



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil Acústica

*Profesor Patrocinante:
Dr. George Sommerhoff Hide
Instituto de Acústica
Universidad Austral de Chile*

CARACTERIZACIÓN Y PROPUESTA DE
MEJORAMIENTO DE LA DIFUSIVIDAD ACÚSTICA
EN BANDAS DE FRECUENCIAS BAJAS DE LA
CÁMARA REVERBERANTE IDIEM

*Tesis presentada como parte de los
requisitos para optar al título profesional de
Ingeniero Civil Acústico*

GERSON PATRICIO CARRILLO WINKLER
VALDIVIA-CHILE
2011

El gran sentimiento de Dios hace crecer al hombre...

...lo demás es ruido.

Se agradece a:

Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales, Idiem. Al señor Miguel Bustamante, Claudio Poo y personal por darme la oportunidad de crecer.

Docentes del Instituto de Acústica de la Universidad Austral de Chile por. George Sommerhoff, José Luis Barros, Jorge Arenas, Jorge Cárdenas, Víctor Poblete, Alfio Yori, Enrique Suarez y Víctor Cumián, por compartir su sabiduría y experiencia.

A mis amigos de la vida por dar la alegría del día, Roberto, Carlos y Gonzalo.

A mi novia Maria Paz y su familia, por su constante apoyo.

A mi familia, mis padres Alicia y Hector y hermanos Andrés, Alejandra, Tania y Yasna, por el apoyo y comprensión.

Agradezco a cada quien que ha ayudado y apoyado mi entorno... y a ti Dios.

Comisión de Tesis

Profesor Patrocinante: Dr. George Sommerhoff Hyde.

Institución: Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile.

Profesor Informante: Ing. Claudio Poo Barrera.

Institución: Idiem, Universidad de Chile.

Profesor Informante: Dr. José Luis Barros Rojas.

Institución: Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile.

ÍNDICE

RESUMEN	v
SUMMARY.....	vi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVOS GENERALES.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3. TEORÍA DE LA ACÚSTICA DE SALAS.....	4
3.1. REVERBERACIÓN	4
3.2. LIBRE CAMINO MEDIO	5
3.3. RAZÓN DE DECAIMIENTO.....	5
3.4. DENSIDAD DE ENERGÍA SONORA EN ESTADO TRANSIENTE	6
3.5. TIEMPO DE REVERBERACIÓN	7
3.6. MODOS NORMALES	8
3.7. CAMPO SONORO EN UN ESTADO ESTACIONARIO	11
3.8. CONSTANTE DE DECAIMIENTO.....	12
3.9. FRECUENCIA DE CORTE	14
3.10. FRECUENCIA DE SCHROEDER.....	14
3.11. DENSIDAD DE ENERGÍA ACÚSTICA.....	16
3.12. RADIO REVERBERANTE.....	17
3.13. INTENSIDAD ACÚSTICA.....	20
3.14. CAMPO SONORO DIFUSO	21
4. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN.....	23
4.1. INTRODUCCIÓN.....	23
4.2. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN CÁMARA REVERBERANTE	23
4.3. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE DIFUSIVIDAD ACÚSTICA EN SALAS A TRAVÉS DE LA DIRECTIVIDAD DE UN MICRÓFONO.....	28
4.4. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE LA DIFUSIVIDAD ACÚSTICA EN SALAS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN POR POSICIÓN DE MICRÓFONO	35
5. ANTECEDENTES: CARACTERIZACIÓN DE LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM	38
5.1. HISTORIA Y UTILIDAD.....	38
5.2. DESCRIPCIÓN DE LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM.....	38
5.3. ELEMENTOS DIFUSORES DE LA CÁMARA REVERBERANTE.....	43

5.4.	DATOS ADICIONALES DE LA CÁMARA REVERBERANTE.....	45
6.	MEDICIONES EN LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM	48
6.1.	INTRODUCCIÓN	48
6.2.	TIEMPO DE REVERBERACIÓN	48
6.3.	DETERMINACIÓN DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DE LA CÁMARA REVERBERANTE EN ESTADO ESTACIONARIO	55
6.4.	MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE DIFUSIVIDAD ACÚSTICA.....	66
7.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	73
7.1.	INTRODUCCIÓN	73
7.2.	ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DIMENSIONALES DE LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM.....	73
7.3.	VALORES ACÚSTICOS MEDIDOS	74
7.4.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA DIFUSIÓN ACÚSTICA DE LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM	79
8.	PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DE LA DIFUSIVIDAD ACÚSTICA EN LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM.....	90
8.1.	ASPECTOS NO MODIFICABLES	90
8.2.	MEJORAR LOS ELEMENTOS DIFUSORES FIJOS ACTUALES	90
8.3.	ELEMENTO DIFUSOR ROTATORIO	91
8.4.	INTRODUCCIÓN DE ELEMENTOS DIFUSORES	93
8.5.	ANÁLISIS DE COSTO DE LAS PROPUESTAS	99
9.	CONCLUSIONES	100
10.	BIBLIOGRAFÍA	102
A.	ANEXO	105
A.1.	MEDICIÓN DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM.	105
A.2.	RESPUESTA EN FRECUENCIA DE LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM	108
A.3.	DIFUSIVIDAD ACÚSTICA: DIAGRAMAS POLARES DE LAS MEDICIONES	117
A.4.	DISEÑOS DE ELEMENTOS DIFUSORES.....	121

RESUMEN

El laboratorio acústico Idiem (cámara reverberante) es usado para determinar la absorción sonora de los materiales a través de medidas de tiempo de reverberación.

La caracterización de la cámara reverberante es formulada en base a las medidas de tiempo de reverberación, expuesta en la normativa internacional ISO 354. A través de las mediciones es posible promediar el valor del tiempo de reverberación para cada banda de frecuencia, determinar la desviación estándar de estos valores, y adicionalmente registrar los gráficos de las caídas de nivel; esto entrega una información adecuada del comportamiento acústico del laboratorio. Para complementar, se utiliza una medición para determinar la difusividad acústica del recinto, mediante un método innovador propuesto por Furduev y T'ung, y mediciones para conocer la respuesta en frecuencia de todo el sistema.

El análisis de los métodos y mediciones utilizados, son ligados principalmente a los criterios de difusión sonora en salas, descrito por Randall y Ward.

El trabajo se centra en el comportamiento de las bandas de frecuencia de 100, 125, 160 y 200 Hz. La observación de la difusión sonora que presentan las bandas de 100 y 125 Hz logra una incerteza en el comportamiento acústico del laboratorio de acuerdo a los criterios de Randall y Ward.

Finalmente, la propuesta consiste en entregar diferentes soluciones acústicas centradas en mejorar e introducir elementos difusores que permitan incrementar el nivel de difusión sonora de la cámara reverberante Idiem. Las soluciones expuestas son usualmente utilizadas en cámaras reverberantes a nivel mundial, esto es: introducir elementos difusores colgantes, fijos y rotatorios, también mejorar los ya existentes.

SUMMARY

The acoustical laboratory of Idiem (reverberation chamber) is used to determine the sound absorption of materials through the reverberation time measurement.

The characterization of the reverberation chamber is formulated based on the reverberation time measurement, shown in ISO 354 international standard. Through the measurement is possible to average the reverberation time samples to each frequency band, determine the standard deviation of these samples, and additionally to get the sound level decay curve; this, get a suitable information from the acoustic behavior in the laboratory. To complement, is utilize a measurement to determine the acoustics diffusion index room, by means of an innovative method propounded by Furduev and T'ung, and measurement to know the frequency response in the system.

The analysis from the method and measurement utilized, are joined mainly to the sound diffusion room criterion, described by Randall and Ward.

The work is oriented to the frequency band behavior of 100, 125, 160 and 200 Hz. The observation of sound diffusion that was presented in 100 and 125 Hz band achieve an uncertain acoustic behavior in the laboratory according to Randall and Ward criterion.

Finally, the proposal consist in to give different acoustics solutions based on improved and introduce diffusers elements device that to be enabled, increase the sound diffusion level of reverberation chamber from Idiem. The set out solutions are usually utilized in reverberation chamber in a worldwide deal, this is: introduce hanging, fixer and rotating diffusers element device, also improve the actual device.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo describe el comportamiento acústico y características físicas de la cámara reverberante Idiem estando vacía, efectuado mediante diversos tipos de mediciones. Al mismo tiempo, propone soluciones de adición y modificación de elementos acústicos para mejorar la difusión del campo sonoro del recinto.

La cámara reverberante Idiem es un laboratorio del Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de Universidad de Chile. En el laboratorio se realizan ensayos no destructivos. Su finalidad es determinar la absorción acústica de materiales y objetos que son de uso para actividades del habla humano, musical, laboral, habitacional, medioambiental, entre otros. También se utiliza para determinar la potencia acústica de artefactos.

En Ingeniería Acústica es de gran interés conocer la capacidad de absorción sonora de los materiales. Para determinar esta propiedad, el material se ensaya en una cámara reverberante. La absorción sonora es obtenida a través de mediciones de tiempo de reverberación basado en el criterio de W.C. Sabine. Las mediciones dependen implícitamente de la difusión del campo sonoro. Una mala difusión acústica se refleja en las curvas de decaimiento, esto conlleva a que las caídas de tiempo de reverberación no sean lineales y los resultados sean diferentes [Cox y D'Antonio, 2004]. Si esto ocurre, los resultados obtenidos no muestran la realidad de las propiedades acústicas de los materiales [Kuttruff, 1981]. El comportamiento acústico de la cámara reverberante clarifica las posibles soluciones en una mejoría.

En este trabajo se utilizan varios métodos de medición: normalizados, experimentales y arbitrarios. Las mediciones muestran resultados cuantitativos, que permiten la elaboración de un análisis objetivo de la situación, mientras que aquellas mediciones de carácter cualitativos son analizados mediante observaciones comunes y los resultados son apreciaciones subjetivas del comportamiento de la cámara reverberante. Finalmente, las muestras detallan las características del laboratorio.

Las limitaciones de los métodos utilizados variarán de acuerdo a su uso práctico, dentro de éstos, el de tiempo de reverberación es normalizado, por lo cual su procedimiento

y análisis es claro. La forma de obtener los resultados mediante el método establecido por V. V. Furduev y Ch. T'ung para medir la difusividad acústica de una sala resulta ser innovadora y su uso es inexplorado, por lo cual no existe documentación para su posterior comparación. Otros métodos que se utilizaron surgieron de la espontaneidad debido a la falta de instrumentación. Otra de las limitaciones dispuestas en el trabajo es la propuesta hecha para mejorar la difusividad acústica del recinto. Se opta por una implementación variada y tradicional, ya que otras soluciones resultan ser costosas y sofisticadas.

A través de todas las mediciones, se analizará y verificará la difusividad acústica de la cámara reverberante Idiem para determinar el grado de incerteza de los resultados que entrega las mediciones de tiempo de reverberación.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GENERALES

- Determinar las condiciones físicas de la cámara reverberante Idiem.
- Proponer soluciones para mejorar la difusividad acústica en la cámara reverberante.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar física y acústicamente el estado de la cámara reverberante Idiem en las bandas de frecuencias bajas mediante métodos tradicionales de medición.
- Determinar los parámetros acústicos de la cámara reverberante y de los elementos difusores utilizando métodos experimentales y tradicionales de medición.
- Analizar el comportamiento acústico de la cámara reverberante, elementos difusores y métodos de medición implementados.
- Proponer mejoras físicas en la cámara reverberante Idiem para aumentar su difusividad acústica.

3. TEORÍA DE LA ACÚSTICA DE SALAS

3.1. REVERBERACIÓN

La reverberación es el fenómeno acústico de reflexiones sonoras en una sala, y es uno de los conceptos más importantes para determinar la calidad acústica de ellas.

La respuesta al impulso es la representación gráfica de la presión sonora y las reflexiones en el tiempo de un impulso sonoro en una sala. La Figura 3.1 muestra el registro del sonido directo de un estallido y la seguidilla de reflexiones que decaen de nivel en el tiempo debido a la absorción de las paredes, como se observa en la Figura 3.2 [Cox y D'Antonio, 2004].

La energía de las reflexiones posteriores son aproximadamente continuas y decrecientes para un punto de recepción, y éstas pueden pronosticar la calidad del campo acústico.

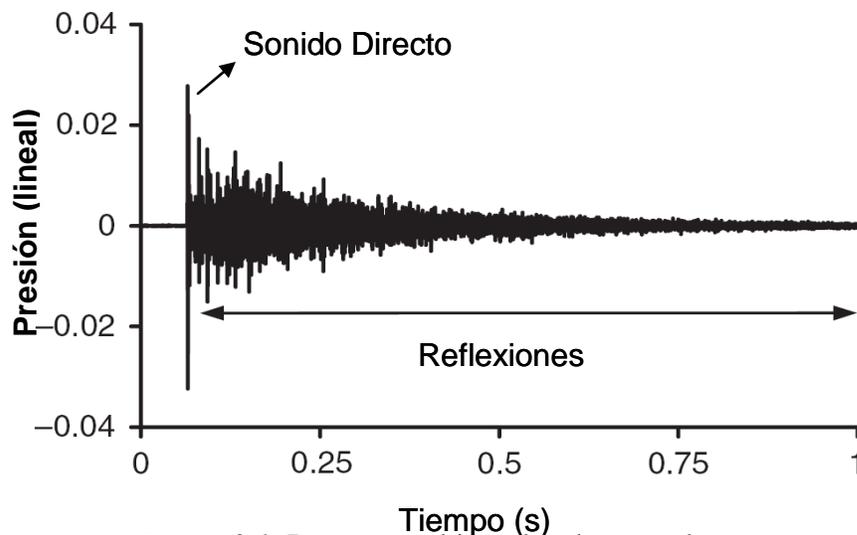


Figura 3.1: Respuesta al impulso de una sala.

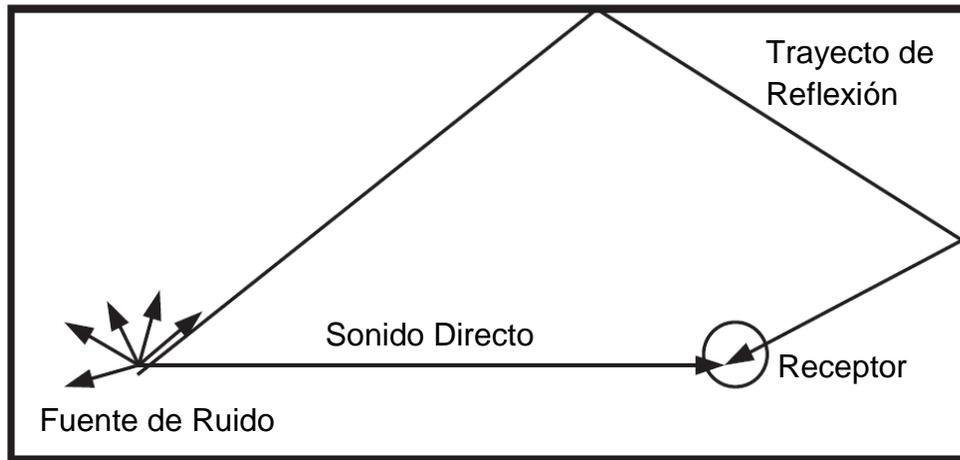


Figura 3.2: Sonido directo y reflejado en una sala.

3.2. LIBRE CAMINO MEDIO

En una sala, la onda sonora viaja desde la fuente de sonido, hasta llegar a una superficie el cual impacta provocando una reflexión. En un instante de tiempo la onda acústica podrá haberse reflejado varias veces en las superficies de la sala.

El libre camino medio se define como la distancia promedio d recorrida de una onda sonora reflejada de una superficie a otra, dentro de una sala [Beranek, 1954], y está dado por la expresión Ec 3.1.

$$d = \frac{4V}{S} \quad (\text{Ec 3.1})$$

Donde V es el volumen y S es la superficie total de la sala.

3.3. RAZÓN DE DECAIMIENTO

La razón de decaimiento es el tiempo que demora el sonido en recorrer el libre camino medio [Beranek, 1954]. Luego, la razón de decaimiento correspondiente a la propagación del sonido a una velocidad c , está dada por Ec 3.2.

$$t' = \frac{d}{c} = \frac{4V}{cS} \quad (\text{Ec 3.2})$$

3.4. DENSIDAD DE ENERGÍA SONORA EN ESTADO TRANSIENTE

La densidad de energía sonora en estado transiente es el flujo de energía acústica en decaimiento presente en una sala; se denota como $D(t)$. La energía sonora de una onda reflejada en una superficie es menor con respecto a la onda incidente, debido a la absorción sonora media $\bar{\alpha}$ de la superficie. A medida que ésta onda sea reflejada, su energía decaerá según el factor $(1 - \bar{\alpha})$, como muestra la Figura 3.3. Los valores de $\bar{\alpha}$ se encuentran entre $0 \leq \bar{\alpha} \leq 1$ [Beranek, 1954].

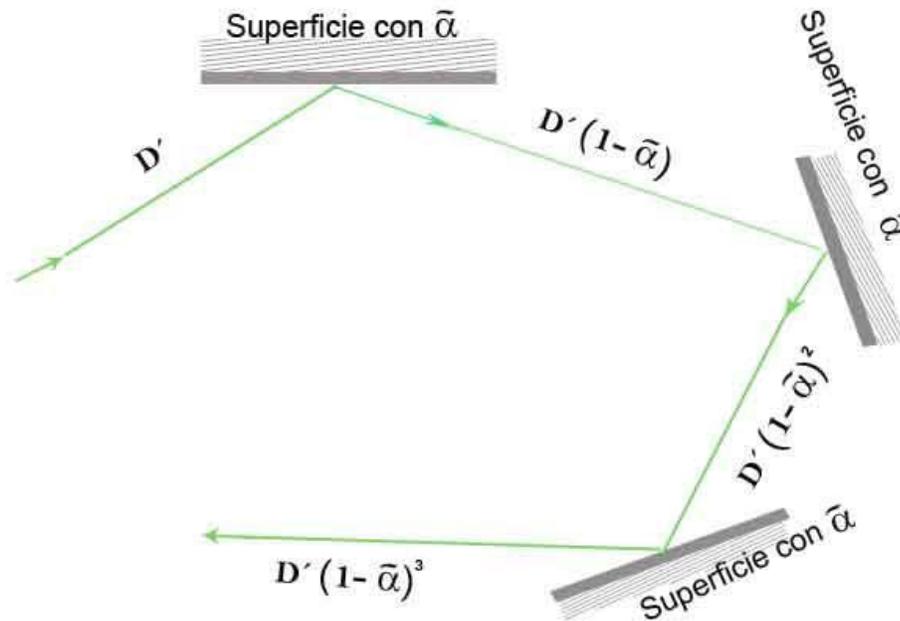


Figura 3.3: Decaimiento de la densidad de energía sonora al ser reflejada en superficies.

La densidad de energía sonora para las primeras n reflexiones de sonido, se muestra en Ec 3.3.

$$D(nt') = D'(1 - \bar{\alpha})^n \quad (\text{Ec 3.3})$$

Entonces la densidad de energía sonora cuando se apaga la fuente sonora en una sala está determinada por la ecuación Ec 3.4.

$$D(t) = D' e^{-nt[-\ln(1-\bar{\alpha})]} \quad (\text{Ec 3.4})$$

Donde n es el cociente entre el tiempo y la razón de decaimiento, que se muestra en Ec 3.5.

$$n = \frac{t}{t'} \quad (\text{Ec 3.5})$$

Para valores de α entre $0 \leq \alpha \leq 1$ la expresión Ec 3.4 se aproxima. La densidad de energía sonora en estado transiente se muestra en Ec 3.6.

$$D(t) = D' e^{-\left(\frac{cS}{4V}\right)\alpha t} \quad (\text{Ec 3.6})$$

3.5. TIEMPO DE REVERBERACIÓN

El tiempo de reverberación T_{60} es una medida acústica que determina el tiempo que tarda el decaimiento de niveles de presión sonora en 60 decibeles (dB) después de apagar la fuente que lo emite en la sala. Como lo muestra la curva de presión sonora en la Figura 3.4. Esta curva puede tener diferentes pendientes para las distintas bandas de frecuencia en una misma sala. Para salas con una distribución espacial homogénea de energía sonora, la curva es menos irregular y más definida.

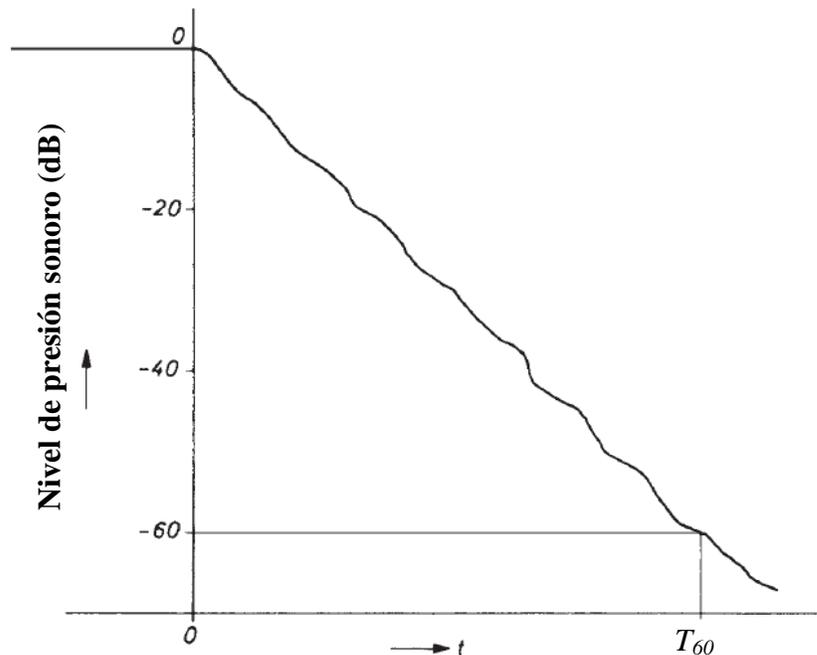


Figura 3.4: Decaimiento de nivel sonoro que determina el tiempo de reverberación en T_{60} .

Los 60 decibeles de decaimiento equivalen a una millonésima parte de la densidad de energía inicial. De la Ec 3.6, se puede obtener la igualdad que muestra la Ec 3.7.

$$D(0) = 10^6 D(t) \quad (\text{Ec 3.7})$$

Esto produce lo siguiente (ver Ec 3.8).

$$D'e^0 = 10^6 D'e^{-\left(\frac{cA}{4V}\right)t} \quad (\text{Ec 3.8})$$

Con A el área de absorción sonora en sabines, dado por $A = S \cdot \bar{\alpha}$. Al despejar t se obtiene el tiempo de reverberación dado por la expresión Ec 3.9, y propuesta por W. C. Sabine que hasta hoy es útil:

$$T_{60} = \frac{55.3V}{cA} \quad (\text{Ec 3.9})$$

Donde V es el volumen de la sala y c la velocidad de propagación del sonido. Si la sala posee diversos tipos de superficies, entonces A está dada por lo siguiente.

$$A = \sum_{i=1}^N S_i \alpha_i = S \bar{\alpha} \quad (\text{Ec 3.10})$$

Donde S_i es la superficie de cada cara de la sala (o elemento superficial en la sala), y α_i es el coeficiente de absorción acústica de cada cara de la sala (o elemento superficial en la sala).

3.6. MODOS NORMALES

Otro concepto que determina la calidad acústica de una sala es su respuesta en frecuencia o comportamiento de la presión sonora. Los modos normales son ondas estacionarias que presenta la sala donde el nivel de presión sonora aumenta considerablemente, como muestra la Figura 3.5. Esto es válido para una posición del micrófono y fuente en particular.

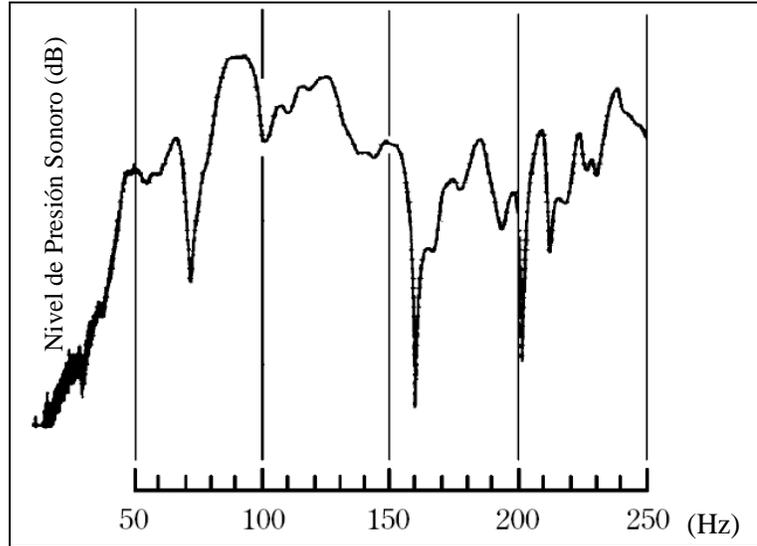


Figura 3.5: Respuesta en frecuencia de una sala con varios modos normales.

Los modos normales se originan de la acumulación de sonido (presión sonora) producido por la suma de dos o más ondas sonoras en una misma fase dentro del recinto (ondas de ida y de vuelta en la misma trayectoria). Para el caso contrario, un valle en la gráfica significa la anulación de las ondas sonoras (ondas desfasadas). Los modos normales dependerán de la forma que tiene el recinto, la incidencia de la onda acústica en la superficie y la posición del emisor y receptor del sonido [Beranek, 1954]. La frecuencia sonora en que sucede este fenómeno se le llama frecuencia modal.

La manera analítica de obtener los modos normales de un sistema, se realiza resolviendo la ecuación de ondas Ec 3.11 con las condiciones de borde de la sala.

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (\text{Ec 3.11})$$

La distribución de los modos normales en salas con dimensiones rectangulares l_x , l_y y l_z , se determina con la expresión Ec 3.12, para modos normales (n_x, n_y, n_z) , que son números enteros entre cero al infinito de elección al azar. La Figura 3.6 muestra un caso de distribución de los modos normales en una sala rectangular.

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (\text{Ec 3.12})$$

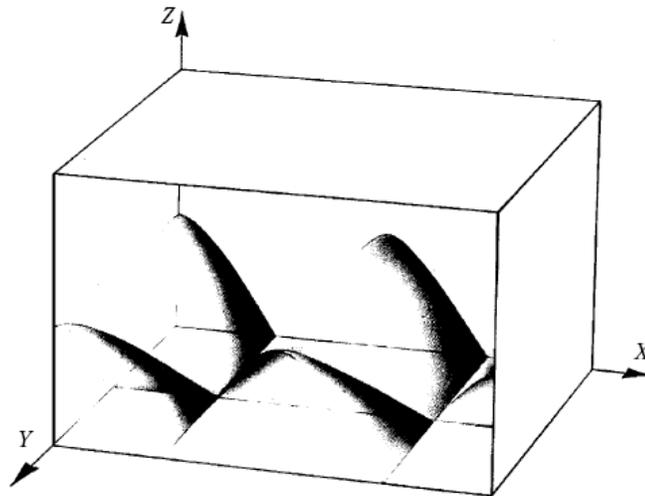


Figura 3.6: Sala con dimensiones rectangulares con modo normal (2, 1, 0).

Según la incidencia de la onda acústica en la superficie y las dimensiones del recinto de forma rectangular, los modos normales se clasifican en tres grupos [Sommerhoff, 2006]:

- a) Modos axiales: la trayectoria de la onda acústica es paralela a un eje coordenado, los modos normales son $(n_x, 0, 0)$, $(0, n_y, 0)$ y $(0, 0, n_z)$.
- b) Modos tangenciales: la trayectoria de las ondas acústicas son tangenciales a un par de superficies, los modos normales son $(n_x, n_y, 0)$, $(n_x, 0, n_z)$ y $(0, n_y, n_z)$.
- c) Modos oblicuos: la trayectoria de las ondas acústicas son de forma oblicua a los tres pares de superficies, los modos normales son de la forma (n_x, n_y, n_z) .

La cantidad Q de modos normales en recintos irregulares se estima con la expresión Ec 3.13 entre la frecuencia 0 a f [Sommerhoff, 2006].

$$Q = \frac{4\pi V f^3}{3c^3} \quad (\text{Ec 3.13})$$

La cantidad de modos normales por Hertz se obtiene con Ec 3.14, llamada densidad de modos normales D_Q .

$$D_Q = \frac{4\pi V f^2}{c^3} \quad (\text{Ec 3.14})$$

3.7. CAMPO SONORO EN UN ESTADO ESTACIONARIO

El campo sonoro en estado estacionario es la distribución espacial del sonido estabilizado en una sala. Este no será siempre homogéneo debido a la existencia de modos normales. El campo sonoro en estado estacionario se expresa como la función de transferencia de la presión sonora p_ω descrita por la serie Ec 3.15, para la frecuencia angular ω en estado estacionario [Kuttruff, 2000].

$$p_\omega = \sum_n \frac{A_n}{\omega^2 - \omega_n^2 - 2j\delta\omega_n} \quad (\text{Ec 3.15})$$

Donde A_n es la función representada por la posición de la fuente, recepción del sonido y la frecuencia angular [Kuttruff, 2000]. Se define también, la frecuencia angular normal ω_n (modo normal) y la constante de decaimiento δ (se detallará en la siguiente sección). La serie muestra la magnitud $|p_\omega|$ del sonido para el modo normal ω_n .

Los niveles de presión sonora (respuesta en frecuencia) de Ec 3.15 muestra una parte real y otra imaginaria. Si se considera que $\delta \ll \omega_n$, la función de transferencia tiene valores máximos cuando $\omega = \omega_n$, entonces en las frecuencias altas se encuentran la mayoría de los modos normales. La función de transferencia es una suma de vectores mostrada en la Figura 3.7 (diagrama polar en un plano complejo).

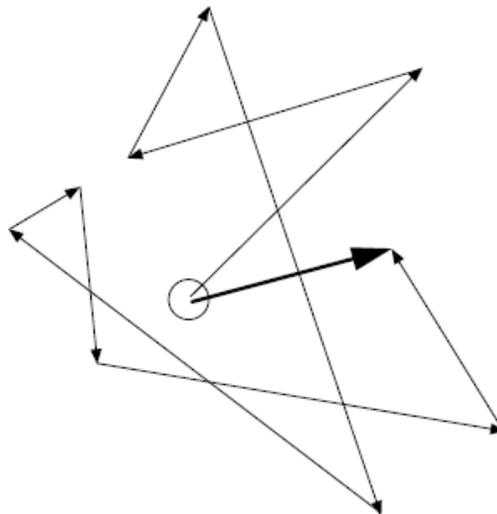


Figura 3.7: Diagrama polar de la sumatoria de vectores expuesta por Ec 3.15 para un estado estacionario.

3.8. CONSTANTE DE DECAIMIENTO

La respuesta al impulso mostrada en la sección 3.1 es uno de los parámetros acústicos propios del recinto, y significa el comportamiento sonoro del decaimiento del sonido en la sala (ver Figura 3.1).

Para la emisión de una frecuencia normal en una sala en particular, su estado transiente (decaimiento) del nivel sonoro tendría una curvatura lineal como muestra la Figura 3.8. El registro de la caída de dos modos normales se muestra en la Figura 3.9. Luego para una banda de frecuencia con modos normales, el decaimiento sería de forma fluctuante como muestra la Figura 3.10 [Beranek, 1954].

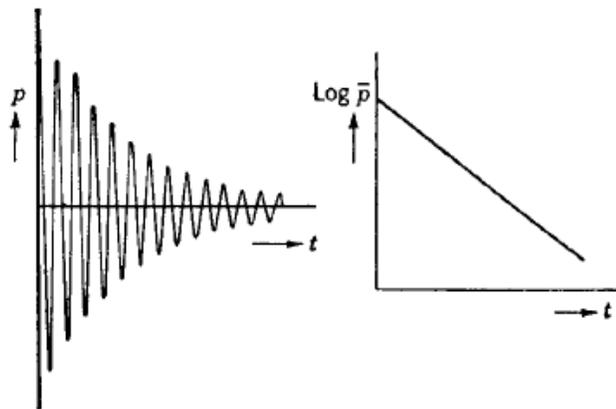


Figura 3.8: Caída de nivel de un modo normal.

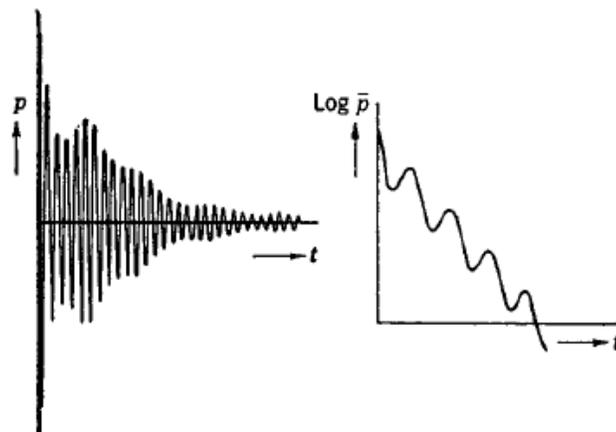


Figura 3.9: Caída de nivel de dos modos normales contiguos.

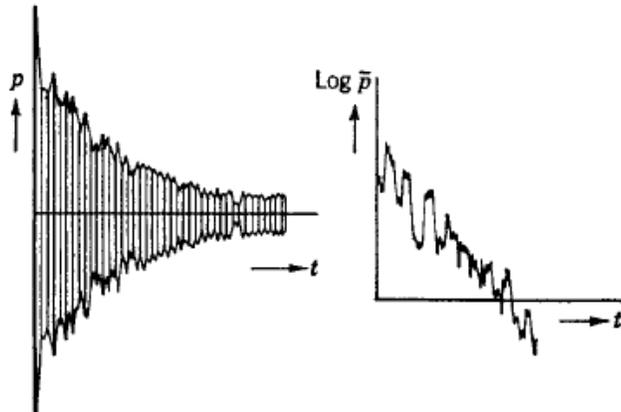


Figura 3.10: Caída de nivel de una banda de frecuencias con modos normales.

El decaimiento de un modo normal se expresa como un decaimiento exponencial de la densidad de energía sonora, como se observa en Ec 3.16 [Kuttruff, 2000].

$$D(t) = D' e^{-2\delta t} \quad (\text{Ec 3.16})$$

La constante de decaimiento δ es la rapidez en que un modo normal decae en el tiempo, determinado como el ancho de banda de un modo normal, como se observa en la Figura 3.11. Está dada implícitamente en términos del volumen de la sala y de la absorción sonora [Beranek, 1954] y se expresa en la ecuación Ec 3.17.

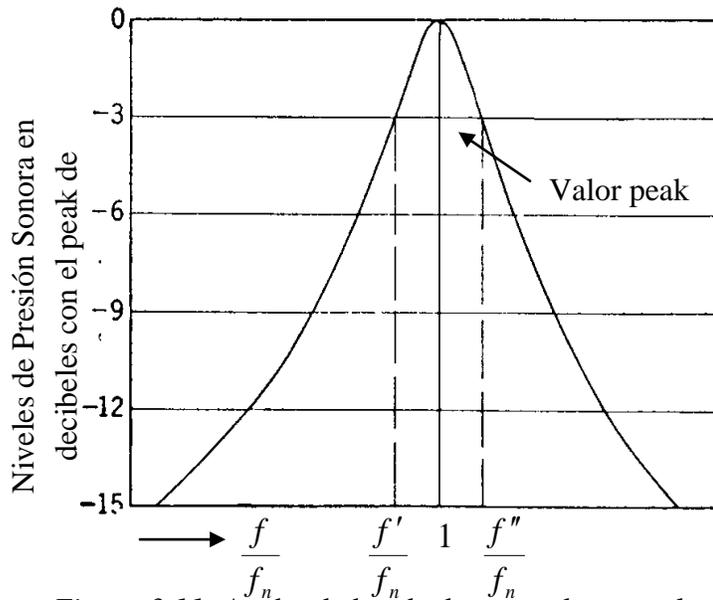


Figura 3.11: Ancho de banda de un modo normal.

$$\frac{\delta}{\pi} = f'' - f' \quad (\text{Ec 3.17})$$

Al igualar la ecuación de decaimiento Ec 3.6 con su similar, expresada con δ en Ec 3.16, se obtiene una expresión en función del área de absorción y el volumen. Los términos son reemplazados por aquellos mismos de la ecuación Ec 3.9 correspondiente al tiempo de reverberación. Con esto, se obtiene la constante de decaimiento en función del tiempo de reverberación, esto se muestra en Ec 3.18.

$$\langle \delta \rangle = \frac{6.91}{T} \quad (\text{Ec 3.18})$$

3.9. FRECUENCIA DE CORTE

Se define como frecuencia de corte f_c al primer valor de frecuencia modal que se genera en una determinada sala e indica el inicio de la utilidad acústica de la sala [Sommerhoff, 2006].

El primer modo normal de una sala rectangular, es efectuado con el recorrido de una onda acústica con dirección normal a dos superficies, es decir un modo axial. La frecuencia de corte es determinada con la expresión Ec 3.12 considerando la longitud máxima L_{\max} del recinto y con $n = 1$ y el resto de los valores nulos. También es llamada frecuencia fundamental del sistema (sala). Esta se muestra en Ec 3.19.

$$f_c = \frac{c}{2L_{\max}} \quad (\text{Ec 3.19})$$

Para salas de forma irregular es difícil encontrar L_{\max} , más aún si se trata de una cámara reverberante con muros no paralelos o sin caras planas, de todas maneras muestra las dimensiones que necesita una sala para los usos que se requiera.

3.10. FRECUENCIA DE SCHROEDER

La densidad de modos normales aumenta al cuadrado de la frecuencia, como se observa en Ec 3.14. Esto significa que, a frecuencias bajas se puede encontrar una escasa cantidad de modos normales como muestra la Figura 3.12 a); donde los modos normales que presenta el recinto se encuentran bien definidos y separados. Mientras que a frecuencias altas existirán varios modos normales traslapados, como muestra la Figura 3.12

b) [Kuttruff, 2007]. El límite transitorio de la respuesta en frecuencia de esta situación (modos normales separados a juntos), se determina mediante la frecuencia de Schroeder.

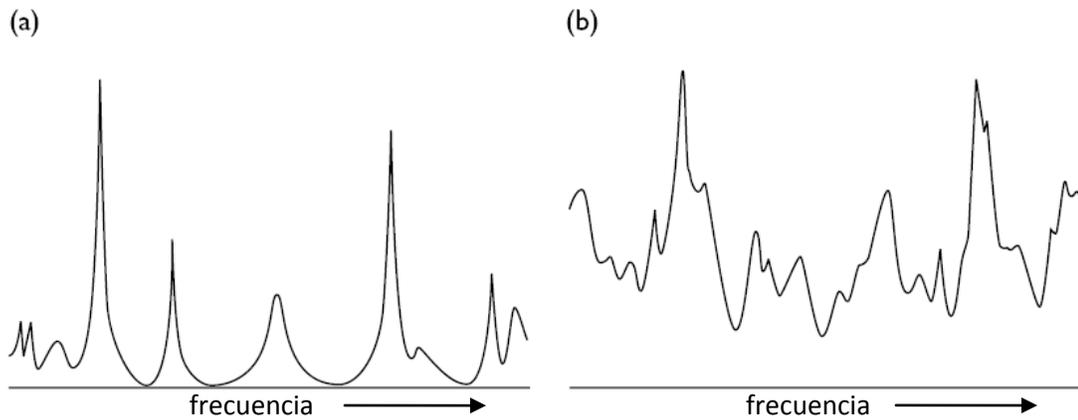


Figura 3.12: Respuesta en frecuencia de una sala; (a) modos normales a frecuencias bajas, (b) modos normales a frecuencias altas.

Como se observa en la Figura 3.13, la frecuencia de Schroeder está definida como aquella que marca la transición entre modos normales bien separados y los modos normales traslapados [Schroeder, 1996].

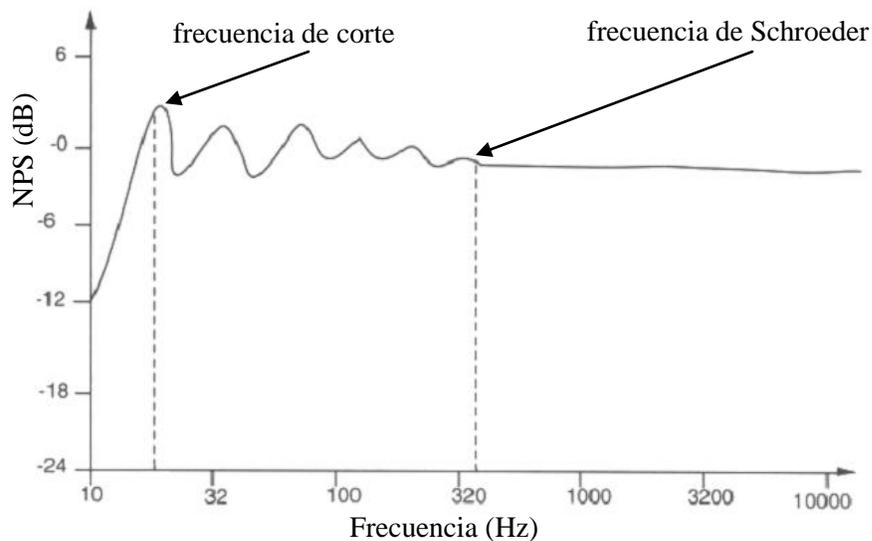


Figura 3.13: Frecuencia de corte y de Schroeder en una respuesta en frecuencia de una sala.

La frecuencia de Schroeder está dada si al menos tres modos normales caen dentro del intervalo $\langle 2\Delta f \rangle$, esto quiere decir, $D_Q \geq 3/\langle 2\Delta f \rangle$, como se muestra en Ec 3.20.

$$\frac{4\pi V f^2}{c^3} \geq \frac{3}{\langle 2\Delta f \rangle} \quad (\text{Ec 3.20})$$

Donde Δf está definida anteriormente en Ec 3.17. Por lo tanto, la frecuencia Schroeder de la sala se expresa en Ec 3.21.

$$f_{sc} \geq \sqrt{\frac{3c^3}{4V\langle\delta\rangle}} \quad (\text{Ec 3.21})$$

Anteriormente δ se expresó en términos del tiempo de reverberación en Ec 3.18. Por lo tanto, el resultado aproximado y que usualmente se aplica es: (ver Ec 3.22)

$$f_{sc} = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (\text{Ec 3.22})$$

3.11. DENSIDAD DE ENERGÍA ACÚSTICA

Una onda de sonido contiene dos tipos de energía; energía cinética y potencial. La densidad de energía acústica contempla la interacción de ambas energías dentro de un volumen (caja). Entonces, la densidad de energía acústica es la suma de la energía cinética más la energía potencial en una unidad de volumen en el espacio, que genera una onda de sonido en movimiento, como muestra la Figura 3.14.

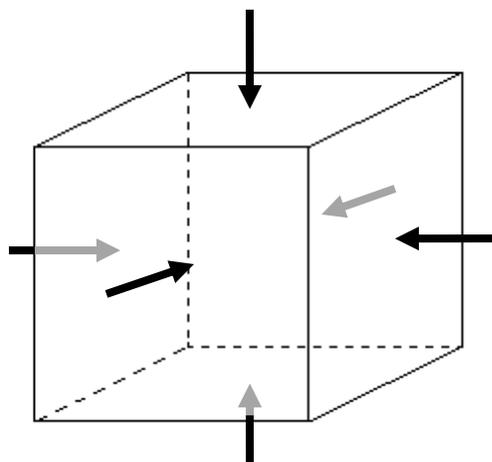


Figura 3.14: Concentración de la o las ondas sonoras en un espacio; densidad de energía acústica.

La energía cinética es la energía de la masa por unidad de volumen de las partículas moviéndose a una velocidad u , como se muestra en Ec 3.23.

$$D_{KE} = \frac{1}{2} \rho_0 u^2 \quad (\text{Ec 3.23})$$

La energía potencial es la energía almacenada del medio en una unidad de volumen producto de la compresión y rarefacción de la onda, esto se muestra en Ec 3.24.

$$D_{PE} = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho_0 c^2} \quad (\text{Ec 3.24})$$

Para la energía cinética, la velocidad de partículas de las ondas esféricas es (ver Ec 3.25) [Kuttruff, 2000]:

$$u_r = \frac{p}{\rho_0 c} \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) \quad (\text{Ec 3.25})$$

Si se considera una sala grande se asume que $kr \gg 1$, es decir, es una onda plana (se considera la parte real de la ecuación), por lo tanto, la expresión Ec 3.23 se asimila a Ec 3.24 y se obtiene la ecuación de densidad de energía acústica en su forma general mediante la suma de ambas, y está dada por la ecuación Ec 3.26 [Beranek, 1954].

$$D_{avg} = \frac{|p_+|^2}{\rho_0 c^2} \quad (\text{Ec 3.26})$$

3.12. RADIO REVERBERANTE

El comportamiento del campo sonoro en una sala depende de la posición de la fuente, recepción y la frecuencia sonora de emisión. El campo sonoro considera dos regiones: campo cercano y campo lejano.

Campo cercano: la intensidad sonora no se relaciona con el cuadrado de presión sonora eficaz [Sommerhoff, 2006].

Campo lejano: la densidad de energía es más precisa en cuanto a su lectura (estabilizada).

A su vez, el campo lejano se subdivide en dos zonas; la primera zona es el campo directo, donde se percibe el sonido que acaba de ser emitido por la fuente [Miyara, 2006] y la densidad de energía sonora decae mientras el punto de medición se aleja de ésta (sonido directo es mayor que el sonido reflejado), como muestra la Figura 3.15. La expresión Ec 3.27 muestra el comportamiento de la densidad de energía para esta zona.

$$D_d = \frac{QP}{4\pi r^2 c} \quad (\text{Ec 3.27})$$

Donde Q es el factor de directividad de la fuente con potencia acústica P , r es la distancia entre ésta y el punto de registro.

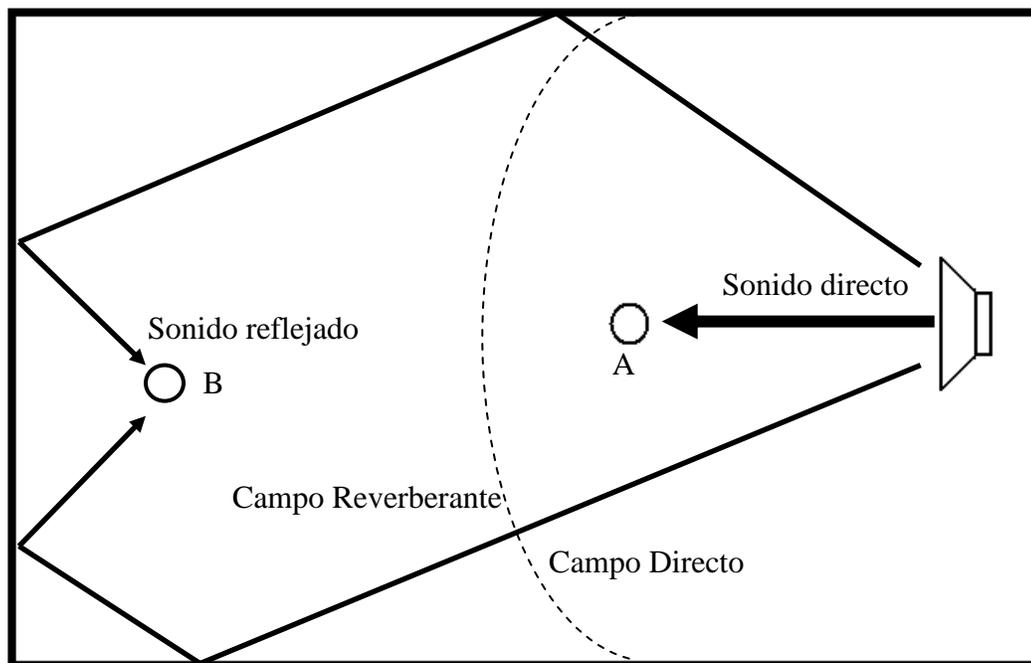


Figura 3.15: Dos regiones del campo lejano; campo directo y campo reverberante.

La segunda zona del campo lejano, es el campo reverberante, que es la zona donde la densidad de energía sonora se estabiliza y recorre toda la sala producto de las múltiples reflexiones al interior de ella (ver Figura 3.15), por lo tanto no influye la distancia hacia la fuente, si no la absorción sonora de la sala, como expresa Ec 3.28 para campo reverberante. El campo reverberante también se llama campo reactivo.

Si la densidad de energía sonora es uniforme, se considera como campo difuso.

$$D_r = \frac{4P}{cA} \quad (\text{Ec 3.28})$$

El radio reverberante o distancia de campo difuso [Schroeder, 1996] es definido como la distancia r desde una fuente omnidireccional hasta un punto de registro de una sala reverberante, donde se iguala la densidad de energía directa con la densidad de energía reverberante. Es decir, es la transición del comportamiento de la densidad de energía sonora.

La igualdad entre las ecuaciones Ec 3.27 y Ec 3.28 induce al despeje de la variable r y se obtiene el radio reverberante denotado por r_c , como muestra Ec 3.29.

$$r_c = \sqrt{\frac{A}{16\pi}} \quad (\text{Ec 3.29})$$

El gráfico de la Figura 3.16 muestra la distancia crítica r_c dado por la intersección de las dos densidades de energía acústica.

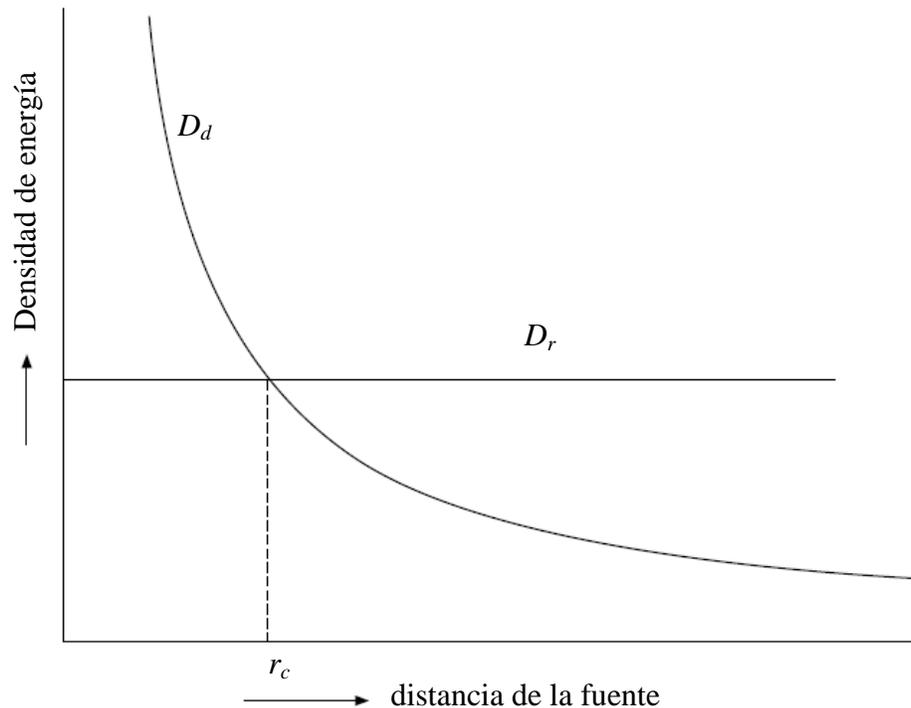


Figura 3.16: Comportamiento del sonido en una sala en razón a la distancia de la fuente.

3.13. INTENSIDAD ACÚSTICA

La intensidad o flujo de energía acústica es aquella que viaja a través del espacio y atraviesa una unidad de área en un determinado tiempo, es decir, es la energía dirigida a un punto dado en el espacio como muestra la Figura 3.17. Con lo anterior, la intensidad acústica se expresa como una medida vectorial de energía.

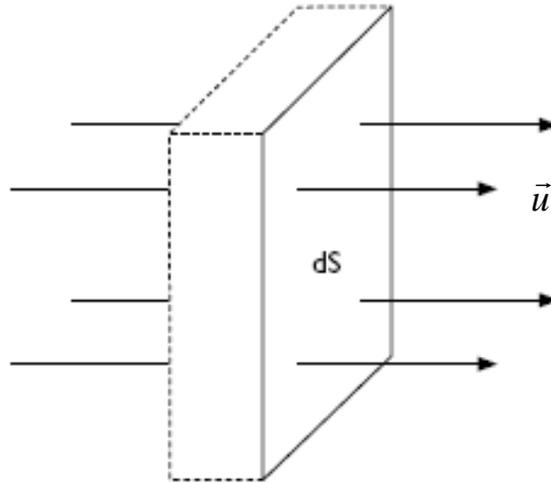


Figura 3.17: Flujo de energía sonora con dirección \vec{u} pasando por una superficie dS .

La intensidad acústica I es el producto entre la variación de presión sonora p (forzada por unidad de área) y la velocidad de partículas u (desplazamiento por unidad de tiempo). Esto se muestra en Ec 3.30 [Bruneau y Scelo, 2006].

$$I = p \cdot u \quad (\text{Ec 3.30})$$

Considerando una onda plana ($kr \gg 1$), la velocidad de partículas u en Ec 3.25, permite que la expresión Ec 3.30 sea similar a la expresión Ec 3.26 de densidad de energía acústica. La relación entre esta última y la intensidad acústica se muestra en Ec 3.31.

$$I = cD \quad (\text{Ec 3.31})$$

La onda de presión acústica p y la velocidad de partículas $u = \frac{j}{\omega c} \frac{dp}{dt}$, tienen desfases, y el producto mostrado en Ec 3.30, resulta ser (ver Ec 3.32):

$$I = \frac{1}{2} |p||u| (\cos(2\omega t + \varphi_p + \varphi_u) + \cos(\varphi_p - \varphi_u)) \quad (\text{Ec 3.32})$$

Donde φ_p y φ_u son los desfases de la presión sonora y la velocidad de partículas respectivamente. La expresión $\cos(2\omega t + \varphi_p + \varphi_u)$ representa la fluctuación de la potencia sonora que varía en el tiempo, mientras que la expresión $\cos(\varphi_p - \varphi_u)$ es la potencia acústica media transmitida.

Se considera la intensidad acústica como el promedio instantáneo (o promedio en un pequeño intervalo de tiempo) de la señal sonora haciendo que la fluctuación de potencia acústica sea nula. Luego la intensidad acústica se denota en Ec 3.33 [Beranek, 1954], con \bar{p} el conjugado de la presión sonora.

$$I = \text{Re}\{\bar{p} \cdot u\} \cos(\varphi_p - \varphi_u) \quad (\text{Ec 3.33})$$

Al igual que la sección 3.12, la intensidad acústica en una sala dependerá de la posición de la fuente de emisión acústica, recepción y frecuencia sonora emitida.

Para ondas planas estacionarias, que es el caso de la onda sonora en un lugar cerrado o campo reactivo, la intensidad acústica es $I = 0$ debido a que la presión acústica y la velocidad de partículas están desfasadas en 90° y la parte real del producto de Ec 3.33 se anula [Beranek, 1954]. Esto significa la presencia de un campo sonoro difuso. A diferencia de un campo activo (fuente de ruido cercana), la intensidad acústica es mayor, dado que el flujo de energía proviene mayoritariamente de la fuente.

3.14. CAMPO SONORO DIFUSO

Un campo sonoro difuso es la suma infinita de todas las ondas que vienen de direcciones uniformemente distribuidas del campo acústico (energía acústica). En la sección anterior se describe que la intensidad acústica en un campo sonoro difuso o campo reactivo es nula, porque el flujo de energía contiene dos señales opuestas entre sí.

El campo sonoro difuso puede distribuirse en varios puntos de la sala dentro del campo reverberante. Esta característica es llamada como estado difuso o difusión acústica de la sala.

Algunas características de una sala con difusión acústica son [Schultz, 1971]:

- La difusión es garantizada por la uniformidad de presión sonora en todos los puntos del espacio de una sala. Esto quiere decir, que la densidad de energía acústica, debe ser uniforme para todos los puntos de la sala.

- Se encuentra una igual probabilidad de energía que fluye en todas direcciones y en cualquier ángulo de incidencia de ésta sobre los contornos de la sala.
- Comprende una superposición de un número infinito de ondas planas progresivas, tales que, en todas direcciones de propagación son igualmente probables y la relación de fase de las ondas son aleatorias en cualquier punto del espacio.

El campo sonoro difuso es obtenido por los factores que favorecen el alto número de modos normales en una sala como: tamaño, proporciones y geometría de la sala, naturaleza de los muros, localización de la fuente, frecuencia acústica utilizada, y los elementos difusores estáticos o móviles. Todas estas condiciones pueden poseer las cámaras reverberantes [Bruneau y Scelo, 2006], donde el campo acústico debe ser casi completamente reactivo [Dood y Doak, 1971].

En la respuesta en frecuencia de una sala, la frecuencia de Schroeder delimita la región modal y la región del campo sonoro difuso, como muestra la Figura 3.18. El comportamiento de la onda sonora en éste último se puede determinar por medio de la teoría de la acústica estadística.

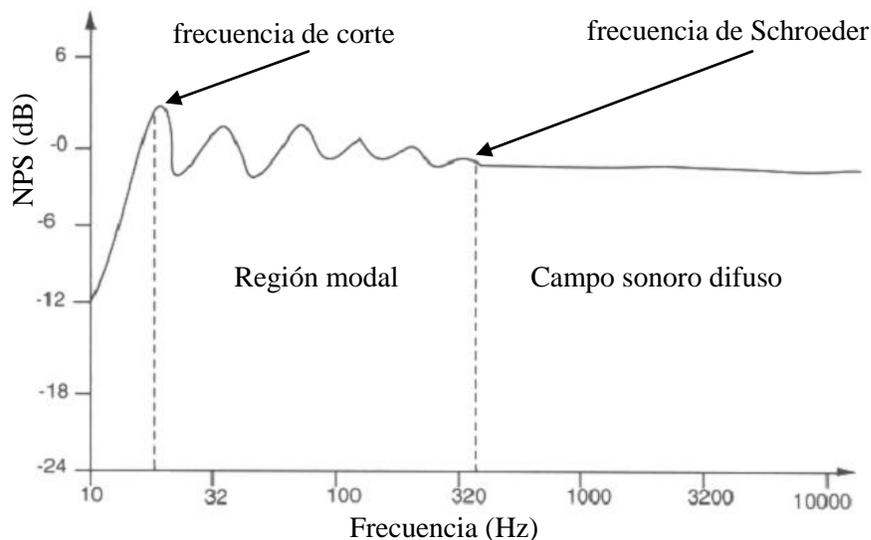


Figura 3.18: Respuesta en frecuencia de una sala, se considera región del campo sonoro difuso cuando existan varios modos normales traslapados.

Como se observó en la sección 3.10, la región de campo sonoro difuso es formada por varios modos normales traslapados (considerándose campo reverberante), mostrando gráficamente una respuesta en frecuencia plana.

4. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN

Para la acústica de salas, es primordial conocer las cualidades acústicas del recinto, para esto hay formas de conseguirlo. Dentro de estos se encuentra, el tiempo de reverberación, y la difusión sonora.

La medida de tiempo de reverberación se basa en la investigación de W. C. Sabine en 1898 y que actualmente sigue utilizándose, pero ha evolucionado en el tiempo. La normativa internacional ISO 354-2003 establece la forma de conseguir el tiempo de reverberación y determinar la absorción sonora de materiales en cámaras reverberantes.

Otra de las características que se puede cuantificar es la difusión acústica de la sala, ésta se mide a través de varios métodos no estandarizados pero basados en los principios de la acústica de salas, en especial el método propuesto por Furduev y T'ung que emplea la directividad de un micrófono para conseguirla. Mientras que una segunda forma es la utilización estadística de las caídas de tiempo de reverberación.

4.2. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN CÁMARA REVERBERANTE

Una cámara reverberante es un laboratorio acústico con superficies altamente reflectantes al sonido. La normativa internacional ISO 354-2003 establece el método para la medición y evaluación del tiempo de reverberación en el laboratorio y determina la absorción sonora de materiales.

Se pueden efectuar dos tipos de mediciones de tiempo de reverberación en la cámara reverberante; mediante un impulso sonoro y a través de la interrupción de un ruido estacionario. Dependerá principalmente de la instrumentación en su elección [ISO 354, 2003], siendo el más común la interrupción de ruido estacionario ya que no requiere un equipo sofisticado.

Se realizan dos mediciones de tiempo de reverberación; la primera es para conocer las condiciones referenciales de la cámara reverberante, es decir, se realiza una medición con la sala vacía para determinar la absorción sonora de las superficies de la sala, y la segunda es con el material u objeto en el laboratorio (el cual interesa saber su coeficiente de absorción sonora).

4.2.1. Equipamiento recomendado

El equipamiento que se utiliza es el siguiente:

- Fuente de ruido (cajas acústicas)
- Micrófono omnidireccional
- Pedestal de micrófono
- Amplificador
- Ecuador
- Generador de señales de ruido (ruido rosa)
- Sonómetro integrador con función de medida de tiempo de reverberación

4.2.2. Consideraciones para la medición

Como consideraciones previas en la medición, el operador no debe estar dentro de la cámara reverberante, como también, cualquier otra cosa que no sea el material que se quiera medir. Los resultados se verán afectados por la introducción de personas u objetos. La cámara reverberante debe permanecer cerrada en el momento de medición, los niveles de ruido de fondo deben ser a lo menos 10 dB bajo el nivel que registra el ruido emitido por la fuente. Los niveles de humedad deben estar entre el 30 a 90% y la temperatura superior a los 15°C, para las mediciones [ISO 354, 2003].

4.2.3. Consideraciones técnicas para la medición

El micrófono se debe montar al menos 1,5 m entre cada posición de micrófono, restringiendo al menos 2 m de la fuente y al menos 1 m de los muros de la cámara. La posición de la fuente acústica es aleatoria, la distancia entre éstos debe ser de al menos 3 m. Se consideran a lo menos 12 posiciones del micrófono, adicionalmente se medirá la temperatura t y la humedad relativa m que existe en el momento de medición.

4.2.4. Tiempo de reverberación exigido para una cámara reverberante

Una cámara reverberante debe tener tiempos de reverberación altos en comparación a una sala de distinto uso con un mismo volumen. Como dispone la expresión Ec 3.9, el tiempo de reverberación dependerá fundamentalmente de dos factores: el volumen de la sala y el área de absorción. La normativa internacional tabula el área de absorción máximo que puede tener una cámara reverberante para un volumen igual a 200 m^3 para la obtención de resultados de absorción sonora de los materiales de forma óptima; esto se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Área de absorción sonora máxima exigible en cámara reverberante de 200 m^3 .

Frecuencia (Hz)	Área de absorción (m^2)
100	6,5
125	6,5
160	6,5
200	6,5
250	6,5
315	6,5
400	6,5
500	6,5
630	6,5
800	6,5
1000	7,0
1250	7,5
1600	8,0
2000	9,5
2500	10,5
3150	12,0
4000	13,0
5000	14,0

Para volúmenes V distintos a 200 m^3 , los factores de la Tabla 4.1 se multiplican por la expresión dada por Ec 4.1.

$$(V/200)^{2/3} \quad (\text{Ec 4.1})$$

4.2.5. Procedimiento de medición del tiempo de reverberación

El procedimiento de medición del tiempo de reverberación se emplea para las dos mediciones: medición de laboratorio vacío y medición de laboratorio con material. Se expondrá el método con ruido interrumpido.

El micrófono es posicionado en diversas partes dentro de la cámara reverberante según las condiciones que describe el punto 4.2.3. En cada punto se efectuará una medición.

La excitación con ruido en la cámara reverberante se realiza como sigue: se emplea un generador de ruido (ruido rosa comúnmente), el cual es ecualizado en las bandas de interés para posteriormente ser amplificado y así emitir ruido a través de las cajas acústicas. Luego de emitir ruido, ésta se debe estabilizar unos 5 segundos como mínimo; en seguida, se detiene la generación de ruido y los niveles de ruido decaen, esto es percibido por el micrófono y registrado por el sonómetro u otro dispositivo que determine el tiempo de reverberación de la sala.

Se realiza el mismo procedimiento para otro punto de medición en la cámara reverberante completando los 12 puntos mínimos exigidos.

4.2.6. Expresiones para condiciones ambientales

La velocidad de propagación del sonido c varía con la temperatura t . La corrección de velocidad se muestra en la expresión Ec 4.2, donde la temperatura está en grados celsius. Por otro lado, la humedad también altera las mediciones acústicas, m es el coeficiente de atenuación de energía que interviene en las bandas de frecuencia medidas entre 1,5 a 10 kHz [Cox y D'Antonio, 2004] y se denota por la ecuación Ec 4.3, donde α es el coeficiente de atenuación calculado de acuerdo a la normativa internacional ISO 9613-1 1993 para las condiciones climáticas (temperatura y humedad) [ISO 9613-1, 1993].

$$c = (331 + 0,6t)m/s \quad (\text{Ec 4.2})$$

$$m = \frac{\alpha}{10 \log(e)} \quad (\text{Ec 4.3})$$

4.2.7. Expresión de resultados

Para las medidas de tiempo de reverberación realizadas en todos los puntos, se efectúa un promedio aritmético para cada banda de frecuencia. Para la medición referencial, el tiempo de reverberación promedio es T_1 , mientras que para la medición con materiales esta será T_2 . Por lo cual, el área de absorción sonora A_1 de la sala vacía, está determinada por Ec 4.4, mientras que el área de absorción sonora A_2 para la sala con el material a medir se muestra en Ec 4.5 (m_1 y m_2 son los coeficientes de atenuación de energía).

$$A_1 = \frac{55,3V}{cT_1} - 4Vm_1 \quad (\text{Ec 4.4})$$

$$A_2 = \frac{55,3V}{cT_2} - 4Vm_2 \quad (\text{Ec 4.5})$$

Siendo V el volumen de la cámara reverberante. Obtenidas las dos medidas de absorción sonora de la sala, basta realizar la diferencia entre ellas para obtener la absorción absoluta del material A_T dada por Ec 4.6.

$$A_T = A_2 - A_1 \quad (\text{Ec 4.6})$$

Finalmente el coeficiente de absorción acústico α_s es la razón entre A_T y la superficie cubierta por el material en la sala S (ver Ec 4.7).

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (\text{Ec 4.7})$$

La normativa internacional ASTM C 423 adiciona al resultado de Ec 4.7 el coeficiente de absorción acústica de la superficie S dado por α_1 (superficie cubierta por el material). El resultado se muestra en Ec 4.8 [ASTM C 423, 2002]. Esto es válido para materiales con coeficiente de absorción acústico menores que 0,01 (según la banda de frecuencia medida).

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} + \alpha_1 \quad (\text{Ec 4.8})$$

4.3. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE DIFUSIVIDAD ACÚSTICA EN SALAS A TRAVÉS DE LA DIRECTIVIDAD DE UN MICRÓFONO

La medición del grado de difusividad acústica en una sala, se fundamenta en comparar dos mediciones en situaciones distintas, como expone V. V. Furduev y Ch. T'ung [Furduev y T'ung, 1960]. El procedimiento contempla una particularidad en cuanto a los elementos que se utilizan para su medición como su criterio en su demostración y análisis.

El método descrito es actualizado con objeto de facilitar la forma de resolver los datos.

4.3.1. Método de Furduev y T'ung

La descripción del método de Furduev y T'ung para determinar el grado de difusión acústica, es comparar la respuesta polar que muestra un micrófono (cardioide o bidireccional) hecha en la sala en cuestión, con respecto a la misma medición hecha en una cámara anecoica.

La forma de conocer la directividad $D(\theta)$ de respuesta del micrófono es realizar una medición en cámara anecoica (campo libre), como muestra la Figura 4.1, donde una fuente acústica emite un ruido que es captado por el micrófono montado sobre una base giratoria con velocidad de rotación ω rpm (revoluciones por minutos). El micrófono gira en su eje vertical y los valores que percibe en una revolución, se grafican en un diagrama polar como muestra la Figura 4.2. El eje acústico de la figura señala que la parte frontal del micrófono se orienta hacia la fuente de ruido (en los 0°).

El mismo procedimiento se realiza para la sala cuestionada, como muestra la Figura 4.3, ésta vez se obtiene el diagrama polar $R(\theta)$, que a diferencia del primero es alterado debido a las reflexiones del sonido en las superficies, esto se muestra en la Figura 4.4.

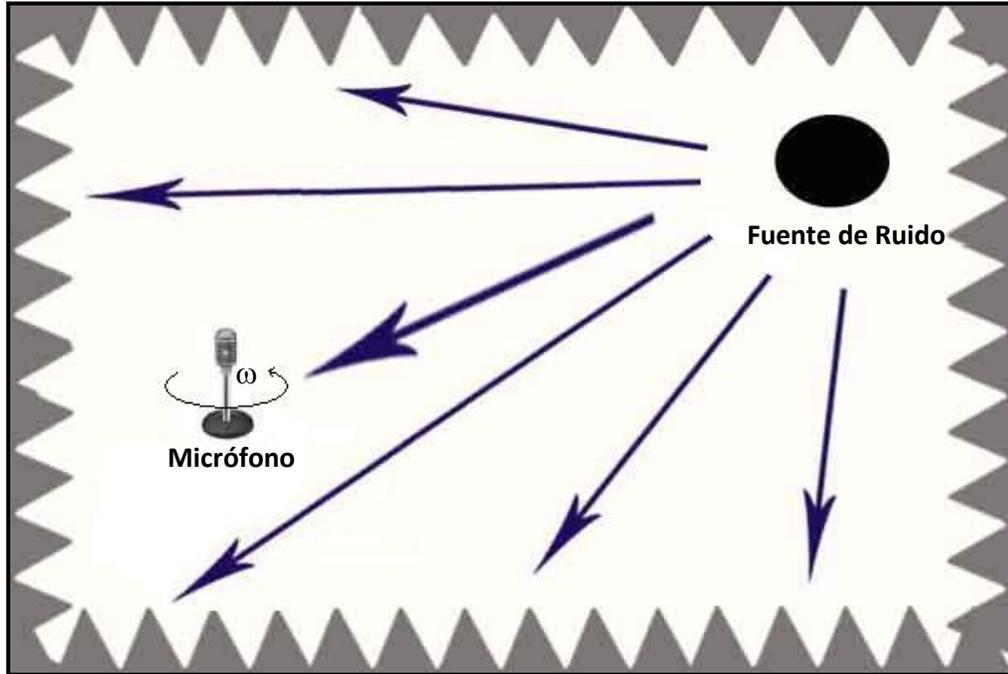


Figura 4.1: Forma de determinar el diagrama polar $D(\theta)$ de un micrófono en campo libre.

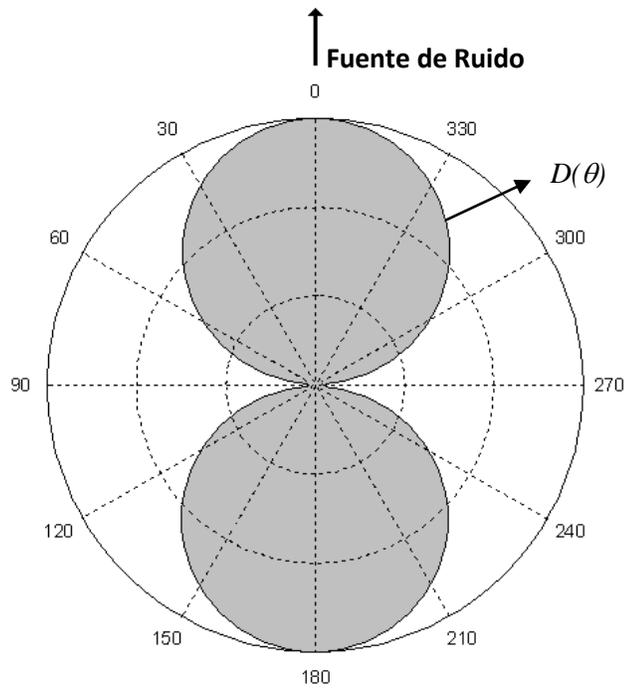


Figura 4.2: Medición del diagrama polar $D(\theta)$, micrófono bidireccional en campo libre.

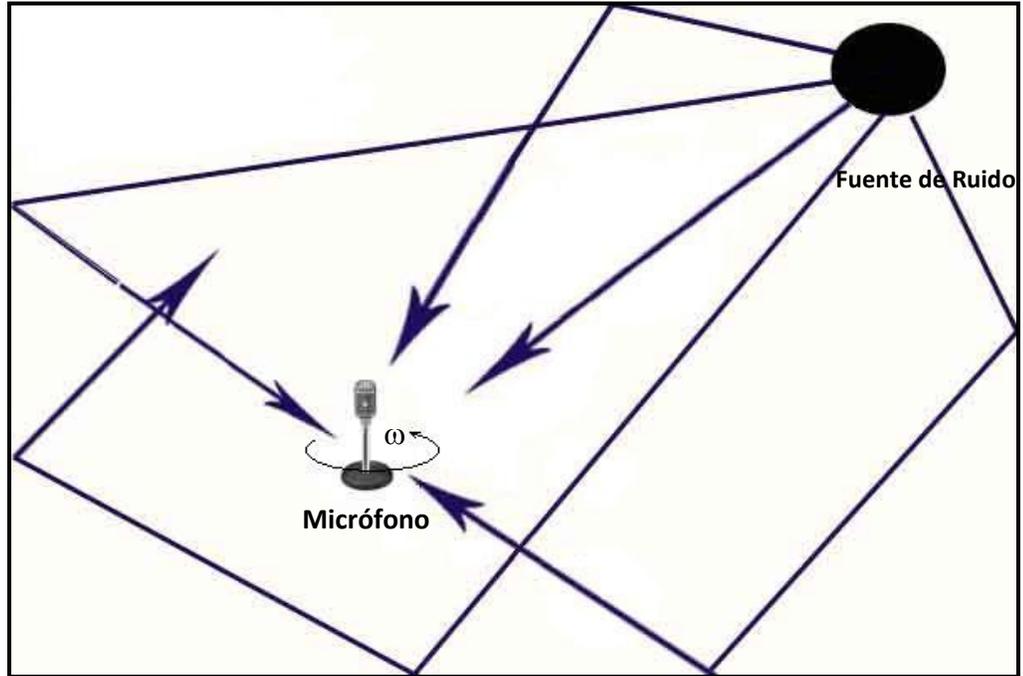


Figura 4.3: Determinación del diagrama polar $R(\theta)$ de un micrófono en la sala a evaluar.

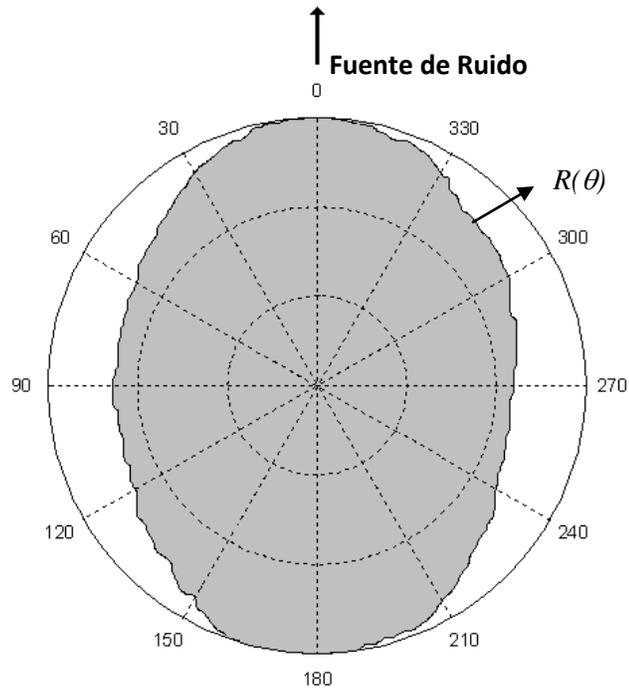


Figura 4.4: Medición del diagrama polar $R(\theta)$, micrófono bidireccional en la sala a evaluar.

La diferencia entre las formas de los diagramas polares $D(\theta)$ y $R(\theta)$, se debe a la difusión acústica del recinto, distinguiéndose entre una difusión nula; aquella donde $R(\theta)$ se asemeja al diagrama polar de referencia (medido en la cámara anecoica), y la difusión absoluta (o campo sonoro difuso); que forma un diagrama polar $R(\theta)$ similar a un círculo.

4.3.2. Equipamiento recomendado

El equipamiento que se utiliza para realizar la medición es el siguiente:

- Fuente de ruido omnidireccional
- Micrófono bidireccional
- Base giratoria con pedestal
- Amplificador
- Ecuador
- Generador de señales de ruido (ruido blanco)
- Computador o dispositivo de registro de señales

4.3.3. Tipos y condiciones de medición

La medición realizada en la cámara anecoica o campo libre, tendrá como nombre medición de referencia. De forma similar, la medición en la sala a estudiar, se llama medición de evaluación.

Las mediciones se realizan con el mismo equipamiento, ruido y software debido a que es la misma medición para ambos lugares. De no ser así, implicaría que las mediciones sufran variaciones en la cadena electroacústica del sistema y, por lo tanto, en el análisis final de los resultados.

4.3.4. Procedimiento práctico de medición del índice de difusividad acústica

La forma y montaje para realizar la medición en ambos recintos (cámara anecoica y sala) con un micrófono bidireccional, consiste en generar ruido blanco filtrado por un ecualizador en bandas de frecuencia de tercio de octava de interés. La señal se amplifica para luego ser emitida por una fuente omnidireccional. La fuente se sitúa preferencialmente en una esquina a una distancia d del micrófono, éste último se localiza en el centro del recinto. El micrófono es girado sobre su eje vertical a una velocidad de rotación ω que permita al micrófono registrar la señal acústica en una revolución del mismo. El micrófono transforma la señal acústica a una señal de voltaje $v(t)$, que posteriormente es graficada en un diagrama polar. El micrófono tiene la particularidad de percibir mejor la señal en la parte frontal y posterior como se mostró en la Figura 4.2, por lo tanto, el inicio del registro es afrontando el micrófono (0°) a la fuente de ruido.

4.3.5. Análisis de los datos

Para realizar el gráfico del diagrama polar del micrófono, la señal $v(t)$ se filtra nuevamente en la banda de frecuencia en estudio para luego ser traspasada a una señal RMS (raíz media cuadrática). La señal resultante se denotará como $u(\theta)$.

La distancia entre la fuente de ruido y el micrófono puede variar en las mediciones de referencia y evaluación, como también la intensidad del sonido. Para contrarrestar esas diferencias la señal RMS es normalizada con el fin de ajustar las mediciones para las dos situaciones distintas, esto es el resultado del cociente entre los valores de la señal y su valor máximo. Se considera la amplitud máxima de la señal en los 0° del diagrama, como se muestra en Ec. 4.9, luego se traza la gráfica de $u(\theta)$ en el diagrama polar.

$$U(\theta) = \frac{u(\theta)}{u(0^\circ)} \quad (\text{Ec 4.9})$$

La normalización permite que los diagramas polares $D(\theta)$ y $R(\theta)$ se encuentren en un mismo nivel para diferenciarlos, esto se muestra en la Figura 4.5.

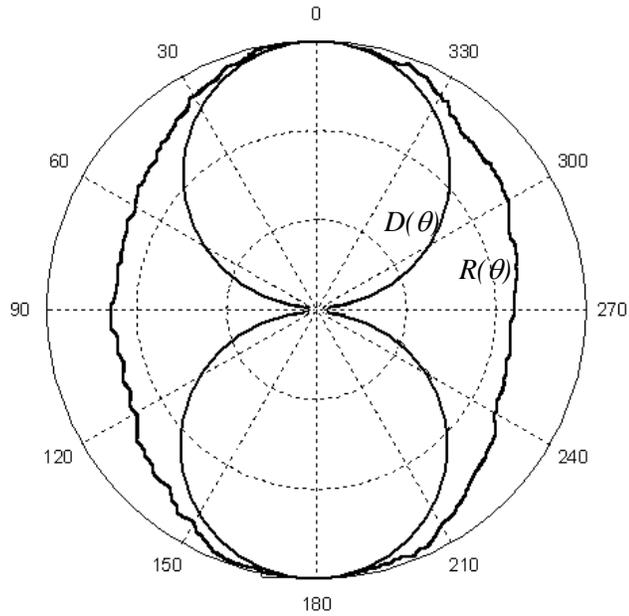


Figura 4.5: Diagramas polares $D(\theta)$ y $R(\theta)$ normalizados en un círculo unitario.

4.3.6. Expresión de resultados

Los diagramas polares muestran la señal $u(\theta)$ circunscrita en una circunferencia de radio unitario. Las áreas que demarcan las figuras de referencia y evaluación, se denotan como S_0 y S respectivamente, como se muestra en la Figura 4.6.

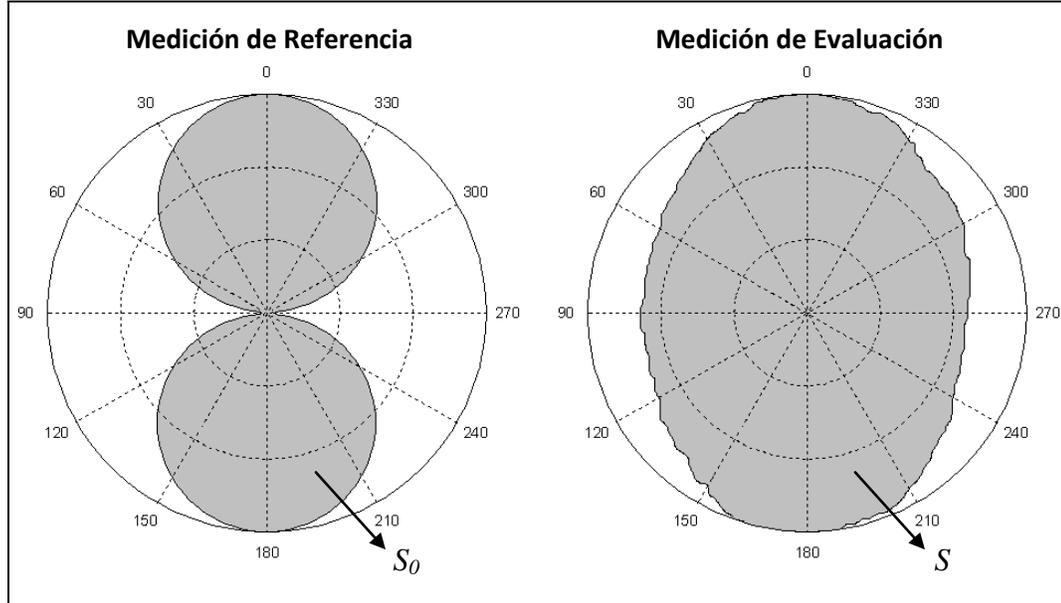


Figura 4.6: Regiones S_0 y S delimitadas por los diagramas polares.

El método considera la región relegada por la señal en el diagrama polar, como se muestra en la Figura 4.7. Para un círculo de radio unitario el área es igual a π . Entonces las áreas que se utilizan están determinadas por Ec 4.10 y Ec 4.11.

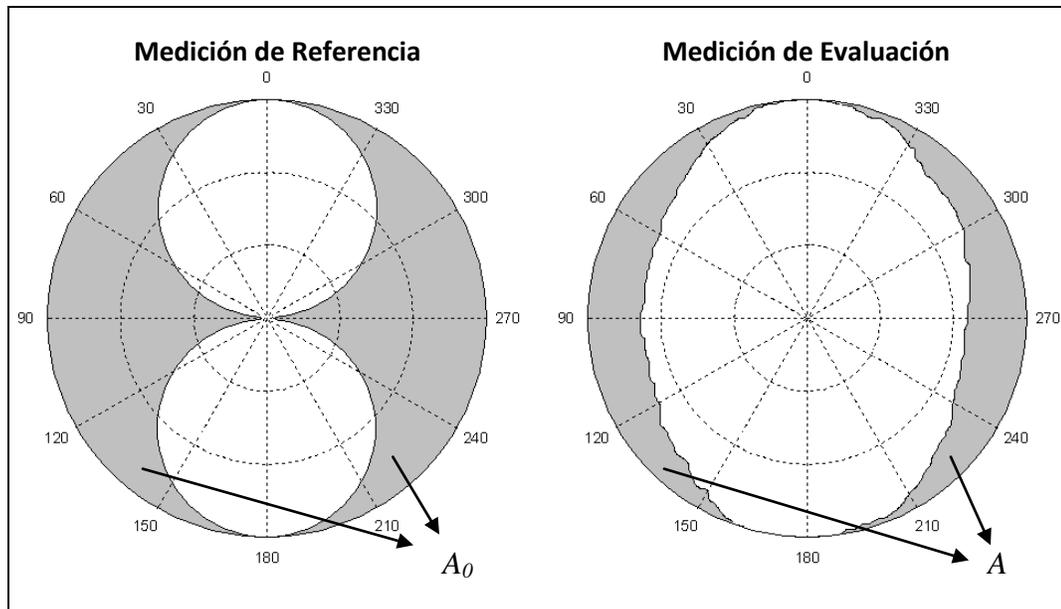


Figura 4.7: Regiones A_0 y A delimitadas por el círculo unitario y por los diagramas polares.

$$A_0 = \pi - S_0 \quad (\text{Ec 4.10})$$

$$A = \pi - S \quad (\text{Ec 4.11})$$

La diferencia entre los diagramas polares de referencia y evaluación determina el índice de difusividad acústica d . Este está dado por Ec 4.12.

$$d = \frac{A_0 - A}{A_0} \quad (\text{Ec 4.12})$$

La ecuación describe que si A tiene valores cercanos a A_0 , entonces d tiende a cero, y el índice de difusividad acústica es nula. En el caso contrario, mientras A se acerque a cero, d tiende a 1, esto señala que la sala es difusa (campo sonoro difuso).

4.4. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE LA DIFUSIVIDAD ACÚSTICA EN SALAS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN POR POSICIÓN DE MICRÓFONO

La forma de determinar la difusión acústica consiste en realizar un análisis estadístico de los valores de tiempo de reverberación hecha en varios puntos de la sala. Este método se basa por los criterios descritos por Randall y Ward [BBC, 1969].

4.4.1. Criterios de Randall y Ward

Los autores exponen los siguientes argumentos para identificar una sala con campo sonoro difuso perfecto [Alton, 2001]:

- a) La irregularidad espacial de una respuesta en frecuencia obtenida de una medición en estado estacionario debe ser insignificante.
- b) La fluctuación en el decaimiento debe ser insignificante (curva suavizada).
- c) El decaimiento debe ser perfectamente exponencial (para escala logarítmica, debe ser lineal).
- d) El tiempo de reverberación debe ser el mismo para cada punto de medición.

- e) La forma del decaimiento debe ser esencialmente la misma para diferentes frecuencias.
- f) La forma del decaimiento debe ser la misma independientemente de la direccionalidad del micrófono de medición.

La forma de evaluar la difusión sonora con los criterios mencionados requiere de una observación cualitativa de los resultados, el punto d) permite apreciar el grado de difusión acústica mediante la variación del tiempo de reverberación medido en varios puntos de la sala, esto significa determinar el promedio y desviación estándar para adquirir el error porcentual de estas medidas.

Se considera un error porcentual nulo si la sala posee un campo sonoro difuso absoluto, cumpliendo con el punto d) de los criterios de Randall y Ward. Los valores tienen distinta dimensión al método de la sección 4.3.

4.4.2. Procedimiento práctico

La forma de realizar este método corresponde al mismo montaje y procedimiento antepuesto en la sección 4.2. Se necesitan todos los valores de tiempo de reverberación de la sala, y promedio aritmético del mismo para cada banda de frecuencia. En este método se adiciona el cálculo de desviación estándar y error porcentual de la misma ante el promedio aritmético anterior.

4.4.3. Expresión de resultados

Obtenidos los valores de tiempo de reverberación de cada banda de frecuencia, se procede a calcular el promedio aritmético T , luego se obtiene la desviación estándar D_T como expresa la fórmula Ec 4.13.

$$D_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T - T_{(i)})^2}{n - 1}} \quad (\text{Ec 4.13})$$

Donde n es la cantidad de mediciones de tiempo de reverberación $T_{(i)}$ efectuado en el punto i .

El grado de difusión acústica de la sala d_p se muestra como la razón porcentual entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de reverberación medido, como se describe en Ec 4.14.

$$d_p = \frac{D_r}{T} \times 100 \quad (\text{Ec 4.14})$$

5. ANTECEDENTES: CARACTERIZACIÓN DE LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM

5.1. HISTORIA Y UTILIDAD

La cámara reverberante Idiem fue construida en el año 1956, siendo en el año 1996 sometida a mejoramientos para fortalecer la calidad acústica en sus mediciones, introduciéndose elementos difusores semicilíndricos. Actualmente, se realizan diversos tipos de ensayos de materiales tales como: alfombras, espumas, lana mineral o de vidrio, cielos, etc. como también objetos como: butacas, muebles y otros, para obtener el coeficiente de absorción acústica. También es usado, para medir la potencia acústica de pequeñas máquinas o instrumentos.

5.2. DESCRIPCIÓN DE LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM

La cámara reverberante es un recinto que posee alta reflexividad sonora gracias a sus muros, cielo y piso, que tienen un estucado duro y liso [Álamo, 1996]. Cuenta con 14 elementos difusores de acero semicilíndricos que le otorgan irregularidad geométrica a la sala.

La cámara posee un volumen de $253,94 \text{ m}^3$, la superficie total es de $244,16 \text{ m}^2$, las longitudes horizontales de los muros se muestran en la Tabla 5.1. La Figura 5.1 muestra la vista de la base de la cámara detallando las dimensiones de los muros como también la abertura angular de las esquinas. Notar que la esquina SE (sureste) es la única que tiene ángulo recto. Para fines explicativo, los cuatro muros de la cámara son nombrados como: muro Norte (MN), muro Sur (MS), muro Este (ME) y muro Oeste (MO).

Tabla 5.1: Longitudes horizontales de los muros

Muro	Longitud (m)
MN	7,05
MS	7,22
ME	6,20
MO	6,02

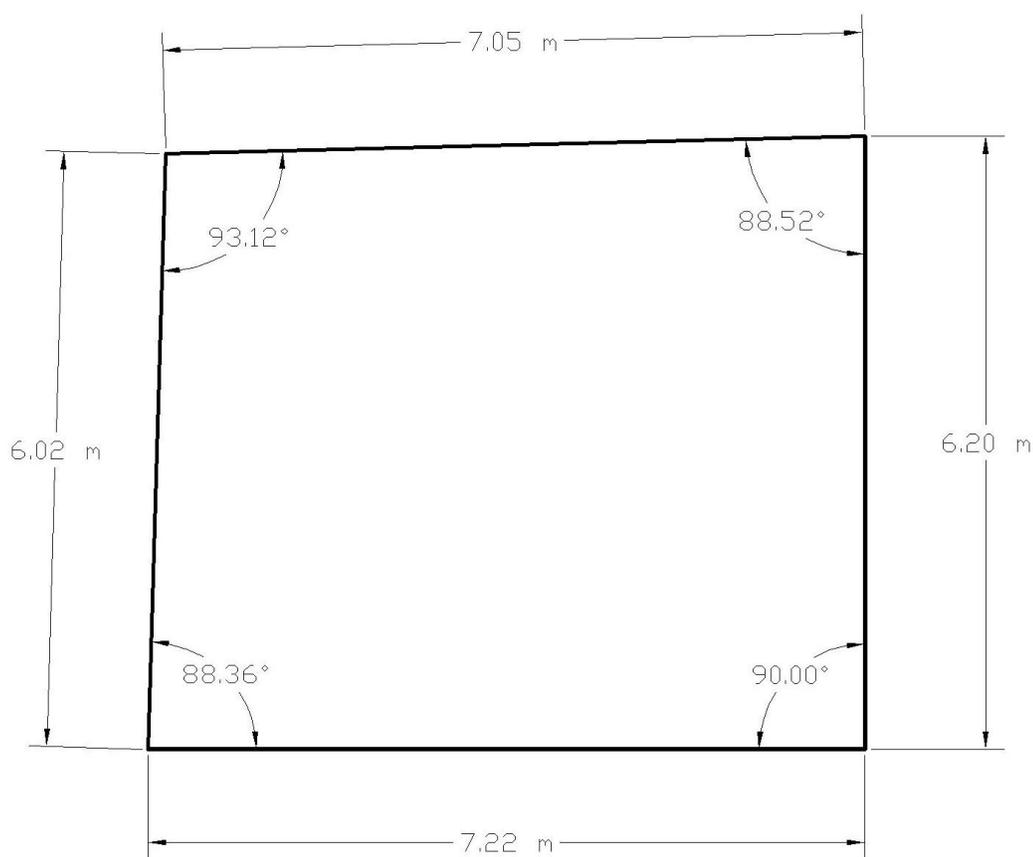


Figura 5.1: Base de la cámara reverberante, dimensiones horizontales de los muros y abertura angular de las esquinas, vista superior.

Dado la irregularidad de la cámara reverberante, la altura promedio es 5,82 m, en las Figuras 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 se detallan las longitudes de los muros, incluyéndose las alturas y ángulos que generan los muros con el cielo.

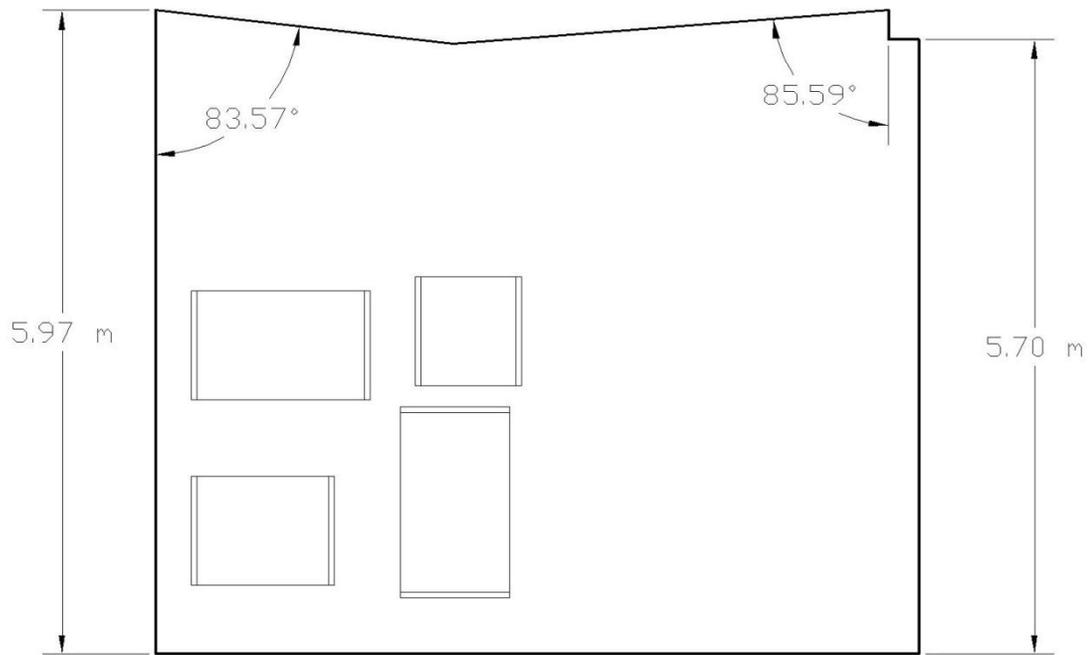


Figura 5.2: Dimensiones en muro norte.

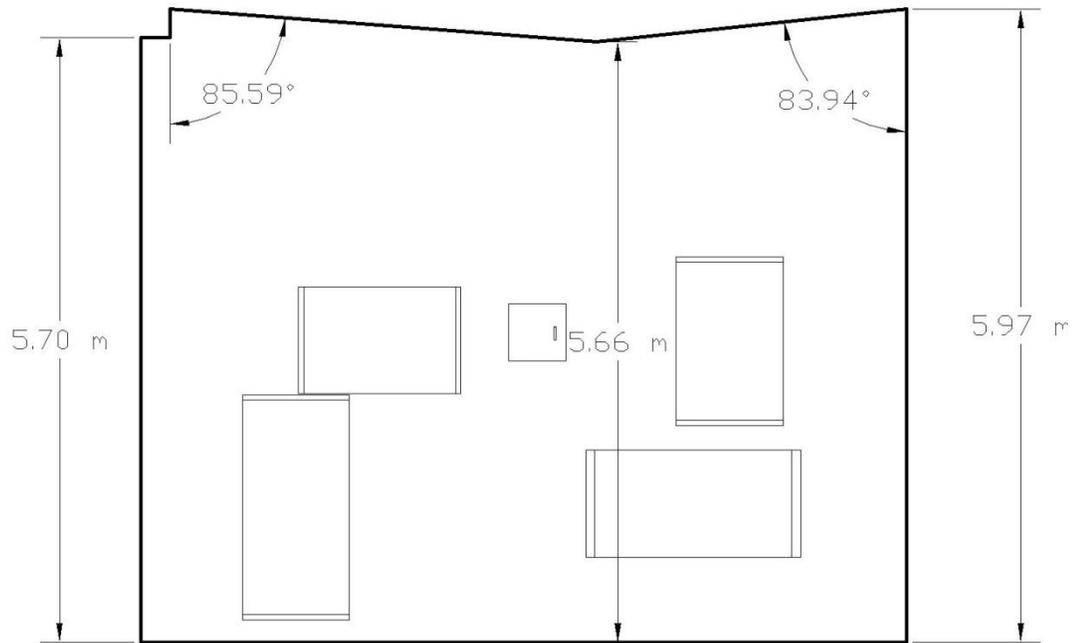


Figura 5.3: Dimensiones en muro sur.

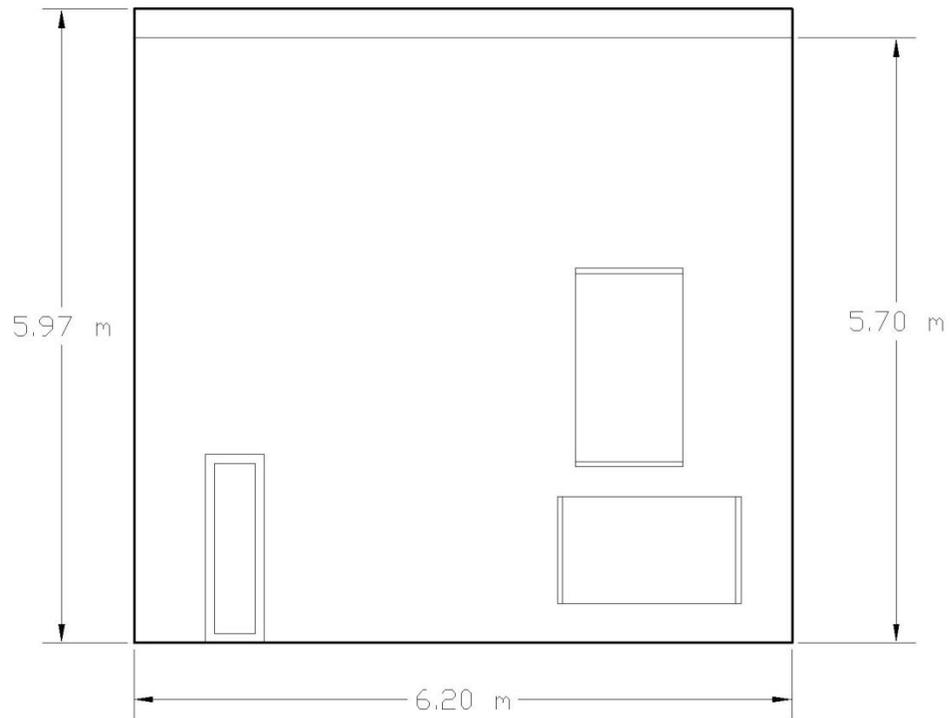


Figura 5.4: Dimensiones en muro este.

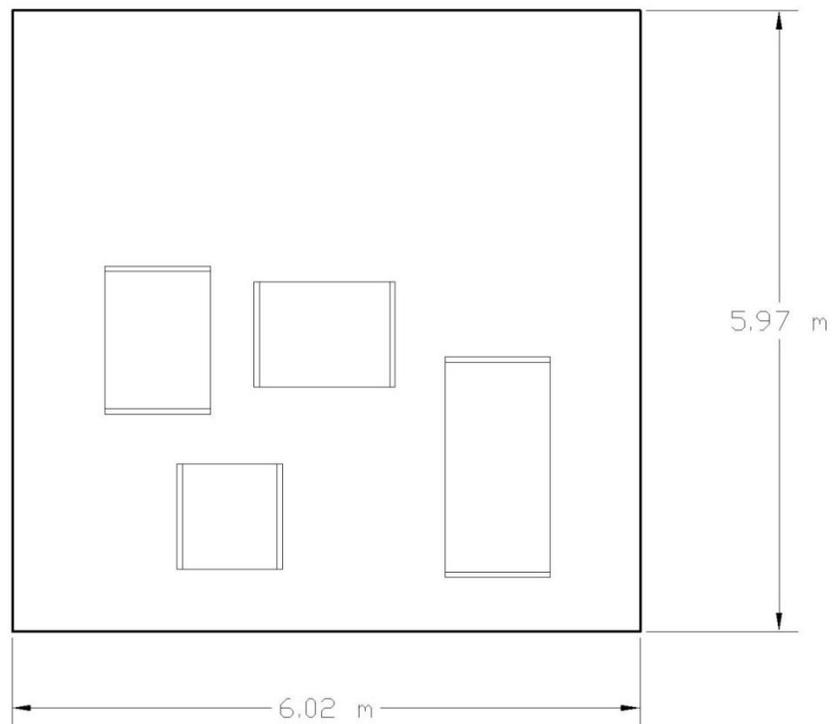


Figura 5.5: Dimensiones en muro oeste.

La Figura 5.6 muestra la cámara reverberante en una vista desde la esquina SE (sureste), mientras que la Figura 5.7 muestra la cámara desde la esquina opuesta NO (noreste).

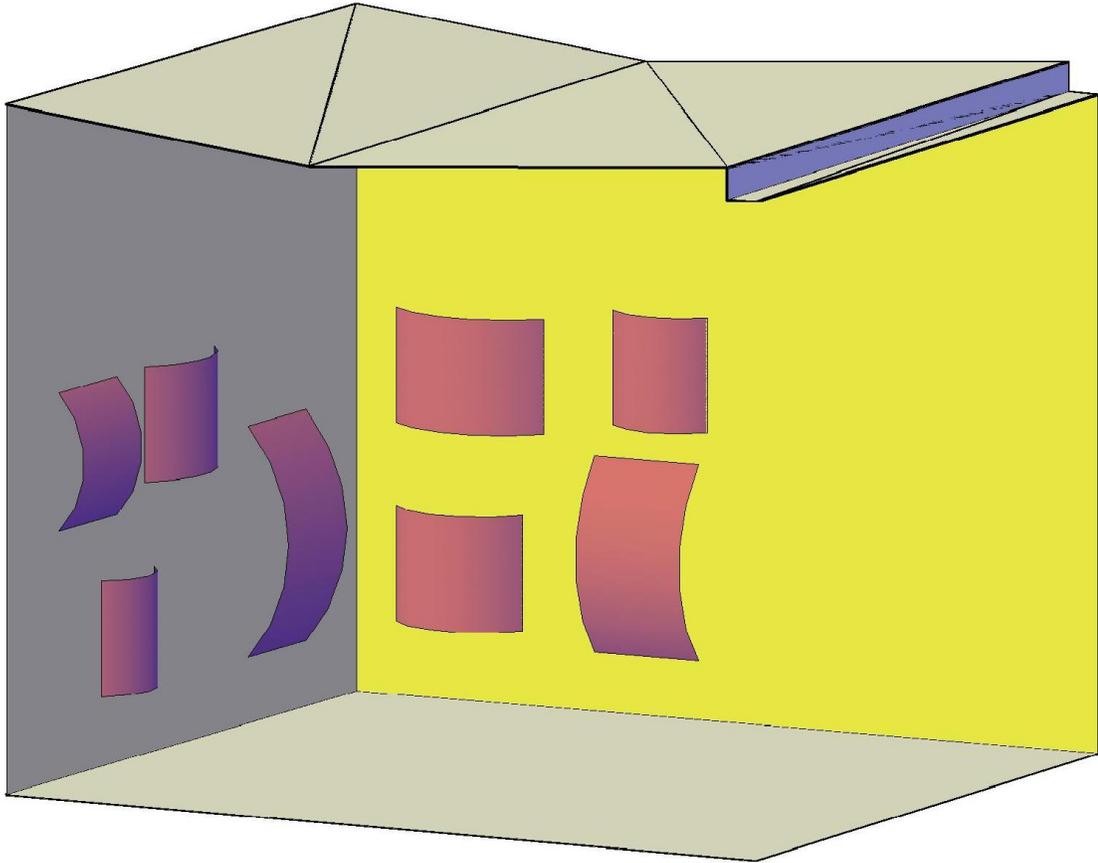


Figura 5.6: Vista de la cámara reverberante desde la esquina SE.

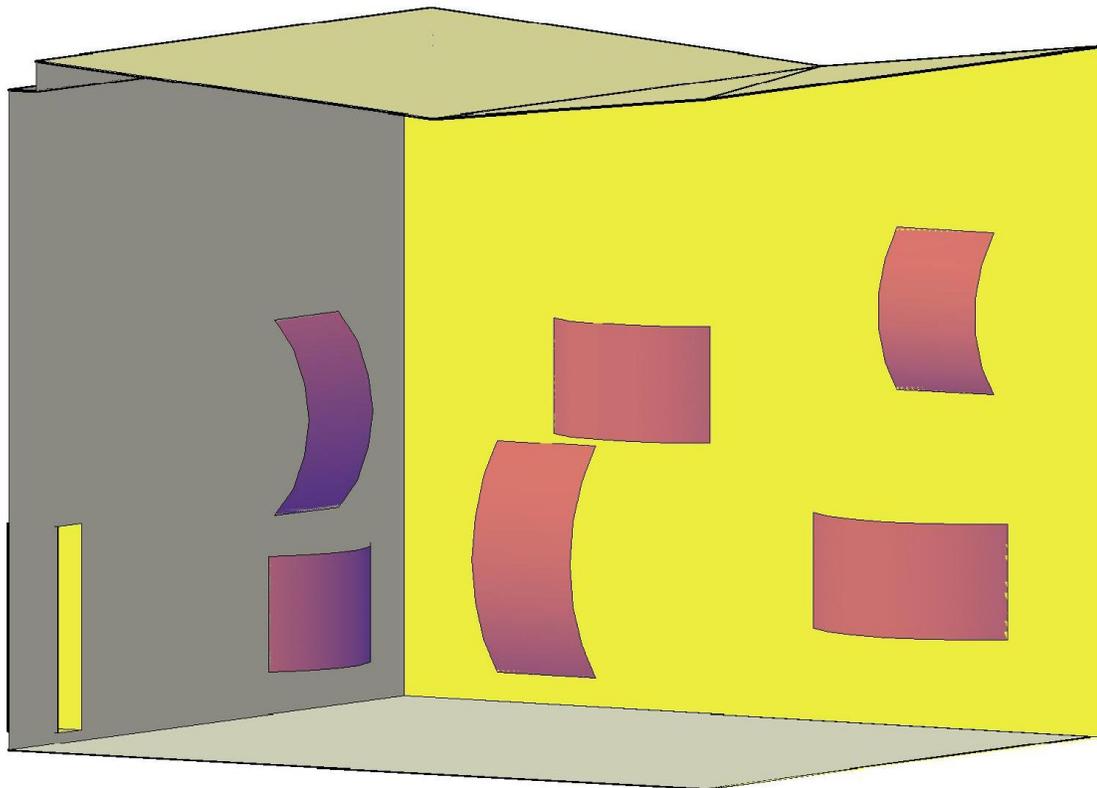


Figura 5.7: Vista de la cámara reverberante desde la esquina NO.

5.3. ELEMENTOS DIFUSORES DE LA CÁMARA REVERBERANTE

Actualmente el laboratorio consta de 14 elementos difusores semicilíndricos consistentes en planchas de acero de 2 mm de espesor con una densidad superficial de 15 kg/m² distribuidos de forma vertical y horizontal en los cuatro muros de la cámara. La Tabla 5.2 muestra el área arqueada de cada elemento difusor en los muros.

Tabla 5.2: Áreas arqueada de los elementos difusores en cada muro.

Muro	Área arqueada de E. difusor (m ²)				Total (m ²)
Muro Norte	1,75	1,75	1,33	1,02	5,85
Muro Sur	2,79	1,57	1,57	2,22	8,15
Muro Este	1,91	1,81			3,72
Muro Oeste	2,21	1,40	1,36	0,92	5,89

Todos los elementos difusores tienen medidas de 1 metro de ancho con pestañas de fijación de 4 a 7 cm como muestra la Figura 5.8, el largo se deduce del área de cada uno mostrado en la Tabla 5.2 (arco), mientras que la superficie que ocupa en el muro (sombra) se muestra en la Tabla 5.3.

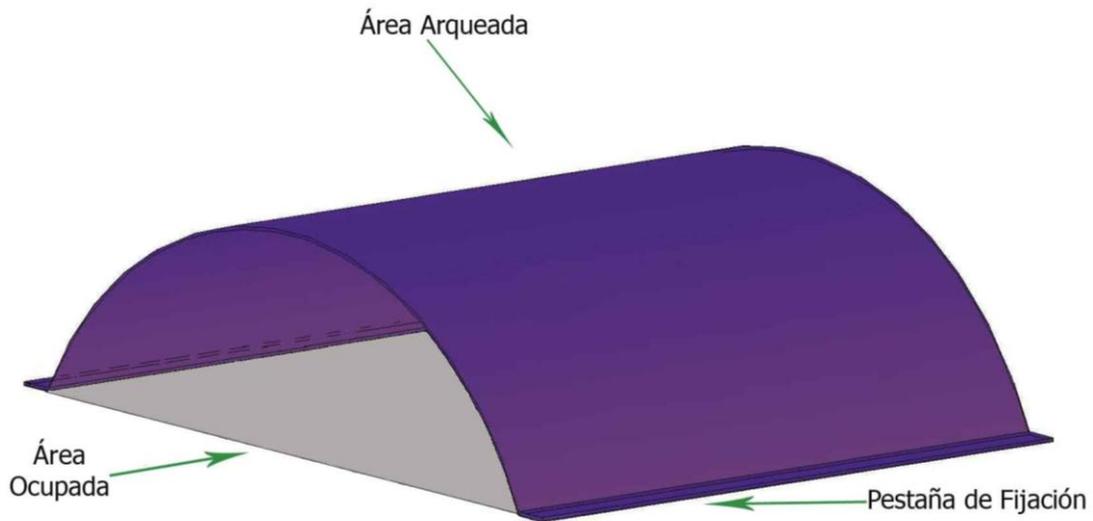


Figura 5.8: Forma de los elementos difusores de acero.

Tabla 5.3: Área de los muros ocupada por elementos difusores.

Muro	Área ocupada por E. difusor (m ²) en muro				Total (m ²)
Muro Norte	1,67	1,55	1,22	0,88	5,32
Muro Sur	2,02	1,43	1,49	1,94	6,88
Muro Este	1,77	1,62			3,39
Muro Oeste	2,02	1,32	1,25	0,91	5,5

La Tabla 5.4 muestra la superficie de cada cara de la cámara reverberante, la superficie arqueada de los elementos difusores, la superficie que ocupan los elementos difusores en cada cara, y la proporción entre esta última con la superficie total de la cámara reverberante (superficie reflectante).

Tabla 5.4: Áreas y proporción de los elementos difusores en los muros.

Superficie	Área (m ²)	Área E. Difusor (arco) (m ²)	Área ocupada E. Difusor (m ²)	Proporción (%)
Cielo	45,45			
Piso	43,59			
m. Norte	40,94	5,85	5,32	13,00
m. Sur	41,95	8,15	6,88	16,40
m. Este	36,34	3,72	3,39	9,33
m. Oeste	35,89	5,89	5,5	15,32
Total	244,16	23,62	21,09	8,64

5.4. DATOS ADICIONALES DE LA CÁMARA REVERBERANTE

La información adquirida en los puntos anteriores sobre las magnitudes físicas de la cámara reverberante provee de manera sustancial la validación de otros datos mediante conceptos teóricos relacionados a la acústica de salas. Los resultados permitirán caracterizar parámetros acústicos comunes de la cámara reverberante.

5.4.1. Tiempo de reverberación y absorción sonora de la cámara reverberante

En la sección 6.2 se muestran los valores de tiempo de reverberación y posteriormente en la sección 7.3.1 el coeficiente de absorción sonora de la cámara reverberante. Sin embargo, es necesario esclarecer que los valores de absorción sonora en una cámara reverberante son bastante bajos, menores de 0,2. Entonces los valores de tiempo de reverberación en todas sus bandas de frecuencias son válidos para la fórmula Ec 3.9 propuesta por W.C. Sabine.

5.4.2. Frecuencia de Schroeder de la cámara reverberante

La irregularidad de la cámara reverberante limita las posibilidades de estimar valores acústicos. La frecuencia de Schroeder es uno de los cálculos para todo tipo de sala. Esta es conseguida a través de la ecuación Ec 3.22 de la sección 3.10.

$$f_{sc} = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}$$

Se elige el tiempo de reverberación de la banda de frecuencia de 500 Hz como el más representativo de la medición de $T = 8,354$ seg (ver en la sección 6.2.2). Considerando $c = 340$ m/s, el volumen $V = 253,94$ m³; la frecuencia de Schroeder es $f_{sc} = 362,8$ Hz.

5.4.3. Libre camino medio y razón de decaimiento

Estos valores no tienen gran relevancia para los objetivos planteados, sin embargo, son datos que ayudarían a estimar el tipo de reflexión que existe en la cámara reverberante. Mediante las ecuaciones Ec. 3.1 y Ec. 3.2, el cálculo respectivo es el siguiente.

$$d = \frac{4V}{S} = \frac{4 \cdot 253,94}{244,16} = 4,16m$$

$$t' = \frac{d}{c} = \frac{4,16}{340} = 0,012seg$$

El libre camino medio calculado es $d = 4,16$ metros y la razón de decaimiento (o tiempo promedio de reflexión de la señal entre muro a muro) es $t' = 0,012$ segundos.

5.4.4. Radio reverberante

El interés de este valor dado por el punto 3.12 es la determinación del campo reverberante. El valor se determina con el área de absorción de la banda de frecuencia más característica (500 Hz), $A = 4,88$ m²; el resultado se obtiene con Ec 3.29.

$$r_c = \sqrt{\frac{A}{16\pi}} = \sqrt{\frac{4,88}{16\pi}} = 0,311m$$

El resultado establece que basta solo $r_c = 0,311$ metros de la fuente para observar el campo reverberante de la cámara.

5.4.5. Constante de decaimiento

Según lo mostrado por la sección 3.8, la constante de decaimiento δ determina la rapidez con que el sonido se disipa en una sala (en un decaimiento exponencial). Esta es conseguida por el ancho de banda de un modo normal (Ec 3.17) o bien por la ecuación Ec 3.18

$$\langle \delta \rangle = \frac{6.91}{T}$$

La constante de decaimiento del ancho de banda característico de la cámara reverberante es $\delta_{500} = 0,827$ Hz. De igual forma, el ancho de banda medio en la frecuencia de Schroeder, perteneciente a la banda de frecuencia de 400 Hz, es $\delta_{400} = 0,779$ Hz.

6. MEDICIONES EN LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM

6.1. INTRODUCCIÓN

El tiempo de reverberación es la medida acústica que más califica una sala. La calidad de la cámara reverberante también está determinada por la respuesta en frecuencia y por la difusividad acústica de la sala, para ambas existen formas de obtener resultados de forma no tradicional.

Las mediciones se realizaron mediante los métodos señalados en el capítulo 4, considerando el comportamiento acústico de la sala; estado estacionario y estado transiente. Se adicionaron formas cualitativas que entregan una mejor observación de las condiciones acústicas de la cámara reverberante.

6.2. TIEMPO DE REVERBERACIÓN

El tiempo de reverberación de la cámara reverberante es medido a través del método descrito por la normativa ISO 354, mostrado en la sección 4.2. Los puntos de medición son arbitrarios como también la altura del micrófono.

6.2.1. Equipamiento utilizado

El equipamiento utilizado es el siguiente:

- 2 cajas acústicas Sansui SPX 9000
- Ecualizador DOD 231series II
- Amplificador Sansui R-70

- Sonómetro integrador Larson Davis 824
- Generador de señales Larson Davis SRC20

El esquema electroacústico utilizado para la medición se muestra en la Figura 6.1.

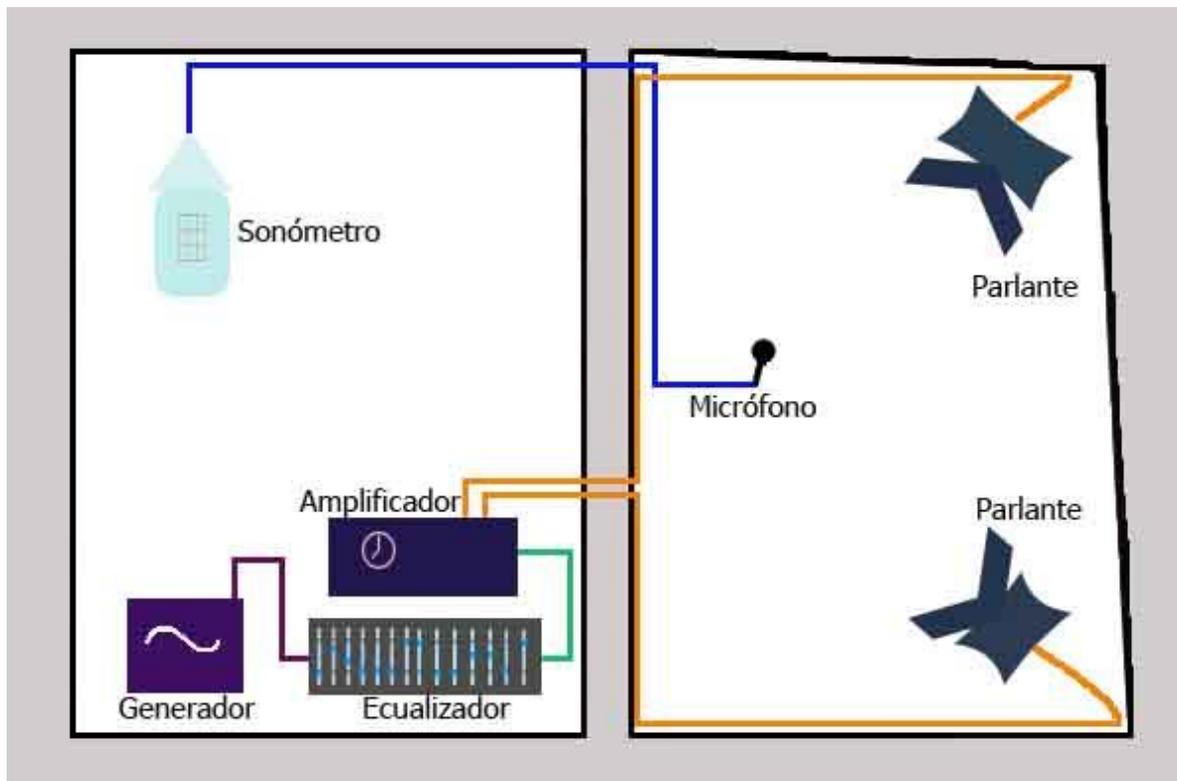


Figura 6.1: Esquema del montaje electroacústico.

6.2.2. Medición del tiempo de reverberación

La medición se realizó con la cámara reverberante vacía, con la salvedad del micrófono en el interior conectado al sonómetro Larson Davis 824 (micrófono del mismo instrumento), permitiendo la medición del tiempo de reverberación a través de sus funciones. El sonómetro realizó la medición al caer el sonido los primeros 30 dB (T30), es decir que los resultados corresponden a la interpolación de la curva de decaimiento. La cámara reverberante se excitó mediante dos fuentes acústicas con un ruido estacionario (se utilizó ruido rosa), el cual se detuvo de forma repentina y luego es el instrumento quién registró las caídas de nivel y, por lo tanto, el tiempo de reverberación.

La Tabla 6.1 muestra los resultados promedio de la medición del tiempo de reverberación en nueve puntos de la cámara seleccionados de forma aleatoria, en el cual cada punto tiene dos mediciones con alturas distintas (18 mediciones en total). También se muestra la desviación estándar producto de todas las mediciones con el fin de estimar un error en cada banda de frecuencia (los valores de tiempo de reverberación para cada punto se muestran en el Anexo A.1 en las Tablas A.1 y A.2).

En la Figura 6.2 se muestra el gráfico de los valores de tiempo de reverberación de la cámara y desviación estándar de acuerdo a la Tabla 6.1. Adicionalmente se grafica el tiempo de reverberación mínimo exigible para la cámara reverberante, según la normativa internacional ISO 354, ésta es conseguida para un volumen de 253,94 m³ como establece la sección 4.2.4.

Tabla 6.1: Tiempo de reverberación promedio de 18 mediciones de la cámara reverberante.

Frecuencia (Hz)	Tiempo de Reverberación (s)	Desviación Estándar
100	7,346	0,749
125	7,847	1,003
160	9,419	0,920
200	9,428	0,769
250	8,878	0,723
315	9,122	0,713
400	8,874	0,855
500	8,354	0,359
630	8,454	0,419
800	8,570	0,296
1000	8,077	0,321
1250	7,693	0,286
1600	6,853	0,389
2000	6,002	0,173
2500	5,174	0,175
3150	4,366	0,173
4000	3,579	0,246
5000	2,885	0,218

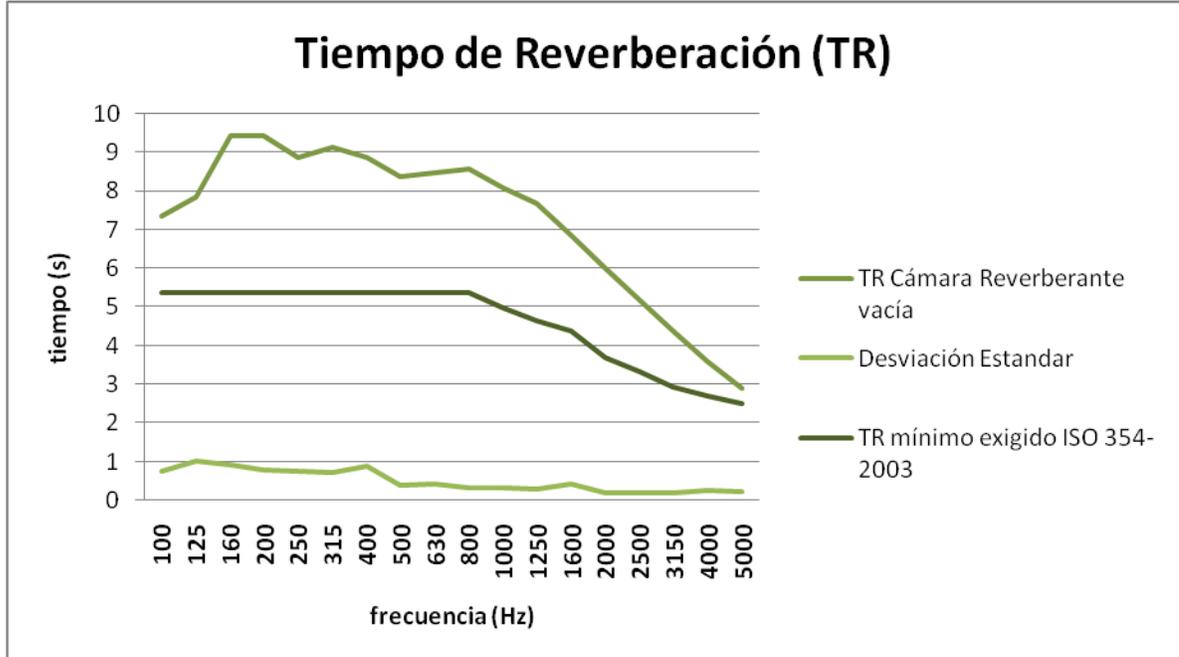


Figura 6.2: Gráfico de valores de tiempo de reverberación promedio, desviación estándar y tiempo de reverberación mínimo exigido para la cámara reverberante.

6.2.3. Curvas de decaimiento

El espectro gráfico de las curvas de decaimiento de las mediciones de tiempo de reverberación, califica el comportamiento del recinto en relación a su difusividad, como exponen los criterios de Randall y Ward de la sección 4.4.1.

El análisis de frecuencia de las curvas de decaimiento permite relacionar el comportamiento de la caída de nivel con el error porcentual del gráfico de la Figura A.1 en el Anexo A.1 (razón porcentual de la desviación estándar mostrado en el punto anterior).

En el análisis se obtuvieron los archivos de las mediciones de tiempo de reverberación de la sección 6.2.2 (archivos de decaimiento del sonómetro) y luego se graficaron. Las caídas de nivel trazadas son de las bandas de frecuencia de 100, 125, 160 y 200 Hz y se muestran en las Figuras 6.3, 6.4, 6.5 y 6.6 respectivamente. En forma adicional se muestran las caídas de las bandas de 1000 y 2000 Hz en las Figuras 6.7 y 6.8 respectivamente, con el fin de compararlos con las demás bandas de frecuencia.

En relación al instrumento utilizado (sonómetro Larson Davis 824), los archivos de éstas curvas son adquiridos mediante un software del mismo producto (824 Utility 3.12), el

cual entrega los datos de decaimiento obtenidos con precisión de 10,1 mseg cada muestra (intervalos de tiempo integrado).

Las figuras siguientes muestran los niveles de presión sonora en decaimiento a través del tiempo, registrado por el sonómetro Larson Davis 824.

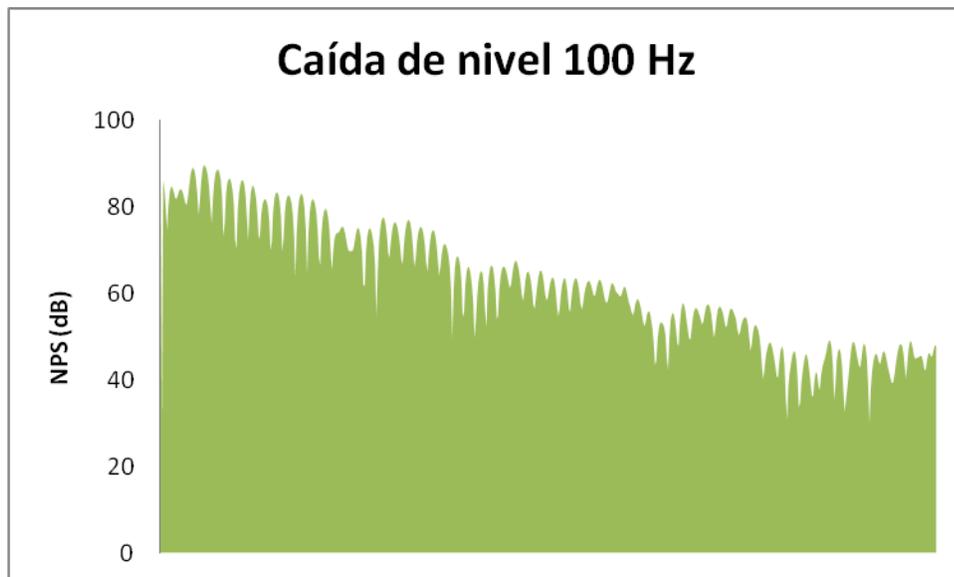


Figura 6.3: Caída de nivel de banda de tercio de octava de 100 Hz.

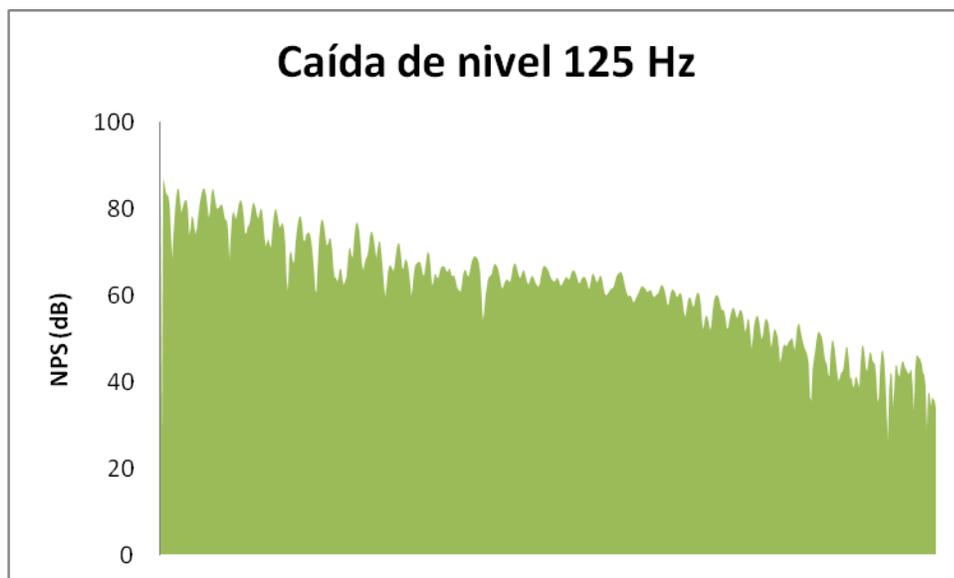


Figura 6.4: Caída de nivel de banda de tercio de octava de 125 Hz.

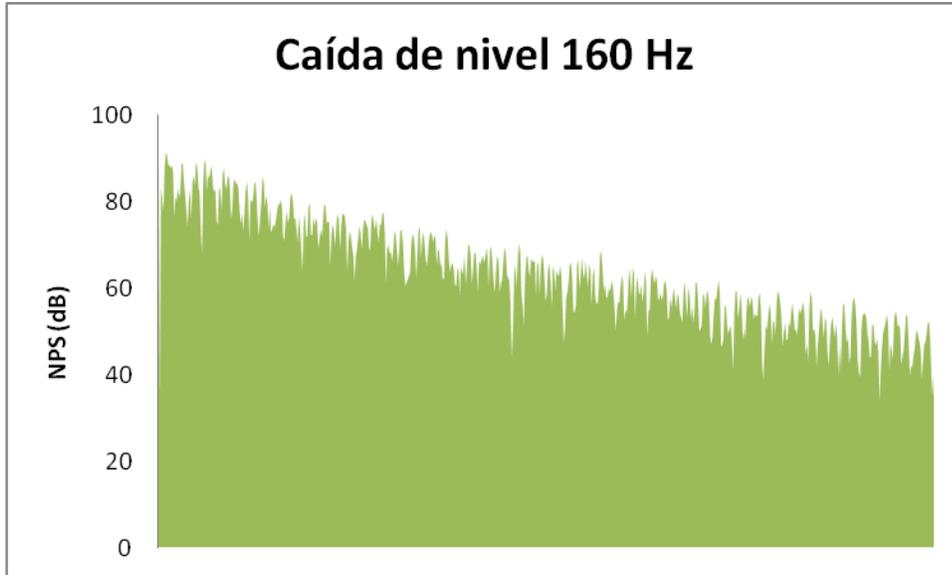


Figura 6.5: Caída de nivel de banda de tercio de octava de 160 Hz.

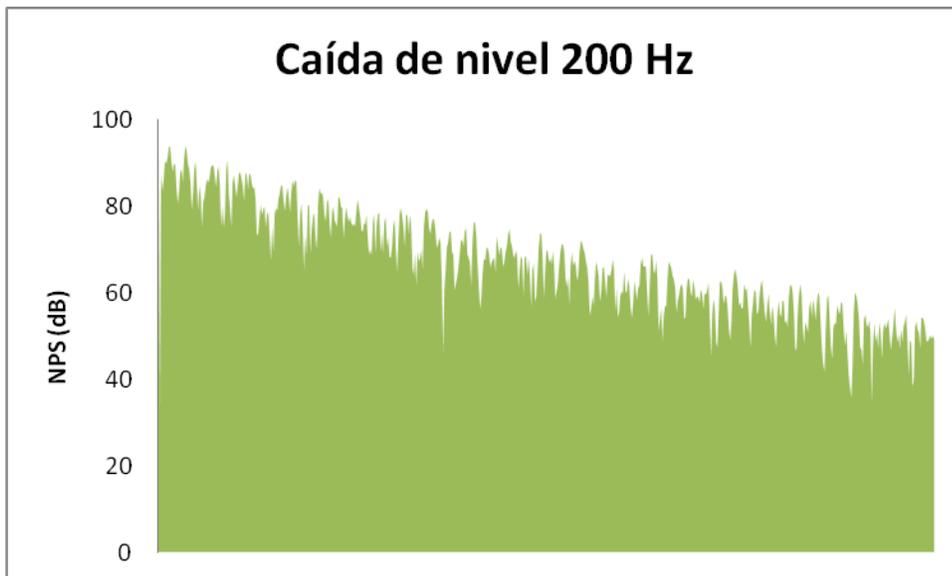


Figura 6.6: Caída de nivel de banda de tercio de octava de 200 Hz.



Figura 6.7: Caída de nivel de banda de tercio de octava de 1000 Hz.

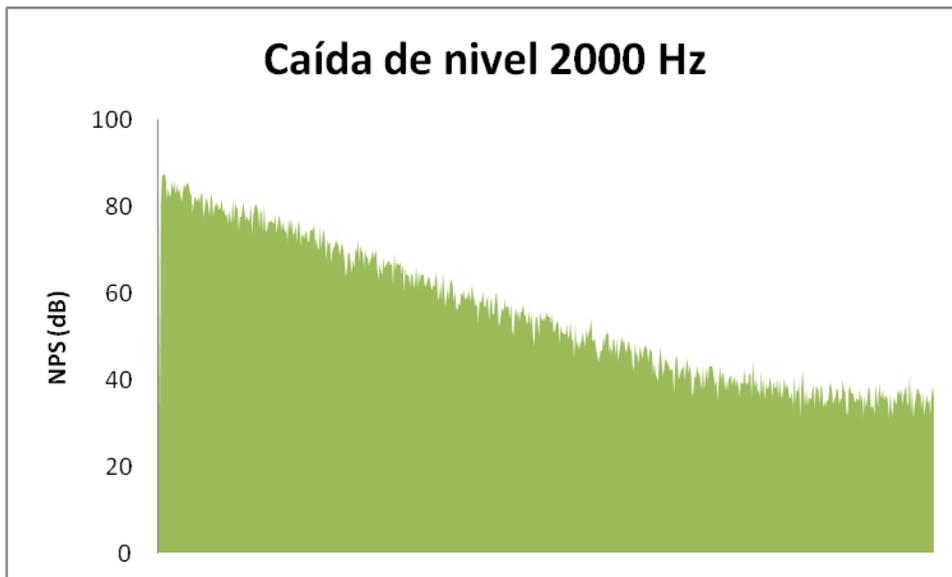


Figura 6.8: Caída de nivel de banda de tercio de octava de 2000 Hz.

6.3. DETERMINACIÓN DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DE LA CÁMARA REVERBERANTE EN ESTADO ESTACIONARIO

La respuesta en frecuencia permite conocer el comportamiento del sistema acústico de la sala. Para la cámara reverberante es: la sala, cajas acústicas y elementos difusores. De forma consecuente, se determinan los modos normales de la cámara reverberante en un determinado rango de frecuencias.

Las medidas de tiempo de reverberación fueron trabajadas con ruido en estado estacionario (en el comienzo), que altera a todo el sistema acústico al ser excitado.

El análisis del sistema acústico consistió en efectuar mediciones que determinen su alteración. Esto significa observar el comportamiento de los elementos difusores, cajas acústicas y la sala, es decir, las mediciones se realizaron emitiendo tonos puros en estado estacionario al sistema.

Los elementos difusores que posee la cámara (Figura 6.9) son planchas de acero de 2 mm de espesor que se encuentran con apoyos fijos en dos de sus lados, y éstos vibran en el momento que son excitados.



Figura 6.9: Elementos difusores de la cámara reverberante.

Por lo tanto, se hizo imprescindible hacer un análisis del comportamiento de la cámara reverberante en estado estacionario para conocer el comportamiento de la cámara, como también de los elementos difusores. Para esto se hicieron tres tipos de mediciones; de

vibración de elementos difusores, respuesta en frecuencia de los parlantes y respuesta en frecuencia de la cámara reverberante.

6.3.1. Equipamiento utilizado

Para las tres mediciones se utilizó el siguiente equipamiento:

- 2 cajas acústicas Sansui SPX 9000.
- Ecualizador: DOD 231series II.
- Amplificador Sansui R-70
- Sonómetro integrador Larson Davis 824
- Generador de señales Larson Davis SRC20

6.3.2. Medición de vibración de los elementos difusores

La medición identifica a los elementos difusores que más vibran dentro del rango de frecuencia de 60 Hz a 204 Hz.

El procedimiento utilizado es sencillo; se emitieron tonos puros con los parlantes que posee la cámara, dejándose estabilizar por 5 segundos aproximadamente. El registro comenzó desde la frecuencia de 60 Hz hasta los 204 Hz de una en una; luego se identificaron la o las frecuencias en el cual los elementos difusores vibran. Este seguimiento se hizo de forma auditiva (la vibración del elemento difusor eleva los niveles de ruido y se hace notorio en la audición).

No todos los elementos difusores vibraron en el rango de frecuencias dado, algunos vibraban en dos frecuencias y otros en determinado rango no lo hacían. También hubo otros que se excitaron en una misma frecuencia (tres difusores), como también elementos difusores de muy similares dimensiones que tenían distintas frecuencias de vibración o que uno de ellos simplemente no lo hacía o era poco perceptible.

En las siguientes figuras (Figuras 6.10, 6.11, 6.12 y 6.13) se asignan nombres a los elementos difusores según el muro en que se encuentran en la cámara reverberante.

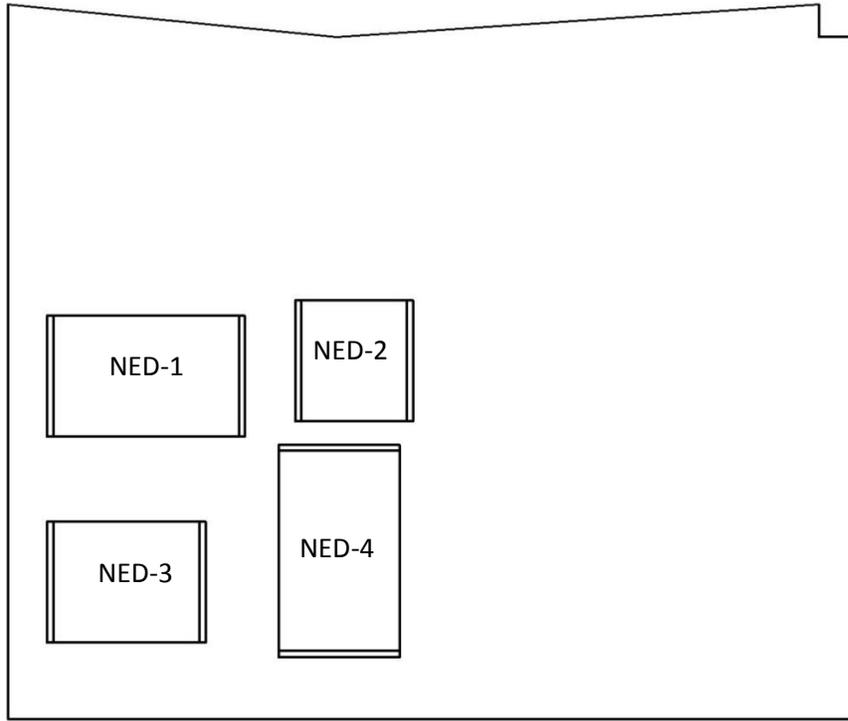


Figura 6.10: Elementos difusores del muro norte.

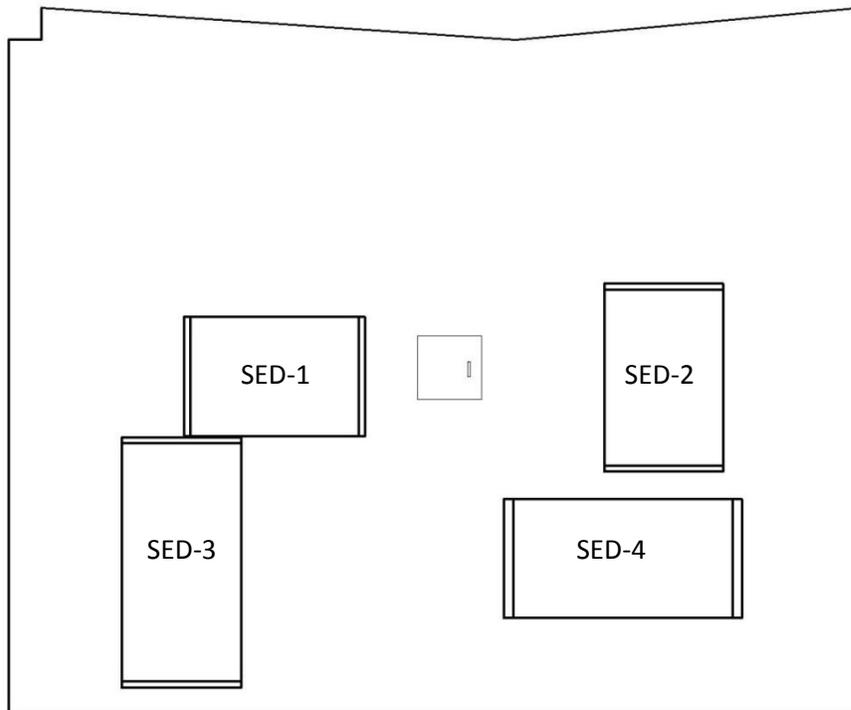


Figura 6.11: Elementos difusores del muro sur.

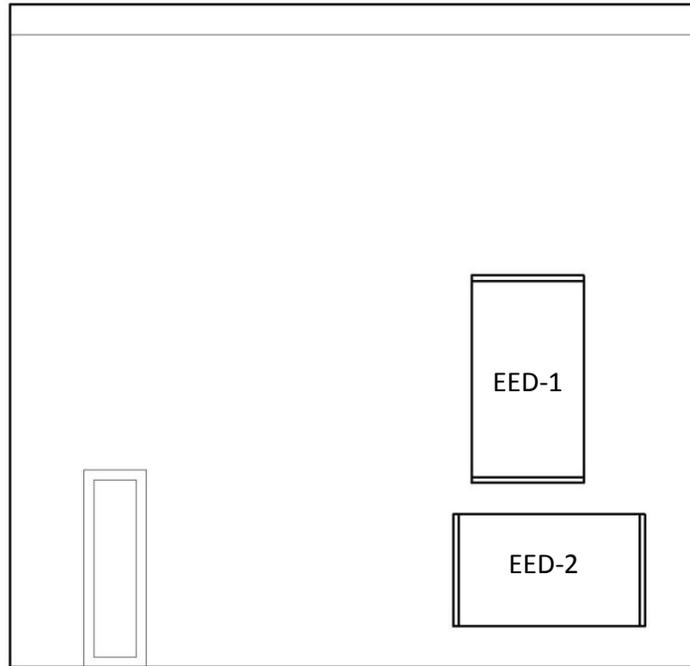


Figura 6.12: Elementos difusores del muro este.

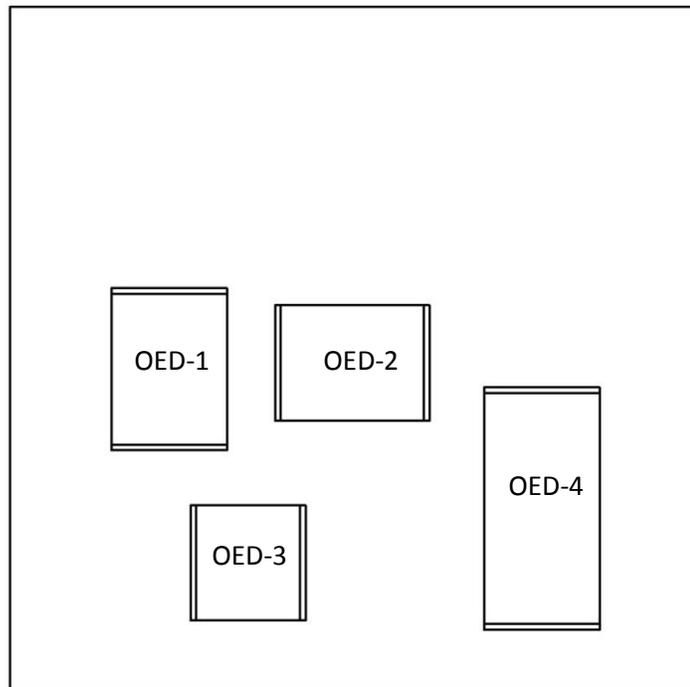


Figura 6.13: Elementos difusores del muro oeste.

La Tabla 6.2 detalla la frecuencia en que lograron vibrar los elementos difusores en el rango de frecuencias de 60 a 204 Hz.

Tabla 6.2: Frecuencia en la cual vibran los elementos difusores en estado estacionario.

Muro	Elemento Difusor	Frecuencia de vibración (Hz)
Muro Norte	NED-2	116
	NED-2	183
Muro Sur	SED-1	166
	SED-3	183
Muro Este	EED-1	108
	EED-1	200
Muro Oeste	OED-3	183
	OED-4	113

6.3.3. Medición de respuesta en frecuencia de los parlantes en campo libre

Esta medición determina la respuesta en frecuencia de los parlantes para referenciar el comportamiento de la cámara reverberante. Por lo tanto, se midió la respuesta de las dos cajas acústicas en campo libre emitiendo tonos puros desde 60 Hz hasta los 204 Hz de una en una, y dejándose estabilizar.

La cadena electroacústica que se utilizó en el procedimiento se muestra en la Figura 6.14, parte del equipamiento usado se muestran en las Figuras 6.15 y 6.16.

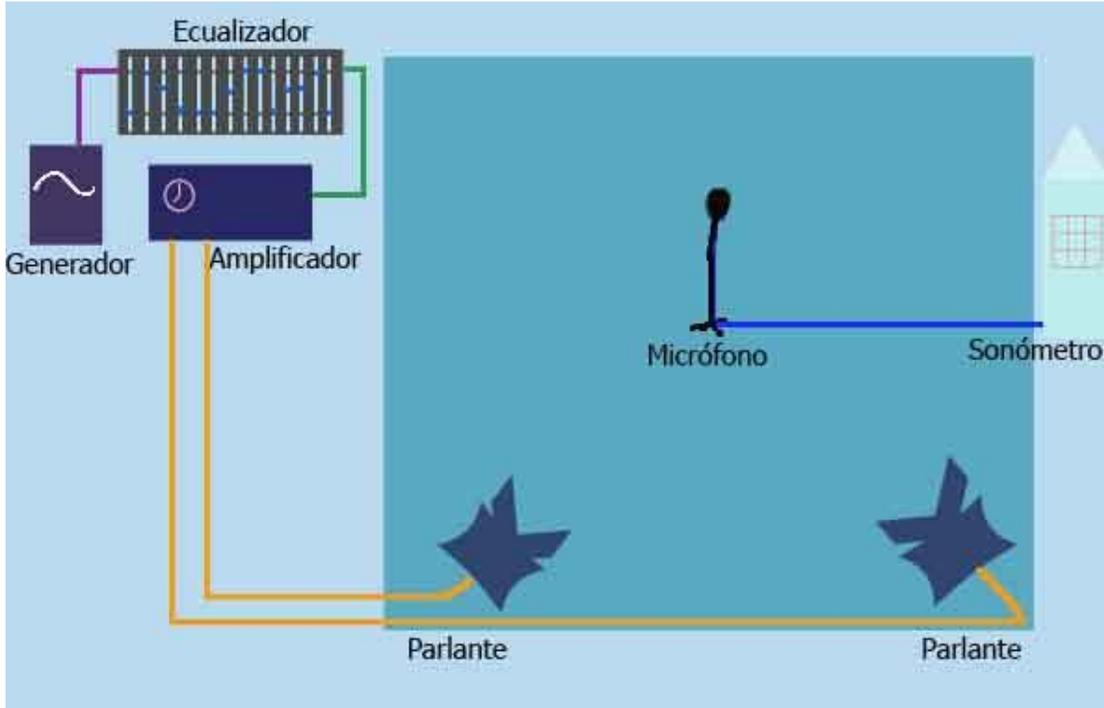


Figura 6.14: Esquema electroacústico de medición de respuesta en frecuencia de los parlantes.



Figura 6.15: Equipamiento; generador de ruido, ecualizador y amplificador.



Figura 6.16: Sonómetro integrador Larson Davis 824.

El montaje se realizó en un predio de la Comuna de Los Cerrillos, Santiago, alejado de los muros, tráfico vehicular y actividad que pueda influir en la medición acústica.

El micrófono del sonómetro se localizó a 4,3 metros de cada parlante y a 1,4 metros de altura, como muestra la Figura 6.17. Los parlantes fueron montados sobre unos trozos de lana de vidrio con el fin de no producir vibraciones entre el parlante y la loza que pueda interferir la medición (véase Figura 6.18).

La emisión de tonos puros debía superar el nivel de ruido de fondo que en ese instante era de 51 dB, los niveles de ruido registrados por el sonómetro son anotados en una planilla para posteriormente graficarlos, esto se muestra en el Anexo A.2, en la Tabla A.3.



Figura 6.17: Ubicación del micrófono del sonómetro Larson Davis 824.



Figura 6.18: Ubicación de las cajas acústicas puestas sobre lana de vidrio.

La respuesta en frecuencia de ambos parlantes es superior al ruido de fondo, la curva de respuesta del sistema de ambas cajas acústicas se muestra en la Figura 6.19.

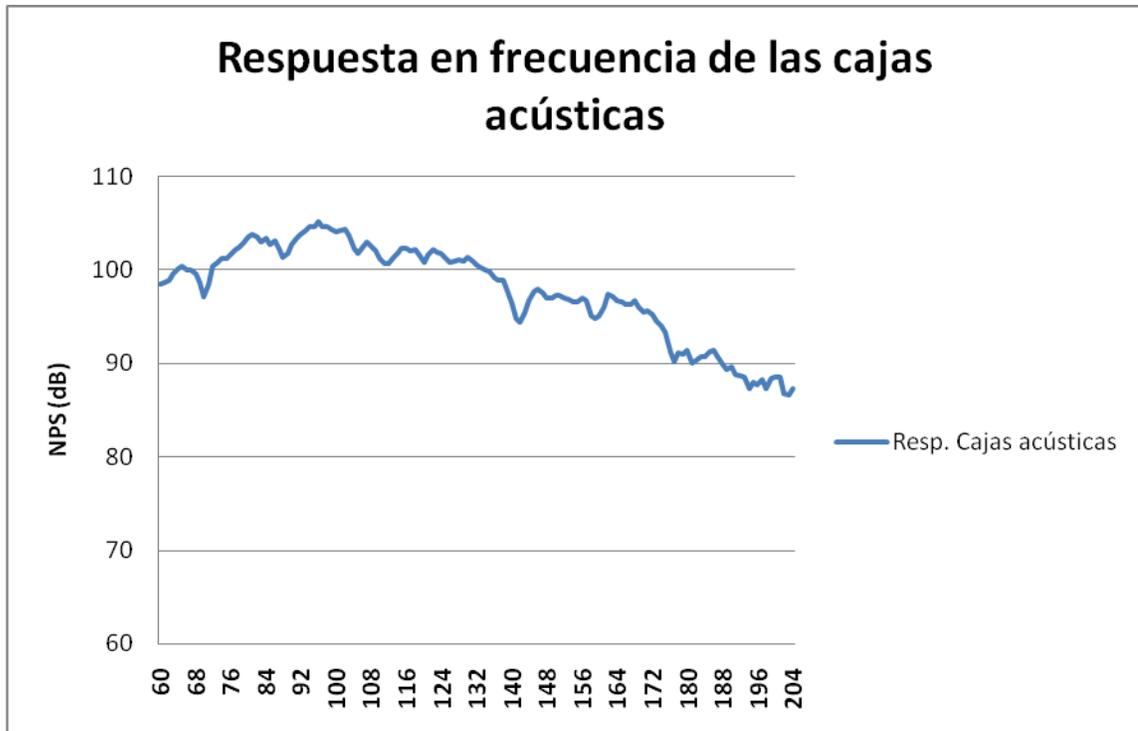


Figura 6.19: Respuesta en frecuencia de los dos parlantes desde los 60 hasta los 204 Hz.

6.3.4. Medición de respuesta en frecuencia de la cámara reverberante

Esta medición tiene el fin de encontrar los modos normales más significativos del sistema, y determinar si existe influencia en la vibración de los elementos difusores con la respuesta de la sala en estado estacionario.

El montaje de la medición de respuesta en frecuencia dentro de la cámara reverberante es similar al mostrado en la Figura 6.14, incluyendo los equipos y cadena electroacústica, diferenciando solo la distancia del micrófono a los parlantes. Se escogieron tres puntos a alturas distintas de la cámara, como muestra la Figura 6.20. La Tabla 6.3 muestra la altura del micrófono en cada punto. La Figura 6.21 muestra la localización y la distancia en metros del punto de ubicación del micrófono desde los muros Este y Sur (los únicos que presentan unión perpendicular). Los parlantes se fijaron en la base de las esquinas NO (noroeste) y SO (suroeste) para los tres puntos en cuestión, como muestra la Figura 6.20 (de la misma manera en que se realizan los ensayos de absorción de materiales).



Figura 6.20: Posición del micrófono para el punto P3.

Tabla 6.3: Altura del micrófono para los tres puntos de medición.

Punto	Altura (m)
P1	1,76
P2	3,12
P3	4,16

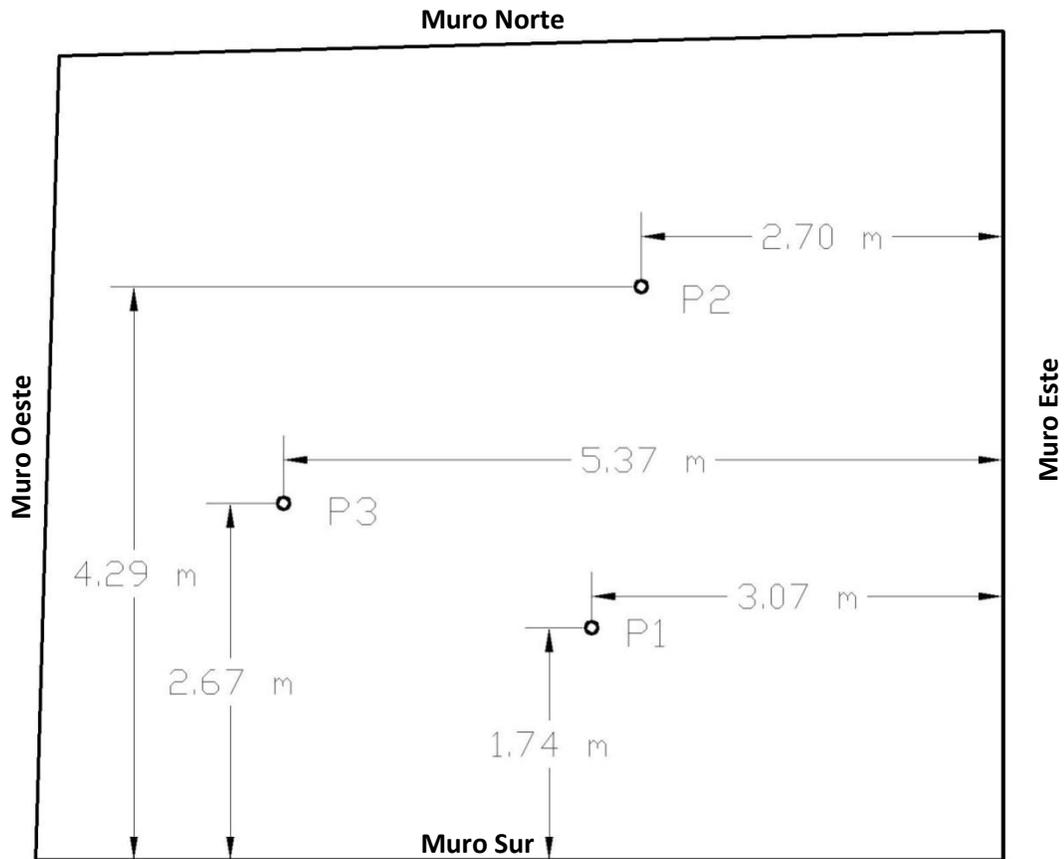


Figura 6.21: Posición de los puntos P1, P2 y P3 en la base de la cámara reverberante.

En cada punto se instaló el micrófono del sonómetro Larson Davis 824, luego se emitieron tonos puros por los parlantes desde la frecuencia de 60 Hz hasta los 204 Hz, una por una estabilizándose en cada frecuencia por 7 segundos aproximadamente. Por último, se registraron los niveles de presión sonora (dB) y se graficaron.

Los datos registrados y gráficos de la respuesta en frecuencia de la cámara reverberante en los puntos P1, P2 y P3 se muestran en el Anexo A.2 en las Tablas A.4, A.5 y A.6 y Figuras A.2, A.3 y A.4 respectivamente.

6.4. MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE DIFUSIVIDAD ACÚSTICA

Para determinar el índice de difusividad acústica en la cámara reverberante se utilizó el método mencionado en la sección 4.3.

6.4.1. Equipamiento utilizado

Para la medición en ambas cámaras (anecoica y reverberante) se utilizó el mismo equipamiento, a excepción del computador que, para los dos casos, fue conectado a una interfaz de sonido; entonces no hay alteración de resultados en dichas mediciones. Por lo tanto, el equipamiento utilizado es el siguiente:

- Reproductor de CD y CD de ruidos acústicos: *“Ruidos básicos para mediciones acústicas”*
- Ecuador: *DOD 231series II*
- Amplificador: *TASCAM, PA-20 Mk II Dual Ampli*
- Fuente omnidireccional
- Micrófono bidireccional: *RODE NT2-A*
- Base giratoria de 0,75 rpm
- Interfaz de sonido: *M-AUDIO, Fast Track Pro*
- Computador, Software: *“Cool Edit Pro 2.0”*

El montaje del equipamiento para ambas cámaras se muestra en la Figura 6.22.

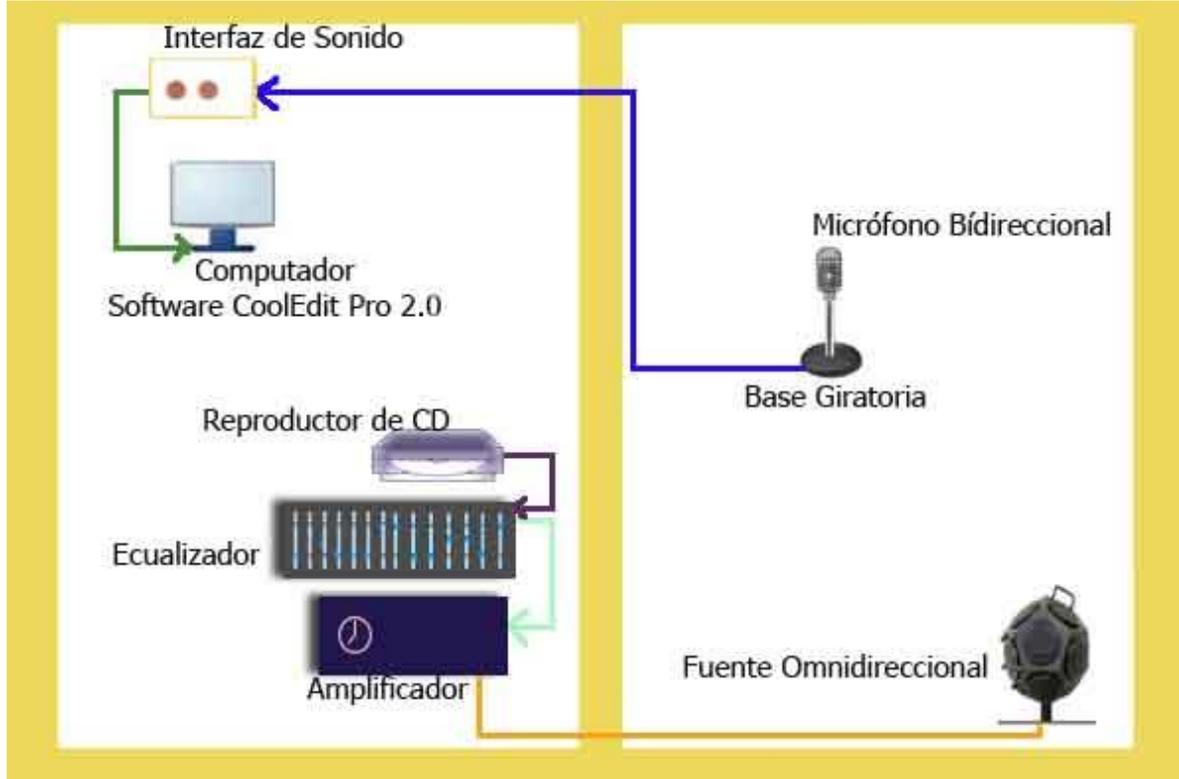


Figura 6.22: Montaje electroacústico para mediciones en ambas cámaras.

6.4.2. Lugares de medición del diagrama polar del micrófono bidireccional

Las mediciones se realizaron en la cámara anecoica del Instituto de Acústica de la Universidad Austral de Chile y en la cámara reverberante Idiem (sala en el cual se estudia su difusividad) de la Universidad de Chile. En el primer lugar se hizo la medición de referencia, que es el diagrama polar representativo del micrófono, y en el segundo la medición de evaluación, en el cual el diagrama polar se alteró producto de la difusión de la cámara.

Las bandas de frecuencias de tercio de octava en estudio fueron las siguientes: 100, 125, 160 y 200 Hz.

Para las mediciones en ambas cámaras se dispusieron de los equipos según el método descrito en la sección 4.3.2.

Se generó ruido blanco filtrado mediante un ecualizador gráfico para cada banda de frecuencia que se menciona anteriormente y luego fue amplificado (Figura 6.23) para así

excitar la fuente omnidireccional de la Figura 6.24. La señal sonora fue percibida por el micrófono bidireccional de la Figura 6.25 que gira en su eje vertical a una velocidad de 0,75 rpm (revoluciones por minutos, ver Figura 6.26). Es decir, que 80 segundos fue tiempo suficiente para percibir con claridad la respuesta del micrófono. La señal captada por el micrófono fue registrada por la interfaz de sonido; ésta fue enviada y grabada directamente a un computador mediante el software Cool Edit Pro 2.0 a una frecuencia de muestreo de 44100 Hz y con un nivel de cuantificación de 16 bits (véase Figura 6.27 y 6.28). Finalmente la señal se grabó en un formato .wav para luego ser analizada.



Figura 6.23: Equipo ecualizador, amplificador y reproductor de CD.



Figura 6.24: Fuente omnidireccional.



Figura 6.25: Micrófono bidireccional Rode NT2-A.



Figura 6.26: Base giratoria de 0,75 rpm.



Figura 6.27: Interfaz de sonido M-Audio Fast Track Pro.



Figura 6.28: Computador, software Cool Edit Pro 2.0.

6.4.3. Consideraciones para la medición en la cámara anecoica

El micrófono se montó a 1,5 m de altura sobre una base giratoria, la fuente omnidireccional se ubicó en una esquina de la cámara a una distancia de 3,48 m y a una altura (centro de la fuente) de 0.5 m, ver Figura 6.29.



Figura 6.29: Medición en cámara anecoica.

6.4.4. Consideraciones para la medición en la cámara reverberante

A diferencia de las mediciones realizadas en la cámara anecoica, el micrófono se situó en el centro de la sala, a 3,8 m de la fuente y ésta en una de las esquinas de la cámara (NE), como muestra la Figura 6.30.



Figura 6.30: Medición en cámara reverberante.

7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

7.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo describe la continuidad analítica de los resultados conseguidos, se detalla el comportamiento acústico mediante los datos registrados y se comparan los enunciados hechos por los autores citados, en relación a los resultados obtenidos.

7.2. ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DIMENSIONALES DE LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM

La geometría de la cámara reverberante garantiza un campo sonoro difuso. Según los autores Kuttruff, Schulz y la normativa ISO 354 ([Kuttruff, 1981], [Schultz, 1971] y [ISO 354, 2003] respectivamente) una cámara reverberante debe contemplar muros no paralelos, incluyendo el cielo y el piso. En caso de que la difusión sonora sea deficiente, según los autores Cox y D'Antonio [Cox y D'Antonio, 2004], Schultz y la normativa ISO 354, una de las contribuciones para mejorar las cualidades acústicas de una cámara reverberante es la introducción de elementos difusores.

La frecuencia de Schroeder es una medida estadística y es aplicable para todo tipo de sala. Una cámara reverberante posee condiciones físicas extremas, en éste caso; volumen y tiempo de reverberación, por lo tanto la frecuencia de Schroeder va a diferir en otro recinto con el mismo volumen.

La frecuencia de Schroeder calculada para la cámara reverberante Idiem fue 362,8 Hz (ver sección 5.4.2), por lo tanto, las bandas de frecuencias que se estudian se encontraron en la región modal y la respuesta en frecuencia en esta región presentó varias fluctuaciones debido a que los modos normales se encontraron más separados (en la sección 7.3.3 se grafica la respuesta en frecuencia entre los 60 a 204 Hz).

De forma similar, la constante de decaimiento de la banda de frecuencia de 500 Hz (característica) y de 400 Hz fueron 0,827 Hz y 0,779 Hz respectivamente, en ésta última se ubica la frecuencia de Schroeder. Ambos valores aproximan la naturaleza de la respuesta en frecuencia de la cámara reverberante.

El libre camino medio resultante fue 4,16 metros. Considerando que la longitud mínima entre muros opuestos de la cámara reverberante es 6,02 metros, el resultado revela que los tipos de reflexión sonora de los modos normales son tangenciales u oblicuos [Beranek, 1954], por lo tanto el sonido reflejado viaja entre muros adyacentes (incluyendo cielo y piso).

El radio reverberante obtenido fue 0,311 metros. El valor muestra una distancia de interés para todo tipo de mediciones, es decir, determina una distancia mínima entre la fuente sonora y el micrófono para la realización de ensayos y le atribuye calidad a la cámara reverberante, sobrevalorando la distancia permisible que establece la normativa entre fuente y micrófono, que es de 2 metros como mínimo [ISO 354, 2003].

7.3. VALORES ACÚSTICOS MEDIDOS

7.3.1. Tiempo de reverberación y absorción sonora de la cámara reverberante

Tiempo de Reverberación: La cámara reverberante Idiem presentó tiempos de reverberación favorables y acordes a los exigidos por la normativa internacional ISO 354, inclusive considerando la corrección de la desviación estándar. La desviación estándar fue significativamente mayor en la banda de frecuencia de 125 Hz; en las bandas posteriores ésta fue menor al igual que los tiempos de reverberación, por lo tanto, la relación porcentual entre ellos resultó ser aparentemente engañosa para las bandas de frecuencias altas. La Figura A.1 del Anexo A.1 muestra los errores porcentuales de las 18 mediciones de tiempo de reverberación de la cámara reverberante, para cada banda de frecuencia.

Absorción Acústica de la Cámara Reverberante: El cálculo de absorción acústica se efectuó de acuerdo a la ecuación Ec 4.4 y Ec 4.7 (sin considerar el coeficiente de atenuación de energía), para una velocidad de propagación del sonido de 344 m/s y los datos de la Tabla 6.1. Los valores del coeficiente de absorción acústica de la superficie de la cámara reverberante se muestran en la Tabla 7.1 y graficados en la Figura 7.1.

Tabla 7.1: Coeficiente de absorción acústico de la cámara reverberante Idiem.

Frecuencia (Hz)	Coeficiente de absorción (α)
100	0,023
125	0,021
160	0,018
200	0,018
250	0,019
315	0,018
400	0,019
500	0,020
630	0,020
800	0,020
1000	0,021
1250	0,022
1600	0,024
2000	0,028
2500	0,032
3150	0,038
4000	0,047
5000	0,058

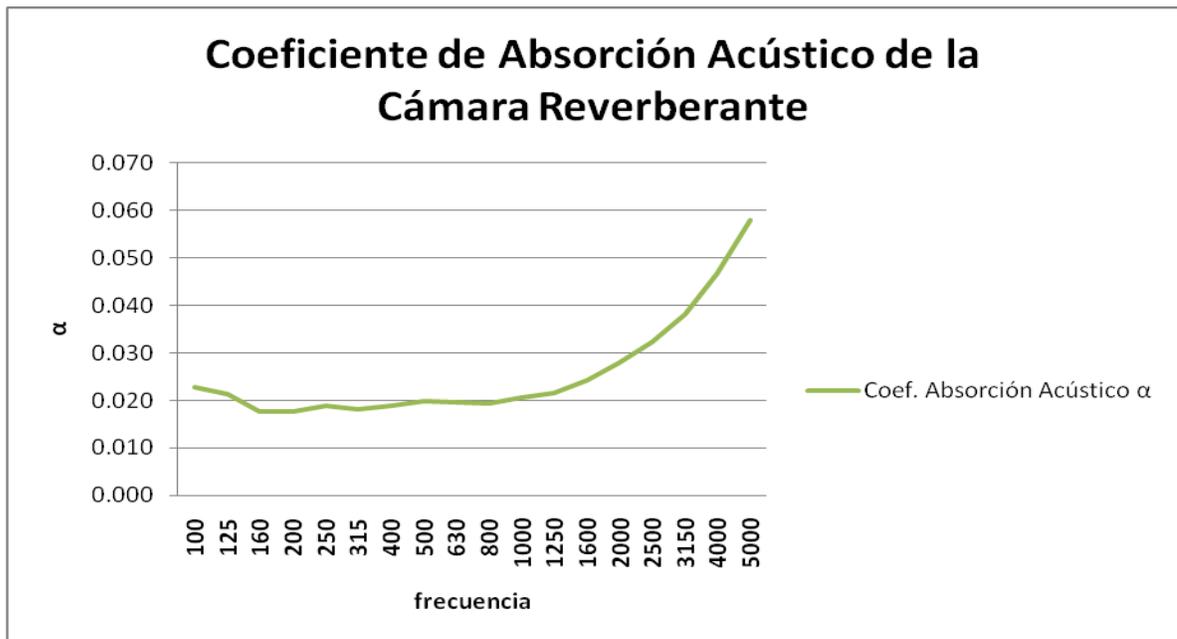


Figura 7.1: Valores del coeficiente de absorción acústico en todas las bandas de frecuencia.

Los valores de absorción son bajísimos y satisfacen la alta capacidad de reflexión que tiene la cámara. El registro y cálculo de los valores se realizó sin ningún otro tipo de instrumentación o datos; frente a esto, los valores de α pudieron diferir en las frecuencias altas producto de las condiciones ambientales presentes en el momento de medición. Sin embargo, el trabajo contempló el estudio de las bandas de frecuencia bajas.

7.3.2. Curvas de decaimiento

La dinámica de las caídas de tiempo de reverberación que mostraron los gráficos de las Figuras 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7 y 6.8 para las bandas de frecuencia en estudio, fueron muestras representativas del comportamiento del sonido en la cámara reverberante. El análisis de éstas se procedió a observar de forma visual.

La curva de decaimiento para la banda de frecuencia de 100 Hz tuvo la particularidad que fluctuó notoriamente en pequeños intervalos de tiempo y también en intervalos más grandes (se observan varios peaks que forman un monte). En la banda de frecuencia de 125 Hz se observó las mismas fluctuaciones anteriores y se distinguió una doble pendiente en el decaimiento (o pendiente irregular). Esta fue la banda de frecuencia con la caída de energía más deforme, casualmente es la que tuvo el mayor error porcentual en los valores de tiempo de reverberación (13% aprox).

Las fluctuaciones en las caídas para el resto de las bandas aún se hicieron presentes, pero el intervalo entre peak a peak disminuye haciendo que la fluctuación sea más compacta, es decir, la curva de decaimiento es más lineal y se puede trazar una pendiente T30. La fluctuación presente en las primeras dos bandas de frecuencia y la pendiente irregular en la banda de 125 Hz se consideraría como bandas con campo sonoro difuso deficiente según los criterios de los autores Randall y Ward [Alton, 2001] de la sección 4.4.1.

Los gráficos de las bandas de 1000 y 2000 Hz (Figura 6.7 y 6.8 respectivamente) mostraron regularidad en las caídas, por lo que es fácil promediar una pendiente de a lo menos 30 decibeles. Ambas bandas de frecuencias obtuvieron un error porcentual menor al 4%, (diferencias menores a 0,4 segundos). Por ello, las formas de las caídas de nivel de estas bandas de frecuencias pueden servir de referencias.

7.3.3. Respuesta en frecuencia

Análisis de la vibración de los elementos difusores: La manera de obtener los resultados de forma auditiva supone poca precisión en los resultados, por lo cual, solo

se registraron datos cuando los valores de frecuencia fueron claramente notorios en vibración (Tabla 6.2), dejando de lado las vibraciones menores de los elementos difusores. Si bien, la experiencia careció de un respaldo teórico, de igual forma esclarecería el comportamiento e influencia vibratoria de los elementos difusores en el sistema acústico de la cámara reverberante.

Los elementos difusores vibraban a diferentes frecuencias como se muestra en la Tabla 6.2, no así los elementos difusores NED-2 y EED-1 que obtuvieron dos frecuencias de vibración cada uno. No obstante, de forma coincidente los difusores SED-3, NED-2 y OED-3 obtuvieron una frecuencia de resonancia en común (183 Hz), siendo que el primero de ellos sea de dimensiones diferentes a los otros.

Respuesta en frecuencia de la cámara reverberante e influencia de los elementos difusores: La sección 6.3.4 mostró la medición de respuesta en frecuencia del recinto. Los resultados de cada punto se muestran en Anexo A.2 en la Tabla A.4, A.5 y A.6 y graficados en la Figura A.2, A.3 y A.4 (para los puntos P1, P2 y P3 respectivamente). Adicionalmente, se grafica la respuesta en frecuencia de cada punto con la respuesta promedio en la Figura A.5. Esta última respuesta es obtenida mediante un promedio aritmético de los tres puntos, y se grafica en la Figura 7.2.

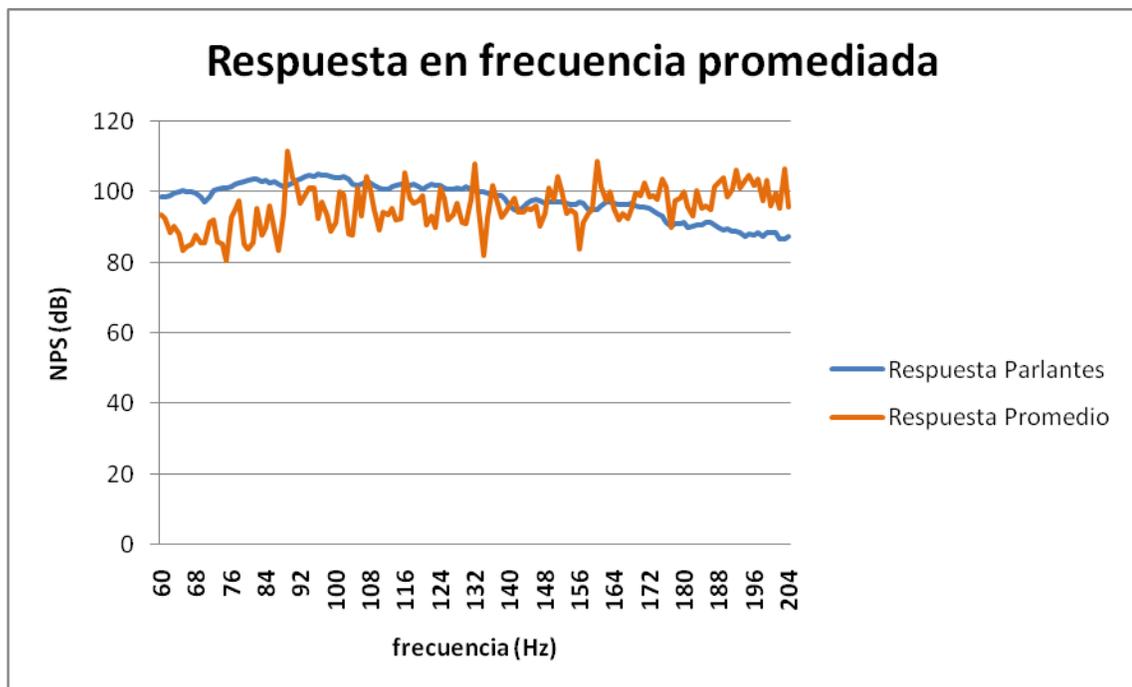


Figura 7.2: Respuesta en frecuencia (promedio aritmético de tres mediciones).

La respuesta en frecuencia de la Figura 7.2 muestra los modos normales y valles de todo el espacio geométrico de la cámara reverberante, y la curva de respuesta de los

parlantes medidos en campo libre. Esta última respuesta obtuvo mayores niveles de presión sonora que la respuesta promedio, porque los niveles de ruido de fondo de la cámara reverberante no superaban los 41 dB, y no fue necesario esforzar los parlantes.

Al comparar la curva promedio de la Figura A.5 con la Tabla 6.2, se observa que; la vibración de los elementos difusores de la cámara reverberante se percibió levemente. La curva distingue máximos en las frecuencias 108 y 116 Hz correspondiente a la frecuencia de vibración de los difusores EED-1 y NED-2 respectivamente. Para el resto de los elementos difusores (de la Tabla 6.2), se observó un leve aumento en la curva promedio de los niveles de presión sonora.

La curva promedio de la Figura A.5 muestra peaks de gran similitud con las tres curvas principales (mediciones en P1, P2 y P3). Este fenómeno se observa en las frecuencias 78, 89, 132, 151, 160 Hz entre otros, donde la curva de respuesta promedio se acomoda con las demás curvas con coincidencias de amplitud de hasta 25 decibeles.

Los modos normales que muestra la Figura 7.2 (respuesta promedio) son en parte alterados por la respuesta del sistema de las cajas acústicas, y no especifica la respuesta en frecuencia del sistema de la cámara reverberante. Al diferenciar los niveles de ambas curvas se esclarece la respuesta en frecuencia de la cámara, como muestra la Figura 7.3.

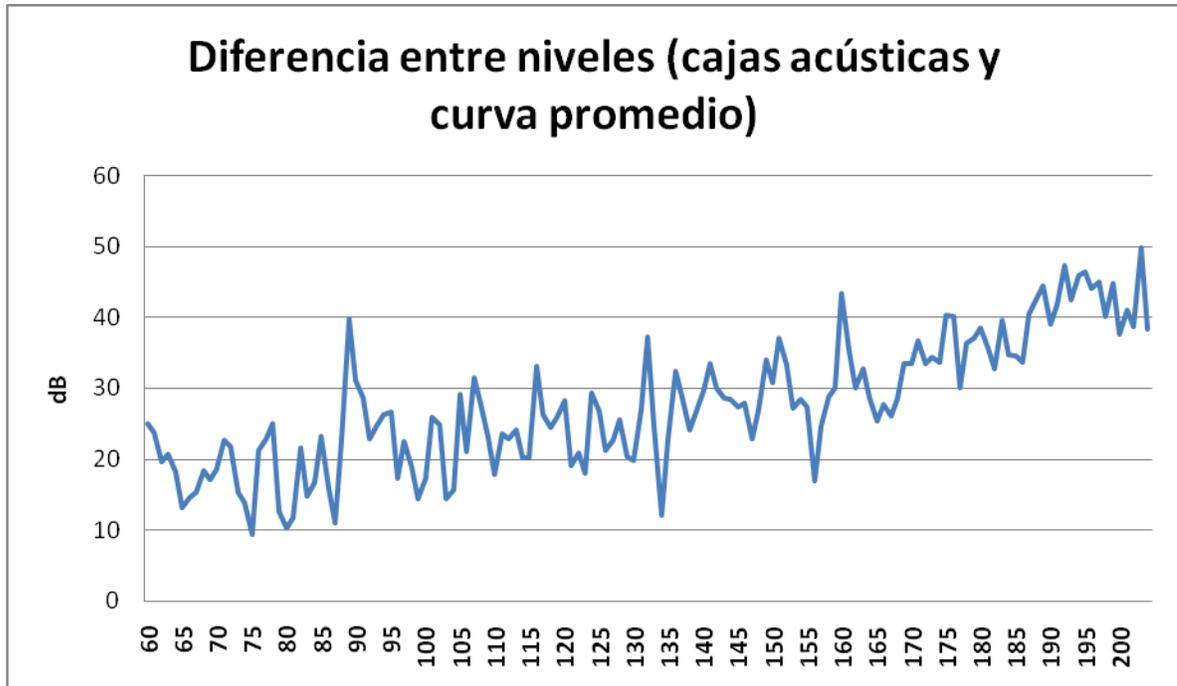


Figura 7.3: Respuesta en frecuencia de la cámara reverberante Idiem (diferencia de nivel de cajas acústicas con curva promedio).

La diferencia de las curvas muestra los modos normales de la cámara reverberante con variaciones que superan los 10 decibeles con respecto a las frecuencias próximas (78, 89, 132, 151, 160 Hz), y fluctuaciones que son habituales en salas con paredes descubiertas (sin material absorbente) [Beranek, 1954]. Por último, los modos normales son más compactos a medida que la frecuencia aumenta. Esto concuerda con las observaciones realizadas por Kuttruff en la sección 3.10 [Kuttruff, 2007].

7.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA DIFUSIÓN ACÚSTICA DE LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM

7.4.1. Análisis de medición de difusión sonora utilizando el método de Furduev y T'ung

Los datos de las mediciones realizadas en la sección 6.4 se registraron mediante un computador; estos se sometieron a evaluaciones y correcciones para permitir que los diagramas polares estén acordes al método empleado por sección 4.3. La corrección tuvo el fin de ajustar el diagrama polar y no variar el resultado.

Se efectuaron cinco mediciones para cada banda de frecuencia en cada laboratorio (cámara anecoica y cámara reverberante); de estas cinco se eligieron las mejores para analizarlas.

El giro del micrófono tardó 80 segundos. La señal que registra el computador posee un nivel de cuantificación de 16 bit y una frecuencia de muestreo f_s de 44100 muestras por segundos. Por lo tanto, cada medición (de una revolución) posee aproximadamente $44100 \times 80 = 3528000$ muestras. En cada medición se adicionaron unos segundos más (3 a 5 segundos de más, es decir más de 80 segundos de grabación).

El análisis de las mediciones se realizó mediante el software de programación *Matlab* [Mathworks, 2007a]. La señal captada fue filtrada digitalmente en bandas de frecuencia de tercio de octava según su correspondiente banda ya ecualizada en la medición. Se denotará como $x[n]$ a la señal.

El filtro utilizado es un demo de Matlab "*octavedemo.m*" que genera filtros para las bandas de tercio de octava de clase 1, orden 6 y de tipo *Butterworth*, según estándares internacionales ANSI S1.11-2004 [Mathworks, 2007b]; como muestra la Figura 7.4.

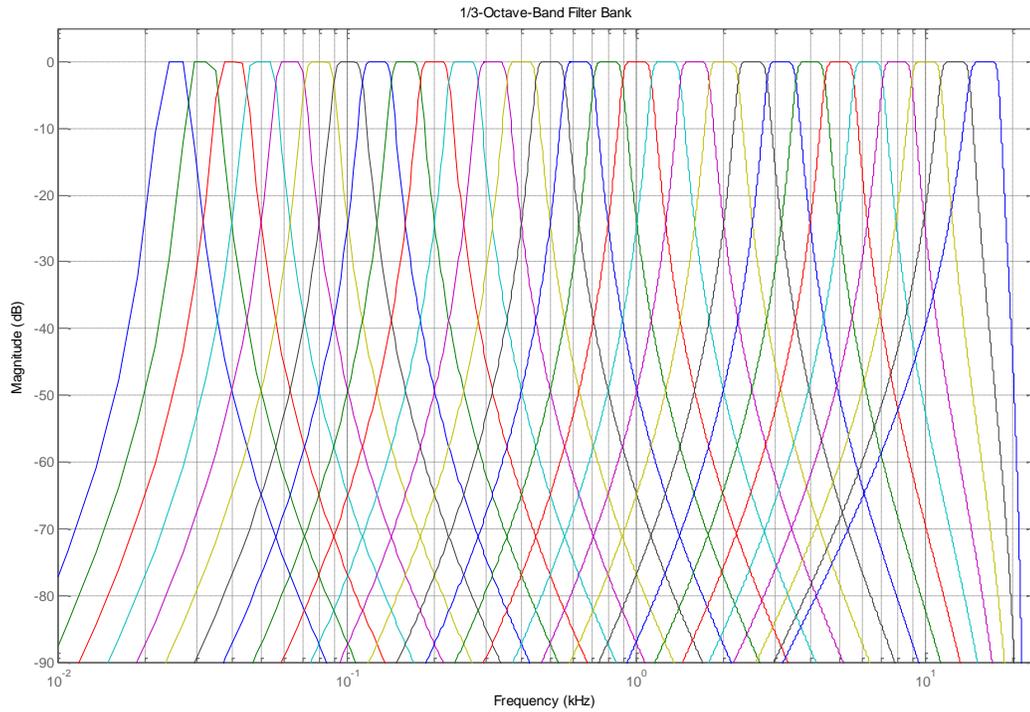


Figura 7.4: Magnitudes del filtro Butterworth en bandas de tercio de octava.

La señal filtrada es traspasada a una señal RMS, la cual posee un periodo de integración T de 200 msec. La señal resultante es conseguida mediante la expresión Ec 7.1, por lo tanto se trabaja con 400 muestras que representan los 80 segundos de registro.

$$x_{rms}[m] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=k}^{Nm} x[n]^2}, \text{ para } k = N(m-1)+1 \text{ (Ec 7.1)}$$

N es el número de muestras dado por $T \cdot f_s$ ($N= 8820$). La señal x_{rms} se presenta gráficamente en la Figura 7.5.

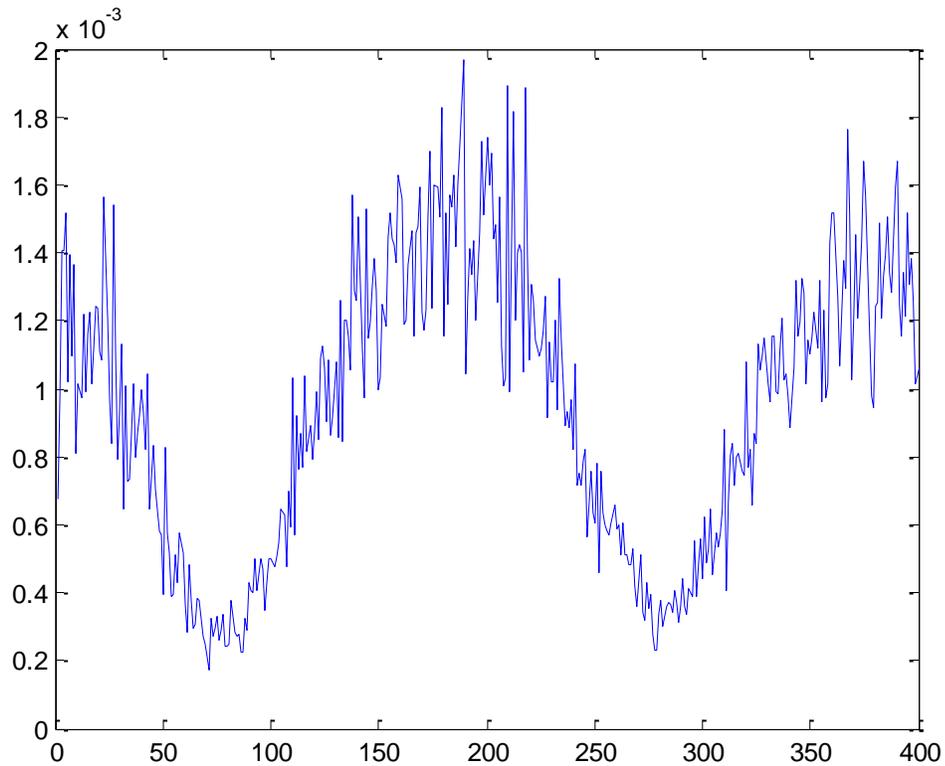


Figura 7.5: Señal x_{rms} de medición con 400 muestras.

La señal grabada mediante el computador presenta un estado transiente (al momento de iniciar el registro) que dura aproximadamente 0,5 seg, al igual que el filtro digital. Afortunadamente la señal resultante x_{rms} cuenta con más de 400 muestras (más de 80 segundos de grabación). Entonces, ésta señal se modifica agregándole nuevos valores a las primeras muestras (los primeros 0,5 seg). Estos valores fueron los últimos de la misma señal x_{rms} (corresponde a los valores de la misma posición del micrófono). Por lo tanto, los primeros n valores que se eliminaron son reemplazados por las últimas n muestras que excedieron los 400 valores como describe la Figura 7.6.

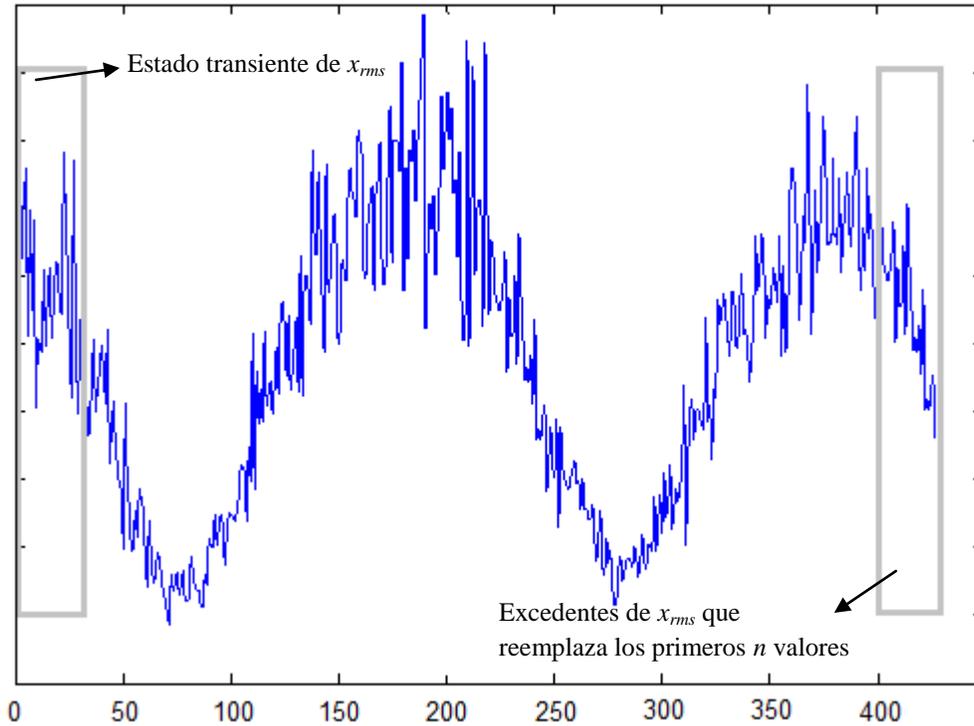


Figura 7.6: Señal x_{rms} con más de 400 muestras.

Como la señal x_{rms} tiene varias fluctuaciones, se realiza un promedio sucesivo para todos los valores, incluyendo el primero con el último valor. Esto consiste en promediar los valores $x_{rms}[m-1]$ y $x_{rms}[m+1]$ y asignárselo al valor $x_{rms}[m]$ como muestra la sucesión discreta Ec 7.2, con el fin de que el diagrama polar tenga una curva suave en todos los puntos.

$$x_{rms}[m] = \frac{(x_{rms}[m-1] + x_{rms}[m+1])}{2} \quad (\text{Ec 7.2})$$

A través de la función *polar* de Matlab, la señal x_{rms} es trazada en un diagrama polar. La Figura 7.7 muestra la secuencia de la transformación de la señal x_{rms} a un diagrama polar. En a) se observa la fluctuación de la señal original, mientras que en b) la fluctuación y el promedio sucesivo de los valores. Finalmente la Figura 7.8 muestra el diagrama polar resultante.

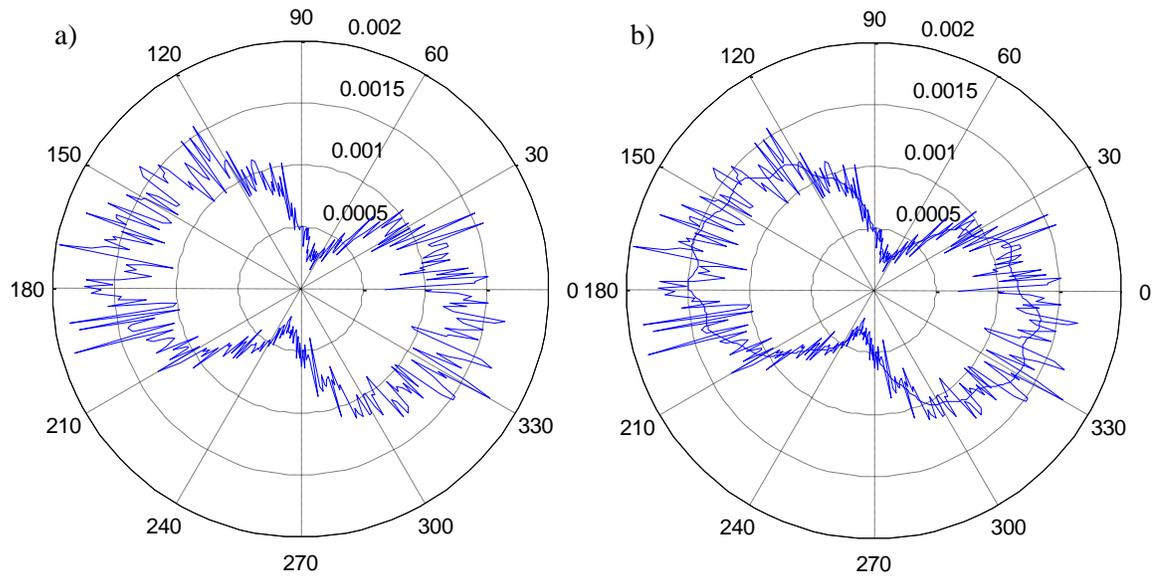


Figura 7.7: a) diagrama polar con fluctuaciones, b) diagrama polar promedio.

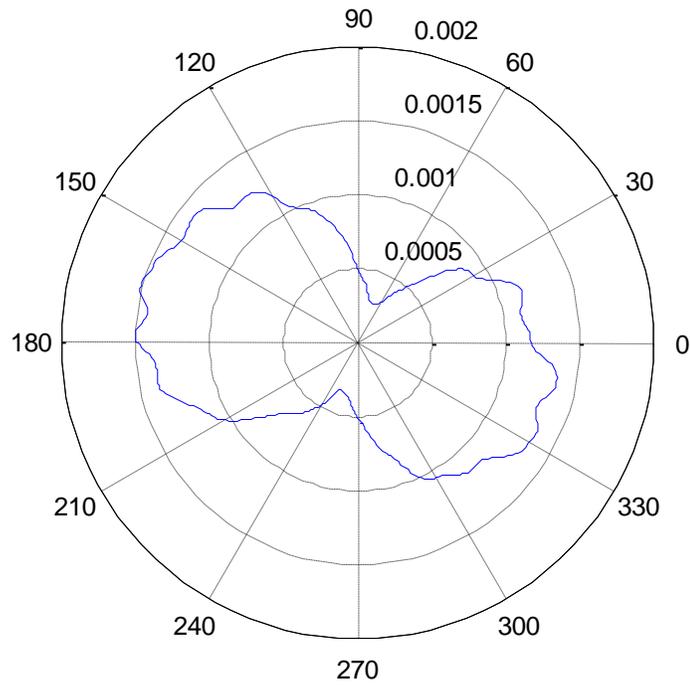


Figura 7.8: Diagrama polar de la señal x_{rms} .

Para comenzar con el registro de la medición, el micrófono se acomoda de forma manual, aun así, el ajuste frontal del micrófono con el parlante es impreciso (la posición frontal del micrófono se considera en los 0°). Por lo tanto, la señal se acomoda de tal manera que en el diagrama polar se muestren los ángulos de 0° y 180° con las mayores amplitudes de la señal; mientras que en los ángulos de 90° y 270° se muestre la menor amplitud aproximada. Para esto se desarrolla un algoritmo en Matlab que realice esta función el cual tenga una desviación cercana al $\pm 20^\circ$. El arreglo se observa en la Figura 7.9.

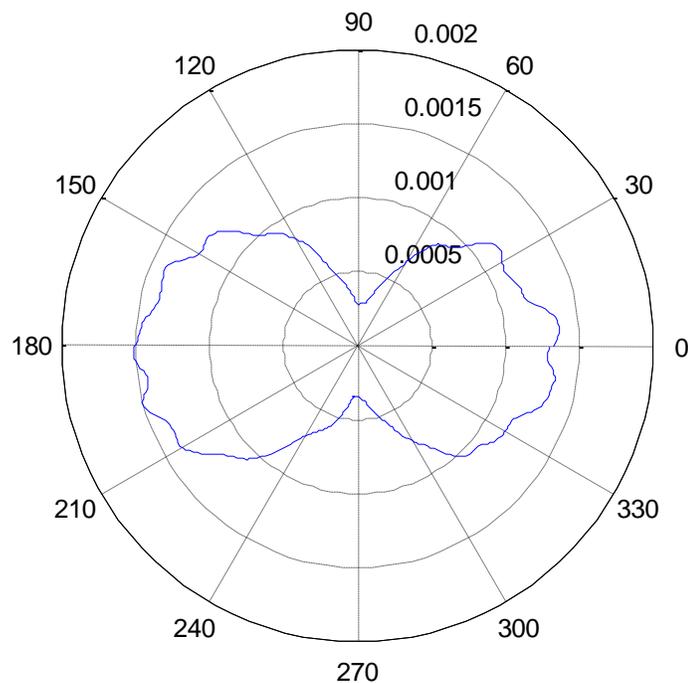


Figura 7.9: Ajuste de la señal x_{rms} en diagrama polar.

El ajuste permite que varias señales RMS, de una misma banda de frecuencia, se puedan promediar, considerando los diagramas polares que más conservan su forma. Así se obtienen los diagramas polares representativos del micrófono para las mediciones en ambos laboratorios.

Finalmente, la señal se normaliza para que ambas mediciones (referencia y evaluación) puedan ser comparables. Para realizar esta operación se ajusta la amplitud de la señal de evaluación a la señal de referencia, de forma que ambas señales se encuentren aproximadamente inscritas en un mismo círculo, como se menciona en la sección 4.3.5. Comúnmente se normaliza en el 0° , esta vez corresponde al valor máximo que presenta la medición de referencia definida como $x_{rms}(\alpha)$, con objeto de que ésta se encuentre en su totalidad inscrita en un círculo de radio unitario como se aprecia en la Figura 7.10. El

procedimiento de normalización se muestra en la fórmula Ec 7.3 con θ una variable angular del diagrama polar.

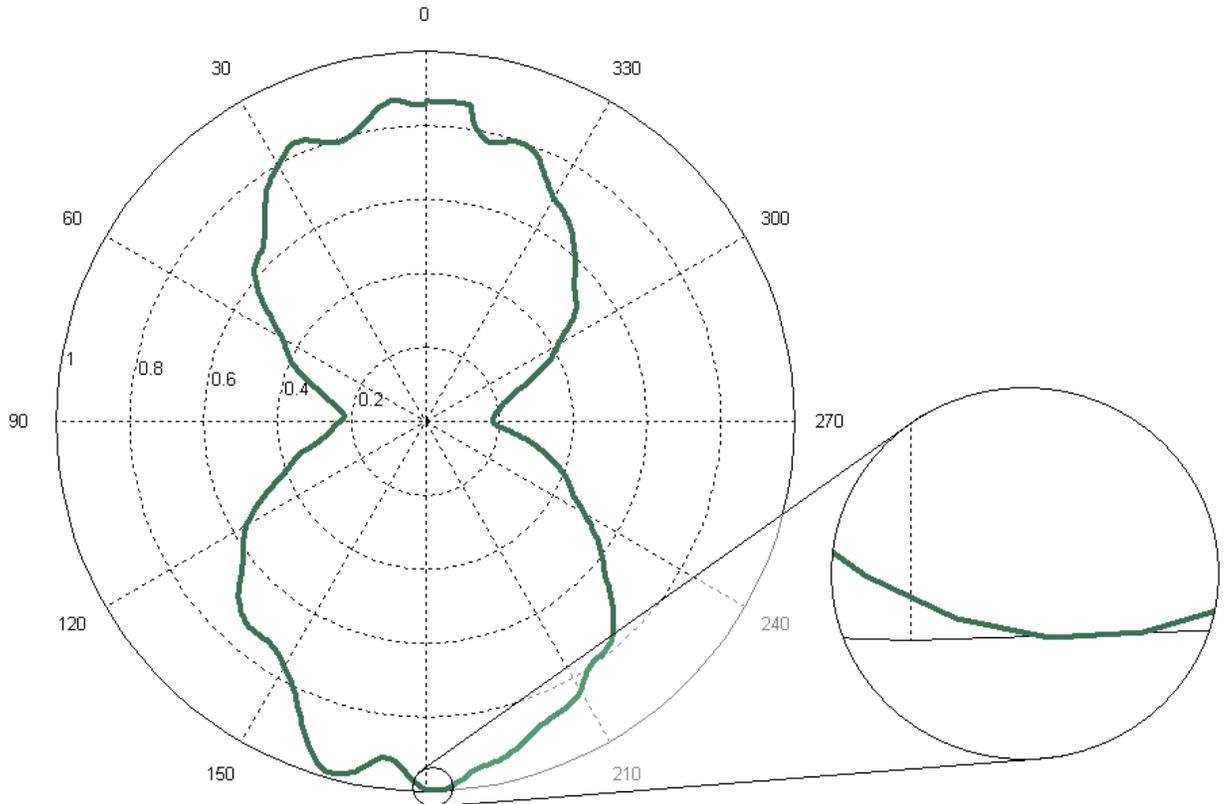


Figura 7.10: Normalización hecha en el mayor valor de la señal.

$$X(\theta) = \frac{x_{rms}(\theta)}{x_{rms}(\alpha)} \quad (\text{Ec 7.3})$$

La medición de evaluación definida como $\hat{x}_{rms}(\theta)$ también es normalizada dependiendo de la posición máxima de la medición de referencia $x_{rms}(\theta)$, es decir en el ángulo α (considerándose la misma banda de frecuencia). Por lo tanto, se considera el valor de $\hat{x}_{rms}(\alpha)$ para normalizar y dejar de forma proporcional ambos diagramas polares medidos. La normalización de ésta se consigue a través de la fórmula Ec 7.4.

$$\hat{X}(\theta) = \frac{\hat{x}_{rms}(\theta)}{\hat{x}_{rms}(\alpha)} \quad (\text{Ec 7.4})$$

Luego, la superficie ocupada por la medición de referencia S_0 en el diagrama polar se determina según muestra Ec 7.5.

$$S_0 = \frac{1}{2} \sum_{\theta=0}^{2\pi} X^2(\theta) \cdot \frac{2\pi}{400}$$

$$S_0 = \sum_{\theta=0}^{2\pi} X^2(\theta) \frac{\pi}{400} \quad (\text{Ec 7.5})$$

Donde el factor de 400 representa el número total de muestras de la señal x_{rms} .

De igual forma, la superficie que determina la medición de evaluación S , se determina según Ec 7.6.

$$S = \sum_{\theta=0}^{2\pi} \hat{X}^2(\theta) \cdot \frac{\pi}{400} \quad (\text{Ec 7.6})$$

Para un círculo de radio unitario el área es π , por lo tanto, el área que se busca es determinada por la diferencia entre π y el área del diagrama polar. Esto se muestra en las ecuaciones Ec 7.7 y Ec 7.8.

$$A_0 = \pi - S_0 \quad (\text{Ec 7.7})$$

$$A = \pi - S \quad (\text{Ec 7.8})$$

Estos valores son los que finalmente determinan el índice de difusividad acústica de la sección 4.3 y ecuación Ec 4.12.

Las mediciones del índice de difusión acústica realizado mediante el método de Furduev y T'ung se muestran en el Anexo A.3, en las Figuras A.6, A.7, A.8 y A.9 para las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100, 125, 160 y 200 Hz respectivamente. Las figuras detallan la medición del micrófono cuando es girado por su eje vertical, es decir, el patrón direccional corresponde a un plano horizontal de medición. La posición frontal del micrófono corresponde al ángulo 0° .

La Tabla 7.2 muestra los resultados de las áreas restantes de las figuras de cada banda de frecuencia, y el índice de difusividad acústico d de la cámara reverberante Idiem.

Tabla 7.2: Resultados del índice de difusividad acústica de la cámara reverberante Idiem.

Banda de frecuencia (3/8)	A_0	A	d
100	0,904	1,825	0,4116
125	1,32	2,3329	0,5561
160	1,3673	2,4553	0,6132
200	1,2741	2,2741	0,5355

7.4.2. Análisis de medición de difusión sonora utilizando el método basado en los criterios de Randall y Ward

Uno de los criterios de Randall y Ward señala el comportamiento del tiempo de reverberación. Los datos de las mediciones de tiempo de reverberación de la sección 6.2 y mostrados en el Anexo A.1, Tabla A.1 y A.2, se sometieron a un análisis estadístico; promedio aritmético T , desviación estándar D_T (según Ec 4.13) y razón porcentual.

La razón porcentual es el porcentaje de la desviación estándar sobre el tiempo de reverberación promedio, es por ello que se denota como error porcentual. Este es definido como grado de difusión acústica, dado por la expresión Ec 4.14.

Los resultados de tiempo de reverberación promedio, desviación estándar y razón porcentual se muestran en la Tabla 7.3. La Figura A.1 (Anexo A.1), grafican el error porcentual en todas las bandas de frecuencia de tercio de octava.

Tabla 7.3: Error porcentual del tiempo de reverberación.

Frecuencia	Tiempo de reverberación (seg, promedio)	Desviación estándar	Error porcentual (%)
100	7,346	0,749	10,197
125	7,847	1,003	12,782
160	9,419	0,920	9,764
200	9,428	0,769	8,155
250	8,878	0,723	8,146
315	9,122	0,713	7,813
400	8,874	0,855	9,639
500	8,354	0,359	4,295
630	8,454	0,419	4,960
800	8,570	0,296	3,457
1000	8,077	0,321	3,978
1250	7,693	0,286	3,721
1600	6,853	0,389	5,676
2000	6,002	0,173	2,891
2500	5,174	0,175	3,374
3150	4,366	0,173	3,958
4000	3,579	0,246	6,881
5000	2,885	0,218	7,547

7.4.3. Discusión de resultados de los métodos utilizados para medir la difusividad acústica en salas

Los diagramas de las mediciones de referencia (cámara anecoica) inscritas en las figuras del Anexo A.3 (Figura A.6, A.7, A.8 y A.9) conservan la directividad en las dos partes más sensibles del micrófono (frontal y posterior), inclusive la parte posterior del micrófono percibe de mejor forma el sonido. En las mediciones de referencia, las figuras fueron más deformes si la banda de frecuencia es menor, y no existe simetría respecto al eje

horizontal. Por otra parte, el método contempla un micrófono de gradiente de presión, mientras que el utilizado es de membrana de condensador de patrón conmutable.

El método de medición del índice de difusividad acústica de Furduev y T'ung, es posible usarlo con micrófono de diferente patrón polar. Por los objetivos planteados en este trabajo, no es conveniente utilizar otro tipo de micrófono como el cardioide, puesto que en bandas de frecuencias bajas el micrófono tiene un diagrama polar pseudo-omnidireccional, y no es un buen determinante en las mediciones de evaluación. También se descarta la combinación de micrófonos cardioides para conseguir un patrón bidireccional.

Los resultados del índice de difusividad acústica descrito por Furduev y T'ung no cuentan con una información comparativa para esclarecer la tendencia de las mediciones en cámaras reverberantes; sin embargo, se opta por analizar los criterios de Randall y Ward para relacionar los resultados.

El método de Furduev y T'ung precisa el índice de difusividad acústica como un valor entre 0 a 1, es decir que en una razón porcentual los valores están entre 0 a 100% de difusión sonora, donde el valor nulo corresponde a una difusión sonora nula. De forma similar, el método descrito por Randall y Ward considera la variación porcentual del tiempo de reverberación como evaluador de la difusión sonora, y los valores se consideran desde un 0% para la nula diferencia entre tiempos de reverberación, es decir, campo sonoro difuso.

Para las cuatro bandas de frecuencia observadas, la banda de 160 Hz presentó el mejor índice de difusión (según el método de Furduev y T'ung) con un 61% de difusión sonora como muestra la Tabla 7.4. De manera comparativa, al observar el método de Randall y Ward, las bandas de frecuencia desde los 160 Hz en adelante presentaron errores porcentuales inferiores al 10%, y ratificaron un buen comportamiento del sonido en bandas de frecuencia mayores. Sin embargo, las bandas de frecuencia de 100 y 125 Hz presentaron una difusión sonora baja y el mayor error porcentual de tiempo de reverberación respectivamente (ver Tabla 7.4).

Tabla 7.4: Resultados de los métodos propuestos.

	Furduev y T'ung (%)	Randall y Ward (%)
100	41,16	10,197
125	55,61	12,782
160	61,32	9,764
200	53,55	8,155

8. PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DE LA DIFUSIVIDAD ACÚSTICA EN LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM

8.1. ASPECTOS NO MODIFICABLES

Para lograr una mayor difusividad acústica de un recinto se puede conseguir de varias maneras, todo dependerá de las cualidades de la sala y la frecuencia sonora que se requiera mejorar. Generalmente una difusión acústica se consigue manipulando los modos normales (en especial los de frecuencias medias y bajas).

Básicamente, el campo sonoro difuso se consigue en recinto irregulares, ingresando material absorbente, o elementos con dimensiones del orden de la longitud de onda, como muebles [NCh 2785, 2002].

Para un laboratorio, como lo es una cámara reverberante, la forma de obtener difusividad acústica es limitada. Los muros de la cámara reverberante son altamente reflectantes y la geometría es irregular, por lo tanto no es necesario modificar la composición interior de las superficies. De igual forma, la introducción de materiales terceros de tipo absorbente daña la calidad acústica de la sala. Lo mismo sucede si se desea ingresar muebles o elementos de grandes dimensiones, aunque éstos podrían estar, si no alteran el procedimiento de medición o los resultados de las pruebas.

8.2. MEJORAR LOS ELEMENTOS DIFUSORES FIJOS ACTUALES

La excitación sonora de la cámara reverberante, provoca la vibración de los elementos difusores (sección 6.3.2). La vibración en placas es solucionada generalmente, agregando una mayor densidad al material, o combinando otro tipo de material (tratamiento de amortiguación de capas separadas), adicionando diferentes características físicas (densidad, espesor, elasticidad, etc.) [Crocker, 2007]. La adhesión de placas consiste en introducir una plancha de fibra de madera prensada (cholguán) de 3,2 mm de espesor en la

parte posterior de cada elemento difusor. El material se ubica en la sombra del difusor y no altera la superficie reflectante, como muestra la Figura 8.1. Este procedimiento incrementa la densidad superficial del difusor, rigidiza la forma semicilíndrica y reduce la resonancia en la cual vibran las placas.

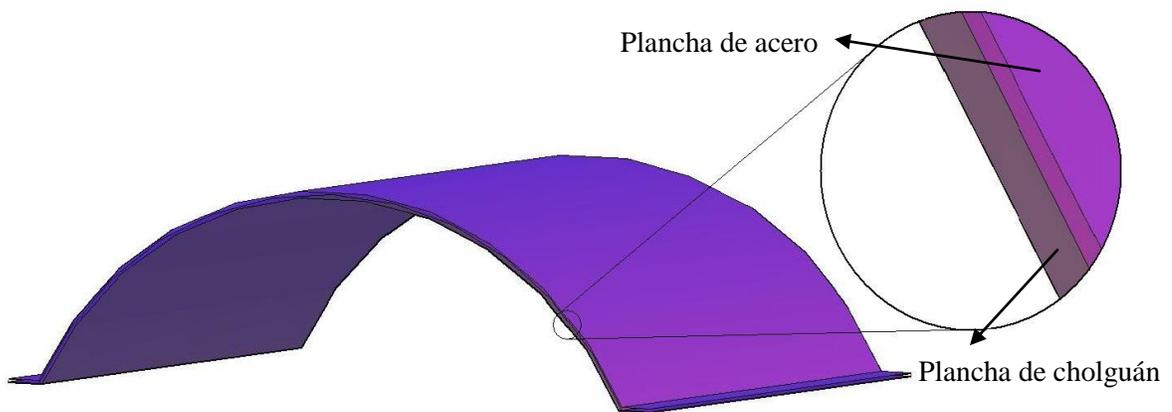


Figura 8.1: Composición de dos tipos de materiales: acero y fibra de madera prensada.

8.3. ELEMENTO DIFUSOR ROTATORIO

Una de las formas más efectivas de mejorar la difusividad acústica de un recinto es instalar elementos difusores rotatorios grandes y reflectantes [Schultz, 1971]. Este dispositivo consiste en colgar una o varias planchas en la parte superior de la cámara reverberante (no estando presente el material a evaluar), girando en el momento que se realiza la medición.

El difusor rotatorio tiene la función de variar la trayectoria del sonido a través del tiempo, es decir, modifica la 'geometría acústica' del recinto.

Para su diseño, los elementos difusores móviles demandan el funcionamiento de la menor banda de frecuencia en cuestión, esta mejoría aborda las próximas bandas de frecuencia. En este caso, se considera la banda de frecuencia de 100 Hz la menor a evaluar. El área del elemento debe ser del orden de los $3,66 \text{ m}^2$, permitiendo un diseño de varios elementos que sumen tal cantidad. La densidad superficial mínima sugerida es $4,90 \text{ kg/m}^2$, eje de giro vertical, y material altamente reflectante al sonido [Schultz, 1971]. Una plancha de acero de 1 mm de espesor ($7,8 \text{ kg/m}^2$) cumple con estos requerimientos, como también planchas de acrílico liso de 5 mm de espesor ($5,9 \text{ kg/m}^2$), o distintos tipos de materiales con características similares.

De acuerdo a Schultz, la velocidad de giro del dispositivo dependerá del tipo de integración del equipo para las mediciones, es decir para una medición con tiempo de integración *Slow* el dispositivo girará lento, mientras que para el modo *Fast*, será más rápido. El elemento difusor giratorio que se propone introducir se ubicará en el centro del cielo de la cámara reverberante, con un eje de 1,9 m y velocidad de giro de 12 rpm [Gunter, 1969]. El dispositivo consta de tres aspas fijadas al eje, cada aspa tendrán una superficie de 1,2 m².

En las Figuras 8.2 y 8.3 se muestra el dispositivo giratorio y la representación en la cámara reverberante respectivamente, las dimensiones de este dispositivo se encuentran en el Anexo A.4, en las Figuras A.10 y A.11.

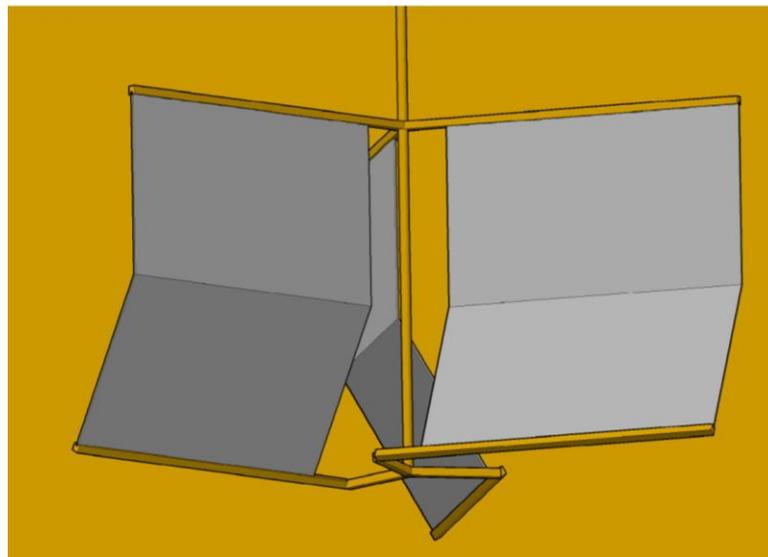


Figura 8.2: Difusor rotatorio de tres aspas.

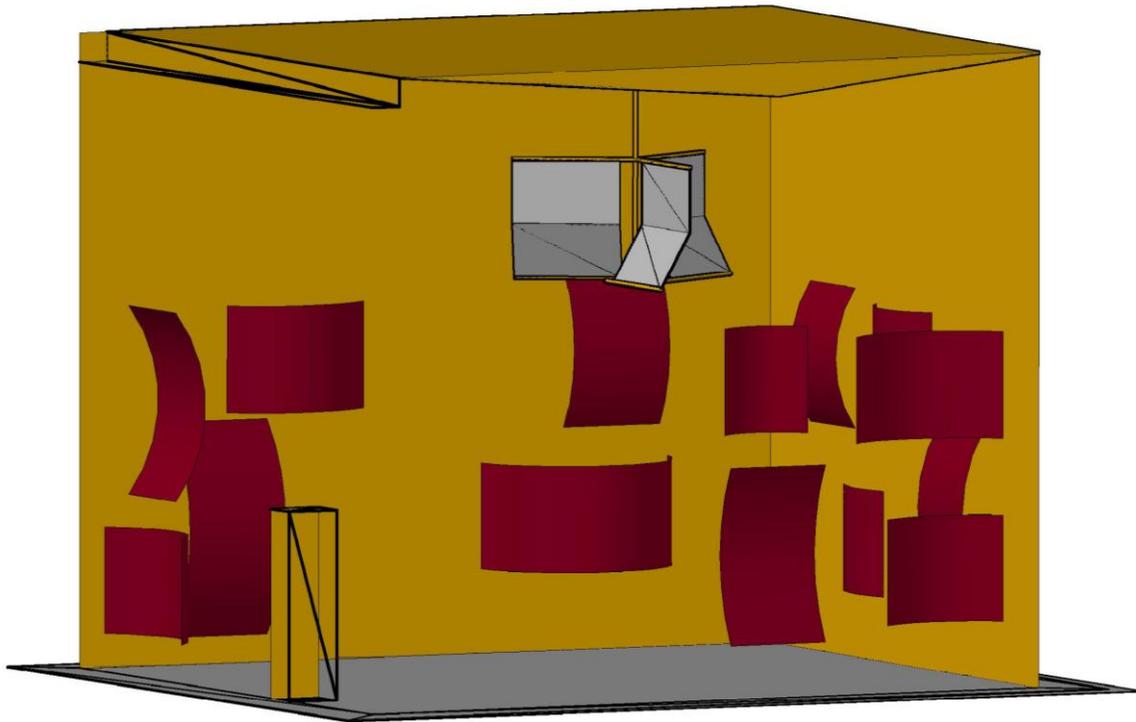


Figura 8.3: Elemento difusor rotatorio en la parte superior de la cámara reverberante, vista desde esquina noreste.

8.4. INTRODUCCIÓN DE ELEMENTOS DIFUSORES

El punto anterior muestra la forma más efectiva de mejorar la difusión del sonido en una sala, cualquiera sea su geometría. Gran parte de la mejoría en la difusión sonora de un recinto se le atribuye a la distribución y proporción de los muros, cielo y piso si en su conjunto forma una sala irregular. Los objetos del recinto también ayudan a difundir el sonido.

Los elementos difusores consisten en dispositivos especiales que intervienen la trayectoria del sonido. Entre sus características son altamente reflectantes, con densidad superficial sobre los $4,9 \text{ kg/m}^2$ y con dimensiones cercanas a la longitud de onda de la banda de frecuencia que se requiere difundir en metros cuadrados [Schultz, 1971]. Por lo general, son planchas de material con estas características. Estos elementos no deben interferir la zona de medición, no deben ser introducidos de forma paralela a las superficies (si son planas) y su distribución en el recinto es de forma aleatoria, al menos utilizando tres muros del recinto de distinta normal superficial [Cox y D'Antonio, 2004].

La cámara reverberante Idiem, tiene muros opuestos no paralelos y planos, adicionalmente los 14 elementos difusores le otorgan más irregularidad a sus superficies y representa el 8,7% de área con difusores del laboratorio. La normativa internacional ISO [ISO 354, 2003] y ASTM [ASTM C 423, 2002] señala que por experiencia se alcanza una difusión satisfactoria introduciendo elementos difusores en un 15% a 25% del total de la superficie (todas las caras de la cámara) para una sala rectangular.

La introducción de elementos difusores dentro de la cámara reverberante es la forma menos forzada de mejorar las condiciones acústicas. Se proponen dos maneras de introducir difusores con diseños aseguibles para implementar: los elementos difusores colgantes y los elementos difusores fijos.

8.4.1. Elementos difusores colgantes

El uso de elementos difusores colgantes es efectivo, su uso es común en cámaras reverberantes europeas. Al ser de dimensiones del orden de la longitud de onda, resulta ser dificultoso si las medidas y cantidad se incrementan [Schultz, 1971]. Una condición adicional para este tipo de difusor, es que no se produzcan sombras entre ellas.

La forma que adquiere el difusor dependerá del material que se utiliza. Se proponen dos diseños de difusores; una con material flexible y otra con material rígido. El material flexible recomendado es el acero, mientras que el material rígido es el acrílico compacto liso (metacrilato).

Difusores colgantes de acero: Se propone introducir cuatro planchas de acero de 1 mm de espesor, con densidad superficial de $7,8 \text{ kg/m}^2$, y con dimensiones de 1 m por 3 m (3 m^2 cada una), se obtendrá una superficie total de 12 m^2 adicionales de elementos difusores, lo que equivale tener un 13,55% de área con difusores respecto al total de la superficie. La Figura 8.4 muestra la representación de los elementos difusores colgantes de acero.

Los nuevos elementos difusores deben ser colgados mediante cables de seguridad que resistan cargas de 20 kg y que no generen fuerzas excesivas hacia los costados, es decir, que estos carguen el elemento con fuerzas verticales, como se muestra en la Figura 8.5.



Figura 8.4: Distribución de nuevos elementos difusores colgantes en la parte superior de la cámara reverberante, vista desde esquina noreste.

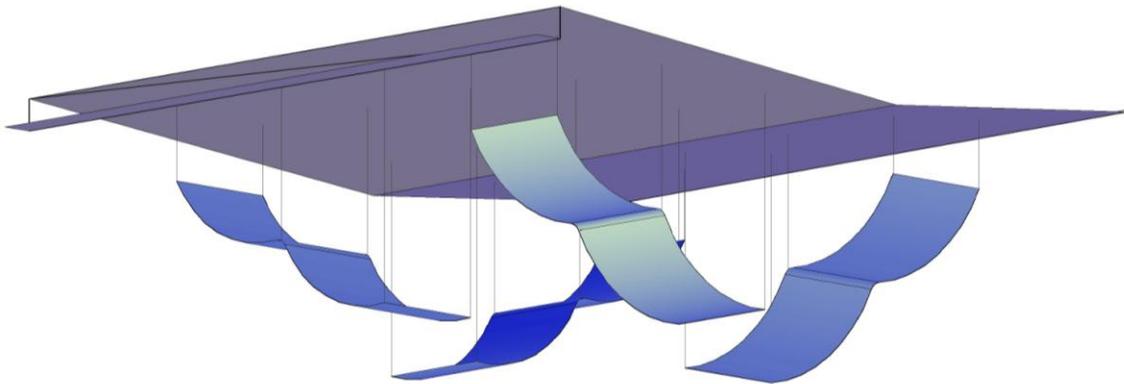


Figura 8.5: Vista de elementos difusores colgantes y fijados con cables, vista noreste.

La posición de los elementos difusores colgantes se encuentra en el plano del Anexo A.4 en la Figura A.12. En la Figura A.13 se asignan los puntos donde los difusores son colgados por los cables, la longitud del cable para cada punto se muestra en la Tabla A.7.

Difusores colgantes de acrílico: De manera similar, se puede utilizar planchas de material acrílico de 5 mm de espesor, con densidad superficial de $5,9 \text{ kg/m}^2$ y dimensiones de 1 m por 1,2 m ($1,2 \text{ m}^2$). La propuesta es introducir 6 planchas acrílicas que incrementa a un 11,55% de elementos difusores al laboratorio respecto a la cantidad de área total.

La Figura 8.6 representa la distribución de los difusores en el cielo de la cámara reverberante, estos están sujetos con cables de las mismas características mencionadas en el punto anterior.

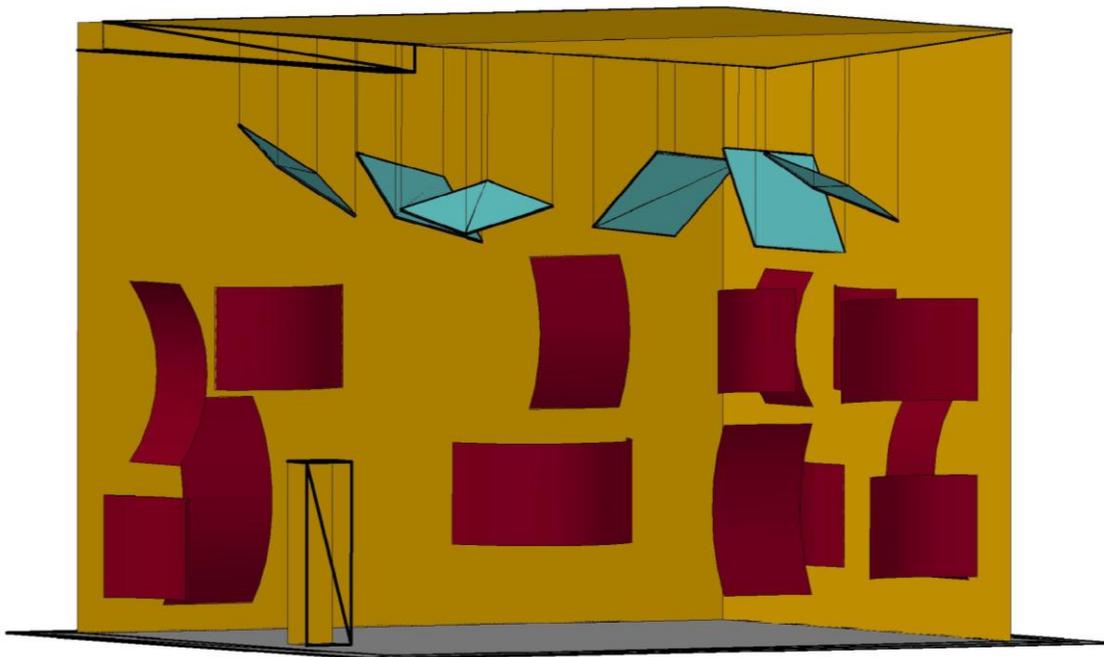


Figura 8.6: Representación de los elementos difusores colgantes de acrílico en la cámara reverberante, vista desde esquina noreste.

La ubicación de las planchas acrílicas se muestra en el plano del Anexo A.4 en la Figura A.14. La Figura A.15 muestra los puntos asignados donde los elementos difusores son colgados por cables y la Tabla A.8 muestra la longitud del cable para cada punto nombrado.

8.4.2. Elementos difusores fijos

Este tipo de difusor tiene la particularidad de que todos los puntos de fijación con la superficie de la cámara reverberante son inmóviles. Se pueden ubicar en los muros, cielos e incluso pisos de forma aleatoria, sin interferir la región de medición. Al igual que los

anteriores, las caras planas de estos elementos no deben ser paralelas a las caras de otras superficies como muros; tampoco se deben producir sombras entre ellas.

De la misma forma al punto anterior, el material que se utiliza como difusor tendrá una forma de acuerdo a su naturaleza, es por ello que se proponen dos tipos de difusores fijos; difusores de acero en el que se puede conseguir superficies curvas, y difusores acrílicos que son planos y rígidos.

Difusores fijos de acero: La propuesta es introducir 4 planchas de acero de 1 mm de espesor moldeadas en forma semicilíndrica y distribuir las en los muros verticales de la cámara reverberante. La densidad superficial de ellos es de $7,8 \text{ kg/m}^2$, con dimensiones de 1 m por 3 m (3 m^2 cada uno). La cantidad total suma un $8,08 \text{ m}^2$ adicionales de elementos difusores (área ocupada por elemento difusor arqueado de 3 m^2 es $2,02 \text{ m}^2$ como determina la sección 5.3), es decir un 11,95% de la superficie con difusores en la cámara.

La naturaleza del material provoca que el elemento difusor se curve dejándolo como un difusor semicilíndrico, a esto se debe moldear unas pestañas de fijación como muestra la sección 5.3. En la parte posterior de cada difusor se adosará una plancha de cholguán a presión de 3,2 mm (mostrado en la sección 8.2). La representación de los elementos difusores en la cámara reverberante se muestra en la Figura 8.7.

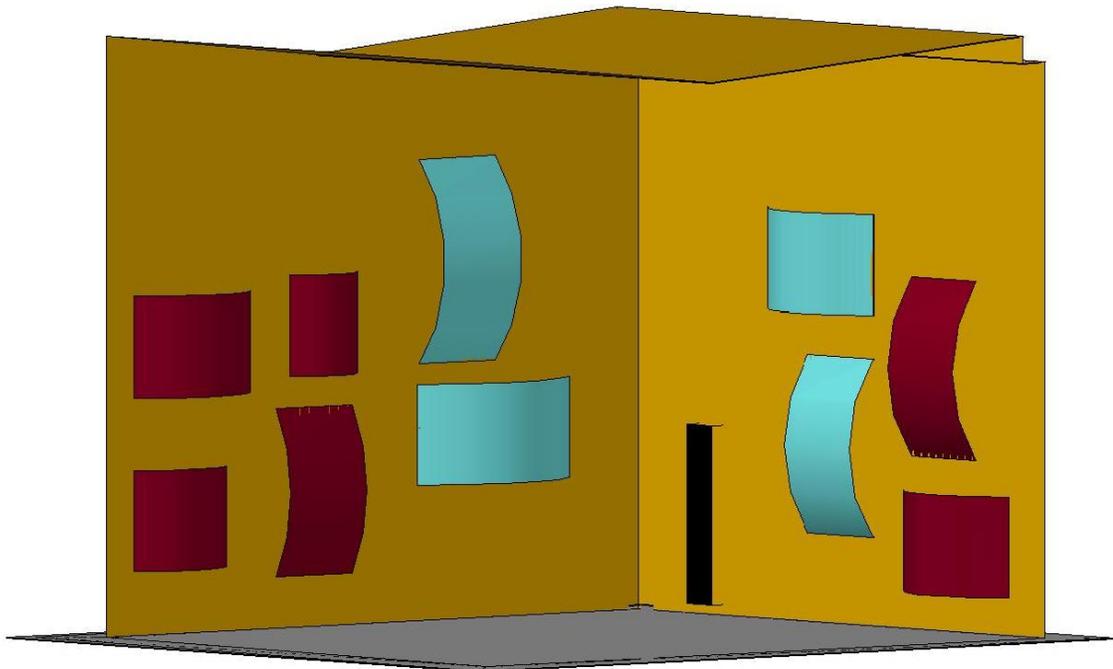


Figura 8.7: Representación de los elementos difusores fijos semicilíndricos de acero, vista desde esquina suroeste.

Las Figuras A.16 y A.17 del Anexo A.4 muestran los planos de distribución de los elementos difusores de acero para los muros Norte y Este respectivamente, estos son fijados a los muros en dos de sus bordes.

Difusores fijos de acrílico: La propuesta es introducir 6 planchas acrílicas de 5 mm de espesor, la densidad superficial es de $5,9 \text{ kg/m}^2$, las dimensiones de las planchas son de 1 m por 1,2 m ($1,2 \text{ m}^2$ cada una). Se incrementará en $6,78 \text{ m}^2$ la superficie con elementos difusores (sombra), resultando un 11,41% de ésta área en el laboratorio.

Las planchas acrílicas se ubican en los muros verticales del recinto de forma aleatoria. La fijación de las planchas está en sus vértices. Las caras de las planchas no deben estar paralelas a la de los muros. Las fijaciones a los muros cuentan con elevaciones. La representación de los elementos difusores fijos de acrílico se muestra en la Figura 8.8.

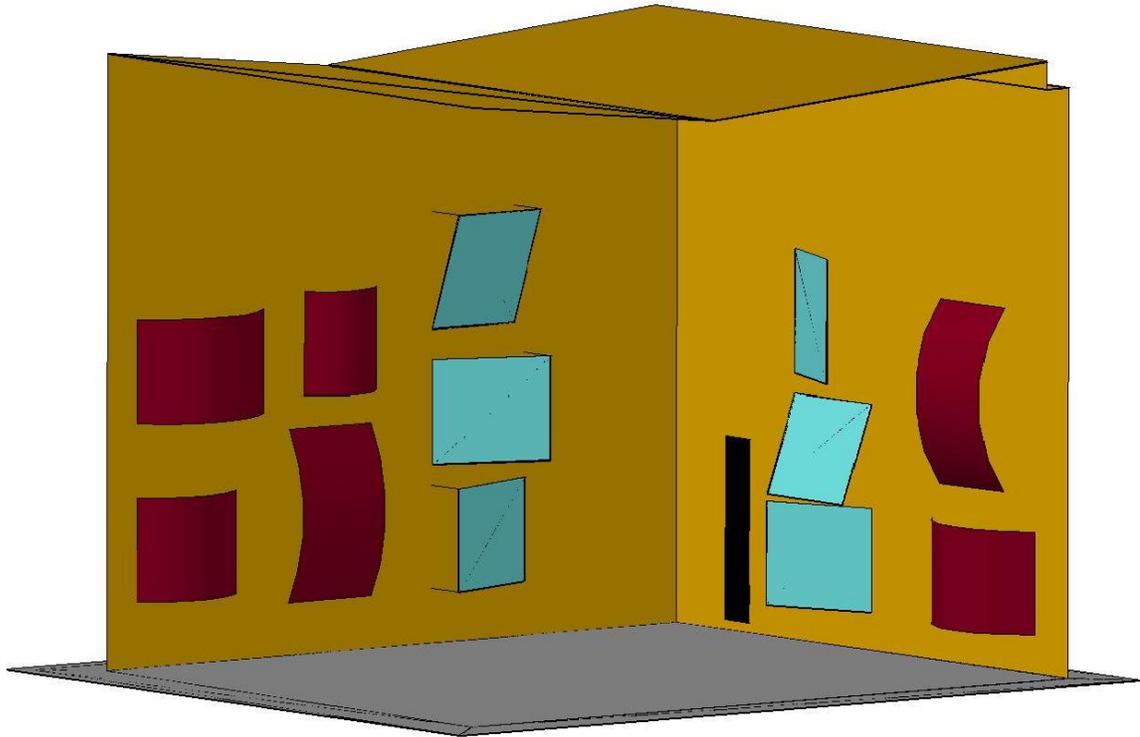


Figura 8.8: Representación de los elementos difusores fijos de acrílico, vista desde esquina suroeste.

Los planos de distribución de los difusores se encuentran en el Anexo A.4 en las Figuras A.18 y A.19, en la Figura A.20 se asignan los vértices donde se encuentran las fijaciones de los elementos difusores a la superficie del muro, y la Tabla A.9 muestra las elevaciones de los vértices sobre los muros.

8.5. ANÁLISIS DE COSTO DE LAS PROPUESTAS

Los respectivos costos de las soluciones propuestas se muestran en la Tabla 8.1, las cuales muestran los costes de los materiales utilizados y mano de obra, adicionalmente se muestra el incremento en superficies de elementos difusores y la calificación de efectividad para su uso. El detalle de los costos se muestra en la Tabla A.10 del Anexo A.4.

Tabla 8.1: Resumen de costos de las soluciones.

Solución	Costo	Incremento en área con elementos difusores	Efectividad
Mejorar los elementos difusores fijos actuales	\$69.000	0%	Regular
Elemento difusor rotatorio	\$494.000	17.1%	Muy Buena
Elementos difusores colgantes de acero	\$169.000	56.9%	Buena
Elementos difusores colgantes de acrílico	\$299.000	34.1%	Buena
Elementos difusores fijos de acero	\$160.000	56.9%	Buena
Elementos difusores fijos de acrílico	\$ 284.000	34.1%	Buena

9. CONCLUSIONES

- Las condiciones físicas presentes en la cámara reverberante Idiem, favorecen su funcionamiento práctico, gracias al volumen de 253 m^3 , 14 elementos difusores fijos, superficies altamente reflectantes, forma irregular de la sala, y las dimensiones que favorecen el comportamiento de las longitudes de ondas.

La teoría acústica de salas beneficia la comprensión de las cualidades acústicas del laboratorio y determina los alcances en las mediciones; el libre camino medio es un indicativo de la longitud de onda que logra excitarse sin dificultad en el laboratorio. La frecuencia de Schroeder permite precaver que, las bandas de frecuencia en cuestión se ubiquen en la región modal.

- Los métodos y mediciones implementados cuentan con dificultades en su ejecución y posterior análisis, sobre todo aquellas experimentales. El tiempo de reverberación que presenta la cámara reverberante Idiem es adecuado para su uso y la absorción sonora de las superficies es acorde a lo exigido por la normativa ISO 354.

El índice de difusividad acústica es una medida implementada por un método de uso no recurrente, por lo tanto, el uso práctico es innovador, y las mediciones obedecen a la conformación electroacústica implementada, como la respuesta del micrófono utilizado. Los criterios para definir la difusión en una sala, propuestos por Randall y Ward, logran comparar el índice de difusividad acústica con los resultados del tiempo de reverberación y los gráficos de caídas de nivel.

- El índice de difusividad acústico medido en la cámara reverberante no muestra datos precisos que determinen una difusión sonora deseable, el mínimo valor es de 41% para la banda de 100 Hz.

La variación en los resultados de tiempo de reverberación del laboratorio, se considera en una desviación estándar o error porcentual, cuyo máximo valor es 12,8% en la banda de 125 Hz. De igual forma, las caídas de tiempo de reverberación son en su mayoría con pendientes claras, la banda de 100 Hz presenta fluctuaciones y la de 125 Hz pendientes irregulares. Según las observaciones y los criterios de

difusión sonora de Randall y Ward, estas dos bandas cuentan con una difusión moderada.

Para complementar, la respuesta en frecuencia del sistema, provee de varios modos normales separados y notorios (78, 89, 132, 151, 160 Hz como los más significativos), pertenecientes a las bandas de 100, 125 y 160 Hz. La vibración observada en los elementos difusores EED-1 y NED-2 se influencia notoriamente en la respuesta en frecuencia en 108 y 116 Hz respectivamente, correspondientes a las bandas de frecuencias más cuestionadas.

- Las soluciones propuestas no garantizan una perfecta difusión del sonido en el laboratorio. Estas se diseñaron acorde a las especificaciones de la normativa ISO 354, por lo tanto, la elección de la propuesta correspondería a verificar el montaje in situ para cada solución. Sin embargo, la solución más efectiva y recurrente es la introducción de un difusor rotatorio, utilizada con éxito a nivel mundial.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [Álamo, 1996] Álamo, H. A., Difusividad de la Cámara Acústica Reverberante y Absorción de Materiales, 1996, Tesis de Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile (1996).
- [Alton, 2001] Alton Everest, F., The Master Handbook of Acoustics, 4ta edición, McGraw-Hill, New York (2001).
- [ASTM C 423, 2002] ASTM C 423-02a. Standard Test Method for: Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Method, ASTM, West Conshohocken (2002).
- [BBC, 1969] The British Broadcasting Corporation BBC, The Measurement of Sound Diffusion Index in Small Rooms, Research Department Engineering Division BBC 1969-16 (1969).
- [Beranek, 1954] Beranek, L.L., Acoustics, 2da edición, Acoustical Society of America, New York (1954).
- [Bruneau y Scelo, 2006] Bruneau, M. y Scelo, T., Fundamentals of Acoustics, 1era edición, ISTE, Londres (2006).
- [Cox y D'Antonio, 2004] Cox, T.J. y D'Antonio, P., Acoustics Absorber and Diffusers: Theory, Design and Application, 1era edición, Spon Press, Londres (2004).
- [Crocker, 2007] Crocker, M. J., Handbook of Noise and Vibration Control, 1era edición, John Wiley & Sons Inc, New Jersey (2007).

- [Dood y Doak, 1971] Dood S. D. y Doak P. E., Some Aspects of the Theory of Diffusion and Diffusers, *Journal of Sound and Vibration* 16 (1), 89-98 (1971).
- [Furduev y T'ung, 1960] Furduev V. V. y T'ung Ch., Measurement of Diffuseness of the Acoustic Field in Rooms by the Directional Microphone Method, *Journal of Soviet Physics Acoustics* 6 (1), 103-111 (1960).
- [Guintier, 1969] Guinter, J. M., New Reverberation Chamber, Rotating Vane, and Microphone System Improve Discrete Frequency Measurement, *Journal of Acoustical Society of America* 46 (1), 91-92 (1969).
- [ISO 354, 2003] ISO 354, Acoustics: Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room, ISO, Suiza, (2003).
- [ISO 9613-1, 1993] ISO 9613-1, Acoustics: Attenuation of Sound During Propagation Outdoors, Part 1: Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere, ISO, Suiza, (1993).
- [Kuttruff, 1981] Kuttruff, H., Sound Decay in Reverberation Chambers with Diffusing Elements, *Journal of Acoustics Society of America* 69 (6), 1716-1723 (1981).
- [Kuttruff, 2000] Kuttruff, H., *Room Acoustics*, 4ta edición, Spon Press, Londres (2000).
- [Kuttruff, 2007] Kuttruff, H., *Acoustics an Introduction*, 1era edición, Taylor & Francis, New York(2004).
- [Mathworks, 2007a] Mathworks, Matlab® R2007a, www.mathworks.com (2007).
- [Mathworks, 2007b] Mathworks, Octave-band and fractional octave-band filter, Matlab® R2007a, www.mathworks.com (2007).
- [Miyara, 2006] Miyara, F., *Acústica y sistemas de sonido*, 4ta edición, UNR editora, Rosario (2006).

- [NCh 2785, 2002] NCh 2785, Acústica: Medición de Aislación Acústica en Construcciones y Elementos de Construcción – Mediciones en Terreno de la Aislación Acústica Aérea entre Recintos, Norma Chilena, Chile (2002)
- [Schroeder, 1996] Schroeder, M. R., The “Schroeder frequency” revised, Journal of Acoustical Society of America 99 (5), 3240-3241 (1996).
- [Schultz, 1971] Schultz T. J., Diffusion in Reverberation Rooms, Journal of Sound and Vibration 16 (1), 17-28 (1971).
- [Sommerhoff, 2006] Sommerhoff, J., Apuntes: Acústica Arquitectónica, Universidad Austral de Chile, Valdivia (2006).

A. ANEXO

A.1. MEDICIÓN DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM.

Los valores medidos de tiempo de reverberación para la cámara reverberante vacía fueron efectuados mediante un equipo de precisión, sonómetro integrador Larson Davis 824 de tipo I. Los datos registrados por éste se muestran tabulados a continuación. La designación de los nueve puntos medidos fue al azar, en cada punto se efectuaron dos mediciones a diferentes alturas.

La Tabla A.1 registra los datos de tiempo de reverberación para cada banda de frecuencia y en los nueve puntos asignados, ésta se realizó para una altura de 1,3 a 1,5 metros del piso, mientras que la Tabla A.2 se realizó la misma medición en los mismos puntos anteriores pero para una altura de 4 metros sobre el piso.

La Figura A.1 muestra el gráfico de la razón porcentual del tiempo de reverberación, esto es la relación entre la desviación estándar y el promedio resultante de tiempo de reverberación.

Tabla A.1: Tiempo de reverberación medido con la cámara reverberante vacía, entre 1,3 a 1,5 metros de altura, datos en segundos.

Frecuencia (Hz)	Punto de medición								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
100	9.063	6.906	7.375	7.063	6.609	6.563	7.953	7.609	7.875
125	7.797	5.781	8.844	8.75	7.906	6.484	7.906	8.188	9.469
160	8.719	8.094	9.188	8.906	10.00	10.15	9.469	9.125	8.219
200	8.719	7.938	9.875	9.719	8.906	10.87	9.719	8.719	9.219
250	8.594	7.625	8.50	9.156	9.25	9.156	8.125	9.594	8.156
315	10.5	9.219	8.781	9.75	8.031	9.375	8.969	9.50	9.531
400	9.969	8.781	9.25	10.59	9.063	9.063	9.313	8.688	9.688
500	8.188	7.969	8.594	8.313	8.906	8.438	7.938	8.656	8.281
630	8.375	9.281	8.688	8.125	8.50	8.063	8.313	8.344	8.313
800	8.313	8.438	8.781	8.531	8.906	8.313	8.719	8.344	8.00
1000	7.703	8.531	8.375	8.188	8.844	8.094	7.766	8.25	7.875
1250	7.125	7.797	7.891	7.359	7.688	7.563	7.406	8.281	7.953
1600	7.094	7.00	7.109	6.734	6.594	6.844	7.266	6.813	6.891
2000	6.203	5.953	6.25	5.828	5.75	6.078	5.719	6.344	6.094
2500	5.031	5.188	5.063	5.016	4.969	5.266	4.953	5.297	5.453
3150	4.719	4.188	4.094	4.25	4.25	4.578	4.234	4.344	4.719
4000	3.523	3.422	3.633	3.414	2.766	3.688	3.563	3.781	3.469
5000	2.797	2.688	2.914	2.82	2.914	3.25	2.781	3.172	3.078

Tabla A.2: Tiempo de reverberación medido con la cámara reverberante vacía a 4 metros de altura, datos en segundos.

Frecuencia (Hz)	Punto de medición								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
100	7.266	8.313	6.516	8.063	7.25	7.391	6.375	7.766	6.266
125	8.094	6.797	9.625	7.406	7.734	6.953	7.859	8.563	7.094
160	9.625	8.625	11.46	11.12	8.969	9.875	9.625	9.938	8.438
200	9.281	9.281	9.406	8.906	9.313	8.781	9.656	10.59	10.81
250	9.094	10.12	9.531	9.438	8.625	8.75	9.031	7.406	9.656
315	9.719	9.938	8.813	8.875	7.859	7.766	9.188	9.219	9.156
400	7.891	7.516	9.063	8.688	8.219	8.125	7.422	9.906	8.50
500	8.594	7.719	8.00	8.625	8.406	8.344	8.25	9.125	8.031
630	8.531	8.50	7.969	8.156	9.094	9.031	8.969	7.734	8.188
800	8.75	8.344	8.875	8.844	8.594	8.219	9.00	8.969	8.313
1000	7.781	7.859	7.719	8.188	7.766	8.344	8.094	7.781	8.219
1250	7.547	7.953	7.391	7.75	7.563	7.938	7.547	8.031	7.688
1600	6.516	6.922	6.469	7.438	6.188	6.516	6.406	7.75	6.797
2000	6.047	5.922	6.00	6.188	5.953	5.953	5.828	5.859	6.063
2500	4.906	5.391	5.234	5.219	4.969	5.188	5.406	5.188	5.391
3150	4.156	4.453	4.375	4.406	4.359	4.375	4.328	4.313	4.438
4000	3.727	3.695	3.609	3.633	3.813	3.969	3.563	3.555	3.594
5000	2.875		3.094	2.969	3.023		2.383	2.742	2.656

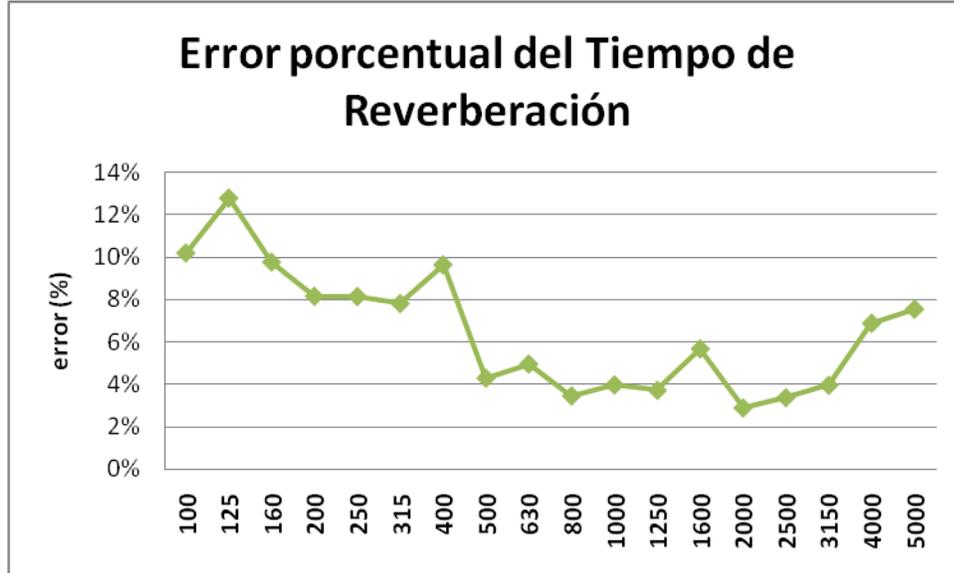


Figura A.1: Razón porcentual de la desviación estandar del tiempo de reverberación.

A.2. RESPUESTA EN FRECUENCIA DE LA CÁMARA REVERBERANTE IDIEM

A.2.1. Respuesta en frecuencia de los parlantes

La medición de respuesta en frecuencia de los parlantes Sansui SPX 9000, se efectuó en campo libre. Mediante un generador de señales Larson Davis SRC20 se emitieron tonos puros por los parlantes desde la frecuencia 60 hasta 204 Hz, los datos fueron registrados por el sonómetro integrador Larson Davis 824 en decibeles lineales (dB), la Tabla A.3 muestra los niveles de presión sonora que registraron los parlantes en conjunto.

Tabla A.3: Respuesta en frecuencia de los parlantes Sansui SPX 9000, datos en dB.

Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB
60	98.4	85	102.7	109	102.0	133	100.2	157	96.7	181	90.0
61	98.6	86	103.0	110	101.2	134	99.9	158	95.1	182	90.3
62	98.9	87	102.3	111	100.6	135	99.8	159	94.8	183	90.7
63	99.5	88	101.3	112	100.6	136	99.1	160	95.1	184	90.7
64	100.0	89	101.7	113	101.3	137	98.9	161	96.0	185	91.2
65	100.3	90	102.7	114	101.7	138	98.8	162	97.3	186	91.4
66	99.9	91	103.3	115	102.2	139	97.7	163	97.1	187	90.7
67	99.9	92	103.7	116	102.2	140	96.2	164	96.6	188	89.8
68	99.5	93	104.2	117	102.0	141	94.8	165	96.5	189	89.3
69	98.6	94	104.6	118	102.1	142	94.4	166	96.3	190	89.6
70	97.1	95	104.5	119	101.6	143	95.5	167	96.3	191	88.8
71	98.5	96	105.1	120	100.7	144	96.7	168	96.6	192	88.6
72	100.4	97	104.6	121	101.5	145	97.6	169	96.0	193	88.5
73	100.7	98	104.6	122	102.1	146	97.9	170	95.5	194	87.3
74	101.2	99	104.3	123	101.9	147	97.5	171	95.6	195	88.0
75	101.2	100	104.0	124	101.7	148	96.9	172	95.2	196	87.7
76	101.5	101	104.1	125	101.2	149	97.0	173	94.5	197	88.3
77	102.1	102	104.3	126	100.7	150	97.2	174	94.0	198	87.3
78	102.4	103	103.6	127	100.9	151	97.2	175	93.2	199	88.4
79	102.8	104	102.2	128	101.0	152	97.0	176	91.2	200	88.5
80	103.4	105	101.7	129	100.9	153	96.8	177	90.1	201	88.5
81	103.7	106	102.2	130	101.3	154	96.5	178	91.1	202	86.7
82	103.5	107	102.9	131	100.9	155	96.5	179	91.0	203	86.6
83	102.9	108	102.5	132	100.5	156	97.0	180	91.3	204	87.3
84	103.3										

A.2.2. Respuesta en frecuencia de los puntos P1, P2 y P3

La Figura 6.21 de la sección 6.3.4 muestra los puntos que se designaron para realizar la medición de la respuesta en frecuencia de la cámara reverberante Idiem, los puntos se escogieron al azar y a diferentes alturas. Los siguientes datos tabulados muestran el nivel logrado en decibeles lineales (dB) en cada frecuencia.

La Tabla A.4 registra los datos del punto P1 a una altura de 1,72 metros sobre el piso, de igual forma los datos de las Tablas A.5 y A.6 muestra el registro de los puntos P2 y P3 a 3,12 metros y a 4,16 metros sobre el piso respectivamente.

Los datos de las tablas mencionadas anteriormente se graficaron, la Figura A.2 muestra la respuesta en frecuencia que se obtuvo en el punto P1, de manera similar, en la Figura A.3 y A.4 están los gráficos de las respuestas producidas en los puntos P2 y P3 respectivamente. Los gráficos son acompañados con la respuesta en frecuencia producida por los parlantes descrita por la Tabla A.3.

La Figura A.5 muestra los gráficos en conjunto de los puntos medidos P1, P2 y P3, adicionalmente se grafica el promedio de estas tres respuestas en frecuencia de la cámara reverberante y la respuesta de los parlantes de la Tabla A.3.

Tabla A.4: Respuesta en frecuencia en el punto P1, datos en dB.

Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB
60	96.3	85	93.3	109	92.3	133	92.8	157	88.5	181	92.7
61	85.3	86	92.5	110	84.2	134	87.8	158	90.3	182	93.6
62	82.2	87	89.5	111	91.0	135	97.1	159	97.4	183	100.7
63	82.7	88	95.7	112	88.7	136	100.0	160	109.8	184	99.3
64	87.2	89	111.8	113	85.3	137	94.5	161	105.1	185	95.1
65	85.5	90	106.4	114	94.9	138	79.9	162	104.5	186	97.0
66	85.5	91	107.5	115	95.9	139	90.8	163	88.5	187	98.1
67	85.5	92	87.7	116	106.0	140	92.8	164	83.9	188	101.9
68	85.4	93	100.8	117	99.1	141	100.3	165	93.5	189	102.9
69	87.3	94	97.5	118	102.9	142	100.0	166	91.8	190	96.3
70	89.5	95	94.4	119	96.1	143	93.0	167	88.7	191	99.9
71	94.8	96	89.0	120	100.5	144	91.5	168	96.7	192	104.2
72	91.7	97	100.7	121	88.9	145	91.8	169	111.7	193	111.0
73	89.2	98	98.6	122	93.3	146	98.5	170	104.2	194	99.0
74	91.3	99	89.0	123	99.8	147	92.7	171	106.4	195	105.0
75	83.9	100	97.5	124	101.0	148	90.1	172	101.8	196	99.9
76	97.7	101	106.6	125	93.6	149	102.8	173	101.6	197	105.1
77	92.8	102	103.2	126	92.3	150	96.3	174	95.0	198	91.5
78	99.0	103	87.1	127	93.2	151	100.6	175	99.0	199	103.0
79	83.2	104	86.9	128	93.4	152	104.4	176	101.7	200	94.5
80	89.2	105	108.1	129	91.2	153	97.3	177	87.4	201	92.9
81	83.6	106	95.0	130	92.7	154	87.7	178	90.1	202	94.4
82	91.2	107	99.2	131	96.8	155	97.7	179	99.1	203	107.4
83	82.0	108	96.5	132	108.9	156	86.1	180	106.9	204	100.7
84	86.4										

Tabla A.5: Respuesta en frecuencia en el punto P2, datos en dB.

Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB
60	100.9	85	95.0	109	88.8	133	94.7	157	98.8	181	103.8
61	90.3	86	89.7	110	88.7	134	80.1	158	107.5	182	100.6
62	90.7	87	75.5	111	95.0	135	90.9	159	92.3	183	103.7
63	98.4	88	90.0	112	89.0	136	104.2	160	104.8	184	91.8
64	91.6	89	111.2	113	106.0	137	97.8	161	97.1	185	93.1
65	76.2	90	99.1	114	92.5	138	98.6	162	88.7	186	94.1
66	76.3	91	87.7	115	82.7	139	98.1	163	106.3	187	109.8
67	71.5	92	99.3	116	105.9	140	94.2	164	101.9	188	105.5
68	81.4	93	100.2	117	99.4	141	95.1	165	92.6	189	102.7
69	82.8	94	99.5	118	92.4	142	83.1	166	92.1	190	107.5
70	84.8	95	102.9	119	95.4	143	94.8	167	90.1	191	98.8
71	91.4	96	98.4	120	101.3	144	95.2	168	93.2	192	109.5
72	91.1	97	95.1	121	85.5	145	93.5	169	90.5	193	90.3
73	80.8	98	87.2	122	91.8	146	89.0	170	103.1	194	108.4
74	90.0	99	75.0	123	77.4	147	86.3	171	101.6	195	105.0
75	73.4	100	77.8	124	103.4	148	98.2	172	94.5	196	97.5
76	93.1	101	94.0	125	102.4	149	101.2	173	92.7	197	99.4
77	97.3	102	100.5	126	100.7	150	99.7	174	92.4	198	98.7
78	89.6	103	81.0	127	101.2	151	104.0	175	103.8	199	98.9
79	86.7	104	77.3	128	100.2	152	97.3	176	105.1	200	98.6
80	74.7	105	94.0	129	89.2	153	93.1	177	97.3	201	101.1
81	82.0	106	87.9	130	84.3	154	95.5	178	101.3	202	97.0
82	103.3	107	101.9	131	93.5	155	91.7	179	100.1	203	107.1
83	94.2	108	103.1	132	106.1	156	86.3	180	90.0	204	93.3
84	89.4										

Tabla A.6: Respuesta en frecuencia en el punto P3, datos en dB.

Hz	dB										
60	83.5	85	99.5	109	104.1	133	97.4	157	86.8	181	90.7
61	101.5	86	84.6	110	94.5	134	78.1	158	84.0	182	84.9
62	93.0	87	85.1	111	96.6	135	90.4	159	94.8	183	96.5
63	89.5	88	96.3	112	102.6	136	100.7	160	111.2	184	95.3
64	86.1	89	111.4	113	95.2	137	100.8	161	101.6	185	99.5
65	88.7	90	106.3	114	88.5	138	100.2	162	98.8	186	94.2
66	91.9	91	110.9	115	98.9	139	94.2	163	105.0	187	96.0
67	99.0	92	102.9	116	104.1	140	100.7	164	100.0	188	100.3
68	97.1	93	96.4	117	96.3	141	99.7	165	89.9	189	105.9
69	87.0	94	106.0	118	94.8	142	100.2	166	98.3	190	92.1
70	82.7	95	106.3	119	101.0	143	94.6	167	98.8	191	103.2
71	87.5	96	90.2	120	95.0	144	99.1	168	95.8	192	104.5
72	93.9	97	95.8	121	97.4	145	99.9	169	96.5	193	101.8
73	88.3	98	94.8	122	94.1	146	100.2	170	89.6	194	102.4
74	74.2	99	102.3	123	92.9	147	92.1	171	99.0	195	103.7
75	84.6	100	98.8	124	98.8	148	93.7	172	99.9	196	108.2
76	87.7	101	99.5	125	98.4	149	99.1	173	102.6	197	105.7
77	94.8	102	94.1	126	83.0	150	98.0	174	105.9	198	102.2
78	103.7	103	96.1	127	86.3	151	108.4	175	107.7	199	108.0
79	86.3	104	99.5	128	96.5	152	99.6	176	97.5	200	95.4
80	87.4	105	100.7	129	93.3	153	91.6	177	85.7	201	104.6
81	91.0	106	97.0	130	96.4	154	101.6	178	101.4	202	95.0
82	91.2	107	112.1	131	103.7	155	92.6	179	95.1	203	105.0
83	87.1	108	102.0	132	108.4	156	79.7	180	102.7	204	93.0
84	94.6										

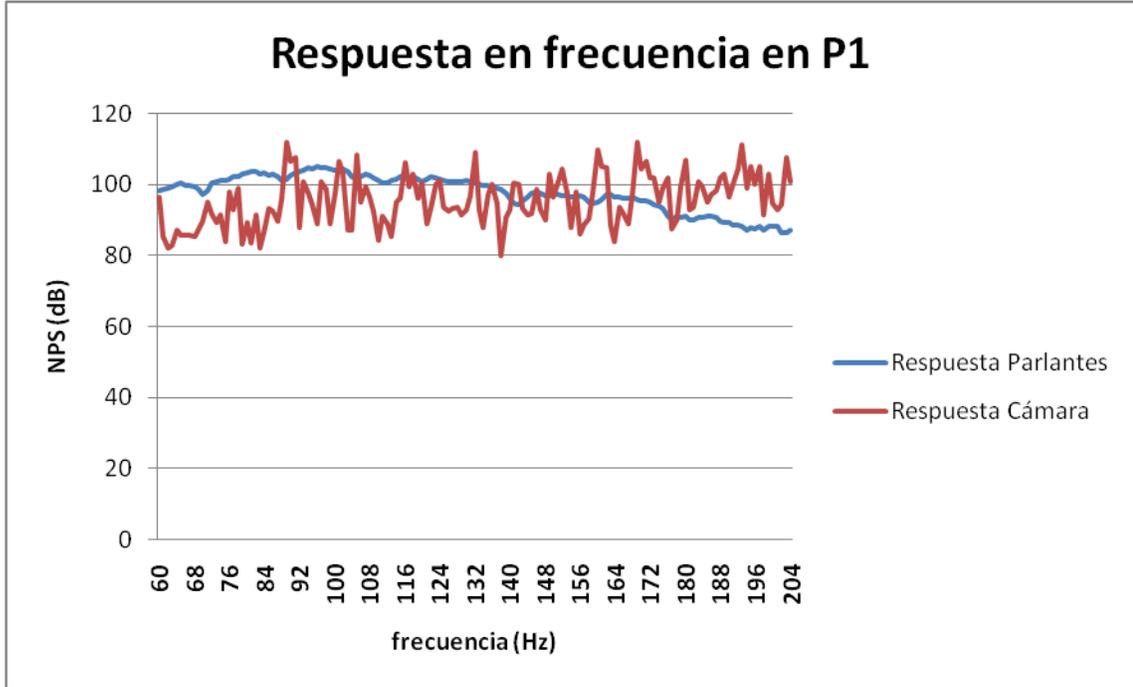


Figura A.2: Respuesta en frecuencia en el punto P1 a 1,76 metros de altura.

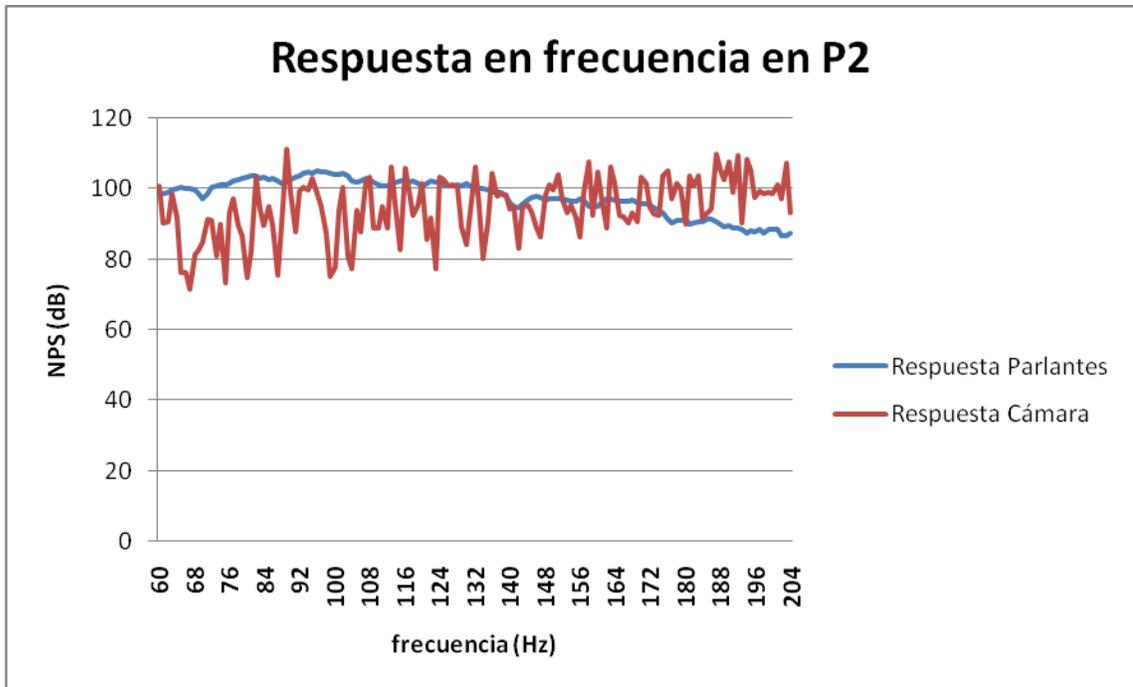


Figura A.3: Respuesta en frecuencia en el punto P2 a 3,12 metros de altura.

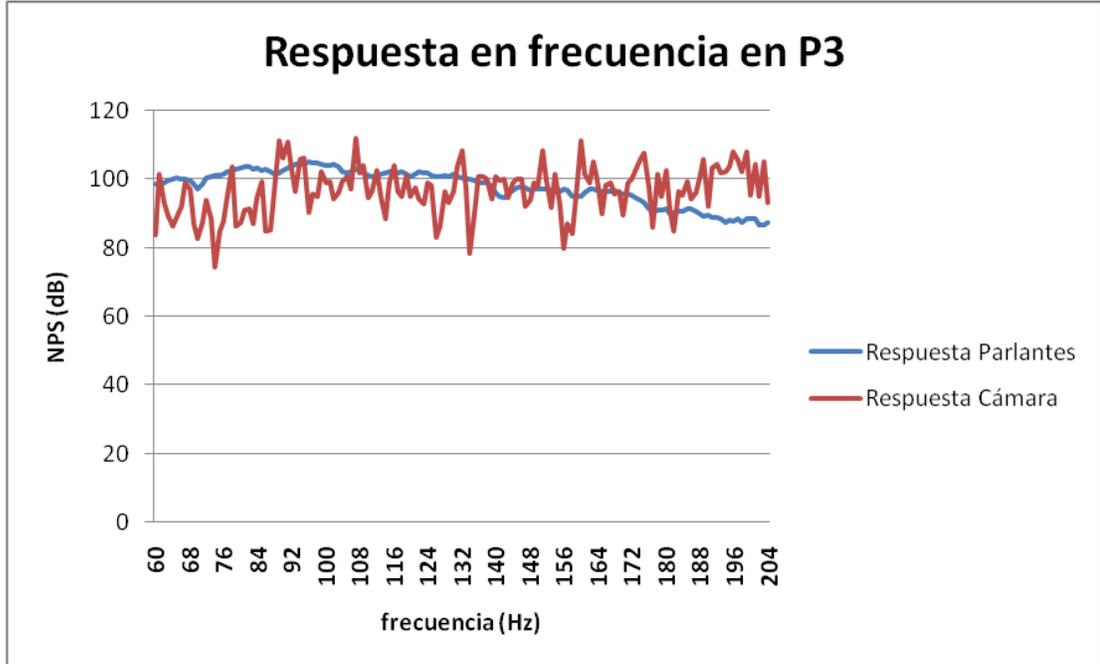


Figura A.4: Respuesta en frecuencia en el punto P3 a 4,16 metros de altura.

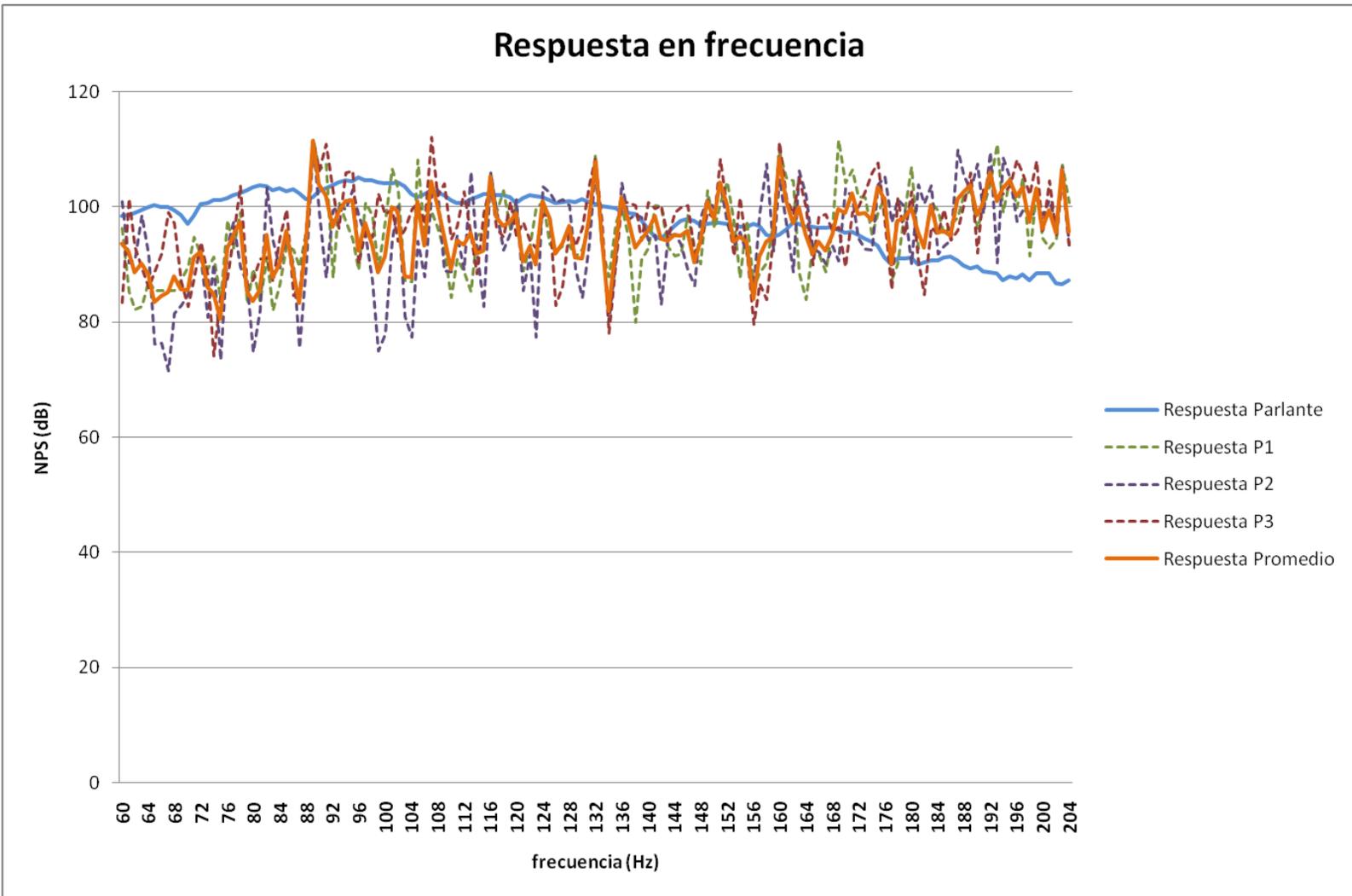


Figura A.5: Respuesta en frecuencia promedio de la cámara reverberante Idiem.

A.3. DIFUSIVIDAD ACÚSTICA: DIAGRAMAS POLARES DE LAS MEDICIONES

Los diagramas polares que representa el comportamiento de la difusión acústica de la cámara reverberante Idiem son graficados de acuerdo al método propuesto por V.V. Furduev y Ch. T'ung como señala la 4.3. En las Figuras A.6, A.7, A.8 y A.9 se muestran los diagramas polares de las bandas de frecuencia de 100, 125, 160 y 200 Hz respectivamente, en cada figura se muestra la medición de referencia y evaluación diferenciados en colores distintos para cada banda de frecuencia.

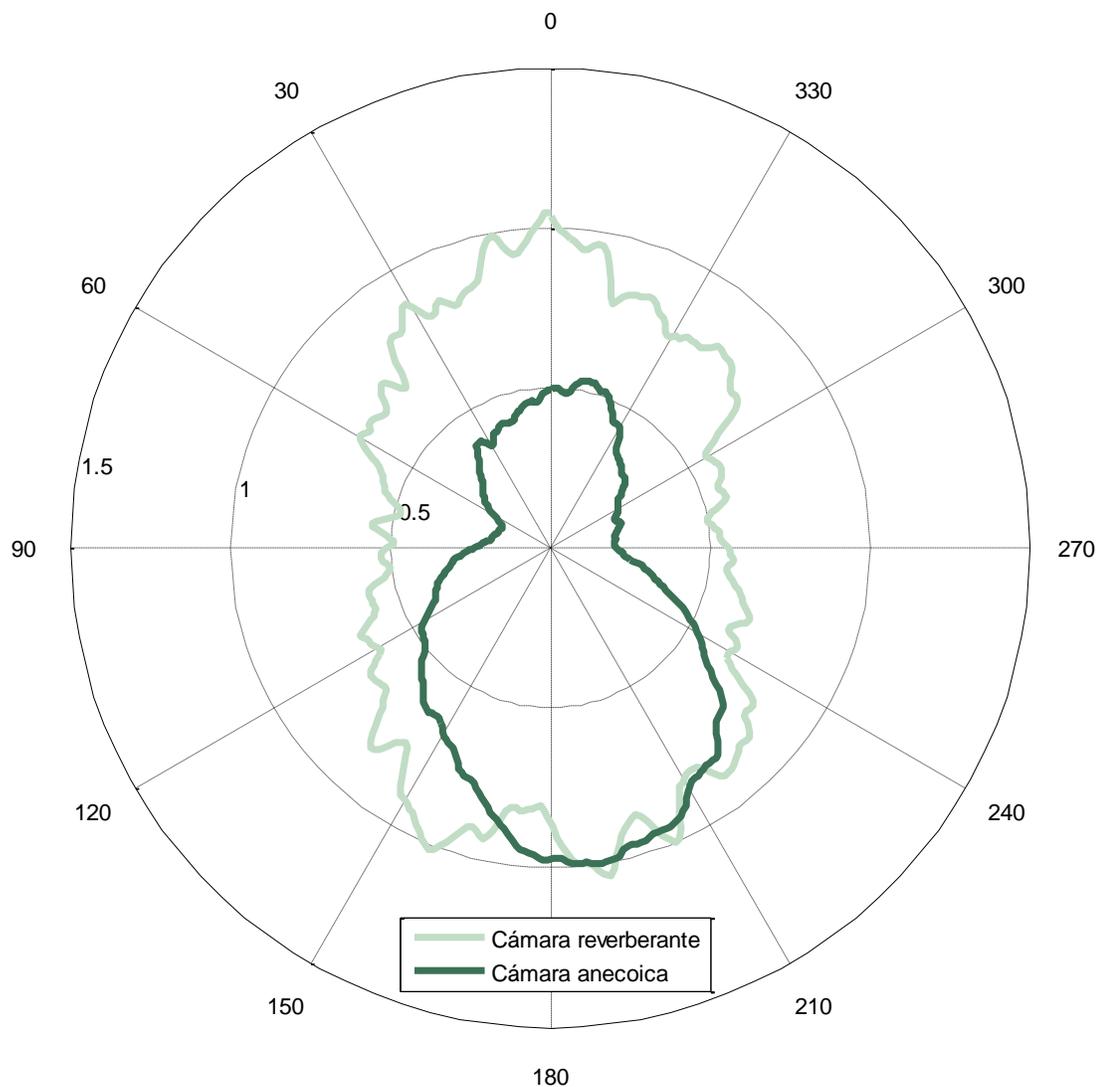


Figura A.6: Medición del diagrama polar en ambas cámaras para la banda de 100 Hz.

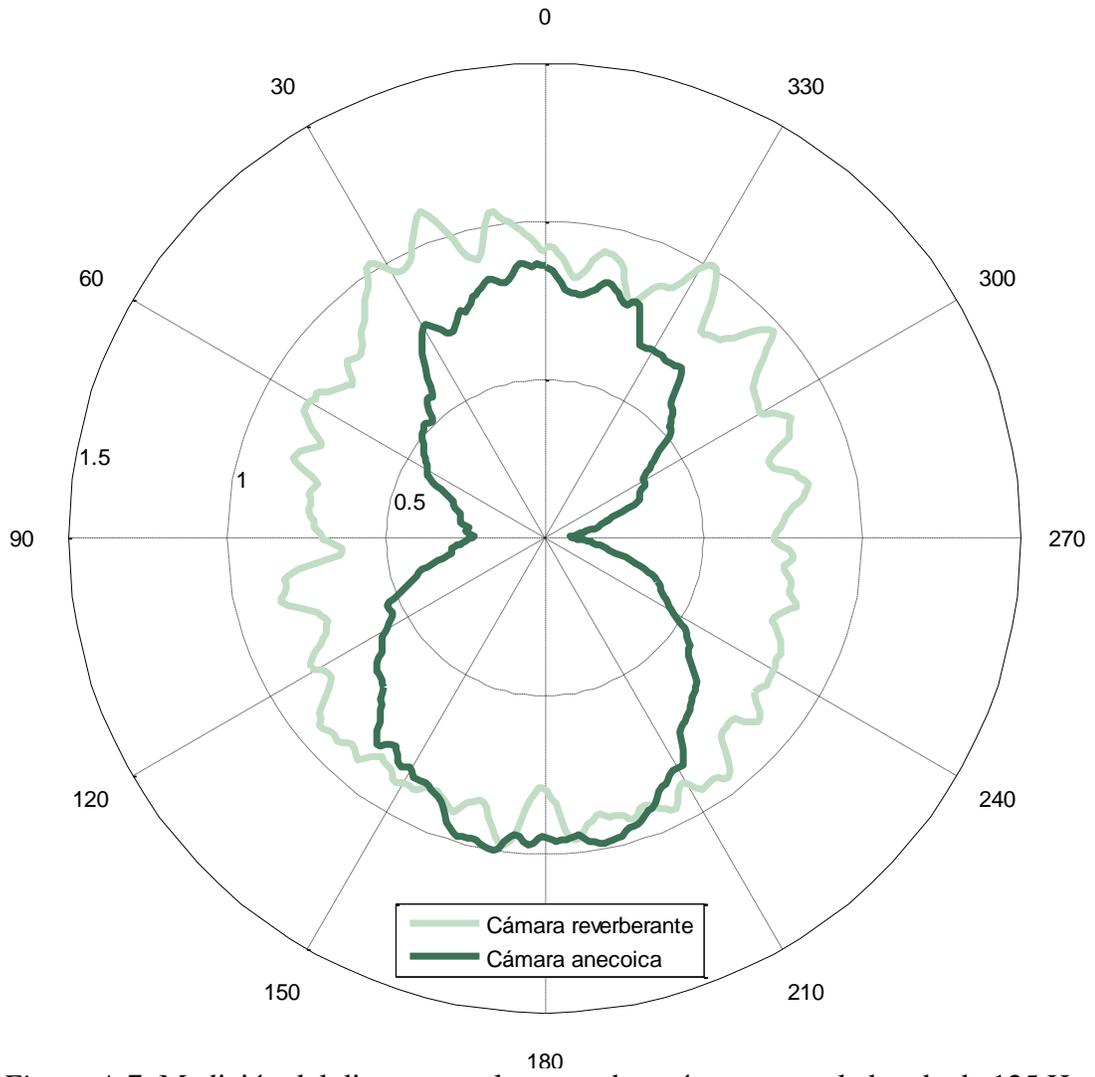


Figura A.7: Medición del diagrama polar en ambas cámaras para la banda de 125 Hz.

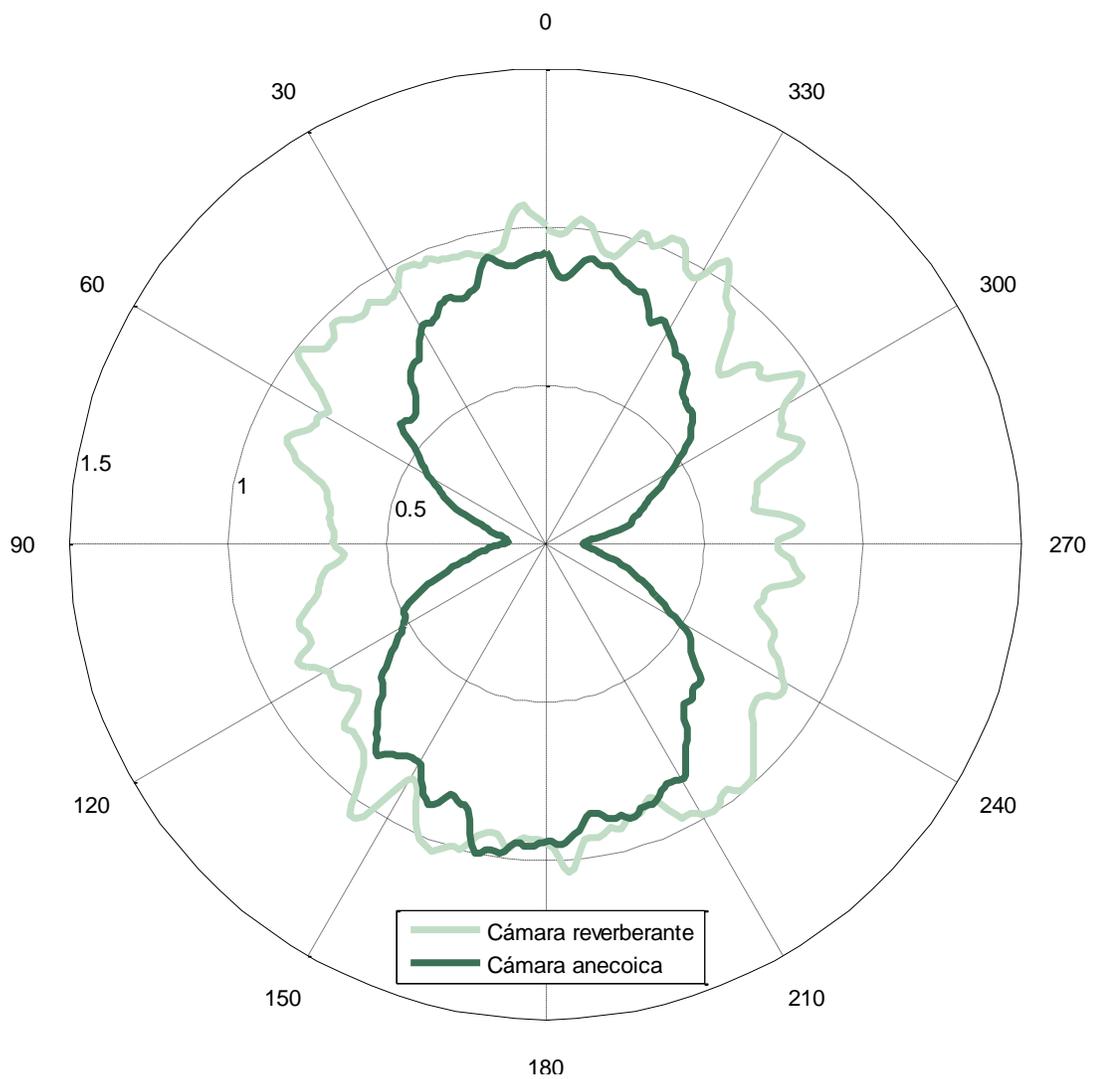


Figura A.8: Medición del diagrama polar en ambas cámaras para la banda de 160 Hz.

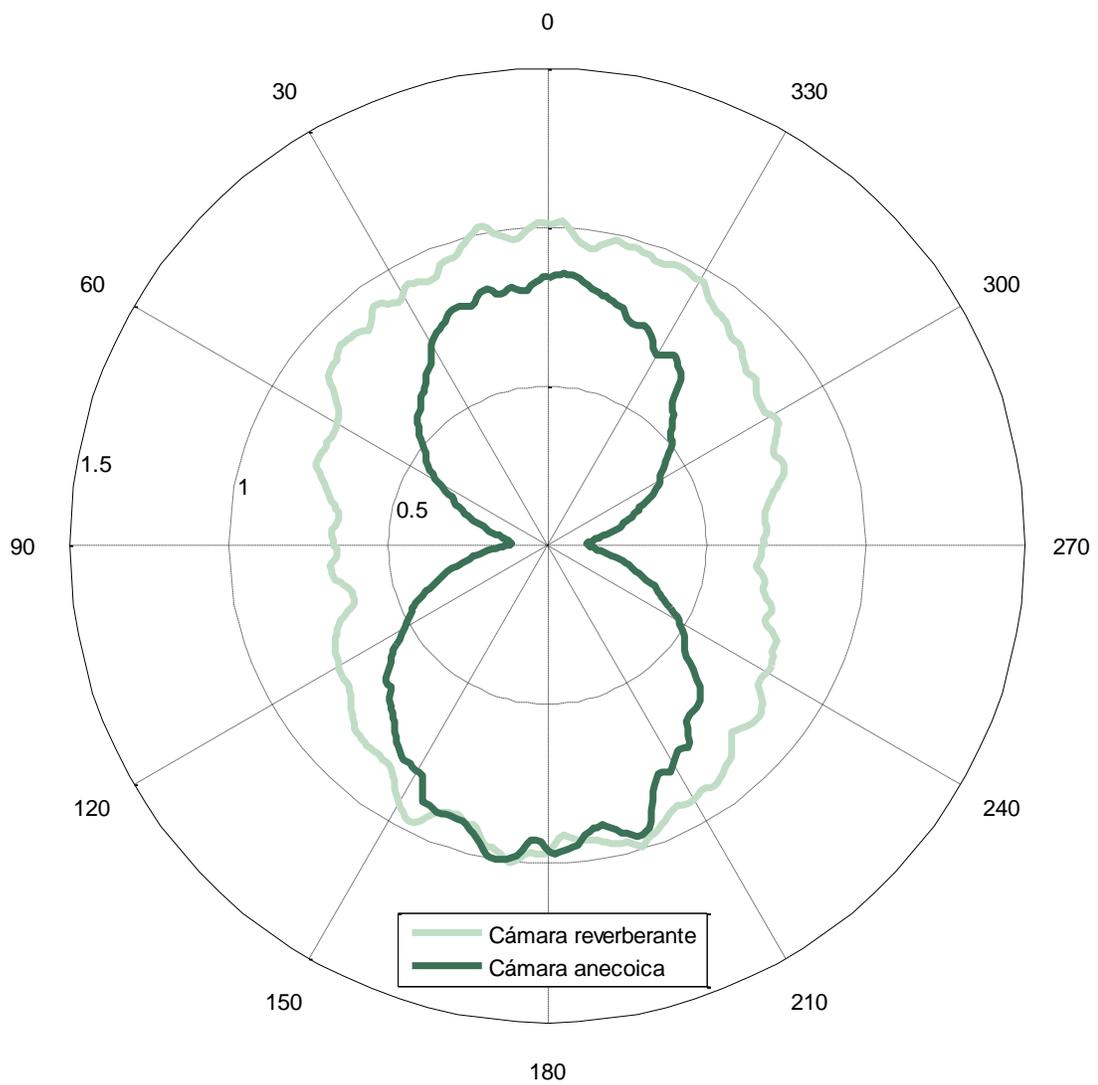


Figura A.9: Medición del diagrama polar en ambas cámaras para la banda de 200 Hz.

A.4. DISEÑOS DE ELEMENTOS DIFUSORES

A.4.1 Elemento difusor rotatorio

El elemento difusor rotatorio consta de planchas de acero, acrílico o el material que cumpla las características señaladas en la sección 8.3. Se propone utilizar una estructura metálica (acero o aluminio), con barras de sección angular (de tipo L) de 20 mm por 20 mm y eje de rotación de sección circular de 1 ¼ de pulgada. El difusor rotatorio es fijado al eje del motor de 12 rpm propuesto.

En la Figura A.10 muestra las dimensiones de la estructura de un aspa del difusor rotatorio con vistas frontal y lateral, la Figura A.11 muestra la vista superior de éste.

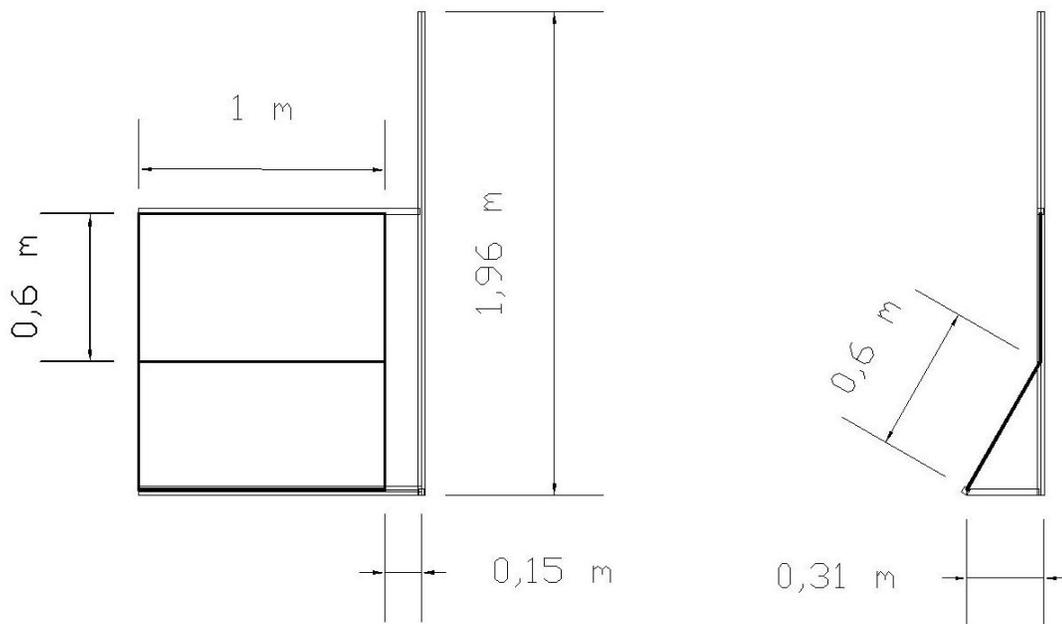


Figura A.10: Dimensiones de un aspa del elemento difusor rotatorio, vista frontal y lateral.

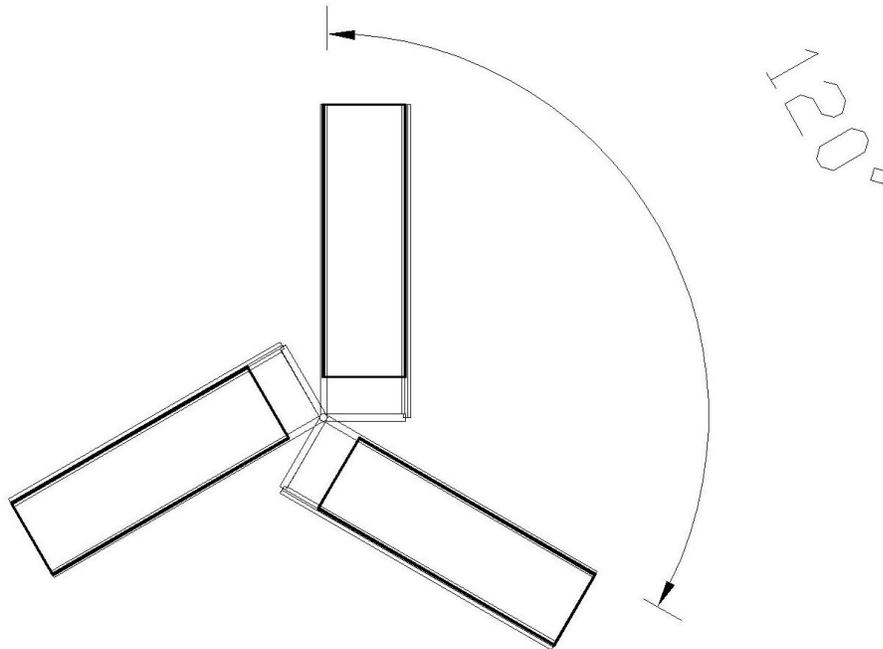


Figura A.11: Vista superior del elemento difusor rotatorio.

A.4.2 Elementos difusores colgantes de acero

Los elementos difusores colgantes de acero son dispuestos al azar y enganchados mediante cables, la Figura A.12 muestra la distribución propuesta con una vista desde abajo, las dimensiones mostradas tienen como referencia los muros perpendiculares (muro Este y Sur). La Figura A.13 muestra los puntos designados, el cual los elementos difusores son enganchados por los cables, estos son los vértices y los puntos medios de los lados más largos de la plancha de acero. La Tabla A.7 muestra la longitud del cable para cada punto designado de la Figura A.13.

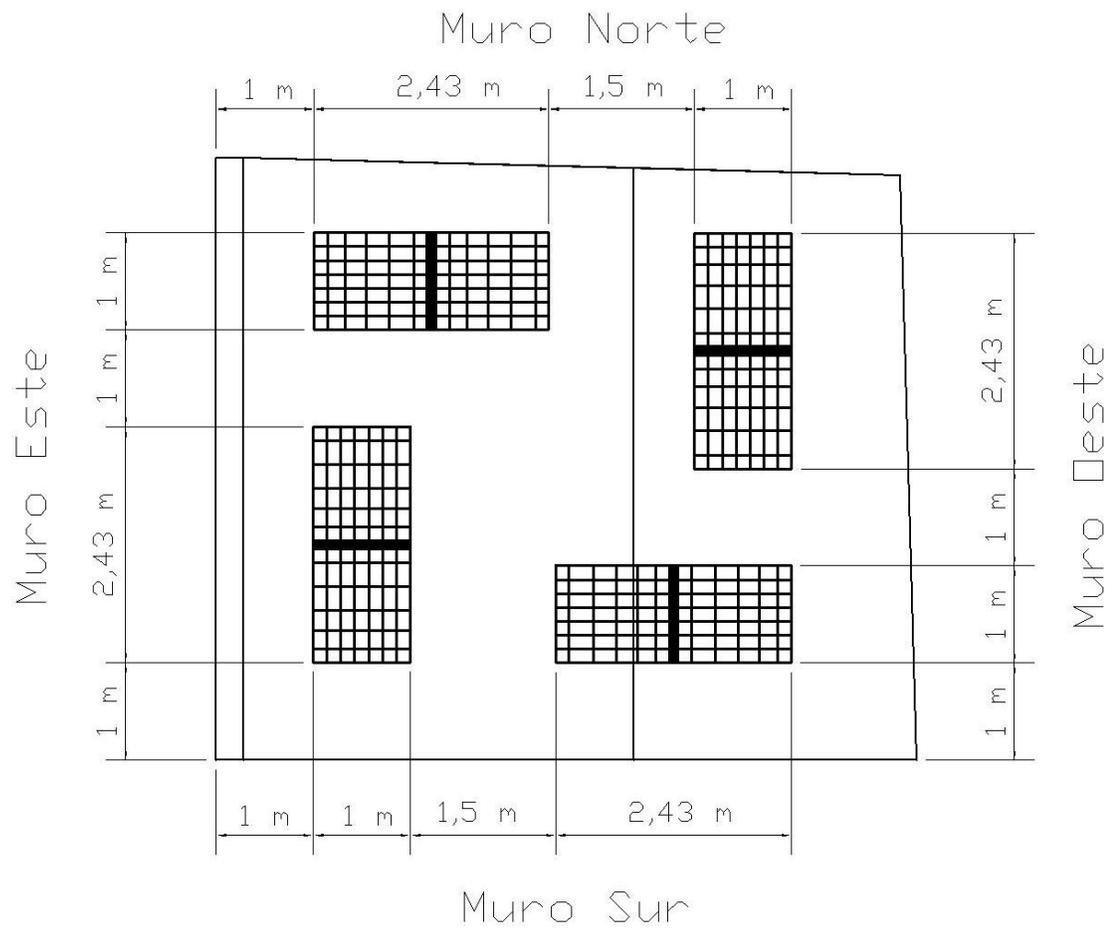
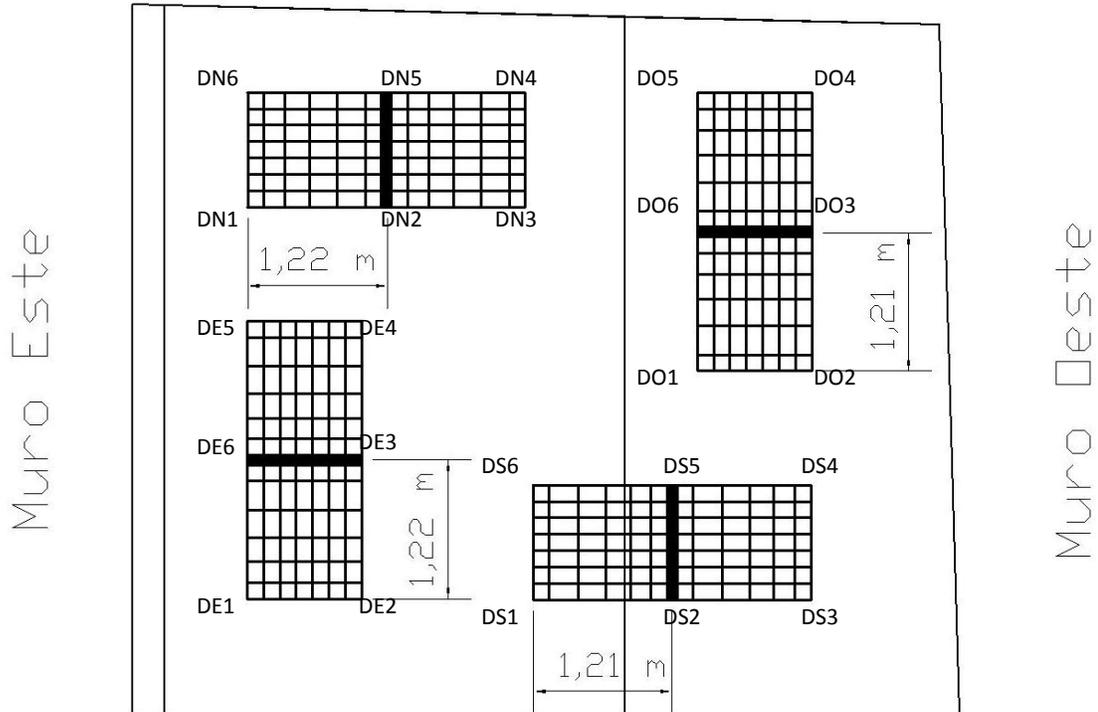


Figura A.12: Vista desde abajo de la posición de los nuevos elementos difusores de acero propuestos, en el cielo de la cámara reverberante Idiem.

Muro Norte



Muro Sur

Figura A.13: Designación de puntos de enganche del elemento difusor de acero con cable.

Tabla A.7: Medida del cable en cada punto de observación.

Punto	Longitud del cable (m)	Punto	Longitud del cable (m)
DN1	0.67	DE1	0.67
DN2	1.22	DE2	0.59
DN3	1.80	DE3	1.24
DN4	1.80	DE4	1.90
DN5	1.22	DE5	1.98
DN6	0.67	DE6	1.31
DS1	1.79	DO1	1.80
DS2	1.10	DO2	1.90
DS3	0.58	DO3	1.23
DS4	0.58	DO4	0.59
DS5	1.10	DO5	0.48
DS6	1.79	DO6	1.12

A.4.3 Elementos difusores colgantes de acrílico

Los elementos difusores de acrílico propuestos son enganchados en sus vértices por cables que están sujetos en el cielo de la cámara reverberante, la dimensión de cada uno es 1 m por 1,2 m. La Figura A.14 muestra la ubicación de los elementos difusores de acrílico, en el plano se observa desde la posición inferior (vista hacia el arriba) y las longitudes expuestas están referenciadas desde los muros perpendiculares (muro Este y Sur).

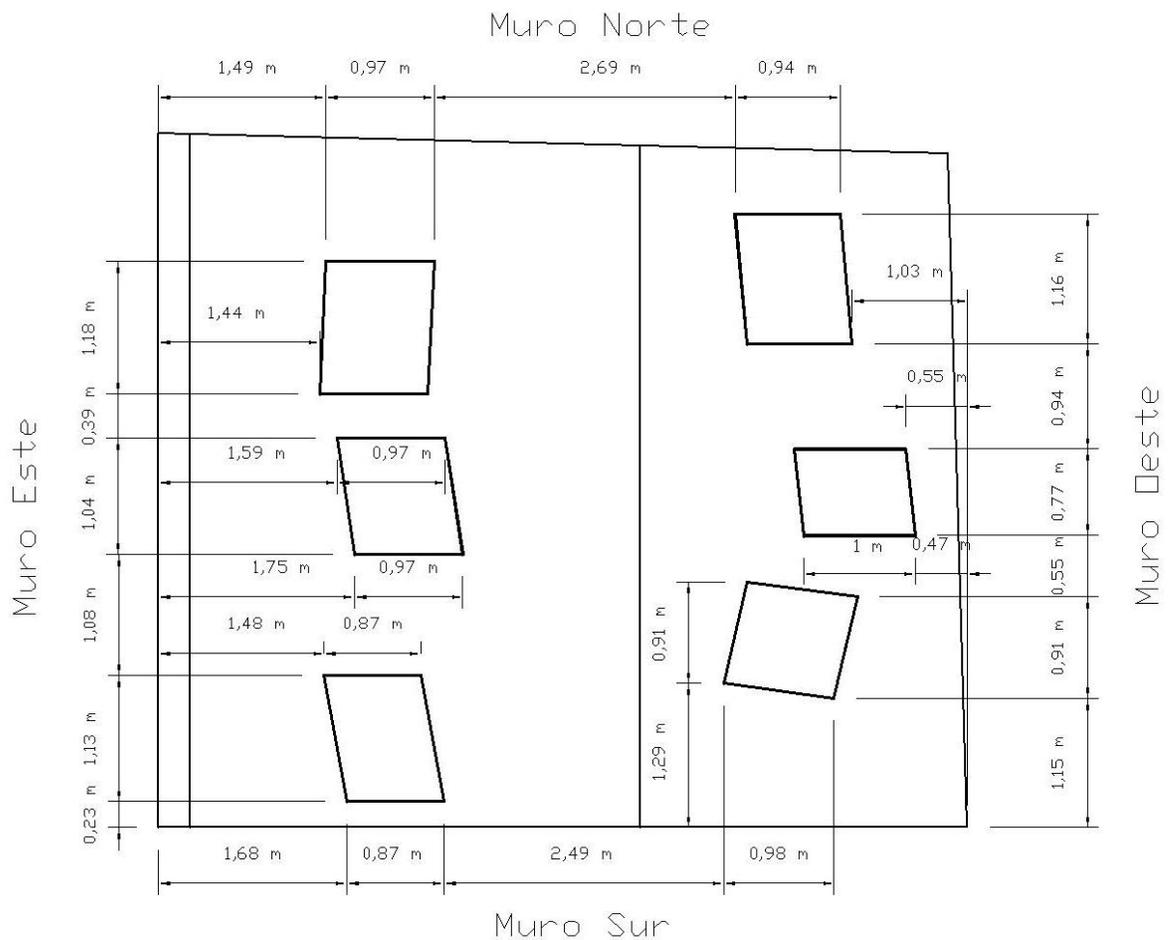


Figura A.14: Vista desde debajo de la distribución de elementos difusores de acrílico propuestos, en el cielo de la cámara reverberante Idiem.

En la Figura A.15 se designan los puntos el cual los elementos difusores son enganchados por cables, luego en la Tabla A.8 se detalla la longitud del cable para cada punto de la Figura A.15.

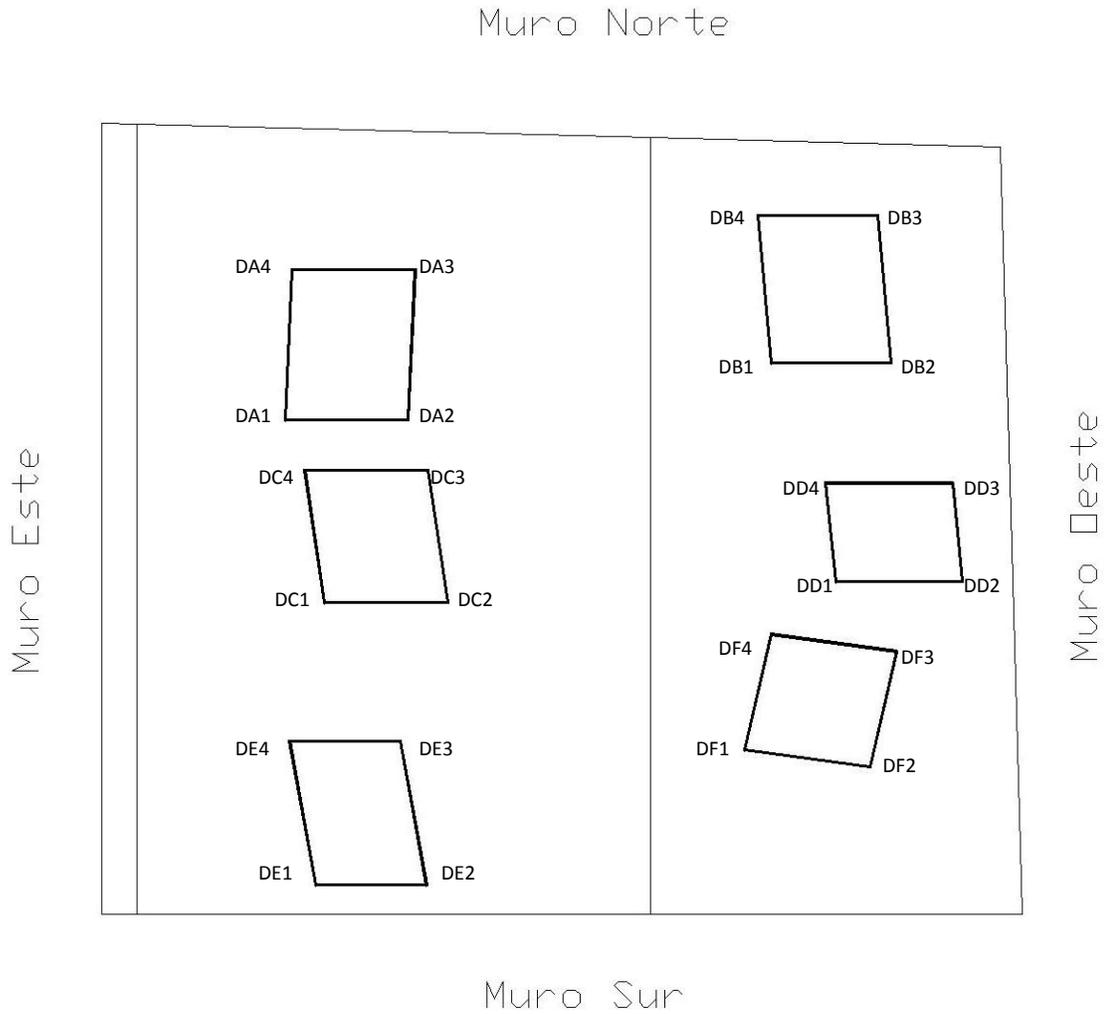


Figura A.15: Designación de puntos de enganche del elemento difusor acrílico con cable.

Tabla A.8: Medida del cable en cada punto de observación.

Punto	Longitud de cable (m)	Punto	Longitud de cable (m)
DA1	1.63	DD1	1.10
DA2	2.60	DD2	2.59
DA3	1.49	DD3	2.20
DA4	1.83	DD4	2.00
DB1	1.02	DE1	0.92
DB2	1.46	DE2	1.36
DB3	1.74	DE3	1.72
DB4	2.60	DE4	2.60
DC1	1.11	DF1	1.82
DC2	2.60	DF2	2.03
DC3	1.89	DF3	2.60
DC4	1.70	DF4	1.08

A.4.4 Elementos difusores fijos de acero

La introducción de elementos difusores fijos se propone efectuar en dos muros de la cámara reverberante. Se propone ingresar elementos difusores de acero de forma semicilíndrica y fijados al muro en dos de sus bordes. La Figura A.16 y A.17 muestra la ubicación de los elementos difusores de acero en los muros Norte y Este respectivamente, éstos son fijados a los muros en dos de sus bordes para cada elemento difusor, la fijación se muestra remarcado en negro.

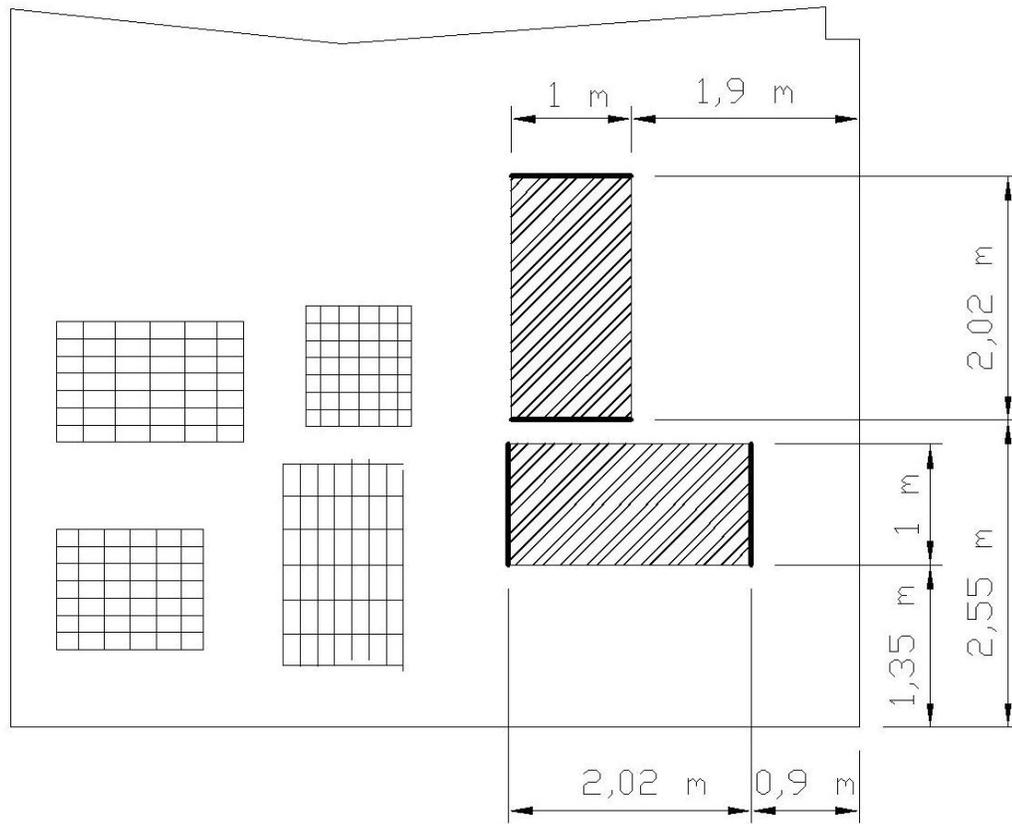


Figura A.16: Distribución propuesta de los elementos difusores semicilíndricos de acero en el muro norte.

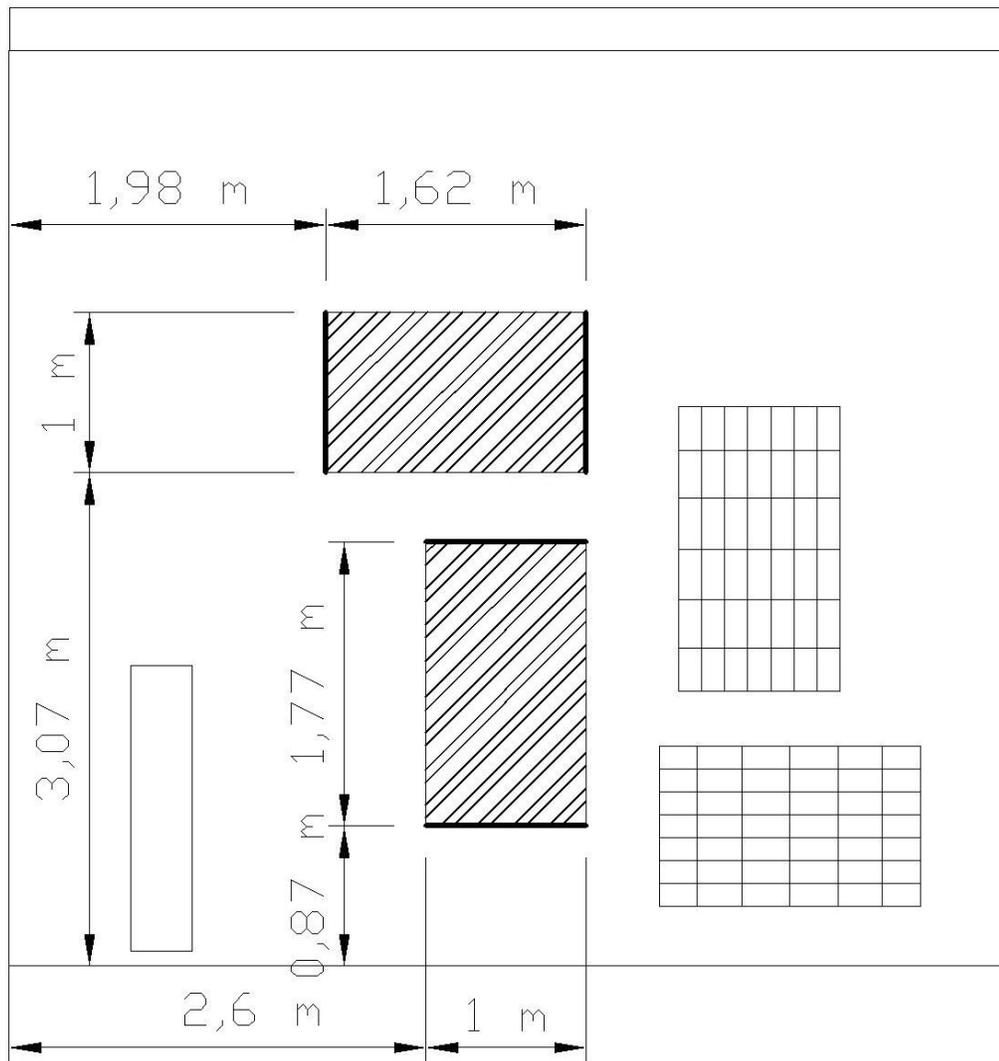


Figura A.17: Distribución propuesta de los elementos difusores semicilíndricos de acero en el muro este.

A.4.5 Elementos difusores fijos de acrílico

Los elementos difusores de acrílico que se proponen son de superficies planas, por lo tanto la fijación de éste en el muro debe tener alguna elevación para que no esté paralelo al muro. Se propone introducir elementos difusores de acrílico en dos muros de la cámara reverberante Idiem.

La Figura A.18 y A.19 muestra la ubicación propuesta de los elementos difusores de acrílicos en los muros Norte y Este, cada plancha de acrílico tiene dimensiones de 1 m por 1,2 m.

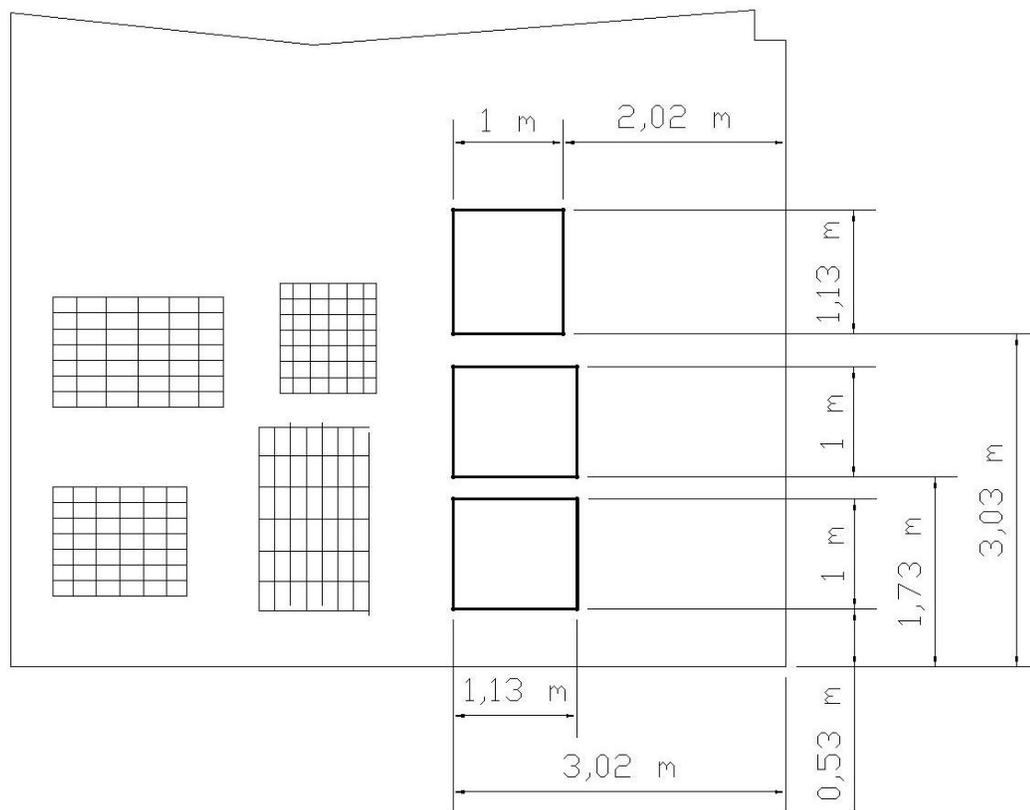


Figura A.18: Distribución propuesta de los elementos difusores de acrílico en el muro norte.

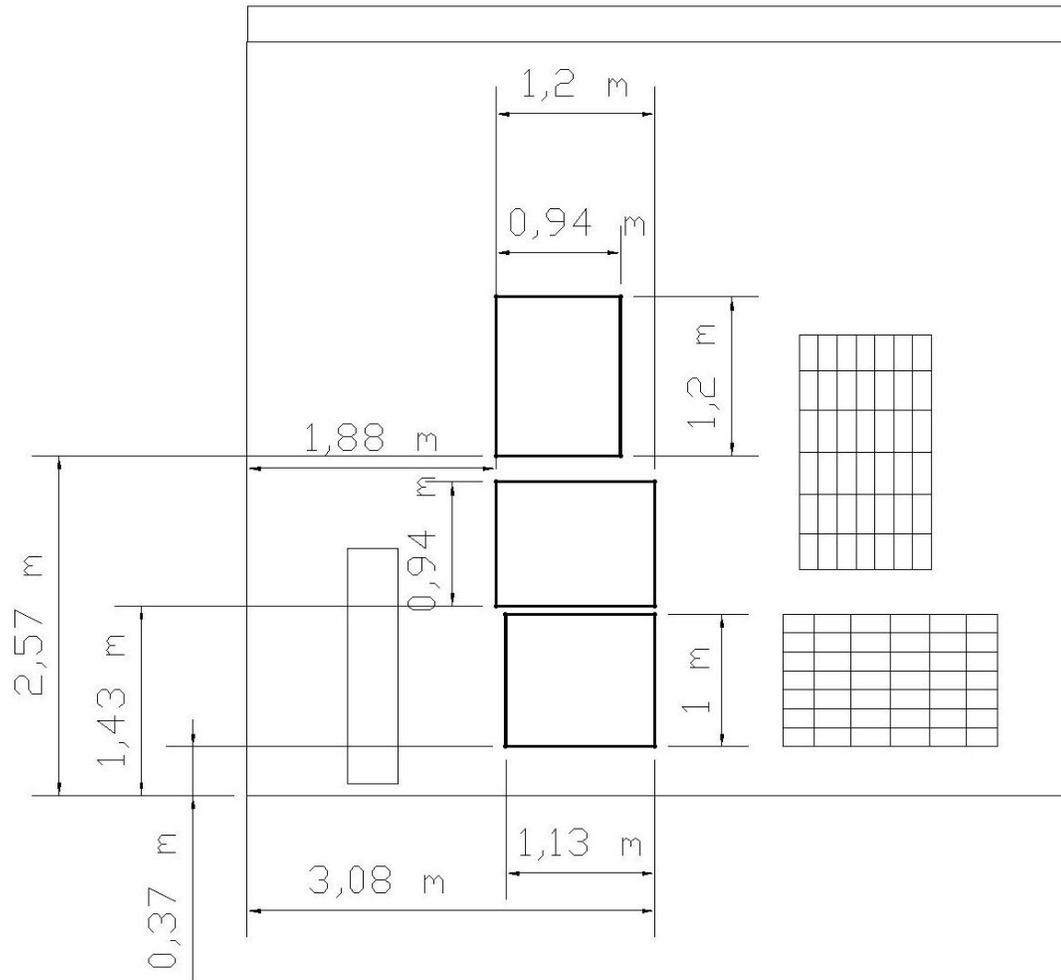


Figura A.19: Distribución propuesta de los elementos difusores de acrílico en el muro este.

En la Figura A.20 se designan los puntos que localizan los vértices de cada plancha acrílica, estos vértices son fijados al muro, la Tabla A.9 muestra la longitud de la elevación del vértice con el muro. La fijación elevada en los muros se puede efectuar con pequeñas barras metálicas (de preferencia acero o aluminio, o que soporten cargas superiores a 15 kg), una barra de acero con longitudes mostradas en la Tabla A.9 y con pestañas de fijación para pernos en ambos extremos sería una solución simple. Las longitudes nulas de la tabla mencionada representan fijaciones directas al muro.

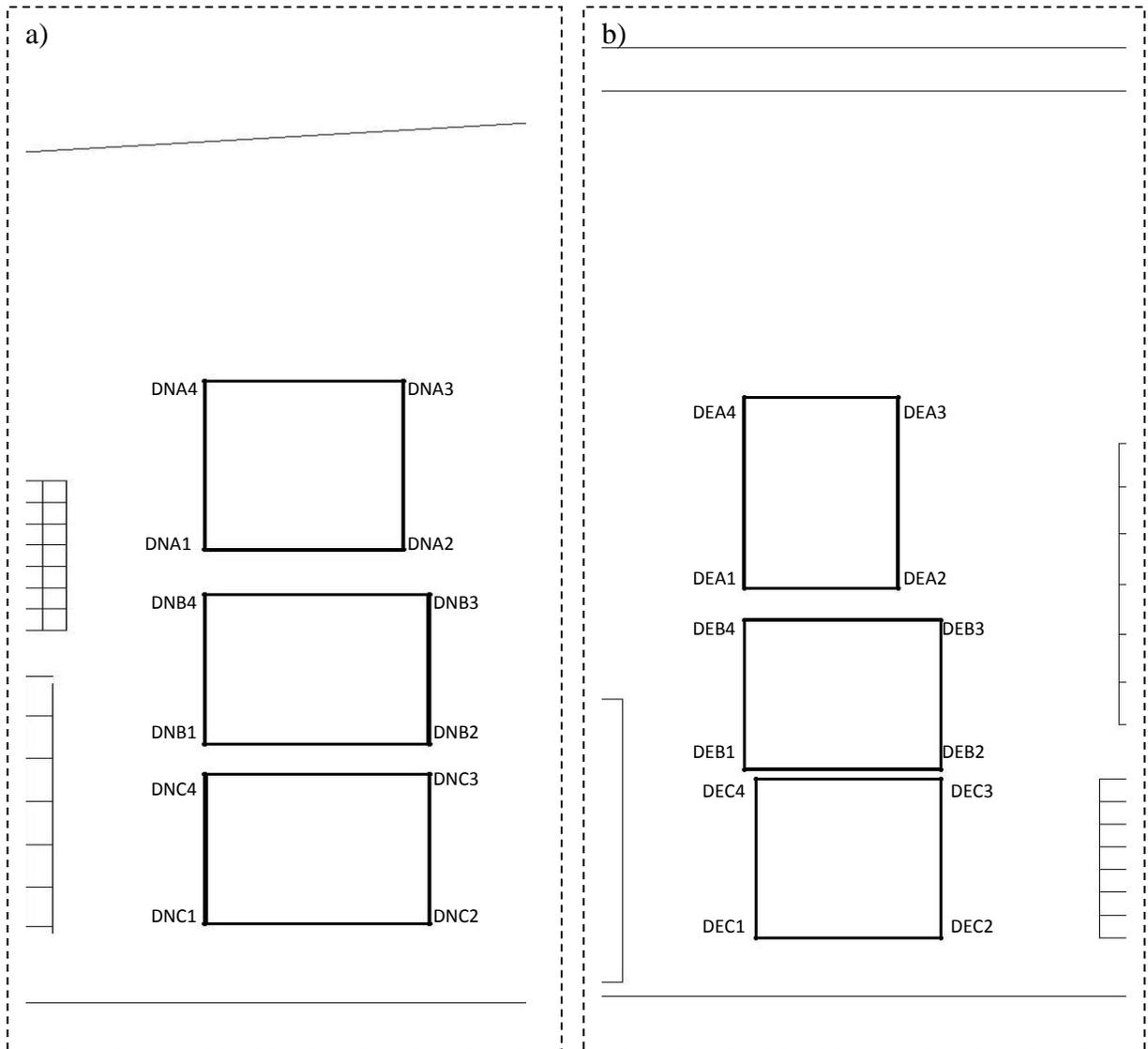


Figura A.20: Designación de los puntos de fijación de los elementos difusores de acrílico en a) muro norte y en b) muro este.

Tabla A.9: Medida de la elevación (o barra para fijación) en cada punto de observación.

Punto	Longitud de elevación (m)	Punto	Longitud de elevación (m)
DNA1	0.00	DEA1	0.00
DNA2	0.00	DEA2	0.34
DNA3	0.41	DEA3	0.34
DNA4	0.41	DEA4	0.00
DNB1	0.00	DEB1	0.34
DNB2	0.41	DEB2	0.34
DNB3	0.41	DEB3	0.00
DNB4	0.00	DEB4	0.00
DNC1	0.41	DEC1	0.42
DNC2	0.00	DEC2	0.00
DNC3	0.00	DEC3	0.00
DNC4	0.41	DEC4	0.42

A.4.6 Detalles del análisis de costo

Tabla A.10: Detalle de los costos de cada solución.

Solución	Material	Mano de obra	Total
Mejorar los elementos difusores fijos actuales	Madera prensada 3,2mm de espesor 24 m ² (cholguán): \$44.000	Cortes de planchas e instalación: \$25.000	\$69.000
Elemento difusor rotatorio	Planchas de acrílico, 3.6 m ² (metacrilato): \$80.000 Perfil rectangular, 6 m: \$4.000 Perfil tubular, 6 m: \$4.000 Motor eléctrico: \$110.000 Regulador de frecuencia: \$89.000 Rodamiento (2): \$7.000	Soldadura, cortes, ensamble e instalación: \$200.000	\$494.000
Elementos difusores colgantes de acero	Planchas de acero 1mm espesor, 12 m ² : \$60.000 Cadena de acero, 36 m: \$29.000	Instalación: \$80.000	\$169.000
Elementos difusores colgantes de acrílico	Planchas de acrílico 5mm espesor, 7.2m ² : \$159.000 Cadena de acero, 25 m: \$20.000	Cortes, instalación: \$120.000	\$299.000
Elementos difusores fijos de acero	Planchas de acero 1mm espesor 12 m ² : \$60.000	Dobles, instalación: \$100.000	\$160.000
Elementos difusores fijos de acrílico	Planchas de acrílico 5mm espesor, 7.2m ² : \$159.000 Cuñas de elevación: \$5.000	Cortes, instalación: \$120.000	\$ 284.000