



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

OPTIMIZACIÓN ACÚSTICA DE UNA INCUBADORA NEONATAL
MEDIANTE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

AUTOR

CRISTIAN GEOVANNY ORDÓÑEZ ANDRADE

AÑO

2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

OPTIMIZACIÓN ACÚSTICA DE UNA INCUBADORA NEONATAL MEDIANTE
ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

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

Profesor guía

Msc. Daniel Núñez Solano

Autor

Cristian Geovanny Ordoñez Andrade

Año

2019

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Optimización Acústica de una Incubadora Neonatal Mediante Análisis de Elementos Finitos, a través de reuniones periódicas con el estudiante, Cristian Geovanny Ordoñez Andrade, en el semestre 201920, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Daniel Alejandro Núñez Solano
Master of science in engineering acoustics
C.I. 1716430911

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Optimización Acústica de una Incubadora Neonatal Mediante Análisis de Elementos Finitos, del estudiante, Cristian Geovanny Ordoñez Andrade, en el semestre 201920, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Virginia Puyana Romero

Dottorato di Ricerca in Rappresentazione, Tutela e Sicurezza dell' Ambiente e
delle Structure e Governo del Territorio

C.I. 1758988354

DECLARACION DE AUTORIA DEL ESTUDIANTE

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

Cristian Geovanny Ordoñez Andrade

C.I. 0302855424

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por guiarme en el camino del bien. A mi familia por su apoyo incondicional en toda mi vida. Agradezco también a mis profesores en especial a Daniel y Virginia por sus enseñanzas.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a toda mi familia, pero de manera especial a mis padres que siempre estuvieron apoyándome y buscando lo mejor para mí.

RESUMEN

En este trabajo de titulación, se realizó un modelo tridimensional de una incubadora neonatal que va a calcular la respuesta al impulso (IR) por medio de la utilización del método de los elementos finitos en el dominio del tiempo (TDFEM). Para ello se ha hecho uso del programa Comsol, que permite simular este modelo en cada banda de octava determinada por la frecuencia de corte de Schroeder. Dichos resultados serán procesados en Matlab para su validación. Además, este programa va a permitir procesar los datos obtenidos insitu para optimizar las mediciones del tiempo de reverberación (RT). Después de obtener estos resultados se realizaron comparaciones del RT del modelo simulado e insitu con la finalidad de analizar las desviaciones que presentan cada una de las mediciones. Los resultados obtenidos son comparados con investigaciones acerca del confort acústico y características del llanto de neonatos. Se concluye que el RT obtenido del modelo simulado e insitu presenta variaciones máximas de un 25% en ciertas bandas mientras que en el resto de las bandas el error absoluto es menor.

ABSTRACT

A three-dimensional newborn incubator model was performed and its impulse response (IR) was calculated by means of the finite element method the time domain (TDFEM). The software Comsol was used to simulate this model for several octave frequency bands, which upper limit was defined by the determination of the Schroeder cutoff frequency. These results were validated using Matlab. Also, the reverberation time (RT) was obtained with the same software using insitu recorded IR's. Then, these insitu and simulated results were compared in order to analyze the deviations. This report concludes that the simulated and insitu measured RT have a maximum deviation of 16% in some bands, while in the other hand, the other frequency band the absolute error is less.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Antecedentes	1
1.2.	Alcance	4
1.3.	Objetivos	4
1.3.1.	General.....	4
1.3.2.	Específico	5
2.	MARCO TEORICO.....	5
2.1.	Presión sonora y nivel de presión sonora (NPS).....	5
2.2.	Modos propios de una sala.....	6
2.3.	Respuesta al impulso (IR).....	7
2.4.	Función de transferencia.....	8
2.5.	Respuesta de frecuencia.....	9
2.6.	Tiempo de reverberación (RT).....	10
2.7.	Frecuencia de corte de Schroeder.....	11
2.8.	Métodos numéricos.	12
2.8.1.	Método de elementos finitos (FEM).....	12
2.8.2.	Método de los elementos finitos en el dominio del tiempo (TDFEM).....	14
2.9.	Ecuación de onda en el dominio de la frecuencia.....	15
2.9.1.	Aéreo.....	15
2.9.2.	Aéreo con material poroso.....	16
2.10.	Ecuación de onda en el dominio del tiempo.....	17
2.10.1.	Aéreo.....	17
2.10.2.	Material poroso.....	19
3.	METODOLOGIA.....	19
3.1.	Frecuencia de Schroeder: Rango de frecuencia y método numérico.....	19
3.2.	Métodos numéricos.	20
3.2.1.	Ecuación de onda en el dominio del tiempo.	20
3.2.2.	Aéreo.....	21

3.2.3. Material poroso.....	24
3.3. Mediciones Insitu.....	25
3.3.1. Respuesta al impulso de la incubadora.....	25
3.3.2. Tiempo de reverberación.....	26
3.4. Validación.....	27
3.4.1. Insitu Vs Referencia.....	27
4. RESULTADOS.....	29
4.1. Respuesta al impulso.....	29
4.1.1. Aéreo.....	30
4.2. Insitu.....	33
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	38
5.1 Conclusiones.....	38
5.2. Recomendaciones.....	38
REFERENCIAS.....	40
ANEXOS.....	43

INDICE DE FIGURAS.

<i>Figura 1.</i> Presión sonora y nivel de presión sonora.	6
<i>Figura 2.</i> Onda estacionaria.	7
<i>Figura 3.</i> Respuesta al impulso de una sala.	8
<i>Figura 4.</i> Representación de una función de transferencia en diagramas de bloques.	9
<i>Figura 5.</i> Sistema lineal invariante en el tiempo.	10
<i>Figura 6.</i> Modelo de una pieza.	13
<i>Figura 7.</i> Modelo dividido en elementos finitos.	13
<i>Figura 8.</i> Ejemplo de discretización.	14
<i>Figura 9.</i> Modelo de incubadora en Comsol.	21
<i>Figura 10.</i> Coeficientes de absorción del acrílico.	23
<i>Figura 11.</i> Modelo de incubadora en Comsol con material poroso.	24
<i>Figura 12.</i> Coeficientes de absorción del material absorbente.	25
<i>Figura 13.</i> Mediciones insitu del tiempo de reverberación.	26
<i>Figura 14.</i> Posiciones de medición EG1.	27
<i>Figura 15.</i> Respuesta al impulso obtenida en Matlab.	28
<i>Figura 16.</i> Tiempo de reverberación referencia vs insitu.	29
<i>Figura 17.</i> Ejemplo de mallado para la frecuencia de 1000Hz.	30
<i>Figura 18.</i> Respuesta al impulso de las bandas de octava sin material absorbente.	30
<i>Figura 19.</i> RT del modelo aéreo.	31
<i>Figura 20.</i> Ejemplo de mallado del colchón para la frecuencia de 125Hz.	32
<i>Figura 21.</i> Respuesta al impulso de las bandas de octava con material absorbente.	32
<i>Figura 22.</i> T10 del modelo en el aire y el material poroso.	33
<i>Figura 23.</i> Relación del T10 de la simulación en el aire e insitu.	34
<i>Figura 24.</i> T10 del material poroso simulado e insitu.	35
<i>Figura 25.</i> Respuesta al impulso y curva de decaimiento de 125Hz.	36
<i>Figura 26.</i> Frecuencia fundamental del llanto de un bebé.	36
<i>Figura 27.</i> Frecuencia fundamental del llanto de una bebé.	37
<i>Figura 28.</i> Respuesta al impulso de 250y 500Hz.	45
<i>Figura 29.</i> Respuesta al impulso de 1000y 2000Hz.	46

<i>Figura 30.</i> Respuesta al impulso de 250y 500Hz para el material absorbente.	47
<i>Figura 31.</i> Respuesta al impulso de 1000y 2000Hz para el material absorbente.	48

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Rango de frecuencias y método utilizado en cada zona según la frecuencia de Schroeder.	13
Tabla 2. Rango de frecuencias de la incubadora a ser analizado.	22
Tabla 3. Posición de los receptores y la fuente emisora.	21
Tabla 4. Variables de entrada de la geometría y la fuente.	22
Tabla 5. Valores de las variables de entrada para el modelo aéreo.	23
Tabla 6. Coeficiente de absorción del acrílico.	23
Tabla 7 Coeficientes de absorción del material absorbente.	25
Tabla 8. Posiciones de medición.	27
Tabla 9. Variación por banda de tercio de octava.	29

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El ruido es un sonido no deseado, que en la actualidad se localiza entre uno de los contaminantes más invasivos, ya que afecta negativamente a la salud y bienestar de los humanos (Miyara, 2018). Tal es el caso, que en las Unidades de Cuidados Intensivos Neonatales (UCIN), los niveles de ruido a menudo superan los límites aceptados universalmente (Villoldo, 2011), lo que conlleva riesgos potenciales para el desarrollo a corto y largo plazo de los recién nacidos (Romeu, 2016). Si bien es cierto que la tecnología facilita la adaptación al medio ambiente y satisface las necesidades esenciales de la humanidad, para una unidad de cuidados neonatales esto no es algo positivo, ya que la incorporación de tecnología la convirtió en un entorno muy ruidoso y perjudicial para el bebé prematuro (Romeu, 2016).

El ruido en las Unidades de Cuidados Intensivos Neonatales proviene de diversas fuentes, como los equipos de soporte vital, incluido ventiladores mecánicos, calentadores radiales, alarmas, voces, sistemas de monitoreo, movimientos de personas en la unidad, entre otros (Romeu, 2016). Estas situaciones, pueden afectar a los recién nacidos, ya sea en la audición, o en el funcionamiento de los sistemas del cuerpo humano. Un estudio demuestra que, además, cualquier método de transporte para un bebé prematuro puede generar niveles de ruido peligroso y por ende, esto afectaría en el comportamiento de los recién nacidos, ya que ellos carecen de madurez autónoma y funcional para manejar los factores estresantes de la vida extrauterina (Sobczak & Johnson, 2011).

A lo largo del tiempo, se han investigado diferentes métodos con los que disminuir en nivel de ruido en las incubadoras neonatales (Almadhoob & Ohlsson, 2015). (Yoshiko Kakehashi, 2011). Uno de ellos propone utilizar un panel de absorción simple, que permite atenuar niveles de ruido considerables dentro y fuera de una incubadora neonatal (Altuncu, 2009). Además, se sabe que el oído humano presenta mayor sensibilidad en las altas frecuencias, por lo que un alto nivel en este rango de frecuencias podría provocar pérdida de la

audición, en especial en los recién nacidos, ya que tienen el oído más sensible a los cambios de niveles de presión sonora. Por tal motivo, un estudio ha examinado la cubierta de una incubadora, diseñada de un material acústico absorbente, que permite disminuir el nivel de presión sonora (NPS) en altas frecuencias, logrando resultados favorables en la mitigación de ruido en frecuencias mayores a 1000Hz (Kellam & Bhatia, 2009).

Es cierto que hasta la actualidad se han venido realizando estudios sobre el ruido y, cómo afecta a los bebés prematuros al momento de estar en una incubadora neonatal (Kenting & Buhr, 1978). Las evidencias anteriormente mencionadas, demuestran que estos estudios fueron realizados in-situ, con la ayuda de equipamiento que permite registrar el nivel del ruido ambiental, que se pueda producir ya sea dentro o fuera de una incubadora neonatal. Sin embargo, no existen publicaciones en las que se realice estudios exhaustivos por medio de la utilización de un software para aplicaciones físicas y de ingeniería.

Con la ayuda de un software de simulación, el análisis del ruido especialmente en las incubadoras favorecería significativamente el diseño y la creación de un prototipo de simulación, con el cual se pueda disminuir a niveles considerables el ruido presente dentro y fuera de una incubadora. En este caso, se analizaría los sistemas de control de la incubadora (Pardell, 2018), puesto que forma un solo cuerpo con todas las partes del objeto. Además, sirve para poder movilizar al neonato de un lugar a otro y, como se había mencionado anteriormente, la movilización de la incubadora produce niveles de ruido considerable que afectan la tranquilidad de los bebés prematuros (Sittig, 2011).

Si bien es cierto que no existen estudios realizados con un software que permitan comprender de mejor manera el ruido en las incubadoras, afortunadamente existen investigaciones realizadas en diferentes softwares que permiten encontrar soluciones a este caso de estudio. Tal es el caso de la plataforma COMSOL, en la que se han diseñado, por ejemplo, métodos electromagnéticos geofísicos, utilizados para inferir de manera remota información sobre el subsuelo de la tierra, (Butler & Zhang, 2016). Del mismo modo, en el campo de la Acústica se ha evaluado la transferencia de energía a través de la estructura

de medios porosos. Como se puede inferir en un estudio realizado sobre un vagón de ferrocarril, donde realizan la reconstrucción del suelo para la mejora del índice de reducción sonora, utilizando materiales acústicos con una microestructura fibrosa (Zvolenský, Kašiar, Volna, & Barta, 2017). Cabe recalcar, que las soluciones propuestas en cada caso las obtuvieron por medio de COMSOL y sus soluciones fueron efectivas para solventar los problemas presentados.

Lo anteriormente expuesto, son algunos de los ejemplos que muestran los procesos que se pueden realizar en la plataforma de COMSOL. Cabe mencionar que, para realizar estos cálculos de los problemas presentados en cada una de las áreas de estudio, COMSOL utiliza una estructura que trabaja en un sistema de ecuaciones diferenciales parciales (PDEs), que es una descripción matemática de varios fenómenos físicos basados en las leyes de la ciencia (Addlink, 2018). Por tal motivo, se utiliza el método de los elementos finitos (MEF o FEM), que utiliza ecuaciones diferenciales complejas para la determinación de esfuerzos y desplazamientos en objetos mecánicos y sistemas. El método de los elementos finitos permite controlar sistemas complejos para los cuales no se puede encontrar soluciones analíticas cerradas (Zvolenský, 2017). Es un conjunto de técnicas que aproximan la resolución del problema a un sistema continuo, como un conjunto de elementos discretos. Por este motivo, el método se basa en remplazar la estructura por una malla de elementos discretos, conectados por medio de un número finito de nodos donde se aplican las condiciones de equilibrio y por ende se pueden formar ecuaciones algebraicas en función de los desplazamientos nodales (Ruprecht, Klemens, Friedemann, 2018).

Cabe mencionar que, en una publicación relacionada con el análisis acústico de un recinto variando su geometría, se puede evidenciar la utilización del método de los elementos finitos y la teoría del comportamiento energético del sonido dentro de un recinto, para proponer una metodología sencilla en el diseño de recintos acústicos, tomando la geometría como la principal variable (Barreiro & Bodensiek, 2010). En otro estudio realizado, presentan un método de diseño para la optimización de la topología acústica para el modelo de sonoridad de Zwicker, considerando la concepción subjetiva del sonido por parte del ser

humano (Kook, Koo, Hyun, Jensen, & Wang, 2012), para minimizar la sonoridad específica de la velocidad en una banda crítica de un material reflectante.

Las evidencias anteriormente expuestas, nos llevan a entender la importancia de un análisis exhaustivo sobre un tema relacionado con la física y la ingeniería, ya que, con la ayuda de una plataforma digital, se pueden encontrar soluciones a los problemas que se van presentando en el transcurso del tiempo. En este caso, un análisis sobre el problema del ruido en las Unidades de Cuidados Intensivos Neonatales ayudaría a encontrar soluciones para este problema. Por ello, se hace necesario desarrollar un estudio que permita determinar los puntos problemáticos a los que se debe prestar mayor importancia al momento de diseñar una incubadora neonatal, para intentar reducir de forma eficaz los niveles de ruido que puedan poner en peligro la salud del bebé prematuro.

Cabe mencionar que la presente tesis se realiza como colaboración con el proyecto de investigación denominado “Optimización del aislamiento acústico y reverberación al interior de una incubadora neonatal” (SOA.VPR.18.04), adjudicado en la IV convocatoria a proyectos de investigación UDLA.

1.2. Alcance

El proyecto se basa en resolver la ecuación de onda mediante métodos numéricos y de elementos finitos en el dominio del tiempo. Mediante el método de elementos finitos en el dominio del tiempo (TDFEM) y usando el programa Comsol se obtiene la respuesta al impulso (IR) de una incubadora para luego obtener el tiempo de reverberación mediante el post procesamiento de la IR en el programa Matlab. Las IR son obtenidas para diferentes bandas de octava, siendo la frecuencia máxima de cálculo determinada mediante la frecuencia de corte de Schroeder. El modelo simulado de incubadora será validado mediante mediciones insitu.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Determinar el tiempo de reverberación mediante la simulación de la respuesta al impulso de una incubadora neonatal, utilizando el método de elementos finitos en dominio del tiempo (TDFEM) en el software de simulación COMSOL.

1.3.2. Específico

- Implementar un modelo tridimensional de incubadora neonatal que permita obtener la respuesta al impulso.
- Validar los resultados de la respuesta de frecuencia simulados con COMSOL.

2. MARCO TEORICO

2.1. Presión sonora y nivel de presión sonora (NPS)

Se conoce como presión sonora al movimiento que provocan las fluctuaciones de una onda en un determinado medio; sea este sólido, líquido o gaseoso. Por tal motivo, la presión sonora es una magnitud utilizada para medir la onda sonora.

Las variaciones que se producen por la dispersión de una onda sonora a través del aire son muy pequeñas comparadas con la presión estática atmosférica. La mínima presión que perciben los seres humanos está alrededor de los $20\mu\text{Pa}$, y esta a su vez, está superpuesta a la presión ambiente atmosférica correspondiente a 10^5 Pa (Bolaños & Ochoa, 1990).

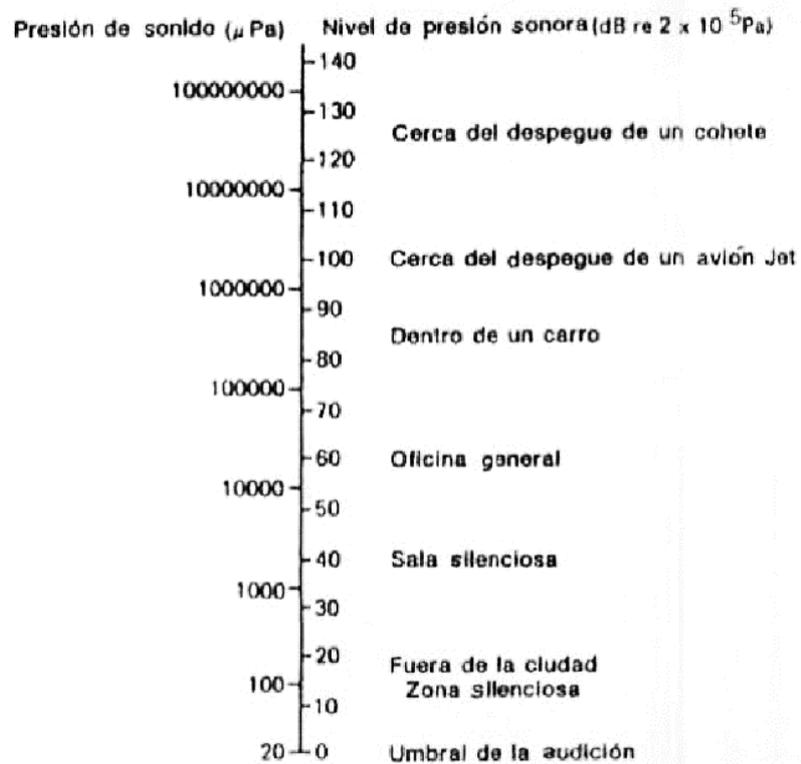


Figura 1. Presión sonora y nivel de presión sonora.

Tomado de (Bolaños & Ochoa, 1990).

El nivel de presión sonora viene dado por la siguiente ecuación:

$$L_p = 20 \log \frac{Prms}{P_0} \quad [dB] \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

P_{rms} = Valor cuadrático medio de la presión que se está midiendo.

P_0 = Presión de referencia equivalente a 20 μPa.

2.2. Modos propios de una sala.

Las ondas estacionarias o modos propios de vibración son aquellas que se generan de la combinación de una onda incidente y una reflejada.

Independientemente de la forma que poseen cada una de las salas, va a existir dentro de su geometría frecuencias propias de vibración, que son características del lugar y que se generan al superponerse dos ondas de la misma dirección, amplitud y frecuencia, pero en sentido contrario. Dando lugar a la distribución heterogénea de la presión acústica dentro de una sala.

En la figura 2 se representa un modo propio de vibración, en donde la onda azul representa a la oscilación incidente, mientras que la roja representa a la oscilación reflejada. La suma de estas dos da lugar a la onda estacionaria, representada por la oscilación de color púrpura.

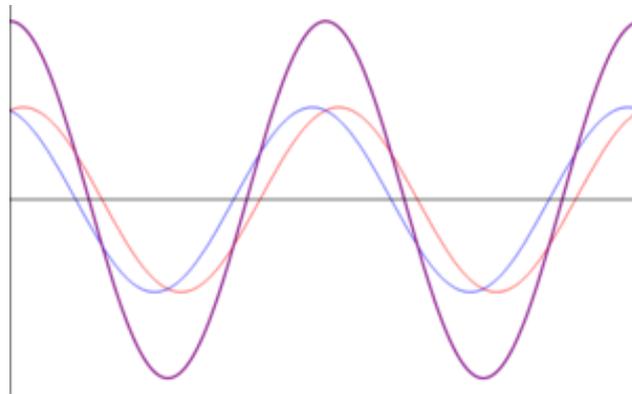


Figura 2. Onda estacionaria.

Tomado de (Barbero Garcia,2015).

2.3. Respuesta al impulso (IR).

Es un estímulo de corta duración, que se utiliza para analizar un sistema en el dominio del tiempo como. Un ejemplo consistiría en dar una palmada dentro de una sala; donde el estímulo será el impulso y el comportamiento de la sala la respuesta a ese impulso.

La respuesta al impulso permite obtener información acústica de una determinada sala, como por ejemplo: los tiempos de llegada de una señal, el sonido directo y el reflejado, la relación señal-ruido, la inteligibilidad de la palabra, así como también el tamaño de un determinado lugar (Yong, 2003).

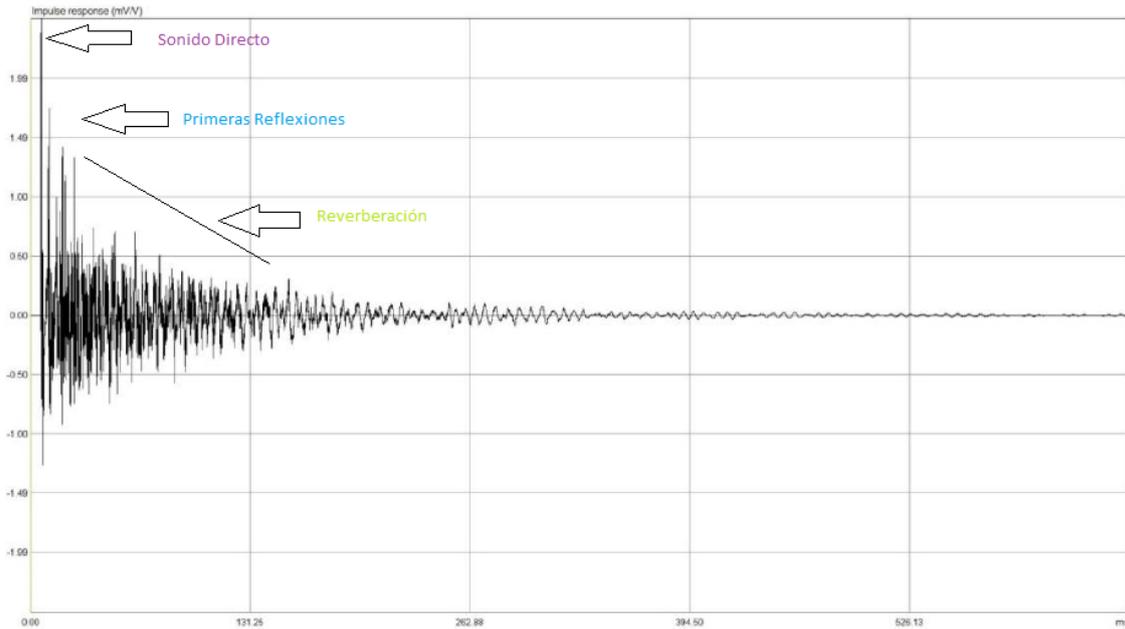


Figura 3. Respuesta al impulso de una sala.

Tomado de (Yong, 2003).

En la figura 3, se puede distinguir tres secciones de la respuesta al impulso. Definiendo de esta manera el sonido directo como el camino más corto que recorre una señal, desde que sale de la fuente hasta que llega al micrófono. Seguidamente de las primeras reflexiones que llegan de las paredes, las mismas que van perdiendo energía dependiendo de la absorción del lugar; y finalmente, la parte reverberante, que es la cantidad de energía de las reflexiones aleatorias tardías que se producen en la sala (Yong, 2003).

2.4. Función de transferencia.

Es una expresión matemática que determina las relaciones de entrada y salida de sistemas invariantes en el tiempo (LTI). En este caso es necesario la utilización de una transformada, como puede ser la de Fourier o Laplace, las mismas que cambian una función en una variable de entrada a otra función en otra variable (Portillo,2017)

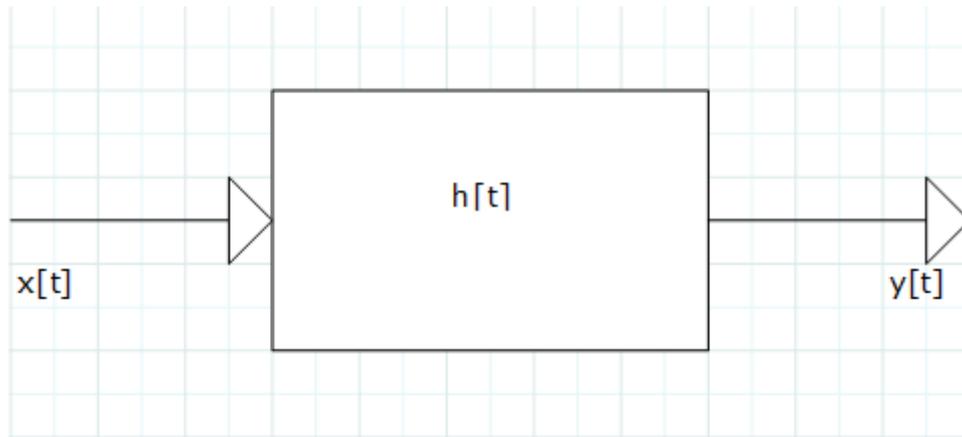


Figura 4. Representación de una función de transferencia en diagramas de bloques.

La figura 4 representa un sistema LTI, como por ejemplo una sala. Aquí $x[t]$ es la entrada al sistema que podría ser representado por una señal impulso, mientras que $y[t]$ es la salida, es decir, la respuesta a este impulso. Por ejemplo, la entrada es la explosión de un globo en una sala o el ruido que puede ser generado mediante un altavoz, mientras que la salida será la respuesta grabada por un micrófono dentro de esta sala. A su vez, $h[t]$ representa la función de transferencia, que en este caso serán los modos propios de la sala.

2.5. Respuesta de frecuencia.

Es un parámetro que describe las frecuencias que están presentes dentro de un determinado medio, ayudando de esta manera a identificar el comportamiento frecuencial del lugar. En este caso, para obtener la respuesta en frecuencia del ejemplo del apartado 2.2.2. Es necesario la aplicación de la transformada de Fourier, que permitirá obtener la respuesta en frecuencia del impulso, a partir de la respuesta en el dominio del tiempo.

Yong (2003, p.31) señala que cada señal de tiempo, con una energía finita tiene una transformada de Fourier correspondiente. Esto quiere decir que cada $x[t]$ en la entrada va a tener una $x(f)$ correspondiente. Así mismo, si en el dominio del tiempo se tiene una señal de salida $y[t]$, su correspondiente será una $y(f)$ en el dominio frecuencial (figura 5).

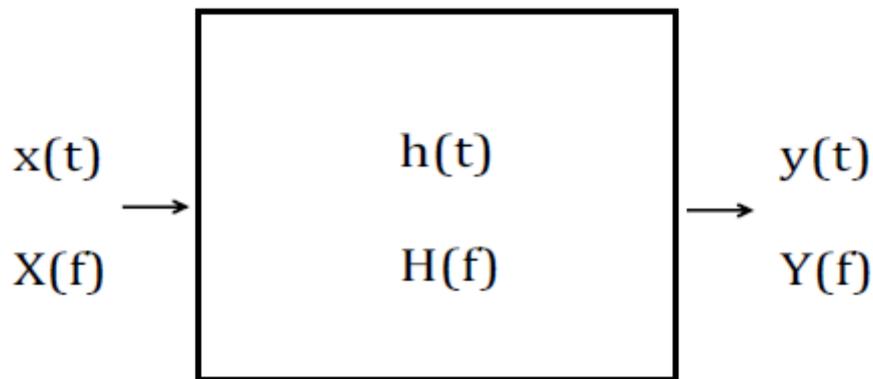


Figura 5. Sistema lineal invariante en el tiempo.

Tomado de (Yong, 2003).

Es posible transformar una señal en el dominio del tiempo, a una señal en el dominio frecuencial mediante la utilización de la transformada de Fourier representada por la función $h(t)$:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i\omega t} dt \quad (\text{ecuación 2})$$

La relación de la entrada y salida de un sistema LTI, puede expresarse en el dominio de la frecuencia, teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$Y(f) = X(f)H(f) \quad (\text{ecuación 3})$$

Siendo $H(f)$ la respuesta en frecuencia expresada por:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (\text{ecuación 4})$$

2.6. Tiempo de reverberación (RT).

El tiempo de reverberación es el tiempo que se demora en decaer la energía en una sala, y se expresa mediante el tiempo que transcurre desde que la fuente deja de emitir un sonido, hasta disminuye en 60dB su nivel de presión sonora. Esto dependerá lógicamente del volumen de la sala, su forma, los materiales por los que está construido y los elementos que se encuentran dentro de la misma.

Para su cálculo se aplica la fórmula de Sabine:

$$RT = \frac{0.161V}{A} \quad \text{(ecuación 5)}$$

Dicha fórmula relaciona el volumen de la sala V y el coeficiente de absorción del recinto representado por la variable A .

Cabe mencionar, que el tiempo de reverberación se puede obtener también con un decaimiento de 20 o 30 dB, una vez que la fuente deja de emitir. A estos tiempos de reverberación se los conoce como T_{20} o T_{30} .

2.7. Frecuencia de corte de Schroeder.

La frecuencia de Schroeder permite dividir el espectro de frecuencias en tres zonas, una de ellas correspondiente al área de baja frecuencia, la de las frecuencias medias y la última correspondiente a las frecuencias altas. De esta manera se pueden estudiar los modos propios que se producen en una sala de manera independiente, aplicando un método de estudio diferente en la zona de altas y bajas frecuencias (tabla 1). En la zona de frecuencias bajas los modos propios se encuentran más separados, cosa que no ocurre en la zona por encima de la frecuencia de Schroeder, donde los modos propios se superponen.

Tabla 1.

Rango de frecuencias y método utilizado en cada zona según la frecuencia de Schroeder

Frecuencias bajas	20Hz-fc	FEM, BEM, TDFEM
Frecuencias medias	fc-4fc	Combinación de métodos
Frecuencias altas	4fc-20kHz	Acústica geométrica, SEA, BEM

La frecuencia de Schroeder se la define de la siguiente manera:

$$f_c = 2000 \sqrt{\frac{\overline{RT}}{V}} \quad \text{(ecuación 6)}$$

En donde:

\overline{RT} = tiempo de reverberación promedio de la sala.

V= volumen de la sala.

2.8. Métodos numéricos.

Es un procedimiento utilizado para resolver problemas que se presentan en la física, como es el caso de una ecuación diferencial parcial (PDE por sus siglas en inglés). Estas soluciones se obtienen a través de cálculos aritméticos que permiten obtener resultados aproximados a la solución del problema. En otras palabras, se resuelve la ecuación que gobierna a cierto fenómeno físico asignando valores a las variables de entrada.

2.8.1. Método de elementos finitos (FEM).

FEM es un procedimiento de aproximación de problemas continuos (figura 6). Esto quiere decir que el sistema continuo se divide mediante líneas o superficies imaginarias en un número de elementos finitos conectados por un número discreto de puntos (nodos) (figura 7), en los que se resuelven las PDE. De esta forma, los desplazamientos de los nodos serán las incógnitas fundamentales del problema (Cooke, 2017).



Figura 6. Modelo de una pieza.

Tomado de (Cooke, 2017).

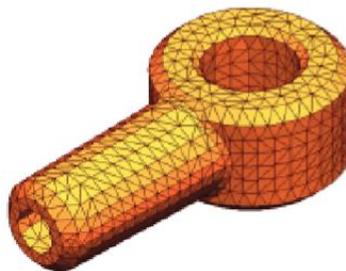


Figura 7. Modelo dividido en elementos finitos.

Tomado de (Cooke, 2017).

Al dividir el objeto en elementos más pequeños no superpuestos (figura 7), se forman mallas entre las uniones de los nodos, generando de esta forma ecuaciones en cada elemento finito. Dichas ecuaciones se combinan y generan la continuidad en el límite entre elementos. Finalmente todas las soluciones individuales se ensamblan, para obtener una solución al problema, dando como

resultado un sistema de ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas con diferentes métodos matemáticos (Yong, 2003).

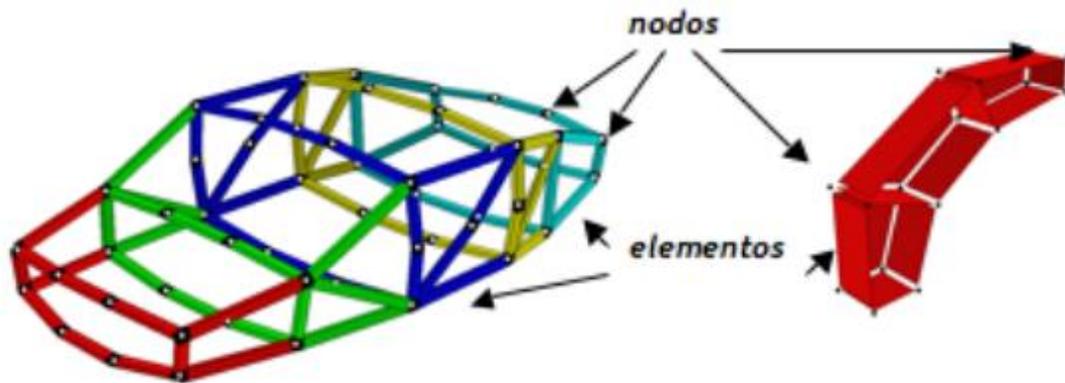


Figura 8. Ejemplo de discretización.

Tomado de (Universidad Autónoma de México, 2017)

En la figura 8, se puede apreciar un ejemplo de discretización de un objeto en un conjunto de nodos y barras que facilitarían el cálculo con FEM, BEM o TDFEM.

En el ámbito de la acústica, este método de los elementos finitos resuelve la ecuación de la onda en un medio de propagación, que puede ser aire (Acústica), estructura (Vibro-acústica), medio poroso (poro-acústica), etc.

2.8.2. Método de los elementos finitos en el dominio del tiempo (TDFEM).

Este método resuelve cierta PDE en el dominio del tiempo. Mediante la utilización de TDFEM se resuelve la ecuación de onda que se propaga en el aire. Estos resultados se generan a partir de la combinación de la discretización espacial que utiliza FEM y una técnica en el dominio del tiempo para dar soluciones al sistema lineal de ecuaciones en cada paso de tiempo, de manera estable.

Yong (2003, p.138) señala que, en la acústica, este método es utilizado para estudiar el comportamiento de una sala en el dominio del tiempo, especialmente para mediciones de respuesta al impulso.

2.9. Ecuación de onda en el dominio de la frecuencia

2.9.1. Aéreo.

El campo sonoro (presión acústica), que se genera dentro de una estancia, está determinado por:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - q_d) \right) - \frac{k^2_{eq} \rho_t}{\rho} = Q_m \quad (\text{ecuación 7})$$

Donde ρ es la densidad del fluido, p_t es la presión acústica total; p_b es el campo acústico de fondo equivalente a $p e^{-i(k \cdot x)}$ y k es el número de onda equivalente a $2\pi f/c$. La presión acústica total viene dada por la siguiente expresión:

$$\rho_t = \rho + \rho b \quad (\text{ecuación 8})$$

Por otro lado, Q_m representa el tipo de fuente a utilizar dentro del modelo y se define por:

$$Q_m = \frac{4\pi}{\rho} S \delta(x - x_0) \quad (\text{ecuación 9})$$

$$S = e^{i\Phi} \frac{i\omega \rho Q_s}{4\pi} \quad (\text{ecuación 10})$$

En este caso, Φ representa la fase, δ es la función dimensional del delta de Dirac (Delta, Variable, & Rapp, 2017), Q_s representa la tasa de flujo volumétrico de la fuente, que equivale a la multiplicación de la fuerza de la fuente de flujo ($1e^{-5} \text{m}^3/\text{s}$) y un número imaginario i . Esta multiplicación se la realiza con la finalidad de obtener gráficos de presión distintos de cero, en el valor de cero de la fase (Multiphysics, 2011.)

Por otro lado, ya que la ecuación 7, es la que gobierna el sistema y es una ecuación diferencial, es imperante establecer condiciones de frontera. Esto va a permitir adicionar propiedades de los materiales que modifiquen la propagación de la onda en el medio. Una de estas propiedades es la impedancia, que es la resistencia que opone un medio a las ondas sonoras que se propagan. Por tal motivo, es necesario conocer el coeficiente de absorción frecuencial del material, ya que con estos datos se puede deducir el comportamiento que va a tener la onda en un determinado medio.

La ecuación 11 representa la impedancia. En donde $\rho_0 c$, es la impedancia acústica característica del aire y α representa el coeficiente de absorción de un determinado material para cada frecuencia central de la banda de octava.

$$Z = \rho_0 c \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha}}{1 - \sqrt{1 - \alpha}} \quad \text{(ecuación 11)}$$

Otra de las propiedades a considerar es el amortiguamiento de un material, esto quiere decir que si un material es muy rígido la velocidad que se genera en las condiciones de frontera será igual a cero. En el caso opuesto, se genera un modelo de mayor complejidad al considerar que la velocidad en las fronteras es diferente de cero, por lo que la onda de sonido que incide sobre esta va a tener más modificaciones en su estructura.

2.9.2. Aéreo con material poroso

A diferencia del modelo anterior, en este caso se añade cierto material poroso dentro del volumen de aire de la sala, considerándose no solo la propagación del sonido por el aire, sino también a través del material poroso teniendo en cuenta el amortiguamiento de este.

Por tal motivo, es necesario vincular el coeficiente de absorción frecuencias y la impedancia del material para establecer las condiciones de frontera.

$$-n \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - q_t) \right) = \frac{1 \partial p_t}{z \partial t} \quad \text{(ecuación 12)}$$

La ecuación 12 representa las condiciones de frontera del material a utilizar, en donde la impedancia z se obtiene de la ecuación 11 que es la resistencia que presenta el material. La velocidad del sonido c y la densidad ρ dependerán del material a utilizar.

2.10. Ecuación de onda en el dominio del tiempo.

2.10.1. Aéreo.

En este caso, el campo de la presión acústica se la analiza desde otra perspectiva, como es en el dominio del tiempo. En este caso, uno de los aspectos más importantes a considerar es la definición del tipo de fuente necesaria para obtener la respuesta al impulso de la sala y poder resolver la ecuación de la onda.

Dicha ecuación se encuentra expresada de la siguiente manera.

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \nabla p \right) = S(x, t) \quad \text{(ecuación 13)}$$

En donde, ρ representa la densidad del fluido y c la velocidad del sonido en el medio. Asimismo, $S(x,t)$, representa el tipo de punto-fuente utilizado, en este caso definido por la siguiente ecuación.

$$S(x, t) = \frac{dg}{dt}(t) \delta^2(x - x_0) \quad \text{(ecuación 14)}$$

El símbolo δ representa la función dimensional del delta de Dirac (Delta et al., 2017) y $g(t)$ define el tipo de pulso utilizado para mover el aire dentro de la sala.

En este caso representando a un pulso Gaussiano, muy utilizado para la resolución de problemas transitorios (Multiphysics, 2011).

El tiempo que dura el pulso está determinado por el corte Gaussiano la misma que es idéntica en un punto x y $x=0$. De esta forma, la transformada de Fourier de $g(t)$ es definida como $G(w)$, donde $w=2\pi f_0$. $G(w)$ permanece como una función Gaussiana similar a $g(t)$.

$$g(t) = \begin{cases} Ae^{-\pi^2 f_0^2 (t-\tau)} & 0 < t < 2\tau \\ 0 & \text{resto} \end{cases} \quad (\text{ecuación 15})$$

donde A es la amplitud del impulso, f_0 es proporcional al ancho de banda del pulso, $\tau = 1/f_0$.

Si se analiza la energía que posee el pulso alrededor de su frecuencia central f_0 , se dice que su ancho de pulso estará dado en el rango de $-2w_0 < w < 2w_0$, Teniendo su mayor concentración de energía en el rango de $-w_0 < w < w_0$ (Nuñez Daniel, Puyana Virginia, 2018).

De esta manera, el sistema será resuelto entre las longitudes de onda correspondientes a la frecuencia central f_0 y la frecuencia máxima a resolver f_{max} . Esta a su vez determina la densidad de la malla de la geometría, así como también su tamaño máximo dado por la siguiente ecuación.

$$h_{max} = \frac{\lambda_{min}}{N} = \frac{c}{f_{max}N} \quad (\text{ecuación 16})$$

Donde N representa el número de elementos por longitud de onda requerido, en este caso igual a 6. Se considera este valor porque al resolver la ecuación de una onda, la cantidad de errores que se genere va a ser mínima (Yong, 2003).

Por otro lado, la relación que tiene la malla con el paso de tiempo se la expresa con la condición de Courant-Friendrichs-lewy (CFL), que se la puede interpretar

como la fracción de un elemento que la onda viaja en un solo paso de tiempo (Yong, 2003).

$$CFL = \frac{c\Delta t}{hmax} \quad (\text{ecuación 17})$$

Donde Δt representa el paso de tiempo interno asumiendo que la malla generada resuelve adecuadamente la $fmax$ que viene representada en la ecuación:

$$\Delta t = \frac{hmaxCFL}{c} = \frac{CFL}{fmaxN} \approx \frac{1}{60fmax} \quad (\text{ecuación 18})$$

Yong (2003, p.86) señala que un valor de $CFL < 0.2$, permite obtener soluciones a la ecuación de onda con un valor mínimo de error, se podría decir que es casi despreciable.

2.10.2. Material poroso

Al igual que en el apartado 2.5.1.1, es necesario establecer las condiciones de frontera del material a utilizar, en este caso los coeficientes de absorción frecuencial que permiten obtener la impedancia del material (ecuación 11) y a su vez resolver la ecuación siguiente:

$$-n \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - q_t) \right) = \frac{1 \partial p_t}{z \partial t} \quad (\text{ecuación 19})$$

3. METODOLOGIA

3.1. Frecuencia de Schroeder: Rango de frecuencia y método numérico.

Antes de empezar con las simulaciones del modelo de la incubadora, es necesario calcular la frecuencia de corte de Schroeder, la misma que ayudará a identificar el método numérico a ser utilizado en cada zona de frecuencias. Por

tal motivo, es necesario obtener el RT y el volumen correspondiente a la incubadora. En este caso se utiliza un volumen de 0.14m^3 y un RT de 0.27s obtenido de las mediciones in situ.

Reemplazando estos valores en la ecuación 6 quedaría:

$$f_c = 2000 \sqrt{\frac{0.27}{0.14}} = 2777.46\text{Hz}$$

De esta forma el rango de frecuencias a analizar quedaría de la siguiente manera:

Tabla 2.

Rango de frecuencias de la incubadora a ser analizado

Frecuencias bajas	20Hz-2777Hz	FEM, BEM, TDFEM
Frecuencias medias	2777Hz-11109Hz	Combinación de métodos
Frecuencias altas	11109Hz-20kHz	Acústica geométrica, SEA, BEM

Como este proyecto se enfoca en la utilización de FEM, el análisis se lo realizará hasta la banda de octava de 2000Hz , puesto que para frecuencias superiores la metodología de análisis es diferente.

3.2. Métodos numéricos.

3.2.1. Ecuación de onda en el dominio del tiempo.

La primera parte de este estudio consiste en la simulación del modelo de la incubadora en Comsol, en donde se tomará como referencia el manual "Transient Gaussian Explosion" (Multiphysics, 2011). El mismo que será utilizado para definir las condiciones iniciales que permita obtener la respuesta al impulso de la incubadora.

El modelo tendrá dos formas de análisis. Por un lado, se analiza la respuesta al impulso en el medio de propagación como es el aire. Mientras que en el segundo análisis la respuesta al impulso se obtiene al acoplar dos medios de propagación, siendo en este caso el aire y el material absorbente, este último se modela como un colchón dentro de la incubadora.

A continuación, se explica el procedimiento a seguir para cada uno de los modelos planteados.

3.2.2. Aéreo.

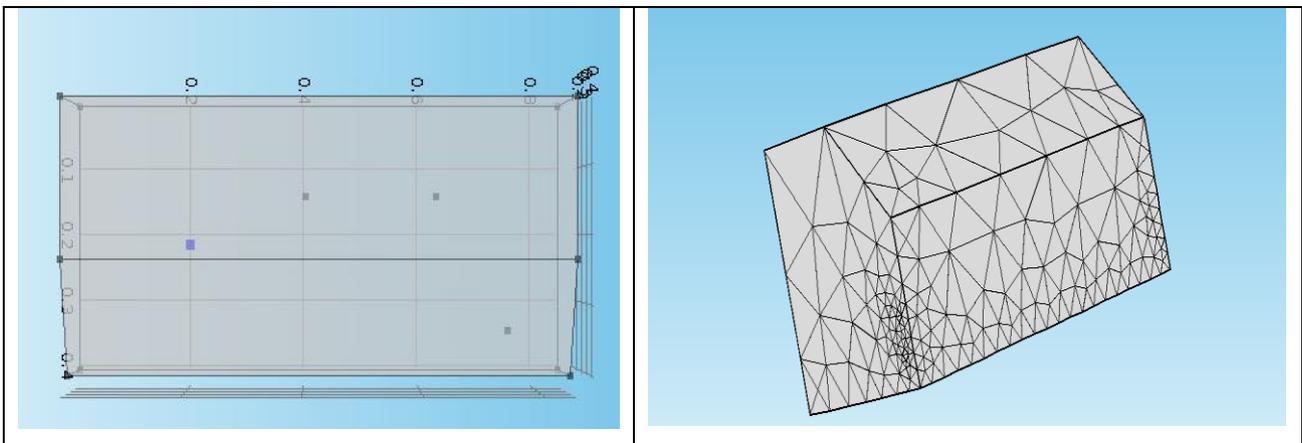


Figura 9. Modelo de incubadora en Comsol.

La geometría de la figura 9 representa un paralelepípedo de 0.84X0.4X0.43 m con un chaflán en una de sus superficies. Dentro de este volumen se establecen tres puntos de medición de la respuesta al impulso, como se establece en la tabla 3.

Tabla 3.

Posición de los receptores y la fuente emisora.

punto	x	y	z
1	0.145	0.405	0.2
2	0.34	0.748	0.2
3	0.145	0.628	0.2
fuelle	0.215	0.21	0.24

Además, es necesario definir las condiciones iniciales para la resolución de la respuesta al impulso, como es el caso de las propiedades del medio de propagación, las condiciones de frontera y el tipo de pulso a ser generado.

Tabla 4.

Variables de entrada de la geometría y la fuente.

ρ	1.2 [kg/m³]	Densidad del aire
c	343.8 [m/s]	Velocidad del sonido
f_o	(125,250,500,1000,2000) Hz	Frecuencia más alta de calculo
L	c/f _o	Longitud de onda más corta
N	6	Elementos por longitud de onda
h_{max}	L/N	Tamaño típico del elemento
A	800 [m ³ /s]	Amplitud del punto-fuente
f_b	c/(h _{max} *N)	Ancho de banda de frecuencia
t₀	1/f _o	Ancho medio de pulso
CFL	0.1	Numero CFL
t_{step}	CFL*h _{max} /c	Paso de tiempo

Como se puede observar en la tabla 4, el modelo de incubadora se simulará tantas veces como la cantidad de bandas de frecuencia consideradas, en este caso definido por la variable **f_o**. Por lo que, si se cambia la frecuencia de cálculo, cambiará también el tamaño de la malla **h_{max}** y los pasos de tiempo a ser evaluados **t_{step}**.

Por otro lado, para el pulso Gaussiano, se ha definido una amplitud **A** de 800 [m³/s]; ya que este valor, ayudará a obtener el decaimiento necesario para el cálculo del tiempo de reverberación. Asimismo, el ancho del pulso Gaussiano en donde se concentra la mayor cantidad de energía está definido por la variable **t₀**. Este valor va a cambiar dependiendo de la frecuencia que se esté analizando.

De esta forma, las variables tendrán los siguientes valores iniciales para cada frecuencia a evaluar.

Tabla 5.

Valores de las variables de entrada para el modelo aéreo.

fo [Hz]	125	250	500	1000	2000
hmax [MN⁻¹]	0.46	0.23	0.11	0.06	0.03
Δt [μs]	133.8	67	32	17.5	8.7
(t_step)					
CFL	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Antes de realizar el cálculo de este modelo, resulta factible establecer las condiciones de frontera del medio de propagación, en este caso correspondiente al acrílico, para ello es importante definir el coeficiente de absorción para cada banda de octava.

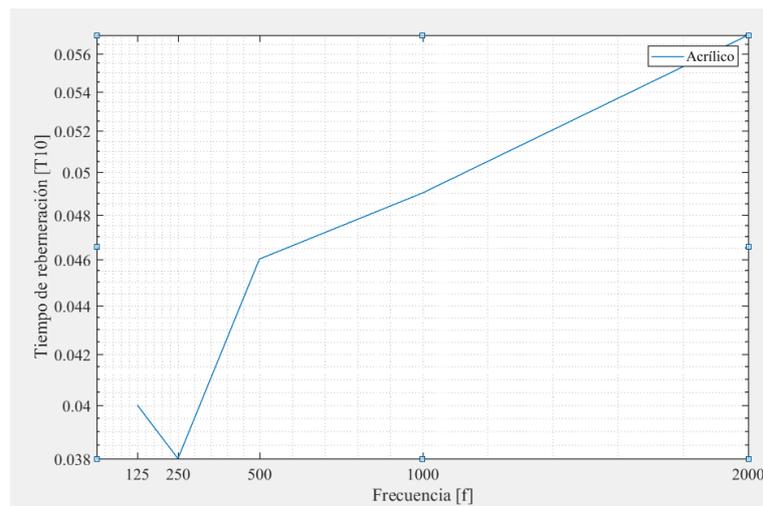


Figura 10. Coeficientes de absorción del acrílico.

Tabla 6.

Coeficiente de absorción del acrílico.

Hz.	125	250	500	1000	2000
Coef.	0.040	0.038	0.046	0.049	0.057

Cabe mencionar que, al no tener una muestra del material de la incubadora por motivos de autorización, se ha buscado un distribuidor de acrílico en el Ecuador para obtener una muestra similar, del cual se ha calculado los coeficientes de absorción con el tubo de impedancia. De esta forma, los valores de la tabla 6 servirán para determinar la impedancia en cada banda de octava a analizar.

Finalmente, el tiempo que se emplea para la evaluación de este modelo es de 1 segundo, en donde Comsol entregará resultados del NPS cada 5ms.

3.2.3. Material poroso

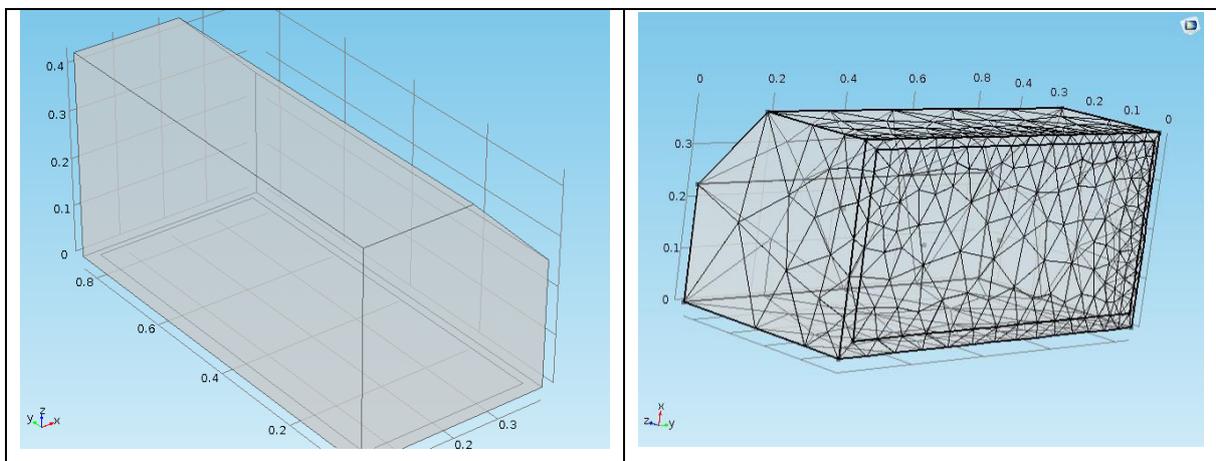


Figura 11. Modelo de incubadora en Comsol con material poroso.

La simulación que se presenta en este apartado corresponde a la interacción entre el aire y el material poroso, añadido dentro del volumen de la incubadora. Este material absorbente se lo incluye porque simula el colchón en donde se ubica el neonato.

De esta forma, el nuevo material va a modificar los resultados del NPS de la incubadora, por lo que se implementan los coeficientes de absorción por frecuencia, para determinar sus condiciones de frontera.

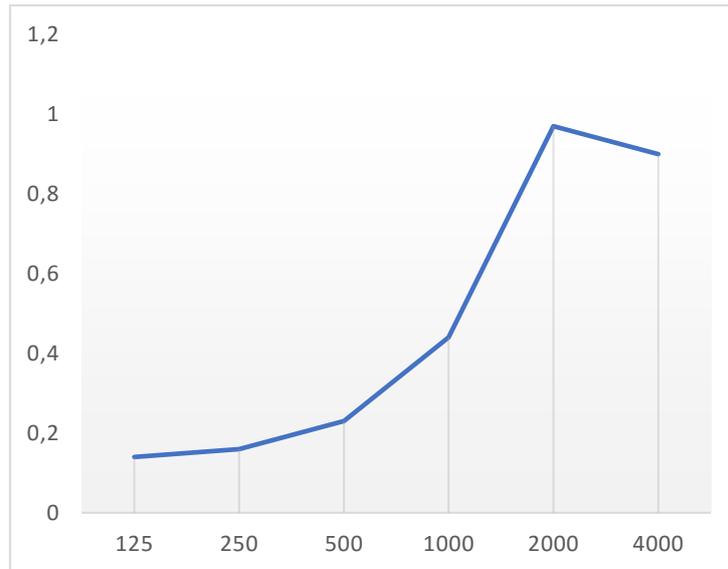


Figura 12. Coeficientes de absorción del material absorbente.

Tabla 7.

Coeficientes de absorción del material absorbente.

Hz.	125	250	500	1000	2000	4000
Coef.	0.13	0.16	0.24	0.47	0.93	0.92

Cabe mencionar que, para estas simulaciones, se utiliza un modelo simplificado de incubadora, esto con la finalidad de optimizar los cálculos matemáticos. Por esta razón, una de las superficies de la incubadora será dividida en dos, estableciendo a una de estas superficies las dimensiones de 0.35X0.8 m, medidas correspondientes al colchón.

3.3. Mediciones Insitu.

3.3.1. Respuesta al impulso de la incubadora

Para la obtención de las mediciones de la IR, se ha hecho uso del software de Matlab, el mismo que permitirá almacenar los registros tomados por el micrófono.

La señal utilizada para la evaluación es el ruido blanco, debido a que presenta un espectro frecuencial plano. Asimismo, la fuente utilizada corresponde a un modelo hexaédrico pequeño, la misma que fue construida específicamente para

este proyecto, por lo que es lo suficientemente pequeña para caber dentro de la incubadora.

3.3.2. Tiempo de reverberación.

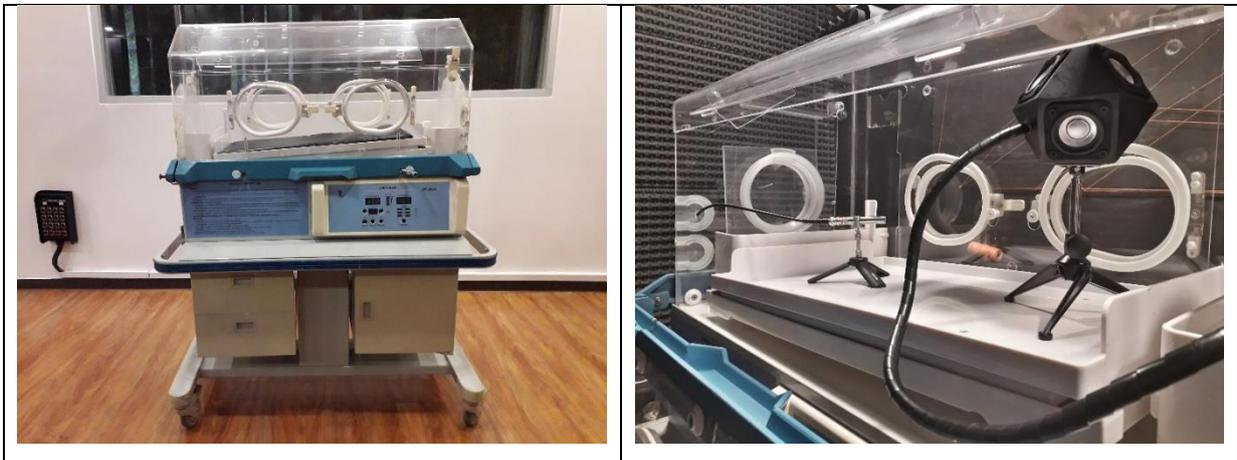


Figura 13. Mediciones insitu del tiempo de reverberación.

Para estas mediciones, se utilizan las mismas posiciones de fuente y receptores que se encuentran en la tabla 3. El tiempo de medida es de 10 segundos por cada muestra, obteniendo un total de 6 mediciones de los 3 puntos receptores establecidos.

Las mediciones se realizaron en la sala EG1 de 18m³ de volumen, la misma que tiene un bajo nivel de RT, aproximadamente de 0.1s en promedio. La sala está construida con paredes dobles y entrega un considerable nivel de aislamiento, lo suficientemente bueno como para tener una buena relación señal-ruido(S/N).

Para el cálculo del RT, es necesario procesar los registros obtenidos de la incubadora. Esto quiere decir que se ha implementado un código en Matlab que permite filtrar una determinada señal, cuantas veces sea necesario hasta obtener una respuesta al impulso, la misma que refleje el decaimiento de la señal una vez la fuente haya dejado de emitir. Esta nueva señal que se encuentra en el dominio del tiempo servirá para encontrar el T20 dentro de la incubadora. Para ello se utiliza otro código que involucra una función de transferencia que utiliza

la transformada de Fourier, la misma que servirá para interpretar los datos en el dominio de la frecuencia.

3.4. Validación

3.4.1. Insitu Vs Referencia.

Para la validación de este método, se va a analizar los datos del RT obtenidos de la sala EG1. Dichos datos corresponden a los tomados por el sonómetro Cesva (referencia), así como también a los registrados por Matlab (insitu).

Para llevar a cabo estas mediciones, se ha establecido diferentes puntos de medición, teniendo en cuenta las consideraciones que establece la normativa UNE-EN ISO 3382-2. En la cual se describe el procedimiento, el equipo necesario, el número de posiciones requerido y el método para evaluar los datos obtenidos de la sala medida.

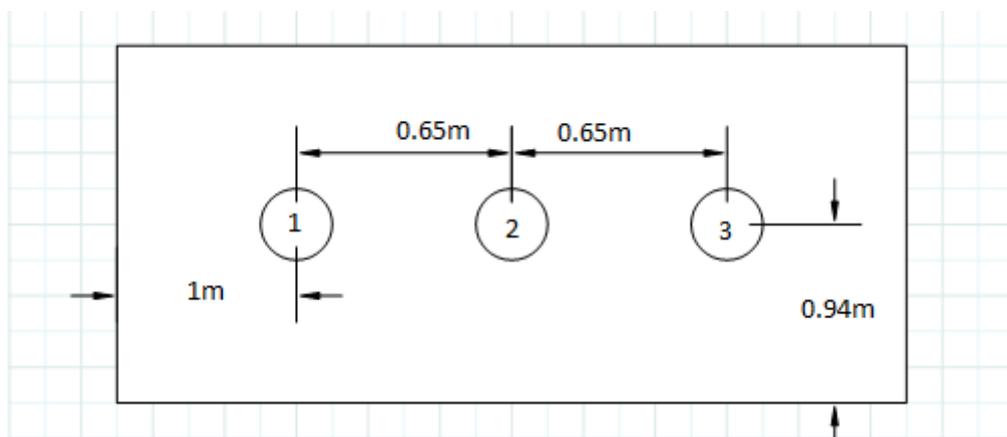


Figura 14. Posiciones de medición EG1.

Cada uno de los puntos indicados en la figura14 corresponden a la posición de la fuente y receptor que se estableció dentro de la sala EG1, de las cuales se realizaron las siguientes combinaciones para el cálculo RT.

Tabla 8.

Posiciones de medición.

FUENTE	RECEPTOR	DECAIMIENTOS	MÉTODO
1	2 y 3	2	CESVA Y
3	1 y 3	2	MATLAB

Por otro lado, como se menciona en el apartado 3.3.2, es necesario procesar los registros almacenados por Matlab. En este caso lo primero que se realiza es filtrar la señal obtenida cuantas veces sea necesario hasta obtener una IR adecuada. La misma que permitirá obtener un RT para cada banda de octava analizada, en este caso para las bandas de octava (125,250,500,1000,2000) Hz.

Cabe mencionar que, el RT se obtiene hasta la frecuencia de 2000Hz, debido a que es la frecuencia máxima hasta donde se puede aplicar FEM.

En la figura15 se presenta un ejemplo de la IR obtenido luego de filtrar la señal obtenida en las mediciones.

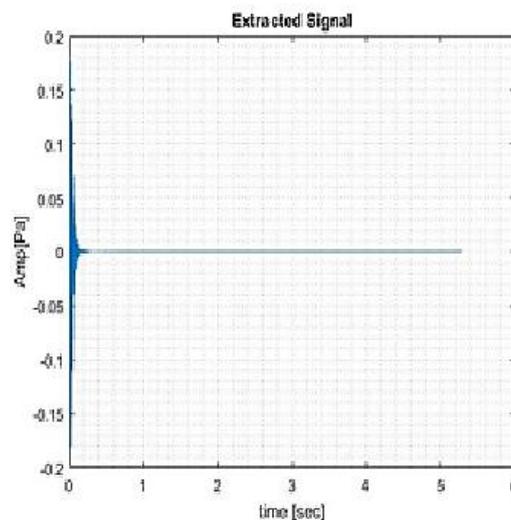


Figura 15. Respuesta al impulso obtenida en Matlab.

Una vez determinada la respuesta al impulso de cada una de las muestras registradas, se va a realizar comparaciones del RT tanto de las mediciones obtenido por el sonómetro cesva así como también los obtenidos por medio del algoritmo implementado en Matlab. Estas comparaciones se la realizan con la finalidad de saber cuan fiable es la aplicación de este método para el cálculo de la respuesta al impulso de un determinado medio de propagación.

En este caso, en la figura 16 se representa los resultados obtenidos del RT de la referencia e insitu.

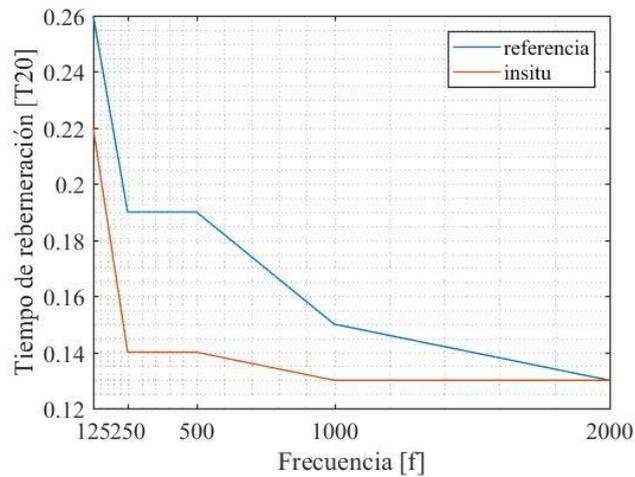


Figura 16. Tiempo de reverberación referencia vs insitu.

Si se calcula el valor absoluto de las mediciones obtenidas se puede corroborar que el método para realizar el cálculo a la respuesta al impulso es eficiente; esto es debido a que el porcentaje de error obtenido en cada banda de octava no supera el 15% como se evidencia en la tabla 9.

Tabla 9.

Variación por banda de tercio de octava.

	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz
variación	12%	13%	11%	6%	1%

Por otro lado, es necesario tener en cuenta la relación S/N al momento de realizar las mediciones, ya que un alto nivel de ruido de fondo no va a permitir obtener el decaimiento adecuado para la evaluación del RT en cada banda de octava a analizar.

4. RESULTADOS.

4.1. Respuesta al impulso

4.1.1. Aéreo

En este apartado se analizan los resultados de la respuesta al impulso obtenido para cada banda de octava.

En la figura 17, se muestra el mallado obtenido según la frecuencia máxima de cálculo, en este caso 1000 Hz. De la misma forma, en la figura 18 se muestra la respuesta al impulso Gaussiano de cada banda de octava, los mismo que fueron obtenidos en los tres puntos receptores definidos en la tabla 3.

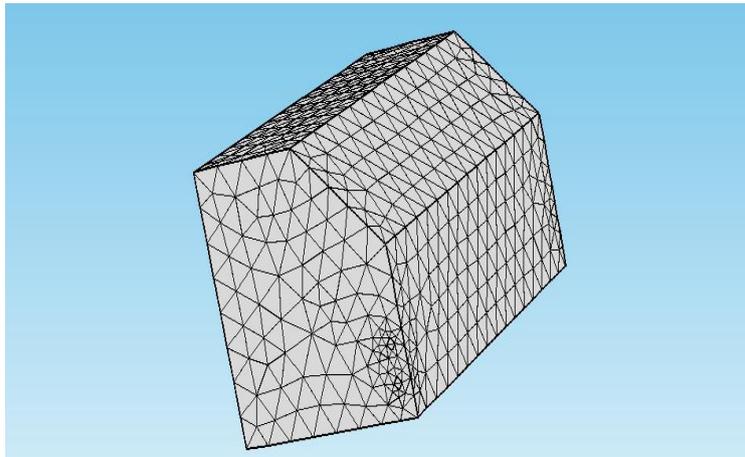


Figura 17. Ejemplo de mallado para la frecuencia de 1000Hz.

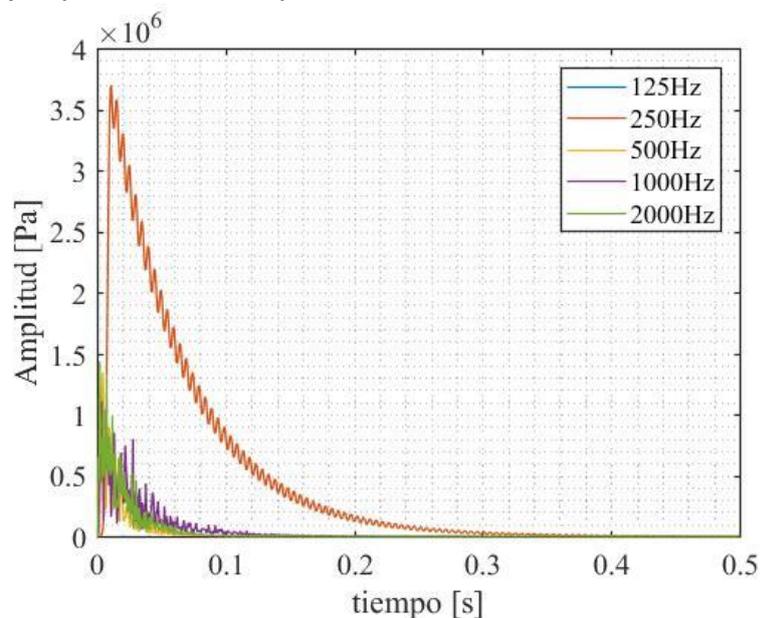


Figura 18. Respuesta al impulso de las bandas de octava sin material absorbente.

En este caso, si se analiza la figura 18, se puede afirmar que; la incubadora presenta mayor cantidad de presión en la frecuencia de 250Hz, por lo que indicaría que es una frecuencia propia de resonancia. De la misma forma ocurre en la frecuencia de 500Hz, en donde se puede apreciar que la cantidad de presión sobresale de las frecuencias de 125,1000 y 2000Hz, por lo que se podría considerar también como un modo propio de vibración, pero de menor amplitud. Este dato será corroborado al momento de obtener el T10 de este modelo. Finalmente, en las bandas de octavas restantes, las amplitudes que se obtienen en cada paso de tiempo muestran un decaimiento uniforme, en donde su punto máximo no sobrepasa los 3.5×10^6 [Pa]

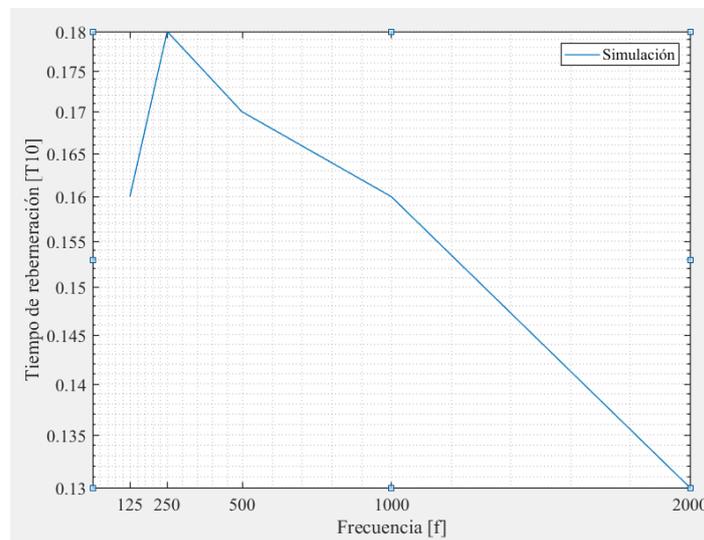


Figura 19. RT del modelo aéreo.

La figura 19, representa la respuesta del T10 obtenido dentro de la incubadora, en donde se puede apreciar que; la menor absorción se obtiene alrededor de los 250Hz. Lo mismo ocurre en la banda de octava de 500Hz, en donde se observa un T10 mayor a los obtenidos en las bandas de 125,1000 y 2000 Hz.

De esta forma, si se compara los resultados de la figura 18 y 19, se puede corroborar que la incubadora tiene sus modos propios en las frecuencias de 250 y 500Hz, esto puede ser debido al amortiguamiento que presenta el material utilizado para esta simulación, en este caso el acrílico. En cual tiene un bajo coeficiente de absorción en las frecuencias antes mencionadas.

La figura 20 representa un ejemplo de mallado obtenido en el colchón, en este caso para la frecuencia de 125Hz. De la misma manera, en la figura 21 se representa la respuesta al impulso de la interacción del aire con el material poroso obtenida de todas las bandas de octava.

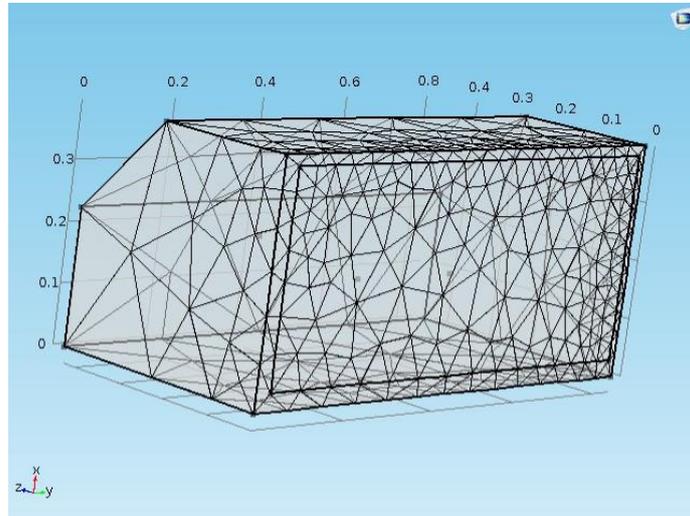


Figura 20. Ejemplo de mallado del colchón para la frecuencia de 125Hz.

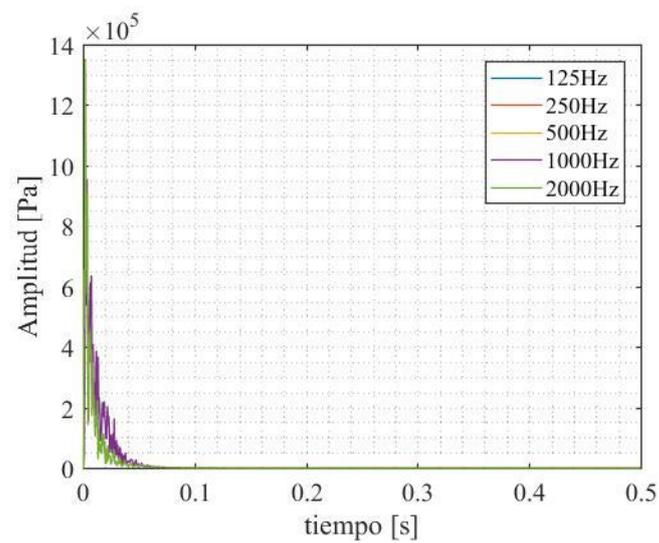


Figura 21. Respuesta al impulso de las bandas de octava con material absorbente.

Como era de esperarse, al introducir un material absorbente dentro de la incubadora, la presión sonora total debería ser mermada. Esto se puede evidenciar en la figura 21, en donde se observa que, en las frecuencias de resonancia propias de la incubadora, en este caso 250 y 500Hz, la presión va a disminuir su valor, siendo la banda de octava de 125Hz a la que más afecta este material absorbente.

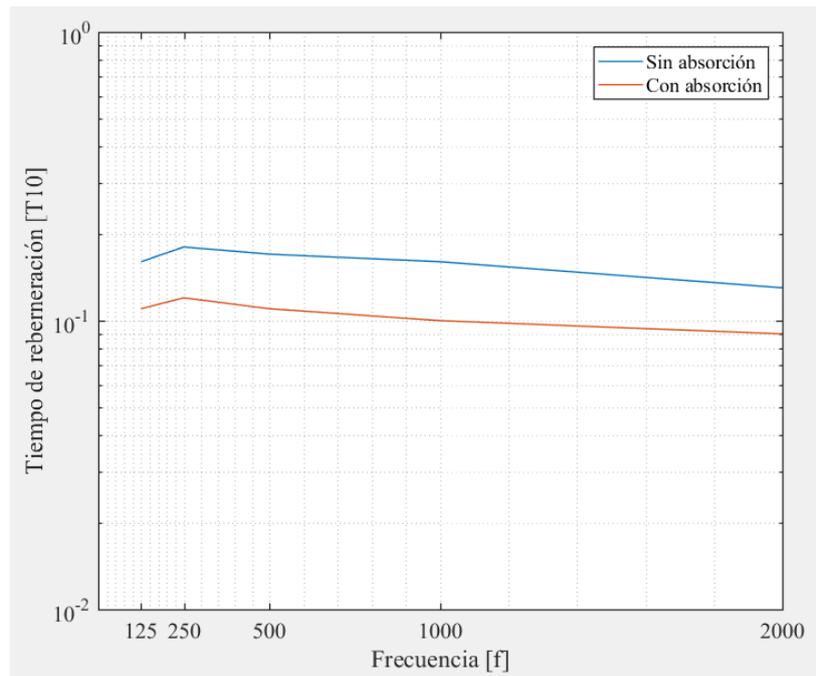


Figura 22. T10 del modelo en el aire y el material poroso.

En la figura 22, se muestra el efecto que se tiene en el T10, al momento de añadir un material absorbente dentro de la incubadora. En este caso, se puede evidenciar la disminución que se obtiene sobre todas las bandas de frecuencia analizadas, de manera especial en las frecuencias de resonancias correspondientes a 250 y 500Hz.

4.2. Insitu.

La figura 23, representa los datos obtenidos del T10 insitu y la simulación con el modelo aéreo. La tendencia que presentan las gráficas es parecida, siendo el RT de la simulación mayor que el insitu para todas las bandas de octava. De esta

forma se puede evidenciar que, en las bandas de 125, 1000 y 2000 Hz la diferencia es mayor.

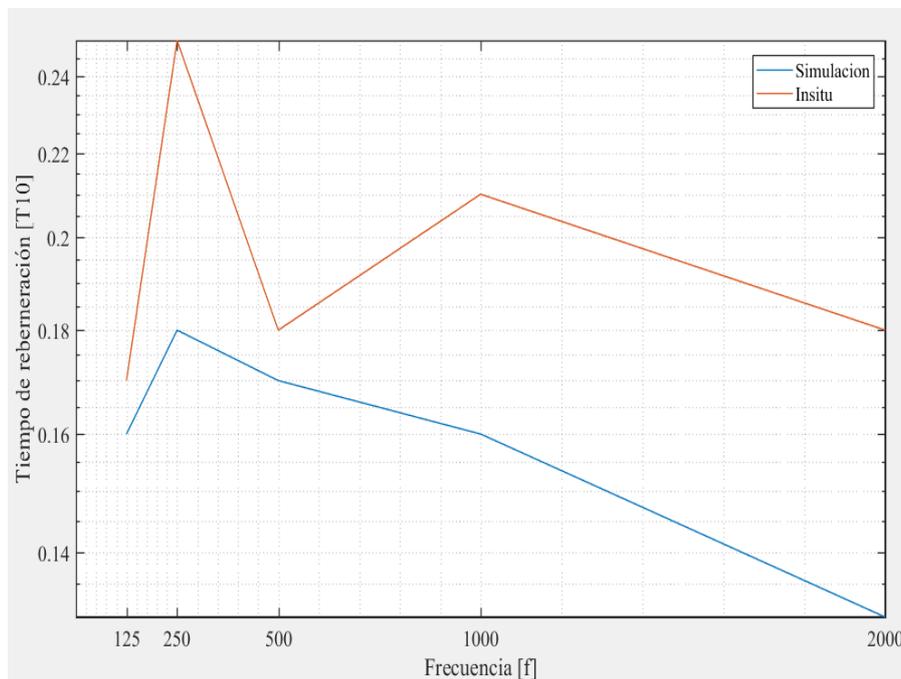


Figura 23. Relación del T10 de la simulación en el aire e insitu.

Si se obtiene el error absoluto de las mediciones presentadas en la figura 23 se puede decir que el porcentaje de error mayor se presenta en la frecuencia de 250 Hz correspondiente a un 16%, seguido de la frecuencia de 2000Hz en donde el porcentaje en esta frecuencia es de 15%.

Por otro lado, en las frecuencias de 125 y 500Hz el error absoluto es de 5%. Lo cual sugiere que el modelo simulado está bien calibrado en estas dos últimas bandas de octava. Esto quiere decir que, el material utilizado para la simulación tiene sus coeficientes de absorción correctos para estas frecuencias. Sin embargo, para las bandas de octava de 250, 1000 y 2000Hz, el coeficiente de absorción del acrílico utilizado no es el correcto, por lo que se debería buscar otro tipo de acrílico que se asemeje a los resultados insitu.

Cabe mencionar que en este tipo de simulaciones y en los métodos numéricos, la búsqueda de un material que se asemeje a la realidad es uno de los problemas que se presenta con mayor frecuencia.

Otra razón posible para esta desviación en las frecuencias de 1000 y 2000Hz es el coeficiente de absorción proporcionado para los agujeros de la incubadora. Ya que para estas simulaciones se ha considerado el coeficiente igual a 1 en todas las frecuencias. Por tal motivo, este valor podría no ser el óptimo para la simulación, por lo que al igual que el acrílico se debería realizar distintas simulaciones con distintos tipos de coeficientes de absorción. Cabe mencionar que es comúnmente conocido que a mayor frecuencia y a mayor complejidad de la geometría el tiempo en simular crece, ya que se requiere un mallado más fino y por ende esto significa mayor cantidad de tiempo de cálculo (Seron, Sanz, Kindelan, & Perez, 1990).

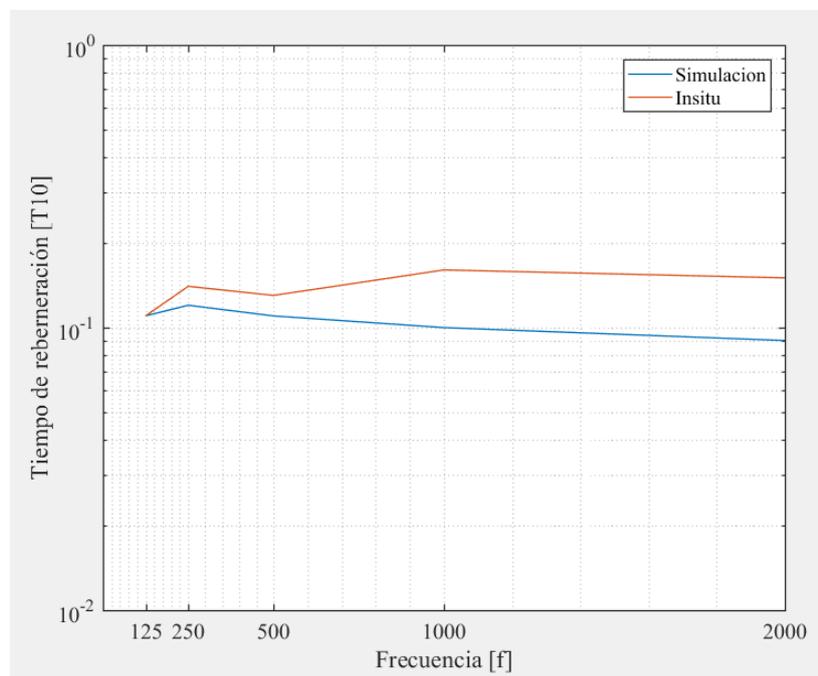


Figura 24. T10 del material poroso simulado e insitu.

Si se analiza el T10 obtenido en la figura 24 se puede evidenciar que el porcentaje de error relativo más alto se encuentra en las frecuencias de 1000 y 2000 Hz, en donde el valor obtenido es de 25%. Mientras que, para las frecuencias de 125, 250 y 500 Hz el valor del error absoluto no supera el 10 %, siendo en estas frecuencias en donde los coeficientes de absorción tanto del acrílico como el del colchón son los correctos.

Asimismo, la desviación que se produce en las frecuencias de 1000 y 2000Hz puede ser debido a un alto nivel de ruido de fondo captado durante la medición, ya que en la gráfica que presenta Matlab se puede visualizar este problema figura25.

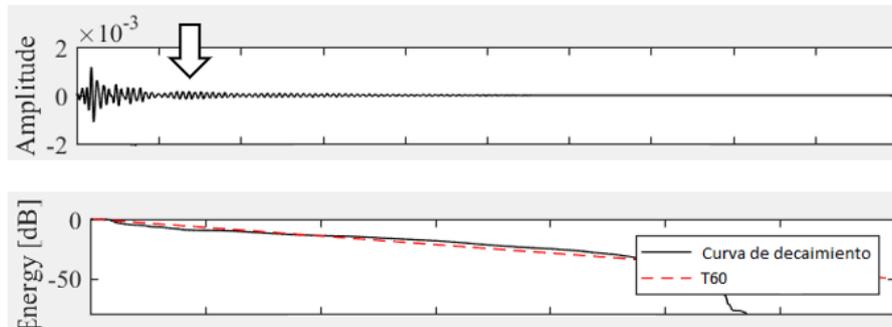


Figura 25. Respuesta al impulso y curva de decaimiento de 125Hz.

Las evidencias anteriores, muestran los resultados obtenidos tanto de la simulación como de insitu. Los mismos que permitirán evaluar los problemas que puede presentar la incubadora en el bienestar del neonato. Para ello se ha obtenido información de investigaciones realizadas en el ámbito de la medicina, en donde se evidencia las frecuencias fundamentales del llanto de un bebe(Daga & Panditrao, 2011)(Naithani, 2015).

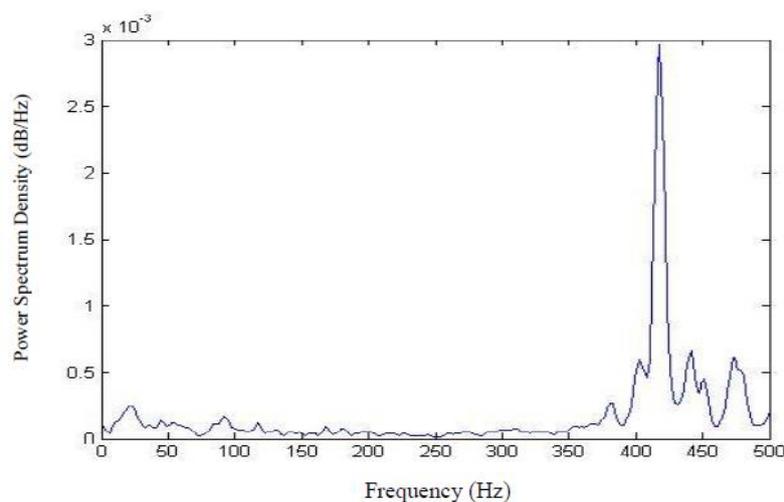


Figura 26. Frecuencia fundamental del llanto de un bebé tomado de(Daga & Panditrao, 2011).

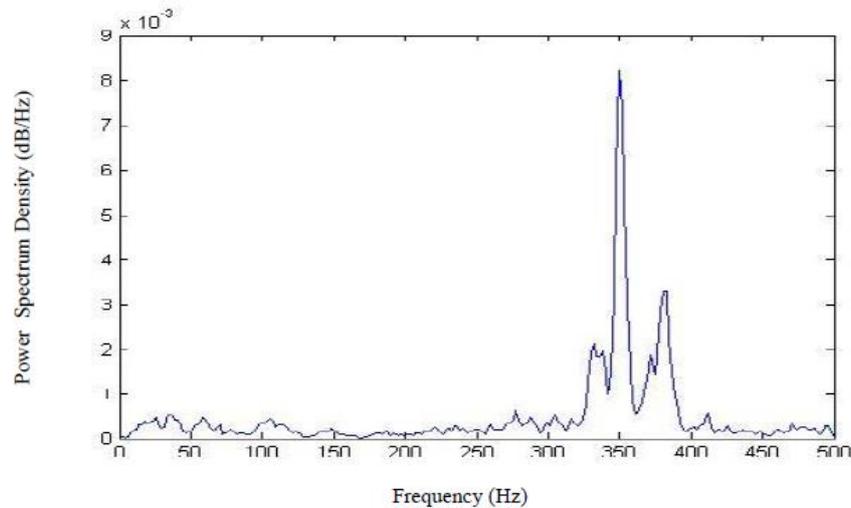


Figura 27. Frecuencia fundamental del llanto de una bebé.

Tomado de(Daga & Panditrao, 2011).

Las figuras 26 y 27, muestran las frecuencias fundamentales del llanto de un niño y una niña, en donde se puede apreciar que el rango de frecuencias más alto lo tiene el niño, comprendido en un rango de 400 a 450Hz. En el caso de la niña, la frecuencia fundamental se encuentra en el rango de 300 a 400Hz.

Teniendo en cuenta estos datos, se podría decir que la incubadora si presenta problemas en este rango de frecuencias ya que según los resultados obtenidos del T10, muestran que en las bandas de octava de 250 y 500 Hz se encuentran los modos propios de vibración. Por lo que podría afectar a la tranquilidad del neonato frente al ruido y por ende se podría producir una pérdida de audición temprana.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

De los resultados obtenidos se puede decir, que el RT del modelo simulado e insitu, presenta desviaciones máximas de un 25% en las frecuencias de 1000 y 2000Hz, esto es debido a que los coeficientes de absorción escogidos podrían no ser exactamente de los materiales con los que la incubadora está construida. Por lo que se debería realizar en un futuro, mediciones específicas de los propios materiales con los que la incubadora está construida. En otras palabras, extraer muestras de estos materiales para que su coeficiente de absorción sea medido mediante el tubo de impedancias (ISO 10534-2) y en cámara reverberante (UNE-EN ISO354). Permitiendo de esta manera mermar las desviaciones en los resultados. En las demás frecuencias las desviaciones del RT fueron mínimas o despreciables, por lo que se sugiere que el modelo realizado esta bien calibrado en estas bandas de octava.

Asimismo, refiriéndose al modelo de incubadora utilizado para la simulación. Se puede decir que, al simplificar la geometría, los tiempos de simulación en cada banda de octava sobre todo en altas frecuencias se va a disminuir. Pero al no tomar en cuenta ciertos detalles de la incubadora como por ejemplo los agujeros se puede perder absorción del sonido sobre todo en las frecuencias altas en donde la longitud de onda es pequeña.

Por otro lado, de los resultados obtenidos insitu se puede decir que en todo el rango de frecuencias analizado la incubadora va a afectar en cierta manera al bienestar del neonato. Esta afección será mayor en las frecuencias de 250 y 500Hz, donde se encuentran los modos propios de vibración de la incubadora. Se debe tomar muy en cuenta estos resultados ya que el bebé tiene un oído muy sensible, por lo que cualquier ruido va a afectar en su confort.

5.2. Recomendaciones.

En este sentido, se recomienda que al momento de realizar mediciones de este tipo, se utilice un lugar en donde el aislamiento y el acondicionamiento sean los

óptimos. Esto permitirá obtener resultados del RT con un mínimo margen de error y se logrará disminuir las incertidumbres en la investigación.

Finalmente, para resolver PDEs mediante FEM es primordial una buena discretización del modelo, es decir, que se debe utilizar una buena resolución de la malla, así como también los pasos de tiempo adecuados; esto definirá la precisión de los resultados. Sin embargo, hay que tener en cuenta que a una mayor resolución de malla mayor va a ser el tiempo de cálculo, por lo que involucra la utilización de mayores y mejores recursos computacionales.

REFERENCIAS

- Almadhoob, A., & Ohlsson, A. (2015). *Sound reduction management in the neonatal intensive care unit for preterm or very low birth weight infants. Cochrane Database of Systematic Reviews*. Recuperado el 16 de Diciembre de 2018 de <https://doi.org/10.1177/0954406218780129>
- Altuncu, E., Akman, I., Kulekci, S., Akdas, F., Bilgen, H., & Ozek, E. (2009). *Noise levels in neonatal intensive care unit and use of sound absorbing panel in the isolette. International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology, 73(7), 951–953*. Recuperado el 2 de Enero de 2019 de <https://doi.org/10.1016/J.IJPORL.2009.03.013>
- Bolaños, F., & Ochoa, J. (1990). *Medida y control de ruido*. (Marcombo, Ed.). Barcelona. Recuperado el 15 de Febrero de 2019 de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/udlasp/reader.action?docID=3181958&query=nivel%2Bde%2Bpresion%2Bsonora>
- Butler, S. L., & Zhang, Z. (2016). *Forward modeling of geophysical electromagnetic methods using Comsol. Computers & Geosciences, 87, 1–10*. Recuperado el 15 de Febrero de 2019 de <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2015.11.004>
- Cooke, R. (2017). *ProQuest Ebook Central. The Charleston Advisor, 19(2), 39–43*. Recuperado el 15 de Febrero de 2019 de <https://doi.org/10.5260/chara.19.2.39>
- Daga, R. P., & Panditrao, A. M. (2011). *Acoustical Analysis of Pain Cries' in Neonates: Fundamental Frequency. Special Issue of International Journal of Computer Applications, (3), 975–8887*. Recuperado el 21 de Marzo de 2019 de <http://research.ijcaonline.org/iceice/number3/iceice022.pdf>
- F.Miyara (1999). *Acústica y sistema de sonido*. Recuperado el 18 de Diciembre de 2018 de <https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/comite/queesrui.htm>
- Kellam, B., & Bhatia, J. (2009). *Effectiveness of an Acoustical Product in Reducing High-Frequency Sound Within Unoccupied Incubators. Journal of Pediatric Nursing*. Recuperado el 21 de Marzo de 2019 de <https://doi.org/10.1016/j.pedn.2008.05.002>

- Kenting, P., & Buhr, R. (1978). *Fundamental frequency in the speech of infants and children*(2.^aed.). San Diego: ASA.
- Kook, J., Koo, K., Hyun, J., Jensen, J. S., & Wang, S. (2012). *Acoustical topology optimization for Zwicker's loudness model - Application to noise barriers. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 237–240, 130–151. Recuperado el 15 de Junio de 2019 de <https://doi.org/10.1016/j.cma.2012.05.004>
- Multiphysics, C. (2011). *Test Bench Car Interior*. Recuperado el 19 de Febrero de 2019 de <https://www.comsol.com/model/test-bench-car-interior-1368>
- Multiphysics, C. (2011). *Transient Gaussian Explosion. Comsol Multiphysics*. Recuperado el 19 de Febrero de 2019 de www.comsol.com/trademarks.
- Naithani, G. (2015). Acoustic Analysis of Infant Cry Signals, 20, 68. Recuperado el 19 de Mayo de 2019 de [https://doi.org/10.1016/S1350-4533\(98\)00045-9](https://doi.org/10.1016/S1350-4533(98)00045-9)
- Papadakis, M. (2017). *Application of Finite Element Method for Estimation of Acoustic Parameters*. (Ph.D. Thesis), Technical University of Crete School of Production Engineering & Management.
- Pardell, X. (s.f.). Apuntes de Electromedicina [Publicación en un blog]. Recuperado el 26 de Julio de 2019 de <https://www.pardell.es/incubadora-neonatal.html>
- Romeu, J., Cotrina, L., Perapoch, J., & Linés, M. (2016). *Assessment of environmental noise and its effect on neonates in a Neonatal Intensive Care Unit. Applied Acoustics*, 111, 161–169. Recuperado el 18 de Junio del 2019 de <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2016.04.014>
- Ruprecht, Klemens, Paul Friedemann(n.d.). *Finite elements*. Recuperado el 20 de Julio de 2019 de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/6519/Capitulo1.pdf>
- Seron, F. J., Sanz, F. J., Kindelan, M., & Perez, Y. C. (1990). El método de los elementos finitos para el modelado de la ecuación de ondas con un procesador vectorial. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 6(4), 573–593. Recuperado el 25 de Junio de 2019 de <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/7343/Article06.pdf>

- Sittig, S. E., Nesbitt, J. C., Krageschmidt, D. A., Sobczak, S. C., & Johnson, R. V. (2011). *Noise levels in a neonatal transport incubator in medically configured aircraft*. Recuperado el 15 de Mayo de 2019 de <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2010.10.012>
- Universidad Autónoma de México. (2017). Conceptos básicos del método por elemento finito. Recuperado el 10 de Marzo de 2019 de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/2548/1/011-MPM-Cap8-Final.pdf>
- Universidad de las Américas.(2019). Impulse response simulation of small rooms and in situ measurements validation. Quito. Ecuador: Universidad de las Américas.
- Villoldo, M. E. (2011). Impacto del ruido ambiental en la Unidad de Cuidado Intensivo Neonatal. *Enfermería Neonatal*, 4(11), 27–30. Recuperado el 15 de Junio de 2019 de <http://fundasamin.org.ar/newsite/wp-content/uploads/2012/06/Impacto-del-ruido-ambiental-en-la-unidad-de-cuidado-intensivo-neonatal.pdf>
- Yong, R. N. (2003). *Application of finite element method for traction prediction*. *Journal of Terramechanics*, 22(3), 184. recuperado del 1 de Marzo de 2019 de [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(85\)90120-x](https://doi.org/10.1016/0022-4898(85)90120-x)
- Yoshiko Kakehashi, T., Moreira Pinheiro, E., Guinsburg, R., & Antonio de Araujo Nabuco, M. (2011). Ruido en la Unidad de Terapia Intensiva Neonatal y en el interior de la incubadora. *Latino-Am. Enfermagem*, 19(5), 1214–1221. Recuperado el 22 de Junio de 2018 de www.eerp.usp.br/rlae
- Zvolenský, P., Kašiar, L., Volna, P., & Barta, D. (2017). *Simulated Computation of the Acoustic Energy Transfer through the Structure of Porous Media in Application of Passenger Carriage Body*. *Procedia Engineering*, 187, 100–109. Recuperado el 12 de Junio de 2019 de <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.04.355>

ANEXOS

Registros utilizados para la validación.

Registro del sonómetro Cesva						
	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
1	0,35	0,13	0,13	0,15	0,14	0,12
2	0,31	0,10	0,17	0,12	0,13	0,13
3	0,21	0,45	0,15	0,15	0,11	0,12
4	0,19	0,18	0,14	0,14	0,11	0,12
5	0,22	0,12	0,15	0,11	0,13	0,12
6	0,30	0,17	0,12	0,13	0,13	0,12
7	0,25	0,23	0,14	0,21	0,15	0,13
8	0,22	0,14	0,49	0,20	0,13	0,12
Registros del Matlab						
1	0,23	0,11	0,14	0,15	0,12	0,12
2	0,43	0,11	0,14	0,13	0,13	0,12
3	0,16	0,11	0,19	0,15	0,12	0,12
4	0,21	0,18	0,15	0,16	0,11	0,13
5	0,12	0,14	0,12	0,11	0,12	0,13
6	0,31	0,16	0,12	0,12	0,14	0,14
7	0,16	0,17	0,16	0,13	0,13	0,13
8	0,16	0,11	0,13	0,12	0,13	0,12

Graficas del modelo Aéreo.

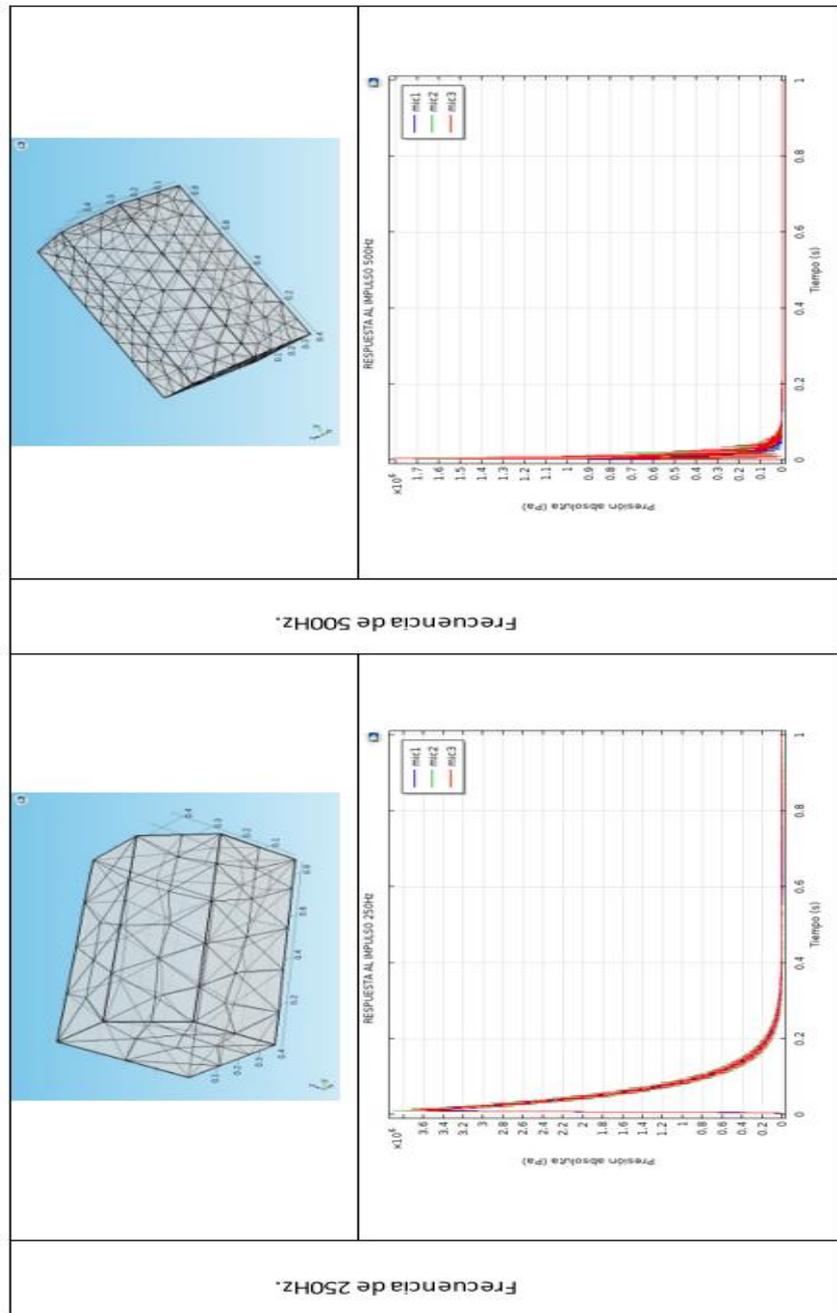


Figura 28. Respuesta al impulso de 250y 500Hz.

Gráficas de la interacción del aire con el material poroso.

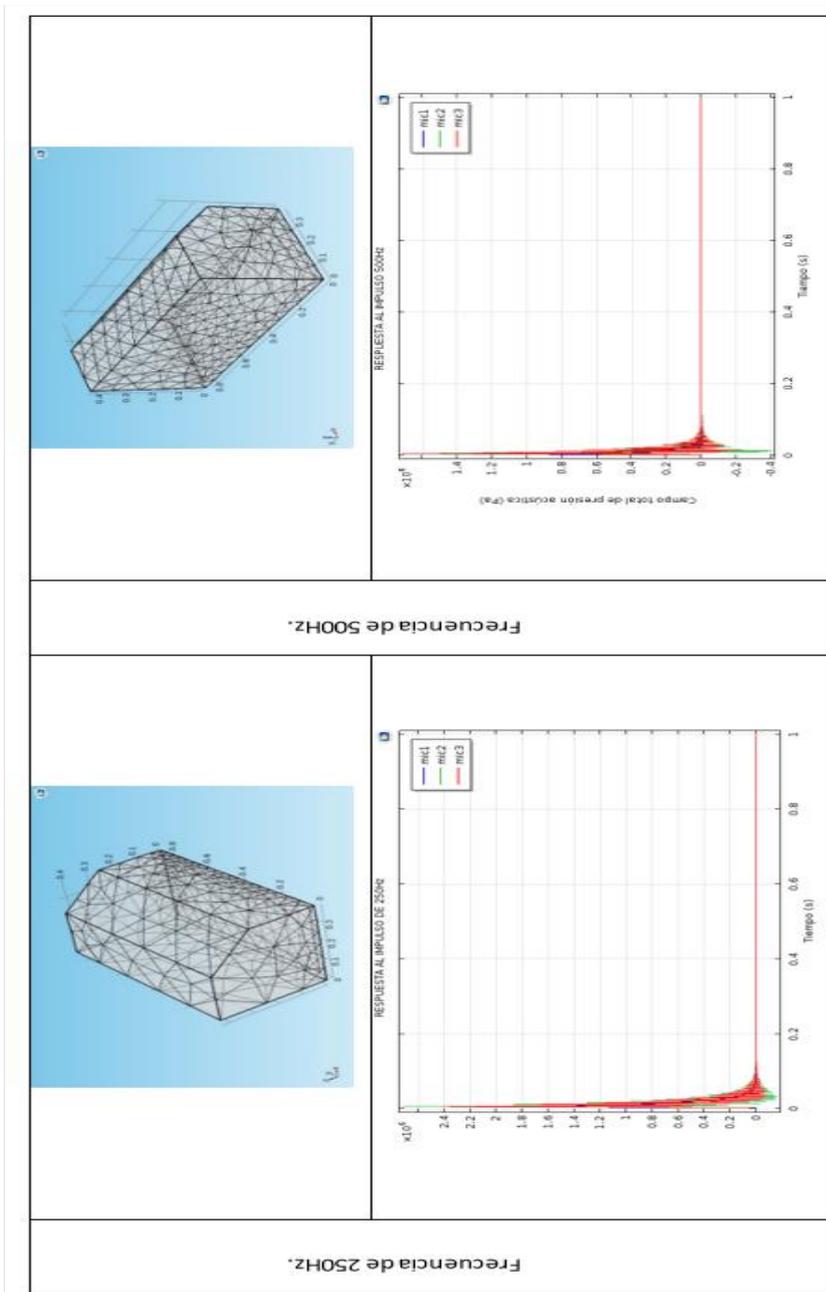


Figura 30. Respuesta al impulso de 250y 500Hz para el material absorbente.

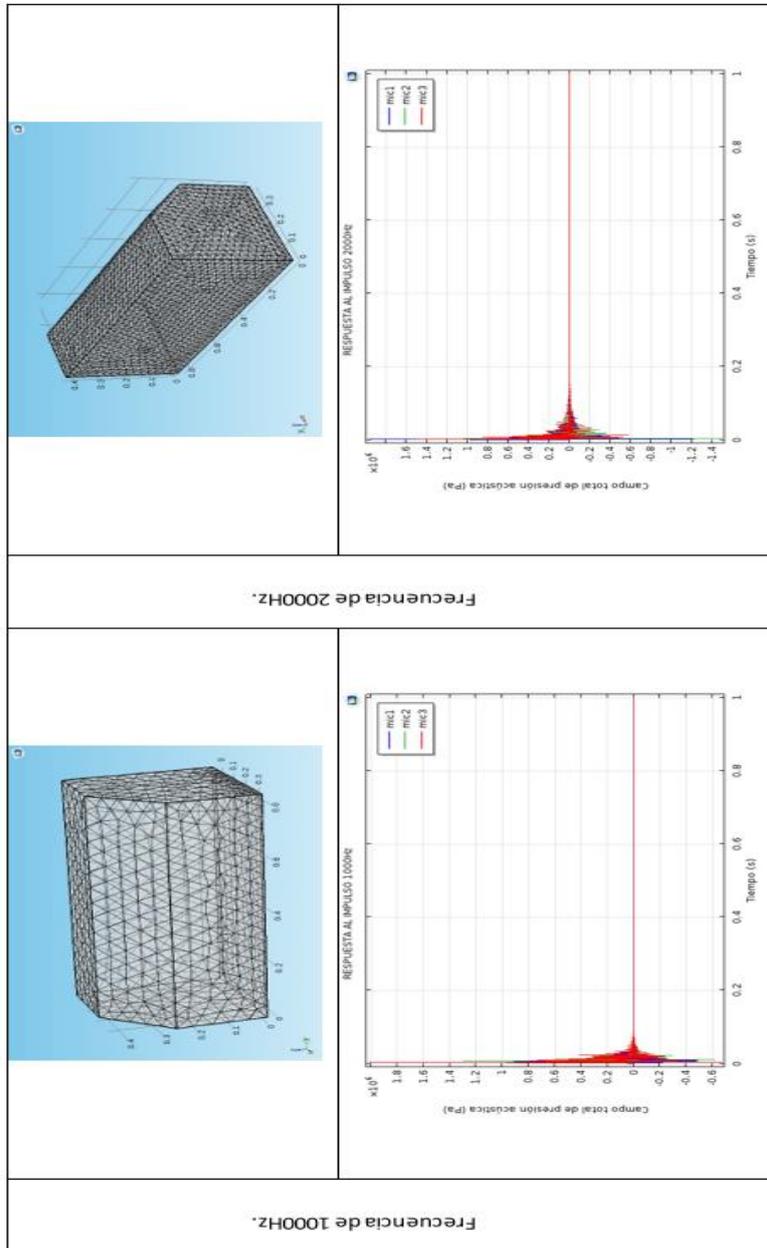


Figura 31. Respuesta al impulso de 1000y 2000Hz para el material absorbente.

Certificado de calibración del sonómetro.

West Caldwell Calibration Laboratories Inc.

Certificate of Calibration

for

SOUND LEVEL METER

Manufactured by:	CESVA
Model No:	SC310
Serial No:	T238856
Calibration Recall No:	27772

Submitted By:

Customer:

Company: UDLA, Carrera Ingenieria Sonido y Acustica

Address:

The subject instrument was calibrated to the indicated specification using standards traceable to the National Institute of Standards and Technology or to accepted values of natural physical constants. This document certifies that the instrument met the following specification upon its return to the submitter.

West Caldwell Calibration Laboratories Procedure No. SC310 CESV

Upon receipt for Calibration, the instrument was found to be:

Within (X)

tolerance of the indicated specification. See attached Report of Calibration.

West Caldwell Calibration Laboratories' calibration control system meets the requirements, ISO 10012-1 MIL-STD-45662A, ANSI/NCSL Z540-1, IEC Guide 25, ISO 9001:2008 and ISO 17025.

Note: With this Certificate, Report of Calibration is included.

Approved by: *FC*

Calibration Date: 29-Jun-17

Felix Christopher (QA Mgr.)

Certificate No: 27772 - 1

GA Dec. #1051 Rev. 2.0 10/1/01

Certificate Page 1 of 1

ISO/IEC 17025:2005

West Caldwell Calibration Laboratories, Inc.

uncompromised calibration

575 State Route 96, Victor, NY 14564, U.S.A.

ACCREDITED

Calibration Lab. Cert. # 1533.01

West Caldwell Calibration Laboratories Inc.

Certificate of Calibration

for

ACOUSTIC CALIBRATOR

Manufactured by: CESVA
Model No: CB006
Serial No: 900626
Calibration Recall No: 27772

Submitted By:

Customer:

Company: UDLA, Carrera Ingenieria Sonido y Acustica
Address:

The subject instrument was calibrated to the indicated specification using standards traceable to the National Institute of Standards and Technology or to accepted values of natural physical constants. This document certifies that the instrument met the following specification upon its return to the submitter.

West Caldwell Calibration Laboratories Procedure No. CB006 CESV

Upon receipt for Calibration, the instrument was found to be:

Within (X)

tolerance of the indicated specification. See attached Report of Calibration.

West Caldwell Calibration Laboratories' calibration control system meets the requirements, ISO 10012-1 MIL-STD-45662A, ANSI/NCSL Z540-1, IEC Guide 25, ISO 9001:2008 and ISO 17025.

Note: With this Certificate, Report of Calibration is included.

Approved by: *FC*

Calibration Date: 27-Jun-17

Felix Christopher (QA Mgr.)

Certificate No: 27772 -2

QA Doc. #1051 Rev. 2.0 10/1/01

Certificate Page 1 of 1

ISO/IEC 17025:2005

**West Caldwell
Calibration
Laboratories, Inc.**
uncompromised calibration
1575 State Route 96, Victor, NY 14564, U.S.A.



Calibration Lab. Cert. # 1533.01

West Caldwell Calibration Laboratories Inc.

Certificate of Calibration

for

MICROPHONE

Manufactured by: CESVA
Model No: C-130
Serial No: 13170
Calibration Recall No: 27772

Submitted By:

Customer:

Company: UDLA, Carrera Ingenieria Sonido y Acustica
Address:

The subject instrument was calibrated to the indicated specification using standards traceable to the National Institute of Standards and Technology or to accepted values of natural physical constants. This document certifies that the instrument met the following specification upon its return to the submitter.

West Caldwell Calibration Laboratories Procedure No. C-130 CESV

Upon receipt for Calibration, the instrument was found to be:

Within (X)

tolerance of the indicated specification. See attached Report of Calibration.

West Caldwell Calibration Laboratories' calibration control system meets the requirements, ISO 10012-1 MIL-STD-45662A, ANSI/NCSL Z540-1, IEC Guide 25, ISO 9001:2008 and ISO 17025.

Note: With this Certificate, Report of Calibration is included.

Approved by: *FC*

Calibration Date: 29-Jun-17

Felix Christopher (QA Mgr.)

Certificate No: 27772 - 3

ISO/IEC 17025:2005

QA Doc. #1051 Rev. 2.0 10/1/01

Certificate Page 1 of 1

uncompromised calibration
1575 State Route 96, Victor, NY 14564, U.S.A.
**West Caldwell
Calibration
Laboratories, Inc.**



Calibration Lab. Cert. # 1533.01

Algoritmos.

Respuesta al impulso.

```
clear all
% close all
clc

% Fs = 48000; %Sample rate [Hz]
[x,Fs]=audioread('EG1_040_EDIT.wav');
T=1/Fs; %sampling period
num_samp = round(Fs); % Number of samples in a sec
Pref=2*10^(-5);
mx=1:length(x);
figure
plot(mx/Fs,x)%audio as a time function
xlabel('tiempo [seg]');ylabel('amp [Pa]')
grid minor
```

```
c=0;
length(x)
while c<25
    pks = findpeaks(x.^2);
    x=x(find(x.^2==max(pks)):end);
    if c==0
        A=max(pks);
    end
    B=max(pks);
    if A==B
        [M,I]=max(pks);
        x=x(find(x.^2==pks(I+1)):end);
    end
    c=c+1;
    length(x);
end
xtrim=x;
```

Tiempo de reverberación.

```
function [rt_temp,cfs] = irStatsDNS8vaBnds(filename,y_fit)

%% read in audio file

% read in impulse
[x,fs] = audioread(filename);

%% set up octave-band filters

% octave-band center frequencies
% cfs = [31.25 62.5 125 250 500 1000 2000 4000 8000 16000];
cfs = [31.25 62.5 125 250 500 1000 2000 4000];

% octave-band filter order
N = 3;

% limit centre frequencies so filter coefficients are stable
cfs = cfs(cfs>fs/480 & cfs<fs/2.9);%DNS2019-2-20: Changed lower limit, so now the cfs will be from
% cfs = cfs(cfs>fs/200 & cfs<fs/5);
cfs = cfs(:);

% calculate filter coefficients
a = zeros(length(cfs), (2*N)+1);
b = zeros(length(cfs), (2*N)+1);
for f = 1:length(cfs)
    [b(f,:),a(f,:)] = octdsgn(cfs(f),fs,N);
end

%% perform calculations

% empty matrices to fill
z = zeros([length(cfs) size(x)]);
rt_temp = zeros([length(cfs) 1]);
% t0 = zeros(1,1);

% filter and integrate

    % find direct impulse
    peak = find(x.^2==max(x.^2));
    t0 = peak;

for f = 1:length(cfs)
    y = filter(b(f,:),a(f,:),x); % octave-band filter
    temp = cumtrapz(y(end:-1:1).^2); % decay curve, DNS2019-02-20: 'y(end:-1:1)' is used to flip d
    z(f,:) = temp(end:-1:1);% DNS2019-02-20: 'temp(end:-1:1)' to flip it again in order to have it
    [rt_temp(f),E_rt,fit_rt] = calc_decay(z(f,t0:end),y_fit,60,fs,cfs(f)); % estimate RT
end
end
```

```

function [t,E,fit] = calc_decay(z,y_fit,y_dec,fs,f)%DNS2019-2-20: z(f,t0:end,n), basically it is es
% CALC_DECAY calculate decay time from decay curve
% Returns the time for a specified decay y_dec calculated
% from the fit over the range y_fit. The input is the
% integral of the impulse sample at fs Hz. The function also
% returns the energy decay curve in dB and the corresponding
% fit.

E = 10.*log10(z); % putting the decay curve into dB
E = E-max(E); % normalise to max 0
if any(isinf(E))
    E = E(1:find(isinf(E),1,'first')-1); % remove trailing infinite values
end

% find yfit x-range
IX1 = findDB(E,max(y_fit),1,f);%DNS2019-2-20:finds the first max value in dB
IX2 = findDB(E,min(y_fit),length(E),f);%DNS2019-2-20:finds the first min value in dB
IX = IX1:IX2;

% calculate fit over yfit
diff_y = abs(diff(y_fit)); % dB range diff
x = reshape(IX,1,length(IX));%DNS2019-2-20: reshaping IX into a new array, x, which is of 1xle
y = reshape(E(IX),1,length(IX));%DNS2019-2-20: reshaping E into a new array, y, which is of 1x
p = polyfit(x,y,1);
fitLength = max(length(E), (1.1*diff_y/abs(length(E)*p(1)))*length(E)); % evaluate fit over suf
fit = polyval(p,1:fitLength); % actual fit
fit0 = fit-max(fit); % fit anchored to 0dB
t = (y_dec/diff_y)*findDB(fit0,-diff_y,[],f)/fs; % estimate decay time
fit = fit(1:length(E));

```

```

function IX = findDB(E,dB,default,f)
% FINDDB find dB value in energy decay

IX = find(E<=dB,1,'first');
if isempty(IX)
    if isempty(default)
        error('iosr:irStats:dynamicRange','Impulse response has insufficient dynamic range at ')
    else
        warning('iosr:irStats:dynamicRange','Impulse response has insufficient dynamic range at ')
        IX = default;
    end
end
end
end

```

```

function rt = irStatsDNS(filename,y_fit)

%% read in audio file

% read in impulse
[x,fs] = audioread(filename);

%% set up octave-band filters
%
% % octave-band center frequencies
% cfs = [31.25 62.5 125 250 500 1000 2000 4000 8000 16000];
%
% % octave-band filter order
% N = 3;
%
% % limit centre frequencies so filter coefficients are stable
% cfs = cfs(cfs>fs/480 & cfs<fs/2.9);%DNS2019-2-20: Changed lower limit, so now the cfs will be :
% % cfs = cfs(cfs>fs/200 & cfs<fs/5);
% cfs = cfs(:);
%
% % calculate filter coefficients
% a = zeros(length(cfs), (2*N)+1);
% b = zeros(length(cfs), (2*N)+1);
% for f = 1:length(cfs)
%     [b(f,:),a(f,:)] = octdsgn(cfs(f),fs,N);
% end

%% perform calculations

% empty matrices to fill
% z = zeros([length(cfs) size(x)]);
% rt_temp = zeros([length(cfs) 1]);
% t0 = zeros(1,1);

% filter and integrate

% find direct impulse
peak = find(x.^2==max(x.^2));
t0 = peak;

% for f = 1:length(cfs)
%     y = filter(b(f,:),a(f,:),x); % octave-band filter
%     temp = cumtrapz(x(end:-1:1).^2); % decay curve, DNS2019-02-20: 'y(end:-1:1)' is used to flip (
%     z = temp(end:-1:1);% DNS2019-02-20: 'temp(end:-1:1)' to flip it again in order to have it for
%     [rt,E_rt,fit_rt] = calc_decay(z(t0:end),y_fit,60,fs); % estimate RT
% end

% time axes for different vectors

tx = ((0:length(x)-1)-t0)./fs;
tE_rt = (0:length(E_rt)-1)./fs;
% plot
figure
subplot(121);plot(tx,x,'k');ylabel('Amplitud');xlabel('Tiempo [s]');title('IR');grid on % bandwidth
subplot(122);plot(tE_rt,E_rt,'-k',tE_rt,fit_rt,'--r');ylabel('Energia [dB]');xlabel('Tiempo [s]');

```

```

function [t,E,fit] = calc_decay(z,y_fit,y_dec,fs)%DNS2019-2-20: z(f,t0:end,n), basically it is est:
% CALC_DECAY calculate decay time from decay curve
% Returns the time for a specified decay y_dec calculated
% from the fit over the range y_fit. The input is the
% integral of the impulse sample at fs Hz. The function also
% returns the energy decay curve in dB and the corresponding
% fit.

E = 10.*log10(z); % putting the decay curve into dB
E = E-max(E); % normalise to max 0
if any(isinf(E))
    E = E(1:find(isinf(E),1,'first')-1); % remove trailing infinite values
end

% find yfit x-range
IX1 = findDB(E,max(y_fit),1);%DNS2019-2-20:finds the first max value in dB
IX2 = findDB(E,min(y_fit),length(E));%DNS2019-2-20:finds the first min value in dB
IX = IX1:IX2;

% calculate fit over yfit
diff_y = abs(diff(y_fit)); % dB range diff
x = reshape(IX,1,length(IX));%DNS2019-2-20: reshaping IX into a new array, x, which is of 1x1
y = reshape(E(IX),1,length(IX));%DNS2019-2-20: reshaping E into a new array, y, which is of 1:
p = polyfit(x,y,1);
fitLength = max(length(E), (1.1*diff_y/abs(length(E)*p(1)))*length(E)); % evaluate fit over su:
fit = polyval(p,1:fitLength); % actual fit
fit0 = fit-max(fit); % fit anchored to 0dB
t = (y_dec/diff_y)*findDB(fit0,-diff_y,[])/fs; % estimate decay time
fit = fit(1:length(E));

```

```

function IX = findDB(E,dB,default)
% FINDDB find dB value in energy decay

IX = find(E<=dB,1,'first');
if isempty(IX)
    if isempty(default)
        error('iosr:irStats:dynamicRange','Impulse response has insufficient dynamic range at
    else
        warning('iosr:irStats:dynamicRange','Impulse response has insufficient dynamic range at
        IX = default;
    end
end
end
end

```

