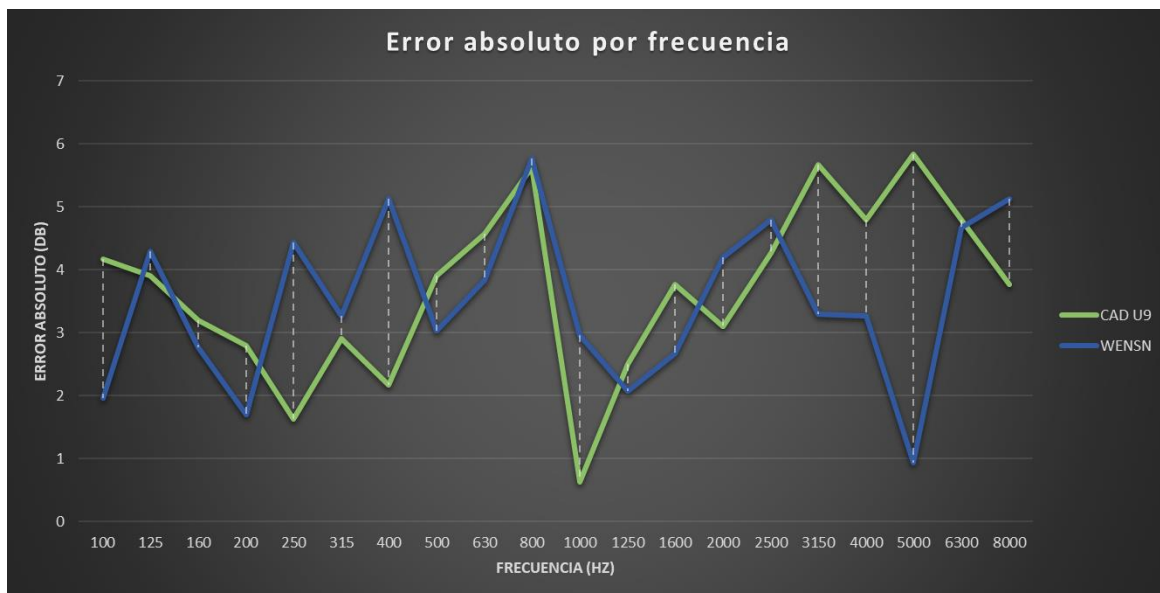


Figura 14 - Error absoluto promedio en dB de micrófono CAD U9 y sonómetro WENSN sobre sonómetro CESVA.

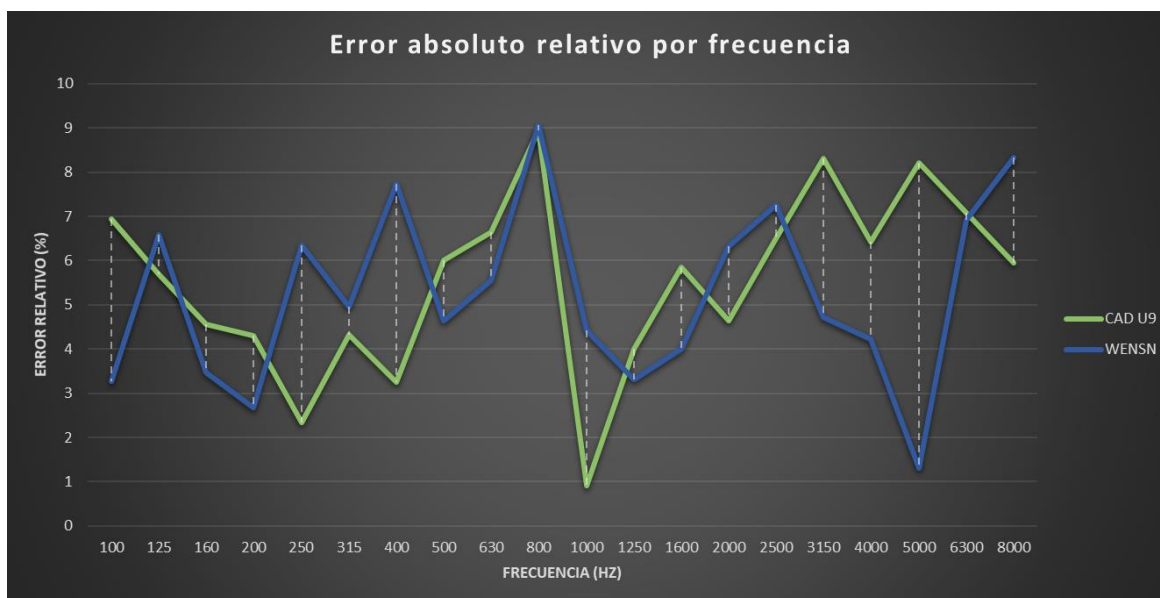


Figura 15 - Error absoluto promedio en dB de micrófono CAD U9 y sonómetro WENSN sobre sonómetro CESVA.

Como se puede observar en la Figura 14 y 15, existen errores bastante grandes en ciertas frecuencias y también se obtienen errores similares cerca de los 1000 Hz. El error absoluto puede ayudar a ajustar un nuevo factor de corrección por

frecuencia que, en investigaciones futuras, ayude a desarrollar un prototipo más preciso.

Para el caso de la medición de ruido rosa, el error absoluto se ha medido mediante la diferencia entre el nivel total medido por el sonómetro CESVA y los dos micrófonos del prototipo. Para el caso del CAD U9, se registró un error absoluto de 3.7 dB, mientras que para el WENSN se tuvo un error de 3.5 dB.

Pero para el caso del error relativo, el error se reduce en el caso del WENSN, con un error del 5.3% y para el CAD U9 un error del 5.5%.

Los resultados de error absoluto en ruido rosa son los mismos para cada micrófono y esto es un valor más preciso que el error por frecuencia, debido a que aquí se están tomando en cuenta a todas las frecuencias que puede medir cada variación del prototipo de sonómetro. Además, hay que tomar en cuenta que se hizo una sola medición para todo el espectro. El error relativo nos muestra que el micrófono WENSN posee menor error a nivel global y esto puede deberse a la certificación clase 2 que tiene, según la normativa IEC 60651.

4.3) Análisis global de resultados

Como se pudo apreciar en los resultados, globalmente se tienen unos resultados medianamente precisos, con un error promedio de 5.5% para el sonómetro WENSN y 5.3% para el micrófono CAD U9.

Los resultados obtenidos también nos muestran que la precisión cambia según el micrófono y que el micrófono del sonómetro WENSN es más preciso que el CAD U9.

Por otro lado, en la tabla 3 se puede observar los errores obtenidos por frecuencia.

Tabla 3.

Error absoluto en dBA de micrófono CAD U9 y sonómetro WENSN sobre sonómetro CESVA por frecuencias

	CAD U9	WENSN
Freq (Hz)	Error absoluto (dBA)	Error absoluto (dBA)
100	4.2	2
125	3.9	4.3
160	3.2	2.8
200	2.8	1.7
250	1.6	4.4
315	2.9	3.3
400	2.2	5.1
500	3.9	3
630	4.6	3.8
800	5.6	5.8
1000	0.6	3
1250	2.5	2.1
1600	3.8	2.7
2000	3.1	4.2
2500	4.3	4.8
3150	5.7	3.3
4000	4.8	3.3
5000	5.8	0.9
6300	4.8	4.7
8000	3.8	5.1

Según la norma, el prototipo con el micrófono CAD U9 estaría dentro de los límites para ser considerado un sonómetro de clase 2 para las frecuencias de 1000 y 8000 Hz. Mientras que para el prototipo con el sonómetro WENSN cumpliría con la frecuencia de 5000 Hz.

La tabla 3 es de gran ayuda para saber el valor al que se debe ajustar el factor de corrección si se llega a desarrollar un filtro para cada banda de frecuencia

dentro del código de programación. Dicha tabla sería el punto de partida para investigaciones futuras y el apropiado ajuste del factor de corrección podría llegar a permitir que el prototipo esté dentro de los límites de un sonómetro clase 2.

5. Análisis económico

La evaluación del dispositivo también consiste en el análisis de la precisión que se presenta frente al costo que tiene. Es por ello que se ha hecho un análisis en relación a estos dos factores y con ello, podremos decidir cuándo conviene usarlo o qué componentes pueden ser cambiados para tener un mejor beneficio con relación al costo.

5.1) Tabla de costos

Una vez ensamblado el prototipo y sabiendo los precios exactos de cada componente, se puede hacer un cálculo del costo total de la fabricación del prototipo.

Tabla 4.

Tabla de costos de componentes del prototipo

Ítem	Cantidad	Precio UNIT.	TOTAL
Fuente de poder portátil 10.000mAh	1	\$20.00	\$20.00
Micrófono CAD U9	1	\$25.00	\$25.00
RaspBerry Pi 3 model B	1	\$40.00	\$40.00
Pantalla táctil Raspberry 3.5"	1	\$20.00	\$20.00
Caja protectora Raspberry	1	\$10.00	\$10.00
Cable de poder micro usb	1	\$2.00	\$2.00
SONómetro WENSN WS1361	1	\$35	\$35
		TOTAL	\$152.00

La selección del micrófono es el que determinará si el precio se puede reducir o incrementar, ya que se podría escoger hasta un micrófono de precisión profesional y dejar que el Raspberry se encargue del procesamiento. No se ha tomado en cuenta ninguna protección contra el ambiente, lo cual implicaría un costo elevado.

5.2) Análisis costo/error

El prototipo con el micrófono CAD U9 tiene un costo total de \$117.00 dólares americanos, con un error promedio de 3.7 dB. Mientras que para el prototipo con sonómetro WENSN se tiene un costo total de \$127 con un error promedio de 3.5 dB. Por lo cual, se puede decir que se ha logrado reducir considerablemente el costo para un prototipo de sonómetro.

Aunque el prototipo no cumpla con los estándares de la norma IEC 61672-1 y no pueda ser usado en aplicaciones profesionales, puede ser un gran aporte en el

ámbito educativo debido a su costo accesible. Además, se puede tener una instrucción personalizada para los estudiantes ya que su código de programación se lo puede adaptar según la aplicación acústica.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1) Conclusiones

Sería posible diseñar y construir un sonómetro integrador de bajo costo utilizando placas de procesamiento Raspberry Pi con una precisión alta, siempre y cuando el factor de corrección y calibración o la calidad del micrófono para cada frecuencia sea el adecuado. Pero para el presente proyecto, el prototipo con el micrófono CAD U9 o el sonómetro WENSN WS1361, no presenta una precisión que cumpla con los estándares de un sonómetro de clase 2 en las distintas bandas de frecuencia según la norma UNE-EN 61672-1. Ya que se pudo determinar una incertidumbre en la medición de nivel desde ± 0.6 dB hasta ± 5.8 dB con los componentes utilizados, en comparación con el sonómetro CESVA SC310.

El código de programación desarrollado para el prototipo fue eficiente debido a las pocas líneas de código y ligera carga de procesamiento para la placa Raspberry pi 3 modelo B. Es por ello que es posible la aplicación de filtros de frecuencia de octava o de un tercio de octava debido a que la carga de procesamiento no es mayor. Esto permitiría ajustar el factor de corrección por bandas de frecuencia.

6.2) Recomendaciones

El análisis costo-precisión del prototipo, utilizando tanto el micrófono CAD U9 como el micrófono del sonómetro WENSN, presenta un costo menor significativo frente al sonómetro de clase 1 CESVA SC310. Pero se debe tomar en cuenta que, para aplicaciones profesionales, un sonómetro certificado clase 1 siempre será la mejor opción para elección de instrumentación, mientras que, para una aplicación no profesional, se puede decir que el prototipo junto con el micrófono del sonómetro WENSN pueden ser la mejor elección si no se tiene un presupuesto alto. Además, a pesar que el prototipo no llegue a cumplir con los límites de la norma, se podría tener una gran aplicación en el campo educativo, ya que permitiría la enseñanza del uso de sonómetros de manera personalizada y a mayor escala.

Tomando en cuenta que la placa Raspberry es bastante compacta y que posee sistemas de comunicación inalámbrica Wifi y Bluetooth, se pueden tener varias aplicaciones a distancias largas como mapas de ruido a tiempo real o mediciones

a largos períodos de tiempo, siempre y cuando se tengan protecciones ambientales y no haya factores externos que afecten a la medición.

Finalmente, se puede decir que el prototipo se podría mejorar con un ajuste digital en el factor de corrección por frecuencia y con la utilización de un micrófono de mejor calidad, como puede ser uno con una respuesta en frecuencia plana o mayor sensibilidad.

REFERENCIAS

- Barański, R. (2014). *Sound Level Meter as Software Application*. Acta Physica Polonica.
- Chan, A. (s.f.). Sound Level Meter. Recuperado de <http://personal.cityu.edu.hk/~bsapplec/sound6.htm>
- Elastix. (s.f.). Transmisión de la voz. Recuperada de http://elastixtech.com/wp-content/uploads/2012/06/Conversor_AD.png
- FCEIA (s.f.). Niveles Sonoros, Federico Miyara. Recuperado el 22 de diciembre de 2017 de <http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/niveles.htm>
- García, S. (s.f.). Tipos de micrófono según su construcción. Recuperado de <http://www.analfatecnicos.net/fotos/122.jpg>
- Kardous, C. A., & Shaw, P. B. (2014). *Evaluation of smartphone sound measurement applications*. The Journal of the Acoustical Society of America.
- Mydlarz, C., Salamon, J., & Bello, J. P. (2017). *The implementation of low-cost urban acoustic monitoring devices*. Applied Acoustics.
- Miyara, F. (2004). *Acústica y Sistemas de Sonido*. Bogotá, Colombia. Fundación Decibel.
- Noriega-Linares, J. E., & Navarro Ruiz, J. M. (2016). *On the Application of the Raspberry Pi as an Advanced Acoustic Sensor Network for Noise Monitoring*. Electronics.
- Segura-Garcia, J., Felici-Castell, S., Perez-Solano, J. J., Cobos, M., & Navarro, J. M. (2015). *Low-cost alternatives for urban noise nuisance monitoring using wireless sensor networks*. IEEE Sensors Journal, 15.
- WENSN. (s.f.). Recuperada de http://wensn.com/html_products/WS1361-17.html

ANEXOS

ANEXO 1

Especificaciones Raspberry Pi 3 model B

The Raspberry Pi 3 is the third-generation Raspberry Pi. It replaced the Raspberry Pi 2 Model B in February 2016.

- Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit CPU
- 1GB RAM
- BCM43438 wireless LAN and Bluetooth Low Energy (BLE) on board
- 40-pin extended GPIO
- 4 USB 2 ports
- 4 Pole stereo output and composite video port
- Full size HDMI
- CSI camera port for connecting a Raspberry Pi camera
- DSI display port for connecting a Raspberry Pi touchscreen display
- Micro SD port for loading your operating system and storing data
- Upgraded switched Micro USB power source up to 2.5A

ANEXO 2

Especificaciones micrófono CAD U9

SPECIFICATIONS

- Frequency Response: 50Hz - 18kHz
- Polar Pattern: omnidirectional
- Resolution: 16 Bit/44.1 kHz
- Sensitivity: 56dB @ 1 kHz
- Output Voltage: 1.20Vms
- Input: USB
- Output: 3.5mm (1/8") headphone output
- LED Power Light

ANEXO 3

Código de programa

```
#!/usr/bin/env Python
```

```
Import numpy
```

```
import math

import pyaudio

import analyse

import datetime

import time

from subprocess import call

from scipy.signal import lfilter

from A_weighting import A_weighting

from C_weighting import C_weighting


samplerate = 44100 #samples per second

t = 1 #seconds

samples = samplerate * t


B, A = A_weighting(samplerate)

D, C = C_weighting(samplerate)

trim = 93.97940008672037609572522210551 #p0-based offset (

mic_gain = 12 #in dB (a gain of 12dB corresponds to 50%)

# calibration

meteor_calibration_100 = 0.31 #dB offset, at gain 100% / 22 dB
```

```
meteor_calibration_50 = 0 #db offser, at gain 50% / 12 dB
```

```
calibration = meteor_calibration_100
```

```
#Setup audio recording:
```

```
pyau = pyaudio.PyAudio()
```

```
stream = pyau.open(format=pyaudio.paInt16, channels=1 , rate=44100,  
input=True, frames_per_buffer=8192, input_device_index=2)
```

```
def sound_level_meter():
```

```
    i=1
```

```
    text_file = open ('salida'+str(datetime.datetime.now())+'.txt', 'w')
```

```
    integra=[]
```

```
    integraA=[]
```

```
    integraC=[]
```

```
    while i<61:
```

```
        # Read raw microphone data:
```

```
        try:
```

```
            rawsamps = stream.read(samples
```

```
except IOError, ioe:

    print "IOError: " + str(ioe)

    continue

# Convert raw data to NumPy array:

chunk = numpy.fromstring(rawsamps, dtype=numpy.int16)

#Compute leq:

leq = compute_leq(chunk) + calibration

conv=pow(10,leq/10)

integra.append(conv)

#Compute LAeq

filteredChunk = lfilter(B, A, chunk)

IAeq = compute_leq(filteredChunk) + calibration

convA=pow(10,IAeq/10)

integraA.append(convA)

#Compute LCeq

filteredChunk = lfilter(D, C, chunk)

ICeq = compute_leq(filteredChunk) + calibration

convC=pow(10,ICeq/10)
```

```

integraC.append(convC)

#print "Leq" + str(t) + "s = " + str(leq) + " dB"

print "LAeq " + str(t) + "s = " + str(lAeq) + " dB(A)"
print "LCeq " + str(t) + "s = " + str(lCeq) + " dB(C)"
print "Leq " + str(t) + "s = " + str(leq) + " dB"

text_file.write("LAeq    "+str(lAeq)+"    LCeq    "+str(lCeq)+"    Leq
"+str(leq)+"\n")

i=i+1

if i==61:

    integra1=10*math.log10(math.fsum(integra)/60)
    integraA1=10*math.log10(math.fsum(integraA)/60)
    integraC1=10*math.log10(math.fsum(integraC)/60)
    print "LAeq 1min = " + str(integraA1) + " dB(A)"
    print "LCeq 1min = " + str(integraC1) + " dB(C)"
    print "Leq 1min = " + str(integra1) + " dB"
    text_file.write("LAeq 1min = "+str(integraA1)+" LCeq 1min =
"+str(integraC1)+" Leq 1min = "+str(integra1)+"\n")
    text_file.close()

```

```
def compute_leq(chunk):
```

```
    #Loudness (code from analyse.loudness()):
```

```
    #data = numpy.array(chunk, dtype=float) / 32768.0
```

```
    #ms = math.sqrt(numpy.sum(data ** 2.0) / len(data))
```

```
    #if ms < 10e-8: ms = 10e-8
```

```
    #return 10.0 * math.log(ms, 10.0)
```

```
    data = numpy.array(chunk, dtype=float) / 32768.0
```

```
    ms = numpy.sum(data ** 2.0) / len(data)
```

```
    if ms < 10e-8: ms = 10e-8 #?
```

```
    return (10.0 * math.log(ms, 10.0)) + trim
```

```
def init():
```

```
    print "Setting gain to 12dB / 50%:"
```

```
    call(["amixer", "-c", "1", "set", "Mic", "capture", str(mic_gain) + print "Starting  
sound level meter:"
```

```
    sound_level_mete
```

ANEXO 4

Tablas de resultados obtenidos por frecuencias y ponderaciones

Medición en tercios de octava 100 - 8000 Hz t=1min Niveles en ponderación Z									
	CAD U9			SLM			Cesva SC310		
freq (Hz)	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3
100	80.6	86.5	83.3	N/A			81.3	79	79
125	94.7	80.3	77.5				87.1	81.9	80
160	102.8	70.5	74.1				97.8	73.1	72.1
200	71.9	83.3	78.4				68.9	80.5	81
250	76.3	74.3	78				76.3	77	80.2
315	70.1	82.3	72.2				68	77.3	70.6
400	66.6	64.3	76.9				70.2	64.1	74.2
500	73.7	68.2	69.8				70.6	71.7	64.7
630	75.4	74.5	78.6				68.3	71.8	74.7
800	67.1	72.2	68.6				61.9	65.1	64
1000	64.4	70.4	69.9				64.2	69.3	70.5
1250	63.8	64.6	64.6				65	61.1	61.8
1600	70.8	70.3	63.3				62.2	71.6	64.7
2000	61.6	74.5	69.5				58.9	68.7	68.7
2500	63.2	70.6	74.8				58.5	71.6	67.7
3150	79	70.7	71.4				71.7	69.4	63
4000	75.4	84	75.7				69.8	77	73.9
5000	67.1	79.1	75.2				70.8	71.2	69.3
6300	76.4	73.1	67				70.5	66.6	65
8000	60	66.7	73				61	64.7	64.7

Medición en tercios de octava 100 - 8000 Hz t=1min Niveles en ponderación A									
	CAD U9			SLM			Cesva SC310		
freq (Hz)	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3
100	61.5	67.4	64.2	61.3	64.2	60.6	62.2	59.9	59.9
125	78.6	64.2	61.4	71.7	73.1	68.8	71	65.8	63.9
160	89.4	57.1	60.7	91.6	59.7	57.6	84.4	59.7	58.7
200	61	72.4	67.5	55.5	68	69.1	58	69.6	70.1
250	67.7	65.7	69.4	70.7	64.9	78.4	67.7	68.4	71.6
315	63.5	75.7	65.6	63.9	74.9	67.1	61.4	70.7	64
400	61.8	59.5	72.1	72.2	57.6	76.3	65.4	59.3	69.4
500	70.5	65	66.6	69.3	72	57.8	67.4	68.5	61.5
630	73.5	72.6	76.7	69.5	77.7	72.2	66.4	69.9	72.8
800	66.3	71.4	67.8	60.3	73.2	70.8	61.1	64.3	63.2
1000	64.4	70.4	69.9	60.3	66.2	68.6	64.2	69.3	70.5
1250	64.4	65.2	65.2	66.6	57.8	63.7	65.6	61.7	62.4
1600	71.8	71.3	64.3	67.3	75.6	66.6	63.2	72.6	65.7
2000	62.8	75.7	70.7	64.3	76.4	71.8	60.1	69.9	69.9
2500	64.5	71.9	76.1	66.2	80	69.9	59.8	72.9	69
3150	80.2	71.9	72.6	78.7	69.2	66.9	72.9	70.6	64.2
4000	76.4	85	76.7	70.9	85.6	77	70.8	78	74.9
5000	67.6	79.6	75.7	70.5	72.7	68.8	71.3	71.7	69.8
6300	76.3	73	66.9	74.9	73.1	62	70.4	66.5	64.9
8000	58.9	65.6	71.9	67.8	67.6	67.1	59.9	63.6	63.6

Medición en tercios de octava 100 - 8000 Hz t=1min Niveles en ponderación C									
	CAD U9			SLM			Cesva SC310		
freq (Hz)	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3
100	80.3	86.2	83	80.1	83	79.4	81	78.7	78.7
125	94.5	80.1	77.3	87.6	89	84.7	86.9	81.7	79.8
160	102.7	70.4	74	104.9	73	70.9	97.7	73	72
200	71.9	83.3	78.4	66.4	78.9	80	68.9	80.5	81
250	76.3	74.3	78	79.3	73.5	87	76.3	77	80.2
315	70.1	82.3	72.2	70.5	81.5	73.7	68	77.3	70.6
400	66.6	64.3	76.9	77	62.4	81.1	70.2	64.1	74.2
500	73.7	68.2	69.8	72.5	75.2	61	70.6	71.7	64.7
630	75.4	74.5	78.6	71.4	79.6	74.1	68.3	71.8	74.7
800	67.1	72.2	68.6	61.1	74	71.6	61.9	65.1	64
1000	64.4	70.4	69.9	60.3	66.2	68.6	64.2	69.3	70.5
1250	63.8	64.6	64.6	66	57.2	63.1	65	61.1	61.8
1600	70.7	70.2	63.2	66.2	74.5	65.5	62.1	71.5	64.6
2000	61.4	74.3	69.3	62.9	75	70.4	58.7	68.5	68.5
2500	62.9	70.3	74.5	64.6	78.4	68.3	58.2	71.3	67.4
3150	78.5	70.2	70.9	77	67.5	65.2	71.2	68.9	62.5
4000	74.6	83.2	74.9	69.1	83.8	75.2	69	76.2	73.1
5000	65.8	77.8	73.9	68.7	70.9	67	69.5	69.9	68
6300	74.4	71.1	65	73	71.2	60.1	68.5	64.6	63
8000	57	63.7	70	65.9	65.7	65.2	58	61.7	61.7

Medición ruido rosa t=1min Niveles en ponderación Z									
	CAD U9			SLM			Cesva SC310		
	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3
	66.5	63.4	63.2	N/A	N/A	N/A	58.4	58.0	59.3

Medición ruido rosa t=1min Niveles en ponderación A									
	CAD U9			SLM			Cesva SC310		
	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3
	60.5	62.1	61.8	68.6	67.7	68	53.7	53.9	54.0

Medición ruido rosa t=1min Niveles en ponderación C									
	CAD U9			SLM			Cesva SC310		
	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3
	65.6	62.9	64.8	69.2	68.3	66.4	58.3	57.9	59.2

Nivel medido con calibrador 1KHz @ 94dB									
	CAD U9			SLM			Cesva SC310		
	94			93.8			93.9		

Error absoluto entre Raspberry y Sonómetro Cesva Niveles en ponderación Z								
	CAD U9			WENSN			CAD U9	WENSN
freq (Hz)	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Promedio	Promedio
100	0.7	7.5	4.3	N/A	N/A	N/A	4.2	N/A
125	7.6	1.6	2.5				3.9	
160	5	2.6	2				3.2	
200	3	2.8	2.6				2.8	
250	0	2.7	2.2				1.6	
315	2.1	5	1.6				2.9	
400	3.6	0.2	2.7				2.2	
500	3.1	3.5	5.1				3.9	
630	7.1	2.7	3.9				4.6	
800	5.2	7.1	4.6				5.6	
1000	0.2	1.1	0.6				0.6	
1250	1.2	3.5	2.8				2.5	
1600	8.6	1.3	1.4				3.8	
2000	2.7	5.8	0.8				3.1	
2500	4.7	1	7.1				4.3	
3150	7.3	1.3	8.4				5.7	
4000	5.6	7	1.8				4.8	
5000	3.7	7.9	5.9				5.8	
6300	5.9	6.5	2				4.8	
8000	1	2	8.3				3.8	

Error absoluto entre Raspberry y Sonómetro Cesva Niveles en ponderación A								
	CAD U9			WENSN			CAD U9	WENSN
freq (Hz)	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Promedio	Promedio
100	0.7	7.5	4.3	0.9	4.3	0.7	4.2	2.0
125	7.6	1.6	2.5	0.7	7.3	4.9	3.9	4.3
160	5	2.6	2	7.2	0	1.1	3.2	2.8
200	3	2.8	2.6	2.5	1.6	1	2.8	1.7
250	0	2.7	2.2	3	3.5	6.8	1.6	4.4
315	2.1	5	1.6	2.5	4.2	3.1	2.9	3.3
400	3.6	0.2	2.7	6.8	1.7	6.9	2.2	5.1
500	3.1	3.5	5.1	1.9	3.5	3.7	3.9	3.0
630	7.1	2.7	3.9	3.1	7.8	0.6	4.6	3.8
800	5.2	7.1	4.6	0.8	8.9	7.6	5.6	5.8
1000	0.2	1.1	0.6	3.9	3.1	1.9	0.6	3.0
1250	1.2	3.5	2.8	1	3.9	1.3	2.5	2.1
1600	8.6	1.3	1.4	4.1	3	0.9	3.8	2.7
2000	2.7	5.8	0.8	4.2	6.5	1.9	3.1	4.2
2500	4.7	1	7.1	6.4	7.1	0.9	4.3	4.8
3150	7.3	1.3	8.4	5.8	1.4	2.7	5.7	3.3
4000	5.6	7	1.8	0.1	7.6	2.1	4.8	3.3
5000	3.7	7.9	5.9	0.8	1	1	5.8	0.9
6300	5.9	6.5	2	4.5	6.6	2.9	4.8	4.7
8000	1	2	8.3	7.9	4	3.5	3.8	5.1

Error relativo entre Raspberry y Sonómetro Cesva Niveles en ponderación Z (%)								
	CAD U9			WENSN			CAD U9	WENSN
freq (Hz)	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Promedio	Promedio
100	0.9	9.5	5.4	N/A	N/A	N/A	5.3	N/A
125	8.7	2.0	3.1				4.6	
160	5.1	3.6	2.8				3.8	
200	4.4	3.5	3.2				3.7	
250	0.0	3.5	2.7				2.1	
315	3.1	6.5	2.3				3.9	
400	5.1	0.3	3.6				3.0	
500	4.4	4.9	7.9				5.7	
630	10.4	3.8	5.2				6.5	
800	8.4	10.9	7.2				8.8	
1000	0.3	1.6	0.9				0.9	
1250	1.8	5.7	4.5				4.0	
1600	13.8	1.8	2.2				5.9	
2000	4.6	8.4	1.2				4.7	
2500	8.0	1.4	10.5				6.6	
3150	10.2	1.9	13.3				8.5	
4000	8.0	9.1	2.4				6.5	
5000	5.2	11.1	8.5				8.3	
6300	8.4	9.8	3.1				7.1	
8000	1.6	3.1	12.8				5.9	

Error relativo entre Raspberry y Sonómetro Cesva Niveles en ponderación A (%)								
	CAD U9			WENSN			CAD U9	WENSN
freq (Hz)	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Promedio	Promedio
100.0	1.1	12.5	7.2	1.4	7.2	1.2	6.9	3.3
125.0	10.7	2.4	3.9	1.0	11.1	7.7	5.7	6.6
160.0	5.9	4.4	3.4	8.5	0.0	1.9	4.6	3.5
200.0	5.2	4.0	3.7	4.3	2.3	1.4	4.3	2.7
250.0	0.0	3.9	3.1	4.4	5.1	9.5	2.3	6.3
315.0	3.4	7.1	2.5	4.1	5.9	4.8	4.3	5.0
400.0	5.5	0.3	3.9	10.4	2.9	9.9	3.2	7.7
500.0	4.6	5.1	8.3	2.8	5.1	6.0	6.0	4.6
630.0	10.7	3.9	5.4	4.7	11.2	0.8	6.6	5.6
800.0	8.5	11.0	7.3	1.3	13.8	12.0	8.9	9.1
1000.0	0.3	1.6	0.9	6.1	4.5	2.7	0.9	4.4
1250.0	1.8	5.7	4.5	1.5	6.3	2.1	4.0	3.3
1600.0	13.6	1.8	2.1	6.5	4.1	1.4	5.8	4.0
2000.0	4.5	8.3	1.1	7.0	9.3	2.7	4.6	6.3
2500.0	7.9	1.4	10.3	10.7	9.7	1.3	6.5	7.2
3150.0	10.0	1.8	13.1	8.0	2.0	4.2	8.3	4.7
4000.0	7.9	9.0	2.4	0.1	9.7	2.8	6.4	4.2
5000.0	5.2	11.0	8.5	1.1	1.4	1.4	8.2	1.3
6300.0	8.4	9.8	3.1	6.4	9.9	4.5	7.1	6.9
8000.0	1.7	3.1	13.1	13.2	6.3	5.5	6.0	8.3

Error relativo entre Raspberry y Sonómetro Cesva Niveles en ponderación C (%)								
freq (Hz)	CAD U9			WENSN			CAD U9	WENSN
	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Promedio	Promedio
100.0	0.9	9.5	5.5	1.1	5.5	0.9	5.3	2.5
125.0	8.7	2.0	3.1	0.8	8.9	6.1	4.6	5.3
160.0	5.1	3.6	2.8	7.4	0.0	1.5	3.8	3.0
200.0	4.4	3.5	3.2	3.6	2.0	1.2	3.7	2.3
250.0	0.0	3.5	2.7	3.9	4.5	8.5	2.1	5.7
315.0	3.1	6.5	2.3	3.7	5.4	4.4	3.9	4.5
400.0	5.1	0.3	3.6	9.7	2.7	9.3	3.0	7.2
500.0	4.4	4.9	7.9	2.7	4.9	5.7	5.7	4.4
630.0	10.4	3.8	5.2	4.5	10.9	0.8	6.5	5.4
800.0	8.4	10.9	7.2	1.3	13.7	11.9	8.8	8.9
1000.0	0.3	1.6	0.9	6.1	4.5	2.7	0.9	4.4
1250.0	1.8	5.7	4.5	1.5	6.4	2.1	4.0	3.3
1600.0	13.8	1.8	2.2	6.6	4.2	1.4	5.9	4.1
2000.0	4.6	8.5	1.2	7.2	9.5	2.8	4.7	6.5
2500.0	8.1	1.4	10.5	11.0	10.0	1.3	6.7	7.4
3150.0	10.3	1.9	13.4	8.1	2.0	4.3	8.5	4.8
4000.0	8.1	9.2	2.5	0.1	10.0	2.9	6.6	4.3
5000.0	5.3	11.3	8.7	1.2	1.4	1.5	8.4	1.4
6300.0	8.6	10.1	3.2	6.6	10.2	4.6	7.3	7.1
8000.0	1.7	3.2	13.5	13.6	6.5	5.7	6.1	8.6

Error relativo entre nivel medido de ruido rosa con Raspberry y Sonómetro Cesva Niveles en ponderación Z (%)									
	CAD U9			WENSN			CAD U9	WENSN	
	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Promedio	Promedio	
	13.9	9.4	6.6	N/A	N/A	N/A	9.9	N/A	
Error relativo entre nivel medido ruido rosa con Raspberry y Sonómetro Cesva Niveles en ponderación A (%)									
	CAD U9			WENSN			CAD U9	WENSN	
	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Promedio	Promedio	
	12.7	15.3	14.4	27.7	25.7	25.9	14.1	26.5	
Error relativo entre nivel medido ruido rosa con Raspberry y Sonómetro Cesva Niveles en ponderación C (%)									
	CAD U9			WENSN			CAD U9	WENSN	
	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Promedio	Promedio	
	12.5	8.7	9.5	18.7	18.0	12.2	10.2	16.3	
							CAD U9	WENSN	
							Promedio Global	Promedio Global	
							5.4	4.9	
							CAD U9	WENSN	Cesva SC310
							Costo*error%	Costo*error%	Costo*error%
							6.3	6.1	52.5

