

## Licenciatura en Ingeniería Electrónica

### Nombre del Proyecto:

“Determinación del tiempo de reverberación mediante un impulso acústico en un recinto”

Proyecto Tecnológico  
Trimestre lectivo: 20P

Presenta

José Carlos Montaña Quiroz  
2153034267

Asesores:

Dr. Ernesto Rodrigo Vázquez Cerón  
Área de Sensores y Procesamiento de Señales

M. en D. Laura Angélica Lancón Rivera  
Área de Análisis y Diseño Acústico

## **DECLARATORIA**

Yo, José Carlos Montaña Quiroz, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Ernesto Rodrigo Vázquez Cerón, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Laura Angélica Lancón Rivera, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

## Resumen

El tiempo de reverberación cuantifica el tiempo que tarda en atenuarse un sonido al interior de un recinto, una vez que la fuente sonora cesa. La atenuación de las reflexiones se relaciona con el volumen del espacio, así como con las características de los materiales que se encuentran al interior de este, como pueden ser los muros, techos, pisos, mobiliario, entre otros. El tiempo de reverberación representa un parámetro de la calidad acústica para el cual fue diseñado, como puede ser un salón de clases donde debe prevalecer una comunicación adecuada entre el profesor y alumnos. Un tiempo de reverberación muy alto indica que el sonido se superpone generando poca claridad acústica, principalmente para un mensaje oral; por el contrario, un tiempo bajo puede no ser adecuado para espacios donde se ejecuta música, ya que los sonidos se escucharán secos, no siendo deseable para ese tipo de recintos.

Este proyecto implementó la técnica de respuesta impulsiva integrada, para cuantificar el tiempo de reverberación de un salón de clases a nivel preescolar. La metodología se basó en el estallido de un globo como fuente de ruido impulsivo y se diseñó una interfaz gráfica para analizar y procesar simultáneamente en el dominio del tiempo el registro del impulso de hasta cuatro zonas de interés, además de identificar el contenido frecuencia y seleccionar los parámetros a lo largo de un intervalo de tiempo para cuantificar el tiempo de reverberación. La interfaz cuenta con la opción de filtros digitales para realizar el análisis a frecuencias específicas establecidas por norma. El valor cuantificado se obtiene del promedio de número de registros realizados y extrapola el tiempo para estimar el valor hasta los 60 dB.

El tiempo de reverberación obtenido, para el salón de clases a nivel preescolar con un volumen de  $144.6984\text{m}^3$ , fue de 1.268 segundos. Este valor sobre pasa el rango recomendado, 0.4 - 0.6 segundos, para aulas de clase con volumen menor a  $200\text{m}^3$ . Por lo que deben implementarse estrategias de acondicionamiento acústico al interior del recinto para reducir el tiempo.

## **Agradecimientos**

*En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, en especial a mi madre, por su apoyo y cariño incondicional.*

*También quiero agradecer a mis asesores por su esfuerzo, dedicación y guía en este proyecto.*

*Por último, agradezco a mis compañeros por las experiencias y aprendizajes compartidos, en especial a Patricia, quien siempre estuvo a mi lado para brindarme su ayuda y compañía.*

## Índice General

1. Introducción	9
2. Antecedentes	11
3. Justificación	13
4. Objetivos	14
4.1 Objetivo específico	14
4.2 Objetivos Particulares	14
5. Marco teórico	15
5.1 Definición del sonido	15
5.2 Generación y propagación del sonido	15
5.3 Frecuencia del sonido	15
5.4 Espectro frecuencial	15
5.5 Nivel de presión sonora	15
5.6 Propagación del sonido en un recinto cerrado	16
5.6.1 Sonido reflejado	16
5.6.2 Eco flotante	17
5.6.3 Tiempo de reverberación	17
5.6.3.1 Cálculo del tiempo de reverberación	18
5.6.3.2 Medición del tiempo de reverberación	19
5.6.3.2.1 Método del ruido interrumpido	19
5.6.3.2.2 Método de respuesta impulsiva integrada	19
6. Metodología	21
6.1 Generación de ruido impulsivo	21
6.2 Registro de las señales	21
6.3 Rango de frecuencias alcanzado por la fuente de ruido impulsiva	23
6.3 Interfaz gráfica	27
7. Resultados	36
7.1 Discusión de resultados	57
8. Conclusiones	59
9. Referencias	60
10. Entregables	61

## Índice de figuras

Figura 1. Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido directo, primeras reflexiones y cola reverberante.....	17
Figura 2. Ruido impulsivo en función del tiempo y de la frecuencia.....	21
Figura 3. Patrón polar unidireccional (a) y patrón polar de figura 8 (b).....	22
Figura 4. Conexión para los micrófonos de Figura 8.....	23
Figura 5. Conexión para los micrófonos Unidireccionales.....	23
Figura 6. Cámara empleada para la caracterización de la fuente de ruido impulsiva.....	24
Figura 7. Primer globo empleado para la caracterización de la fuente de ruido impulsiva.....	24
Figura 8. Señal registrada por la explosión del primer globo, en función del tiempo y de la frecuencia.....	25
Figura 9. Segundo globo empleado para la caracterización de la fuente de ruido impulsiva.....	25
Figura 10. Señal registrada por la explosión del segundo globo, en función del tiempo y de la frecuencia.....	26
Figura 11. Tercer globo empleado para la caracterización de la fuente de ruido impulsiva.....	26
Figura 12. Señal registrada por la explosión del tercer globo, en función del tiempo y de la frecuencia.....	27
Figura 13. Ventana de Inicio.....	28
Figura 14. Ventana 2 análisis de 4 zonas.....	29
Figura 15. Señal cargada para el análisis de 4 zonas.....	29
Figura 16. Señal segmentada para el análisis de 4 zonas.....	30
Figura 17. Contenido de frecuencias de la señal.....	31
Figura 18. Ventana para aplicar análisis por frecuencia.....	31
Figura 19. Filtro de 2000Hz aplicado a la señal segmentada.....	32
Figura 20. Parámetros para el diseño del filtro pasabanda centrado en 2000Hz...32	
Figura 21. Decaimiento de las señales.....	33
Figura 22. Ajuste lineal y diferencia en dB entre el valor inicial y el valor final.....	34
Figura 23. Ventana final, promedio de las cuatro zonas para determinar el tiempo de reverberación.....	35

Figura 24. Esquema del salón de clases analizado.....	36
Figura 25. Frecuencia de muestreo y numero de zonas a analizar para realizar las mediciones dentro del salón de clases.....	37
Figura 26. Globo 1 con circunferencia de 46cm.....	37
Figura 27. Ruido impulsivo obtenido a partir de la explosión del globo 1.....	38
Figura 28. Señal segmentada de la explosión del globo 1.....	38
Figura 29. Contenido de frecuencias de la señal segmentada de la explosión del globo 1.....	39
Figura 30. Decaimiento de la señal, curva de ajuste y diferencia en dB de la señal segmentada de la explosión del globo 1.....	39
Figura 31. Promedio del tiempo de reverberación obtenido por la explosión del globo 1.....	40
Figura 32. Globo 2 con circunferencia de 42cm.....	40
Figura 33. Ruido impulsivo obtenido a partir de la explosión del globo 2.....	41
Figura 34. Señal segmentada de la explosión del globo 2.....	41
Figura 35. Contenido de frecuencias de la señal segmentada de la explosión del globo 2.....	42
Figura 36. Decaimiento de la señal, curva de ajuste y diferencia en dB de la señal segmentada de la explosión del globo 2.....	42
Figura 37. Promedio del tiempo de reverberación obtenido por la explosión del globo 2.....	43
Figura 38. Globo 3 con circunferencia de 39cm.....	43
Figura 39. Ruido impulsivo obtenido a partir de la explosión del globo 3.....	44
Figura 40. Señal segmentada de la explosión del globo 3.....	44
Figura 41. Contenido de frecuencias de la señal segmentada de la explosión del globo 3.....	45
Figura 42. Decaimiento de la señal, curva de ajuste y diferencia en dB de la señal segmentada de la explosión del globo 3.....	45
Figura 43. Promedio del tiempo de reverberación obtenido por la explosión del globo 3.....	46
Figura 44. Globo 4 con circunferencia de 92cm.....	46
Figura 45. Ruido impulsivo obtenido a partir de la explosión del globo 4.....	47
Figura 46. Señal segmentada de la explosión del globo 4.....	47

Figura 47. Contenido de frecuencias de la señal segmentada de la explosión del globo 4.....	48
Figura 48. Decaimiento de la señal, curva de ajuste y diferencia en dB de la señal segmentada de la explosión del globo 4.....	48
Figura 49. Promedio del tiempo de reverberación obtenido por la explosión del globo 4.....	49
Figura 50. Esquema de la cámara semianecoica.....	50
Figura 51. Señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 7.....	50
Figura 52. Contenido de frecuencias de la señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 7.....	51
Figura 53. Decaimiento de la señal, curva de ajuste y diferencia en dB de la señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 7.....	51
Figura 54. Promedio del tiempo de reverberación obtenido por la explosión del globo de la Figura 7.....	52
Figura 55. Señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 9.....	52
Figura 56. Contenido de frecuencias de la señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 9.....	53
Figura 57. Decaimiento de la señal, curva de ajuste y diferencia en dB de la señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 9.....	53
Figura 58. Promedio del tiempo de reverberación obtenido por la explosión del globo de la Figura 9.....	54
Figura 59. Señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 11.....	54
Figura 60. Contenido de frecuencias de la señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 11.....	55
Figura 61. Decaimiento de la señal, curva de ajuste y diferencia en dB de la señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 11.....	55
Figura 62. Promedio del tiempo de reverberación obtenido por la explosión del globo de la Figura 11.....	56
Figura 63. Salón de clases empleado para el análisis.....	57

## 1. Introducción

Se define a la *acústica* como la parte de la ciencia que estudia la generación, transmisión y recepción de energía en forma de ondas vibratorias en la materia y el efecto que dicha energía pueda producir [1]. Dentro de esta misma línea conceptual surge la *acústica arquitectónica*, la cual se enfoca al diseño de espacios confortablemente acústicos para los usuarios, a través de la distribución de las ondas sonoras en recintos cerrados, además de impedir la transmisión de ruido de un espacio a otro, ya sea entre ambientes internos o entre un ambiente interno y externo o viceversa [2]; es decir, adaptar el espacio arquitectónico o recinto al uso al que está destinado mediante un acondicionamiento o aislamiento acústico.

El acondicionamiento acústico consiste en la definición de las formas y revestimientos de las superficies interiores de un recinto con objeto de conseguir las condiciones acústicas más adecuadas para el tipo de actividad a la que se haya previsto destinarlo. Mientras que el aislamiento acústico se refiere al conjunto de acciones encaminadas a la obtención de una correcta atenuación en la transmisión de ruido y vibraciones entre los diferentes espacios que integran un recinto [2].

Por lo general, para mejorar la distribución de las ondas sonoras y controlar el tiempo de reverberación en espacios cerrados se recurre a la absorción y difusión sonora, cabe resaltar que, en algunos casos se combinan ambos tratamientos.

La absorción sonora se define como el porcentaje de la pérdida de energía al incidir sobre un material. Se emplean materiales fibrosos o porosos, ya que, debido a su composición, en ellos ocurre una mayor absorción, contrario a los materiales más densos que generalmente son menos absorbentes.

Por otra parte, la difusión sonora permite propagar la energía del sonido de una forma más homogénea dentro de un espacio [3].

Uno de los parámetros que indiscutiblemente influye de manera decisiva en muchos aspectos de la calidad acústica de una sala es la *reverberación*, fenómeno acústico de reflexión, el cual consiste en la permanencia del sonido una vez que la fuente original ha dejado de emitirlo. Esta permanencia depende en gran medida de las ondas sonoras al incidir sobre las distintas superficies de algún recinto produciendo diversos fenómenos como difusión, difracción, absorción y reflexión, entre otros. Es decir, al incidir la onda sonora sobre alguna superficie, una parte de la onda se refleja produciendo una onda sonora reflejada, la cual tiene menor intensidad que la señal original, pues la otra parte de la onda incidente es absorbida o transmitida por el material [1]. La duración del sonido, reverberación, está ligado al volumen del recinto y a las características físicas de los materiales interiores como pueden ser los muros, techos, pisos, asientos, mobiliario, entre otros.

Se emplea el parámetro del *tiempo de reverberación* ( $R_T$ ) para cuantificar el tiempo que tarda en atenuarse el sonido en un recinto, el cual a su vez define de manera directa la calidad acústica. Este parámetro define el tiempo que tarda la energía acústica en atenuarse 60 dB a partir del cese de la emisión de una fuente sonora dentro de dicho recinto [4]. Cuando la persistencia de un sonido ( $R_T$ ) es demasiado larga, genera un efecto de confusión sonora donde todos los sonidos se superponen hasta volverse incomprensibles. Por el contrario, si el tiempo de reverberación es

excesivamente corto, los sonidos son demasiado secos y no llegan a los oyentes más alejados de la fuente sonora [5]. Teniendo en cuenta lo anterior, destaca que cada recinto requiere un tiempo de reverberación óptimo, según el propósito para el que esté destinado.

La acción correctiva más simple para obtener el tiempo de reverberación óptimo, cuando este no es el deseado en un espacio cerrado, es la instalación de paneles acústicos. Esta acción evita que se deban reemplazar los materiales de las superficies, el mobiliario o hasta realizar cambios estructurales en el recinto. Además, existen una gran variedad de paneles acústicos, según los requerimientos estéticos, o preferencia en materiales. Por ejemplo, existen paneles acústicos multicapa, los cuales, contienen láminas de plomo cubiertas por otros materiales como el poliuretano expandido, aunque por su efecto de contaminante ambiental se encuentra reducido su uso; en contraste, existen paneles acústicos ecológicos, de diferentes materiales, que buscan reducir el impacto ambiental provocado por otros materiales tradicionales que encuentran su naturaleza en recursos no renovables.

## 2. Antecedentes

Comúnmente, para el cálculo teórico del tiempo de reverberación de un recinto se emplea la fórmula de Wallace Clement Sabine, la cual relaciona el volumen y el área efectiva de absorción, haciendo de ésta una herramienta eficaz para determinar la calidad acústica de una sala. Por otra parte, se emplean el método del ruido interrumpido y el método de respuesta impulsiva integrada para determinar este parámetro experimentalmente.

La fórmula clásica por excelencia para el cálculo teórico del tiempo de reverberación y tomada como referencia a nivel internacional por su sencillez de operación, es la denominada fórmula de Sabine. La correspondiente expresión matemática, obtenida aplicando la teoría acústica estadística y despreciando el efecto de la absorción producida por el aire, es la siguiente [6]:

$$TR = \frac{0.163V}{\sum_i S_i a_i} \quad (1)$$

donde:

$V$  = Volumen del recinto (en  $m^3$ )

$S_i$  = Área de la superficie (en  $m^2$ )

$a_i$  = Coeficiente de absorción sonora

Se emplean dos métodos para realizar experimentalmente la cuantificación del tiempo de reverberación, que son: el método del ruido interrumpido y el método de respuesta impulsiva integrada.

### 2.1 Ruido interrumpido

El método de ruido interrumpido consiste en la excitación suficiente del recinto con ruido, dentro de un rango de frecuencia establecido, para que el campo acústico alcance un estado estacionario antes de apagar la fuente, para lo cual es necesario emitir el ruido durante algunos segundos.

La principal ventaja de este método radica en que aporta mayor resolución en determinadas frecuencias. Es decir, se determina el tiempo de reverberación dentro de un rango establecido de frecuencias. En contraste, las principales desventajas son que se requiere emplear una fuente de sonido omnidireccional y que para obtener resultados precisos se requieren realizar múltiples mediciones.

### 2.2 Respuesta impulsiva integrada

El método de respuesta impulsiva integrada consiste en la excitación del recinto mediante una fuente impulsiva que no sea en si misma reverberante, como pueden ser el sonido emitido por el disparo de una pistola, descargas eléctricas o algún sonido que asemeje un impulso acústico, es decir, una alta intensidad en un tiempo muy corto [7].

Este método de medición permite obtener resultados rápidos y con un buen grado de aproximación. Tiene la ventaja de ser un método sencillo de implementar. La desventaja radica en el hecho de que no aporta información discriminada sobre las distintas bandas de octava [8].

Actualmente, se ha determinado el tiempo de reverberación experimentalmente de distintos recintos, siguiendo los lineamientos de la norma 3382-2, la cual especifica el tipo de equipo y sus parámetros de operación para medir el tiempo de reverberación, así como los lineamientos para el montaje y se ha comparado el valor obtenido con el tiempo de reverberación determinado empleando la fórmula de Sabine.

En general, el valor más adecuado de RT60 depende tanto del volumen del recinto como de la actividad a la que se haya previsto destinarlo. Por ejemplo, cuando se trata de salas destinadas a la palabra, es conveniente que los valores de RT sean bajos, con objeto de conseguir una buena inteligibilidad, mientras que en el caso de salas de conciertos son recomendables unos valores apreciablemente más elevados a fin de que la audición musical resulte óptima.

En la Tabla 1 se indican los márgenes de tiempos de reverberación recomendados para las distintas salas.

*Tabla 1. Márgenes de valores recomendados de RT en función del tipo de sala [9].*

Localidad	Cantidad	Distancia crítica $D_c$	Tiempo de reverberación RT60 recomendado
Estudio de grabación	< 50 m <sup>3</sup>	1.5 m	0.3 s
Aulas	< 200 m <sup>3</sup>	2 m	0.4 - 0.6 s
Oficinas	< 1'000 m <sup>3</sup>	3.5 m	0.5 - 1.1 s
Sala de lectura	< 5'000 m <sup>3</sup>	6 m	1.0 - 1.5 s
Sala de conciertos, Opera	< 20'000 m <sup>3</sup>	11 m	1.4 - 2.0 s
Templo/ Iglesia			2 - 10 s

En el Laboratorio de Diseño Acústico de la División de Ciencias y Artes para el Diseño de la UAM-A se cuenta con un sistema que utiliza el método de ruido interrumpido para determinar el tiempo de reverberación en modelos a escala urbanos [7]. Este sistema ha sido implementado para evaluar modelos a escala en avenidas, las cuales se refieren como cañones acústicos.

### 3. Justificación

El tiempo de reverberación es un parámetro que influye indiscutiblemente en la calidad acústica de cualquier recinto, por ejemplo, cuando se trata de salas destinadas a la palabra, es conveniente que los valores de  $R_T$  sean bajos, con objeto de conseguir una buena inteligibilidad, mientras que en el caso de salas de conciertos son recomendables valores apreciablemente más elevados a fin de que la audición musical resulte óptima. Por ello, es de importancia cuantificar su valor y así determinar si este tiempo es el óptimo según el uso para el que esté destinado el recinto.

Cabe resaltar que, en un aula de clase, el exceso de reverberación podría causar que los alumnos no entiendan de manera adecuada el mensaje que el profesor transmite, además puede causar estrés tanto a los alumnos como al profesor, e incluso se ha asociado con el fracaso escolar y al desgaste . Esto se debe a que el ruido de fondo y la reverberación pueden disminuir la atención y el rendimiento académico. En un aula de clase se recomienda que el tiempo de reverberación sea de alrededor 0.6 segundos, ya que, con este tiempo se escucha nítida la voz del profesor. Si el tiempo de reverberación es mayor a 1 segundo el mensaje se vuelve difícil de entender, por lo que el alumno deja de poner atención [10].

En México existen compañías de consultoría acústica cuyos servicios se especializan en el asesoramiento, medición y evaluación acústica de cualquier espacio cerrado; sin embargo, este servicio representa un gasto elevado al usuario.

Por esta razón, en el Laboratorio de Diseño Acústico de la División de Ciencias y Artes para el Diseño de la Universidad Autónoma Metropolitana, surge la necesidad de contar con un sistema portátil para cuantificar el tiempo de reverberación de un recinto mediante la técnica de respuesta impulsiva integrada, el cual contribuirá como una herramienta de docencia e investigación para analizar de manera rápida el confort acústico, y en caso de ser necesario realizar acciones correctivas, que conserven un ambiente adecuado para la mejor recepción del sonido en los usuarios. La integración de un sistema portátil para la generación y registro de señales acústicas, así como el procesamiento y análisis cuantificará la calidad acústica de un recinto.

## **4. Objetivos**

### **4.1 Objetivo General**

- Cuantificar el tiempo de reverberación en un salón de clases implementando la técnica de respuesta impulsiva integrada.

### **4.2 Objetivos Particulares**

- Implementar un sistema portátil para registrar señales acústicas en diversos puntos de un recinto.
- Determinar el rango de frecuencias del impulso alcanzado por la fuente de ruido impulsiva.
- Diseñar una interfaz gráfica para el procesamiento y visualización de señales digitales.
- Comparar los tiempos de reverberación implementando la metodología en diez salones.
- Comparar el tiempo de reverberación experimental respecto al teórico obtenido por la expresión de Sabine.

## **5. Marco teórico**

### **5.1 Definición del sonido**

Se define al sonido como una vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico y denso (habitualmente el aire), y que es capaz de producir una sensación auditiva. De dicha definición se desprende que el sonido no se propaga a través del vacío y, además, se asocia con el concepto de estímulo físico.

### **5.2 Generación y propagación del sonido**

Al elemento generador del sonido se denomina fuente sonora. La generación del sonido tiene lugar cuando dicha fuente entra en vibración. Dicha vibración es transmitida a las partículas de aire adyacentes que, a su vez, la transmiten a nuevas partículas contiguas. Las partículas no se desplazan con la perturbación, sino que simplemente oscilan alrededor de su posición de equilibrio. La manera en que la perturbación se traslada de un lugar a otro se denomina propagación de la onda sonora.

La oscilación de las partículas tiene lugar en la misma dirección que la de propagación de la onda. En este caso se refiere a ondas sonoras longitudinales, el movimiento de las partículas del medio es paralelo a la dirección de propagación de la onda. La manera más habitual de expresar cuantitativamente la magnitud de un campo sonoro es mediante la presión sonora, o fuerza que ejercen las partículas de aire por unidad de superficie.

### **5.3 Frecuencia del sonido**

El número de oscilaciones por segundo de la presión sonora  $p(t)$  se denomina frecuencia ( $f$ ) del sonido y se mide en hertzios (Hz) o ciclos por segundo (c/s). Lógicamente, la frecuencia del sonido coincide con la frecuencia de la vibración mecánica que lo ha generado.

### **5.4 Espectro frecuencial**

La gran mayoría de los sonidos que percibimos no constan únicamente de una sola frecuencia, sino que están constituidos por múltiples frecuencias superpuestas.

Se puede conocer qué frecuencias componen un sonido observando el denominado espectro frecuencial (o simplemente espectro) del mismo, entendiendo por tal la representación gráfica de las frecuencias que lo integran junto con su correspondiente nivel de presión sonora.

### **5.5 Nivel de presión sonora**

La manera más habitual de expresar cuantitativamente la magnitud de un campo sonoro es mediante la presión sonora, o fuerza que ejercen las partículas de aire por unidad de superficie.

La presión sonora constituye la manera más habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro, su unidad de medida es el Newton/metro<sup>2</sup> (N/m<sup>2</sup>) o Pascal (Pa), la entendemos como la diferencia ente la presión instantánea debida al sonido y la presión atmosférica. La presión sonora, a diferencia de la atmosférica varía con rapidez, de valores positivos a negativos, y es lo que se conoce como su frecuencia (Hz).

Dado que el intervalo de incremento de presiones debidas al sonido es muy grande, es decir, las variaciones de presión audibles se encuentran en una gama muy amplia entre los sonidos intensos y los débiles, se adoptó para su medición una unidad logarítmica llamada decibel. Así surge el Nivel de Presión Sonora (SPL), cuya unidad de medición es el decibel (dB) y se define como:

$$SPL = 20 \log_{10} \left( \frac{P}{P_{ref}} \right) \quad (2)$$

Donde  $P_{ref}$  es la presión de referencia (20  $\mu$ Pa) y P es la presión sonora.

## 5.6 Propagación del sonido en un recinto cerrado

La energía radiada por una fuente sonora en un recinto cerrado llega a un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo de dos formas diferentes: una parte de la energía llega de forma directa (sonido directo), es decir, como si fuente y receptor estuviesen en el espacio libre, mientras que la otra parte lo hace de forma indirecta (sonido reflejado), al ir asociada a las sucesivas reflexiones que sufre la onda sonora cuando incide sobre las diferentes superficies del recinto. En un punto cualquiera del recinto, la energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora, mientras que la energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el rayo sonoro, así como del grado de absorción acústica de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies implicadas. Lógicamente, cuanto mayor sea la distancia recorrida y más absorbentes sean los materiales empleados, menor será la energía asociada tanto al sonido directo como a las sucesivas reflexiones.

### 5.6.1 Sonido reflejado

Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto, objeto de estudio, se observan básicamente dos zonas de características notablemente diferenciadas: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas, y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante.

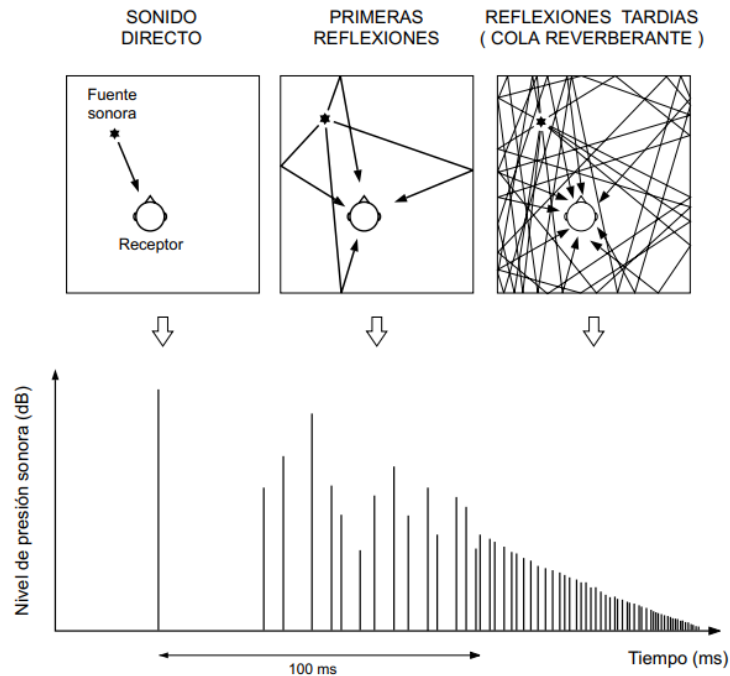


Figura 1. Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido directo, primeras reflexiones y cola reverberante [6].

### 5.6.2 Eco flotante

Se denomina eco flotante al efecto sonoro que se origina entre dos paredes paralelas, lisas y reflectantes, que consiste en una repetición múltiple, en un breve intervalo de tiempo, de un sonido generado por una fuente sonora

Dichas paredes pueden estar separadas por varios metros o muy juntas, con lo que el sonido se refleja de una pared a otra, dando una serie de ecos los cuales van perdiendo intensidad lentamente.

Se podría decir que la onda queda atrapada entre las dos paredes y su energía se refleja llegando a transformar el sonido en otro diferente al emitido inicialmente. Dicho sonido se transforma porque algunas frecuencias interfieren anulándose y otras sumándose en las numerosas reflexiones producidas entre las dos paredes.

### 5.6.3 Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación (RT) define el tiempo que tarda la energía acústica en atenuarse 60 dB a partir del cese de la emisión de una fuente sonora dentro de dicho recinto.

Un recinto con un RT grande se denomina “vivo” mientras que si el RT es pequeño recibe el nombre de recinto “apagado” o “sordo”.

Por lo general, el RT varía con la frecuencia, tendiendo a disminuir a medida que ésta aumenta. Ello es debido, en parte, a las características de mayor absorción con la frecuencia de los materiales comúnmente empleados como revestimientos, así como a la absorción del aire, que especialmente se manifiesta en recintos grandes y a altas frecuencias.

### 5.6.3.1 Cálculo del tiempo de reverberación

Si bien existe un gran número de fórmulas para el cálculo teórico del RT, la fórmula clásica por excelencia, y aceptada como de referencia a nivel internacional por su sencillez de cálculo, es la denominada fórmula de Sabine, fórmula 1. Expresión matemática, obtenida aplicando la teoría acústica estadística y despreciando el efecto de la absorción producida por el aire.

El llamado coeficiente de absorción  $\alpha$ . Se define como la relación entre la energía absorbida por dicho material y la energía incidente sobre el mismo:

$$\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}} \quad (3)$$

Sus valores están comprendidos entre 0 (correspondiente a un material totalmente reflectante) y 1 (caso de absorción total). El valor de  $\alpha$  está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia.

Para facilitar dichos datos se presenta la tabla con los coeficientes de algunos materiales:

Tabla 2. Coeficiente de absorción de algunos materiales [11].

Material/ Dispositivo	Descripción	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Espesor [mm]	Coeficiente de absorción sonora					
				Frecuencia central por banda de octava [Hz]					
				125	250	500	1000	2000	4000
Alfombra	Alfombra sobre pared	-	10	0,09	0,08	0,21	0,27	0,27	0,37
Alfombra	Alfombra pesada sobre goma espuma	-	-	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73
Alfombra	Alfombra media sobre base espumosa	-	6	0,03	0,09	0,25	0,31	0,33	0,44
Fibra	Placas de fibra 16 mm (Armstrong, Minaboard)	-	16	0,30	0,32	0,54	0,74	0,67	0,60
Lana de vidrio	Placas lana de vidrio con lámina vinilo sin perforar	-	16	0,57	0,39	0,41	0,82	0,89	0,72
Hormigón	Bloque de hormigón grueso	-	-	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25
Hormigón	Bloque de hormigón pintado	-	-	0,01	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Mármol	Losa de mármol	-	-	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Ladrillo	Ladrillo liso con mezcla al ras	-	-	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Hormigón	Hormigón pintado	-	-	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Hormigón	Hormigón Suavizado sin pintar	-	-	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05
Lana de vidrio	Panel rígido de lana de vidrio con film de PVC (Isover, Andina Glacial)	50	20	0,68	0,64	0,61	0,81	0,66	0,39
Corcho	Revestimiento de corcho	5,6	20	0,12	0,27	0,72	0,79	0,76	0,77
Corcho	Pavimento de corcho (Dekwall)	200	3	0,04	0,03	0,05	0,11	0,07	0,02
Corcho	Baldosas contra respaldo sólido	-	22	0,05	0,10	0,20	0,55	0,60	0,55
Goma	Alfombra de goma	-	5	0,03	0,04	0,06	0,08	0,07	0,05
Piedra	Lastre u otra piedra estampada 3,18 cm x 15,2 de profundidad	-	-	0,19	0,23	0,43	0,37	0,58	0,62
Fieltro	Fieltro punzonado adherido a concreto	-	5	0,01	0,02	0,05	0,15	0,03	0,4
Revoque	Revoque de cal y arena	-	20	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Butacas	Sillas vacías tapizadas con tela	-	-	0,44	0,60	0,77	0,89	0,82	0,70
Butacas	Sillas vacías tapizadas con cuero	-	-	0,40	0,50	0,58	0,61	0,58	0,50
Madera	Parquet de madera sobre hormigón	-	-	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07

### 5.6.3.2 Medición del tiempo de reverberación

El RT se calcula a partir de la curva de decaimiento energético, medida en un punto establecido en una sala. Sin embargo, existen diversos métodos para medir el tiempo de reverberación, las diferencias fundamentales en los distintos métodos están basadas en la información que se desee obtener, es decir, si se trata de obtener valores globales de discernimiento de una banda de frecuencias en un espectro amplio, o se busca mayor resolución en determinadas frecuencias

#### 5.6.3.2.1 Método del ruido interrumpido

El método de ruido interrumpido consiste en la excitación suficiente del recinto con ruido, dentro de un rango de frecuencia establecido, para que el campo acústico alcance un estado estacionario antes de apagar la fuente, para lo cual es necesario emitir el ruido durante algunos segundos.

La principal ventaja de este método radica en que aporta mayor resolución en determinadas frecuencias. Es decir, se determina el tiempo de reverberación para valores establecidos de frecuencias, donde comúnmente se emplean las siguientes frecuencias: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz y 8000 Hz.

En contraste, las principales desventajas son que se requiere emplear una fuente de sonido omnidireccional y que para obtener resultados precisos se requieren realizar múltiples mediciones

#### 5.6.3.2.2 Método de respuesta impulsiva integrada

Como se mencionó, el método de respuesta impulsiva integrada consiste en la excitación del recinto mediante una fuente impulsiva que no sea en si misma reverberante, como puede ser el sonido emitido por el estallido de un globo, es decir, una alta intensidad en un tiempo muy corto.

Este valor se obtiene determinando el tiempo que tarda la energía acústica en atenuarse 60 dB a partir del cese de la emisión fuente impulsiva dentro de dicho recinto.

Algunas consideraciones que hay que tener en cuenta son la distancia del micrófono de medición con respecto a las superficies reflectantes y la distancia mínima entre el micrófono y la fuente impulsiva.

Para la primera consideración, la distancia del micrófono de medición con respecto a las superficies reflectantes (paredes, puertas, ventanas, suelo, mesas, etc.) debe ser de al menos 1 m.

Por otra parte, la distancia mínima entre el micrófono y la fuente impulsiva, para las mediciones RT60, se denominada "distancia crítica" y se calcula con la siguiente fórmula.

$$D_c = 2\sqrt{\frac{V}{cT}} \quad (4)$$

Donde:

$V$  = volumen de la sala [ $m^3$ ]

$c$  = velocidad del sonido [m/s]

$T$  = tiempo de reverberación esperado [s]

Este método tiene la ventaja de ser un método sencillo de implementar, pues basta con registrar un impulso acústico dentro de un recinto, haciendo uso una grabadora, y determinar el tiempo que tarda en atenuarse la energía acústica 60 dB, a partir de la curva de decaimiento energético.

## 6. Metodología

### 6.1 Generación de ruido impulsivo

Un sonido impulsivo se define como un sonido agudo casi instantáneo que posee un amplio contenido de frecuencias, por esta razón, se empleó el estallido de un globo para la generación del ruido impulsivo. Las ventajas de emplear un estallido de globo para la generación de ruido impulsivo son que su diagrama de radiación es esférico, que el bajo peso del globo facilita el transporte y, principalmente, que el contenido en frecuencias obtenido por el estallido de este abarca un amplio rango de frecuencias, lo cual, disminuye el número de mediciones necesarias para determinar el tiempo de reverberación, en comparación con el método de ruido interrumpido, el cual requiere de una bocina, un amplificador de audio y un sistema para generar ruido con cierto contenido de frecuencias. Cabe destacar que cuanto más grande es el globo, más baja es la frecuencia y más alto es la intensidad del sonido, de este modo se pueden medir incluso salas grandes. Sin embargo, es posible que el ruido espacial no cubra toda la gama de frecuencias o que el estallido del globo no produzca el nivel de sonido necesario en salas grandes. De aquí que es conveniente evaluar varios puntos distribuidos a lo largo del espacio y considerar al menos tres mediciones para realizar un promedio.

La Figura 2 muestra la forma del pulso acústico cuando se genera mediante el estallido de un globo. Como se observa, el tiempo de propagación es breve y con una alta intensidad, además de que el contenido en frecuencia puede alcanzar hasta los 10 kHz.

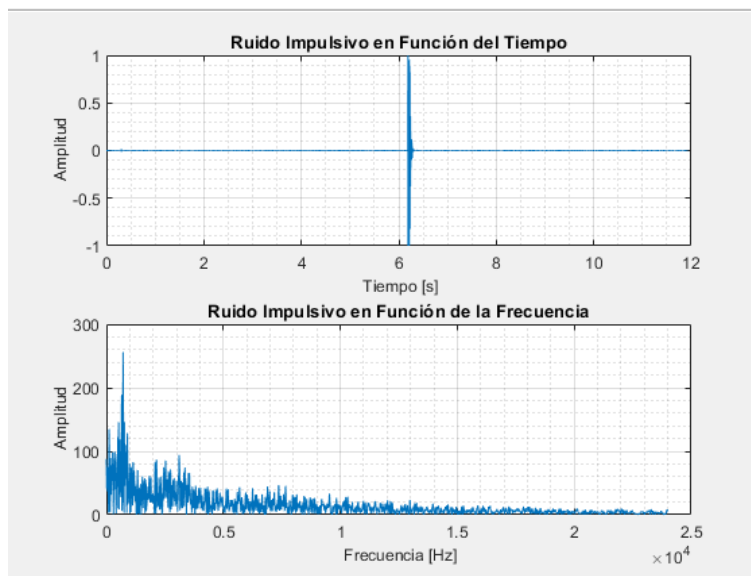


Figura 2. Ruido impulsivo en función del tiempo y de la frecuencia.

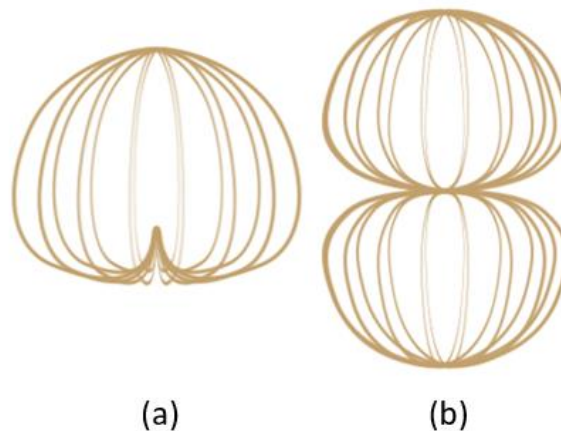
### 6.2 Registro de las señales

Cabe resaltar que el trabajo realizado para la cuantificación del tiempo de reverberación considera que el registro de las señales acústicas puede ser realizado

mediante cualquier grabadora de audio, siempre y cuando se conozca la frecuencia de muestreo. Por otro lado, es importante mencionar que este trabajo considerará utilizar para próximas mediciones una grabadora portátil multipista, Zoom F8, la cual se caracteriza por registrar audio de la más alta calidad y por su compacto y liviano diseño, peculiaridades requeridas para este tipo de trabajo.

Una de las cualidades de la grabadora de campo multipista, Zoom F8, es que permite realizar la grabación de 8 entradas, por lo cual, se consideraron hasta cuatro puntos de análisis en el interior del recinto, y en cada uno de estos puntos se colocaron dos micrófonos, uno de patrón unidireccional y otro con patrón de figura 8.

Los micrófonos unidireccionales se caracterizan por ser más sensibles a aquellos sonidos que provienen de una dirección específica, es decir, son más sensibles a sonidos que vienen desde el frente y menos a aquellos que vienen desde detrás del micrófono. En cambio, los micrófonos con patrón de figura 8, tienen la capacidad de captación en dos direcciones, por el frente y por la parte de atrás del micrófono, en ambos puntos con la misma sensibilidad.



*Figura 3. Patrón polar unidireccional (a) y patrón polar de figura 8 (b).*

Al conectar los micrófonos se consideró que los primeros canales están reservados para los micrófonos con patrón de figura 8 y los canales restantes para los micrófonos con patrón unidireccional. Es decir, si se analizan 4 puntos dentro del recinto, los primeros cuatro canales están destinados para los micrófonos de figura 8 y los siguientes canales se emplearán para los micrófonos unidireccionales.

### Micrófonos Figura 8



Zona 4    Zona 3    Zona 2    Zona 1

Figura 4. Conexión para los micrófonos de Figura 8.

### Micrófonos Unidireccionales



Zona 5    Zona 6    Zona 7    Zona 8

Figura 5. Conexión para los micrófonos Unidireccionales.

## 6.3 Rango de frecuencias alcanzado por la fuente de ruido impulsiva

Se realizó la caracterización de la fuente de ruido impulsiva en la cámara semianecoica del Laboratorio de Diseño Acústico de la División de Ciencias y Artes para el Diseño de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco. Dicha caracterización consistió en determinar experimentalmente el rango de frecuencias alcanzado por la fuente de ruido impulsiva, para ello, se registró el estallido de tres globos dentro de esta cámara y se observó el espectro de la señal. La Figura 6 muestra la cámara semianecoica, posteriormente, En las Figura 7, Figura 9 y Figura 11 se observan los globos que fueron utilizados para generar el impulso acústico y finalmente, en la Figura 8, Figura 10 y Figura 11 la señal registrada en función del tiempo y de la frecuencia.



*Figura 6. Cámara empleada para la caracterización de la fuente de ruido impulsiva.*



*Figura 7. Primer globo empleado para la caracterización de la fuente de ruido impulsiva.*

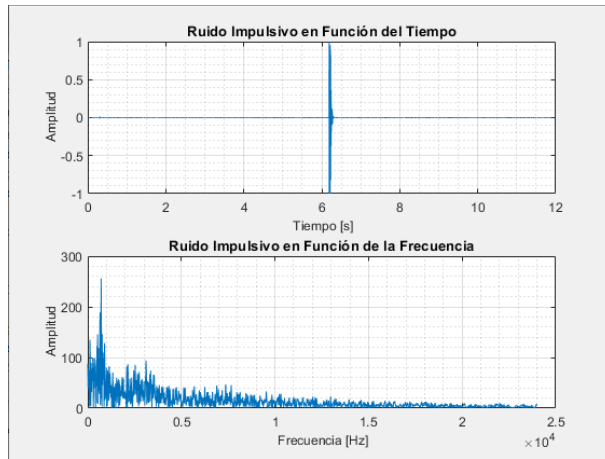


Figura 8. Señal registrada por la explosión del primer globo, en función del tiempo y de la frecuencia.



Figura 9. Segundo globo empleado para la caracterización de la fuente de ruido impulsiva.

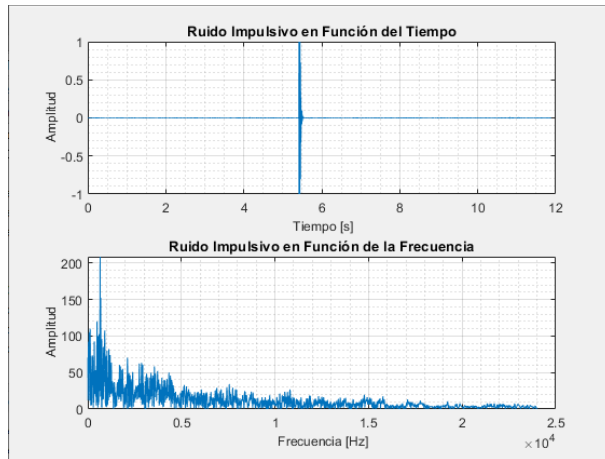


Figura 10. Señal registrada por la explosión del segundo globo, en función del tiempo y de la frecuencia.



Figura 11. Tercer globo empleado para la caracterización de la fuente de ruido impulsiva.

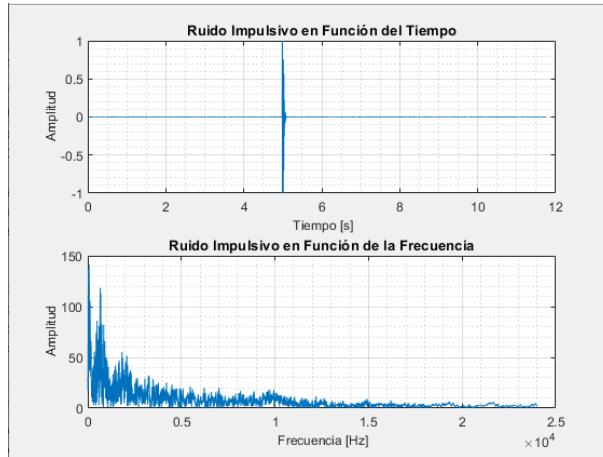


Figura 12. Señal registrada por la explosión del tercer globo, en función del tiempo y de la frecuencia.

Como se puede observar en las Figura 8, Figura 10 y Figura 12, el ruido impulsivo registrado en los tres casos es casi instantáneo y posee un amplio contenido de frecuencias.

## 6.4 Interfaz gráfica

Se diseñó una interfaz gráfica de usuario, compuesta por diferentes ventanas, empleando el sistema de cómputo numérico MATLAB. Con el fin de analizar las señales registradas de manera sencilla, lo cual, elimina la necesidad de aprender un lenguaje de programación, escribir comandos a fin de ejecutar una instrucción, o realizar el análisis matemático detrás de este programa.

Inicialmente, en dicha interfaz, se ingresa la frecuencia de muestreo y el número de puntos a analizar. Posteriormente, se cargan, visualizan y segmentan las señales registradas para examinar en tiempo o frecuencia únicamente la sección de interés. En una ventana, se muestra el decaimiento de las señales en decibelios, con lo que, según el criterio del usuario, se determina el intervalo de decaimiento lineal que permite calcular, los valores típicos de, el tiempo de reverberación para cada señal registrada, como son TR5, TR10, TR15, TR20, TR30 y TR60. Finalmente se realiza un promedio de los valores obtenidos y se despliegan los resultados en una tabla.

Por otra parte, esta interfaz permite determinar el tiempo de reverberación, a partir de un método experimental propuesto, el cual, realiza el análisis para las frecuencias empleadas en el método de ruido interrumpido, esto a partir del filtrado de la señal para conservar únicamente la frecuencia de interés. Es importante resaltar que, para emplear este análisis denominado TR por frecuencia, la señal debe haber sido registrada con una frecuencia de muestreo de 48000 Hz.

### 6.4.1 Ventana de Inicio

Al ejecutar el programa se abre la ventana *Inicio*, en esta ventana se ingresa la frecuencia de muestreo empleada para el registro de la señal y se selecciona el número de zonas a analizar, como se puede observar en la Figura 13.

La interfaz proporciona la opción al usuario de llevar a cabo la evaluación de cuatro zonas para un mismo espacio evaluado. Cada zona lleva a cabo el registro simultaneo de dos señales, uno con micrófono unidireccional y otro con figura ocho, para cuantificar el tiempo de reverberación con los cuales se obtiene un promedio. Por lo que es importante que el archivo utilizado contenga el número respectivo de señales registradas. Una zona utiliza el registro simultaneo de dos micrófonos, dos zonas el registro de cuatro micrófonos, tres zonas el registro de seis micrófonos y cuatro zonas el registro de ocho micrófonos.

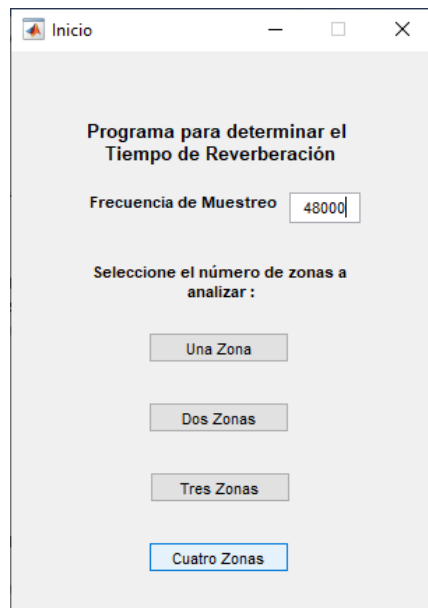


Figura 13. Ventana de Inicio.

#### 6.4.2 Cuatro zonas

Esta sección describe el proceso para cuantificar el tiempo de reverberación de un espacio en el cual se considera un registro simultaneo de cuatro zonas, es decir ocho micrófonos. Al seleccionar cuatro zonas de análisis en la ventana de *Inicio* se abrirá la siguiente ventana, Figura 14. En esta, se debe presionar el botón *cargar señal*, este permite acceder al explorador de archivos para buscar la señal a analizar, dicha señal debe estar en formato *.mat* y tener la forma de vector columna. Para este caso en específico, en el que se analizan cuatro zonas, la señal debe tener 8 columnas.

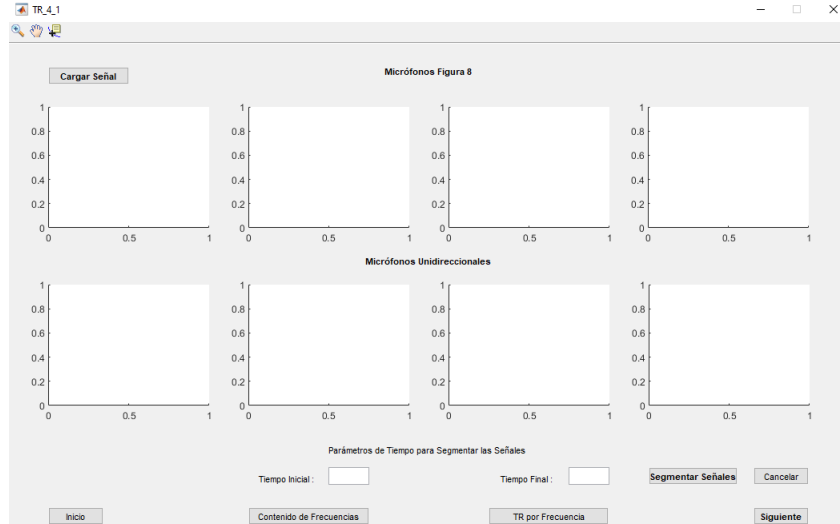


Figura 14. Ventana 2 análisis de 4 zonas.

Una vez cargada la señal de análisis se verá como se muestra en la Figura 15.

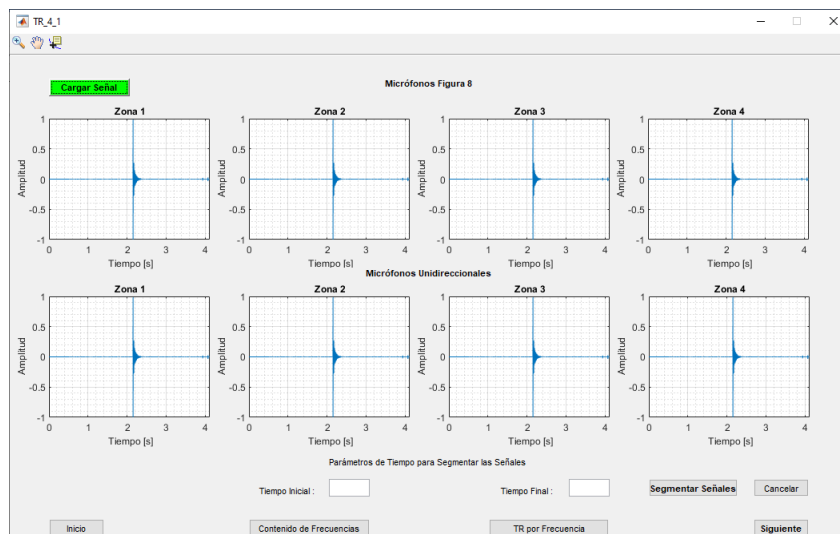


Figura 15. Señal cargada para el análisis de 4 zonas.

El siguiente paso es *Ingresar los parámetros de tiempo para segmentar las señales*, es decir, seleccionar los tiempos de interés para análisis de la señal. Una vez ingresado el *tiempo inicial* y el *tiempo final* se presiona el botón *Segmentar Señales* y se mostrará en pantalla la Figura 16.

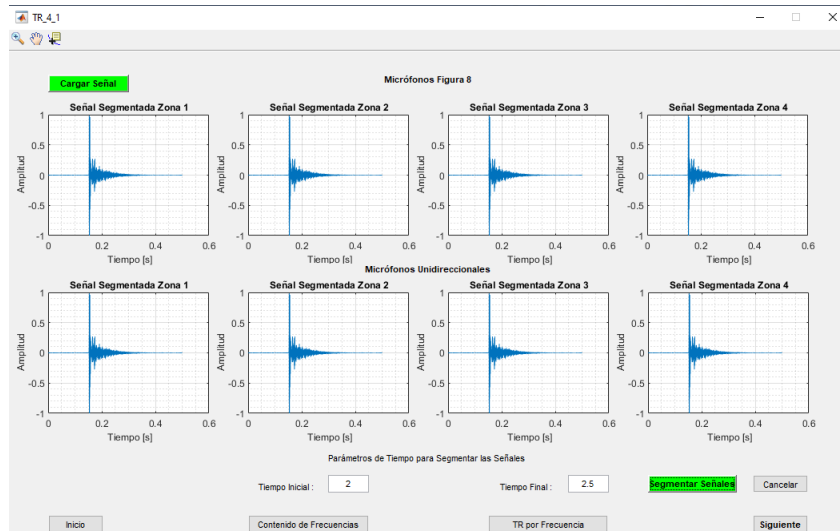


Figura 16. Señal segmentada para el análisis de 4 zonas.

Es necesario enfatizar que el procedimiento establece la segmentación de las señales, para desprestigiar los intervalos de tiempo antes y después del impulso y evitar errores en el programa. En caso de que los valores ingresados no sean los correctos o que el usuario desee corregir los valores, al oprimir el botón *Cancelar* se regresa a la señal original.

Si no hay ningún cambio por realizar se debe presionar el botón *Siguiente*, el cual abrirá una nueva ventana.

Como se puede observar en las imágenes anteriores, en esta ventana aparecen los botones *Contenido de frecuencias* y *Tr por Frecuencia*, los cuales se describen en las siguientes secciones.

### 6.4.3 Contenido de frecuencias

Al presionar el botón *Contenido de Frecuencias*, se abrirá una nueva ventana en la que se observa el espectro de las señales registradas por cada uno de los micrófonos, como se muestra en la Figura 17. Es importante mencionar que la interfaz considera la frecuencia de muestreo, inicialmente proporcionada por el usuario, para mostrar el contenido de frecuencias de las señales. Si se presiona el botón *Cancelar* regresará a la ventana anterior, en caso contrario, de presionar el botón *Siguiente* pasará a la ventana que muestra el decaimiento de la señal en dB.

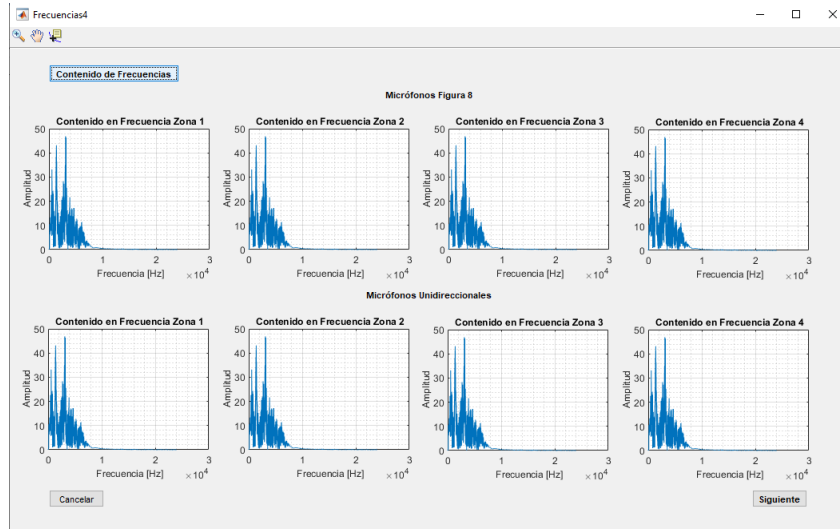


Figura 17. Contenido de frecuencias de la señal.

#### 6.4.4 Filtrado de la señal

En el caso de que el usuario seleccione la opción TR por Frecuencia, Figura 14, se mostrarán las señales segmentadas en el tiempo especificado y posteriormente el usuario podrá elegir alguno de los filtros que se indican en la Figura 18. Estos son filtros pasabanda centrados en la frecuencia que aparece en el botón, con un ancho de banda de 100 Hz. Para el correcto filtrado de la señal, los audios deben de haber sido registrados con una frecuencia de muestreo de 48000 Hz.

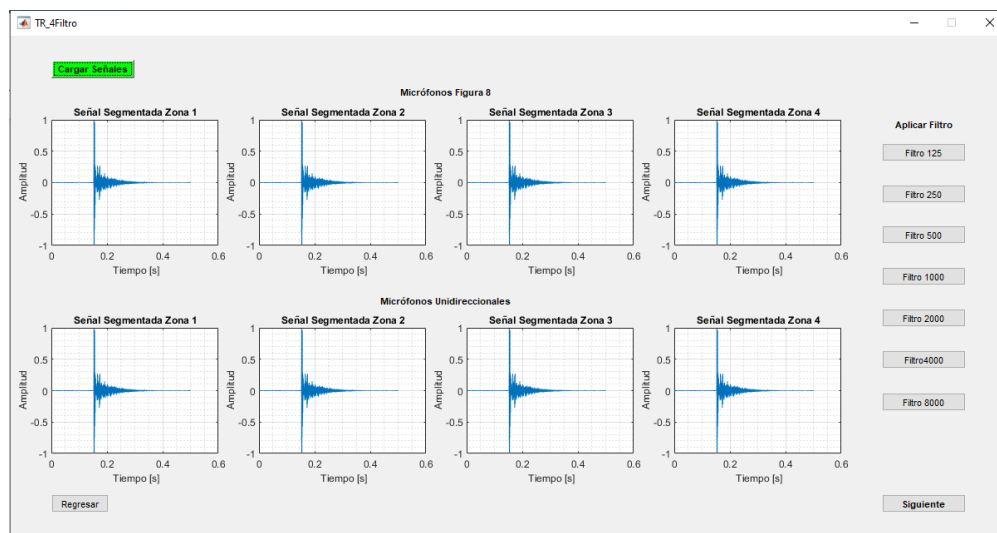


Figura 18. Ventana para aplicar análisis por frecuencia.

La Figura 19 muestra la señal después de aplicar el filtro pasabanda centrado en 2000Hz. Se aprecia que la señal es visiblemente diferente a la original y la escala de amplitud se autoajusta para una mejor apreciación de la señal.

Si se desea aplicar un filtro diferente a la señal es necesario presionar el botón *Cancelar* para regresar a la ventana anterior, en la cual, se deberán volver a ingresar

los parámetros de tiempo para segmentar la señal y así regresar a la señal segmentada.

Cuando se haya aplicado a la señal segmentada el filtro deseado se debe presionar el botón siguiente, que cerrará la ventana actual y abrirá una nueva.

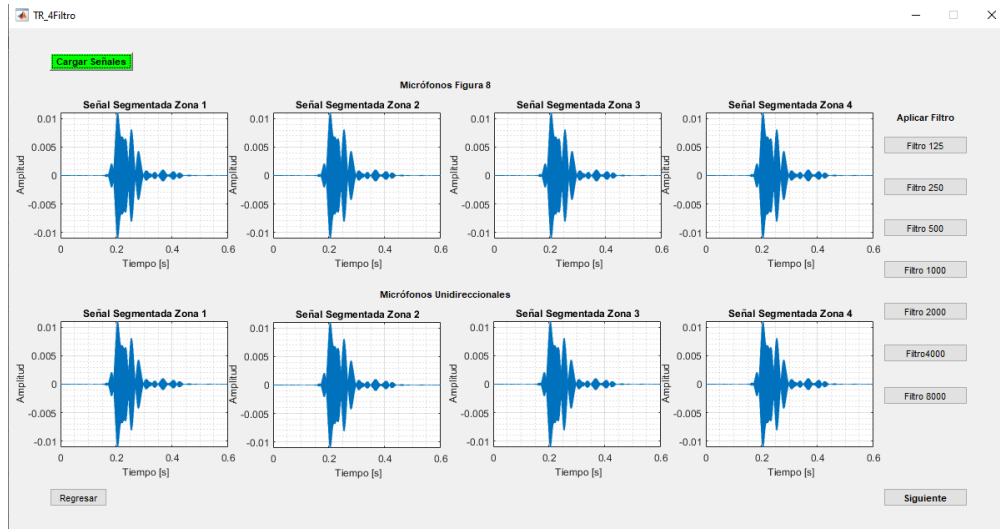


Figura 19. Filtro de 2000Hz aplicado a la señal segmentada.

Estos filtros se diseñaron utilizando la herramienta *fdatool* de Matlab, se puede apreciar en la Figura 20 que seleccionó un filtro pasabanda de respuesta infinita al impulso, de orden mínimo, con frecuencia de muestreo de 48000 Hz, con ancho de banda de 100 Hz centrado en la frecuencia 2000 Hz con atenuación de 80 dB.

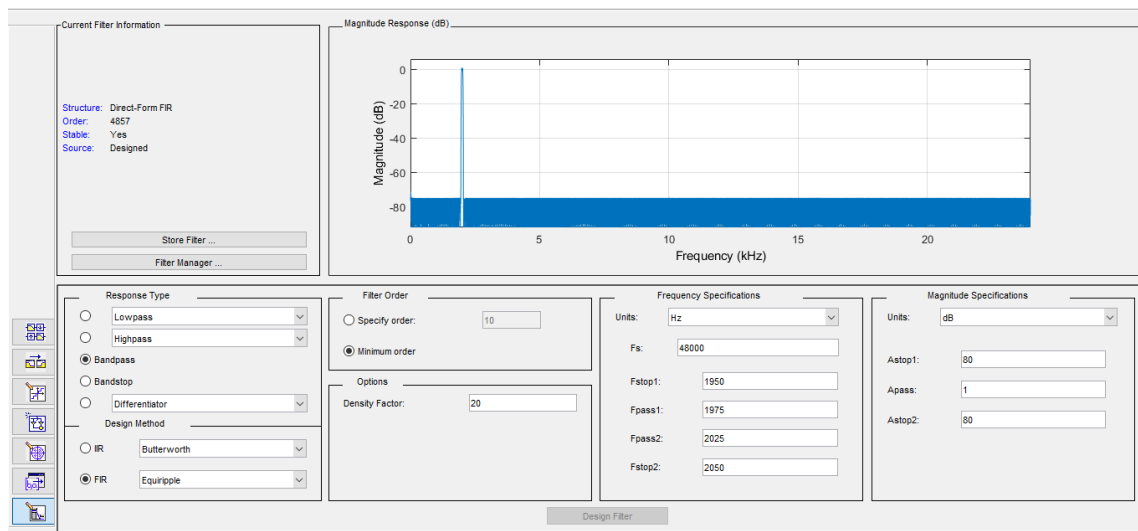


Figura 20. Parámetros para el diseño del filtro pasabanda centrado en 2000Hz.

## 6.4.5 Decaimiento de la señal

Independientemente del análisis aplicado a la señal, se llega a la siguiente ventana mostrada en la Figura 21, en la cual, se debe presionar el botón *Graficar Decaimiento de las Señales*, y posteriormente se debe ingresar el *Tiempo Inicial* y *Tiempo Final*, en cada esquema, para obtener la gráfica del ajuste lineal y observar la diferencia en dB entre estos dos valores de tiempo. Cabe resaltar que la norma establece que para calcular el tiempo de reverberación el decaimiento de la señal sea posterior a los -5 dB. A partir de este tiempo se obtiene un ajuste lineal con los valores para realizar una extrapolación para cuantificar hasta -60 dB. La interfaz fue diseñada con una opción, en la parte superior izquierda, que permite al usuario posicionarse sobre la curva y elegir con precisión los tiempos sobre la curva.

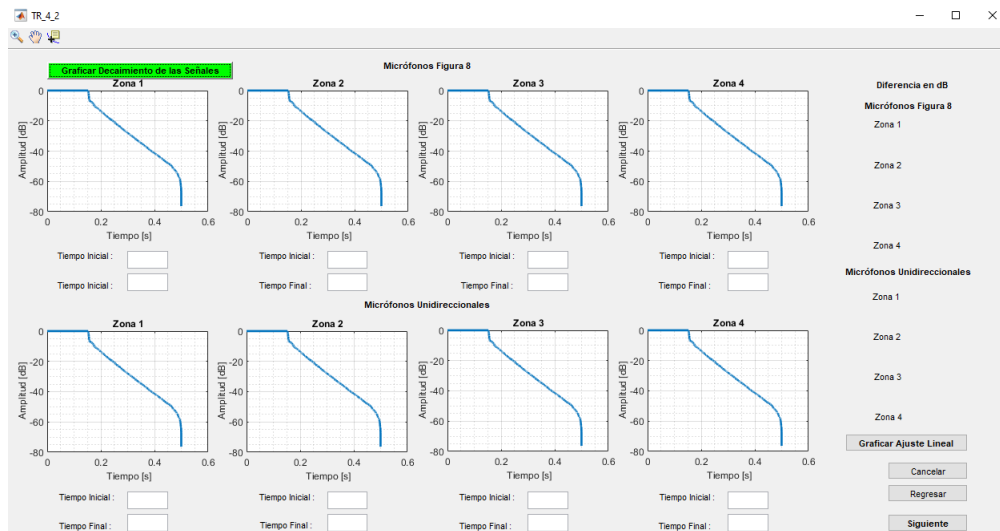


Figura 21. Decaimiento de las señales.

En la Figura 22 se puede apreciar que se seleccionaron tiempos diferentes para cada registro, y al presionar el botón *Graficar Ajuste Lineal* se muestra, en color rojo, la línea recta sobrepuesta que va desde el tiempo inicial hasta el final en cada registro, a su vez, se muestra en la parte derecha de la ventana la diferencia en dB para cada registro.

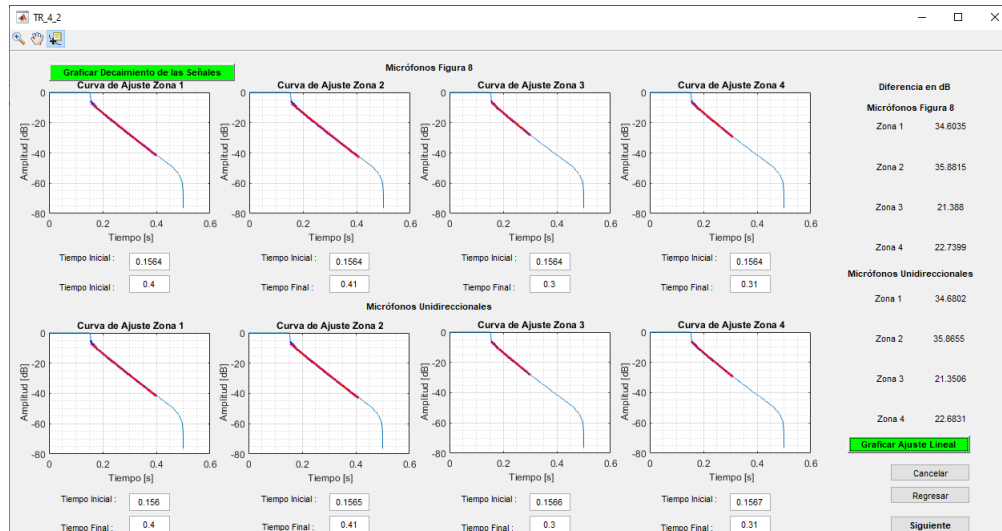


Figura 22. Ajuste lineal y diferencia en dB entre el valor inicial y el valor final.

### 6.4.6 Tiempo de reverberación

En la Figura 23 se muestra la ventana final del programa, donde se calculan los valores de Tiempo de reverberación. Una vez que el usuario presione el botón *Mostrar Valores* se obtiene un promedio considerando todas las zonas evaluadas, es decir, para cada registro de determina el RT5, RT10, RT15, RT20, RT30 y RT60, a partir de la extrapolación de la recta de ajuste lineal y posteriormente se suman los valores de tiempo obtenidos y se dividen entre el número de registros empleados. En la parte inferior de esta ventana aparece la opción *Ingrese el valor para un TR diferente*, esta opción es en caso de que el usuario desee calcular el tiempo de reverberación para un tiempo no indicado en la tabla. Por ejemplo, en caso de que desee calcular el TR40, el usuario deberá ingresar el valor numérico 40 y posteriormente deberá oprimir la opción mostrar valores.



Figura 23. Ventana final, promedio de las cuatro zonas para determinar el tiempo de reverberación.



los casos se analizó únicamente una zona y las señales fueron registradas con una frecuencia de muestreo de 48000 Hz, como se muestra en la Figura 25.

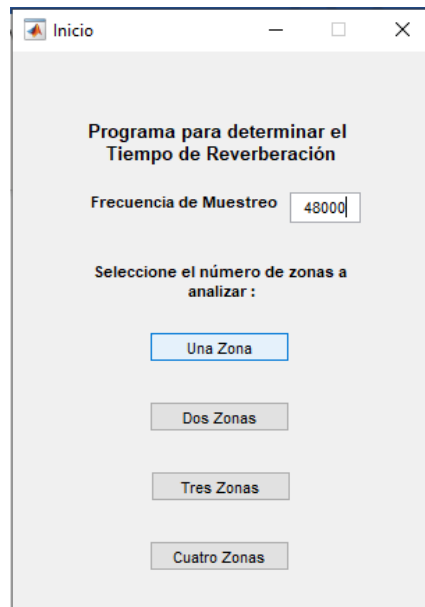


Figura 25. Frecuencia de muestreo y numero de zonas a analizar para realizar las mediciones dentro del salón de clases.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al analizar el salón empleando un globo con circunferencia 46 cm.



Figura 26. Globo 1 con circunferencia de 46 cm.

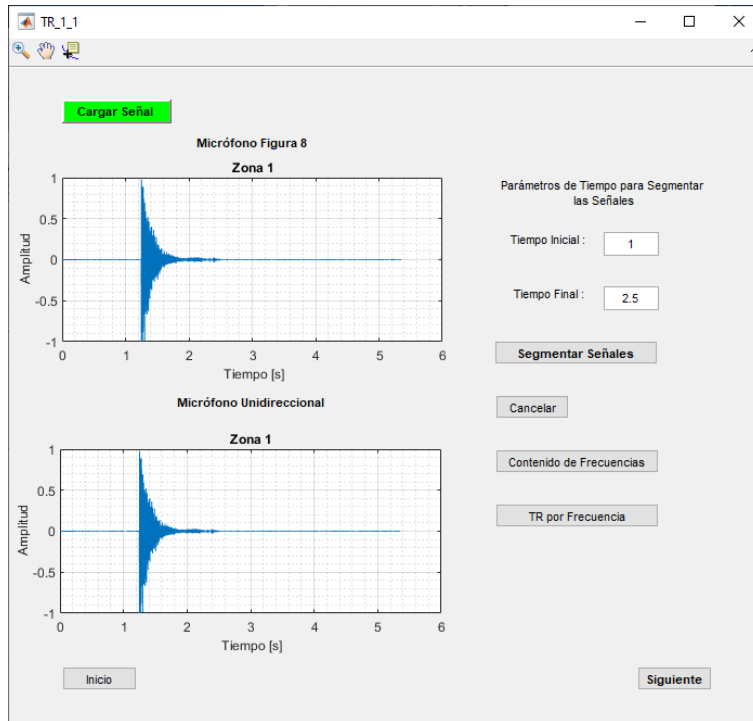


Figura 27. Ruido impulsivo obtenido a partir de la explosión del globo 1.

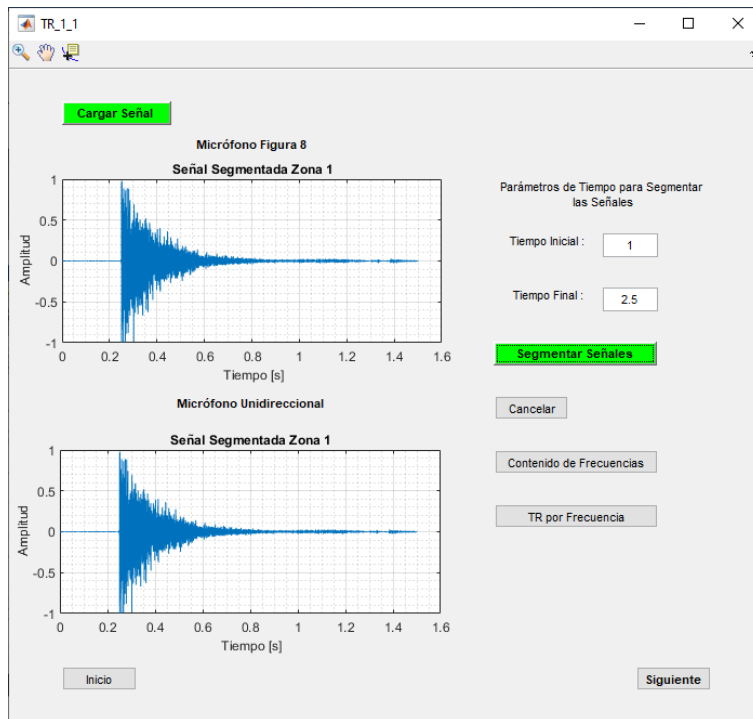


Figura 28. Señal segmentada de la explosión del globo 1.

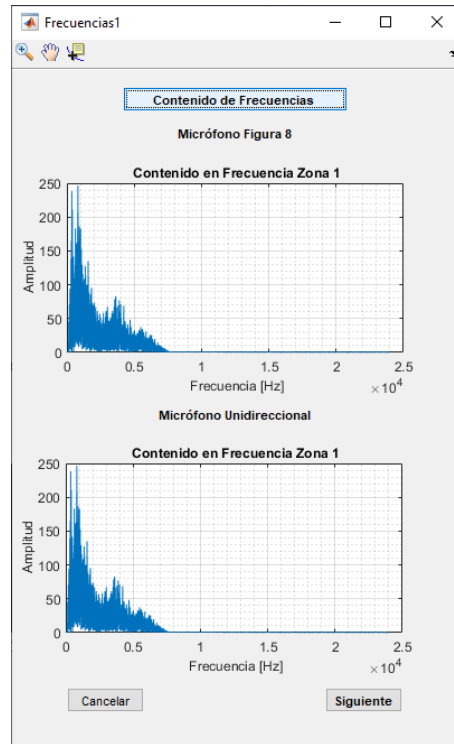


Figura 29. Contenido de frecuencias de la señal segmentada de la explosión del globo 1.

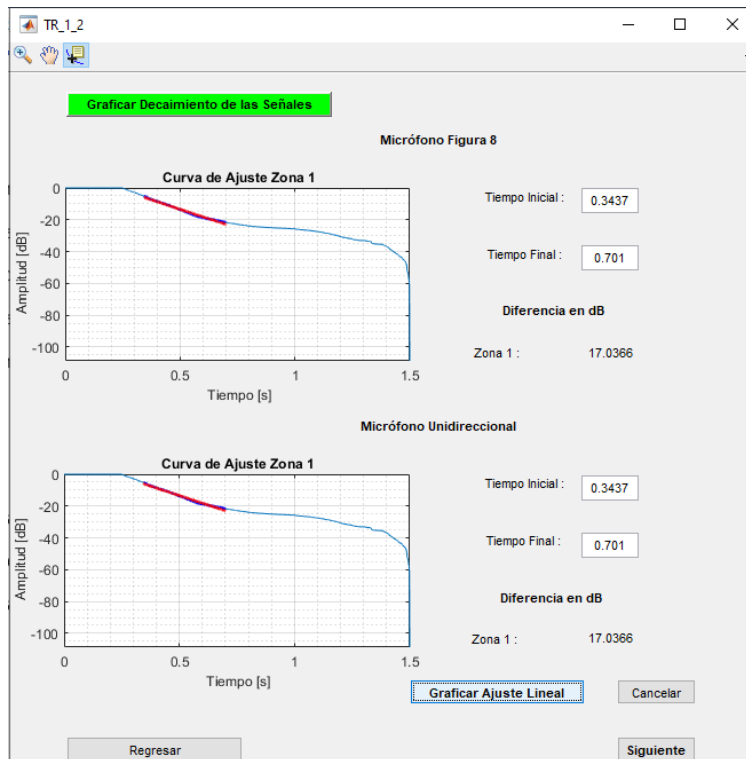


Figura 30. Decaimiento de la señal, curva de ajuste y diferencia en dB de la señal segmentada de la explosión del globo 1.



Figura 31. Promedio del tiempo de reverberación obtenido por la explosión del globo 1.

La segunda medición se realizó empleando un globo con circunferencia de 42 cm.



Figura 32. Globo 2 con circunferencia de 42 cm.

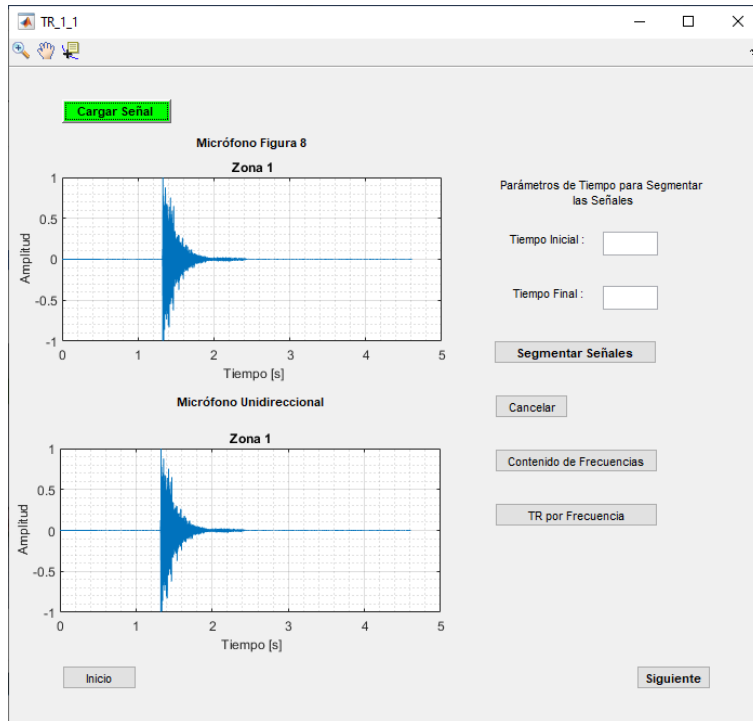


Figura 33. Ruido impulsivo obtenido a partir de la explosión del globo 2.

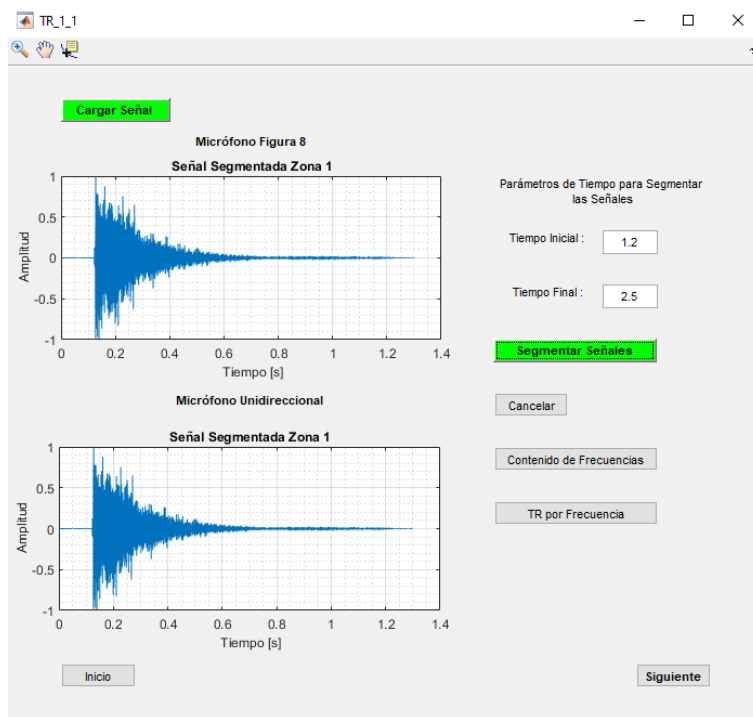


Figura 34. Señal segmentada de la explosión del globo 2.

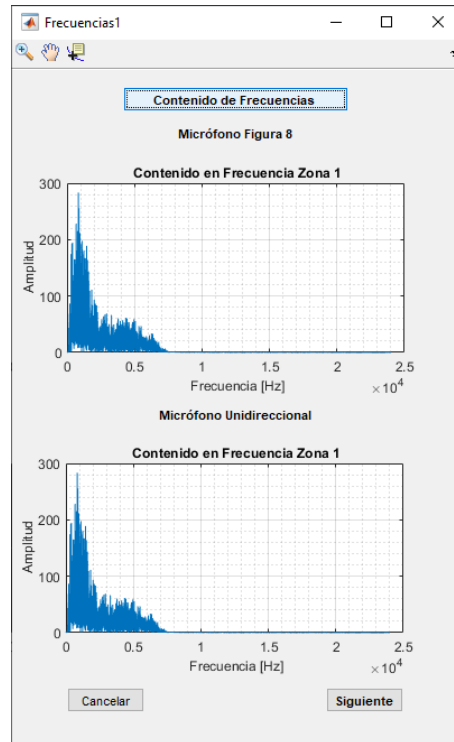


Figura 35. Contenido de frecuencias de la señal segmentada de la explosión del globo 2.

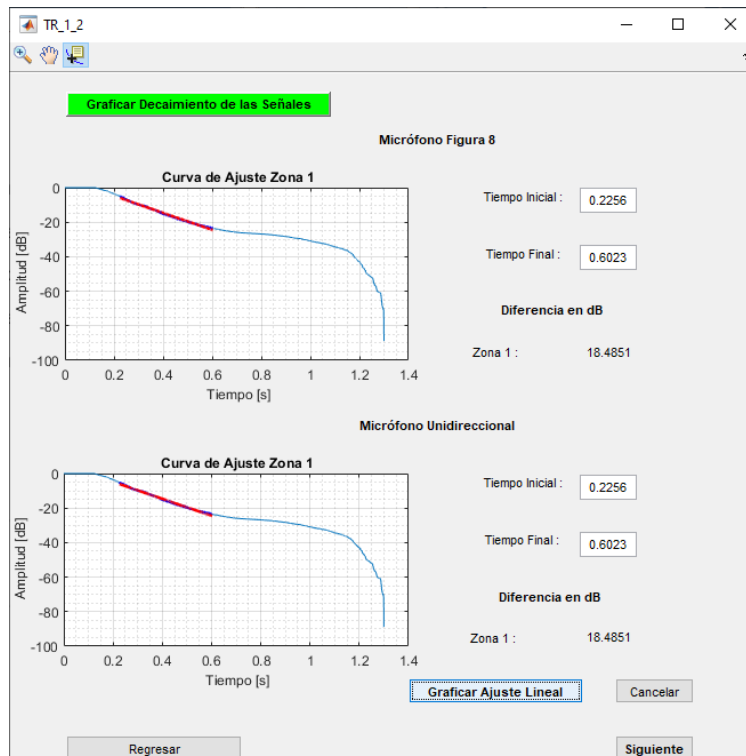


Figura 36. Decaimiento de la señal, curva de ajuste y diferencia en dB de la señal segmentada de la explosión del globo 2.



Figura 37. Promedio del tiempo de reverberación obtenido por la explosión del globo 2.

Se empleó un tercer globo con una circunferencia de 39 cm para realizar la tercera medición, obteniendo los siguientes resultados.



Figura 38. Globo 3 con circunferencia de 39 cm.

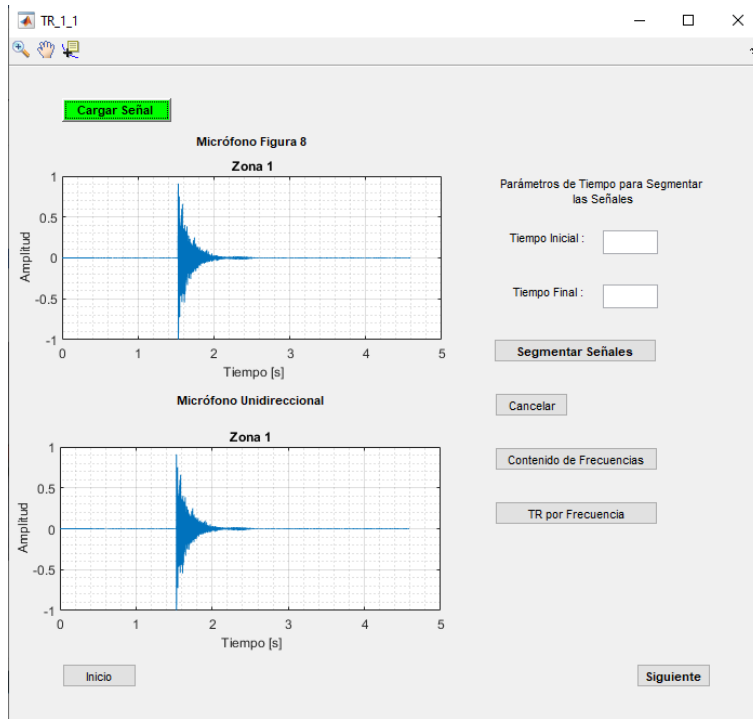


Figura 39. Ruido impulsivo obtenido a partir de la explosión del globo 3.

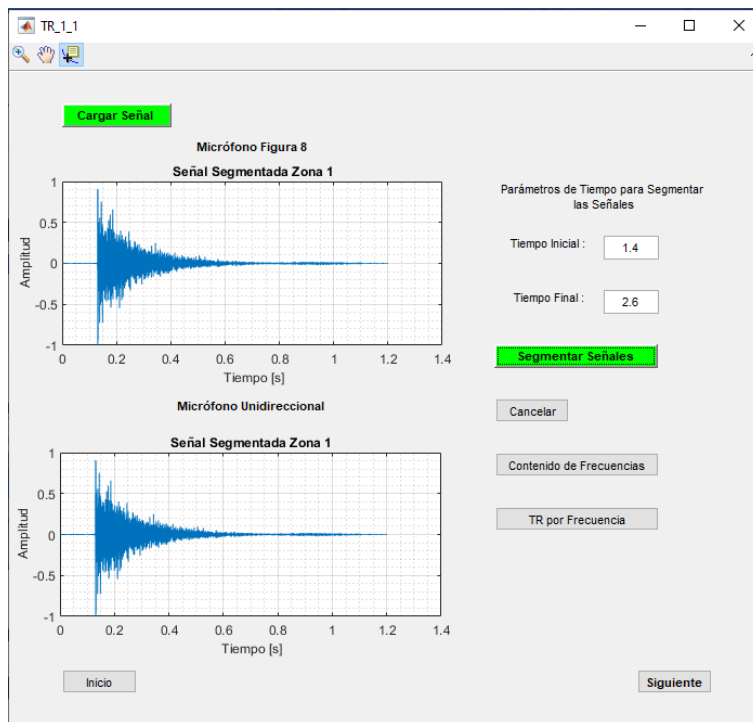


Figura 40. Señal segmentada de la explosión del globo 3.

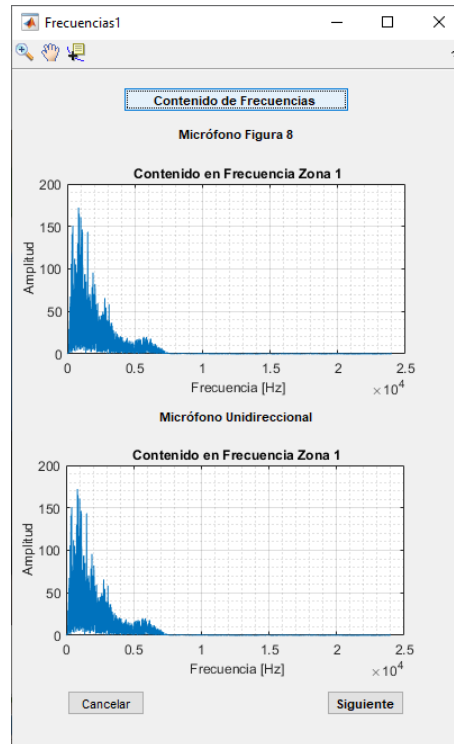


Figura 41. Contenido de frecuencias de la señal segmentada de la explosión del globo 3.

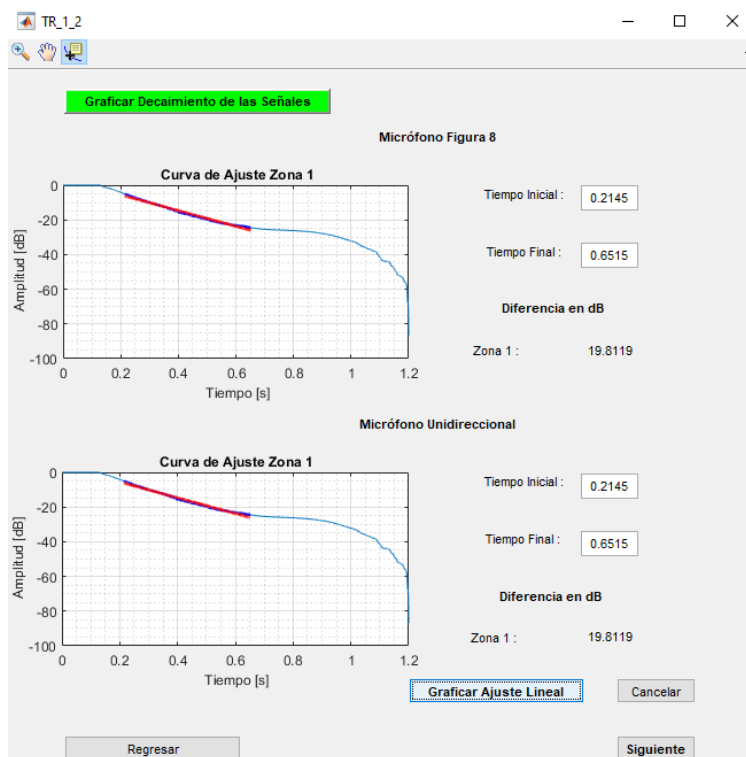


Figura 42. Decaimiento de la señal, curva de ajuste y diferencia en dB de la señal segmentada de la explosión del globo 3.



Figura 43. Promedio del tiempo de reverberación obtenido por la explosión del globo 3.

Finalmente, se empleó un globo con circunferencia de 92 cm para realizar la última medición.



Figura 44. Globo 4 con circunferencia de 92 cm.

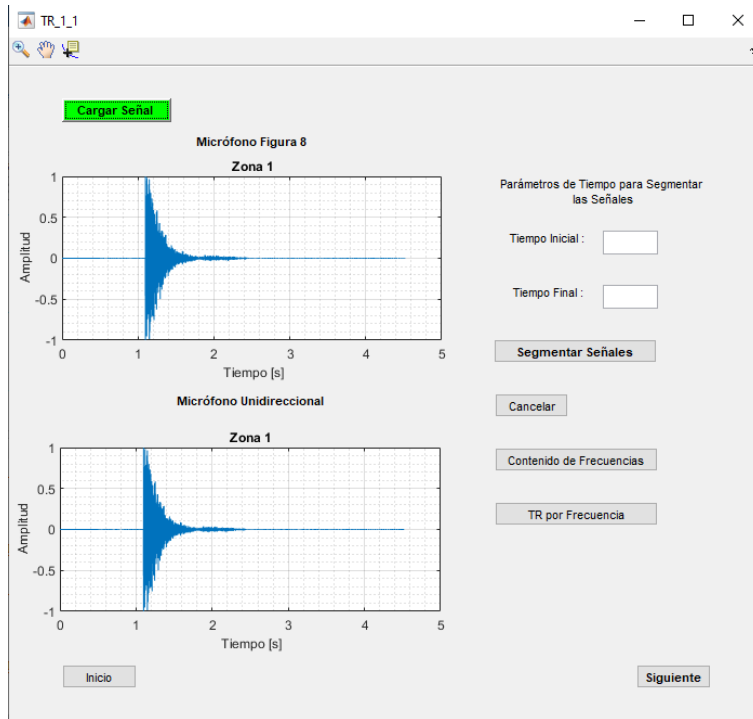


Figura 45. Ruido impulsivo obtenido a partir de la explosión del globo 4.

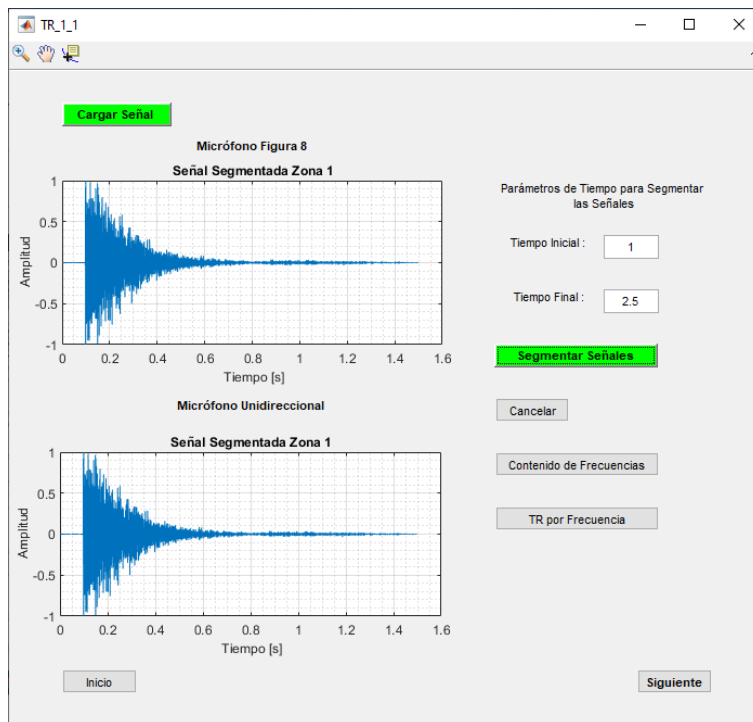


Figura 46. Señal segmentada de la explosión del globo 4.

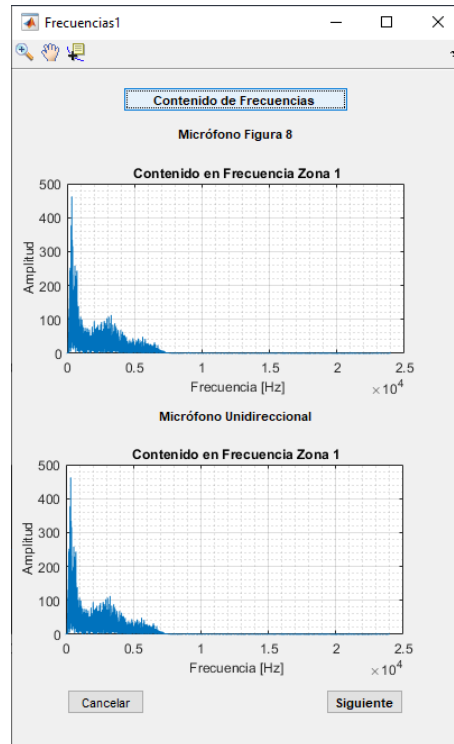


Figura 47. Contenido de frecuencias de la señal segmentada de la explosión del globo 4.

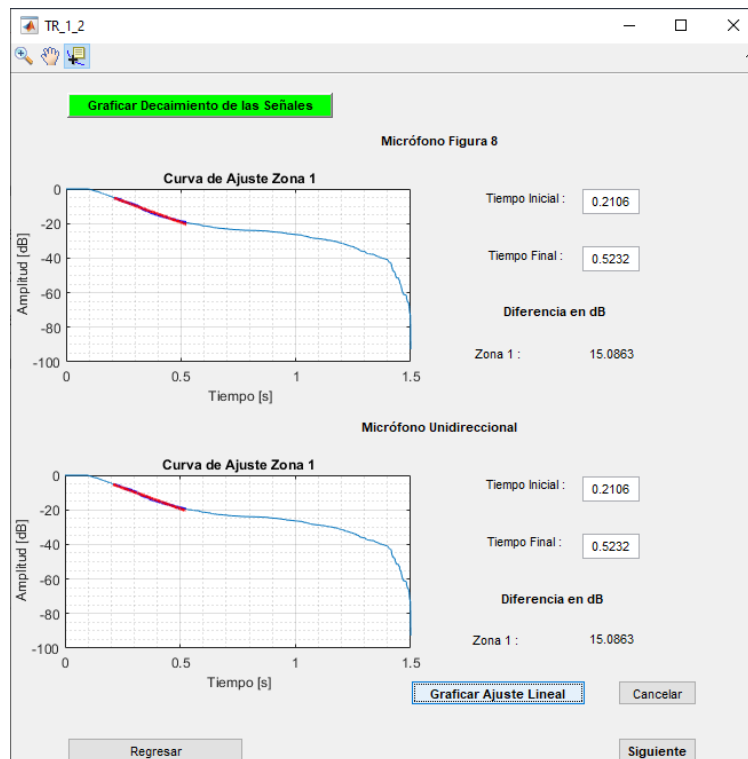


Figura 48. Decaimiento de la señal, curva de ajuste y diferencia en dB de la señal segmentada de la explosión del globo 4.



Figura 49. Promedio del tiempo de reverberación obtenido por la explosión del globo 4.

Tabla 3. Valores de tiempo de reverberacion obtenidos en el salon de clases analizado.

Circunferencia del globo [cm]	TR60 [s]
46	1.2584
42	1.2228
39	1.3235
92	1.2433

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al determinar el tiempo de reverberación de la cámara semianecoica, cuyas dimensiones son: 6.27 m de largo, 2.33 m de ancho y 2.83 m de altura, dando un volumen de 41.34 m<sup>3</sup>.

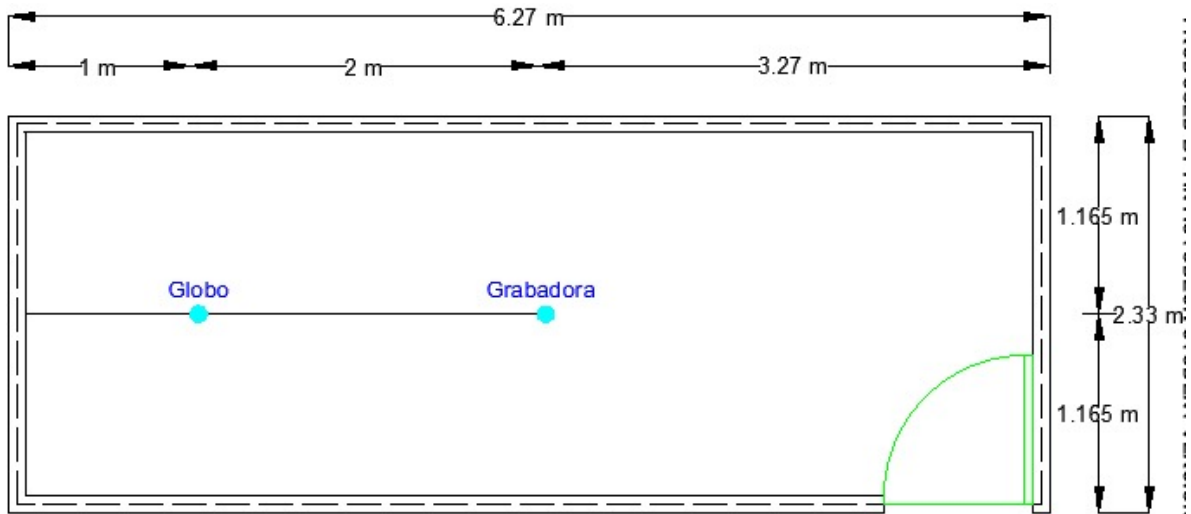


Figura 50. Esquema de la cámara semianecoica.

Empleando el globo de la Figura 7, como fuente de ruido impulsivo, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 49, Figura 50, Figura 51 y Figura 52.

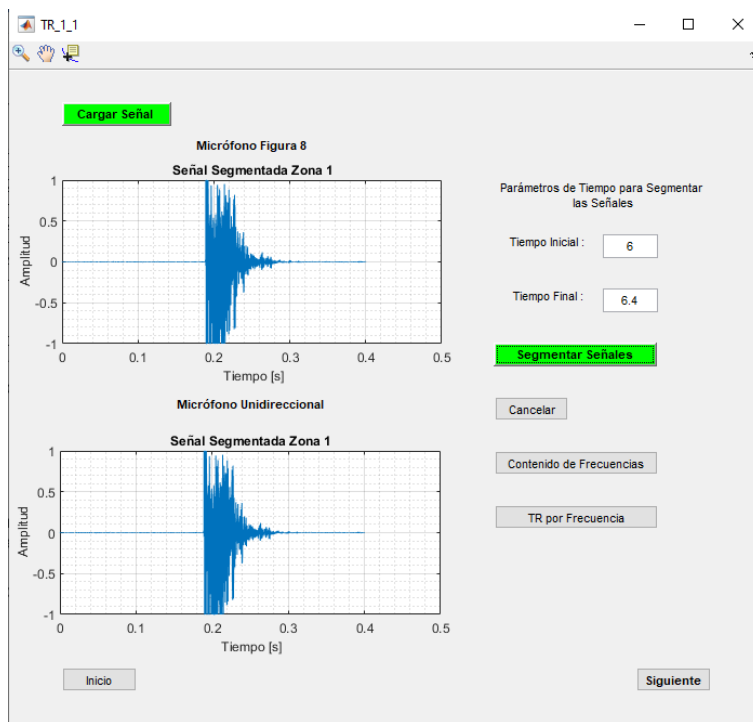


Figura 51. Señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 7.

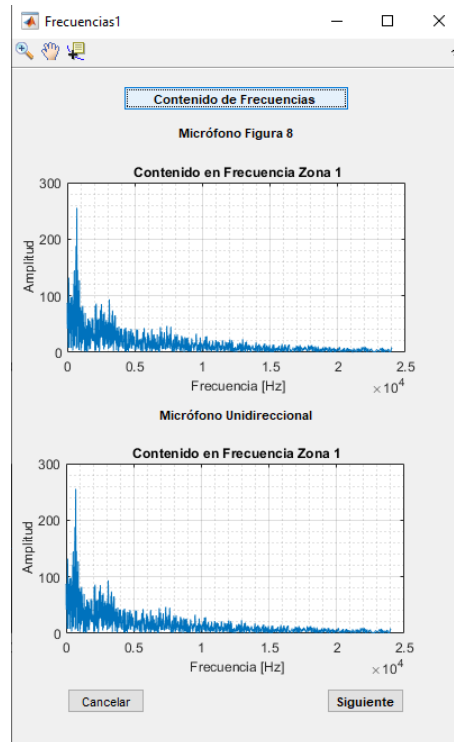


Figura 52. Contenido de frecuencias de la señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 7.

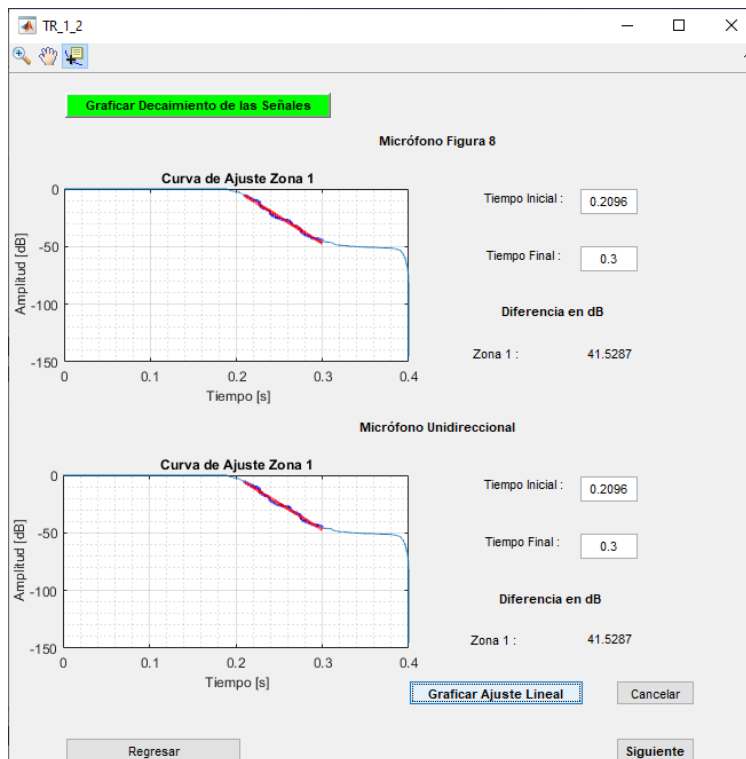


Figura 53. Decaimiento de la señal, curva de ajuste y diferencia en dB de la señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 7.



Figura 54. Promedio del tiempo de reverberación obtenido por la explosión del globo de la Figura 7.

Se realizó una segunda medición, utilizando como fuente de ruido impulsiva el globo de la Figura 9. En la Figura 53, Figura 54, Figura 55, Figura 56 se muestran los resultados.

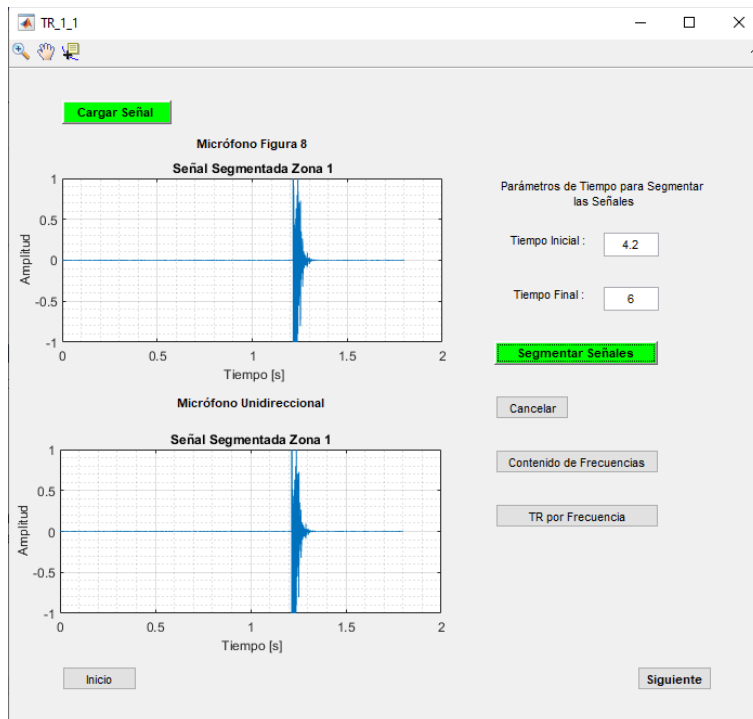


Figura 55. Señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 9.

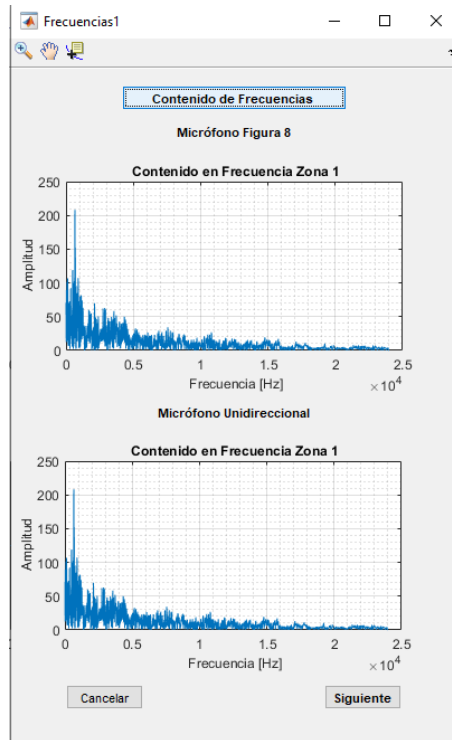


Figura 56. Contenido de frecuencias de la señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 9.

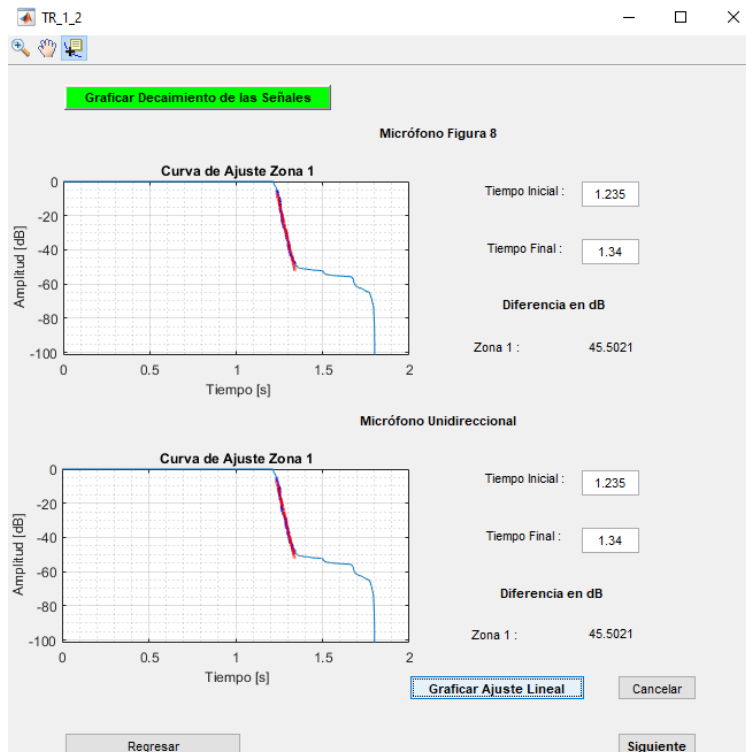


Figura 57. Decaimiento de la señal, curva de ajuste y diferencia en dB de la señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 9.



Figura 58. Promedio del tiempo de reverberación obtenido por la explosión del globo de la Figura 9.

En la Figura 57, Figura 58, Figura 59 y Figura 60 se muestran los resultados obtenidos, en una tercera medición realizada, empleando el globo de la Figura 11 como fuente de ruido impulsiva.

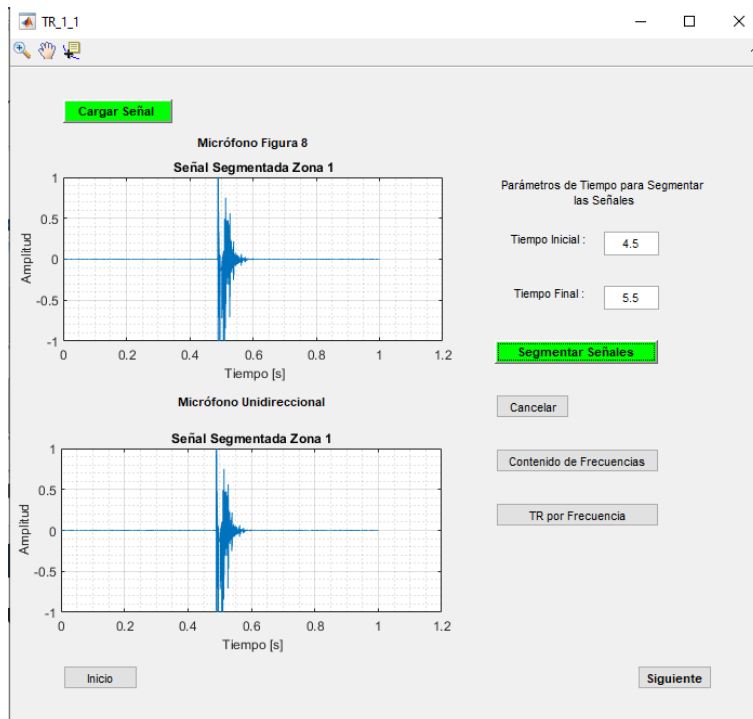


Figura 59. Señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 11.

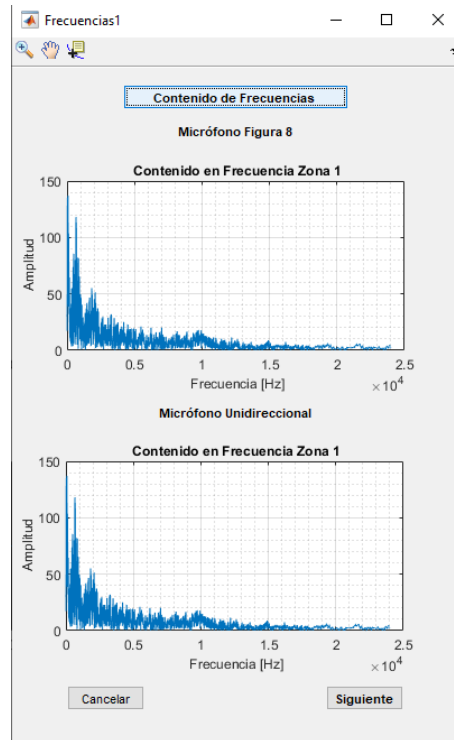


Figura 60. Contenido de frecuencias de la señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 11.

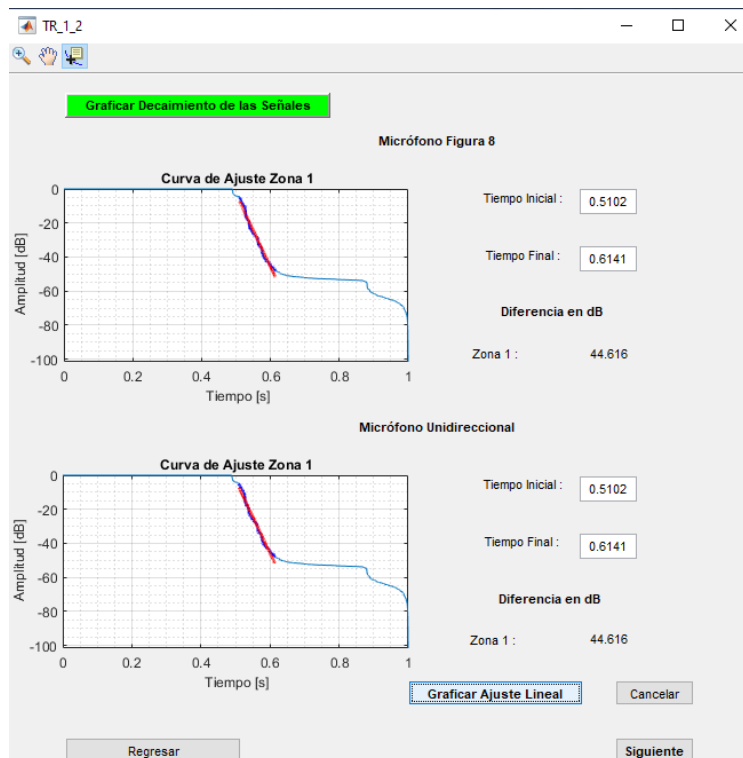


Figura 61. Decaimiento de la señal, curva de ajuste y diferencia en dB de la señal segmentada de la explosión del globo de la Figura 11.



Figura 62. Promedio del tiempo de reverberación obtenido por la explosión del globo de la Figura 11.

Tabla 4. Valores de tiempo de reverberacion obtenidos en la camara semianecoica.

Globo empleado	TR60 [s]
Figura 7	0.1306
Figura 9	0.1385
Figura 11	0.1398

## 7.1 Discusión de resultados

Retomando los valores de tiempo de reverberación recomendado para un aula de clase cuyo volumen es menos a  $200 \text{ m}^3$  de la Tabla 1, se considera que el RT60 debería ser aproximadamente de 0.4 a 0.6 segundos.

Sin embargo, se realizaron cuatro mediciones para determinar el tiempo de reverberación en un salón de clases a nivel preescolar, empleando la técnica de respuesta impulsiva integrada. Para realizar las primeras tres mediciones se emplearon globos con volumen aproximado, con circunferencia de 46 cm, 42 cm y 39 cm obteniendo los valores de RT60 de 1.2584 segundos, 1.2228 segundos y 1.3235 segundos, respectivamente. A partir de estos valores de tiempo se determinó el promedio, obteniendo el valor de 1.2682 segundos, para finalmente compararlo con una última medición realizada utilizando un globo con volumen mayor, de circunferencia igual a 92 cm. El RT60 obtenido a partir del análisis de la explosión de este globo es de 1.2433 segundos, un valor muy aproximado al promedio obtenido de las tres mediciones anteriores.

Con esto, destaca que sin importar el tamaño del globo empleado para determinar el RT60 de esta aula, el valor experimental está muy por arriba del valor recomendado para las aulas de clase de este volumen.

La razón por la cual el valor experimental obtenido es más elevado al recomendado es porque las superficies de este salón de clases son muy reflejantes, a continuación, se presenta una foto del salón evaluado.



*Figura 63. Salón de clases empleado para el análisis.*

Las superficies lisas como pizarras, paredes de cristal y las obligatorias mesas de trabajo reflejan el sonido con especial intensidad y, por lo tanto, aumentan el tiempo de reverberación, lo que reduce la inteligibilidad de la voz.

Dado se desea conservar la entrada de luz natural y la ventilación, no es posible cubrir, realizar adecuaciones o cambiar las amplias ventanas de vidrio y, debido a que este es un salón de clases de jardín de niños, no es recomendable colocar

alfombras o tapetes en el piso, ya que requieren de constante limpieza o mantenimiento. La alternativa más viable es colocar paneles acústicos en el techo del salón, de esta manera las paredes quedan libres para colocar materiales didácticos, en caso de ser necesario.

Para comprobar el correcto funcionamiento de la interfaz gráfica diseñada, así como la correcta implementación de la técnica, se determinó el tiempo de reverberación de la cámara semianecoica empleada para determinar el rango de frecuencias alcanzado por el impulso acústico. El tiempo de reverberación establecido para esta cámara es de 0.08 segundo, sin embargo, al tener mobiliario dentro de ella este valor aumenta a aproximadamente 0.1 segundos. Los tiempos de reverberación medidos a partir de la explosión de los globos de la Figura 7, Figura 9 y Figura 11 son de 0.1306 segundos, 0.1385 segundos y 0.1398 segundos, respectivamente. El promedio de las tres mediciones efectuadas es 0.1363 segundos, valor muy aproximado a los 0.1 segundos esperados, con lo cual se puede deducir que la interfaz opera correctamente y que se implementó la técnica de respuesta impulsiva integrada adecuadamente.

Cabe mencionar que uno de los objetivos específicos establece comparar los tiempos de reverberación implementando la metodología en diez salones. Sin embargo, debido a la situación de contingencia que se vivió en México, en el año 2020, solo se llevó a cabo la medición de un salón de clases a nivel preescolar, al cual se tuvo acceso manteniendo todas las medidas sanitarias. Cabe resaltar que la metodología implementada en este proyecto puede ser aplicada a cualquier espacio cerrado para determinar el tiempo de reverberación.

## **8. Conclusiones**

Se diseñó una interfaz gráfica que permite caracterizar cualquier espacio cerrado, para determinar su tiempo de reverberación, empleando una señal de ruido impulsivo. Dicha interfaz permite analizar una, dos, tres o hasta cuatro zonas simultáneamente, además, el usuario tiene la opción de ingresar parámetros para seleccionar las zonas de interés según su criterio y requerimientos. Lo que la convierte en una alternativa muy flexible en función de las necesidades del análisis.

Los resultados fueron comparados con un recinto, cámara semianecoica, en el cual el tiempo de reverberación es aproximadamente 0.1. Para ello se realizó la caracterización de la fuente de ruido impulsivo dentro de la cámara semianecoica ubicada en el Laboratorio de Diseño Acústico de la División de Ciencias y Artes para el Diseño de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco para determinar el rango de frecuencias alcanzado por la explosión de un globo.

Finalmente, se determinó experimentalmente el tiempo de reverberación de un salón de clases de un jardín de niños, empleando la técnica de respuesta impulsiva integrada. Esto se logró a partir del análisis de un ruido impulsivo, generado a partir de la explosión de cuatro globos dentro del recinto mencionado, empleando la interfaz gráfica diseñada. Lo más significativo de las mediciones realizadas en esta aula de clases es que, sin importar el tamaño del globo empleado para la generación del ruido impulsivo, el tiempo de reverberación medido en el recinto es mucho mayor al recomendado para este tipo de recintos.

## 9. Referencias bibliográficas

- [1] Aspectos Básicos del sonido y el ruido. Recuperado el 18 de Enero de 2019 [Online]. Available: [http://gcastro.webs.uvigo.es/PFC/Capitulo\\_uno.htm](http://gcastro.webs.uvigo.es/PFC/Capitulo_uno.htm)
- [2] A. Plazola. *Enciclopedia de arquitectura Plazola, Volumen 10*. Plazola Editores, 1994
- [3] Souza E. (2019, Abril 11) Claves para mejorar la acústica en la arquitectura: absorción y difusión del sonido. Recuperado el 20 de Septiembre de 2020 [Online] Available: <https://www.archdaily.mx/mx/914856/claves-para-mejorar-la-acustica-en-la-arquitectura-absorcion-y-difusion-del-sonido>
- [4] Proyecto de teatro polifuncional para la ciudad de H. Caborca, Sonora. Mayra Alejandra Rodríguez Covarrubias. Recuperado el 18 de Enero de 2019 [Online]. Available: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22219/Anexo.pdf>
- [5] INERCO (2012, Noviembre 27) Tiempo de reverberación. Recuperado el 18 de Enero de 2019 [Online]. Available: <https://www.inercoacustica.com/acustipedia/item/426-tiempo-de-reverberacion>
- [6] A. Carrión. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Primera edición. Barcelona: Edicions UPC, 1998.
- [7] B. V. Toledo, "Medición del tiempo de Reverberación en un Modelo a Escala Urbano" Proyecto de integración de Ingeniería Física, Ciencias Básicas e Ingeniería, UAM. Ciudad de México, México, 2017.
- [8] Boschi C. (2008, Octubre) Método para medir el tiempo de reverberación en recintos. Recuperado el 21 de Septiembre de 2020 [Online] Available: [http://www1.frm.utn.edu.ar/laboratoriodeacustica/Metodo\\_experimental\\_para\\_medir\\_el\\_TR60.pdf](http://www1.frm.utn.edu.ar/laboratoriodeacustica/Metodo_experimental_para_medir_el_TR60.pdf)
- [9] NTI Audio (2010, Enero 23) Medición del tiempo de reverberación RT60. Recuperado el 16 de Noviembre de 2020 [Online]. <https://www.nti-audio.com/es/aplicaciones/acustica-de-salas-y-edificios/medicion-del-tiempo-de-reverberacion-rt60#What-is-reverberation-time>
- [10] Royo J. (2012, Octubre 02). La importancia del tiempo de reverberación en las aulas. Recuperado el 10 de Febrero de 2020 [Online] Available: <http://www.viviendoelsonido.com/foros/post/983/la-importancia-del-tiempo-de-reverberacion-en-las-aulas>
- [11] Asociación Argentina de Mecánica Computacional. (2013, Noviembre 19) Base de datos de coeficientes de absorción sonora de diferentes materiales. Recuperado el 16 de Noviembre de 2020 [Online] Available: <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/download/4527/4456>

## 10. Entregables

En este proyecto se hizo la entrega al Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico de la División de Ciencias y Artes para el Diseño del manual de operación del equipo, Zoom F8, para el registro de señales acústicas, así como de la interface para el procesamiento de datos, con el cual se determina el tiempo de reverberación en un recinto. Tal como se muestra en la Figura 64 – 69.

### Micrófonos Figura 8



Zona 4    Zona 3    Zona 2    Zona 1

Figura 64. Conexiones destinadas para los micrófonos de Figura 8.

### Micrófonos Unidireccionales



Zona 5    Zona 6    Zona 7    Zona 8

Figura 65. Conexiones destinadas para los micrófonos de Unidireccionales.

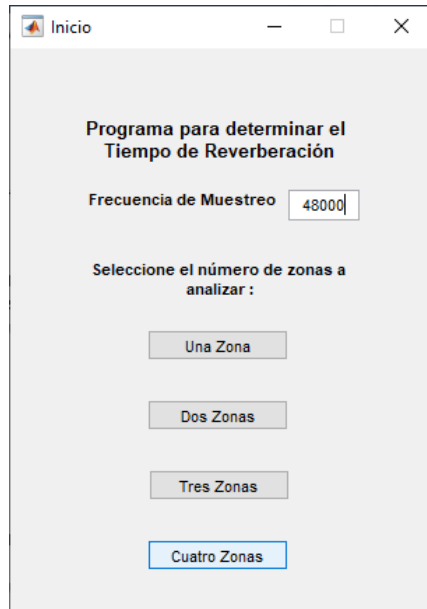


Figura 66. Ventana de Inicio.

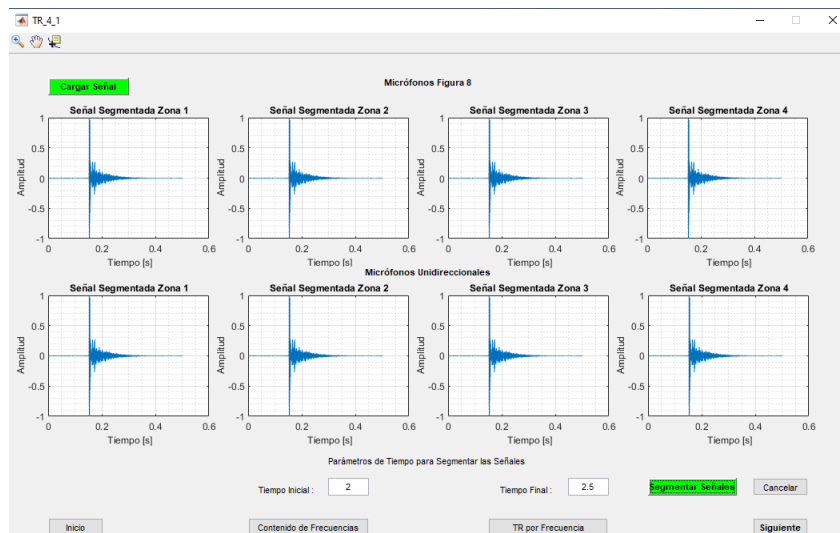


Figura 67. Señal segmentada para el análisis de 4 zonas.

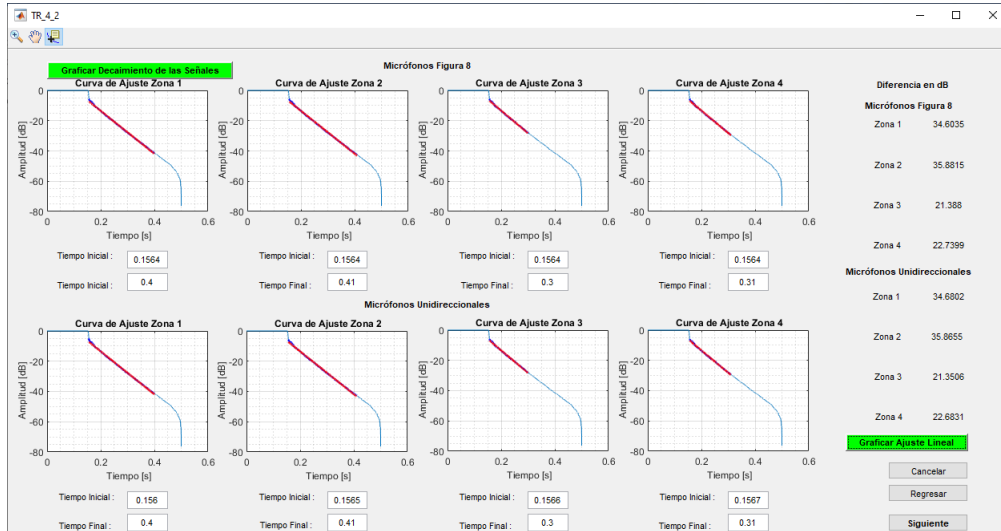


Figura 68. Ajuste lineal y diferencia en dB entre el valor inicial y el valor final.



Figura 69. Ventana final, promedio de las cuatro zonas para determinar el tiempo de reverberación.