

Ciudad Obregón, Sonora, a 01 de Julio de 2014.

Instituto Tecnológico de Sonora
P r e s e n t e.

El que suscribe **Jorge Alberto Cerecer Córdoba**, por medio del presente manifiesto bajo protesta de decir verdad, que soy autor y titular de los derechos de propiedad intelectual tanto morales como patrimoniales, sobre la obra titulada: **“Análisis y simulación acústica del recinto Casa Club ITSON”**, en lo sucesivo “LA OBRA”, misma que constituye el trabajo de tesis que desarrolle para obtener el grado de **Ingeniero Civil** en ésta casa de estudios, y en tal carácter autorizo al Instituto Tecnológico de Sonora, en adelante “EL INSTITUTO”, para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública, distribución y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines académicos o propios del objeto del Instituto, es decir, sin fines de lucro, por lo que la presente autorización la extiendo de forma gratuita.

Para efectos de lo anterior, EL INSTITUTO deberá reconocer en todo momento mi autoría y otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente de LA OBRA.

De igual forma, libero de toda responsabilidad a EL INSTITUTO por cualquier demanda o reclamación que se llegase a formular por cualquier persona, física o moral, que se considere con derechos sobre los resultados derivados de la presente autorización, o por cualquier violación a los derechos de autor y propiedad intelectual que cometa el suscrito frente a terceros con motivo de la presente autorización y del contenido mismo de la obra.



Jorge Alberto Cerecer Córdoba
(Nombre y firma del autor)



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA
Educar para Trascender

**“Análisis y simulación acústica del recinto Casa
Club ITSON”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

Presenta

Jorge Alberto Cerecer Córdoba

DEDICATORIA

Con todo mi amor para mi esposa Claudia y mi hijo Demián, por ser parte de este esfuerzo y estar a lo largo de todo el inmenso camino, brindando el apoyo y la confianza necesaria para motivarme a seguir adelante en cada ocasión donde todo se tornaba difícil, sin ustedes nada de esto hubiera sido posible.

Son y siempre serán lo más importante para mí en esta vida, son lo que le da sentido a toda esta trayectoria a lo largo de estos cuatro años, así mismo, con toda certeza puedo decir que siempre serán la razón por la cual seguir en el carril buscando lo mejor para brindarles. Espero esto sea el primero de muchos éxitos.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos por darme el apoyo incondicional que me han ofrecido a lo largo de toda mi vida y darme buenos valores los cuales han sido herramientas para alcanzar todas las metas que me propongo.

A la familia Avilés Rivera por estar presentes en toda la trayectoria y ofrecer su ayuda incondicional en todo momento.

A mis compañeros por luchar conmigo en el transcurso de toda esta etapa de mi vida, forjando valiosas amistades.

A mis profesores por compartir su tiempo y conocimiento, y ayudarme a crecer personal y profesionalmente.

A mi asesor por confiar en mí y apoyarme en cada etapa de este proceso.

A Joel Beltrán, Alan Sandoval y Fernando Alvarado por introducirme en el mundo de la música y abrir la curiosidad hacia temas como la acústica.

Y especialmente a Maximiliano Gutiérrez, Cesar Bernal y Álvaro Morales, por ser parte importante de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Índice general	iv
Índice de figuras	vi
Índice de tablas	vii
Resumen	viii
Capítulo I. Introducción	9
1.1 Antecedentes	9
1.2 Planteamiento de problema	11
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 Objetivo General	12
1.3.2 Objetivos Específicos.....	12
1.4 Justificación	12
1.5 Limitaciones del estudio.....	13
Capítulo II. Marco teórico	14
2.1 Sonido	14
2.1.1 Generación y propagación del sonido	14
2.1.2 Escala frecuencial.....	16
2.1.3 Bandas de frecuencias.....	17
2.1.4 Velocidad de propagación del sonido.....	18
2.1.5 Longitud de onda del sonido	19
2.1.6 Nivel de presión sonora	19
2.1.7 Inteligibilidad de la palabra.....	21
2.2 Parámetros acústicos para la evaluación acústica de recintos.....	21
2.2.1 Tiempo de reverberación	22
2.2.1.1 Calidez acústica (BR).....	22
2.2.1.2 Brillo (Br)	23
2.2.1.3 Early Decay Time (EDT).....	24
2.2.1.4 Sonoridad (G)	24
2.2.1.5 Initial Time Delay Gap (Ti).....	25
2.2.2 Claridad musical (C_{80}).....	26

2.2.3 Espacialidad del sonido: amplitud aparente de la fuente sonora (ASW).....	27
2.2.4 Resumen de los parámetros de caracterización de salas	29
2.3 Anomalías en los recintos	30
2.3.1 Coloración del sonido.....	30
2.3.2 Eco y Eco flotante	30
2.3.3 Focalización del sonido.....	31
2.4 Acondicionamiento acústico.....	32
2.4.1 Absorción del sonido	32
2.4.2 Reflexión del sonido.....	32
2.4.3 Difusores del sonido	33
2.4.4 Absorción del público y de las sillas	33
Capítulo III. Método	35
3.1 Tipo de investigación	35
3.2 Ubicación del objeto de estudio	36
3.3 Participantes.....	36
3.4 Materiales	36
3.3 Procedimiento.....	37
Capítulo IV. Resultados.....	40
Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones	52
5.1 Conclusiones	52
5.2 Recomendaciones	53
Referencias.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Zonas de compresión y dilatación de las partículas de aire en la propagación de una onda sonora.....</i>	15
Figura 2. <i>Evolución de la presión sonora total PT en función del tiempo en un punto cualquiera del espacio..</i>	16
Figura 3. <i>Bandas de frecuencias..</i>	18
Figura 4. <i>Ejemplo de focalización del sonido.....</i>	31
Figura 5. <i>Ubicaciones seleccionadas para la fuente sonora.....</i>	37
Figura 6. <i>Ubicaciones seleccionadas para el receptor.</i>	38
Figura 7. <i>Medición de la intimidad acústica en $R1$.....</i>	42
Figura 8. <i>Comportamiento de la sonoridad por frecuencia.</i>	45
Figura 9. <i>Valoración de parámetros acústicos.....</i>	46
Figura 10. <i>Modelo digital de Casa Club ITSON.</i>	47
Figura 11. <i>Modelo digital de Casa Club ITSON.</i>	47
Figura 12. <i>Vista en planta de Casa Club ITSON.....</i>	48
Figura 13. <i>Vista en corte de Casa Club ITSON.</i>	48
Figura 14. <i>Tiempo de reverberación promedio obtenido en la simulación acústica.</i>	49
Figura 15. <i>Tiempo de reverberación tras proponer una solución.....</i>	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Niveles de presión sonora correspondientes a sonidos y ruidos típicos, y valoración subjetiva asociada.</i>	20
Tabla 2. <i>Márgenes recomendados para los distintos tipos de música.</i>	22
Tabla 3. <i>Caracterización de la sala según (1-I IACCE3).</i>	29
Tabla 4. <i>Valores recomendados para una sala de conciertos.</i>	29
Tabla 5. <i>Coeficientes de absorción de las sillas vacías.</i>	34
Tabla 6. <i>Coeficientes de absorción de las sillas ocupadas.</i>	34
Tabla 7. <i>Valores de EDT obtenidos.</i>	41
Tabla 8. <i>Valores promedios EDT.</i>	41
Tabla 9. <i>Valores de sonoridad obtenidos.</i>	43
Tabla 10. <i>Sonoridad promedio de cada frecuencia.</i>	44
Tabla 11. <i>Resumen de resultados obtenidos.</i>	45
Tabla 12. <i>Valoración de parámetros acústicos.</i>	46
Tabla 13. <i>Tiempo de reverberación promedio obtenido en la simulación acústica.</i>	48
Tabla 14. <i>Tiempo de reverberación tras cambio de plafón.</i>	49

RESUMEN

Este proyecto de investigación consistió en el análisis acústico y la simulación acústica del recinto Casa Club ITSON, ubicado en Ciudad Obregón, Sonora, en la colonia Villa ITSON. Esta investigación radicó en medir diferentes parámetros acústicos, como son el tiempo de reverberación, calidez acústica, brillo, sonoridad e intimidad acústica del lugar, para compararlos con valores recomendados por diferentes autores.

Una vez realizado el análisis, se procedió a identificar los fallos del lugar y a diseñar un modelo acústico del recinto en tres dimensiones, donde se obtuvieron valores muy similares a los recolectados en el sitio.

A partir de la simulación se propusieron soluciones a las faltas obtenidas, evaluando cuál es la solución más viable para remediar el problema.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Desde el inicio de los tiempos, los seres humanos han establecido una estrecha relación con el sonido y el ruido, inclusive podría afirmarse que ésta llega a ser imprescindible. Desde antes de nacer se dice que las personas tienen percepción del sonido, además estos afectan positiva o negativamente su crecimiento a lo largo de toda su vida, es por esto que se les ha asignado una gran cantidad de usos en cada escenario que se presenta; desde alertar ante peligros inminentes, hasta su empleo en celebración de eventos importantes.

Martínez y Díaz (2004) expresan que el sonido es una sensación agradable producida en el órgano del oído por el movimiento vibratorio de los cuerpos, transmitido por un medio elástico. El ruido, por su parte, se refiere a un sonido indeseado, desagradable o inesperado, este último da paso a la contaminación acústica.

La acústica es entendida como la ciencia que estudia el sonido incluyendo su producción, transmisión y efectos (Pierce, 1989). Carrión (2001) menciona que históricamente, los griegos fueron los primeros en apreciar la gran importancia que representa la acústica en la sociedad, tomando en cuenta este aspecto en sus construcciones, aprovechando las gradas de los grandes teatros como reflectores, cuadruplicando la sonoridad del recinto para una mejor apreciación de sus obras. La acústica arquitectónica moderna llegó en 1895 con la inauguración del Museo de Arte Fogg de la Universidad de Harvard, el cual tenía una acústica de mala calidad, donde era difícil distinguir las palabras de los oradores. Sin embargo, Wallace Clement Sabine fue capaz de solucionar el problema, llegando a la conclusión de que la calidad acústica de un recinto depende del tamaño de la cámara, como de la suma de las superficies de absorción.

Según Apfel (1998), las condiciones más comunes en espacios acústicos en cuanto a calidad se deben a la suficiente intensidad del sonido en cualquier sitio, la buena distribución del mismo, la claridad adecuada y un espacio libre de eco.

Recientemente, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha alertado que la contaminación acústica en las ciudades, no sólo es una molestia, sino también una amenaza para la salud pública, causando problemas como estrés, insomnio, mal humor, sordera e incluso problemas cardiovasculares. Es por esto que el hombre se ha visto en la necesidad de controlar esta variante de la contaminación que frecuentemente es subestimada mediante la simulación del comportamiento de la acústica. Se han utilizado principalmente dos sistemas de simulación que buscan evitar ruidos, así como la contaminación acústica.

El primer método son las maquetas, modelos construidos a escala de una obra civil, permiten estudiar el comportamiento de las ondas sonoras, utilizando factores de escala para optimizar la simulación. Sin embargo, para llevarse a cabo es necesario contar un espacio disponible, además de la necesidad de cubrir el costo y el tiempo de construcción.

La segunda técnica se realiza por medio de software especializado, el cual permite crear sonido virtual creando una auralización, definido por Carrión (2001) como el proceso a través del cual es posible realizar una escucha, en cualquier punto de un recinto, de un mensaje oral o un pasaje musical, con la particularidad de que ello se lleva a cabo de forma virtual (antes de que dicho recinto se haya construido o remodelado).

En México, la acústica arquitectónica puede brindar mejoras en la calidad acústica, entendiéndose como calidad al cumplimiento de ciertas características que consideran que un recinto es adecuado para alguna actividad específica, en términos de acústica.

En la región, la cuestión acústica en las edificaciones es prácticamente desconocida, ya que se cuenta con muy poca experiencia en el área, subestimando los problemas relacionados con la contaminación acústica y provocando la falta de calidad en la acústica de los recintos.

1.2 Planteamiento de problema

Actualmente, en la región, no se considera prioridad el obtener una acústica de calidad en los recintos, aun cuando se conocen los efectos negativos que el ruido puede causar física y psicológicamente. Esto se debe a la poca información disponible sobre la acústica arquitectónica, lo que da paso a lugares con una alta presencia de sonidos desagradables que propician un ambiente poco confortable.

El Diario Oficial de la Federación, así como algunas dependencias nacionales e internacionales, en normas como la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la ISO-140 y el DB-HR Protección frente al ruido de España, establecen reglamentos relacionados con la contaminación acústica que debe cumplir una edificación, sin embargo, en el diseño de obra se

deja de lado este aspecto, provocando gastos posteriores para aliviar los inconvenientes que provoca este tipo de contaminación.

En base a lo establecido en las normas mencionadas anteriormente, se pretende diagnosticar el nivel de confort acústico del recinto Casa Club ITSON, ubicado en Ciudad Obregón, Sonora.

¿Qué grado de calidad acústica puede brindar el diseño de una simulación acústica de un recinto?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar los parámetros acústicos que provee una simulación acústica de un recinto, mediante el uso del software Autodesk Ecotect, comparado con resultados obtenidos in situ.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Medir los niveles acústicos a los que está expuesto un recinto.
2. Diseñar un modelo digital de la propagación del sonido en un recinto.
3. Proponer soluciones a los problemas resultantes.

1.4 Justificación

Esta investigación se realiza debido a que, actualmente, el área de acústica es prácticamente desconocida en la región, lo cual deja un espacio vulnerable en este rubro, originando problemas de confort a las personas que hacen uso de un recinto.

Se pretende analizar un lugar ya existente para determinar el comportamiento del sonido en dichas zonas y así proponer soluciones que brinden un acondicionamiento acústico de calidad.

Con el presente trabajo se desea beneficiar a las personas que frecuentan con regularidad recintos con una mala calidad acústica; así como propietarios de empresas dedicadas a la edificación de los mismos, evitando gastos posteriores debido a problemas acústicos no identificados durante la planeación del proyecto.

1.5 Limitaciones del estudio

La investigación se realiza en un edificio ya construido, por lo que la simulación tomará en cuenta sólo la geometría del lugar.

Las pruebas en el sitio y la simulación se efectuaron con sillas y demás mobiliario vacío, dada esta circunstancia, en otras condiciones podrían resultar diferencias.

Los materiales se consideraron con parámetros acústicos estándar, debido a que no se cuenta con un estudio de parámetros acústicos de los materiales utilizados en la construcción de la obra.

Se cuenta con un tiempo limitado para obtener los resultados de la investigación.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Sonido

El sonido se puede definir según Bonello (2012) como un disturbio que se propaga en el aire o medio elástico, causando alteraciones de presión. Para Rougeron (1977) es una sensación auditiva engendrada por una onda acústica. Por lo tanto, se concluye que el sonido es un estímulo mecánico que viaja a través del aire, principalmente agradable al sentido.

2.1.1 Generación y propagación del sonido

Carrión (2001) explica que el elemento generador del sonido se denomina fuente sonora. La generación del sonido tiene lugar cuando dicha fuente entra en vibración. Esta vibración es transmitida a las partículas de aire adyacentes de la misma que, a su vez, la transmiten a nuevas partículas contiguas.

Las partículas no se desplazan con la perturbación, sino que simplemente oscilan alrededor de su posición de equilibrio. La manera en que la perturbación se traslada de un lugar a otro se denomina propagación de la onda sonora.

Si se considera como fuente sonora, por ejemplo, un tambor, un golpe sobre su membrana provoca una oscilación. Cuando la membrana se desplaza hacia fuera, las partículas de aire próximas a su superficie se acumulan creando una zona de compresión, mientras que en el caso contrario dichas partículas se separan, lo cual da lugar a una zona de enrarecimiento o dilatación como se muestra en la Figura 1.

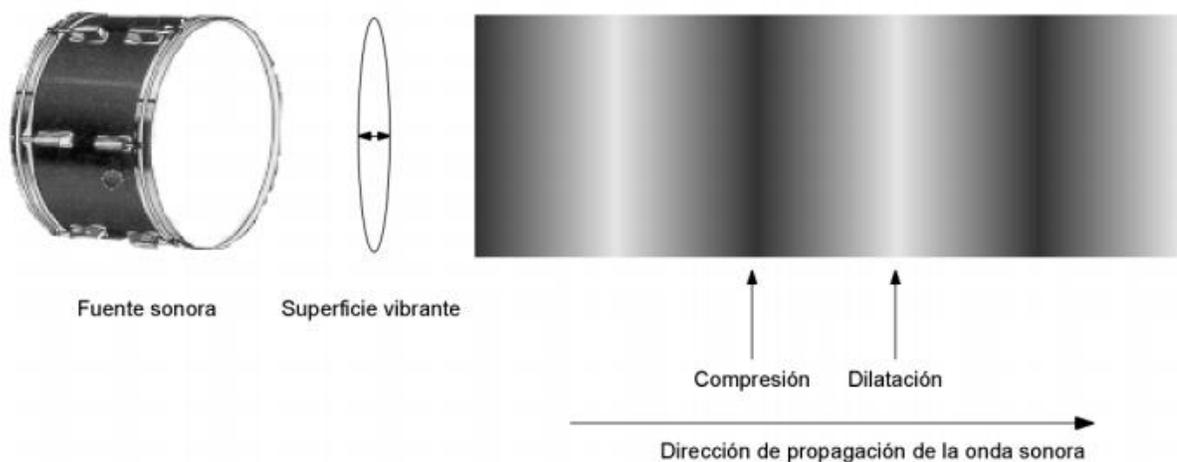


Figura 1. Zonas de compresión y dilatación de las partículas de aire en la propagación de una onda sonora. Fuente: Carrión (2001).

La oscilación de las partículas tiene lugar en la misma dirección que la propagación de la onda. La manera más habitual de expresar cuantitativamente la magnitud de un campo sonoro es mediante la presión sonora, o fuerza que ejercen las partículas de aire por unidad de superficie.

En la Figura 2 se observa la evolución de la presión P_T , en función del tiempo, en un punto situado a una distancia cualquiera de la fuente sonora. Dicha presión se obtiene como suma de la presión atmosférica estática P_0 y la presión asociada a la onda sonora p .

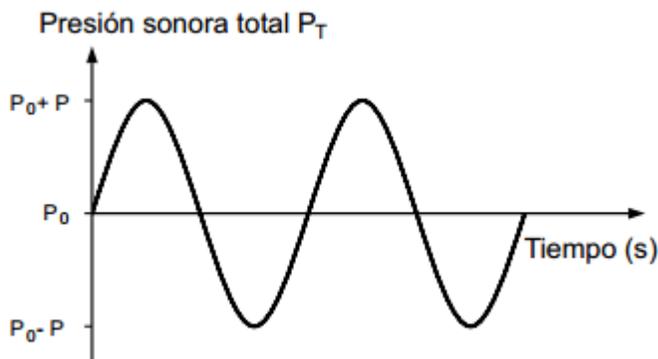


Figura 2. *Evolución de la presión sonora total P_T en función del tiempo en un punto cualquiera del espacio.* Fuente: Carrión (2001).

Se observan incrementos y disminuciones periódicas de su valor de equilibrio, correspondiente a la presión atmosférica estática P_0 , dichas variaciones van asociadas a los procesos de compresión y dilatación. El valor máximo de la oscilación respecto a P_0 recibe el nombre de amplitud de la presión asociada de la onda sonora, y se representa por la letra P .

El número de oscilaciones por segundo de la presión sonora p se denomina frecuencia (f) del sonido y se mide en hertzios (Hz) o ciclos por segundo (c/s).

Los sonidos que se perciben no constan únicamente de una sola frecuencia, sino que están constituidos por múltiples frecuencias superpuestas. Se puede conocer qué frecuencias componen un sonido observando su espectro frecuencias, entendiendo por tal la representación gráfica de las frecuencias que lo integran, así como su nivel de presión sonora correspondiente.

2.1.2 Escala frecuencial

Para Arau (1999), un sonido de una frecuencia determinada se caracteriza por ser una vibración periódica, es decir, es un fenómeno que se repite a intervalos de tiempo iguales a T , que se denominan periodo de la oscilación. Una baja frecuencia le corresponde a un tono grave y una frecuencia alta a un tono agudo.

La sensación de altura tonal se denomina tonía y su unidad es el mel. La octava es el intervalo de altura tonal que separa un sonido de otro de frecuencia doble.

En la acústica arquitectónica en correspondencia a las escalas musicales, se denominan:

- Tonos graves: las dos octavas centradas sobre las frecuencias de 125 y 250 Hz.
- Tonos medios: las dos octavas centradas sobre las frecuencias de 500 y 1000 Hz.
- Tonos agudos: las dos octavas centradas sobre las frecuencias de 2000 y 4000 Hz.

2.1.3 Bandas de frecuencias

De acuerdo a Carrión (2001), el conjunto de frecuencias situado entre las notas inferior y superior de una fuente sonora se denomina banda o margen de frecuencias. En la Figura 3 se muestran las bandas de frecuencias asociadas a diversos instrumentos musicales y a la voz humana.

En el caso de la audición humana, la banda de frecuencias audibles para una persona joven y sana se extiende, aproximadamente, de 20Hz a 20,000 Hz (20 kHz). Las frecuencias inferiores a 20 Hz se llaman subsónicas y las superiores a 20 kHz ultrasónicas, dando lugar a los infrasonidos y ultrasonidos, respectivamente.

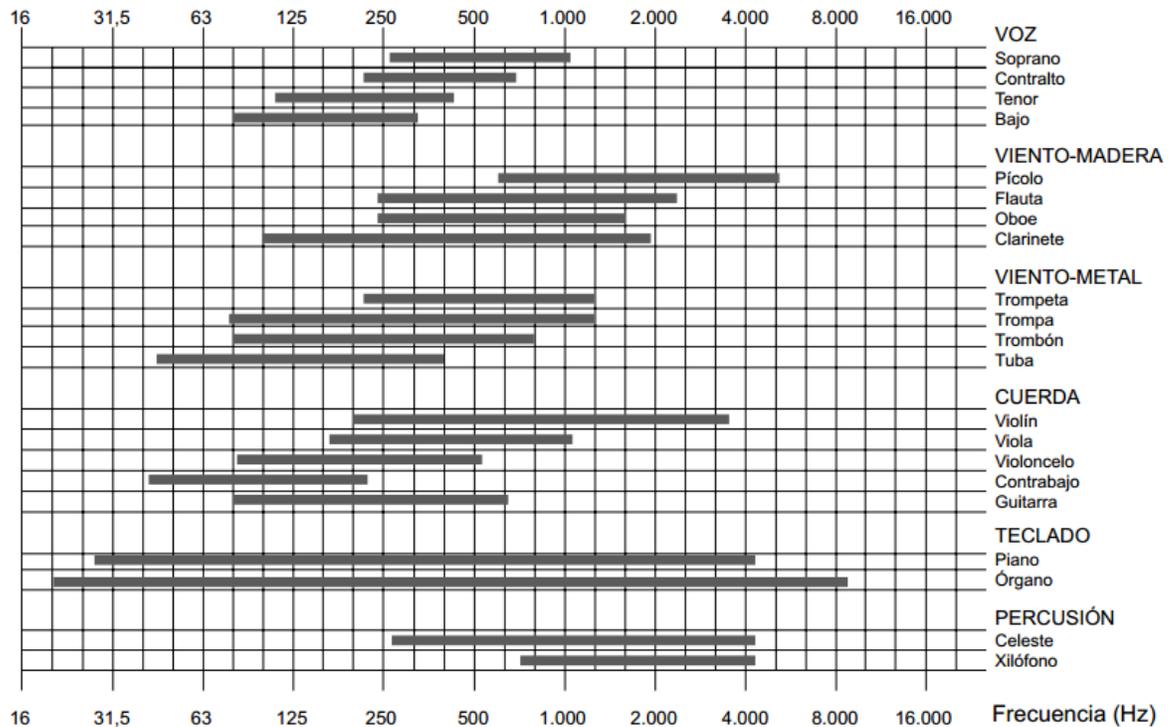


Figura 3. *Bandas de frecuencias*. Fuente: Carrión (2001).

2.1.4 Velocidad de propagación del sonido

La velocidad del sonido en el aire, o dicho de otra manera, la velocidad con que se propagan las perturbaciones, depende de la relación entre la presión atmosférica p_0 y de la densidad específica ρ_0 del aire según la fórmula de Laplace:

$$c = \sqrt{\frac{1.4 * p_0}{\rho_0}}$$

Donde la densidad específica ρ_0 está en función de la temperatura. A 22°C la velocidad es de unos 345 m/s (Bartí, 2010).

2.1.5 Longitud de onda del sonido

La distancia entre dos puntos consecutivos del campo sonoro que se hallan en el mismo estado de vibración en cualquier instante de tiempo, se le denomina longitud de onda del sonido (λ).

La relación entre las tres magnitudes: frecuencia (f), velocidad de propagación (c) y la longitud de onda (λ), viene dada por la siguiente expresión:

$$\lambda = c/f$$

Para cada frecuencia, la longitud de onda depende del medio de propagación, ya que es proporcional a la velocidad, y está varía para cada medio. Por otro lado, se puede ver que la longitud de onda y la frecuencia son inversamente proporcionales, es decir, cuanto mayor es f , menor es λ y viceversa (Carrión, 2001).

2.1.6 Nivel de presión sonora

Carrión (2001) explica que el valor a considerar es la diferencia entre el valor fluctuante de la presión sonora total P_T y su valor de equilibrio P_0 . La unidad de medida es el Newton/metro cuadrado (N/m^2) o Pascal (Pa). Debido a la variación de dicha magnitud con el tiempo, se utiliza como valor representativo su promedio temporal, que recibe el nombre de valor eficaz. Sin embargo, la utilización del valor eficaz da lugar a una serie de problemas en el comportamiento del oído humano.

Es conveniente hacer uso de una escala logarítmica para representar la presión sonora. Dicha escala se expresa en valores relativos a un valor de referencia, la unidad utilizada es el decibelio (dB). La utilización del umbral de audición como

referencia tiene como objetivo que todos los sonidos audibles sean representados por valores de niveles de presión sonora (SPL) positivos.

El uso de dB reduce la dinámica de presiones sonoras $1:5 \times 10^6$ a niveles de presión sonora de 0 a 135 dB, donde 0 dB representa una presión igual al umbral de audición y 135 dB el umbral aproximado de dolor. De esta manera, las cifras manejadas son mucho más simples y, además, se dan las siguientes relaciones entre cambios de nivel sonoro y su efecto subjetivo:

- 1 dB: mínimo cambio de nivel sonoro perceptible.
- 5 dB: cambio de nivel claramente percibido.
- 10 dB: incremento asociado a una sonoridad doble.

En la Tabla 1 se muestran niveles de presión sonora correspondientes a una serie de sonidos y ruidos típicos.

Tabla 1. *Niveles de presión sonora correspondientes a sonidos y ruidos típicos, y valoración subjetiva asociada.*

Fuente Sonora	Nivel de Presión Sonora SPL (dB)	Valoración Subjetiva
Despegue avión (a 60m)	120	Muy elevado
Edificio en construcción	110	
Martillo neumático	100	
Camión pesado (a 15m)	90	Elevado
Calle (ciudad)	80	
Interior automóvil	70	
Conversación normal (a 1m)	60	Moderado
Oficina, aula	50	
Sala de estar	40	
Dormitorio (noche)	30	Bajo
Estudio de radiodifusión	20	

Fuente: Carrión (2001).

2.1.7 Inteligibilidad de la palabra

La inteligibilidad de la palabra es una cuestión básica que se debe considerar en el diseño de entornos laborales, que afectan de manera importante a la higiene y a la seguridad, ya que la pérdida de entendimiento o comprensión de los mensajes verbales pueden dar origen a confusiones.

Se determina por el uso de los valores Preferred Speech Interference Level (PSIL), éste se define mediante los niveles de presión sonora determinados a las frecuencias de octavas de 500, 1000 y 2000 Hz y se expresa por medio de su valor medio (Arau, 1999).

2.2 Parámetros acústicos para la evaluación acústica de recintos

Carrión (2001) establece que los objetivos a cumplir para considerar que un recinto tiene un alto grado de calidad acústica son los siguientes:

- Garantizar la existencia de confort acústico.
- Asegurar una correcta inteligibilidad de la palabra.
- Certificar que los mensajes emitidos sean claramente inteligibles y lleguen a todos los puntos con un nivel suficiente y sin coloraciones.

Para conseguir un adecuado confort acústico, a la vez que una correcta inteligibilidad de la palabra, es preciso que:

- El ruido de fondo existente en la sala sea suficientemente bajo.
- El nivel de campo reverberante sea bajo.
- No existan ecos, focalizaciones del sonido, ni eco flotante.

2.2.1 Tiempo de reverberación

Se denomina reverberación al sonido que persiste en el interior de la sala después de apagada la fuente emisora. La reverberación está formada por el conjunto de reflexiones que se fusionan unas a otras, y que se extinguen con mayor o menor rapidez dependiendo de la absorción y volumen de la sala (Sommerhoff, 2005).

Según Beranek (2004) el tiempo de reverberación (RT) medio es el correspondiente a las bandas de 500 Hz y 1 kHz.

$$RT_{mid} = \frac{RT(500Hz) + RT(1000Hz)}{2} [s]$$

El tiempo de reverberación óptimo para los recintos de música sinfónica debe estar entre 1.8 – 2.0 ms y para la música barroca y clásica entre 1.6 – 1.8 ms con la sala ocupada, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. *Márgenes recomendados para los distintos tipos de música.*

Tipo de Música	Tiempo de Reverberación (RT _{mid})
Música sinfónica	1.8-2.0
Música Barroca y Clásica	1.6-1.8
Música de cámara	1.3-1.7
Ópera	1.2-1.5

Fuente: Beranek (2004).

2.2.1.1 Calidez acústica (BR)

La calidez acústica o bass ratio (BR) se define como la relación de las suma de los tiempos de reverberación RT de las frecuencias bajas (125 Hz a 250 Hz) y medias (500 Hz a 1 kHz), Se dice que una sala tiene calidez acústica si presenta una buena respuesta a frecuencias bajas. La palabra calidez representa, pues, la

riqueza de graves, la suavidad y la melosidad de la música en la sala (Onieva, 2013).

$$BR = \frac{RT(125 \text{ Hz}) + RT(250 \text{ Hz})}{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1 \text{ kHz})}$$

Durante el acondicionamiento de un recinto es de especial cuidado la absorción de las frecuencias bajas, ya que éstas representan el mayor reto para el diseño de un lugar confortable.

Según Beranek (2004), el margen de valores recomendados de BR para una sala de conciertos destinada a la música sinfónica y totalmente ocupada es:

$$1.10 \leq BR \leq 1.25 \text{ (si } RT_{mid} = 2.2 \text{ s)}$$

$$1.10 \leq BR \leq 1.45 \text{ (si } RT_{mid} = 1.8 \text{ s)}$$

Para salas con valores de RT_{mid} comprendidos entre 1.8 y 2.2 s, el valor máximo recomendado de BR se determina por medio de interpolación.

2.2.1.2 Brillo (Br)

El término brillante se ha elegido como indicativo de que el sonido en la sala es claro y rico en armónicos. Por definición el brillo (Br) de una sala es la relación entre la suma de los tiempos de reverberación RT a frecuencias altas (2 kHz y 4 kHz) y la suma de los RT correspondientes a frecuencias medias (500 Hz y 1 kHz) (Onieva, 2013).

$$Br = \frac{RT(2 \text{ kHz}) + RT(4 \text{ kHz})}{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1 \text{ kHz})}$$

Beranek (2004) recomienda que el valor de Br para recintos totalmente ocupados cumpla con:

$$Br \geq 0.87$$

2.2.1.3 Early Decay Time (EDT)

Moreno (2011) menciona que este parámetro se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que desconectamos la fuente hasta que el nivel de presión sonora ha decaído 10 dB. El EDT está muy relacionado con el RT, ya que el primero mide la reverberación percibida, mientras que el segundo, la reverberación real, sin embargo, para determinar el grado de viveza de una sala es más fiable el valor del EDT.

Se aconseja que la media aritmética de EDT en las frecuencias de 500 Hz y 1 kHz con la sala vacía denominada EDT_{mid} sea lo más parecido a los valores de RT_{mid} .

$$EDT_{mid} \approx RT_{mid}$$

2.2.1.4 Sonoridad (G)

La sonoridad (G) corresponde con el grado de amplificación producido por la sala. Depende de la distancia del oyente al escenario, de la energía asociada a las primeras reflexiones, de la superficie ocupada por el público y el nivel de campo reverberante (Onieva, 2013).

La sonoridad se define como la diferencia del nivel de presión sonora en un punto de un recinto producido por una fuente omnidireccional y un nivel de presión utilizado como referencia, obtenido con la misma fuente en campo libre a una distancia de 10 metros.

Ambos niveles se miden por bandas de frecuencias de octava (entre 125 Hz y 4 kHz) y aplicando la misma potencia a la fuente sonora. El nivel de referencia en cada banda de frecuencias es de 69 dB SPL.

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} \text{ [dB]}$$

Habitualmente se utiliza el valor obtenido como promedio de los valores correspondientes de las bandas de 500 Hz y 1 kHz.

$$G_{mid} = \frac{G(500 \text{ Hz}) + G(1 \text{ kHz})}{2} \text{ [dB]}$$

Beranek (2004) recomienda que el valor de G_{mid} para una sala vacía cumpla con:

$$4 \leq G_{mid} \leq 5.5 \text{ [dB]}$$

2.2.1.5 Initial Time Delay Gap (Ti)

Benarek (2004) asocia la valoración de la intimidad acústica (Initial-Time-Delay Gap) con la sensación que tiene el oyente de escuchar la música en un espacio de dimensiones reducidas que las dimensiones reales de la sala.

El Ti correspondiente a un punto cualquiera de una sala se define como el intervalo de tiempo (en milisegundos) existente entre la llegada del sonido directo procedente del escenario y la primera reflexión significativa que llega del mismo (Onieva, 2013).

Según Beranek (2004), el valor recomendado de este parámetro en el centro de la platea debe cumplir con:

$$Ti \leq 20 \text{ [ms]}$$

La obtención de valores superiores a 35 ms representa generalmente una reducción significativa de la calidad acústica de un recinto.

2.2.2 Claridad musical (C_{80})

La claridad musical C_{80} indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical.

Para Cremer (1982), el C_{80} se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la que llega después de los primeros 80 ms, calculada en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0.08} p^2(t) dt}{\int_{0,0/}^{\infty} p^2(t) dt} [dB]$$

La elección del intervalo temporal de 80 ms se debe a que, cuando se trata de música, las reflexiones que llegan al oyente dentro de dicho intervalo son integradas por el oído junto con el sonido directo, por lo tanto, contribuyen a aumentar la claridad musical.

Habitualmente se utiliza el valor medio de los C_{80} correspondiente a las bandas de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz, denominado “music average” o $C_{80}(3)$:

$$C_{80}(3) = \frac{C_{80}(500 \text{ Hz}) + C_{80}(1 \text{ kHz}) + C_{80}(2 \text{ kHz})}{3} [dB]$$

Beranek (2004) recomienda para un recinto vacío que el valor de $C_{80}(3)$ cumpla con lo siguiente:

$$-4 \leq C_{80}(3) \leq 0 [dB]$$

Mientras que Marshall (1994) propone el siguiente margen para salas ocupadas:

$$-2 \leq C_{80}(3) \leq +2 [dB]$$

2.2.3 Espacialidad del sonido: amplitud aparente de la fuente sonora (ASW)

La amplitud aparente de la fuente sonora (ASW por sus siglas en inglés “Apparent Source Width”) se asocia con la sensación de que el sonido que llega del escenario proviene de una fuente de mayor amplitud que la correspondiente a la orquesta real (Onieva, 2013).

Según Barron (2010), la ASW aumenta con el número de primeras reflexiones que inciden lateralmente al oyente. Ello es debido a que el oído las suma con el sonido directo, con lo cual la localización de la fuente tiende a ser ambigua.

Existen dos parámetros que permiten cuantificar el grado de ASW:

El primer parámetro es la eficiencia lateral (LF), según Marshall, Gottlob y Alrutz (1978), se define como la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo (se excluye el directo) y la energía recibida en todas las direcciones en dicho intervalo de tiempo.

$$LF = \frac{\int_{0.005}^{0.08} p^2(t) \cos^2 \theta dt}{\int_0^{0.08} p^2(t) dt}$$

Habitualmente se utiliza el valor obtenido como promedio de los valores correspondientes a las bandas desde 125 Hz a 1 kHz.

$$LF_{E4} = \frac{LF(125 \text{ Hz}) + LF(250 \text{ Hz}) + LF(500 \text{ Hz}) + LF(1 \text{ kHz})}{4}$$

Se recomienda que LF_{E4} para sala vacía deba cumplir:

$$LF_{E4} \geq 0.19$$

El segundo parámetro es la denominada Interaural Cross-Correlation o correlación cruzada interaural (IACC), se define como la correlación cruzada entre las respuestas impulsionales calculadas en ambos oídos, y es indicativo del grado de similitud existente entre ambas señales (Onieva, 2013).

Hidaka (1995) definen dos IACC: el $IACC_E$ corresponde a los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo, y el $IACC_L$, calculado a partir de los 80 ms hasta 1 s.

$$IACC_E = \max \frac{\int_{0.005}^{0.8} h_L(t) h_R(t + \tau) dt}{\left(\int_{0.005}^{0.8} h_L^2(t) dt \int_{0.005}^{0.8} h_R^2(t) dt \right)^{1/2}} \quad (\text{para } |\tau| \leq 1 \text{ ms})$$

Donde $h_L(t)$ y $h_R(t)$ son las respuestas impulsionales asociadas a los oídos izquierdos y derecho, respectivamente.

Según Okano (1995), las bandas de frecuencias más representativas son las centradas en 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz. Por lo que se representa:

$$IACC_{E3} = \frac{IACC_g(500 \text{ Hz}) + IACC_g(1 \text{ kHz}) + IACC_g(2 \text{ kHz})}{3} \quad [dB]$$

El $IACC_{E3}$ permite cuantificar el grado de disimilitud entre las informaciones sonoras que llegan a ambos oídos, dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo.

Beranek (1996) explica que debido a que la importancia de este parámetro ha sido reconocida hace poco tiempo, existen relativamente pocas salas en las que se haya procedido a su medida, Sin embargo, se ha podido comprobar que su fiabilidad es estadísticamente elevada, es decir, el valor de $(1-IACC_{E3})$ medido en cada una de ellas permite separarlas en tres categorías como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Caracterización de la sala según (1-I IACCE3).

(1-I IACC _{E3})	Categoría acústica de las salas
0.66	Excelente
0.55	Muy buena
0.41	Aceptable/Buena

Fuente: Beranek (1995).

En consecuencia, si bien no existe valor óptimo para (1-I IACCE3), Beranek (2004) propone para la sala vacía el siguiente valor aproximado:

$$(1 - IACC_{E3}) \approx 0.70$$

2.2.4 Resumen de los parámetros de caracterización de salas

En la Tabla 4 se muestran los valores recomendados para una sala de conciertos.

Tabla 4. Valores recomendados para una sala de conciertos.

Parámetro Acústico	Estado de Sala	Valor recomendado	Valoración Subjetiva
Tiempo de reverberación medio (RT _{mid})	Ocupada	$1.8 \leq RT_{mid} \leq 2s$	Grado de viveza
	Sólo mob.	$1.0 \leq RT_{mid} \leq 1.7s$	
Calidez acústica (BR)	Ocupada	$1.10 \leq BR \leq 1.25$ (si RT _{mid} = 2,2s)	Riqueza de sonidos graves, melosidad y suavidad de la música
		$1.10 \leq BR \leq 1.45$ (si RT _{mid} = 1,8s)	
Brillo (Br)	Ocupada	$Br \geq 0.87$	Riqueza de los sonidos agudos
Early Decay Time medio (EDT _{mid})	Ocupada	$EDT_{mid} \approx RT_{mid}$	Grado de viveza de la sala
Sonoridad media (G _{mid})	Vacía	$4 \leq G_{mid} \leq 5,5$ [dB]	Grado de amplificación producida por la sala
Initial-Time-Decay Gap (Ti)	-	$Ti \leq 20$ [ms]	Intimidad acústica (Sensación subjetiva del volumen de la sala)
Claridad musical media (music average o C ₈₀ (3))	Vacía	$-4 \leq C_{80}(3) \leq 0$ [dB]	Grado de separación entre los diferentes sonidos integrantes de una composición musical
	Ocupada	$-2 \leq C_{80}(3) \leq 2$ [dB]	
Eficiencia lateral (LF _{E4})	Vacía	$LF_{E4} \geq 0,19$	Impresión espacial del sonido
Correlación cruzada interaural (IACC _{E3})	Vacía	$(1-IACC_{E3}) \approx 0,70$	Impresión espacial del sonido

2.3 Anomalías en los recintos

Se denominan anomalías a efectos que por diseño, elementos y materiales hacen que no se cumplan los parámetros adecuados para el acondicionamiento acústico.

2.3.1 Coloración del sonido

Según Moreno (2011), consiste en que la sala responda de una forma plana al sonido, sin amplificar ni atenuar ninguna de las frecuencias al combinarse el sonido directo y reflejado.

La calidad puede verse alterada por la ornamentación del lugar y las cavidades que puedan encontrarse en el lugar.

2.3.2 Eco y Eco flotante

Carrión (2001) menciona que todas aquellas reflexiones que llegan a un oyente dentro de los primeros 50-80 ms desde la llegada del sonido directo son integradas por el oído humano y, en consecuencia, su percepción no es diferenciada respecto al sonido directo.

Por el contrario, la aparición en un punto de escucha de una reflexión de nivel elevado con un retardo superior a los 80 ms es totalmente contraproducente para la obtención de una buena inteligibilidad de la palabra.

Para evitarlo, Moreno (2011) dice que se debe poner material absorbente en las paredes, sin superar el 10% total de la superficie total, de lo contrario afectaría el tiempo de reverberación y la sonoridad.

Otra solución es superponer superficies convexas en las productoras de eco, en caso de que estas superficies sean reflectoras, su radio deberá ser mayor a 5 metros, si no funcionarían como difusores.

Para Carrión (2001), el eco flotante (“flutter echo”) consiste en una repetición múltiple, en un breve intervalo de tiempo, de un sonido generado por una fuente sonora, y aparece cuando ésta se sitúa entre dos superficies paralelas, lisas y muy reflectantes.

2.3.3 Focalización del sonido

Carrion (2001) explica que este efecto se produce cuando una gran cantidad de reflexiones se agrupan en una zona concreta de la sala, rompiendo la homogeneidad del sonido. La causa de éstas se produce generalmente por la presencia de cualquier tipo de superficies cóncavas en la sala, como techos abovedados, cúpulas, etc. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de focalización del sonido.

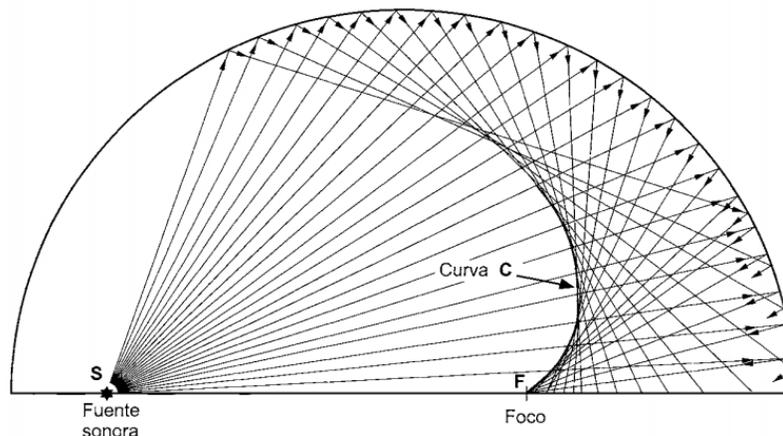


Figura 4. *Ejemplo de focalización del sonido*. Fuente: Carrión (2001).

2.4 Acondicionamiento acústico

2.4.1 Absorción del sonido

Para De la colina (2000), bajo la denominación de absorción acústica hay dos conceptos distintos que hay que distinguir:

Un primer concepto es la absorción en el seno del aire: la densidad de energía disminuye al propagarse la perturbación acústica debido a procesos viscoelásticos de degradación y moleculares, de relajación. Al ser un medio homogéneo, la absorción es función del tiempo o de la distancia recorrida.

Un segundo concepto es el que se refiere al coeficiente de absorción acústica, que es la fracción de energía no reflejada por una superficie o por un objeto en relación a la energía incidente.

El coeficiente de absorción de un material, es la relación entre la energía absorbida por el material y la energía reflejada por el mismo; dada esta formulación su valor siempre está comprendido entre 0 y 1.

2.4.2 Reflexión del sonido

Carrión (2001) explica que la energía radiada por una fuente sonora en un recinto cerrado llega a un oyente, ubicado en un punto cualquiera del mismo, de dos formas diferentes: una parte de la energía llega de forma directa (sonido directo), mientras que la otra parte lo hace de forma indirecta (sonido reflejado), al ir asociada a las sucesivas reflexiones que sufre la onda sonora cuando incide sobre las diferentes superficies del recinto.

En un punto cualquiera del recinto, la energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora, mientras que la

energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el rayo sonoro, así como del grado de absorción acústica de los materiales utilizados como revestimiento de las superficies implicadas. Cuanto mayor sea la distancia recorrida y más absorbentes sean los materiales empleados, menor será la energía asociada tanto al sonido directo como a las sucesivas reflexiones.

2.4.3 Difusores del sonido

Moreno (2011) denomina como difusores a aquellas superficies que reflejan el sonido uniformemente en todas las direcciones, produciendo un mayor efecto de espacialidad, con lo que la impresión de calidad acústica del recinto mejora considerablemente.

2.4.4 Absorción del público y de las sillas

Carrión (2001) considera que el grado de reverberación de un recinto viene dado por los materiales absorbentes utilizados en su revestimiento de las superficies, así como de una forma muy notoria de la absorción producida por el público y sillas existentes.

Según Beranek (2004) la absorción de las sillas (ocupadas y vacías) aumenta en proporción directa a la superficie que ocupan. Esto se cumple siempre que las sillas ocupen entre 0.45 y 0.479 m².

La absorción de las sillas se calcula de la siguiente manera:

$$A_s = S_A a_s \text{ [Sabins]}$$

Donde la superficie acústica efectiva ocupada por las sillas (S_A) está formada por la superficie real S_s ocupada por las mismas más la superficie total en bandas perimetrales de 0.5m de anchura que bordean los diferentes bloques de la silla, y

a_s es el coeficiente de absorción unitario de las sillas, como se muestran en la Tablas 5 y Tabla 6.

Tabla 5. *Coefficientes de absorción de las sillas vacías.*

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Sillas con alto porcentaje de superficie tapizada	0.72	0.79	0.83	0.84	0.83	0.79
Sillas con un porcentaje medio de superficie tapizada	0.56	0.64	0.70	0.72	0.68	0.62
Sillas con un porcentaje bajo de superficie tapizada	0.35	0.45	0.57	0.61	0.59	0.55

Fuente: Carrión (2001).

Tabla 6. *Coefficientes de absorción de las sillas ocupadas.*

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Sillas con alto porcentaje de superficie tapizada	0.76	0.83	0.88	0.91	0.91	0.89
Sillas con un porcentaje medio de superficie tapizada	0.68	0.75	0.82	0.85	0.86	0.86
Sillas con un porcentaje bajo de superficie tapizada	0.56	0.68	0.79	0.83	0.86	0.86

Fuente: Carrión (2001).

CAPÍTULO III. MÉTODO

3.1 Tipo de investigación

Según el tipo de investigación se considera como cuantitativa, ya que se obtuvieron datos de manera numérica, los parámetros que determinan el confort acústico de la Casa Club ITSON, comparando estos con valores aceptados internacionalmente.

De igual manera, tomando en cuenta el alcance del estudio, se considera como una investigación exploratoria, debido a que es un tema poco estudiado, donde existen fuentes de información limitadas, además de abrir paso a futuras investigaciones dentro del tema de la acústica.

El diseño de la investigación se cataloga como no experimental debido a que se observan los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural, para analizarlos posteriormente.

3.2 Ubicación del objeto de estudio

El estudio se llevó a cabo en el local de eventos Casa Club ITSON, ubicado en Ciudad Obregón, Sonora, en la colonia Villa ITSON. La zona estudiada tiene un área aproximada de 42 m x 21 m y una altura máxima de 7.9 m, con un volumen total de aproximadamente 4,700 m³ y una capacidad máxima de 700 personas.

3.3 Participantes

Se contó con un asesor técnico, perteneciente al Instituto Tecnológico de Sonora, así como con un Ingeniero en Audio, encargado de operar el equipo, y un estudiante de noveno semestre de Ingeniería Civil.

3.4 Materiales

En el proyecto se utilizaron diferentes herramientas para medir con precisión las variables necesarias, como son:

- Una fuente sonora direccional (debido a la falta de disponibilidad de una fuente omnidireccional) que debe ser capaz de alcanzar un nivel de presión acústica suficiente para la generación de curvas de decrecimiento con el rango dinámico mínimo requerido sin contaminación por ruido de fondo.
- Micrófono omnidireccional y un sonómetro para detectar la presión acústica.
- Un amplificador, filtros y una computadora para hacer funcionar el sistema y recolectar los datos obtenidos.
- Software Pro-Tools, utilizado para grabar impulsos.
- Autodesk Revit, un software de diseño asistido por computadora para elaborar un modelo del recinto digital, en el cual se realizara la simulación acústica.
- Software Autodesk Ecotect para llevar a cabo la simulación acústica.

3.3 Procedimiento

Para esta investigación es necesario realizar pruebas con el recinto completamente vacío, para posteriormente efectuar las mismas con sillas y demás mobiliario que normalmente se encuentra en el local y finalmente un nuevo análisis con la sala completamente habitada. Debido al reducido tiempo para realizar el estudio, solamente se trabajó el lugar con el mobiliario instalado.

Para esta investigación solamente se calcularon el tiempo de reverberación (RT_{mid}), calidez acústica (BR), brillo (Br), sonoridad (G) e intimidad acústica (IDT), el resto de los parámetros no se midieron debido a problemas que se presentaron con el equipo utilizado.

Se utilizó el siguiente procedimiento:

Se determinaron dos posiciones de la fuente sonora, en este caso, se tomaron las posiciones más utilizadas en los eventos realizados en el lugar, como se muestra en la Figura 5.

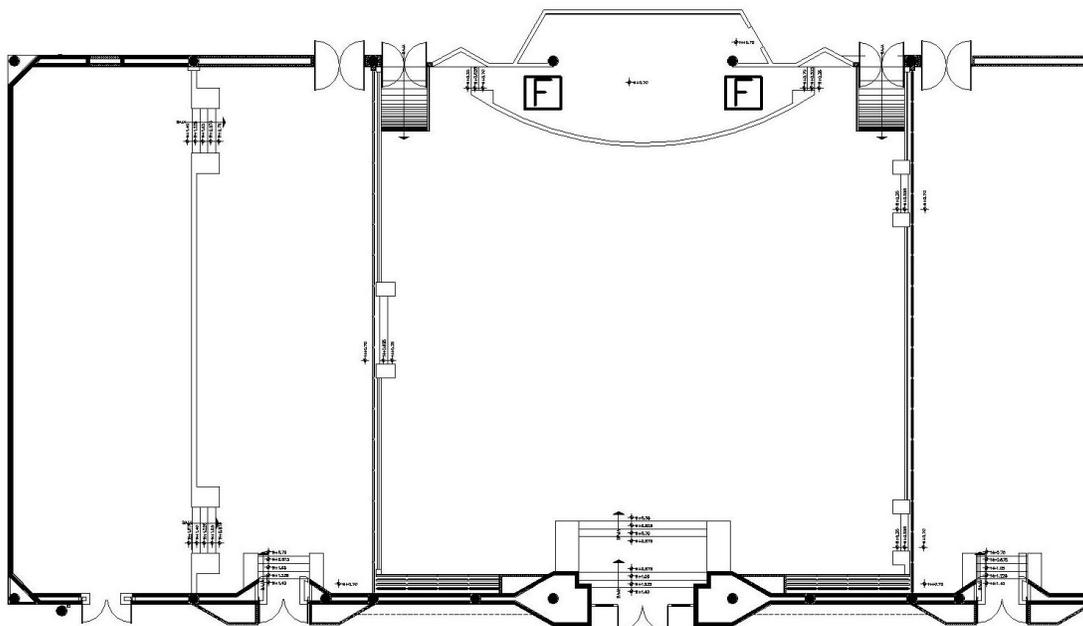


Figura 5. Ubicaciones seleccionadas para la fuente sonora.

Una vez decidido el espacio que ocupó la fuente sonora, fue necesario distribuir las posiciones de recepción por todo el recinto, teniendo un total de 9 posiciones, tal como se plasma en la Figura 6.

Antes de comenzar con la medición del tiempo de reverberación se lanzó una onda de ruido rosa, éste es un sonido que se caracteriza por ser plano en todas sus frecuencias, es decir, que todas las bandas de octava tienen el mismo nivel sonoro. Éste determinó a groso modo las frecuencias en las que hay algún tipo de inconveniente, como cancelaciones o focalización en determinadas frecuencias.

Se inició la medición del tiempo de reverberación de la sala, midiendo cada punto de recepción con cada una de las posiciones de la fuente sonora. Para realizar el cálculo, se necesitó que el nivel de presión fuera de al menos 35 dB sobre el ruido de fondo.

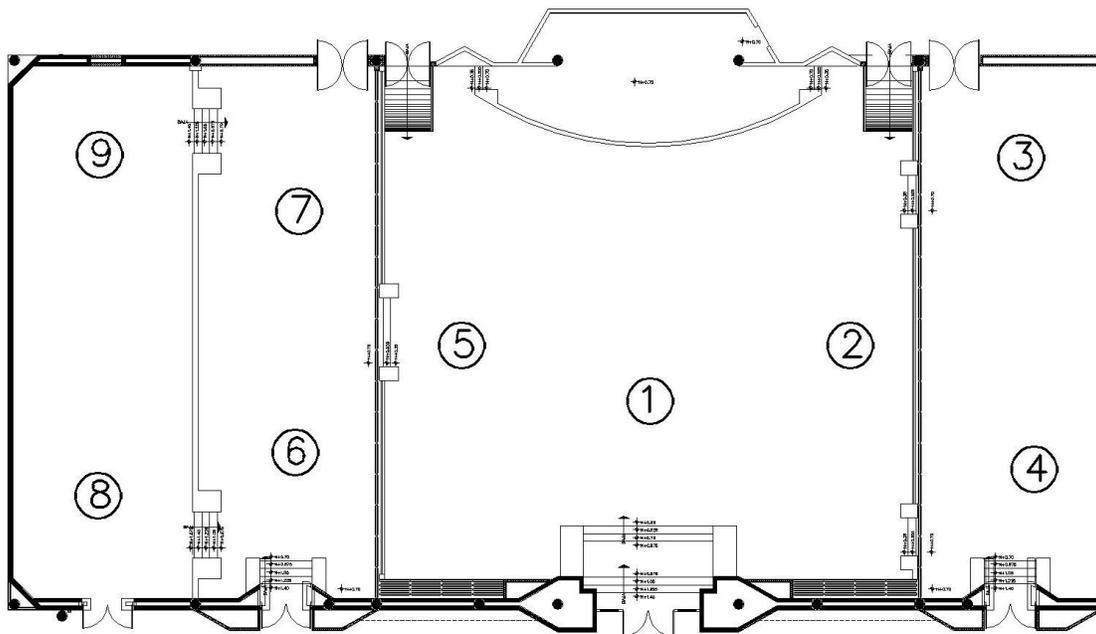


Figura 6. *Ubicaciones seleccionadas para el receptor.*

Adicionalmente a la medición del tiempo de reverberación utilizando el micrófono, se midió el EDT, que consta de calcular el tiempo en que el sonido disminuye 10 dB, para posteriormente multiplicarlo por 6.

A partir de las mediciones del tiempo de reverberación, se procedió a calcular los parámetros de tiempo de reverberación (RT_{mid}), calidez acústica (BR) y riqueza de agudos (Br).

Con la ayuda del sonómetro y el software de grabación de audio, se hicieron mediciones para determinar la amplificación propia de la sala (G) e intimidad acústica (IDT).

Para una evaluación del recinto, fue necesario comparar los valores obtenidos in situ, con los valores recomendados en la Tabla 4.

Una vez determinados los valores acústicos de la sala, se procedió a realizar el modelo digital del recinto con la ayuda del software de diseño Autodesk Revit.

Al terminar el diseño del local, se exportó a Autodesk Ecotect donde, de igual manera, fue necesario especificar los puntos de posicionamiento de la fuente sonora y los receptores. En el modelo acústico, se intentó obtener los valores más cercanos posibles a los obtenidos in situ.

Una vez obtenidos parámetros semejantes, se propusieron soluciones para obtener valores dentro de los rangos recomendables especificados en la Tabla 4.

Finalmente, se planteó la solución más viable para mejorar la acústica del lugar.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el recinto y en la simulación acústica, en base a lo establecido en el capítulo 3.

A primera instancia se hicieron mediciones con el ruido rosa, se puede observar que hay una anomalía en las frecuencias cercanas a los 60 Hz, 125 Hz y 12 kHz, lo que probablemente indica que hay una cancelación de frecuencias en éstas.

Debido a que en varios puntos no fue posible obtener el nivel de presión necesario para el cálculo del tiempo de reverberación, se trabajó con el EDT, además, por razones prácticas se tomó este valor como tiempo de reverberación. Los valores obtenidos y su promedio en cada punto se muestran en la Tabla 7. Un promedio de todos los receptores es expuesto en la Tabla 8

Tabla 7. Valores de EDT obtenidos.

EARLY DECAY TIME (EDT)							
Frecuencia (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
R1	F1	1.54	2.50	2.97	2.48	2.94	1.47
	F2	1.44	3.94	3.01	2.84	2.62	1.56
PROMEDIO		1.49	3.22	2.99	2.66	2.78	1.52
R2	F1	1.86	2.53	2.87	2.49	2.03	2.10
	F2	1.16	2.24	2.78	2.62	1.59	1.63
PROMEDIO		1.51	2.39	2.83	2.56	1.81	1.87
R3	F1	1.74	2.36	2.74	2.02	2.88	1.8
	F2	1.58	2.76	3.19	2.35	2.16	2.00
PROMEDIO		1.66	2.56	2.97	2.19	2.52	1.90
R4	F1	1.88	2.47	3.07	3.51	2.66	1.76
	F2	1.79	2.37	2.92	3.16	2.71	1.70
PROMEDIO		1.84	2.42	3.00	3.34	2.69	1.73
R5	F1	1.55	2.40	3.26	2.75	2.57	1.68
	F2	1.26	2.40	3.60	2.87	2.74	1.79
PROMEDIO		1.41	2.40	3.43	2.81	2.66	1.74
R6	F1	1.56	3.16	3.03	2.46	3.23	1.70
	F2	1.36	2.69	3.34	2.88	2.78	2.01
PROMEDIO		1.46	2.93	3.19	2.67	3.01	1.86
R7	F1	1.30	2.96	2.74	2.65	3.00	2.51
	F2	1.38	2.51	3.21	2.98	2.85	1.83
PROMEDIO		1.34	2.74	2.98	2.82	2.93	2.17
R8	F1	1.58	3.09	2.94	3.38	3.38	1.96
	F2	1.62	3.10	3.50	3.39	3.42	1.66
PROMEDIO		1.60	3.10	3.22	3.39	3.40	1.81
R9	F1	1.78	2.60	3.52	3.09	3.17	1.97
	F2	2.00	2.95	3.10	3.04	3.10	1.68
PROMEDIO		1.89	2.78	3.31	3.07	3.14	1.83

Tabla 8. Valores promedios EDT.

Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
EDT	1.58	2.72	3.10	2.83	2.77	1.82

A partir de los datos obtenidos, se procedió a calcular el RT promedio mediante la fórmula:

$$RT_{mid} = \frac{RT(500Hz) + RT(1000Hz)}{2} [s]$$

$$RT_{mid} = \frac{3.10s + 2.83s}{2} = 2.96s$$

Seguido del tiempo de reverberación, se aplicó la siguiente ecuación para obtener la calidez acústica de la sala:

$$BR = \frac{RT(125 Hz) + RT(250 Hz)}{RT(500 Hz) + RT(1 kHz)}$$

$$BR = \frac{1.58s + 2.72s}{3.10s + 2.83s} = 0.72$$

El brillo fue el próximo valor obtenido mediante la utilización del cálculo mostrado a continuación:

$$Br = \frac{RT(2 kHz) + RT(4kHz)}{RT(500 Hz) + RT(1 kHz)}$$

$$Br = \frac{2.77s + 1.82s}{3.10s + 2.83s} = 0.77$$

Para el grado de intimidad acústica de la sala, se tomó la medida en cada sitio, sin embargo, se muestra el receptor 1 debido a que es el lugar más alejado de las paredes, por lo que es el punto ideal para evaluar este parámetro. El resultado se muestra en la Figura 7.

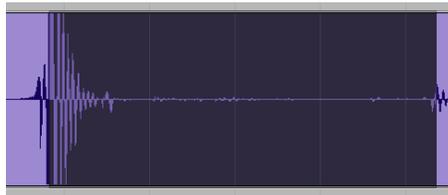


Figura 7. Medición de la intimidad acústica en R1.

Para el receptor 1 la diferencia del tiempo medido entre el sonido directo y la primera reflexión fue de 45 ms, sin embargo, en los demás sitios la intimidad acústica fue menor a 20 ms.

A partir de este punto se inició la medida de la sonoridad de la sala, de manera que fue necesario registrar el nivel de presión sonora en cada uno de los receptores, los resultados se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores de sonoridad obtenidos.

SONORIDAD (G)								
Frecuencia (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	G
R1	F1	-1.00	1.00	5.00	13.00	11.00	8.00	9.00
	F2	11.00	6.00	21.00	1.00	11.00	12.00	11.00
PROMEDIO		5.00	3.50	13.00	7.00	11.00	10.00	10.00
R2	F1	3.00	3.00	12.00	4.00	8.00	12.00	8.00
	F2	13.00	5.00	8.00	2.00	15.00	13.00	5.00
PROMEDIO		8.00	4.00	10.00	3.00	11.50	12.50	6.50
R3	F1	1.00	-5.00	0.00	1.00	3.00	7.00	0.50
	F2	9.00	-9.00	3.00	6.00	13.00	-10.00	4.50
PROMEDIO		5.00	-7.00	1.50	3.50	8.00	-1.50	2.50
R4	F1	10.00	-4.00	-2.00	-7.00	12.00	2.00	-4.50
	F2	5.00	4.00	4.00	9.00	11.00	11.00	6.50
PROMEDIO		7.50	0.00	1.00	1.00	11.50	6.50	1.00
R5	F1	-9.00	4.00	0.00	13.00	6.00	19.00	6.50
	F2	9.00	-4.00	7.00	-1.00	13.00	2.00	3.00
PROMEDIO		0.00	0.00	3.50	6.00	9.50	10.50	4.75
R6	F1	6.00	-5.00	12.00	8.00	-2.00	7.00	10.00
	F2	9.00	4.00	-7.00	5.00	8.00	0.00	-1.00
PROMEDIO		7.50	-0.50	2.50	6.50	3.00	3.50	4.50
R7	F1	8.00	4.00	12.00	4.00	10.00	6.00	8.00
	F2	5.00	2.00	2.00	2.00	8.00	6.00	2.00
PROMEDIO		6.50	3.00	7.00	3.00	9.00	6.00	5.00
R8	F1	2.00	4.00	7.00	-8.00	6.00	3.00	-0.50
	F2	6.00	-5.00	-3.00	2.00	4.00	-1.00	-0.50
PROMEDIO		4.00	-0.50	2.00	-3.00	5.00	1.00	-0.50
R9	F1	3.00	5.00	10.00	2.00	3.00	7.00	6.00
	F2	10.00	1.00	6.00	-1.00	1.00	0.00	2.50
PROMEDIO		6.50	3.00	8.00	0.50	2.00	3.50	4.25

Partiendo de estos valores, se calculó un promedio de sonoridad para cada frecuencia, así como la sonoridad media, como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. *Sonoridad promedio de cada frecuencia.*

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	G _{mid}
G _{prom}	5.56	0.61	5.39	3.06	7.83	5.78	4.22

Para la obtención de la sonoridad media del recinto se utilizó la siguiente formula:

$$G = L_p - L_{10} \text{ [dB]}$$

Donde L_p es el nivel de presión sonora obtenida en cada punto del recinto, mientras que L_{10} es el nivel de presión sonora medido en campo libre a una distancia de 10 m.

$$G_{mid} = \frac{G(500 \text{ Hz}) + G(1 \text{ kHz})}{2} \text{ [dB]}$$

$$G_{mid} = \frac{5.39 + 3.06}{2} = 4.22 \text{ dB}$$

En la Figura 8 se puede observar la sonoridad promedio por frecuencia. La gráfica muestra claramente problemas de cancelación en los valores de 250 Hz y 1 kHz, adicionalmente a esto, se presenta una amplificación en la frecuencia 2 kHz.

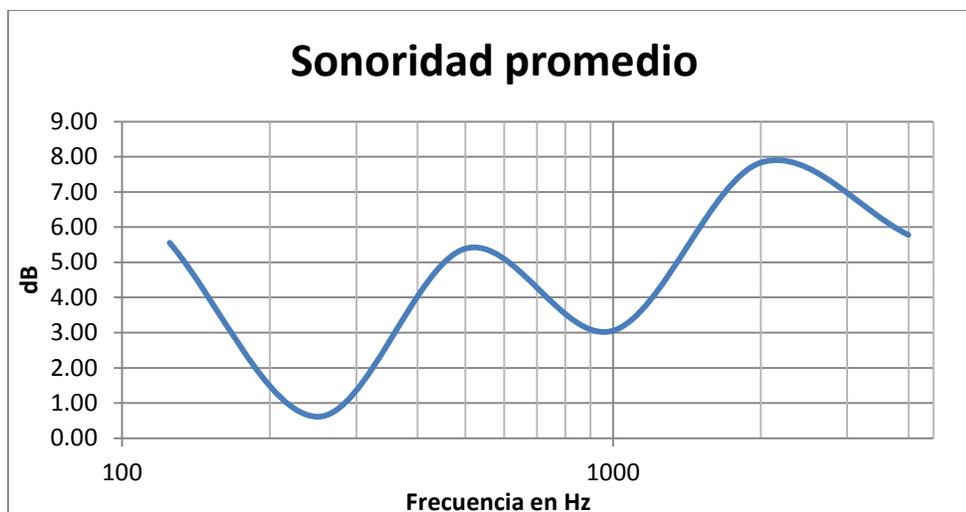


Figura 8. Comportamiento de la sonoridad por frecuencia.

Tabla 11. Resumen de resultados obtenidos.

Parámetro Acústico	Estado de Sala	Valor recomendado	Resultado obtenido	Valoración Subjetiva
Tiempo de reverberación medio (RT_{mid})	Ocupada Solo mob.	$1.8 \leq RT_{mid} \leq 2s$ $1.0 \leq RT_{mid} \leq 1.7s$	2.96 s	Grado de viveza
Calidez acústica (BR)	Ocupada	$1.10 \leq BR \leq 1.25$ (si $RT_{mid} = 2,2s$) $1.10 \leq BR \leq 1.45$ (si $RT_{mid} = 1,8s$)	0.72	Riqueza de sonidos graves, melosidad y suavidad de la música
Brillo (Br)	Ocupada	$Br \geq 0.87$	0.77	Riqueza de los sonidos agudos
Early Decay Time medio (EDT_{mid})	Ocupada	$EDT_{mid} \approx RT_{mid}$	2.96 s	Grado de viveza de la sala
Sonoridad media (G_{mid})	Vacía	$4 \leq G_{mid} \leq 5,5$ [dB]	4.22 dB	Grado de amplificación producida por la sala
Intimidad acústica (IDT)	-	$t_i \leq 20$ [ms]	45 ms	Sensación subjetiva de volumen de la sala

En la Tabla 11 se aprecian los resultados obtenidos en las pruebas in situ, comparadas con los valores recomendados, en ésta se muestra que la mayor parte de los parámetros no cumple con los valores aceptables, por lo que es necesario modificar aspectos dentro del recinto.

Para una mayor comprensión de la calidad acústica en los diferentes puntos establecidos para los receptores se hace una valoración del 1 al 100 representados en la Tabla 12 y en la Figura 9.

Tabla 12. *Valoración de parámetros acústicos.*

Parámetro Acústico	Valor Óptimo	Resultados Obtenidos								
		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
Tiempo de reverberación medio (RT_{mid})	1.9	2.83	2.69	2.58	3.17	3.12	2.93	2.9	3.3	3.19
Calidez acústica (BR)	1.275	0.83	0.72	0.82	0.67	0.61	0.75	0.7	0.7	0.73
Brillo (Br)	≥ 0.87	0.76	0.68	0.86	0.7	0.7	0.83	0.9	0.8	0.78
Early Decay Time medio (EDT_{mid})	$EDT_{mid} \approx RT_{mid}$	2.83	2.69	2.58	3.17	3.12	2.93	2.9	3.3	3.19
Sonoridad media (G_{mid})	4.75	10	6.5	2.5	1	4.75	4.5	5	-0.5	4.25
Intimidad acústica (IDT)	≤ 20 ms	45	25	15	18	23	18	17	8	17
Calificación		69	76	77	67	79	84	83	62	80

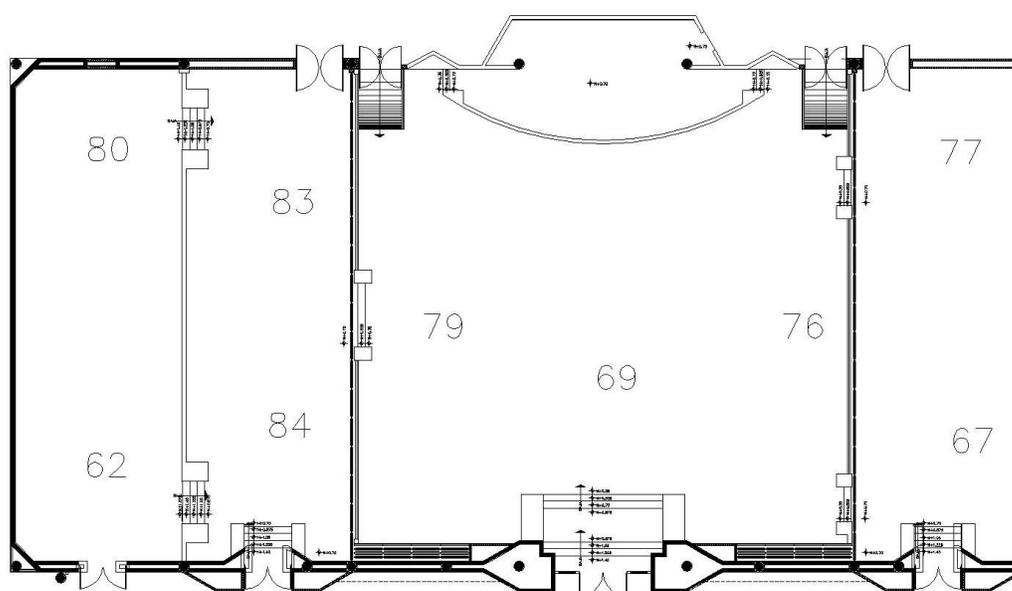


Figura 9. *Valoración de parámetros acústicos*

En el plano se hace notar que los lugares con menor valoración son aquellos en donde se tiene la mayor distancia respecto a las fuentes sonoras, en estos hay mayor incidencia en problemas de sonoridad. Este inconveniente se presenta debido a la geometría del recinto, en estos sitios las frecuencias se encuentran y dan lugar a las cancelaciones.

Otro punto destacable en el plano de valoración es el punto 1, en el que se encontró una sonoridad muy elevada respecto a las demás, esto es provocado por la gran cúpula que se localiza en el centro del local, el sonido se concentra dentro de la bóveda y se produce una focalización.

Posterior al cálculo de los parámetros en el lugar, se construyó un modelo del lugar en tres dimensiones, proponiendo materiales similares a los encontrados en el recinto, como se muestra en la Figura 10 y Figura 11.

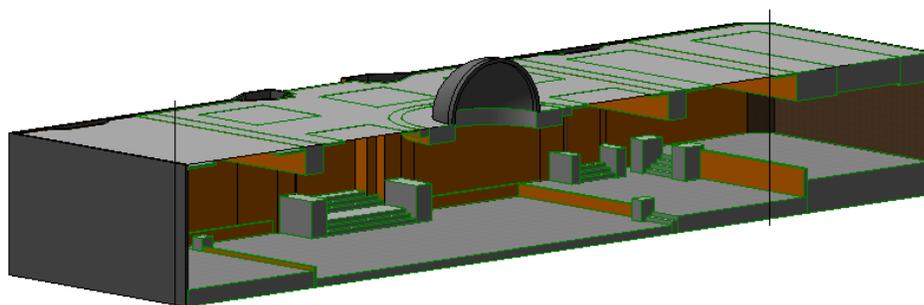


Figura 10. *Modelo digital de Casa Club ITSON.*

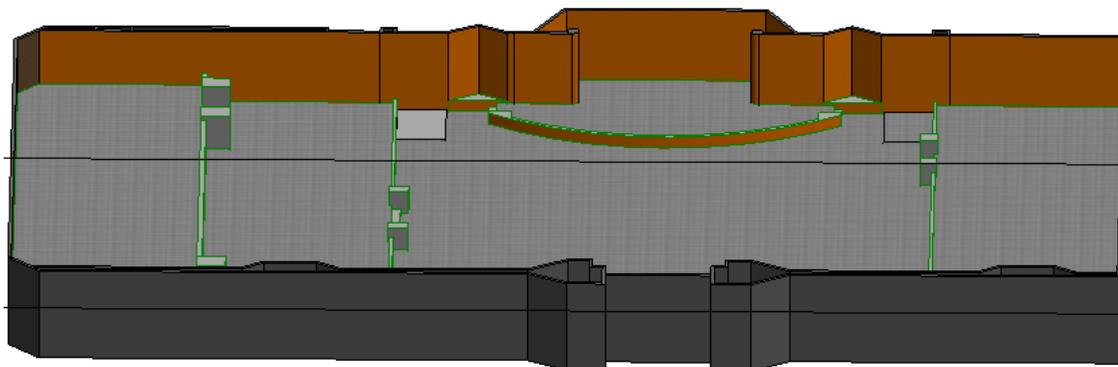


Figura 11. *Modelo digital de Casa Club ITSON.*

Una vez construido el recinto digitalmente, se exportó al software Autodesk Ecotect, el cual es el encargado de realizar el análisis de los parámetros acústicos. El modelo exportado puede observarse en la Figura 12 y Figura 13.

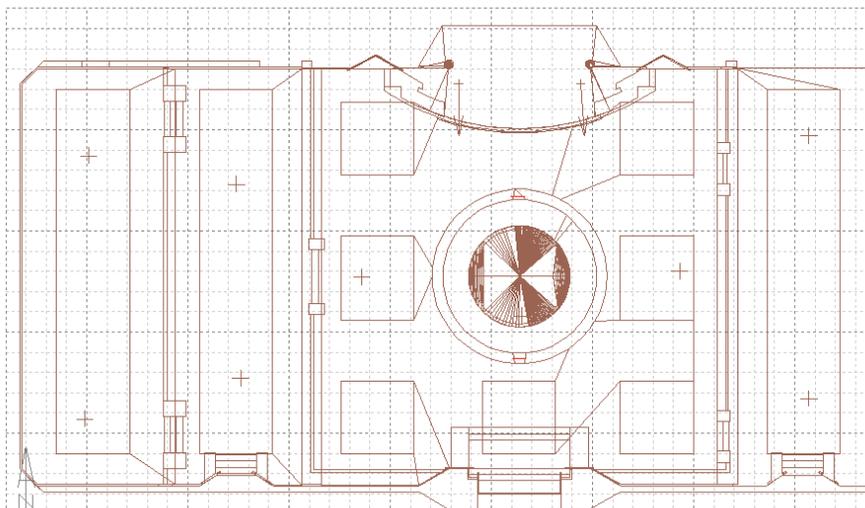


Figura 12. *Vista en planta de Casa Club ITSON.*

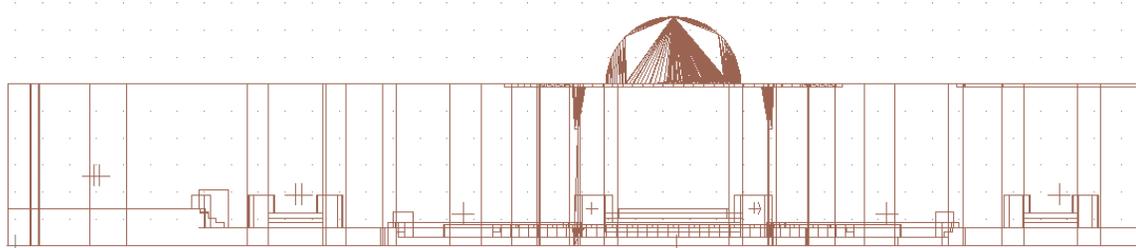


Figura 13. *Vista en corte de Casa Club ITSON.*

Debido al corto tiempo disponible para la investigación, en el modelo digital solamente se calculó el tiempo de reverberación promedio del recinto, dando como resultado los valores mostrados en la Tabla 13 y representados en la Figura 14.

Tabla 13. *Tiempo de reverberación promedio obtenido en la simulación acústica.*

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
RTmid	1.59	2.72	3.06	2.85	2.77	1.83

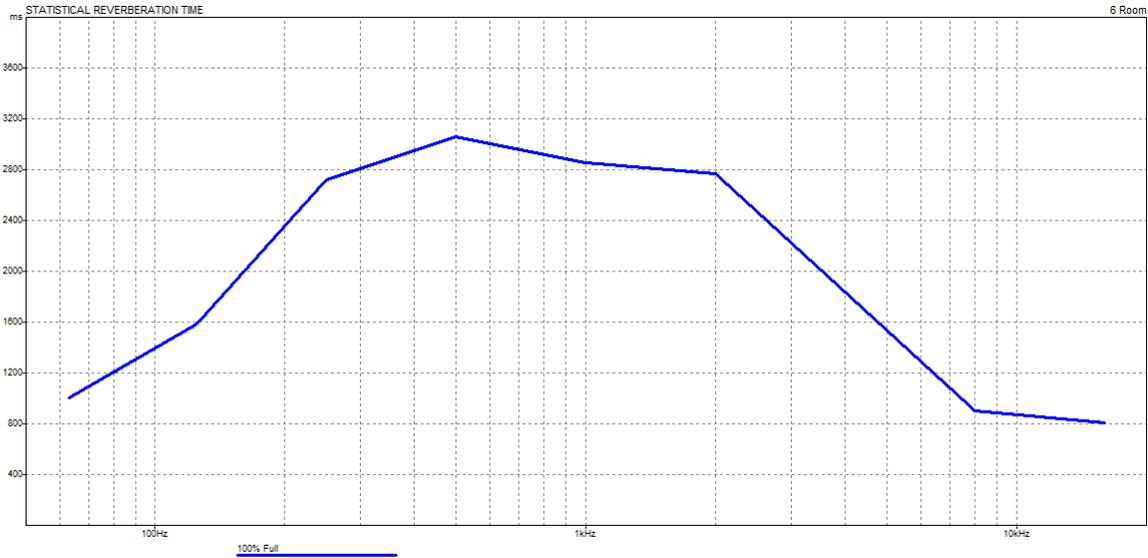


Figura 14. *Tiempo de reverberación promedio obtenido en la simulación acústica.*

Se puede observar que los valores del tiempo de reverberación son muy similares a los parámetros que se obtuvieron en las pruebas en sitio, por lo que los cambios a partir de este punto pueden ser considerados como una solución.

El tiempo de reverberación se puede apreciar que es superior al parámetro recomendado, por lo que se buscó una solución para este problema. La manera más sencilla de aliviar el problema fue proponiendo un cambio en los materiales que se tienen en el recinto, en este caso se modificó el plafón que actualmente cuenta el lugar con un plafón hecho de madera, los valores que arrojó el software con este nuevo material se muestran en la Tabla 14 y la Figura 15.

Tabla 14. *Tiempo de reverberación tras cambio de plafón.*

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
RT _{mid}	1.95	1.90	1.33	1.14	1.13	0.86

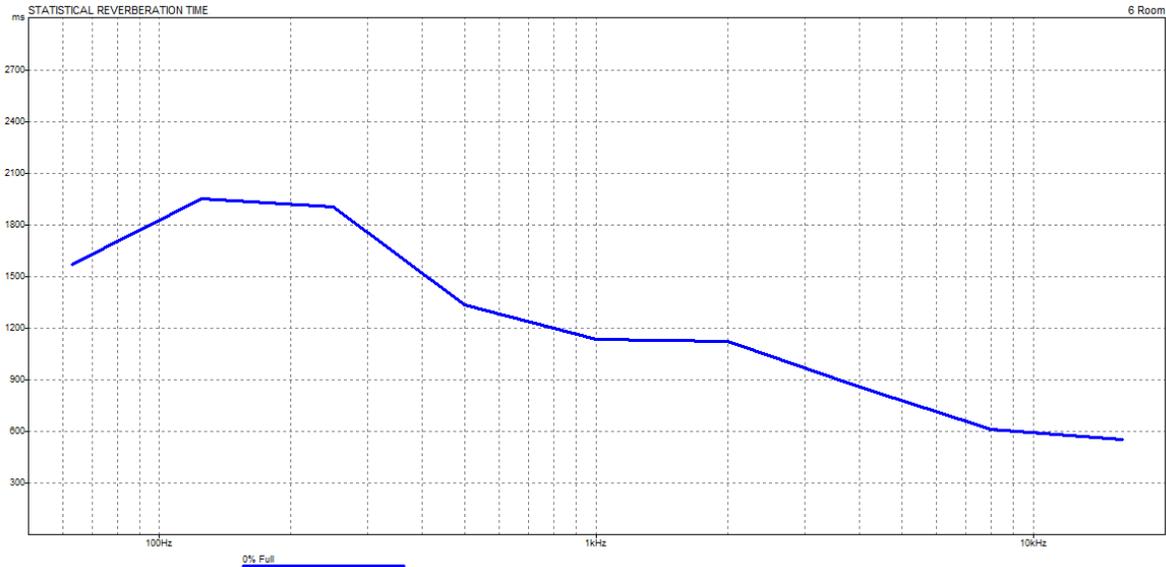


Figura 15. Tiempo de reverberación tras proponer una solución.

Con los nuevos valores obtenidos del tiempo de reverberación de cada frecuencia, es posible calcular el tiempo de reverberación medio de la sala, así como la calidez acústica y brillo.

$$RT_{mid} = \frac{RT(500Hz) + RT(1000Hz)}{2} [s]$$

$$RT_{mid} = \frac{1.33s + 1.14s}{2} = 1.24s$$

$$BR = \frac{RT(125 Hz) + RT(250 Hz)}{RT(500 Hz) + RT(1 kHz)}$$

$$BR = \frac{1.95s + 1.90s}{1.33s + 1.14s} = 2.47$$

$$Br = \frac{RT(2 kHz) + RT(4kHz)}{RT(500 Hz) + RT(1 kHz)}$$

$$Br = \frac{1.13s + 0.86s}{1.33s + 1.14s} = 0.81$$

Según el software, con el cambio de material propuesto en el modelo, el tiempo de reverberación medio es de 1.24s, es decir, cumple con los valores recomendados de tiempo de reverberación. No obstante, esto no cumple para la calidez acústica, por lo que será necesario diseñar trampas de frecuencias bajas para ayudar a reducir la resonancia de estas frecuencias.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En este proyecto se realizó el análisis acústico del local de eventos Casa Club ITSON ubicado en Ciudad Obregón, Sonora, con el objetivo de valorar la calidad acústica que se tiene en el recinto y así poder buscar posibles soluciones a las problemáticas encontradas.

Con el estudio fue posible identificar la falta de control del tiempo de reverberación de las frecuencias medias, así como en la sonoridad que produce el lugar. Sin embargo, éstas son consecuencia de la geometría del lugar y de elementos construidos para embellecer el ambiente, como es la gran cúpula al centro del recinto, lo que, el arreglar la acústica del lugar, puede generar grandes costos.

Con el análisis acústico realizado se plasmaron los sitios dentro del recinto en donde la calidad acústica es más baja, respecto a los parámetros recomendados

por los autores, los puntos con menor valoración identificados en el estudio fueron los ubicados en las esquinas contrarias a la fuente sonora, así como en el lugar donde se encuentra la cúpula, esto se debe a que en estas esquinas se acumulan las ondas de frecuencia, dando lugar a cancelaciones de sonido. Por el contrario, en la cúpula se concentran los sonidos y provocan un aumento considerable de presión sonora.

Este proyecto obtuvo muy buenos resultados ya que logró identificar y cuantificar los problemas acústicos que se tienen en los eventos realizados en el recinto, además, se encontraron las áreas en donde la problemática se agudiza, lo cual facilitará la toma de decisiones en las acciones a realizar para aliviar los inconvenientes acústicos.

5.2 Recomendaciones

Para satisfacer las necesidades acústicas del local, según muestra la simulación acústica, es necesario cambiar el plafón existente en el recinto por uno hecho de madera, esto ayudará a disminuir el tiempo de reverberación del lugar y lo ubicará en los parámetros recomendados, además, será necesario construir trampas de frecuencias graves. Sin embargo, al ser una solución costosa, otra solución válida para este problema es el tomar en cuenta que las frecuencias en las que se presentan los problemas son 250 Hz, 1 kHz y 2 kHz, conociendo esto, se abre la posibilidad para manipular estas ondas mediante un ecualizador y aliviar temporalmente el problema.

La recomendación para el público que visita recintos parecidos a este, es evitar situarse en las esquinas, así como el evadir sentarse debajo de cúpulas o algún otro elemento decorativo que pueda causar focalizaciones.

REFERENCIAS

- Apfel R.E. (1998). *Deaf architects & blind acousticians*. New York: Asoa.
- Arau, H. (1999). *ABC de la Acústica Arquitectónica*. Barcelona: CEAC.
- Barron, M. (2010). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Gran Betraña: Spon Press.
- Bartí, R. (2010). *Acústica medioambiental. Vol. I*. San Vicente (Alicante): Editorial Club Universitario.
- Beranek, L.L. (1996). *Concert halls and opera houses: How they sound?* J. Acoust. Soc. Am. Woodbury, NY.
- Beranek, L.L., (2004). *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*. Nueva York: Springer.
- Bonello, O. (2012). *La aventura del sonido y la música*. Buenos Aires: Librería y Editorial Alsina.
- Carrión, A. (2001). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Cremer, L. (1982). *Principles and Applications of Room Acoustics*. Alemania: Applied Science.
- De la colina, C. (2000). *Acústica de la edificación*. Madrid: Fund. Escuela de la Edificación.
- El país (2011, 31 de marzo). La OMS alerta de las enfermedades ligadas al ruido en las ciudades. *El País*. Recuperado el 12 de marzo de 2014, de <http://www.elpais.com/>.
- Hidaka, T., Beranek, L.L. y Okano, T. (1995, Marzo). Interaural cross-correlation, lateral fraction, and low- and high-frequency sound levels as measures of acoustical quality in concert halls. J. Acoust. Soc. Am. 98(3), 998-1007.

Marshall A.H., Gottlob, D. y Alrutz, H. (1978). *Acoustical conditions preferred for ensemble*. J. Acoust. Soc. Am. 64(5), 1437-1442.

Marshall, L.G. (1994). *An Acoustics Measurement Program for Evaluating Auditoriums Based on the Early/Late Sound Energy Ratio*. J. Acoust. Soc. Am. 96(4): 2251-2261.

Martínez, E. y Díaz, Y. (2004). *Contaminación atmosférica*. España: Universidad de Castilla-La Mancha.

Moreno, F.J. (2011). *Estudio acústico y simulación del acondicionamiento del local de conciertos de la Unión Musical de Higuera de las Torres*. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Onieva R. (2013). *Diseño acústico de una sala multifunción mediante empleo de paneles móviles*. Tesis de maestría publicada. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

Pierce, A.D. (1989). *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. E.U.A.: Acoustical Society of America

Rougeron, C. (1977). *Aislamiento acústico y térmico en la construcción*. Barcelona: Técnicos Asociados, SA.

Sommerhoff, G. (2005). *Curso de Acústica de Locales*. Conferencia presentada en Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.