



---

# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Unidad Profesional "Adolfo López Mateos".

"MÉTODO ACÚSTICO PARA LA DETECCIÓN DE GRIETAS Y  
FISURAS NO VISIBLES EN RECINTOS CERRADOS."

Para Obtener el Título de:

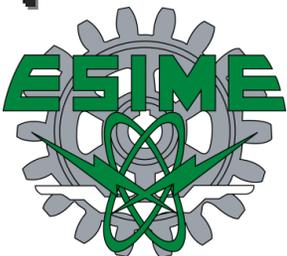
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Presenta:

Ing. E. Blanca Dalia Volantin Trejo

Asesor:

Dr. Francisco Javier Gallegos Funes



Ciudad de México a 8 de noviembre del 2018.



---

## Resumen

En los últimos años, movimientos telúricos de grandes intensidades han dejado graves afectaciones en edificaciones de diversas partes del mundo. Por lo que es necesario desarrollar métodos que permitan la evaluación de las estructuras antes de que vuelvan a ser habitadas, ya que pueden encontrarse dañadas con grietas o fisuras que no son visibles y que representan riesgo para la población debido a que la edificación podría estar en riesgo de colapso. De tal manera, es necesario estudiar y proponer nuevos métodos de evaluación de estructuras que permitan evitar pérdidas humanas.

México, por su ubicación geográfica se encuentra dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, el cual, con frecuencia presenta sismos de intensidad considerable causados, por lo general, por deslizamientos que presenta la Placa de Cocos por debajo de la placa de Norteamérica. Son de importancia los daños que han ocasionado los sismos ocurridos el 19 y 21 de septiembre de 1985 y el 19 de septiembre del 2017.

Posterior a los eventos sísmicos, las edificaciones pueden tener fisuras y grietas que no son perceptibles a simple vista, por lo que puede haber la posibilidad de que éstas se colapsen, por lo que se propone un método acústico que detecte grietas y fisuras no visibles al ojo humano en recintos cerrados de todo tipo de geometría y tamaño. De tal manera, durante el desarrollo de esta tesis se realizará lo siguiente:

Se diseñarán y construirán tres cabinas de pruebas: a) para condiciones óptimas, b) para simulación de grietas y c) para simulación de fisuras.

Se calculará el tiempo de reverberación de la cabina en condiciones óptimas por medio de tres métodos: Sabine, Eyring y Millington Sette, para demostrar que la cabina se comporta como un recinto real considerando un aislamiento y acondicionamiento acústico adecuados.

Se medirá con la aplicación Rev Meter Pro con iOS 11 del iPhone 6s el tiempo de reverberación de la cabina en condiciones óptimas y se comparará con el tiempo de reverberación calculado para observar las variaciones entre ambos métodos y comprobar si es viable el uso de las cabinas de prueba.



---

Se realizarán mediciones de los niveles de presión del sonido con un sonómetro en cada una de las cabinas de prueba para detectar posibles variaciones. Se medirán con la aplicación Sound Meter con iOS 11 del iPhone 6s los niveles de sonido y se compararán los resultados con los obtenidos con el sonómetro para observar si existe similitud entre éstas.

El método propuesto se comprobará mediante trabajo de campo, primeramente, con las mediciones realizadas en el laboratorio de señales y sistemas de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, y en una habitación con ambiente controlado en donde se generarán alteraciones que sustituyen a las grietas en diferentes tamaños.

Finalmente, se presentará un método de acceso fácil e inmediato a la mayoría de las personas, el cual permita valorar las condiciones de un recinto posterior a un evento telúrico, para evitar el riesgo de habitarlo y que posteriormente se colapse. El método puede ser probado por medio de un teléfono inteligente que tenga una aplicación de sonómetro y en recintos caracterizados (medidos y con un rango de niveles de sonido constante), ya que existen métodos que utilizan equipos costosos y sofisticados, y en cambio, en este trabajo se utilizará solo la variación del sonido para detectar alguna grieta o fisura en cualquier recinto cerrado.



---

## Abstract

In recent years, very intense telluric events have caused damage to buildings in various parts of the world. Thus, it is necessary to develop methods that allow the evaluation of the structures before they are inhabited again. Since they can be damaged with cracks or fissures which are not visible and represent a risk for the population due to the building could be at risk of collapse. In this way, it is necessary to study and propose new evaluation methods of structures which allow to avoid human losses.

Due to Mexico's geographical location, It's located within the Pacific Ring of Fire, which often presents earthquakes of considerable intensity. They are usually caused by landslides that the Cocos Plate presents below the North American plate. The earthquakes damages which took place on September 19<sup>th</sup>, 21<sup>st</sup> in 1985 September 19<sup>th</sup> in 2017, are extremely important.

After these seismic events, buildings may have fissures and cracks that are not visible to the naked eye. Consequently the possibility of collapse may occur. For this reason an acoustic method is proposed, It detects cracks and fissures that are not visible to the human eye in enclosures of all types of geometry and size. In such a way, the following steps will be done during the development of this thesis.

Three test cabins will be designed and built: for optimal conditions and crack.

The reverberation time of the cabin will be calculated in optimal conditions by three methods that are, Sabine, Eyring and Millington Sette. Inorder to demonstrate that the cabin behaves like a real enclosure taking in consideration the isolation, and appropriate acoustic conditioning.

It will be measured with the application Rev Meter Pro with iOS 11 of the iPhone 6s the reverberation time of the cabin in optimal conditions and will be compared with the calculated reverberation time to observe the variations between both methods and check if the use of the cabins is viable test.



---

Measurements of sound pressure levels will be made with a sound level meter in each of the test cabins to detect possible variations. The sound levels will be measured with the Sound Meter application with iOS 11 of the iPhone 6s and the results will be compared with those obtained with the sound level meter to observe if there is similarity between them.

The proposed method will be verified through fieldwork, firstly, with the measurements made in the Signal and Systems Laboratory of the Postgraduate Studies and Research Section of the Zacatenco School of Mechanical and Electrical Engineering, and in a room with an controlled environment where alterations that replace the cracks in different sizes will be generated.

Finally, a method of easy and immediate access to most people will be presented, which allows assessing the conditions of an enclosure after a telluric event, to avoid the risk of inhabiting it and subsequently collapsing. The method can be tested by means of a smartphone that has a sound level meter application and in characterized rooms (measured and with a range of constant sound levels), since there are methods that use expensive and sophisticated equipment, and instead, in This work will only use the variation of the sound to detect any crack or fissure in any enclosure.



## Agradecimientos

Agradezco a Jesucristo por permitirme obtener un logro más en mi vida el cual puedo compartir con mi familia, por haber puesto en mi camino a tantos ángeles terrenales que quitaron las piedras del camino, me pongo en tus manos como siempre y te regalo éste trabajo. TE AMO JESÚS.

A mamá y papá que me dieron siempre la oportunidad para que yo pudiera desarrollarme en la mayoría de las metas que me he propuesto, hoy ya encaminada y teniéndolos aún conmigo gracias a Dios, les agradezco su esfuerzo, apoyo, paciencia y tolerancia, gracias por confiar en mi (aunque siempre les meto sustos con mis nuevas ideas) y hoy en un tercer trabajo de ésta índole espero nunca haberles fallado y que enorgullezcan de mi. LOS AMO PAPÁS.

A mi Figo, por ser la alegría que faltaba en nuestros corazones.

Hermanita Merit que siempre has estado a mi lado, que me apoyas en todo a pesar de llevarte la contra casi siempre, te agradezco todo, apoyo moral principalmente pero gracias a tu apoyo económico siempre logro todas mis metas y he logrado ser mejor, por ser la persona más humana, honesta y amorosa que conozco, eres mi ángel protector. TE AMO HERMANITA.

Cuñis Miguel, gracias por tus consejos, por tu apoyo, por ser un hermano para mi y siempre prestar interés de éste proyecto, eres mi cuñado favorito.

A Fer: Gracias por tu apoyo incondicional en éste viaje que emprendimos juntos, por ser mi fortaleza y mi luz cuando todo parecía oscuro, por tu compañía y por haber convertido de ésta maestría una gran y divertida aventura, primero Dios será la primera de muchas metas que juntos lograremos. TE AMO.

Dr. Francisco Javier Gallegos Funes, no tengo palabras para agradecer el apoyo que me brindó, la confianza que tuvo en mi, usted fue un ángel terrenal en mi vida y en el proyecto que más había anhelado. Gracias por ser más que un maestro un gran amigo. Ojalá existieran más maestros como usted, que comparte sus conocimientos y da apoyo moral. Siempre estará en mi corazón.



---

## Objetivo General

Utilizar un método acústico para detectar fisuras y grietas no visibles en un recinto cerrado.



---

## Objetivos Particulares

- Diseñar y construir las cabinas de prueba bajo las condiciones de: recinto controlado, recinto con fisuras y recinto con grietas.
- Calcular el Tiempo de Reverberación óptimo de las cabinas de prueba por medio de tres métodos: Sabine, Eyring y Millington Sette, para demostrar que los recintos cumplen con los niveles de un recinto real.
- Utilizar la aplicación de Rev Meter Pro con iOS 11 del iPhone 6s plus para medir el Tiempo de Reverberación y comparar los resultados con los obtenidos en los cálculos de los métodos de Sabine, Eyring y Millington Sette para su demostración.
- Medir con un sonómetro los niveles de presión sonora en cada una de las cabinas de prueba y detectar las variaciones que puedan existir entre ellas.
- Utilizar la aplicación de Sound Meter con iOS 11 del iPhone 6s plus para medir el nivel de sonido en cada una de las cabinas de prueba y comparar los resultados con los obtenidos con el sonómetro.
- Comprobar el sistema mediante trabajo de campo.



---

## Justificación

Posteriormente a los movimientos telúricos, se pueden aplicar diferentes metodologías para detectar grietas o fisuras, pero estas exigen la utilización de equipos sofisticados y costosos, por lo que en este trabajo se propone un método de detección de grietas y fisuras basado en las variaciones del nivel del sonido.



---

## Hipótesis

Es posible detectar grietas y fisuras no visibles al ojo humano en recintos cerrados, mediante la comparación de la medición del sonido en recintos óptimos sin grietas ni fisuras, con respecto a la medición del sonido posterior a algún movimiento telúrico, la cual podría presentar alguna alteración.



## Índice General

Resumen .....	i
Abstract .....	iii
Agradecimientos.....	v
Objetivo General .....	vi
Objetivos Particulares .....	vii
Justificación.....	viii
Hipótesis.....	ix
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tablas .....	xv
Nomenclatura .....	xvii

## CAPÍTULO 1

1. Conceptos fundamentales .....	2
1.1. Introducción .....	2
1.2. Umbrales auditivos.....	2
1.3. Acústica Fisiológica.....	4
1.4. Campo Sonoro en Recintos .....	5
1.5. Reverberación .....	5
1.6. Tiempo de Reverberación (T.R.).....	7
1.7. Absorción acústica .....	8
1.8. Curva de ponderación A.....	8
1.9. Análisis de frecuencias .....	9
1.10. Recintos acústicos. ....	9
1.11. Nivel sonoro en un recinto.....	10
1.12. Absorción y coeficiente de absorción de los materiales utilizados en recintos.....	10
1.13. Niveles de ruido de fondo con Curvas NC (Noise Criteria).....	11
1.14. Lesiones mecánicas en estructuras.....	12
1.15. Ruido blanco.....	14




---

1.16.	Ruido rosa.....	14
-------	-----------------	----

## CAPÍTULO 2

2.	Métodos e instrumentos para caracterizar y medir los recintos .....	16
2.1.	Introducción .....	16
2.2.	Método de Sabine .....	16
2.3.	Método de Eyring.....	17
2.4.	Método de Millington-Sette.....	18
2.5.	Sonómetro.....	18
2.6.	Aplicaciones para teléfono inteligente: Simuladores .....	20
2.6.1.	Aplicación Sound Meter .....	20
2.6.2.	Aplicación Rev Meter Pro.....	20
2.7.	Características de cabinas de pruebas .....	21
2.7.1.	Cálculo del volumen real de las cabinas de pruebas.....	22
2.7.2.	Cálculo de Superficies de las cabinas de pruebas .....	23
2.8.	Caracterización de cabinas de prueba .....	24
2.8.1.	TR calculado con condiciones controladas.....	26
3.	Mediciones y análisis de datos .....	30
3.1.	Introducción .....	30
3.2.	Fórmulas para el análisis probabilístico .....	30
3.3.	Sistema Propuesto .....	31
3.4.	Mediciones de cabinas de pruebas .....	33
3.4.1.	Cabina en condiciones óptimas.....	33
3.4.2.	Cabina con grietas .....	35
3.4.3.	Cabina con fisuras .....	36
3.5.	Mediciones de campo .....	36
3.5.1.	Mediciones de Laboratorio de Señales y Sistemas de ESIME Zacatenco.....	36
3.5.2.	Mediciones en habitación sin grietas y con grietas de 1cm, 5cm, 10cm y 30cm.....	38
3.6.	Análisis probabilístico de las mediciones obtenidas en las cabinas de pruebas.....	40
3.6.1.	Cabina en condiciones óptimas.....	40
3.6.2.	Cabinas con grietas.....	42



---

3.7.	Análisis probabilístico de los datos obtenidos en mediciones de campo.....	44
3.7.1.	Laboratorio de Señales y Sistemas de ESIME Zacatenco .....	44
3.7.2.	Habitación sin grietas .....	47
3.7.3.	Habitación con grietas de 1cm, 5cm, 10cm y 30cm.....	49
4.	<b>1METODOLOGÍA .....</b>	<b>53</b>
4.1.	INTRODUCCIÓN .....	53
4.2.	Metodología para mediciones. ....	53
4.2.1.	Caracterización del recinto.....	53
4.2.2.	Análisis probabilístico de información .....	53
4.2.3.	Posteriormente a un evento telúrico .....	53
4.3.	Programa de verificación del método.....	54
4.3.1.	Diagramas de flujo.....	54
4.3.2.	Código en MATLAB R2017a.....	57
	<b>Conclusiones .....</b>	<b>59</b>
	<b>Trabajos futuros .....</b>	<b>61</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>63</b>



## Índice de Figuras

Figura 1.1 Respuesta en frecuencia del oído humano. ....	3
Figura 1.2 Diferencia de intensidad perceptible en función de una determinada frecuencia 16 .....	4
Figura 1.3 Reflexiones generadas en una superficie plana. ....	5
Figura 1.4 Ondas directas y reflejadas de un recinto. ....	6
Figura 1.5 Sonido directo y sonido reflejado. ....	6
Figura 1.6 Muestra de la variación de la densidad de energía contra el tiempo. ....	7
Figura 1.7 Reparto de energía acústica en la absorción. ....	8
Figura 1.8 Ponderación A de la sensibilidad auditiva. ....	9
Figura 1.9 Ejemplos de geometrías de un recinto. ....	10
Figura 1.10 Tipos de fisuras. <sup>19</sup> .....	13
Figura 2.1 Comportamiento de la absorción de Sabine.....	17
Figura 2.2 Comportamiento de la absorción de Eyring.....	17
Figura 2.3 Sonómetro Sound Level Meter.....	19
Figura 2.4 Carátula inteligente de la Aplicación Sound Meter del iOS 11.....	20
Figura 2.5 Imagen de la aplicación del iPhone 6s plus.....	20
Figura 2.6 Prototipo de cabina pruebas SOLIDWORKS .....	21
Figura 2.7 Columnas triangulares dentro de la cabina de prueba. ....	23
Figura 2.8 Materiales d superficies de las cabinas de prueba. ....	24
Figura 2.9 Cabina anecoica ESIME Zacatenco IPN.....	24
Figura 2.10 Medición del T.R. a 250 Hz. ....	25
Figura 2.11 Medición del T.R. a 125 Hz. ....	25
Figura 2.12 Respuesta del T.R. de Sabine. ....	26
Figura 2.13 Respuesta del T.R. de Eyring. ....	27
Figura 2.14 Respuesta del T.R. de Millington Sette. ....	27
Figura 3.1 Sistema propuesto: a) Diagrama a bloques del sistema y b) Mediciones. ....	32
Figura 3.2 Gráfica del Rango de clase de cabina en condiciones óptimas a 250 Hz con ruido rosa medido con sonómetro (S) y aplicación Sound Meter (SM).....	41
Figura 3.10 Gráfica del Rango de clase del análisis de datos obtenido en habitación de pruebas sin grietas a 250Hz con ruido rosa medido con sonómetro .....	48



---

Figura 3.11 Gráfica de tendencia del análisis de datos obtenido en habitación de pruebas sin grietas a 250Hz con ruido rosa medido con sonómetro.....	48
Figura 4.1 Diagrama de flujo del cálculo del Tiempo de reverberación.....	54
Figura 4.2 Diagrama de flujo de tipo de medidor.....	55
Figura 4.3 Análisis de datos con sonómetro.....	56
Figura 4.4 Análisis de datos con aplicación.....	56



---

## Índice de Tablas

Tabla 1-1 Ejemplos de T.R. en salas con materiales reflejantes.....	8
Tabla 1-2 Coeficiente de absorción de materiales NRC.....	12
Tabla 2-1 Frecuencias centrales estandarizadas (ISO 266) .....	19
Tabla 2-2 Parámetros técnicos.....	19
Tabla 2-3 Tiempo de reverberación óptimo de recintos. ....	22
Tabla 2-4 Valores del T.R. con Fórmula de Sabine.....	26
Tabla 2-5 Valores del T.R. utilizando fórmula de Eyring. ....	27
Tabla 2-6 Valores del T.R. con fórmula de Millington sette. ....	27
Tabla 3-1 Mediciones en cabina de pruebas óptima T.R. 20 a 250Hz con ruido rosa utilizando sonómetro. ....	33
Tabla 3-2 Mediciones en cabina de pruebas óptima T.R. 20 a 125 Hz con ruido blanco utilizando sonómetro.....	34
Tabla 3-3 Mediciones en cabina de pruebas óptima T.R. 20 a 250Hz con ruido blanco utilizando la aplicación Sound Meter.....	34
Tabla 3-4. Mediciones en cabina de pruebas óptima TR30 125Hz con ruido blanco utilizando la aplicación Sound Meter. ....	34
Tabla 3-5. Mediciones en cabina de pruebas con grietas TR20 250Hz con ruido blanco utilizando sonómetro.....	35
Tabla 3-6. Mediciones en cabina de pruebas con grietas TR20 125Hz con ruido rosa utilizando sonómetro. ....	35
Tabla 3-7. Mediciones en cabina de pruebas con grietas TR20 125Hz con aplicación Sound Meter.....	36
Tabla 3-8. Mediciones en cabina de pruebas con grietas TR20 250Hz con aplicación Sound Meter.....	36
Tabla 3-9 Mediciones en día lunes por la mañana, medio día y tarde con sonómetro. ....	37
Tabla 3-10 Mediciones en día lunes por la mañana, medio día y tarde con aplicación Sound Meter.....	37



---

Tabla 3-11 Mediciones en habitación sin grietas a las 9:00hrs en día lunes con sonómetro (S) y aplicación Sound Meter (SM) a 125Hz. ....	38
Tabla 3-12 Mediciones con alteraciones a las 9:00 horas en día lunes, con sonómetro (S) y aplicación Sound Meter (SM) a 125Hz. ....	39
Tabla 3-13 Rangos de caracterización de habitación de pruebas.....	40
Tabla 3-14 Resultados de análisis para cabinas en condiciones óptimas a 250Hz con ruido rosa medido con sonómetro (S) y la aplicación Sound Meter (SM). ....	40
Tabla 3-15 Resultados de análisis para cabinas con grietas a 250Hz con ruido rosa medido con sonómetro (s) y la aplicación Sound Meter (SM) .....	42
Tabla 3-16 Resultados del análisis de datos obtenido en el laboratorio de señales y sistemas de ESIME Zacatenco en día lunes a 250Hz con ruido rosa medido con sonómetro (S) y la aplicación Sound Meter (SM). ....	44
Tabla 3-17 Resultados del análisis de datos obtenidos en habitación de pruebas sin grietas a 250 Hz con ruido rosa medido con sonómetro. ....	47
Tabla 3-18 Resultados medidos con sonómetro en la habitación de pruebas en condiciones de actividades normales simulando una alteración con grieta de 1cm, 5cm, 10cm y 30 cm .....	49



---

## Nomenclatura

$L$  = Cambio percibido en un estímulo

$P$  = Presión sonora

$k$  = Constante para cada tipo de sensación (color, olor, sonido ...)

$\Delta E$  = Cambio de magnitud de un estímulo

$E$  = Magnitud del estímulo

$d$  = Distancia

$E_i$  = Energía de la onda sonora incidente

$E_a$  = Energía de la onda sonora que se absorbe

$T.R.$  = Tiempo de reverberación

$V$  = Volumen

$S$  = Area

$\alpha$  = Coeficiente de absorción sonora

$V_1$  = Volumen del cubo completo

$a$  = Lado1

$b$  = Lado2

$h$  = Altura

$0.161 \left[ \frac{\text{segundos}}{\text{m}} \right]$  = Constante de Sabine a 20°Celsius

$V_2$  = Volúmen de la columna

$A_B$  = es el área del triángulo base

$\bar{X}$  = Media

$X_i$  = Valores en la población

$N$  = Tamaño de la población



---

$\sigma_x =$  *Desviación estándar*

$\sigma_{\bar{x}} =$  *Desviación estándar de la media*

$\delta^2 =$  *Varianza*

# CAPÍTULO 1



# 1. Conceptos fundamentales

## 1.1. Introducción

En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales que serán usados a lo largo del presente trabajo. Se muestran los umbrales auditivos del oído humano mediante la curva de respuesta para tener la referencia de los espectros de potencia acústica y frecuencia en donde tiene mejor percepción. Los sonidos percibidos están ligados con el estímulo que los provoca, de acuerdo a su fisiología, el oído humano puede ser considerado como un sistema de audio y por lo tanto se puede caracterizar el sistema en similitud con las sensaciones que las ondas acústicas producen. También, se considera el efecto que generan diferentes características del sonido dentro de recintos como: Campo sonoro, reverberación, tiempo de reverberación, absorción acústica, ponderación, frecuencias, nivel sonoro, absorción del sonido y ruido de fondo para las caracterizaciones y mediciones en los recintos de pruebas y comprobar su comportamiento como un recinto real añadiendo ruidos que sean ajustados en ciertos rangos como son el ruido blanco y ruido rosa. Finalmente, es importante mencionar que algunas lesiones mecánicas como grietas y fisuras enfocan la atención del método propuesto.

## 1.2. Umbrales auditivos

El Nivel de Presión sonora (NPS) expresa la magnitud de un campo sonoro, con unidades  $N/m^2$  (Newton/metro<sup>2</sup>) o Pa (Pascal). La presión sonora más débil que puede ser detectada por el oído humano es de  $2 \times 10^{-5}$  (Pa) a una frecuencia de 1kHz, ésta es llamada umbral de audición, y varía con el cambio de frecuencia y en cada individuo. Cuando las presiones sonoras crecen, la sonoridad también crecerá produciendo una sensación de molestia llamada umbral de molestia, siendo la máxima de  $10^3$  (Pa) o aproximadamente 120 dB. Llegar a 140 dB se produce sensación de dolor ocasionando daño permanente por una exposición prolongada, si se alcanzan los 160 dB los daños serán inmediatos y muy probablemente permanentes.

Para obtener una estandarización a nivel internacional se normalizó con condiciones idénticas mediante un grupo de individuos obteniendo la curva de respuesta en frecuencia o umbral de audición en tonos puros<sup>9</sup>. En la Figura 1.1 se observa la dependencia entre la frecuencia y la sensibilidad del oído en decibeles, la frecuencia máxima se aproxima a los 3000Hz tomando 1kHz de frecuencia como referencia y los  $2 \times 10^{-5}$  Pa para que la presión pueda ser percibida; para frecuencias inferiores a 1kHz el umbral asciende de forma

regular con decrecimiento en la frecuencia, en las frecuencias superiores a 5kHz el nivel del umbral crece en forma abrupta, es ahí en donde la pendiente se acentúa de acuerdo a la edad del individuo perdiendo sensibilidad sobre todo en altas frecuencias por lo que se observa que la zona de más sensibilidad del oído humano es en el rango de 2000 a 5000 Hz. Esta gráfica es el patrón de referencia que se considera en todos los sistemas que tengan que reproducir de alguna forma el sonido, deben tener una respuesta aproximada para una óptima escucha del individuo, cualquier recinto debe de presentar una gráfica de la respuesta en frecuencia del tiempo de reverberación de acuerdo al rango descrito.

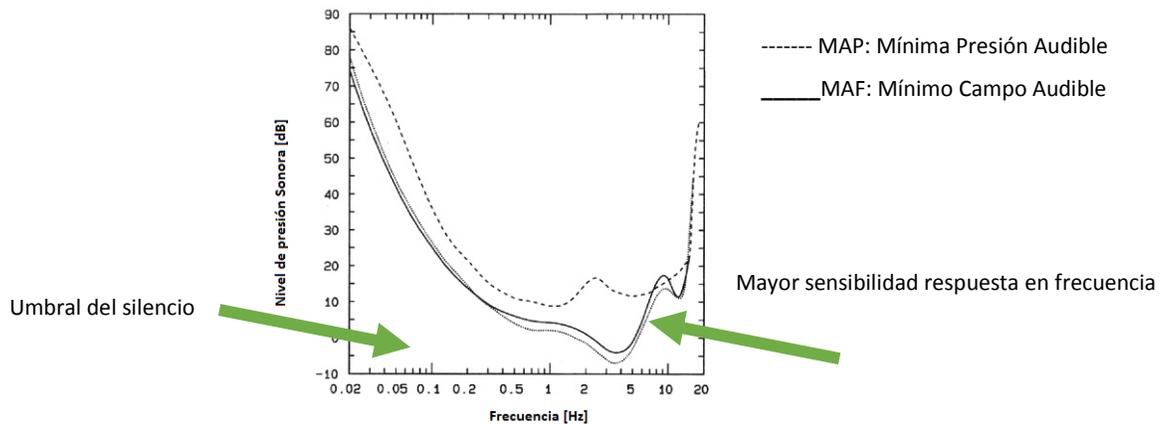


Figura 1.1 Respuesta en frecuencia del oído humano.

Es importante hacer mención que el sistema auditivo humano no responde de forma lineal a los estímulos que recibe, éste responde de forma logarítmica, por lo que la sonoridad percibida en el oído humano no es proporcional a la variación de la presión, si no de acuerdo con la Ley de Weber Fechner que dice “La magnitud de la sensación percibida es proporcional al logaritmo del estímulo que lo provoca”, es decir, la relación cuantitativa entre la magnitud del estímulo físico y cómo es percibido:

$$L = k \times \log P \quad (1.1)$$

donde  $L$  es el cambio percibido en un estímulo,  $P$  es la presión sonora [Pa] y  $k$  es una constante para cada tipo de sensación (color, olor, sonido...) definida como,

$$k = \frac{\Delta E}{E} \quad (1.2)$$

teniendo que  $k$  es la constante para cada tipo de sensación (color, olor, sonido...),  $\Delta E$  es el cambio de la magnitud del estímulo y  $E$  es la magnitud del estímulo.

Esta sensibilidad es constante e independiente del valor de la intensidad dentro de un amplio intervalo de frecuencias como se muestra en la Figura 1.2. El umbral de audibilidad promedio para un oído no dañado se representa en la curva más baja, la frecuencia de máxima sensibilidad está aproximada a 4kHz. Debajo de estos valores el umbral aumenta al decrecer la frecuencia variando independientemente de la edad en un intervalo por debajo de 1kHz.

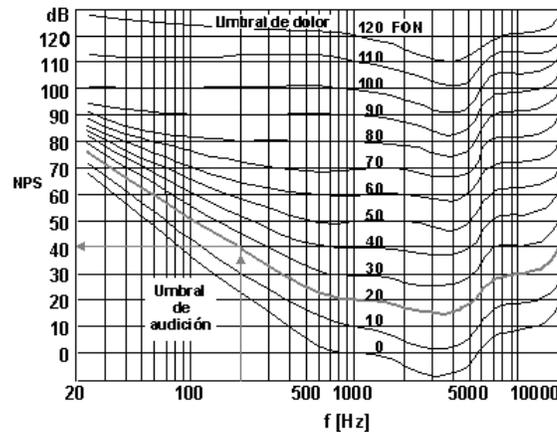


Figura 1.2 Diferencia de intensidad perceptible en función de una determinada frecuencia <sup>16</sup>.

### 1.3. Acústica Fisiológica

Realizando la analogía del oído humano con un sistema, estaría compuesto por un órgano que adquiere datos (oído externo y medio), un convertidor analógico-digital (oído interno) y un sistema de memorias y procesamiento central (cerebro). El sistema iniciará cuando el pabellón concentra los sonidos, las ondas sonoras penetran por el conducto auditivo externo que condensa las ondas y las transporta al tímpano haciendo que vibre lentamente en tonos de baja frecuencia y rápido en tonos de altas frecuencias, ésta vibración se transmite al oído interno por medio de un grupo de tres huesecillos que actúan como un sistema de amplificación, el oído interno transforma los impulsos mecánicos en impulsos nerviosos que llegan al cerebro donde se presume se interpreta la información. En general, el mecanismo auditivo transforma una onda acústica y variaciones de presión en la sensación del sonido. El rango de percepción del oído humano es de 20 a 20000 Hz para un oído sano.

Para poder hacer caracterizaciones de las sensaciones que una onda acústica produce en el oído se considera un sonido puro el cual se identifica físicamente por la frecuencia y la amplitud de las variaciones de la presión acústica con sensaciones distintas, tono y

sonoridad. El tono es la sensación de agudeza que dependerá de la frecuencia por lo que a mayor frecuencia da una sensación de más agudeza, la sonoridad es la sensación de intensidad, depende de la presión acústica, en cuanto más alta es la presión, más intenso parecerá el sonido.

#### 1.4. Campo Sonoro en Recintos

Si en un recinto cerrado se irradia energía acústica por medio de una fuente sonora, se genera un campo acústico que se propaga libremente, dependiendo de la distancia al paso del tiempo las ondas sonoras empezarán a sufrir reflexiones sobre las diversas superficies superponiéndose las ondas que inciden con las ondas reflejadas. Como se observa en la Figura 1.3, esas reflexiones se van repitiendo por lo que la energía en el recinto aumentaría indefinidamente si no fuera absorbida por las superficies u objetos que contenga dicho recinto. Entonces el campo sonoro se determina a partir de la potencia de la fuente y las propiedades reflectantes de las superficies del recinto.

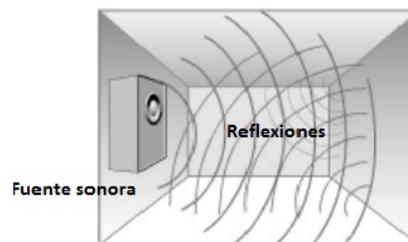


Figura 1.3 Reflexiones generadas en una superficie plana.

#### 1.5. Reverberación

Cuando una fuente sonora deja de emitir sonido, la densidad de energía acumulada no desaparece de inmediato, dura un cierto intervalo de tiempo y es absorbida por los materiales del recinto hasta que ya no se percibe. A este fenómeno de permanencia del sonido en un recinto después de que se apaga la fuente sonora se conoce como reverberación, el cual tendrá injerencia en el comportamiento acústico del recinto. Considerando para dicho fenómeno un recinto con superficies parcialmente reflejantes el campo sonoro estará formado por el sonido directo y el sonido reflejado, el primero parte de la fuente sonora al individuo permaneciendo el mismo en campo libre y el segundo van desde la fuente sonora al individuo después de una o más reflexiones en las superficies como se observa en la Figura 1.4.

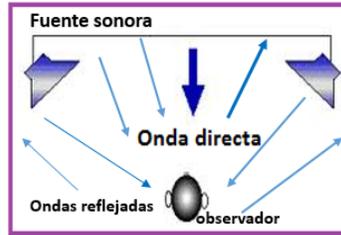


Figura 1.4 Ondas directas y reflejadas de un recinto.

Existe otro fenómeno acústico que se suele confundir con la reverberación llamado eco, todo empieza de acuerdo a la percepción que el oído tenga entre el sonido directo y el sonido indirecto como se muestra en la Figura 1.5. Si el sonido indirecto llega al oído antes de 0.1 segundos desde que fue percibido el sonido que provocó las reflexiones tendremos una reverberación, si tarda más de 0.1 segundos el oído lo percibirá como eco, considerando que la velocidad del sonido es aproximadamente 340 m/s se demuestra de la siguiente forma:

$$d = V \times t \quad (1.3)$$

donde  $d$  es la distancia recorrida,  $V = 340\text{m/s}$ , y  $t = 0.1$  segundos.

Sustituyendo valores tenemos que:

$$d = 340 \times 0.1 = 34 \text{ m} \quad (1.4)$$

Siendo 34 metros que recorre ese sonido en su viaje de ida y vuelta por lo que cualquier superficie reflejante que se encuentre a más de 17 metros de distancia puede originar el eco.

Visto de otra forma, el oído humano tiene un tiempo de respuesta medio de aproximadamente 50ms considerando una señal de ida y otra de vuelta tendremos una señal única.

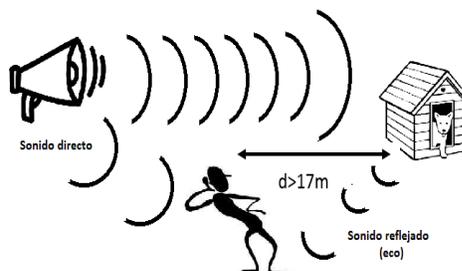


Figura 1.5 Sonido directo y sonido reflejado.



## 1.6. Tiempo de Reverberación (T.R.)

El nivel de intensidad acústica disminuye 60dB si un sonido reflejado llega con un tiempo inferior a 1/10 de segundo, el sistema de audición humano no es capaz de separar ambas señales y las toma como una misma, pero con duración superior a ésta. La reverberación se mide en segundos y varía según la frecuencia de análisis que se utilice.

La Figura 1.6 muestra la variación de la densidad de energía sonora contra el tiempo desde la emisión de energía sonora hasta que se apaga, dividiéndose en tres tramos:

- Régimen transitorio de aumento: La energía acústica crecerá de forma gradual y continua, mientras que la energía emitida por la fuente sonora por unidad de tiempo supera a la absorbida en el recinto durante el mismo tiempo.
- Régimen estacionario: Se igualan las energías ganadas y perdidas por lo que la densidad de energía acústica permanece constante con el tiempo.
- Régimen transitorio de disminución: Cuando se interrumpe la fuente sonora, la densidad de energía comienza a descender. En esta etapa el recinto pierde energía acústica debido a la absorción de la sala.

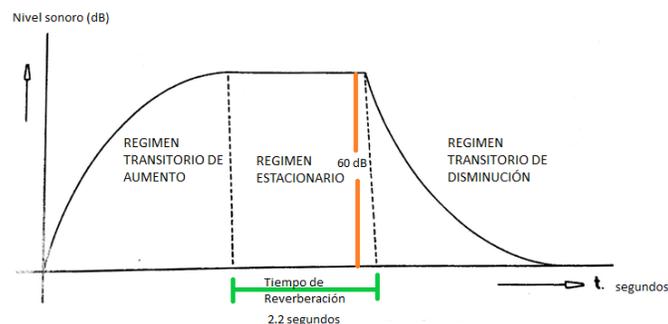


Figura 1.6 Muestra de la variación de la densidad de energía contra el tiempo.

Si se tiene un recinto con todas las superficies de materiales reflejantes su comportamiento sería; a mayor volumen, el T.R. aumenta por que las reflexiones son más largas como se observa en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1 Ejemplos de T.R. en salas con materiales reflejantes.

Dimensiones del recinto (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Tiempo de reverberación (segundos)
2 x 2 x 2	8	1,1
4 x 4 x 4	64	2,1
8 x 8 x 4	256	3,2
10 x 20 x 5	1000	4,8
20 x 40 x 8	6400	8
50 x 50 x 12	30000	13

### 1.7. Absorción acústica

La absorción acústica controla el T.R., elimina ecos, resonancias y balancea el sonido directo con respecto al reverberante. En la Figura 1.7 se muestra que cuando una onda acústica incide en un material, parte de la energía se refleja y parte se absorbe, ésta última energía no regresa al canal de transmisión.

Es importante considerar que la absorción acústica depende del tipo de material, espesor, forma del material, del ángulo de incidencia y frecuencia de las ondas acústicas.

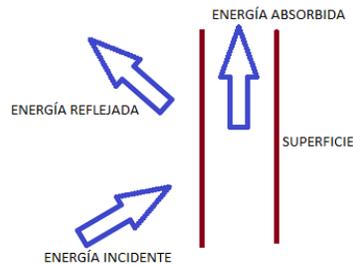


Figura 1.7 Reparto de energía acústica en la absorción.

### 1.8. Curva de ponderación A

Para que los niveles de sonido sean representativos al oído humano se toma la ponderación A que es utilizada en la medición ambiental de ruidos y sonidos, proporciona referencias de las normas correspondientes a la acústica de recintos acústicos, es decir, para fábricas, oficinas, hospitales, escuelas, etc.



En la Figura 1.8 se muestra la curva de ponderación A en donde se observa que en 1000Hz no hay alteración de nivel y de ahí en adelante la alteración se atenúa, para bajas frecuencias la atenuación disminuye.

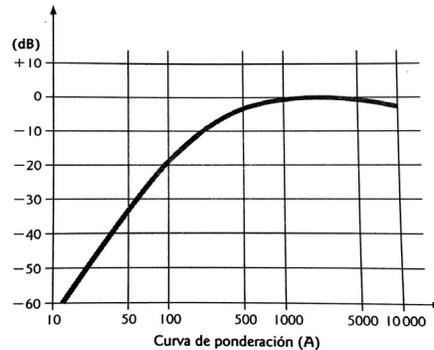


Figura 1.8 Ponderación A de la sensibilidad auditiva.

## 1.9. Análisis de frecuencias

Para saber por qué se referencia a cierto intervalo de frecuencias en la obtención del T.R., se considera el análisis de frecuencias para poder tener información más detallada del nivel sonoro a ciertas frecuencias, se obtiene con decibelímetros o sonómetros que incluyen filtros que solo dejan pasar las frecuencias de la banda que se encuentra verificando las cuales son 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz.

## 1.10. Recintos acústicos.

En general, al hablar de recintos grandes y de geometría irregular se debe considerar principalmente el ángulo de incidencia, el ángulo de reflexión y los elementos focales ya que estos recintos son propensos a los ecos y perturbaciones por superficies reflejantes.

### a) Clasificación

La clasificación de los recintos está dada por las propiedades físico-fisiológicas de la audición humana, de las características naturales de los sonidos y de las características de las fuentes sonoras y receptores. En general, se agrupan como recintos de audición directa ej. teatros, para transmisión sonora por medio de sistemas electroacústicos ej. cines, estudios de radio y televisión y sistemas de amplificación sonora ej. estadios.

### b) Eliminación de ecos

- Colocar materiales acústicos de forma convexa en superficies problemáticas.
- Evitar el paralelismo de superficies y la inclinación mayor de cinco grados.

### c) Formas de diseño

Se deben evitar superficies circulares, cóncavas y paralelas, en caso de requerirse éstas superficies se debe considerar tratamiento acústico.

En el presente trabajo nos referiremos a recintos cerrados sin importar el tipo de geometría que posea, como se muestra en la Figura 1.9.

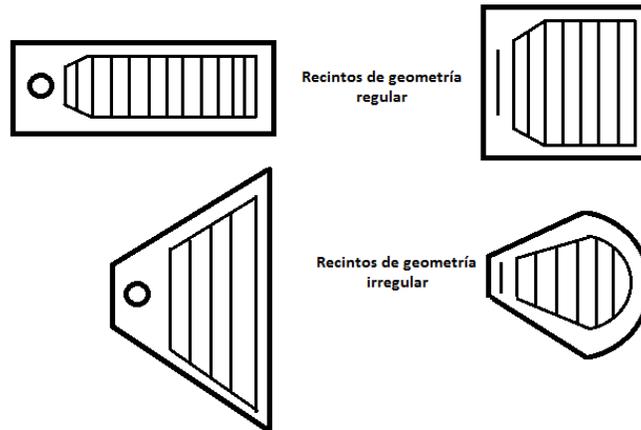


Figura 1.9 Ejemplos de geometrías de un recinto.

### 1.11. Nivel sonoro en un recinto

Un sonido da el efecto de parecer más fuerte cuanto mayor es la amplitud de las vibraciones más próximas al oído. En cuanto nos alejamos de una fuente sonora la intensidad del sonido disminuye, lo que indica que es inversamente proporcional con la distancia siempre y cuando el medio de transmisión sea homogéneo, isótropo y no absorbente con propagación de forma de ondas esféricas. En caso de que no existan pérdidas en el medio de transmisión, todas las potencias irradiadas por la fuente atravesarán las superficies que las envuelven.

Para mediciones se utilizan los sonidos puros de 1000Hz con niveles de presión variable y ajustable o bandas de ruido blanco centradas en los 1000Hz con un ancho de banda de 100Hz y el nivel de presión sonora variable y ajustable.

### 1.12. Absorción y coeficiente de absorción de los materiales utilizados en recintos

La absorción es un fenómeno observado en los materiales en donde parte de la onda que incide sobre una superficie se pierde debido a que se transforma en calor, hay materiales en donde su efecto es mayor por lo que son llamados materiales absorbentes.



La absorción de un material es determinada por su coeficiente de absorción  $\alpha$ , el cual relaciona la cantidad de energía de la onda sonora incidente  $E_i$  y la energía de la onda sonora que se absorbe  $E_a$ ,

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (1.5)$$

El coeficiente de absorción de un material se encuentra entre 0 y 1.

Si  $\alpha=1$ . Corresponde a la máxima absorción de un material, es decir, toda la energía es absorbida por el material.

Si  $\alpha=0$ . Corresponde a la mínima absorción de un material, es decir, toda la energía se refleja.

Este valor varía con la frecuencia por lo cual los fabricantes de los materiales especifican éste valor a distintos valores de frecuencias, del ángulo de incidencia de las ondas y del sistema de instalación del material.

La mayoría de los materiales utilizados en México para el acondicionamiento acústico son prácticamente reflejantes debido a su baja porosidad. En la Tabla 1-2 se muestran algunos materiales en las seis octavas que han manejado, que es la media aritmética de las octavas de 250,500,1000 y 2000Hz.

### 1.13. Niveles de ruido de fondo con Curvas NC (Noise Criteria)

Las curvas NC se toman de referencia cuando se realiza una evaluación del grado de molestia de determinados ruidos de fondo que puede percibir un individuo, se realiza una comparación de los niveles de ruido medidos en un recinto ocupado para cada banda de octava comprendida entre los 63 Hz y 8kHz. Un recinto cumplirá las especificaciones NC cuando los niveles medidos se encuentran por debajo de la curva correspondiente y varían de acuerdo a las características geométricas y de volumen del recinto. Este ruido de fondo es causado tanto por ruidos externos al recinto como de ruido en el interior.



Tabla 1-2 Coeficiente de absorción de materiales.

Material	Frecuencia					
	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz
Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Bloc pintado	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Yeso	0.04	0.06	0.06	0.09	0.05	0.07
Cemento	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Ladrillo poroso	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Ladrillo pintado	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Tabla roca	0.29	0.1	0.05	0.04	0.07	0.09
Vidrio grosor meno de 5mm	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Vidrio grosor mayor a 6mm	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Triplay de 1/2"	0.3	0.23	0.18	0.14	0.11	0.1
Pisos vinilicos	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Parquet sobre concreto	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
Puerta de madera sólida	0.24	0.19	0.14	0.08	0.13	0.1
Cortina de pliegues fruncida al 180% separada de la pared 15 cm	0.18	0.35	0.65	0.6	0.6	0.68
Cortina de pliegues fruncida al 180% rozando la pared	0.02	0.07	0.25	0.55	0.75	0.7
Tirol	0.03	0.03	0.06	0.09	0.04	0.06
Sillas o sillones muy tapizados	0.72	0.79	0.83	0.84	0.83	0.79
Sillas desocupadas porcentaje medio de grosor de tapiz	0.5	0.64	0.7	0.72	0.68	0.62
Sillas o sillones de bajo grosor de tapiz	0.35	0.45	0.57	0.61	0.59	0.55
Sillas o sillones ocupados medio grosor de tapiz	0.68	0.75	0.82	0.85	0.86	0.86
Aislamiento acústico	0.1	0.13	0.19	0.56	0.79	0.79
Agua	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Ventana abierta	1	1	1	1	1	1

#### 1.14. Lesiones mecánicas en estructuras

Las grietas y fisuras son roturas que aparecen en el concreto como consecuencia de tensiones superiores a su capacidad de resistencia. Algunas son producidas por esfuerzos o sobrecargas que generan tensión interna generando rupturas debido a esfuerzos mecánicos superiores a los previstos durante las construcciones.

Las sobrecargas suelen ser por diversas causas, por ejemplo, asentamientos de las sedimentaciones, movimientos en el terreno, aperturas de huecos en muros, dilataciones térmicas, problemas de construcción o deformaciones en estructuras. Para efecto de éste trabajo, se estudia el método acústico con fisuras y grietas que son causadas por fuerzas externas.

Las fisuras, principalmente en el hormigón pueden no sólo afectar la apariencia de una estructura, pueden también indicar fallas estructurales significativas o falta de durabilidad del material, esto depende del tipo de estructura, de la aplicación que se dé a la edificación

o de la naturaleza de la fisuración. Si se encuentran elementos de la construcción que se dañan en su totalidad y se visualizan despegues, se estará hablando de grietas.

Para efecto de este trabajo, nos referiremos al tipo de grietas y fisuras que se generaron por movimientos en los materiales en donde se tienen cuatro causas específicas:

1. Movimientos del terreno,
2. Variaciones de las cargas estructurales,
3. Vibraciones tanto en el interior como en el exterior del edificio,
4. Variaciones dimensionales.

La importancia de las fisuras depende del tipo de estructura y de su naturaleza, debido a que existen algunas que son aceptables en inmuebles, pero, por ejemplo, no son aceptables en lugares donde se almacenan líquidos. Para efecto de éste trabajo se estudia el método acústico con fisuras y grietas que son causadas por fuerzas externas, clasificándose en:

Grieta Horizontal: Pueden indicar que el concreto ha sobrepasado su capacidad de resistencia.

Grietas por Flexión: Cuando llegan al centro de la viga y se curvean como se observa en la Figura 1.10.

Grietas por cortante: Son las más comunes posteriormente a un evento sísmico, afectan la armadura, generalmente son de  $45^\circ$ , como se observa en la Figura 1.10. Se recomienda evacuación inmediata del inmueble.

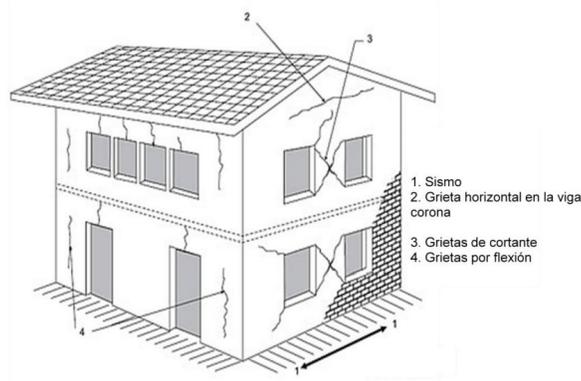


Figura 1.10 Tipos de fisuras.<sup>19</sup>



---

### 1.15. Ruido blanco

Es el ruido en donde se encuentran presentes todas las frecuencias posibles, es de característica aleatoria y posee la misma densidad espectral de potencia a lo largo de toda la banda de frecuencias, es una señal no correlativa, es decir, en el eje del tiempo la señal toma valores sin ninguna relación unos con otros, por ejemplo, sería el ruido que se alcanzaría si todos los instrumentos tocaran al mismo tiempo notas distintas sin alguna coordinación. Se emplea como señal para pruebas debido a que su densidad espectral se asemeja a la percepción humana incrementando 3dB por octava.

### 1.16. Ruido rosa

Todas las frecuencias se encuentran representadas y las bajas frecuencias entran en mayor proporción que las altas, posee una distribución que disminuye 3dB por octava. El ruido rosa es un ruido blanco con una atenuación de las frecuencias altas por lo que predominarán las bajas frecuencias.

# CAPÍTULO 2



## 2. Métodos e instrumentos para caracterizar y medir los recintos

### 2.1. Introducción

Para acondicionar de la manera más óptima un recinto que corresponda a las condiciones de sonido que se requieran, se utiliza el cálculo del Tiempo de Reverberación (T.R.). En éste capítulo se realizarán los cálculos del T.R. con tres métodos: Sabine, Millington Sette y Eyring, para la comprobación del comportamiento acústico en cuanto a reverberación y así medir los niveles de presión sonora correctos tanto de las cabinas de prueba propuestas como en las mediciones de campo de recintos. Se muestra el diseño y caracterización de las cabinas de pruebas en donde se demuestra el método propuesto. También se muestran mediciones del sonido que requiere el sistema propuesto mediante un sonómetro. Finalmente, se describen las aplicaciones de teléfono inteligente, así como la plataforma utilizada que permitirán la caracterización del sistema y las mediciones del sonido.

### 2.2. Método de Sabine

El modelo matemático está definido como:

$$T.R. = 0.161 \times \frac{V}{\sum S\alpha} [\text{segundos}] \text{ para } \alpha < 2 \quad (2.1)$$

donde 0.161[segundos/m] es el valor de la constante de Sabine a 20º Celsius,  $V$  es el volumen [ $m^3$ ],  $S$  es el área [ $m^2$ ] y  $\alpha$  es el coeficiente de absorción sonora.

Del modelo matemático de Sabine se desprende que:

- El T.R. es constante sobre cualquier punto del recinto.
- El T.R. es independiente de la geometría del recinto.
- El T.R. es independiente de las condiciones de la fuente sonora.
- Homogeneidad y poca absorción acústica en cuanto a distribución de los materiales.

Sabine propone que los cálculos se deben realizar en condiciones de campo difuso que implican:

- Distribución isótropa y uniforme del campo acústico.
- La energía acústica se presenta por unidad de superficie y de tiempo constante.
- La densidad de energía acústica es constante sobre el recinto.

Por lo anterior, éste método es utilizado para todo recinto en donde el material absorbente está distribuido de manera uniforme y supone que el número de reflexiones es tal que la disminución de energía por absorción de los cerramientos se reparte de forma gradual sobre la totalidad del trayecto de las partículas sonoras, es decir, un descenso exponencial de la energía acústica como se muestra en la Figura 2.1.

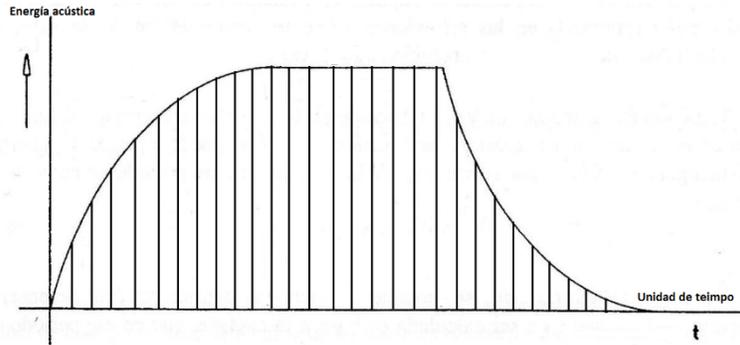


Figura 2.1 Comportamiento de la absorción de Sabine.

### 2.3. Método de Eyring

Este método es conocido como la fórmula de estudio de locales más absorbentes. Partiendo de la hipótesis de Sabine, que la energía acústica se pierde gradualmente y proporcionalmente al conjunto de la energía que queda en el recinto, Eyring propone una simplificación considerando que la pérdida por absorción en las reflexiones es discontinua y se produce a saltos, como se muestra en la Figura 2.2.

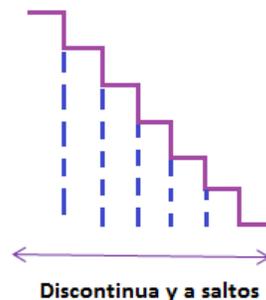


Figura 2.2 Comportamiento de la absorción de Eyring.

Este método es aplicable cuando los coeficientes de absorción sonora son de valores numéricos parecidos para todas las superficies, es decir, recintos muy absorbentes.

El modelo matemático está dado por:



$$T = 0.161 \times \frac{V}{-\sum S \times \ln(1-\alpha)} [\text{segundos}] \quad (2.2)$$

donde 0.161[segundos/m] es la constante de Sabine a 20°Celsius,  $V$  es el volumen [ $m^3$ ],  $S$  es el área [ $m^2$ ] y  $\alpha$  es el coeficiente de absorción sonora, si  $\alpha \ll 1$  para recintos vivos y  $\alpha = 1$  para recintos absorbentes.

#### 2.4. Método de Millington-Sette

Este método es usado cuando existe una gran variedad de materiales en el recinto y la diferencia entre los valores de los coeficientes de absorción también es grande.

El modelo matemático es:

$$T = 0.161 \times \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S \times \ln(1-\alpha)} [\text{segundos}] \quad (2.3)$$

donde 0.161[segundos/m] es la constante de Sabine a 20°Celsius,  $V$  es el volumen [ $m^3$ ],  $S$  es el área [ $m^2$ ] y  $\alpha$  es el coeficiente de absorción sonora.

#### 2.5. Sonómetro

El nivel de presión sonora provee información del espectro de los sonidos en un recinto, pero también se debe conocer su contenido energético a distintas frecuencias, es decir, el análisis de frecuencia de la señal.

Un sonómetro es un instrumento de medición directa del nivel de presión sonora en decibeles (dB). Indica el nivel acústico de las ondas sonoras que inciden sobre el micrófono que está integrado en el propio instrumento, es omnidireccional, de tamaño pequeño para no perturbar el campo sonoro, poco sensible a las variaciones de temperatura, humedad y campos magnéticos y eléctricos, suficientemente sensible para detectar niveles de presión sonora comprendidos entre 20 y 130 dB y cubrir un margen de 20 a 20000 Hz.

El nivel de sonido se visualiza en una pantalla digital y varía de acuerdo a la marca. Su composición general consta de cinco elementos básicos: micrófono, atenuador, calibrador, amplificador e instrumento de medición.

Frecuentemente, la escala de ponderación A es la más utilizada, está internacionalmente normalizada, además su curva de ponderación se ajusta a la respuesta del oído humano. La ponderación es un conjunto de filtros eléctricos los cuales sólo permiten pasar los

espectros de una cierta banda, los sonómetros comerciales trabajan con bandas de una octava, de acuerdo a la norma ISO 266 que se muestra en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1 Frecuencias centrales estandarizadas (ISO 266)

FRECUENCIAS CENTRALES DE LAS BANDAS OCTAVA [Hz]										
16	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000

Por lo general, para fines de diseño acústico se utilizan las seis bandas de octava centrales entre 125 Hz y 4000Hz. Se utilizará un sonómetro de propósito general, marca BENETECH, (ver Figura 2.3) con precisión adecuada para recintos cerrados para realizar las mediciones de campo. Las características del Sonómetro se muestran en la Tabla 2-2, lo que permite que éste sea adecuado para la experimentación.



Figura 2.3 Sonómetro Sound Level Meter.

Tabla 2-2 Parámetros técnicos.

Rango	30-130dB
Exactitud	±1.5dB
Respuesta en frecuencia	31.5Hz-8kHz
Resolución	0.1db

## 2.6. Aplicaciones para teléfono inteligente: Simuladores

### 2.6.1. Aplicación Sound Meter

Es una aplicación de medición del ruido/sonido inteligente para el iPhone (iOS 11) que permite realizar mediciones pre calibradas y fiables, proporciona con precisión el nivel de presión sonora (NPS) en el entorno, siendo una herramienta práctica y económica que permitirá la comparación de las mediciones que se realicen con el sonómetro. Las unidades que maneja son [dB]. La Figura 2.4 muestra la carátula inteligente en donde se observan las mediciones.



Figura 2.4 Carátula inteligente de la Aplicación Sound Meter del iOS 11.

### 2.6.2. Aplicación Rev Meter Pro

Es una aplicación que mide el tiempo de reverberación de una habitación. Estos valores serán comparados con los resultados de los cálculos del T.R. por los métodos mencionados anteriormente. En la Figura 2.5 se muestra un ejemplo de cómo se observan las mediciones del T.R. en la carátula inteligente.

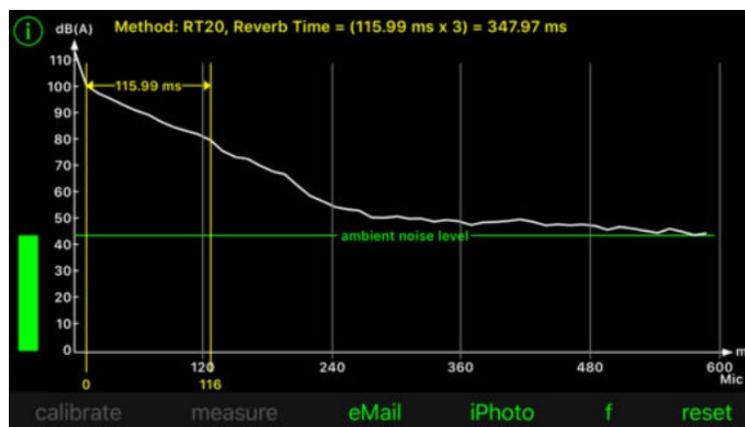


Figura 2.5 Imagen de la aplicación del iPhone 6s plus.

## 2.7. Características de cabinas de pruebas

Se diseñaron tres cabinas de pruebas bajo tres condiciones posibles:

- Acondicionado óptimo
- Fisurado superficialmente
- Agrietado y fisurado

Se utilizó un tablero de densidad media (DM) o madera MDF (Medium Density Fibreboard) de  $\frac{3}{4}$  de pulgada para representar los muros del recinto por ser un aglomerado tres veces más barato que la madera, tiene dureza, rigidez e índice de absorción adecuado para efectos del sonido. Está fabricado a partir de elementos fibrosos de madera prensados en seco y se aglutina con una resina sintética.

Las cabinas se acondicionarán con los materiales adecuados para que respondan como recintos bajo las tres condiciones óptimas, las cuales serán utilizadas para la medición del T.R. tanto en forma indirecta (cálculos) y de forma directa (aplicaciones) que serán las referencias para demostrar que se están comportando como un recinto real, un recinto con fisuras superficiales y grietas que no dañen la estructura y un recinto con grietas que pone en riesgo su estructura.

En la Figura 2.6 se muestra el prototipo de cabina de pruebas simulada en SOLIDWORKS en donde se observan una serie de perforaciones que servirán para realizar las mediciones con el sonómetro y las ranuras para el teléfono celular con las aplicaciones correspondientes para medir el TR y el NPS, siendo a su vez la representación de las grietas.

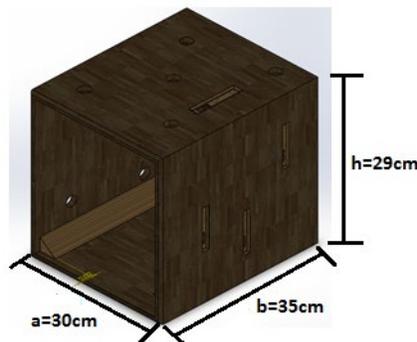


Figura 2.6 Prototipo de cabina pruebas SOLIDWORKS



Para determinar los tiempos de reverberación de cada una de las cabinas de prueba se requiere calcular el volumen total y las superficies de cada material utilizado como se muestra en la Tabla 2-3.

### 2.7.1. Cálculo del volumen real de las cabinas de pruebas

Basándose en la Figura 2.6 se calcula el volumen del cubo completo:

$$V1 = a \times b \times h[m^3] \quad (2.4)$$

Sustituyendo valores:

$$V1 = 30cm \times 35cm \times 29cm = 30450cm^3 = 0.03045m^3 \quad (2.5)$$

donde  $V1$  es el volumen del cubo completo [ $m^3$ ],  $a$  es el lado1 [ $m^2$ ],  $b$  es el lado2 [ $m^2$ ] y  $h$  es la altura [ $m^2$ ].

Tabla 2-3 Tiempo de reverberación óptimo de recintos.

Tipo de edificio	Local	Tiempo de Reverberación (T.R.)
Viviendas u oficinas	Salas de estar dormitorios, oficinas, zonas comunes	$\leq 1$ $\leq 1$ $\leq 1.5$
Hospitales	Zonas de estancias Zonas comunes Dormitorios	$1.5 \leq T.R. \leq 2$ $\leq 1$ $1.5 \leq T.R. \leq 2$
Escuelas	Aulas, salas de lectura Zonas comunes	$0.5 \leq T.R. \leq 1.9$ $1.5 \leq T.R. \leq 2$
Salas	Estudios de radiodifusión Sala de conferencias Cines Auditorios	$0.2 \leq T.R. \leq 1$ $0.8 \leq T.R. \leq 1.4$ $0.4 \leq T.R. \leq 0.8$ $1.1 \leq T.R. \leq 1.5$ $1.4 \leq T.R. \leq 2$

Como es un recinto con características irregulares en su interior, se le restan las dos columnas triangulares, considerando la Figura 2.7 se obtiene el volumen de las columnas,

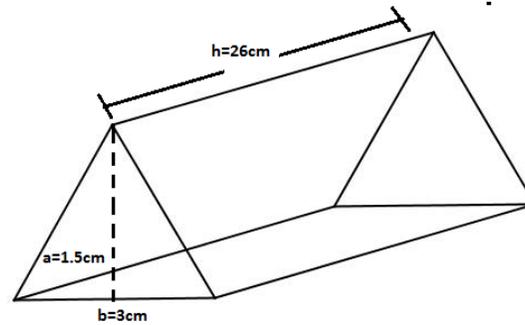


Figura 2.7 Columnas triangulares dentro de la cabina de prueba.

$$V2 = A_B \times h [m^3] \quad (2.6)$$

donde  $V2$  es el volúmen de la columna [ $m^3$ ],  $A_B$  es el área del triángulo base [ $m^2$ ] y  $h$  es la altura del prisma [ $m$ ].

Si,

$$A_B = \frac{b \times a}{2} [m^2] \quad (2.7)$$

Sustituyendo:

$$A_B = \frac{3cm \times 15cm}{2} = 2.25cm^2 \quad (2.8)$$

Sustituyendo en la Ecuación 2.6 se tiene que:

$$V2 = 2.25cm^2 \times 26cm = 58.5[cm^3] = 5.85^{-5}m^3 \quad (2.9)$$

Restándole dos veces  $V2$  a  $V1$  tenemos el volumen real de las cabinas de prueba:

$$V_T = V1 - (2 \times V2) = 0.03045m^3 - 2(5.85^{-5}m^3) = 0.030333m^3 \quad (2.10)$$

### 2.7.2. Cálculo de Superficies de las cabinas de pruebas

Para el caso de este proyecto, se utilizaron dos tipos de superficies, la primera de madera MDF de  $\frac{3}{4}$  de pulgada y otra con panel de esponja acústica de 35 mm de espesor y densidad de  $18 \text{ kg/m}^3$ , con ondulación de 3-4cm como se muestra en la Figura 2.8. Se colocaron de forma estratégica y bajo experiencias previas, de tal modo que se asemeje el comportamiento a un recinto real.



Figura 2.8 Materiales d superficies de las cabinas de prueba.

Se calculó la superficie para cada material:

**Superficie de madera**  $S1 = Superficie\ de\ madera\ [m^2]:$

$$S1 = 4(25cm \times 29cm) = 2900[cm^2] = 0.29m^2 \quad (2.11)$$

**Superficie de espuma acústica**  $S2 = Superficie\ de\ espuma\ acústica\ m^2:$

$$S2 = 2(35cm \times 29cm) = 1624[cm^2] = 0.1624m^2 \quad (2.12)$$

Como se observa en la Figura 2.8, las cabinas tienen una serie de huecos y aberturas por las cuales se realizaron las mediciones y asemejan las grietas y fisuras en estudio.

## 2.8. Caracterización de cabinas de prueba

La caracterización de las cabinas de prueba bajo condiciones controladas se realizó con el uso de la cámara anecoica de los laboratorios de acústica de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica ESIME Zacatenco, ver Figura 2.9.



Figura 2.9 Cabina anecoica ESIME Zacatenco IPN.





### 2.8.1. TR calculado con condiciones controladas

Para validar si las cabinas de prueba responden como un recinto y cerrado, se considera la Tabla 2.3, para los valores de uso para el que fue diseñado el recinto, volumen del recinto, naturaleza de la fuente sonora y rango de frecuencias: La flecha verde indica el rango en el que se encuentran las cabinas de prueba.

Usando la Ecuación 2.1 que corresponde al Método de Sabine, y sustituyendo los valores de volumen total real, superficies calculadas y la Tabla 1.2 para los coeficientes de absorción, se obtuvieron los resultados de la Tabla 2-4.

Tabla 2-4 Valores del T.R. con Fórmula de Sabine.

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
T.R.	1.92	1.46	1.8	2	2	2.1

Para una mejor interpretación de resultados, se compara la Figura 2.12 con la curva de respuesta en frecuencia del oído humano (ver Figura 1.1), que debe responder al rango de valores mencionados en la Tabla 2.3. Como se observa en la gráfica, la respuesta está dentro de los valores óptimos que se mencionan anteriormente y se demuestra que la fórmula responde a todo recinto en donde el material absorbente está distribuido de manera uniforme.

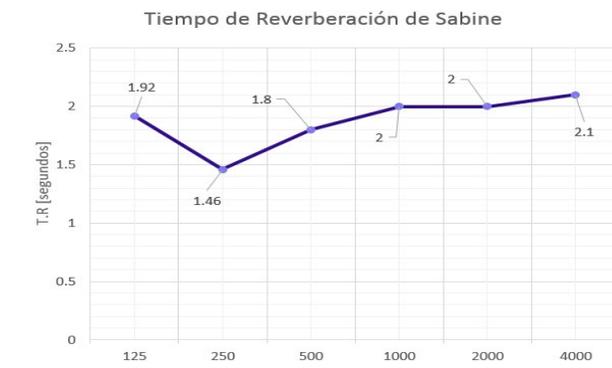


Figura 2.12 Respuesta del T.R. de Sabine.

Haciendo uso de la Ecuación 2.2 que corresponde al Método de Eyring, y sustituyendo los valores de volumen total real, superficies calculadas y la Tabla 1.2 para los coeficientes de absorción, se obtuvieron los resultados de la Tabla 2-5.



Tabla 2-5 Valores del T.R. utilizando fórmula de Eyring.

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
T.R.	1.46	1.37	1.37	1.37	1.38	1.39

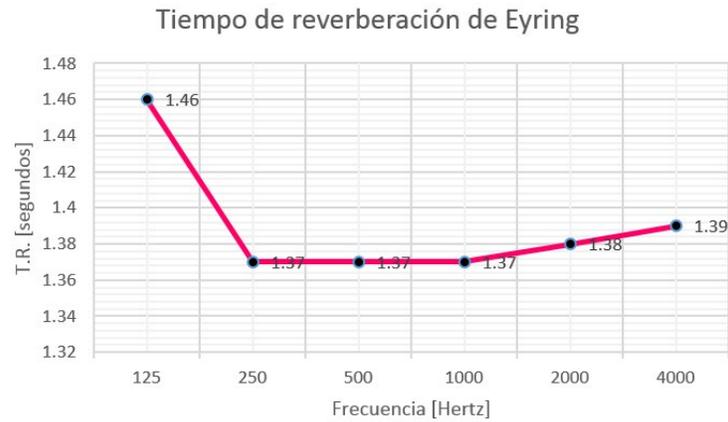


Figura 2.13 Respuesta del T.R. de Eyring.

Como se puede observar en la Figura 2.13, los valores caen por debajo de 1.4 segundos que es el rango inferior en la Tabla 2.3, esto sucede porque la fórmula está diseñada para recintos muy absorbentes y en el caso del proyecto no es así.

Haciendo uso de la Ecuación 2.3, se obtiene la Tabla 2-6 en donde se presentan los valores calculados del T.R. con el modelo de Millington Sette.

Tabla 2-6 Valores del T.R. con fórmula de Millington sette.

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
T.R.	3.1	1.5	1.7	1.2	0.65	0.67

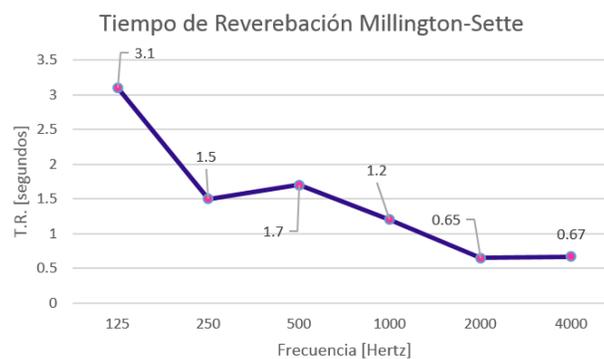


Figura 2.14 Respuesta del T.R. de Millington Sette.



“Método acústico para la detección de grietas y fisuras no visibles en recintos cerrados.”



---

En este caso, se puede observar en la Figura 2.14, que los valores están totalmente fuera del rango que se está manejando de acuerdo a la Tabla 2.3, esto es correcto ya que la fórmula de Millington- Sette sólo responde para coeficientes de absorción muy grandes y para una gran diversidad de materiales.

# Capítulo 3



## 3. Mediciones y análisis de datos

### 3.1. Introducción

En éste capítulo se describe el sistema propuesto que permite la demostración del método usado. Se muestran las mediciones realizadas en cada una de las cabinas de prueba, así como en un laboratorio y una habitación residencial, tomando en cuenta las condiciones óptimas de un recinto, así como un recinto con fisuras y grietas. Se presentan los análisis probabilísticos para la obtención de la medición más real de acuerdo a la tendencia de repetición arrojada. Cada una de las mediciones se realizaron envueltas en ruido blanco, el cual contiene todas las frecuencias en una misma potencia, ninguna sobresale por encima de otra por lo que es un sonido constante suma de todas las frecuencias; a su vez se involucraron en ruido rosa, el cual es una señal de valores aleatorios, con menos amplitud para las altas frecuencias en comparación del ruido blanco.

### 3.2. Fórmulas para el análisis probabilístico

Se utilizaron las siguientes ecuaciones para el muestreo probabilístico de los datos adquiridos.

#### Media

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (3.1)$$

donde  $\bar{X}$  es la media,  $X_i$  son los valores en la población y  $N$  es el tamaño de la población.

#### Desviación Estándar

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.2)$$

donde  $\sigma_x$  es la desviación estándar,  $\bar{X}$  es la media,  $X_i$  son los valores en la población y  $N$  es el tamaño de la población.

#### Desviación estándar de la media

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \quad (3.3)$$



donde  $\sigma_{\bar{x}}$  es la desviación estándar de la media,  $\sigma_x$  es la desviación estándar y  $N$  es el tamaño de la población.

### **Varianza**

$$\delta^2 = \frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{N} \quad (3.4)$$

donde  $\delta^2$  es la varianza,  $X_i$  son los valores en la población,  $\bar{X}$  es el promedio y  $N$  es el tamaño de la población

### **Tendencia**

Se graficaron las líneas de tendencia de los datos mediante una línea que puede predecir valores futuros o suaviza las fluctuaciones en los datos.

### **Rango**

Nos permite darnos cuenta del intervalo entre los valores mínimo y máximos de cada muestra.

### **Mediana**

Nos proporciona el valor central de las mediciones ordenadas.

### **Valor máximo**

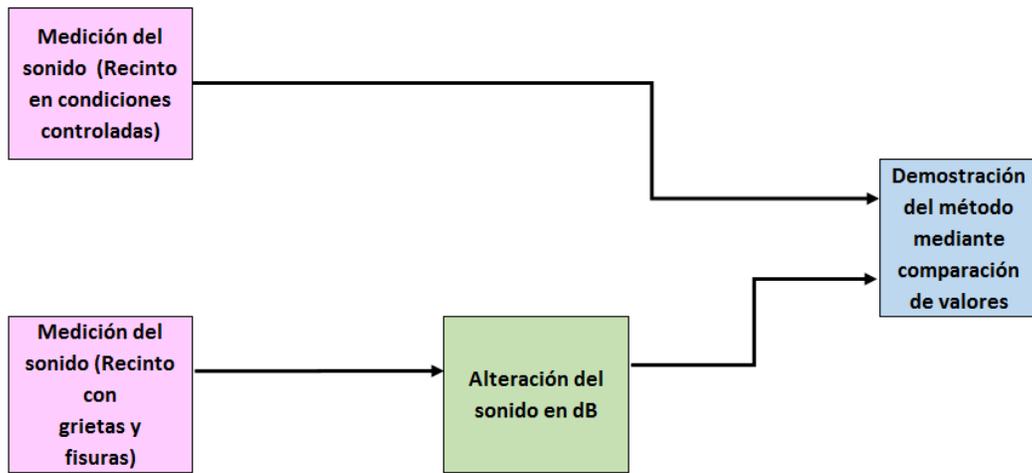
Valor máximo en las mediciones ordenadas.

### **Valor mínimo**

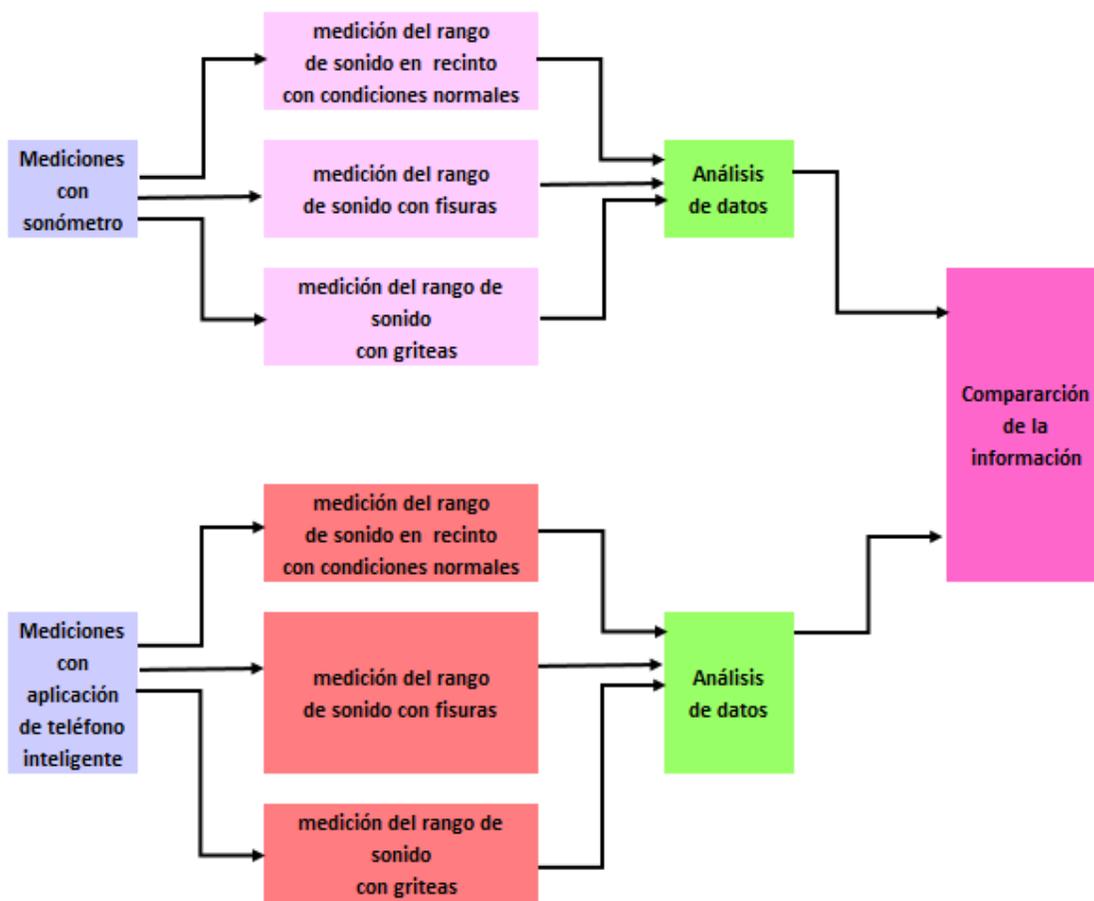
Valor mínimo en las mediciones ordenadas.

## **3.3. Sistema Propuesto**

El sistema propuesto se presenta en la Figura 3.1(a), éste medirá el sonido mediante un sonómetro y la app (aplicación) Sound Meter para iOS 11 del iPhone 6s plus en condiciones controladas durante diferentes tiempos y posiciones (ver Figura 3.1(b)) en el caso de: un recinto de condiciones óptimas y en un recinto similar, pero con grietas y fisuras. Este sistema permitirá observar las diferencias entre los patrones de sonido medidos y las variaciones que se detecten.



(a)



(b)

Figura 3.1 Sistema propuesto: a) Diagrama a bloques del sistema y b) Mediciones.



### 3.4. Mediciones de cabinas de pruebas

#### 3.4.1. Cabina en condiciones óptimas

Se realizaron mediciones en la cabina de pruebas en condiciones óptimas de acuerdo a la Figura 3.1(b), esto es, durante todos los días de una semana en horario de 10:00 horas a 20:00 horas en intervalos de 1 hora. en treinta diferentes posiciones, con ruido blanco y posteriormente con ruido rosa a 125Hz y 250Hz. Primero, se midió el nivel del sonido con el sonómetro y posteriormente con la aplicación Sound Meter para un tiempo de reverberación TR20 y TR30.

En las Tablas 3.1 y 3.2 se muestran algunas de las mediciones adquiridas mediante el sonómetro y las Tablas 3.3 y 3.4 se presentan mediciones adquiridas mediante la app. Sound Meter. De los resultados presentados en las Tablas 3-1 a 3-4 se concluye que, al obtener los valores mínimos, éstos no presentan grandes variaciones en sus valores tanto en mediciones con sonómetro y la aplicación Sound Meter. Sin embargo, para los valores máximos si existe una diferencia de hasta 10dB entre las mediciones de sonómetro y la aplicación y se presentan diferencias entre ellas, esto puede ser debido a la colocación de los objetos como muebles en cada habitación y los valores pequeños se disipan mucho más rápido sin tener mayor persistencia, no así cuando se presentan más reflexiones y se suman lo que se capta con mayor duración y por lo tanto mayor valor.

Tabla 3-1 Mediciones en cabina de pruebas óptima T.R. 20 a 250Hz con ruido rosa utilizando sonómetro.

HORA	MEDICIÓN 1		MEDICIÓN 2		MEDICIÓN 3		MEDICIÓN 4		MEDICIÓN 5		MEDICIÓN 6	
	DECIBELES											
	MIN	MÁX										
10:00	36.7	64.8	37.1	51	37.3	54.2	36.6	53.3	36.6	48.3	37.2	66.6
11:00	36.7	65.9	36.8	65.1	36.8	65	37	66.7	36.7	67.4	36.9	65.5
12:00	37	52	37.7	53.4	36.6	52.7	37.1	55.6	36.9	67.7	37.1	67.5
13:00	37	58	38.1	63.3	38	50.6	37.4	59.7	37.4	54.6	40.2	69.9
14:00	37.1	51.8	37.7	66.8	37.9	61.6	38	53.7	38	62.6	36.9	67
15:00	37.9	72.2	41.9	63.9	37.7	63.8	37.5	66.6	37.7	67.6	38.2	64.8
16:00	37.4	66.3	37.6	55.6	37.7	64.8	37	56.3	37.2	53.1	37.1	49.9
17:00	37.9	66.3	37.3	54.5	39	64.6	37.3	65	36.9	51.7	37.4	49



Tabla 3-2 Mediciones en cabina de pruebas óptima T.R. 20 a 125 Hz con ruido blanco utilizando sonómetro.

HORA	MEDICIÓN 1		MEDICIÓN 2		MEDICIÓN 3		MEDICIÓN 4		MEDICIÓN 5		MEDICIÓN 6	
	DECIBELES											
	MIN	MÁX										
10:00	38.6	64.9	39.5	52	39.9	67.3	38.2	61.9	39.3	69	38.3	66.4
11:00	38	68	36.9	54.9	38	53.2	38.2	66.8	37.5	53.9	37.3	65.8
12:00	37.2	72.9	37.5	65	40.9	64.2	39.1	66.8	37.3	65.2	37.3	62.8
13:00	36.7	58.1	37.3	67.3	37.6	56.5	37	64.9	36.3	65.8	37.3	48.7
15:00	36.8	55.5	37.1	66.1	37.6	56.5	37	64.9	36.3	65.8	37.3	48.7
18:00	36.9	67.6	37.3	53.2	37.1	51.9	36.9	60.7	37.1	59.8	37.7	64.2
19:00	36.6	54	37	51.7	37.2	65	37	61.2	36.9	65	37.1	65.4
20:00	36.8	54	37	63.6	37.2	66.8	36.9	64.1	36.8	55.1	37.2	65.4

Tabla 3-3 Mediciones en cabina de pruebas óptima T.R. 20 a 250Hz con ruido blanco utilizando la aplicación Sound Meter.

HORA	MEDICIÓN 1		MEDICIÓN 2		MEDICIÓN 3		MEDICIÓN 4		MEDICIÓN 5		MEDICIÓN 6	
	DECIBELES											
	MIN	MÁX										
09:00	41.5	57.1	41	63.8	45.7	65.8	41.6	51.4	49.2	60.1	49.5	57.4
10:00	48.2	54.5	46.6	54.5	47.1	64.7	47.6	65.3	46.3	53.5	41.5	57.1
15:00	40.7	69.2	46.5	53	46.1	66.4	41.5	63.2	41.6	53	40.7	66.6
16:00	47.4	61	46.6	64	49	74.8	46.8	65.9	45.5	58.6	46.1	67.8

Tabla 3-4. Mediciones en cabina de pruebas óptima TR30 125Hz con ruido blanco utilizando la aplicación Sound Meter.

HORA	MEDICIÓN 24		MEDICIÓN 25		MEDICIÓN 26		MEDICIÓN 27		MEDICIÓN 28		MEDICIÓN 29	
	DECIBELES											
	MIN	MÁX										
10:00	38.2	50.2	38.3	55.8	37.8	55	39.3	65	39.1	69.5	38.9	63.7
11:00	38.2	50.2	38.3	55.8	37.8	55	39.3	65	39.1	69.5	38.9	63.7
12:00	36.9	57.5	36.7	49	36.3	55.3	37	67.3	36.7	55	37.3	51.2
13:00	36.9	57.5	36.7	49	36.3	55.3	37	67.3	36.7	55	37.3	51.2
15:00	36.9	57.5	36.7	49	36.3	55.3	37	67.3	36.7	55	37.3	51.2
18:00	37.4	53	36.6	66.6	37.3	65.8	36.6	62.2	37.1	56.6	36.7	62.6
19:00	37.5	62.5	36.6	60.3	36.8	63.3	37.2	67.4	37.1	65.6	37.7	66.6
20:00	36.8	67.9	36.8	68.3	36.9	54.3	36.6	66.8	36.8	48.2	37	63.9



### 3.4.2. Cabina con grietas

Se realizaron mediciones en la cabina de pruebas con grietas de acuerdo a la Figura 3.1(b). En las Tablas 3-5 a 3-8 se presentan algunas mediciones adquiridas, en donde se observa el decremento en los valores en comparación con la cabina sin grietas, tanto en valores mínimos como máximos y a su vez con respecto a las mediciones realizadas por el sonómetro y la aplicación. Lo anterior, se debe a que, al encontrarse la cabina acondicionada adecuadamente, el sonido externo no entró, si no que se presentó fuga del sonido.

Tabla 3-5. Mediciones en cabina de pruebas con grietas TR20 250Hz con ruido blanco utilizando sonómetro

HORA	MEDICIÓN 1		MEDICIÓN 2		MEDICIÓN 3		MEDICIÓN 4		MEDICIÓN 5		MEDICIÓN 6	
	DECIBELES											
	MIN	MÁX										
10:00	36.7	64.8	37.1	51	37.3	54.2	36.6	53.3	36.6	48.3	37.2	66.6
11:00	36.7	65.9	36.8	65.1	36.8	65	37	66.7	36.7	67.4	36.9	65.5
12:00	37	52	37.7	53.4	36.6	52.7	37.1	55.6	36.9	67.7	37.1	67.5
13:00	37	58	38.1	63.3	38	50.6	37.4	59.7	37.4	54.6	40.2	69.9
14:00	37.1	51.8	37.7	66.8	37.9	61.6	38	53.7	38	62.6	36.9	67
15:00	37.9	72.2	41.9	63.9	37.7	63.8	37.5	66.6	37.7	67.6	38.2	64.8
16:00	37.4	66.3	37.6	55.6	37.7	64.8	37	56.3	37.2	53.1	37.1	49.9
17:00	37.9	66.3	37.3	54.5	39	64.6	37.3	65	36.9	51.7	37.4	49

Tabla 3-6. Mediciones en cabina de pruebas con grietas TR20 125Hz con ruido rosa utilizando sonómetro.

HORA	MEDICIÓN 1		MEDICIÓN 2		MEDICIÓN 3		MEDICIÓN 4		MEDICIÓN 5		MEDICIÓN 6	
	DECIBELES											
	MIN	MÁX										
12:00	37.5	50.4	37.2	60.3	37	68.7	37.4	66.4	37.5	66.5	37.3	65.9
13:00	39.3	68.1	40.2	64.4	40.7	70.8	39.5	65.7	39.1	67.1	38.4	71.3
14:00	38.3	66.2	37.4	56.2	39.1	67.4	39.9	66.7	39.9	59.6	39.2	66.6
15:00	36.6	59.9	36.2	63.4	36.9	53.4	36.7	55.2	36.8	58.8	38.2	54.5
16:00	36.3	64.3	36.8	59.9	36.9	58.6	36.9	63.9	37.1	65.1	37.5	66.3
17:00	39.7	67.3	39.6	59.1	36.9	58.6	36.9	63.9	37.1	65.1	37.5	66.3

Tabla 3-7. Mediciones en cabina de pruebas con grietas TR20 125Hz con aplicación Sound Meter

HORARIO	MEDICIÓN 15		MEDICIÓN 16		MEDICIÓN 17		MEDICIÓN 18		MEDICIÓN 19	
	DECIBELES									
	MIN	MÁX								
09:00	51.9	63.5	51	65.8	50.4	61	56.2	58.7	50.7	65.4
10:00	47.8	52.8	48.1	57.6	48.4	55	53	57	49.5	59.3
15:00	41.7	64.7	48.2	53.2	45.2	68	49.5	65.1	47	53.1
16:00	46.5	53.6	50.4	69.7	51.3	66.8	54.6	65.5	49.8	68.9

Tabla 3-8. Mediciones en cabina de pruebas con grietas TR20 250Hz con aplicación Sound Meter

HORA	MEDICIÓN 1		MEDICIÓN 2		MEDICIÓN 3		MEDICIÓN 4		MEDICIÓN 5		MEDICIÓN 6	
	DECIBELES											
	MIN	MÁX										
09:00	41.5	57.1	41	63.8	45.7	65.8	41.6	51.4	49.2	60.1	49.5	57.4
10:00	48.2	54.5	46.6	54.5	47.1	64.7	47.6	65.3	46.3	53.5	41.5	57.1
15:00	40.7	69.2	46.5	53	46.1	66.4	41.5	63.2	41.6	53	40.7	66.6
16:00	47.4	61	46.6	64	49	74.8	46.8	65.9	45.5	58.6	46.1	67.8

### 3.4.3. Cabina con fisuras

Mediante la cabina de pruebas con fisuras se realizaron mediciones de acuerdo a la Figura 3.1(b). La observación obtenida de estas mediciones es que no presentan cambios con respecto a los valores medidos mediante la cabina en condiciones óptimas.

## 3.5. Mediciones de campo

### 3.5.1. Mediciones de Laboratorio de Señales y Sistemas de ESIME

#### Zacatenco

Se realizaron mediciones en el laboratorio de Señales y Sistemas de ESIME Zacatenco, en diferentes posiciones y alturas, de lunes a viernes en un horario de 10:00 a 20:00 hrs. En este apartado se presentan solo las mediciones realizadas a las 9:00, 12:00 y 17:00 horas. En las Tablas 3-9 y 3-10 se muestran las mediciones obtenidas y se mencionan las condiciones contempladas.



Tabla 3-9 Mediciones en día lunes por la mañana, medio día y tarde con sonómetro.

12:00hrs		17:00hrs		9:00hrs	
DECIBELES					
Lunes	Lunes	Lunes	Lunes	Lunes	Lunes
Con alteración	Sin alteración	Con alteración	Sin alteración	Con alteración	Sin alteración
66.8	52.4	51.9	51.6	52.8	79
67.2	53.1	51.1	54.2	52.3	63.8
67.4	66.8	51.9	52.1	53.4	47.8
56.3	51.3	51.6	59.4	48.9	48.8
49.8	66.7	52.2	65.3	49.7	47.4
72.1	65.3	51.9	66.7	49.5	47.6
51.1	51.4	51.2	65.9	53.1	47.5
72.4	65.6	51.8	65.63	56.2	47.4
67.3	63	51.7	69.2	53.3	47.6
60.1	65.1	50.9	52	51.7	48.1
70.4	51.2	51.3	53.4	49.2	47.6
55.2	54.3	51.1	64.3	49.6	47.2

Tabla 3-10 Mediciones en día lunes por la mañana, medio día y tarde con aplicación Sound Meter.

medio día				tarde				mañana			
Decibeles											
lunes		lunes		lunes		lunes		lunes		lunes	
Con alteración		Sin alteración		Con alteración		Sin alteración		Con alteración		Sin alteración	
min.	máx.										
64.15	76.41	64.61	77.43	59.89	64.38	62.19	66.01	60.13	87.09	60.63	72.21
68	94.9	63.07	64.57	60.85	75.67	62.44	67.69	60.13	65.16	66.33	72.18
64.75	67.24	59.57	65.69	60.02	75.46	62.57	69.82	60.59	64	58.75	65.65
65.69	67.84	63.54	70.9	61.65	69.22	63.63	70.02	60.44	67.96	60.48	64.38
61.84	92.41	59.07	67.66	70.46	77.7	62.71	66.01	61.01	67.18	62.27	64.21
62.45	77	58.87	75.2	60.62	73.7	73.84	78.3	59.8	68.07	59.56	68.46
64.53	74.49	80.63	84.53	61.94	65.28	64	65.34	60.14	64.2	59.69	66.52
64.13	73.21	59.09	75.54	62.78	66.27	60.84	62.45	62.32	71.36	60.94	70.41
64.28	72.79	74.74	81.51	62.84	71.02	77.79	88.21	60.89	75.27	68.79	81.6
62.59	76.37	60.36	74.72	59.99	65.9	69.71	80.2	60.16	68.52	59.59	64.6
64.75	67.87	61.81	74.86	66.37	69.49	62.89	70.22	61.56	70.71	61.07	69.25
62.81	67.4	61.46	85.17	64.77	75.72	65.92	68.24	60.37	70.54	60.04	69.52



### 3.5.2. Mediciones en habitación sin grietas y con grietas de 1cm, 5cm, 10cm y 30cm.

Se utilizó una habitación de casa habitación de dimensiones de 16m<sup>2</sup> midiendo en 30 puntos diferentes, con alturas de 1m y 1.5m durante una semana en horario de 10:00 a 20:00 horas en treinta posiciones diferentes, con ruido blanco y después con ruido rosa a 125Hz y 250Hz primero se midió el nivel del sonido con el sonómetro y posteriormente con la aplicación Sound Meter en condiciones reales y con grietas de 1cm, 5cm, 10cm y 30cm. La Tabla 3-11 muestra algunas mediciones realizadas en condiciones reales, en donde se observa que los valores que se presentan son constantes en el rango medido.

Tabla 3-11 Mediciones en habitación sin grietas a las 9:00hrs en día lunes con sonómetro (S) y aplicación Sound Meter (SM) a 125Hz.

Mediciones en habitación sin grietas							
Decibeles							
Posición 1		Posición 2		Posición 3		Posición 4	
S	SM	S	SM	S	SM	S	SM
37.1	37.3	36.4	36.7	39.1	37.4	36.6	36.9
36.6	36.7	36.3	36.4	36.6	36.8	36.5	36.4
36.7	36.5	36.8	36.5	36.8	36.7	36.7	36.9
37.5	36.6	36.9	36.4	36.7	38.1	37.3	37.3
37	36.8	36.3	36.5	36.6	40.9	36.6	36.8
36.9	36.5	36.7	36.6	36.7	37.9	37.9	37.1
36.7	37.5	36.3	36.4	37.1	39.8	36.5	36.4
40.1	36.8	36.5	36.6	36.9	37	37.5	36.9
36.8	36.7	36.4	36.4	36.8	37.1	37.2	36.6
36.7	36.8	36.5	36.5	36.9	36.7	37.3	36.8
36.6	37.3	36.4	36.4	37	36.6	37.6	36.3
36.7	36.8	36.5	36.3	36.6	38.1	36.5	36.7
36.7	36.7	36.4	36.5	36.7	36.9	36.6	36.5
36.5	36.6	36.3	36.4	36.8	36.8	37.5	37
38.7	36.7	36.5	36.3	36.6	37	36.4	37.7
37.2	36.9	36.6	36.4	36.6	37.1	36.5	36.7
36.7	36.6	36.3	36.5	37.1	36.5	36.6	37.3
37.3	36.8	36.6	36.4	36.7	36.7	36.7	37.2
37.1	36.7	36.4	36.3	36.6	36.7	37.1	36.5
37.3	36.8	36.3	36.6	36.9	36.6	36.6	36.6



La Tabla 3-12 muestra algunas mediciones en la misma habitación con alteraciones generadas con una ventana de 40 x 50 cm, abriéndola a 1cm, 5cm, 10cm y 30 cm. en donde se observa que para las grietas de 1cm, 5cm y 10 cm los valores responden a un rango muy similar al de las mediciones sin grietas, no así con los valores médicos con grietas de 30cm, en donde su rango desciende casi 1dB.

*Tabla 3-12 Mediciones con alteraciones a las 9:00 horas en día lunes, con sonómetro (S) y aplicación Sound Meter (SM) a 125Hz.*

Mediciones con simulación de grietas							
Decibeles							
Habitación con grieta 1cm		Habitación con grieta 5cm		Habitación con grieta 10cm		Habitación con grieta 30cm	
S	SM	S	SM	S	SM	S	SM
37.1	37.1	38.6	38.9	37.2	37.7	36.7	36.7
37.3	38.3	37.5	37.2	37	38.7	36.6	36.4
37	36.5	37.8	36.7	36.8	37.2	36.7	36.7
37.1	36.7	37.4	36.4	37	36.6	36.6	36.6
37.5	36.6	37.1	36.5	37.1	36.7	36.7	37
38.7	36.5	37.3	36.7	37	37.5	37.9	37.3
37	36.6	37	36.6	37.3	36.6	38	36.8
37.7	36.7	37.4	36.7	36.9	38.1	36.9	36.5
37.2	36.4	36.9	36.4	37.1	36.7	36.4	36.7
37.1	36.6	37	36.5	36.9	36.6	36.9	36.6
37	36.7	37.1	36.4	37.2	36.5	36.7	36.4
37.3	37.3	36.9	36.7	36.9	36.7	36.9	36.7
37.4	36.3	37	36.6	37.2	36.8	36.6	36.6
37.1	36.8	36.8	37.1	37.1	37	36.7	36.5
37	36.6	37	36.6	37.2	37.5	36.8	36.8
37.3	36.5	36.9	36.9	37.3	36.7	36.8	36.6

Finalmente, la Tabla 3-13 presenta los rangos de caracterización finales tomando el máximo y mínimo de las mediciones obtenidas anteriormente. Aquí se puede observar que es posible detectar grietas en recintos utilizando el método propuesto.



Tabla 3-13 Rangos de caracterización de habitación de pruebas.

Rangos de habitación [dB]		
mínimo	máximo	pruebas
36.3	40.9	sin grietas
36.3	38.7	1cm
36.4	38.9	5cm
36.5	38.7	10cm
36.4	38	30cm

### 3.6. Análisis probabilístico de las mediciones obtenidas en las cabinas de pruebas

#### 3.6.1. Cabina en condiciones óptimas

Se realizó el muestreo probabilístico de los datos medidos bajo las condiciones mencionadas en la sección 3.3.1. En la Tabla 3-14 se muestran los resultados medidos con sonómetro (S) y la aplicación Sound Meter (SM), en la cabina en condiciones óptimas con ruido rosa a 250Hz. En las Figuras 3.2 y 3.3 se muestran las gráficas de los resultados del rango y la tendencia de mediciones usando el sonómetro y la aplicación Sound Meter.

Tabla 3-14 Resultados de análisis para cabinas en condiciones óptimas a 250Hz con ruido rosa medido con sonómetro (S) y la aplicación Sound Meter (SM).

ANALISIS	S	SM
MEDIA	47.3dB	37.21 dB
DESVIACIÓN ESTANDAR	7.6dB	0.48 dB
VALOR MAXIMO	54.6dB	37.90 dB
VALOR MINIMO	36.6dB	36.70 dB
DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA MEDIA	7.1dB	0.39 dB
VARIANZA	69.36dB	0.23 dB
TENDENCIA	38.05dB	36.60 dB
MEDIANA	51.8dB	37dB

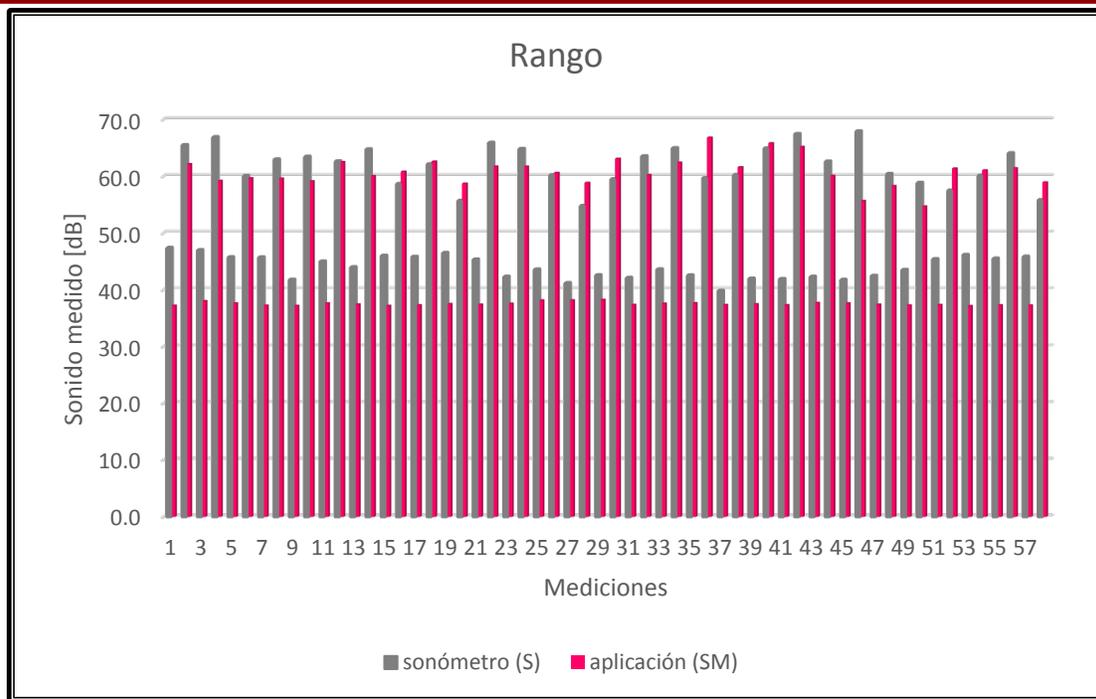


Figura 3.2 Gráfica del Rango de clase de cabina en condiciones óptimas a 250 Hz con ruido rosa medido con sonómetro (S) y aplicación Sound Meter (SM)

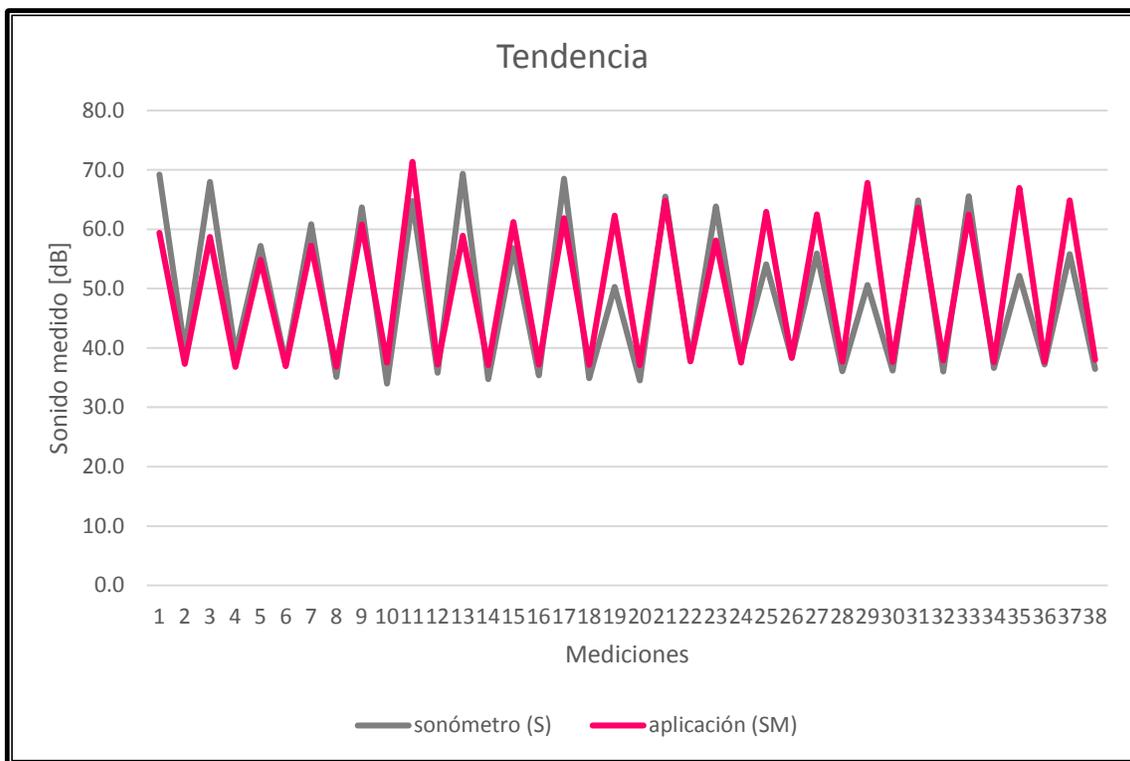


Figura 3.3 Gráfica de la tendencia de cabina en condiciones óptimas a 250Hz, con ruido rosa medido con sonómetro (S) y aplicación Sound Meter (SM).



De los resultados obtenidos se observa una diferencia en amplitud entre las mediciones realizadas con el sonómetro con respecto a las obtenidas con la aplicación Sound Meter pero se conserva la forma de la señal. Esto puede deberse al tipo de micrófono que tiene el aparato de medición con respecto al micrófono que tiene el teléfono inteligente.

### 3.6.2. Cabinas con grietas

El muestreo probabilístico de los datos adquiridos se obtuvo bajo las condiciones mencionadas en la sección 3.3.2. La Tabla 3-15 presenta los resultados adquiridos mediante sonómetro y Sound Meter en la cabina con grietas envuelta con ruido rosa a 250Hz. Las Figuras 3.4 y 3.5 presentan las gráficas de los resultados del rango y la tendencia de mediciones. De los resultados reportados en este apartado se concluye que no existen variaciones significativas entre las mediciones realizadas con el sonómetro con respecto a las realizadas con la aplicación Sound Meter en el caso de cabinas con grietas.

Tabla 3-15 Resultados de análisis para cabinas con grietas a 250Hz con ruido rosa medido con sonómetro (s) y la aplicación Sound Meter (SM)

ANALISIS	S	SM
MEDIA	49.2dB	49.17dB
DESVIACIÓN ESTANDAR	12.58dB	12.58dB
VALOR MÁXIMO	72.2dB	72.2dB
VALOR MINIMO	36.6dB	36.6dB
DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA MEDIA	11.67dB	11.67dB
VARIANZA	158.28dB	158.28dB
TENDENCIA	49.86dB	49.86dB
MEDIANA	46.2dB	46.25dB

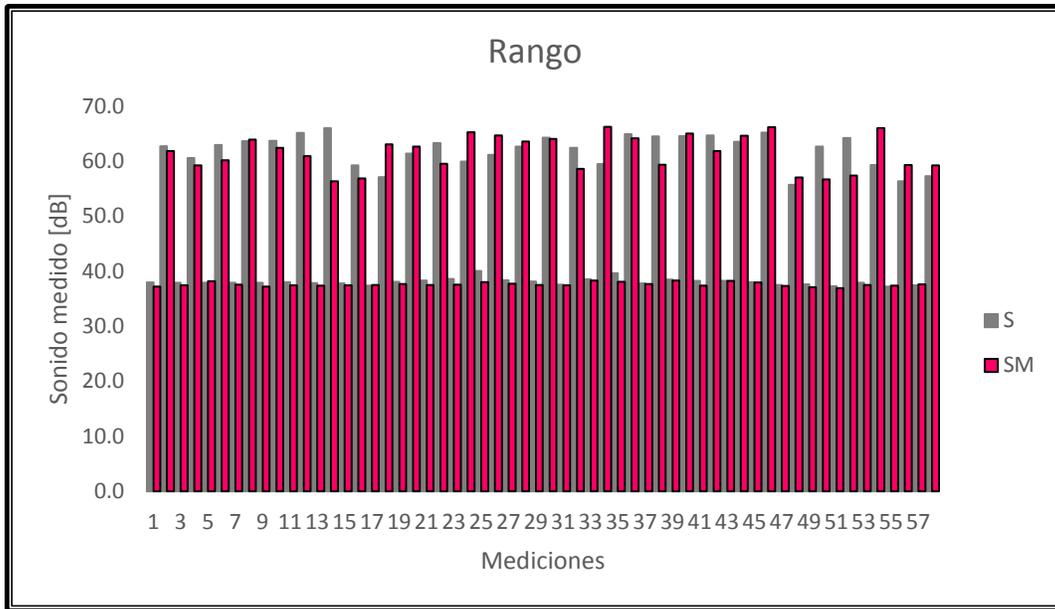


Figura 3.4 Gráfica del Rango de clase de cabina con grietas a 250 Hz con ruido rosa medido con sonómetro (S) y aplicación Sound Meter (SM).

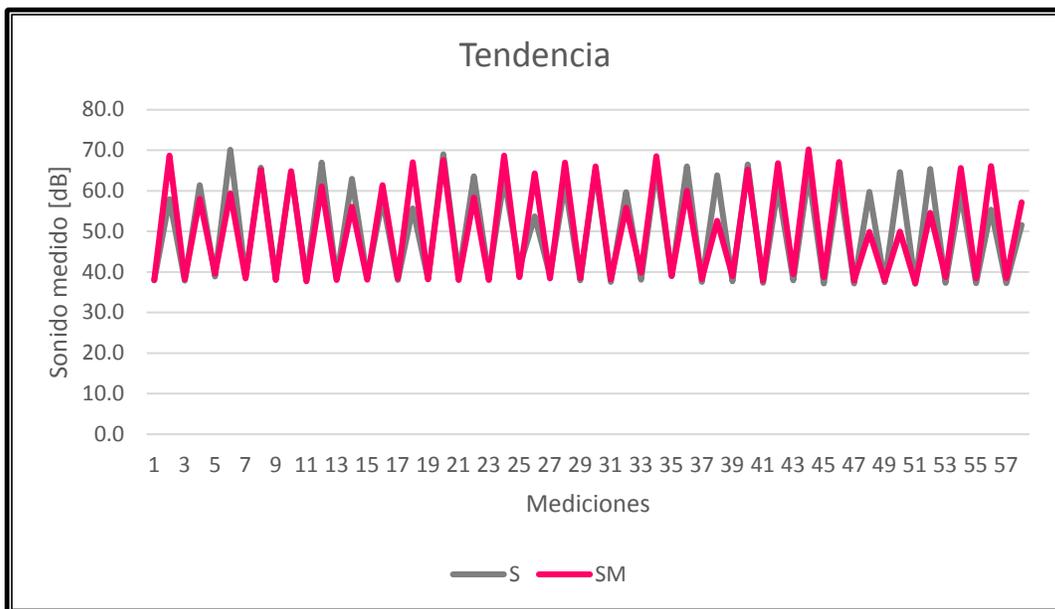


Figura 3.5 Gráfica de la tendencia de cabina con grietas a 250Hz, con ruido rosa medido con sonómetro (S) y aplicación Sound Meter (SM).



### 3.7. Análisis probabilístico de los datos obtenidos en mediciones de campo.

#### 3.7.1. Laboratorio de Señales y Sistemas de ESIME Zacatenco

Se realizó el muestreo probabilístico de los datos medidos bajo las condiciones mencionadas en la sección 3.4.1, En la Tabla 3-16 se ejemplifican los resultados medidos con sonómetro en el laboratorio de señales y sistemas de ESIME Zacatenco en condiciones de actividades normales en día lunes enmascarado con ruido rosa a 250Hz. En las Figuras 3.6 y 3.7 se muestran las gráficas de los resultados del rango y la tendencia de mediciones.

Tabla 3-16 Resultados del análisis de datos obtenido en el laboratorio de señales y sistemas de ESIME Zacatenco en día lunes a 250Hz con ruido rosa medido con sonómetro (S) y la aplicación Sound Meter (SM).

ANALISIS	S	SM
MEDIA	55.80dB	68.5dB
DESVIACIÓN ESTANDAR	5.65dB	4.85dB
VALOR MAXIMO	75.63dB	83.9dB
VALOR MINIMO	49.4dB	58.9dB
DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA MEDIA	5.6dB	3.7dB
VARIANZA	33.6dB	27dB
TENDENCIA	56.3dB	65.9dB
MEDIANA	53.2dB	66.2dB

Las mediciones y análisis de datos se llevaron a cabo durante todos los días de la semana para el sonómetro y la aplicación Sound Meter, por lo que el comportamiento de la información se muestra en las Figuras 3.8 y 3.9.

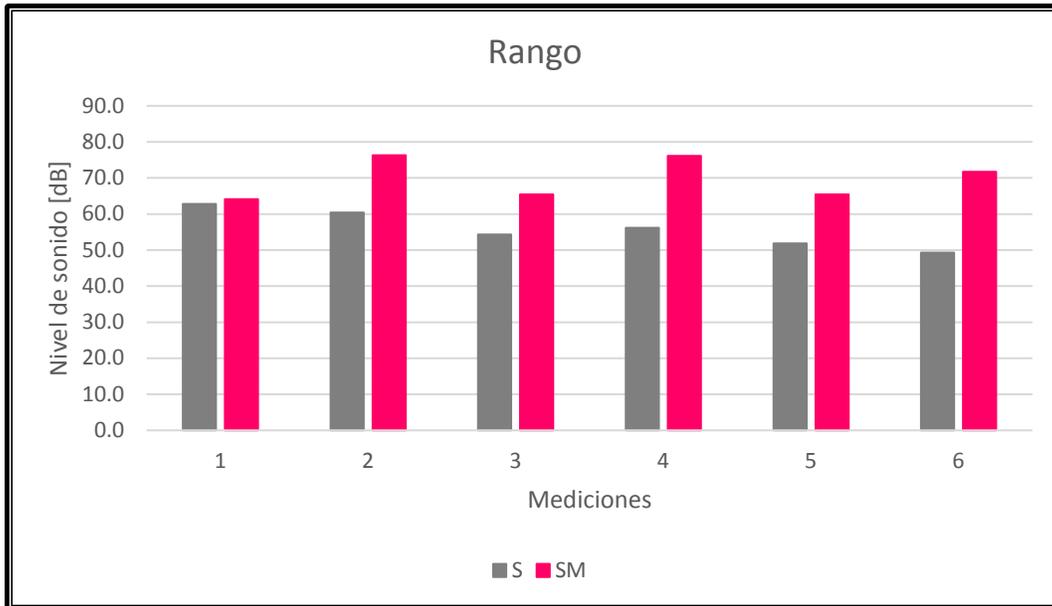


Figura 3.6 Gráfica del Rango de clase de datos obtenidos en el laboratorio de señales y sistemas de ESIME Zacatenco en día lunes para 250 Hz con ruido rosa medido con sonómetro y aplicación Sound Meter.

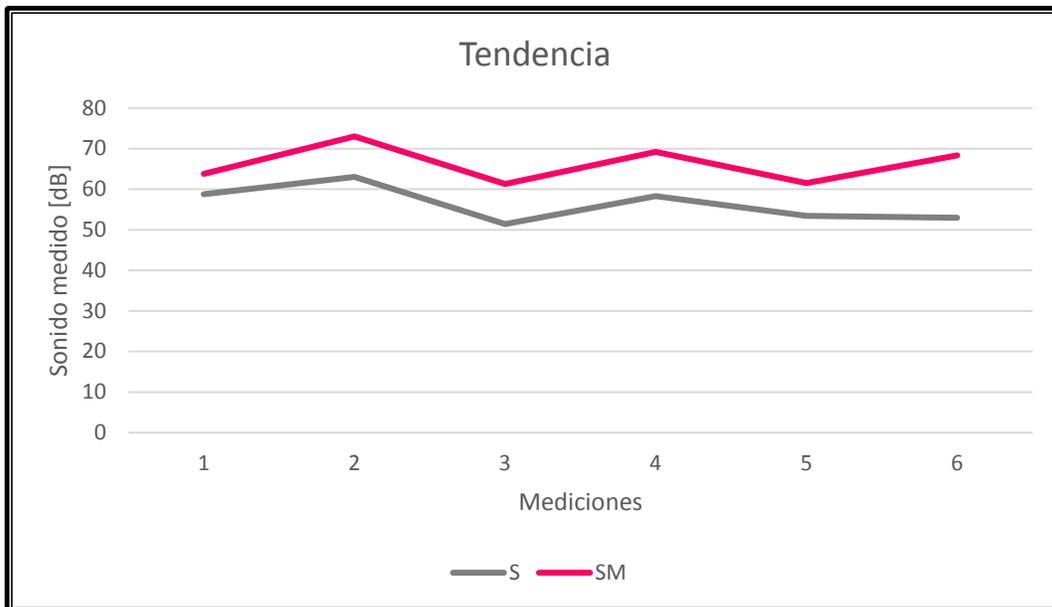


Figura 3.7 Gráfica de la tendencia de datos obtenidos en el laboratorio de señales y sistemas de ESIME Zacatenco en día lunes para 250 Hz con ruido rosa medido con sonómetro y aplicación Sound Meter.

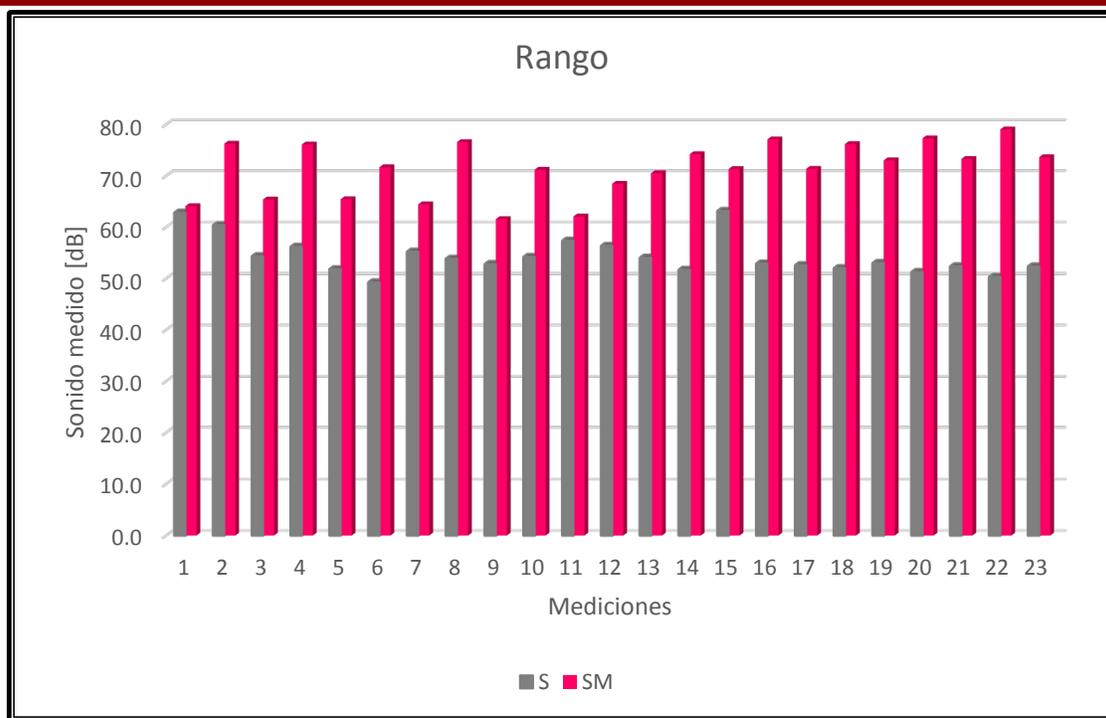


Figura 3.8 Gráfica del Rango de clase semanal de datos obtenidos en el laboratorio de señales y sistemas de ESIME Zacatenco para 250 Hz con ruido rosa medido con sonómetro y aplicación Sound Meter.

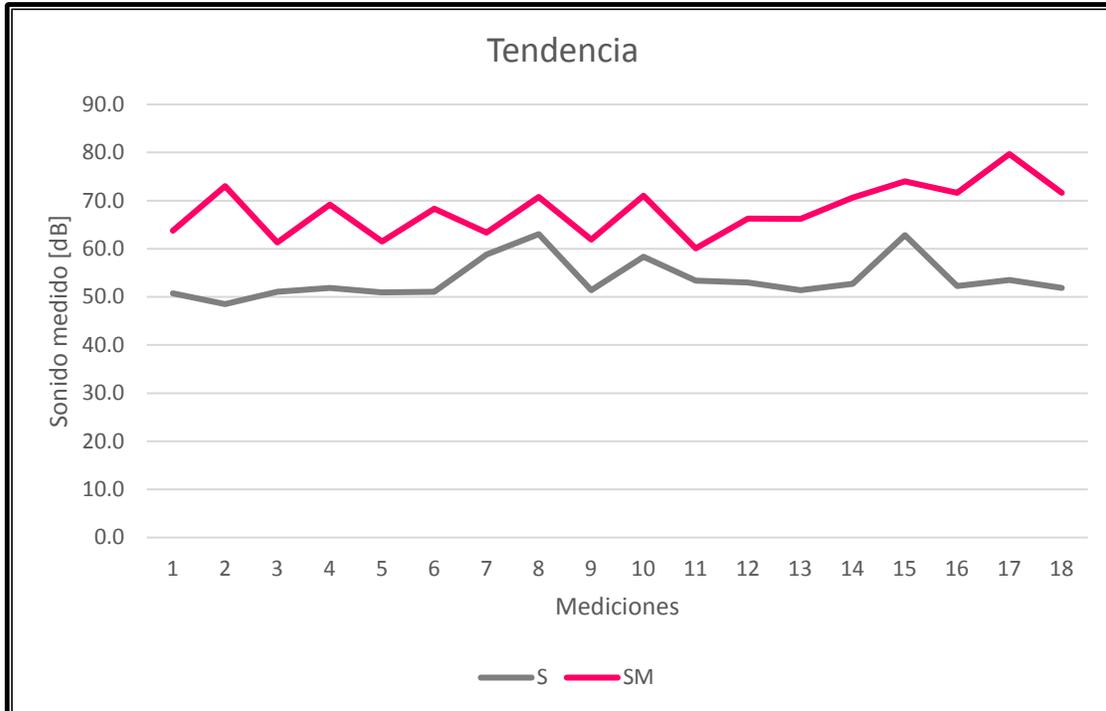


Figura 3.9 Gráfica de la tendencia semanal de datos obtenidos en el laboratorio de señales y sistemas de ESIME Zacatenco para 250 Hz con ruido rosa medido con sonómetro y aplicación Sound Meter.



En este caso, se observa una diferencia entre las mediciones del sonido realizadas con el sonómetro con respecto a las obtenidas con la aplicación Sound Meter debido a que el sonómetro se encuentra calibrado y el micrófono de los teléfonos inteligentes quizás por tanto movimiento y uso constante tiendan a un desajuste.

### 3.7.2. Habitación sin grietas

De acuerdo a la sección 3.4.2, se obtuvo el muestreo probabilístico de los datos. En la Tabla 3-17 se presentan los resultados medidos con sonómetro en la habitación de pruebas en condiciones de actividades normales considerando todos los datos obtenidos, enmascarada con ruido rosa a 250Hz. En las Figuras 3.10 y 3.11 se muestran las gráficas de los resultados del rango y la tendencia de mediciones. Las mediciones se realizaron durante todos los días de la semana a diversos horarios.

Tabla 3-17 Resultados del análisis de datos obtenidos en habitación de pruebas sin grietas a 250 Hz con ruido rosa medido con sonómetro.

<b>MEDIA</b>	36.78dB
<b>DESVIACIÓN ESTANDAR</b>	0.24dB
<b>VALOR MAXIMO</b>	37.75dB
<b>VALOR MINIMO</b>	36.40dB
<b>DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA MEDIA</b>	0.17dB
<b>VARIANZA</b>	0.06dB
<b>TENDENCIA</b>	36.83dB
<b>MEDIANA</b>	36.7

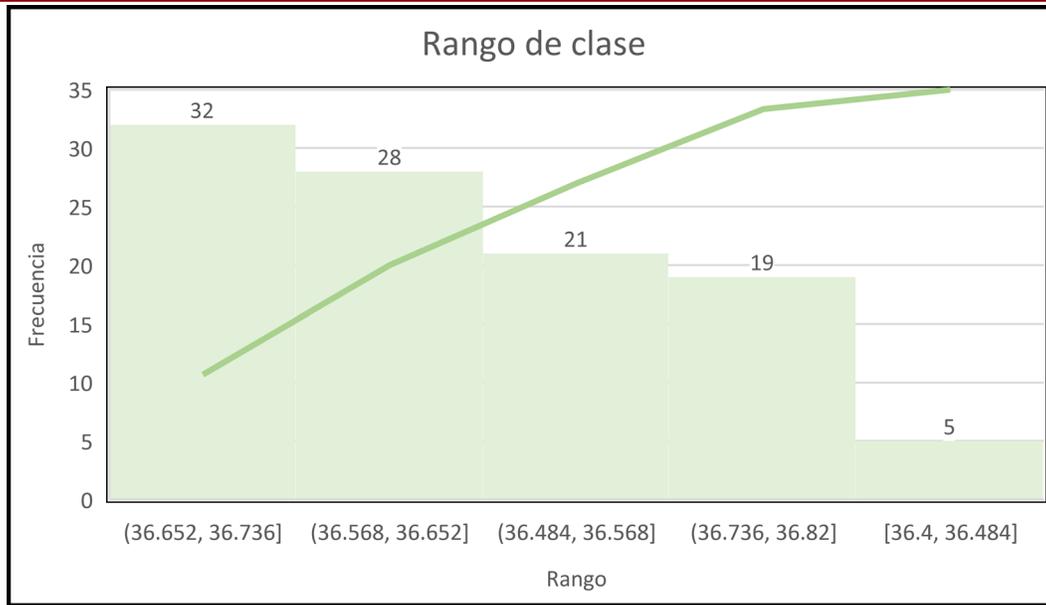


Figura 3.30 Gráfica del Rango de clase del análisis de datos obtenido en habitación de pruebas sin grietas a 250Hz con ruido rosa medido con sonómetro

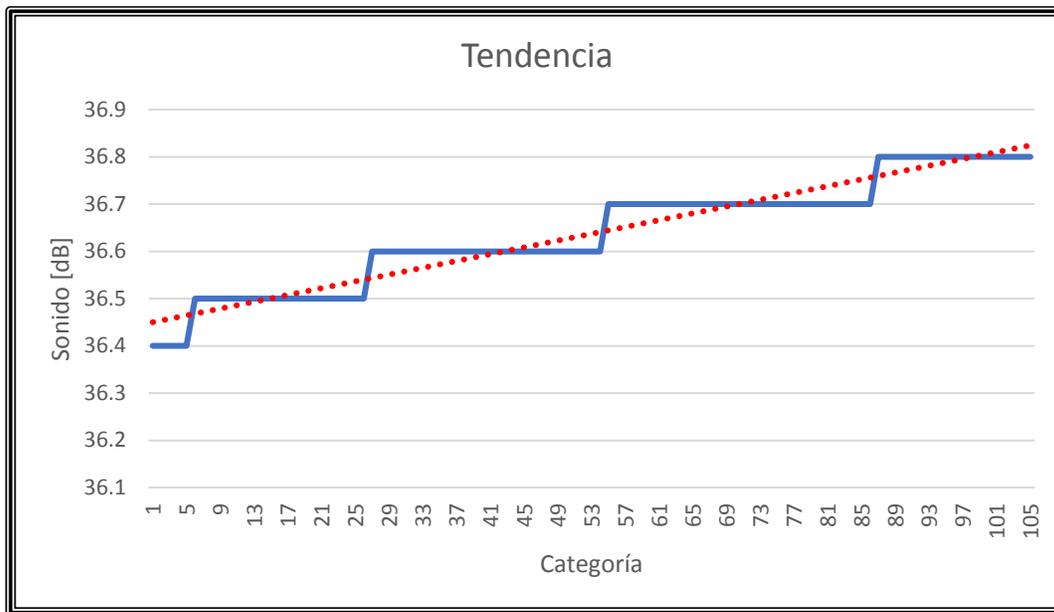


Figura 3.41 Gráfica de tendencia del análisis de datos obtenido en habitación de pruebas sin grietas a 250Hz con ruido rosa medido con sonómetro.



### 3.7.3. Habitación con grietas de 1cm, 5cm, 10cm y 30cm.

Se realizó el muestreo probabilístico de los datos medidos bajo las condiciones mencionadas en la sección 3.4.3. En la Tabla 3.18 se presentan los resultados medidos con sonómetro en la habitación de pruebas en condiciones de actividades normales simulando una alteración como grieta de 1cm, 5cm, 10cm y 30cm considerando todos los datos obtenidos, enmascarada con ruido rosa a 250Hz.

Tabla 3-18 Resultados medidos con sonómetro en la habitación de pruebas en condiciones de actividades normales simulando una alteración con grieta de 1cm, 5cm, 10cm y 30 cm

ANALISIS	1cm	5cm	10cm	30cm
<b>MEDIA</b>	36.77dB	36.80dB	37dB	37.44
<b>DESVIACIÓN ESTANDAR</b>	0.86dB	0.41dB	0.75dB	0.57
<b>VALOR MAXIMO</b>	47.10dB	39dB	45.10dB	41.20
<b>VALOR MINIMO</b>	36.30dB	36.40dB	36.40dB	36.80
<b>DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA MEDIA</b>	0.30dB	0.27dB	0.37dB	0.38
<b>VARIANZA</b>	0.74dB	0.17dB	0.56dB	0.32
<b>TENDENCIA</b>	36.86dB	36.90dB	37.05dB	37.59
<b>MEDIANA</b>	36.4	36.4	36.8	36

En las Figuras 3.12 y 3.13 se muestran las gráficas de los resultados de 1cm, 5cm, 10cm y 30cm para el rango y la tendencia, respectivamente.

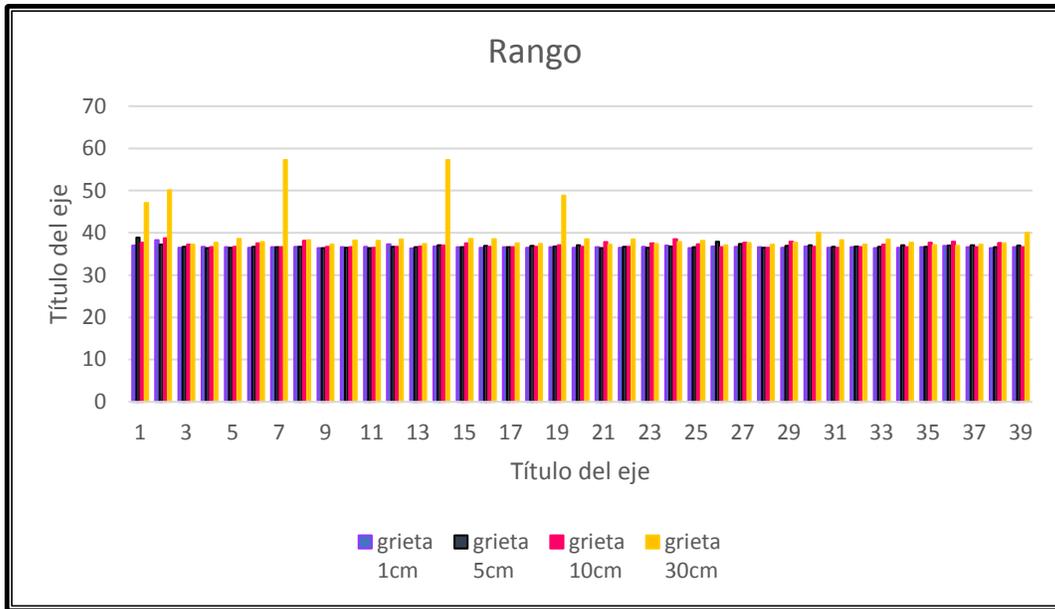


Figura 3.12 Gráfica de rango de los resultados medidos con sonómetro en la habitación de pruebas simulando una alteración como grieta de 1cm, 5cm, 10cm y 30cm.

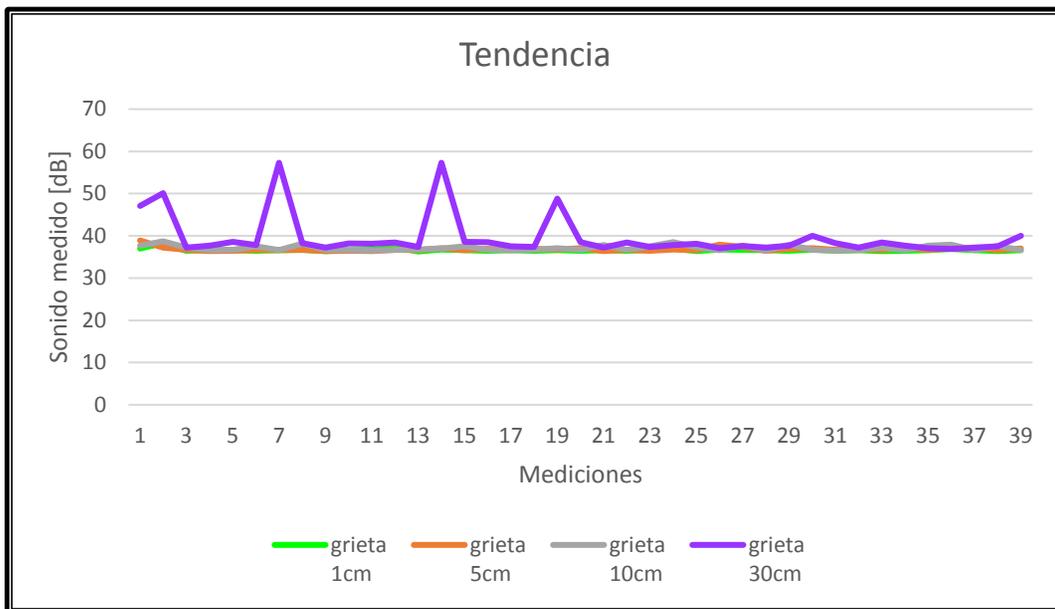


Figura 3.13 Gráfica de tendencia de los resultados medidos con sonómetro en la habitación de pruebas simulando una alteración como grieta de 1cm, 5cm, 10cm y 30cm.



---

De las mediciones anteriores se demuestra que los valores obtenidos entre el instrumento de medición y el iPhone 6s plus difieren entre sí, pero conservan la misma forma de onda y tendencia, por lo que se concluye que se puede utilizar cualquier sonómetro o teléfono inteligente con aplicación de sonómetro para el método, siempre y cuando se realice la caracterización del recinto con el mismo.

# Capítulo 4



---

## 4. 1METODOLOGÍA

### 4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen cada uno de los pasos que componen el método acústico de detección de grietas y fisuras para mediciones realizadas con sonómetro y aplicación del teléfono inteligente.

### 4.2. Metodología para mediciones.

#### 4.2.1. *Caracterización del recinto*

Para obtener datos adecuados de caracterización de un recinto se recomienda tratar acústicamente cada una de las habitaciones o recintos a someter al método, acondicionándolo y aislando acústicamente, obtener su tiempo de reverberación para conocer cómo será un ambiente controlado (ver sección 2.8.1).

Se realizan las mediciones del nivel de sonido con un sonómetro o descargando una aplicación de sonómetro desde cualquier teléfono inteligente, se debe asegurar de tener un gran número de mediciones en diferentes horas, días, alturas y temperatura, con la finalidad de recabar un concentrado de datos que se demuestre sean constantes en su tendencia.

Las características mínimas del medidor son un rango de 30-130 dB con una respuesta en frecuencia de 34.5Hz-8kHz y el teléfono inteligente cualquiera que pueda tener la aplicación de sonómetro o medidor de sonido mientras sea en decibeles (ver sección 3.5.2).

#### 4.2.2. *Análisis probabilístico de información*

Se realiza un análisis probabilístico de los datos que incluya la media, la desviación estándar, valor máximo, valor mínimo, varianza, tendencia y mediana, además de obtener un rango de valores que caractericen a la habitación para obtener información precisa donde se pueda observar una tendencia y corroborar que el comportamiento es constante. Esta información deberá obtenerse de cada habitación en donde se realizaron las mediciones de manera independiente y controlada. En caso de que se realice alguna remodelación y cambio de muebles, se deberá realizar la caracterización del recinto nuevamente.

#### 4.2.3. *Posteriormente a un evento telúrico*

Se realizan las mediciones en las mismas posiciones y mismos horarios, se realiza nuevamente el análisis probabilístico con la intención de establecer un rango, se comparan



los valores con la caracterización en condiciones normales del recinto, en caso que salgan los valores de ese rango, es posible que exista alguna grieta en el recinto.

### 4.3. Programa de verificación del método

#### 4.3.1. Diagramas de flujo

El programa de verificación del método consiste en una serie de pasos que facilitará la aplicación del mismo. Se inicia con la caracterización del recinto calculando el tiempo de reverberación para garantizar la buena acústica además de identificar el tipo de recinto en estudio. En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo del tiempo de reverberación.

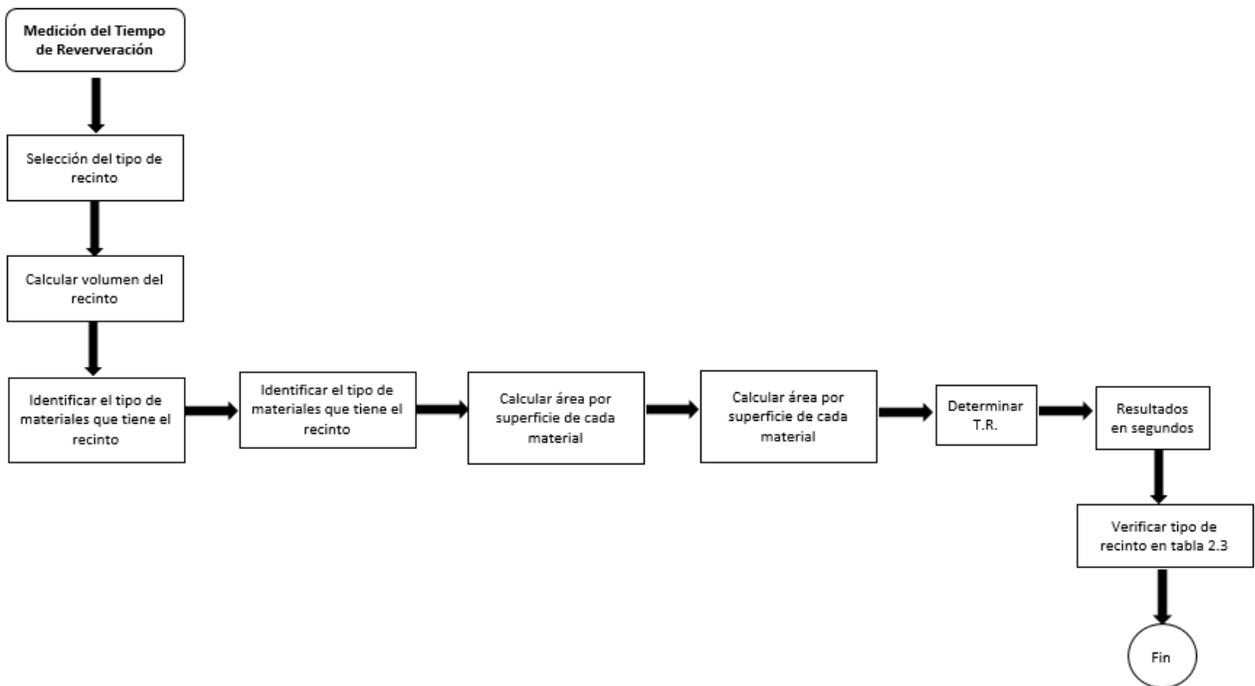


Figura 4.1 Diagrama de flujo del cálculo del Tiempo de reverberación.

En la Figura 4.2 se muestra el diagrama de flujo de la identificación del tipo de medidor con el ejemplo y datos de la cabina en condiciones óptimas, ya sea sonómetro o aplicación, para nuestro caso Sound Meter del i-phone 6s plus, se debe realizar como se menciona en capítulos anteriores que se puede utilizar cualquier aplicación de teléfonos inteligentes, siempre y cuando se realice su propia caracterización y se establezcan rangos.

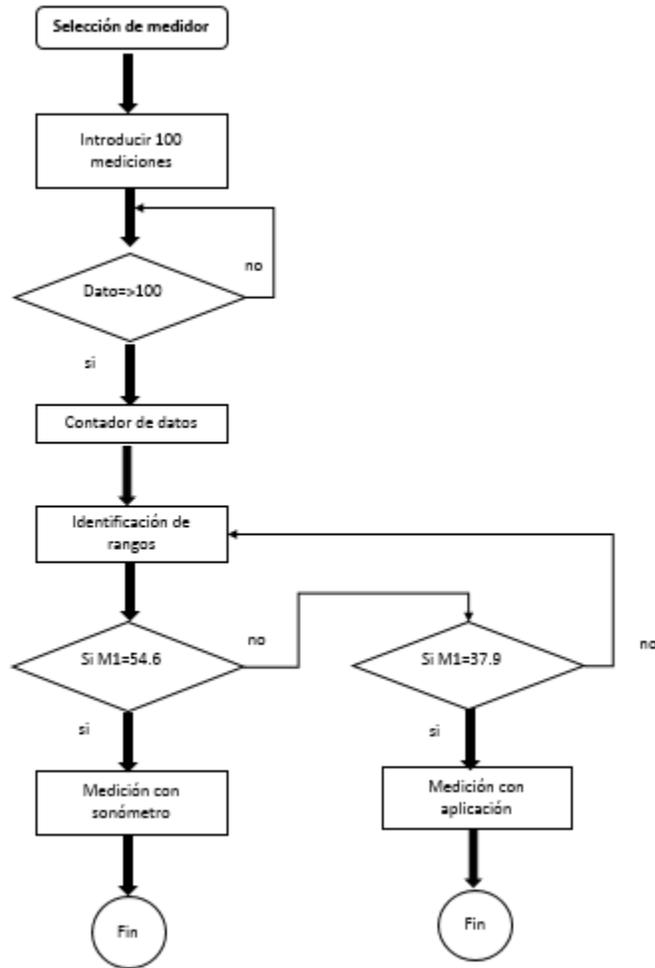


Figura 4.2 Diagrama de flujo de tipo de medidor

Una vez identificado a partir del rango de los datos el tipo de medidor que se está utilizando se realiza el análisis de cada tipo de información, ya sea las mediciones con sonómetro (ver Figura 4.3) o con aplicación (ver Figura 4.4).

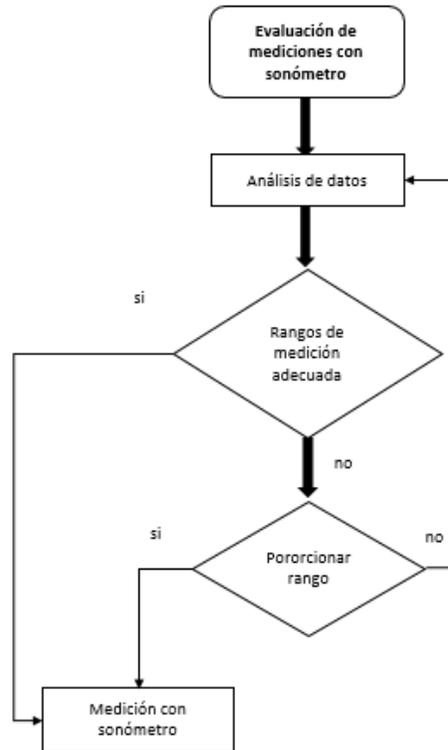


Figura 4.3 Análisis de datos con sonómetro.

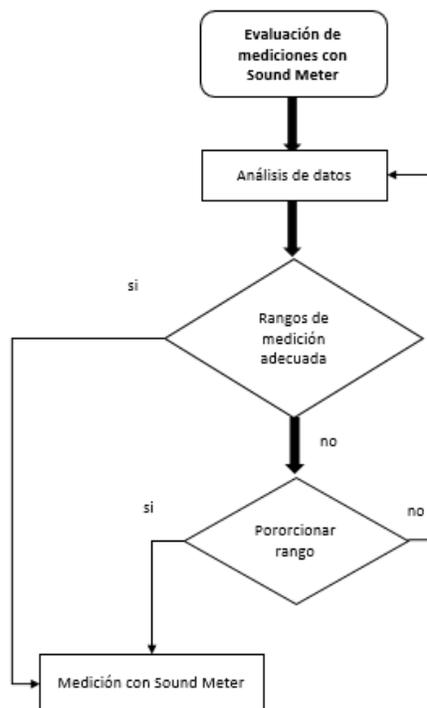


Figura 4.4 Análisis de datos con aplicación



### 4.3.2. Código en MATLAB R2017a

Los siguientes códigos son propuestos para delimitar paso a paso como debe desarrollarse el Método.

El siguiente código se utiliza para identificar el tipo de recinto y su caracterización con el Tiempo de Reverberación.

```
function tr
vm = 0.03;
a = 0.25;
s = 50 ;
volumen = vm ;
alpha = a;
superficie = s;
Tr = (0.161 * vm)/(a * s);
end
```

Para determinar el tipo de medidor que se está utilizando se pueden utilizar los pasos mencionados en el siguiente código:

```
function medidores
s = ?; %medidas menor a 100
if 36.6 < s < 54.6
    R = Sonometro ;
else
if 36.7 < s < 37.9
R = SM App;
end
```

Y por último para realizar el análisis probabilístico se propone el siguiente código:

```
function estadistica
Dato1 = ?;
Dato2 = ?;
Dato3 = ?;
Dato100 = ?;
N = 100 ;
Promedio = (Dato1 + Dato2 + Dato3 + . . . + Dato100 )/N;

Desviacion_Estandar = ((1/(N-1))*((Dato1 - promedio)^2 + (Dato2 -
promedio)^2 + (Dato3 - promedio)^2 + . . . + (Dato100 -
promedio)^2 ))^(1/2)

Desviacion_Estandar_media = Desviacion_Estandar/((N)^(1/2))
```



---

```
Varianza = (((Dato1 - promedio)^2 + (Dato2 - promedio)^2 + (Dato3  
- promedio)^2 + . . . + (Dato100 - promedio)^2 )/N)^(1/2)
```

```
Mediana = (Dato_Mayor + Dato_Menor)/2
```

```
Valor_Mx = Dato_Mayor
```

```
Valor_Mn = Dato_Menor
```

```
end
```

Finalmente, de acuerdo a los diagramas a bloques presentados en las Figuras 4.1 a 4.4 se puede caracterizar cualquier sonómetro y dispositivo móvil (teléfono inteligente) obteniendo sus parámetros de tiempo de reverberación, los cuales proveen información suficiente para la detección de grietas y fisuras.

# Conclusiones



- Se diseñaron y construyeron las cabinas de prueba bajo las condiciones de: recinto controlado, recinto con fisuras y recinto con grietas.
- Se calculó el Tiempo de Reverberación óptimo de las cabinas de prueba por medio de tres métodos: Sabine, Eyring y Millington Sette, y se demostró que los recintos cumplen con los niveles de un recinto real se demostró que el ruido externo no interviene en las mediciones debido al aislamiento acústico
- Se realizó la comparación de los resultados del Tiempo de Reverberación obtenido, con los métodos de Sabine, Eyring y Millington Sette con los medidos con la aplicación de Rev Meter Pro con iOS 11 del iPhone 6s plus obteniendo que entre las mediciones de la cabina óptima y la de fisuras tienen el mismo comportamiento.
- Se utilizó un sonómetro para medir los niveles de presión sonora en cada una de las cabinas de prueba y se detectaron variaciones entre las mediciones de la cabina óptima y la de grietas, tanto en amplitud y rango.
- Se utilizó la aplicación de Sound Meter con iOS 11 del iPhone 6s plus para medir el nivel de presión sonora y se compararon los resultados con los obtenidos con el sonómetro obteniendo que son muy diferentes las mediciones en cuanto a la amplitud, pero conservando la forma de la señal, demostrando esto con el método de mínimos cuadrados.
- Al realizar las mediciones en recintos con grietas se observa:
  - Existen similitudes entre las grietas de 1cm y 5cm y existen cambios graduales en los valores medidos con grietas entre 10cm y 30cm.
  - Se debe considerar la altura del recinto y de donde se realizan las mediciones.
  - Se debe considerar horario y temperatura en las mediciones.
- Se puede utilizar cualquier teléfono inteligente con aplicación de sonómetro para el método, siempre y cuando se realice la caracterización del recinto con el mismo.

# Trabajos futuros



- En éste trabajo se realizó la caracterización y mediciones con el iOS 11 del iPhone 6s plus por lo que propone un trabajo futuro que caracterice y aplique el método con diferentes teléfonos inteligentes, diferentes aplicaciones para el tiempo de reverberación y diversas aplicaciones como sonómetro.
- Otra opción sería realizar las mediciones del sonido en diferentes recintos de diferentes aplicaciones y tamaños y comprobar el método.
- En el capítulo cuatro se ejemplifica el algoritmo de programación para diseñar una interfaz del método con la computadora por lo que a futuro se podría hacer un control por software que identificara el tipo de medidor utilizado de acuerdo a los rangos que maneja el sonómetro y la aplicación, así como realizar el análisis probabilístico automático al introducir los datos.
- Obtener un modelo matemático que demuestre el método.

# Referencias



- [1] Canas, J. A. (José Antonio);Pujades, Luis G. (Luis Gonzaga Tesis doctorales en red, <http://www.tdx.cat/handle/10803/6216>.
- [2] [http://www.pymetec.gob.mx/patentex.php?pn\\_num=WO2004097351&pn\\_clasi=A2&pn\\_fecha=2004-11-11](http://www.pymetec.gob.mx/patentex.php?pn_num=WO2004097351&pn_clasi=A2&pn_fecha=2004-11-11)(IMPI).
- [3] [http://www.pymetec.gob.mx/patentex.php?pn\\_num=WO2004113852&pn\\_clasi=A2&pn\\_fecha=2004-12-29](http://www.pymetec.gob.mx/patentex.php?pn_num=WO2004113852&pn_clasi=A2&pn_fecha=2004-12-29)(IMPI).
- [4] Ávila Romero, Jorge Arturo (2013). Acondicionamiento acústico del auditorio Alfredo Harp Helu del planetario Luis Enrique Erro. Tesis de ingeniería en comunicaciones y electrónica, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México D.F.
- [5] Llinares, J., Llopis, A., Sancho, J. (2015). Acústica arquitectónica y urbanística, Madrid: LIMUSA.
- [6] B.J.C. Moore. (2012). An Introduction to the Psychology of hearing. USA: Emerald.
- [7] INIFED, Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones, Tomo IV, Volumen tres, 2014.
- [8] Carrión, I. (2016). Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Barcelona: Ediciones UPC.
- [9] Recuero, M. (2005). Ingeniería acústica. Madrid España: Paraninfo.
- [10] [https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_04\\_05/io9/public\\_html/propagacion.html](https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_04_05/io9/public_html/propagacion.html).
- [11] Kinsler, E. (2000). Fundamentos de acústica, México: Limusa.
- [12] <http://sonoflex.com/fonac/que-es-la-absorcion-acustica/>.
- [13] Morales, J. (2015). Acústica en espacios y en los volúmenes arquitectónicos. México: Trillas.
- [14] Recuero, M. (2001). Acondicionamiento acústico. España: Paraninfo.
- [15] S. S. Stevens, Fred Warshofsky. (1985). Sonido y audición. México: Colección Científica Time Life.
- [16] <https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/niveles.htm>



[17] <http://www.labc.usb.ve/paginas/EC4514/AUDIO/PSICOACUSTICA/Psicoacustica.html>

[18] <http://www.inercoacustica.com/acustipedia/item/240-curvas-de-confort-ac%C3%BAstico-curvas-nc>

[19] Comité ACI 224, Causas, Evaluación y reparación de Fisuras en Estructura de Hormigón, Grant T. Halvorsen, Randall W. Poston 2017.

[20] <http://www.parro.com.ar/definicion-de-enlucido+de+cemento>

[21] J. Millán. (2016). Instalaciones de megafonía y sonorización. México: Paranin[22]

[22] NOM-C-102 Medición en el campo del nivel de presión acústica.

[23] NOM-C-092 Terminología de materiales aislantes acústicos.

[24] Celia Facio Salazar (2015) Sonido, silencio: acústica y arquitectura, centro de Investigaciones y estudios de posgrado, facultad de arquitectura UNAM.

[25] CHAPMAN Y HALL. The Measurement and Suppression of Noise. Publisher A.J. KING, 1985

[26] COLOMBIT S.A. Aislamiento acústico construcción, liviana en seco, Notas técnicas, No 30, agosto 2016.

[27] COLOMBIT S.A. - WebSite Corporativo <http://www.colombit.com.co/>

[28] Curso de Acústica creado por GA. © Copyright 2003.

[29] CYRIL M. Harris. Manual de medidas acústicas y control del ruido, 3ª edición McGraw-Hill/interamericana de España. 1995. p 9.1-9.23, ISBN 84-481-0304-1

[30] ESPUMLATEX. S.A. <http://www.espumlatex.com/web/>

[31] EXTECH, Registrador medidor de nivel de sonido, Modelo 407764, Manual del usuario.

[32] FIBERGLASS S.A. Notas técnicas desarrolladas por la unidad De servicios Técnicos de Fiberglass.

[33] KUTTRUFF H. Room Acoustics, Applied Science publishers LTD, England. 1979. p. 3-7.

[34] Gómez-Cano Hernández, M. (1994) Aspectos ergonómicos del ruido. Salud y



Trabajo 102, 33-40.

[35] Ruíz Ripollés M. (1987) Ergonomía. El ambiente sonoro. Mapfre Seguridad 27, 3-9.

[36] Manual de Higiene Industrial (1996). Fundación Mapfre. Editorial Mapfre.

[37]. ISO/R – 1996 (1971) Acoustics- Assessments of noise with respect to community response.

[38]. UNE 74022 (1981) Valoración del ruido en función de la reacción de las colectividades.

[39]. Vér L. István, Beranek Leo L. (2006) Noise and vibration control engineering.

Principles and applications. Editorial Wiley & Sons, Inc.

[40] ISO/TR 3352 (1974) Acoustics: Assessment of noise with respect to its effect on the intelligibility of speech.

[41] Benjegard, S.C. "Rapport 51/60 Statens Institut for bygnadsforskning - Stockholm, 1969, Buller.

[42] Burck, W., Grutzmacher, M., Heister L. Mueller, E.A., Matschat, K. "Fluglarm, Gutachter tattet im Auftrag Bundesministra für Gesunduewsen", Gottingen, 1965.

[43]. Freud, J.E. Mathematical Statistics, Practice Hall, 1962.

[44]. Griffiths I. D., Langdon, F.J. "Subjctive Response to Road Traffic Noise" J. Sound Vibration, 1968.

[45]. Jones, H. W., Stredulinsky, D., Vermello. P.J. "Modeling of Environmental Acoustics" Paper PP9 91st, Meeting Acoustics" Soc. Amer. 1971.

[46] Langdon, F. J., Scholes. W.E. "The Traffic Noise index: a Method of controlling noise nuisan Architestic" J. 147, 1968.

[47]. Norma ISO 2204-1973 "Guide to the Manual urement of Airborne Acoustical Noise And Evaluation of its Effects on man".

[48]. Ostle, B. Statistics in Research, Iowa St. University Press, 1968.



---

[49]. Recomendación Iso/1966 "Assesment Noise with Respect to the Community Response".

[50] Reglamento para la prevención y control de la contaminación ambiental originada por la emisión de ruido. México, 1976.

[51]. Schomer, P. D. "Evaluation of C. weight-day-nigth Level for assesment of impulse noise" Acoust Soc. of Amer. 67 pp. 396, 399, 1977.

[52]. Skudrzyk, E. The Foundations of Acoustics Spriger Verlag, 1974.

[53]. Stevens, K. N. Pietrasanta, A.C. et. al. "Precedures for Estimating Noise. Exposure and Resulting Community Reactions from Air Base Operation WADC Technical Note 57.10. Wright-Patterson Air Force Base, OH, 1957.

[54]. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Information of Levels of Environmental Noise Requisite to Protect Public Health and Welter With an Adequate Margin of Safety. Document 550, 74-