



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SONIDO Y ACÚSTICA

**PROPUESTA DE DISEÑO ACÚSTICO Y CONSTRUCTIVO DE UNA CÁMARA
REVERBERANTE PARA EL NUEVO CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS
AMÉRICAS**

Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos
establecidos para optar por el título de
Ingeniería de Sonido y Acústica

Profesor Guía
Ing. Yolanda Carreño Pozo

Autor
Paúl Rodrigo Lozada Moreno

Año
2010

Ciudad
Quito

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el/la estudiante, orientando sus conocimientos para un adecuado desarrollo del tema escogido, y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Yolanda Carreño Pozo
Ingeniero Civil en Sonido y Acústica
172 169 464- 2

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

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

Lozada Moreno Paúl Rodrigo
171306638-7

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser la luz guía en mi vida, a mis Padres y hermanos por su apoyo, paciencia y confianza; a mi profesora guía por mostrarme todos sus conocimientos durante mucho tiempo; a todos quienes aportaron en mi vida, y de quienes sigo aprendiendo cada día más.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, mis abuelos, padres, hermanos, por ser el mayor aporte, la mejor inspiración, y la más grande bendición que Dios puso en mi vida.

A Lambdacoustic Laboratories S.A.; mi mayor reto, y mi más anhelado sueño.

A todos quienes contribuyeron de una u otra manera para la realización de este trabajo investigativo.

RESUMEN

La Universidad de las Américas tiene como lema crear modelos de referencia para la educación superior ecuatoriana, construyendo una comunidad de alumnos comprometidos con el país y la institución, promoviendo en cada uno de ellos, su realización en excelencia, tanto en el ámbito personal como profesional. Es por esto que, la hacen pionera a nivel nacional en cuanto a carreras innovadoras, y por la calidad de educación brindada a cada uno de sus alumnos. Por lo tanto, es imprescindible la implementación de espacios que permitan desarrollar mediante práctica, la investigación científica de sus educandos.

El presente trabajo investigativo, se enfoca en el establecimiento de un espacio acústico, que es el pilar fundamental para que los estudiantes de la carrera y personas afines, puedan desarrollar y poner en práctica todo lo requerido en base a la utilización de una Sala Reverberante con equipamiento y perfil técnico de primera generación.

Es importante conocer que este trabajo, fue realizado bajo el cumplimiento de normativa internacional, y experiencias prácticas recomendadas por personas de vasta experiencia en el ámbito de diseño acústico de recintos.

ABSTRACT

The Universidad de las Américas has as motto to create reference models for the Ecuadorian superior education, building a community of committed students with the country and the institution, promoting in each one of them, its realization in excellence, so much in the personal environment as professional. It is for this reason that, they make it pioneer at national level as for innovative careers, and for the education quality toasted to each one of their. Therefore, it is indispensable the implementation of spaces that you/they allow to develop by means of practice, the scientific investigation of their students.

The present investigative work is focused in the establishment of an acoustic space that is the fundamental pillar so that the students of the career and people tune, they can develop and to put into practice all that required based on the use of a Reverberation Room with equipment and technical profile of first generation.

It is important to know that this work, it was carried out under the execution of international normative and practical experiences recommended by people of vast experience in the environment of acoustic design of enclosures.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	11
OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS	12
JUSTIFICACIÓN	13
CAPITULO I	
MARCO TEORICO	
1.1 Acondicionamiento Acústico	15
1.1.1 Tiempo de reverberación	15
1.1.2 Campo Sonoro Directo y Campo Sonoro Reverberante Difuso	17
1.1.3 Modos Normales de Vibración (MNV), Resonancias	19
1.1.4 Difusión (Difusor)	21
1.1.5 Panel Reflectante – Reflector	22
1.1.6 Coefficiente de Absorción de un material	24
1.2 Aislamiento Acústico	25
1.2.1 Coefficiente de transmisión sonora (τ)	25
1.2.2 Pérdida por transmisión. (TI)	26
1.2.3 Material absorbente	26
1.2.4 Cámara de aire	27
1.2.5 Resonancia Masa-Aire-Masa	28
1.2.6 Sellos perimetrales	29

CAPITULO II	
NORMATIVA ESPECÍFICA PARA EL DISEÑO E IMPLEMENTACION DECAMARAS REVERBERANTES	30
2.1 Requisitos para la implementación de una cámara reverberante	31
CAPITULO III	
CONSIDERACIONES TEÓRICAS PARA EL DISEÑO DE CAMARAS REVERBERANTES	35
3.1 Diseño de una cámara reverberante	39
3.1.1 Tiempos de reverberación mínimos recomendados para cámara reverberante	48
3.2 Procedimientos para evaluar el diseño de la cámara reverberante	50
3.2.1 Difusión Sonora	50
CAPITULO IV	
DISEÑO ACUSTICO Y ARQUITECTONICO DE LA CAMARA REVERBERANTE	54
4.1 Nivel de ruido de fondo al interior de la cámara reverberante	54
4.1.1 Nivel de ruido de fondo de las salas	54
4.2 Aislamiento Acústico	56

4.2.1	Diseño del Aislamiento Acústico de la Cámara Reverberante	56
4.2.1.1	Paredes y Pisos	57
4.2.1.2	Puertas	61
4.2.1.3	Materiales para revestimiento interno	65
4.2.1.3.1	Techo	66

CAPITULO V

INSTRUMENTACIÓN REQUERIDA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA SALA REVERBERANTE	68
---	----

CAPITULO VI

ANÁLISIS DE COSTOS REQUERIDOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CÁMARA REVERBERANTE E INSTRUMENTAL PROPUESTO	70
---	----

CONCLUSIONES	75
---------------------	----

BIBLIOGRAFÍA	77
---------------------	----

ANEXOS	80
---------------	----

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se basa principalmente en la necesidad de instaurar recintos que puedan brindar las mejores prestaciones técnicas propias de cada uno de ellos, para la realización de proyectos de alto nivel técnico, tratando de alcanzar estándares de medición internacionales, y priorizando el nivel de aprendizaje de los alumnos de Ingeniería en Sonido y Acústica de la **Universidad de las Américas**.

Aparte del interés teórico que pueda tener un campo sonoro difuso, la utilidad práctica de disponer de una buena cámara reverberante se deriva de la sencillez experimental en la medición de la absorción sonora de materiales y objetos, de la potencia acústica de fuentes sonoras y de la exploración de vibraciones eventuales en sólidos excitados por vía aérea. De la misma manera, diseñar laboratorios que posean el equipamiento adecuado y que sean idóneos para impartir y recibir información académica.

Es fundamental por consiguiente alcanzar grados suficientes de aproximación a la situación ideal de difusión. Las normas internacionales de medición tratan de establecer condiciones mínimas de aproximación y se han investigado y desarrollado magnitudes de fácil determinación que garanticen un adecuado cumplimiento.

La teoría acústica en toda su extensión, ha experimentado un gran progreso, se han desarrollado y propuesto nuevas y más fundamentadas técnicas para la realización de mediciones de cualquier parámetro acústico, y en el caso particular de esta tesis de grado, la difusión de un recinto concreto.

La instauración de la cámara reverberante es el pilar fundamental para que los estudiantes puedan acceder a los beneficios prácticos que podría brindar una sala reverberante con equipamiento y perfil técnico de primera generación en el ámbito de la acústica.

OBJETIVOS GENERALES

- Proponer el diseño acústico y constructivo de una cámara reverberante, para la Escuela de Ingeniería en Sonido y Acústica de la Universidad de las Américas; de acuerdo a diversos criterios técnicos establecidos en las normas ASTM,ISO,UNE e IRAM.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos para la elaboración de este proyecto:

- Crear un campo sonoro altamente difuso, sustentado en la aplicación de diversos criterios de diseños tanto acústicos como arquitectónicos, que se fundamenten en la no homogeneidad del espacio interno (geometría) y en las características propias de los materiales utilizados en la construcción del espacio.
- Lograr un diseño acústico que evite los principales modos normales de vibración propios del recinto, que posea una respuesta en frecuencias lo más extendida y plana posible sobre el espectro audible, adecuado aislamiento sonoro y vibratorio, y que mantenga temperatura, presión y humedad eficientemente controladas.
- Proponer la implementación del equipamiento necesario para el correcto funcionamiento de la sala reverberante.
- Crear ambientes de aprendizaje que presenten condiciones espaciales deseables, que permitan mantener una elevada interacción entre los alumnos, instrumentos y las áreas de análisis.

JUSTIFICACIÓN

Una cámara reverberante es una sala diseñada para crear un ambiente acústico altamente difuso, es decir, un campo sonoro en el cual la energía acústica tiene la posibilidad de viajar en todas las direcciones posibles.

El propósito principal de una sala de reverberación es llevar a cabo mediciones acústicas como por ejemplo, determinar el nivel sonoro de salida de diversas fuentes sonoras, la pérdida por transmisión de diversas particiones, pérdida por inserción de silenciadores y barreras acústicas, respuesta característica de micrófonos y coeficientes de absorción de materiales, entre otros, pudiendo ser usadas incluso para analizar fatiga producida por la emisión niveles sonoros de alta intensidad de aeronaves, vehículos espaciales y otros equipos.

Una cámara reverberante debe poseer un aislamiento sonoro que sea capaz de evitar sonidos extraños provenientes de otros lugares, y sobre todo, mantener a la temperatura, presión y humedad controladas.

Aparentemente la elaboración de este espacio acústico puede ser lo menos complejo con relación a otros laboratorios de análisis, como por ejemplo una cámara anecóica; pero se ha comprobado, que a menudo es la que presenta mayores deficiencias al ser construida. Lograr los requerimientos de la sala en cuanto a niveles sonoros, coeficientes de absorción de sonido, tiempos de reverberación adecuados, una correcta distribución volumétrica entre la sala y el objeto a ser analizado; es una labor bastante compleja.

Varios autores y diseñadores basan sus proyectos de diseño en la utilización de paredes no paralelas y techos de alturas diferentes; para de esta manera, conseguir mayor cantidad de reflexiones y por ende, un campo sonoro difuso bastante eficiente. En la actualidad, se ha podido obtener una buena difusión en cualquier configuración de recinto, debido también a la utilización de paneles difusores

estacionarios y paneles reflectores móviles, los que permiten un intercambio de la energía sonora para una distribución uniforme de las resonancias del cuarto.

Para que una cámara reverberante funcione correctamente, se deben tener muchas consideraciones, y una cierta cantidad de factores, los cuales incluyen:

- El volumen interior del recinto
- Las dimensiones de la cámara con relación al tamaño de los objetos a ser analizados
- El área interna de trabajo
- La banda de frecuencia más baja que sea de interés para el análisis
- Reducción de niveles de ruido
- Aislamiento anti vibratorio
- Puertas y conexiones de acceso
- Sistemas eléctrico adecuado y de ventilación altamente silencioso
- Requerimientos estructurales

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

Para poder comprender de mejor manera los términos empleados en el presente trabajo investigativo, se procederá a mencionar varios conceptos que serán útiles a la hora de interpretar cada término; para lo cual, se procederá a definir los términos utilizados tanto en aislamiento como acondicionamiento acústico.

1.1. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

1.1.1. TIEMPO DE REVERBERACIÓN

El Tiempo de Reverberación (RT o T60), es definido por Wallace Sabine como el tiempo T necesario a partir de la interrupción de una fuente sonora dentro de un recinto cerrado, para que la densidad de energía se reduzca en **60 [dB]**, es decir que se reduzca a una millonésima parte de la densidad de energía original (aquella que existía antes de apagar la fuente).

A continuación se muestra un ejemplo de **T60**:

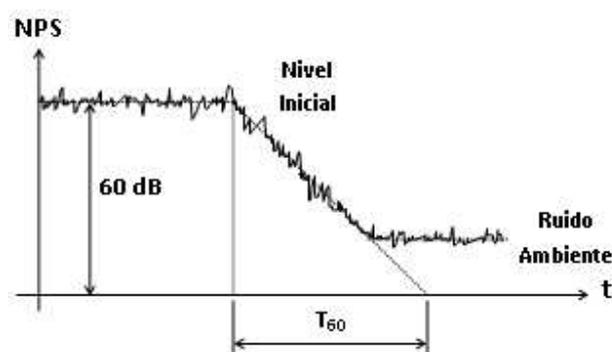


Figura 1.1 Gráfico del tiempo de reverberación (T60).

El Tiempo de Reverberación (T60) se mide por bandas de frecuencia (bandas de octava generalmente), debido a que viene determinado por el volumen de la sala, y por las superficies con un coeficiente de absorción determinado. Como los coeficientes de absorción de los materiales que componen cualquier espacio, no son iguales para todas las frecuencias, las reflexiones generadas en el interior del local serán diferentes para cada frecuencia y por lo tanto el T60 del local varía según la frecuencia.

Para calcular el **T60** de un local sin realizar mediciones, y conociendo los coeficientes de absorción de cada material que lo conforma, se puede utilizar la fórmula de Sabine:

$$T_{60} = 0,161 * \left(\frac{V}{A} \right) \text{ [s]} \quad \text{Fórmula (1.1)}$$

Donde:

V: Volumen de la sala aproximado en [m³].

A: Absorción sonora equivalente de la sala [m²_{sab}].

Cabe mencionar que para la elaboración de este trabajo, se utilizó el método Sabine, ya que es válido en recintos vivos, como lo es en este caso, la cámara reverberante.

El valor de **T60** es muy importante si se quiere conseguir buenos niveles de inteligibilidad dentro de los recintos.

1.1.2. CAMPO SONORO DIRECTO Y CAMPO SONORO REVERBERANTE O DIFUSO

Campo sonoro se define como el valor que adquiere la presión sonora en cada punto del espacio. Para realizar el análisis, el campo sonoro se divide en dos componentes: el campo directo y el campo reverberante. El campo directo contiene la parte del sonido que acaba de ser emitido por la fuente, y que por lo tanto aún no experimentó ninguna reflexión, y el campo reverberante, en cambio, incluye la superposición de la primera reflexión y sus reflexiones posteriores.

Estas dos características del campo sonoro presentan comportamientos muy diferentes. En el campo sonoro directo, se puede observar que, a medida que aumenta la distancia entre el receptor y la fuente, el nivel de presión sonora disminuye rápidamente y lo hace a razón de 6[dB] por cada duplicación de la distancia. Por ejemplo, si a 1[m] de una fuente sonora se mide un nivel de presión sonora (NPS) de 70[dB]; a 2[m] (el doble de distancia que 1[m]), el NPS será de 64[dB]. A esta ley, se la conoce como la Ley del Inverso Cuadrático.

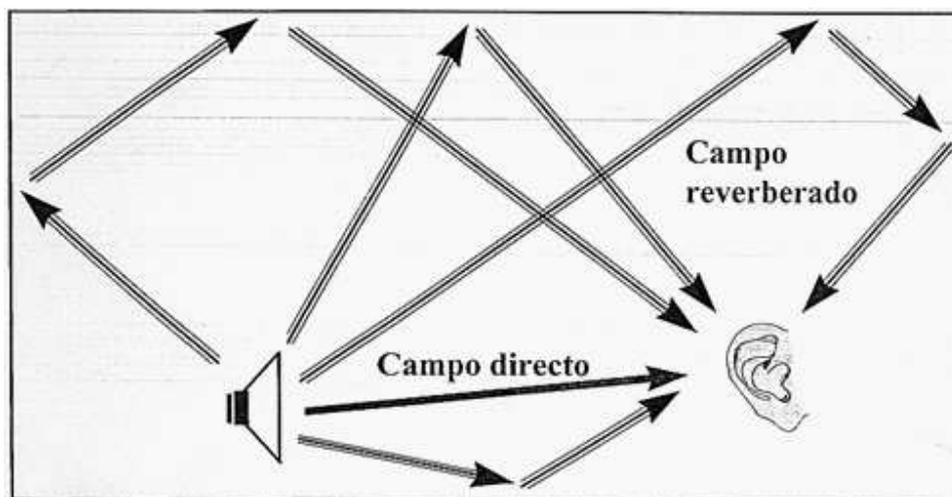


Figura 1.2. Relación entre campo sonoro directo y campo sonoro reverberante.

El campo reverberante, en cambio, es constante en los ambientes cerrados, como habitaciones, salas y otros recintos. Esto se debe a que el sonido sufre multitud de reflexiones (en los límites), y todas ellas se superponen entre sí, resultando una distribución prácticamente uniforme del sonido. En un ambiente cerrado, si el receptor se encuentra muy cerca a la fuente, se percibe que predomina el campo directo, y a medida que el receptor se aleja de la cercanía de la fuente, se puede apreciar que predomina el campo reverberante.

Por lo que resulta, que el campo directo tiene características de un campo libre, es decir sin reflexiones, mientras que el campo reverberante posee características de un campo difuso.

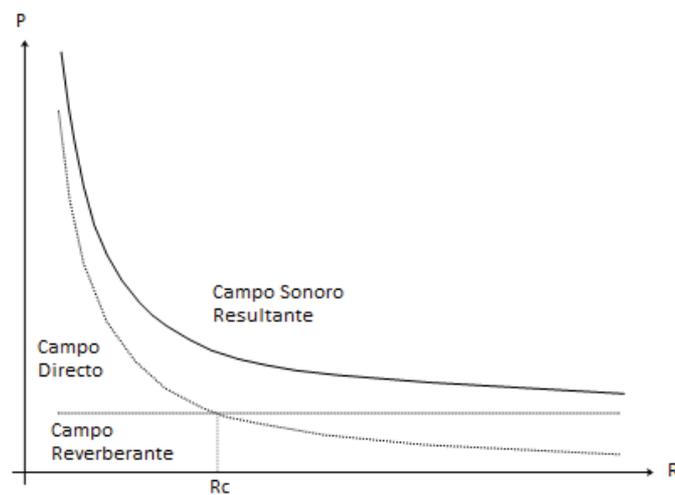


Figura 1.3. Campo directo y campo reverberante. Se indica también la distancia crítica, que limita las regiones.

1.1.3. MODOS NORMALES DE VIBRACIÓN (MNV), RESONANCIAS

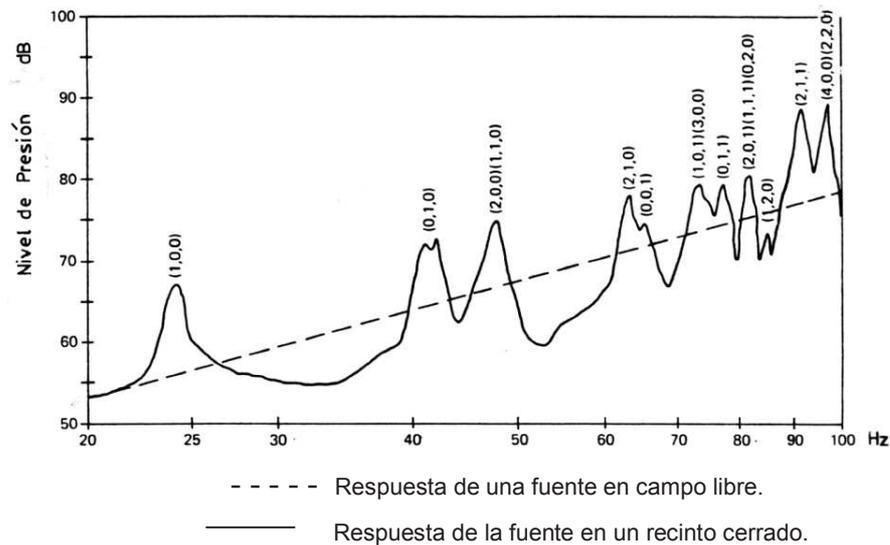


Figura 1.4. Modos normales de Vibración en un recinto.

En la gráfica anterior se observa una curva en línea continua, que representa las múltiples resonancias de la sala que son llamadas Modos Normales de Vibración (MNV); y que se encuentra comparada con la línea discontinua, que representa la respuesta de frecuencias en campo libre (sin superficies limitantes).

Un modo normal de vibración de cualquier sistema vibratorio es una frecuencia con la cual el sistema puede oscilar durante algún tiempo después de interrumpida toda excitación.

Como un recinto tiene muchas masas asociadas (paredes, techo, ventanas, etc.), también tiene múltiples frecuencias naturales propias de cada elemento, las mismas que se pondrán de manifiesto cuando una fuente sonora emita un sonido que contenga las mismas frecuencias o muy cercanas a las frecuencias naturales de cada partición. De esta forma, los niveles sonoros de dicha frecuencia se elevarán

por sobre el resto, debido a las resonancias internas, generando una respuesta de frecuencias no uniforme.

Los modos normales de vibración aparecen en todo el espectro de frecuencias, pero se los puede considerar frecuencias problemáticas en bajas frecuencias hasta los 300[Hz]. Debido a la gran cantidad energética contenida en bajas frecuencias, que podrían enmascarar al resto de frecuencias dentro del espectro.

Los MNV se encuentran presentes en todo tipo de recintos especialmente en aquellos que poseen particiones paralelas, debido a que la distancia de separación entre particiones, siempre concordará con la longitud de onda $[\lambda]$ de alguna frecuencia, produciéndose resonancias internas.

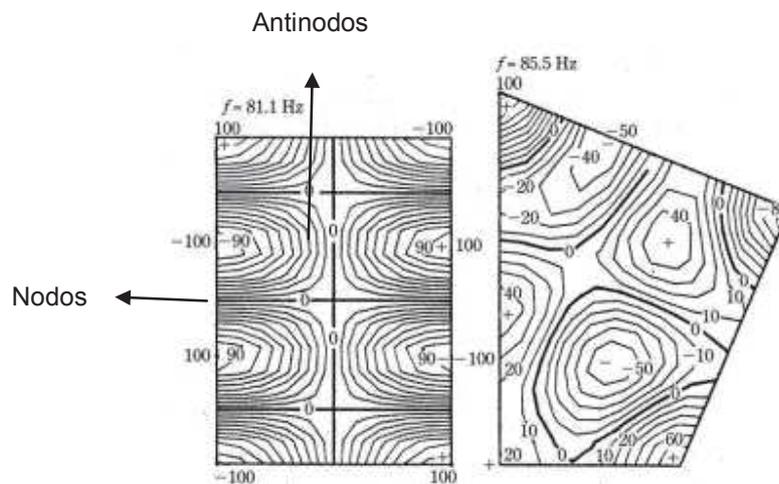


Figura 1.5. A la izquierda.- un ejemplo de habitación con problemas de MNV. A la derecha otra habitación con muchos menos problemas de estos modos, gracias simplemente a tener paredes no paralelas.

Para evitar que se generen inconvenientes de MNV, se recomienda evitar paralelismo entre paredes, techos, pisos, etc., mediante la inclinación de uno de ellos, colocación de paneles difusores o absorbentes.

1.1.4. DIFUSIÓN (DIFUSOR)

Difusión se refiere a la dirección de llegada de la energía del campo reverberante a los oídos del espectador, energía que debe ser aproximadamente la misma desde todas las direcciones.

Este fenómeno físico se presenta cuando una onda sonora incide sobre cualquier superficie, la misma, cumplirá con la ley básica de la reflexión. Si la superficie del material sobre la cual incidirá el sonido es 'rugosa' y dicha rugosidad es distribuida aleatoriamente, las reflexiones sonoras se distribuirán de la misma manera.

Para que mencionadas reflexiones sean distribuidas homogéneamente dentro de un espacio, se recomienda la utilización de superficies especialmente diseñadas para este fin, llamadas difusores.

Los difusores, son elementos acústicos que permiten lograr una mayor difusión del campo sonoro dentro de un recinto (lo cual tiende a corregir la existencia de modos normales y resonancias), así como puntos focales (donde se concentran ondas sonoras) y de vacíos acústicos (donde se anula el campo sonoro).

Existen diferentes tipos de difusores contruidos en base a secuencias matemáticas previamente diseñadas, que sirven para poder caracterizar las frecuencias a las cuales el elemento acústico presenta su mejor rendimiento. Hay que tener presente que estos elementos presentan difusión en una banda de frecuencias limitadas, y que dicha banda depende de las dimensiones del difusor.



Figura 1.6. Ilustración de la elaboración de un panel difusor.

1.1.5. PANEL REFLECTANTE (REFLECTOR)

Es un dispositivo que genera reflexiones de tipo regular y que se caracteriza por tener un coeficiente de absorción (α) muy bajo ($\alpha < 0.1$). Para que este tipo de paneles generen reflexiones regulares, las dimensiones del reflector deben ser mucho más grandes que la longitud de onda (λ) del frente sonoro incidente. Si lo anterior no se cumple el sonido se difracta (las ondas sonoras atraviesan el panel sin poner resistencia).

El empleo de acústica gráfica, permite determinar el área de cobertura de un reflector dentro de un recinto, usando la teoría rayos.

A continuación se muestran algunos ejemplos de colocación de reflectores acústicos en espacios.

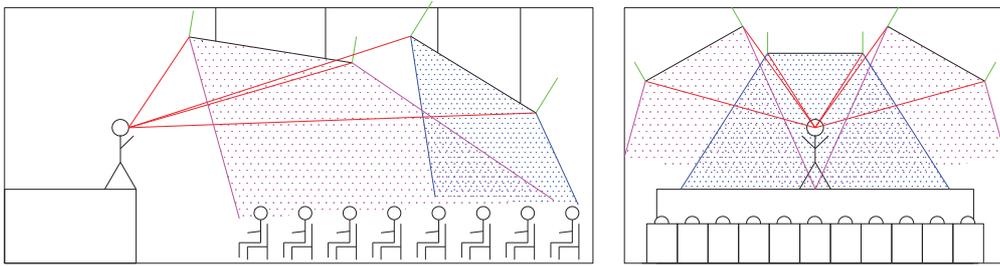


Figura 1.7. Disposición de paneles reflectores en un recinto (Rayos Acústicos).

Para proyectar áreas de cobertura para reflectores convexos y superficies cóncavas, se dibujan rayos incidentes desde la fuente hacia los bordes del reflector, se determinan las tangentes en ambos puntos y se sigue la ley de reflexión regular.

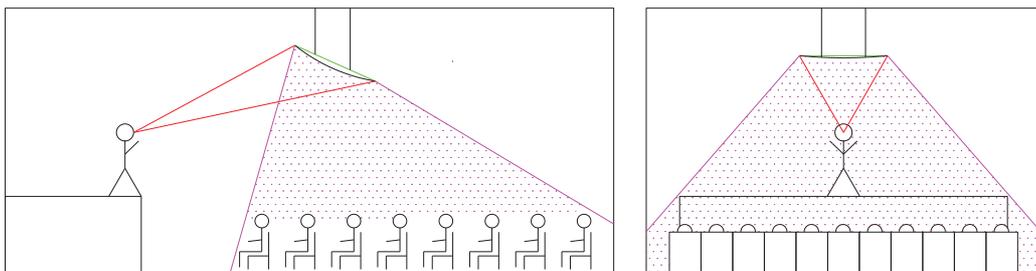


Figura 1.8. Distribución sonora mediante el uso de paneles reflectores en un recinto.

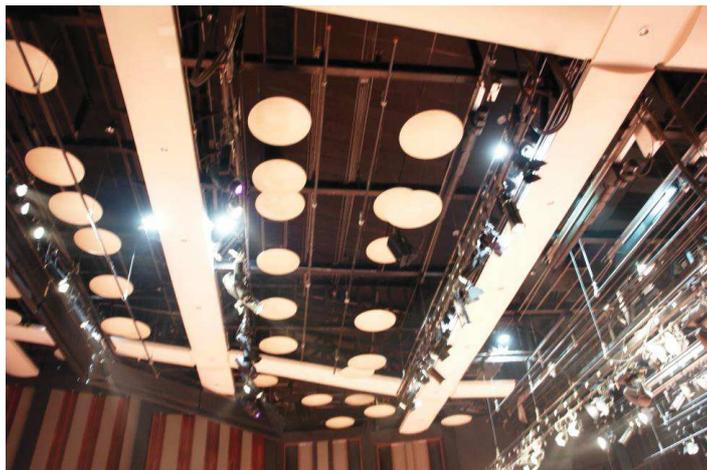


Figura 1.9. Distribución de paneles reflectores dentro de un recinto.

1.1.6. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE UN MATERIAL

El coeficiente de absorción α de un material se define como la energía absorbida por el material y la energía incidente sobre el mismo. Cuantifica la capacidad de un material, para absorber energía sonora, transformándola en calor.

Para calcular el coeficiente absorción de recintos, se recurre a la siguiente expresión:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum A_i}{\sum S_i} \Rightarrow \bar{\alpha} = \frac{A_t}{S_t} \quad (\text{Fórmula 1.2})$$

En donde:

A_t : Absorción total del recinto [m^2Sab].

$S_t (X, Y, Z)$: Superficies derivadas de las dimensiones de la sala [m].

Cabe mencionar que una vez aplicada la formulación anterior, el valor obtenido, siempre se encontrará comprendido entre los valores 0 y 1. Para expresar el máximo coeficiente de absorción, el valor tiende a su límite superior que será 1, en donde toda la energía que incide en el material es absorbida por el mismo; y el valor mínimo es 0 en donde toda la energía sonora es reflejada.

El coeficiente de absorción varía con la frecuencia debido a que el comportamiento de las ondas sonoras cambia con ella, por tanto los fabricantes de materiales acústicos especifican los coeficientes de absorción por banda de octava, de acuerdo a normativa internacional, como por ejemplo normas ASTM E1264 e IRAM 4065.

1.2. AISLAMIENTO ACÚSTICO

1.2.1. COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN SONORA (τ)

El coeficiente de transmisión sonora es una característica intrínseca del material, y va a depender de variables como la densidad superficial del material, la frecuencia incidente. Y evaluando estas condiciones se puede estimar el coeficiente mediante la siguiente relación:

$$\tau = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\rho_s c \omega}{2\rho_0 c} \right)^2 \quad (\text{Fórmula 1.3})$$

Donde:

ρ_s → Densidad superficial de la partición.

c → Velocidad del sonido

ω → Frecuencia angular del sonido incidente.

$\rho_0 c$ → Impedancia acústica específica

Donde:

τ .- es el coeficiente de transmisión que se define como la razón entre la potencia acústica transmitida y la potencia acústica incidente:

$$\tau = \frac{I_{trans}}{I_{incid}} = \frac{|Pt^2|}{|Pi^2|} \quad (\text{Fórmula 1.4})$$

Lo anterior favorece al cálculo del coeficiente de pérdida de transmisión sonora en una partición TL (Transmission Loss).

1.2.2. PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN. (TL)

La reducción sonora entre dos espacios depende de todos los elementos de la estructura que los separan. Por lo tanto, al momento de cuantificar la reducción sonora total se deben considerar todas las vías de transmisión sonora posibles. El aislamiento acústico a ruido aéreo, que presentan elementos como paredes, puertas, ventanas o similares, se puede definir como la pérdida de energía debido a las reflexiones y a la absorción, que experimenta la onda sonora incidente, al atravesar dicho elemento.

Las propiedades de aislamiento acústico de dichos elementos, puede establecerse si se conoce la diferencia de nivel de intensidad incidente y nivel de intensidad transmitida a través de estos. Esta diferencia se denomina pérdida de transmisión sonora y se representa por la relación:

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau} \text{ [dB]} \quad (\text{Fórmula 1.5})$$

Las barras paralelas que encierran los valores de la potencias tanto incidente como transmitida, indican el valor RMS de la presión sonora.

1.2.3. MATERIAL ABSORBENTE

Es cualquier superficie, de cualquier material, y cualquier objeto, animado e inanimado, que tenga la propiedad de absorber sonido en mayor o menor cantidad. Cuando una onda sonora incide sobre el material absorbente, la presión sonora hace vibrar el aire contenido en los poros y por distintos mecanismos de fricción contra las fibras y en el aire mismo, se produce la degradación de la energía sonora, y su respectiva transducción en energía calórica.

En la vida práctica, las características reales de absorción acústica de cualquiera material, dependerá de varios factores tales como: material que lo componga, forma constructiva en que se utiliza el mismo, forma y dimensiones del objeto o superficie y lugar en donde se encuentre ubicado el material absorbente.



Figura 1.10. Ilustración de la elaboración de un panel absorbente.

1.2.4. CÁMARA DE AIRE

Consiste en el espacio divisorio entre ambas caras de una partición y actúa como elemento elástico del sistema, es decir, un resorte. El aumento del espesor de la cámara disminuye su rigidez y por lo tanto los fenómenos resonantes de baja frecuencia quedan fuera del espectro para el cual se calcula el aislamiento.

El aire atrapado en el espacio entre las paredes actúa como un muelle, transfiriendo energía vibratoria de un panel al otro. Esta interacción entre paneles produce una bajada de la curva de pérdida por transmisión (TL) y, a menudo, una reducción del STC.

1.2.5. RESONANCIA MASA – AIRE – MASA

Según lo anterior, dentro de un sistema masa–aire–masa, existe una bajada de la curva de pérdida por transmisión (TL), como por ejemplo, el efecto de un espacio de aire de 6 [mm] entre dos cristales dentro de un sistema de ventanales bien sellados. Esta bajada se denomina resonancia masa-aire-masa, y se produce debido a que su frecuencia depende fundamentalmente de la masa de los dos paneles y de la cámara de aire existente entre ellos. Cuanto mayor es el espacio o más pesados los materiales, menor es la frecuencia a la que se produce la resonancia.

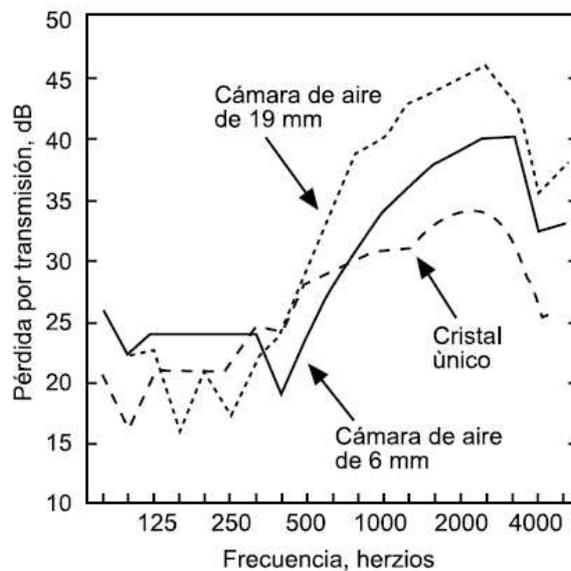


Figura 1.11. Influencia de la cámara de aire sobre la pérdida por transmisión (TL) de los sistemas de ventanas. La curva continua es el TL para cristal doble de 3[mm] con una cámara de aire de 6[mm] (STC 28). La curva punteada corresponde al mismo cristal con una cámara de aire de 19[mm] (STC 32). Como referencia se presenta la pérdida por transmisión del sonido para un cristal único de 3[mm] (STC 29).

1.2.6. SELLOS PERIMETRALES

Son fundamentales para compensar las diferencias de ajuste entre una partición como por ejemplo tabiques, puertas, ventanas, etc., y la estructura que lo limita (pisos, mampostería, etc.).

Si se requiere obtener una partición con alta eficiencia en aislamiento acústico, habrá que tener en cuenta que los sellos, deben ser elaborados en base a material altamente resistente y maleable; y sobre todo, que su instalación debe ser minuciosamente realizada.



Figura 1.12. Muestra de Juntas o sellamiento herméticos.

CAPÍTULO 2

2. NORMATIVA ESPECÍFICA PARA EL DISEÑO E IMPLEMENTACION DE CAMARAS REVERBERANTES

Este punto tiene por objeto establecer los criterios y normativas más convenientes a emplear para el diseño e implementación de laboratorios de medición de propiedades acústicas, y en especial de cámaras reverberantes.

Es importante mencionar que para poder establecer la normativa específica para la elaboración del presente diseño de cámara reverberante, fueron consultados varios trabajos investigativos anteriormente realizados por profesionales especializados en el área acústica a nivel internacional.

Las normativas tomadas como referencia para la elaboración de este proyecto, son las especificadas por la ISO (International Organization for Standardization), UNE (Instituto Español de Normalización), ASTM (American Society for Testings and Materials), y otras entidades encargadas de la emisión de normativa específica para la elaboración de laboratorios para el análisis de parámetros acústicos.

A nivel mundial, las normas especificadas por la ISO (International Organization for Standardization), son las principales normas tomadas en cuenta para la elaboración de este tipo de proyectos; ya que permiten obtener un enfoque global y sobre todo unificado de las diversas características que requieran ser medidas y examinadas con rigurosidad en el tema acústico.

Asimismo la normativa española UNE, por su particular similitud a la normativa ISO y sobre todo, porque en la mayoría de países hispanoparlantes se tienen como referencias debido a que están escritas en castellano. En el caso particular de

Latinoamérica, se puede mencionar que existen normas expuestas por países con amplia experiencia en el campo de la acústica tales como Brasil, Chile, Argentina (IRAM).

De este último, se puede mencionar que el IRAM (Instituto Argentino de Racionalización de Materiales), es un organismo que ha realizado un exhaustivo preámbulo investigativo para poder desarrollar un tipo de normativa específica para el control acústico, la cual será detallada y tomada en cuenta en el presente proyecto.

Cabe mencionar que existen organismos tales como la ASTM (American Society for Testings and Materials), DIN (Deustches Institut für Normung), que por su particular método de investigación y análisis se diferencian en varios aspectos con relación a las normas especificadas por ISO; pero que resultan de gran ayuda para un análisis más profundo de los diversos parámetros requeridos para la elaboración de laboratorios de medición de propiedades acústicas.

2.1. REQUISITOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA CÁMARA REVERBERANTE

Es importante conocer que una cámara reverberante es un laboratorio de medición que se emplea para evaluar coeficientes de absorción sonora de materiales, determinar el nivel sonoro de salida de diversas fuentes sonoras, la pérdida por transmisión de diversas particiones, pérdida por inserción de silenciadores y barreras acústicas, respuesta característica de micrófonos, etc. Por lo anterior, la sala deberá presentar un volumen interno de aire considerable, que brindará una alta difusión sonora y a la vez, alta homogeneidad de sonido en su interior, para un mejor análisis de los parámetros acústicos requeridos.

Para la medición de parámetros tanto de absorción sonora de materiales, como medición de potencia sonora, etc., dentro de este tipo de recintos, se debe colocar la muestra o sistema a ser evaluado, en el interior de la sala y seguir los respectivos pasos descritos en la normativa especializada.

Las normas requeridas para definir los parámetros de diseño según investigaciones anteriormente realizadas son:

- ASTM C423-90[13]
- ISO 354[18]
- UNE 74-041-80[19]
- IRAM 4065[17]

Según la normativa mencionada, se deben cumplir ciertos parámetros específicos en cuanto a la parte constructiva, para lo cual existen recomendaciones de diseño en cada una ellas, y por motivos de esta investigación se han logrado sintetizar en valores específicos.

A continuación se muestran los parámetros anteriormente mencionados:

Normas ASTM

- Dimensiones internas.- La dimensión mínima que deben poseer sus paredes es de 3,44[m]; debido exclusivamente al análisis de parámetros acústicos para la frecuencia que posee la longitud de onda más baja, que para este caso es la frecuencia de 100 [Hz].

Normas UNE, ISO, IRAM

- Volumen de aire interno.- El volumen de aire al interior del recinto mínimo requerido es de 200 [m³].

- Relación entre las dimensiones.- Se recomienda que las dimensiones de las particiones sean distintas o que por lo menos, que una de las dimensiones sea menor a las otras.

Norma UNE-EN 20354

- La humedad relativa en el interior de la cámara debe ser superior al 40%, y la temperatura, superior a los 10°C.
- El área de la muestra debe ser de 12m², en forma rectangular, dispuesto en el centro de la cámara reverberante.

A continuación se muestra una tabla comparativa de las recomendaciones emitidas por los diversos organismos mencionados:

Recomendaciones Norma	Dimensión Interior Mínima [m]	Volumen de aire mínimo [m ³]	Razón entre dimensiones	Máxima Longitud Interior [m]	Humedad y temperatura interior [%], [°C]
ISO	----	200	diferentes	$1,9 V^{1/3}$	----
UNE	----	200	Menores que 2	$1,9 V^{1/3}$	40% , 10°C
IRAM	----	200	----	$1,9 V^{1/3}$	----
ASTM	3,44		Menores que 2	----	----

Tabla 2.1. Algunas recomendaciones para la elaboración de cámaras reverberantes.

Otras recomendaciones para lograr un ambiente sonoro interno favorable, según ISO.

- Para el caso de medición de absorción sonora de materiales dentro de laboratorio con paredes rectangulares, se suele colocar el objeto de muestra sobre el piso. Pero, si el análisis se lo realiza en salas no rectangulares (en este caso específico), es aconsejable que las inclinaciones de las paredes se dirijan hacia afuera, ya que si se las realiza hacia el interior, los resultados de las mediciones van a ser similares al de una sala rectangular.
- Se recomienda hacer mediciones de absorción sonora dentro de los predios de la sala vacía, para de esta manera, poder obtener una curva de absorción sonora equivalente; la cual, debe ser lo más plana posible, sin poseer caídas abruptas ni tampoco valores peak que difieran más de un 15% del promedio de los valores de las bandas de tercio de octava adyacentes.
- Si se utilizan paneles de difusión sonora (difusores) en el interior del recinto, se recomienda que dichos paneles posean muy baja absorción sonora y con una densidad superficial de por lo menos 5 [Kg/m²]. Además, si se van utilizar difusores de diferentes tamaños, se sugiere que posean formas y orientaciones diferentes, distribuidas aleatoriamente en el interior del recinto.

Según estudios realizados por el IRAM, las frecuencias naturales del recinto en bajas frecuencias deben estar alejadas lo más uniformemente posible.

CAPÍTULO III

3. CONSIDERACIONES TEÓRICAS PARA EL DISEÑO DE CAMARAS REVERBERANTES

La mayoría de las metodologías para disminuir y evitar las resonancias excesivas en el diseño de cámaras reverberantes, están basadas en recintos rectangulares, estas principalmente consisten en la adecuada elección de proporciones entre la longitud, el ancho y el alto.

Estos métodos tratan de evitar los Modos Normales de Vibración (MNV), en donde múltiples frecuencias de resonancia caen dentro de una estrecha banda de frecuencia.

La siguiente ecuación determina las frecuencias naturales de un recinto rectangular y es la base para las diversas metodologías que determinan las proporciones de una sala (1).

$$f(n_x, n_y, n_z) = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{n_x}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y} \right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Fórmula 3.1.})$$

En donde:

$f(n_x, n_y, n_z)$.- Son las frecuencias naturales del recinto.

L_x, L_y, L_z .- Dimensiones de la sala.

n_x, n_y, n_z .- Números modales.

C .- Velocidad del sonido.

Resulta factible la utilización de la fórmula anterior, si se desea calcular el número de MNV con frecuencias propias por debajo de una frecuencia dada, para primeramente calcularlas y posteriormente contar la cantidad de las mismas.

Hay un método que se denomina Método reticular, que resulta más efectivo para poder determinar la homogeneidad de un campo sonoro en el interior de una sala, y que a la vez, da a conocer el número de modos Δn contenidos en un intervalo de frecuencias; y en el cual se representan los modos n de un recinto a manera de puntos. Este valor está dado por:

$$\Delta n = \left(\frac{4\pi f^3 V}{c^3} + \frac{\pi f^2 S}{2c^2} + \frac{fL}{8c} \right) \frac{\Delta f}{f} \quad (\text{Fórmula 3.2.})$$

En donde:

Δn : Número de modos contenidos en un intervalo de frecuencias Δf .

V.- Volumen de la sala en [m³].

S.- Superficie del recinto en [m²].

L.- Longitud de arista de la sala en [m].

f .- Frecuencia central de la banda considerada para diseño [Hz].

$\Delta f/f$.- Valor por banda de tercio de octava, igual a 0,23.

Para el caso de la elaboración del diseño de la cámara reverberante es necesario obtener un campo sonoro difuso, para lo que se puede mencionar la presencia de aproximadamente 15 a 20 modos normales a ser excitados en la banda de frecuencia de diseño, en este caso, la frecuencia de interés.

Lo anterior se puede realizar en base a la gráfica que muestra las respectivas relaciones entre dimensiones interiores de un recinto *rectangular* para la obtención de respuestas modales recomendadas por el gráfico de Bolt.

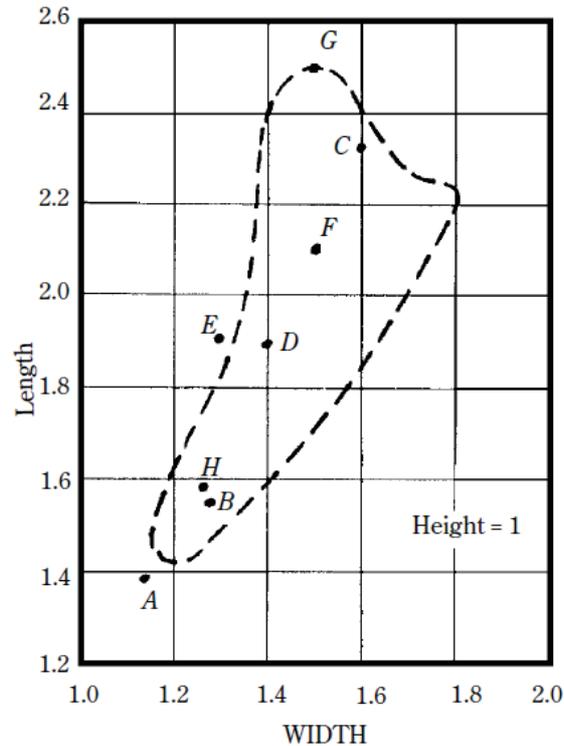


Figura 3.1. Gráfico de Bolt. Dimensiones favorables recomendadas para el diseño de salas.

Como se trata de una sala de forma irregular, poder aplicar el criterio anterior podría llegar a ser complejo, pero es importante conocer, que al aplicar la expresión anterior, se obtendrá una muy confiable aproximación en altas frecuencias [5].

Además es primordial mencionar que al aplicar el criterio de Bolt en un recinto, la distribución de los modos normales de vibración se realizará de manera aleatoria, y la cantidad de superposiciones producidas entre ellos va a ser menor (menor cantidad de resonancias entre frecuencias); por lo que la difusión sonora va a mejorar notablemente al interior de la sala.

El caso más crítico es el de la frecuencia de interés más baja (frecuencia más baja tomada en cuenta para el diseño de la cámara reverberante), ya que la densidad modal $\left[\frac{\Delta n}{\Delta f}\right]$ posee una estrecha relación con el volumen de la sala y la frecuencia del sonido. Dicho de otra manera, cuando la frecuencia y el volumen aumentan, los modos normales contenidos en una banda de frecuencia aumentarán rápidamente; por lo que, la distribución sonora dentro del recinto se acercará a condiciones de campo difuso (condiciones básicas de cámara reverberante).

Lo anterior conlleva a deducir que ninguna de las dimensiones internas de la sala debe ser menor que la longitud de onda de la frecuencia más baja, lo que quiere decir, que ninguna de las dimensiones debe ser menor a 3,44 [m], ya que la frecuencia elegida fueron los 100 [Hz]. Si las dimensiones son menores a lo recomendado anteriormente, las ondas sonoras de baja frecuencia no excitarán por completo a los modos normales asociados a la frecuencia de diseño.

Hay que tener en cuenta también en la etapa de diseño, que si dos de las particiones limitantes de la sala poseen relación de números enteros en sus dimensiones internas, puede ocurrir un fenómeno de coincidencia de las ondas sonoras. Este fenómeno se puede observar en la curva de respuesta de frecuencias de la sala, en donde se observarán incrementos excesivos de nivel sonoro (Valores Peak), y en otras, decaimientos prominentes (Valores Deep). Por lo que se recomienda que las dimensiones internas del recinto, no posean relación de números enteros.

3.1. DISEÑO DE UNA CÁMARA REVERBERANTE

Según recomendaciones realizadas en normativa anteriormente mencionada, este recinto deberá poseer un volumen interno mínimo de 200 [m³]. Por lo que se estima que el presente diseño dispondrá un volumen aproximado de 198 [m³]; valor que es menor a lo requerido en normativa, pero refiriéndose a otras condiciones de diseño, la presente cámara reverberante, cumple a cabalidad con otros requerimientos.

La dimensión mínima que deberán poseer sus caras interiores, será de 4[m], valor que se encuentra por sobre la longitud recomendada en normativa como longitud mínima, en este caso de 3,44[m] para la frecuencia de 100[Hz].

Según lo expuesto en la norma ASTM C423-90 la máxima longitud interior que debe poseer una cámara reverberante no debe sobrepasar los 11,55[m] para volúmenes aproximados a los 224[m³]. La mayor longitud en línea recta posible en este diseño es de 8,87[m]; que concuerda con lo especificado en la normativa anteriormente citada.

Es importante mencionar que ninguna de las dimensiones internas de la cámara reverberante es igual, cada una de ellas es elaborada en base a razones diferentes en comparación con las otras.

Para obtener una razón adecuada para la elaboración del diseño acústico de este espacio, se tomó como referencia lo especificado en las normas ASTM, UNE, y según el texto *“Diseño y funcionamiento de laboratorio normalizado de medición de propiedades acústicas de materiales de construcción”*, que nos indica que la razón entre dos dimensiones no debe superar el valor entero 2, y que en mencionado caso, la razón máxima es 1,64.

Se muestra a continuación la determinación de la distancia entre dos puntos que determinan los lados de cada cara interior del recinto diseñado, y que se determinaron tomando en cuenta recomendaciones anteriores.

SEGMENTO	DIMENSION	RAZÓN
BA	6,56	1,64
BC	5,22	1,26
AD	6,02	1,09
CD	5,25	1,24
BH	4,03	1,60
AG	4,34	1,50
DF	4,00	1,64
CE	4,64	1,44
HG	5,74	1,15
GF	5,27	1,25
FE	4,46	1,45
EH	4,53	1,44
GE	7,12	0,92
GB	7,73	0,85
HA	7,11	0,92
HC	6,05	1,08
GC	8,88	0,74
CA	8,34	0,78
FC	6,60	0,99
AF	7,19	0,91

Tabla 3.1. Valores de las rectas obtenidas en los diversos puntos pertenecientes al diseño de la sala reverberante.

Una vez obtenidas las dimensiones internas, se procede a realizar la construcción de cada una de las caras (cuerpos) internas, que posteriormente formarán el recinto.

A continuación se procede a describir gráficamente el dimensionamiento obtenido anteriormente, al igual que su respectiva distribución y angulación entre cada una de las superficies:

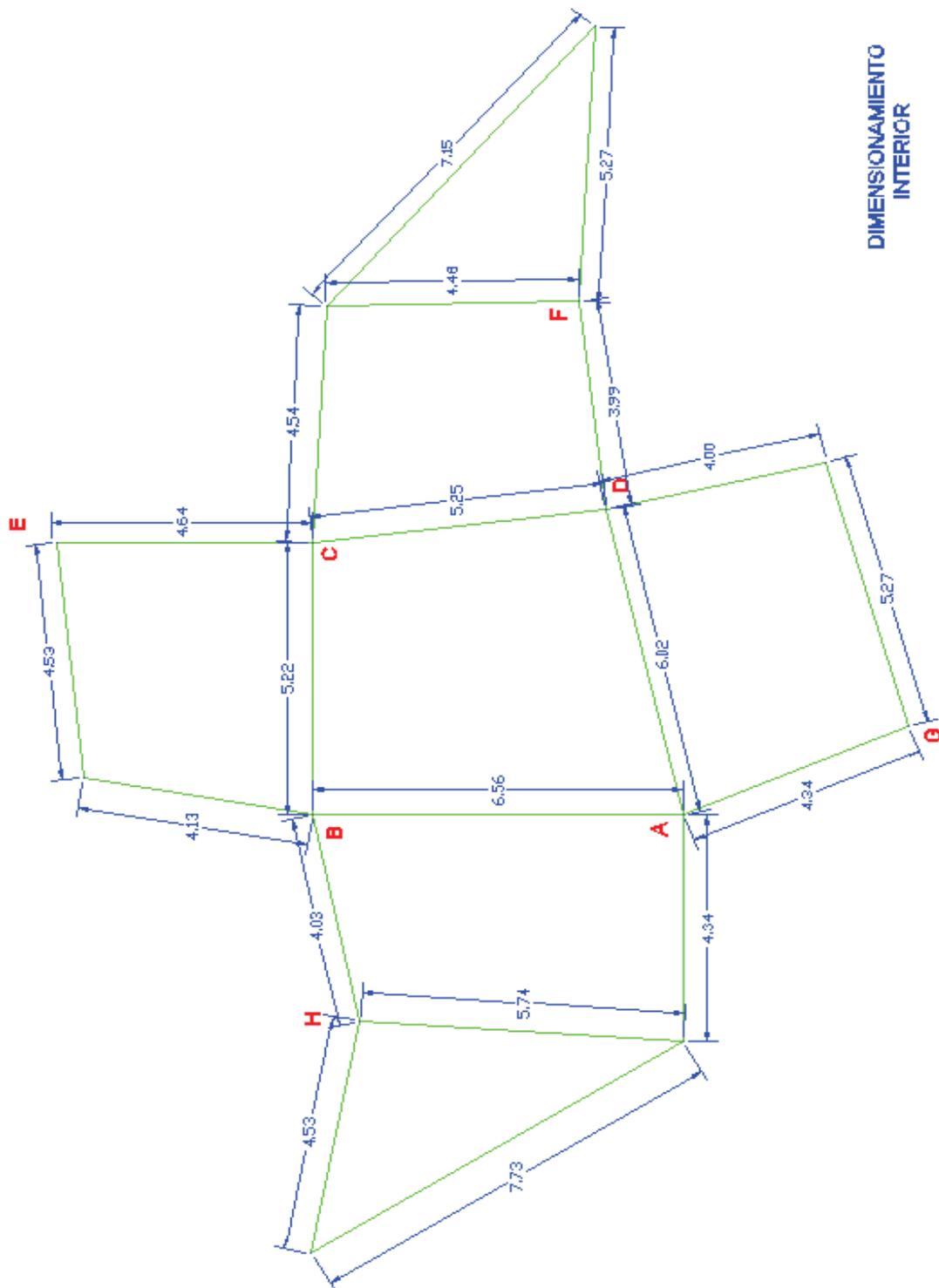


Figura 3.1. Dimensionamiento Interior de la Cámara Reverberante.

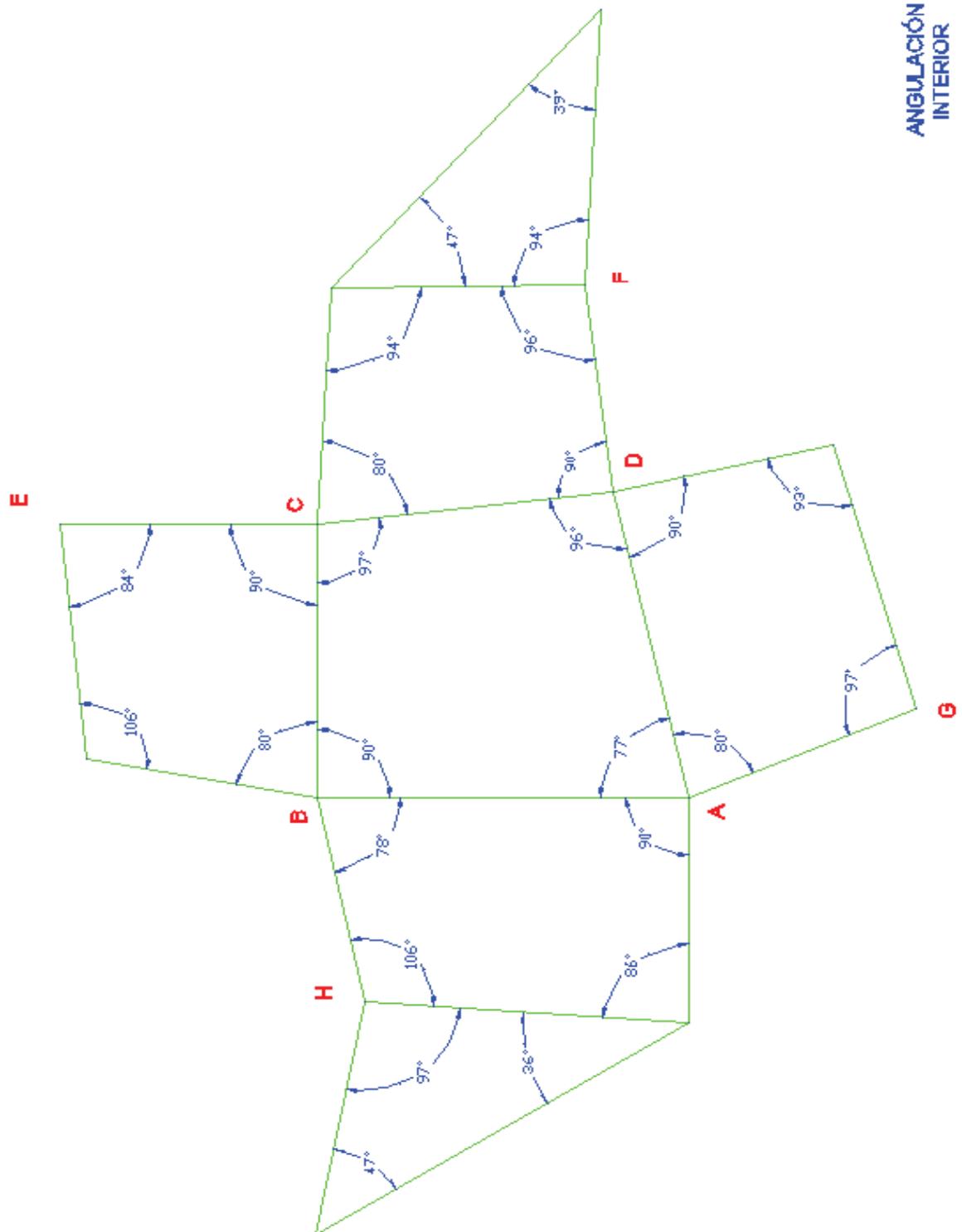


Figura 3.2. Angulación interior requerida para la Cámara Reverberante.

Los siguientes gráficos muestran la proyección tridimensional, y sus respectivos levantamientos 3D de la cámara reverberante, realizada en base a las dimensiones anteriormente obtenidas:

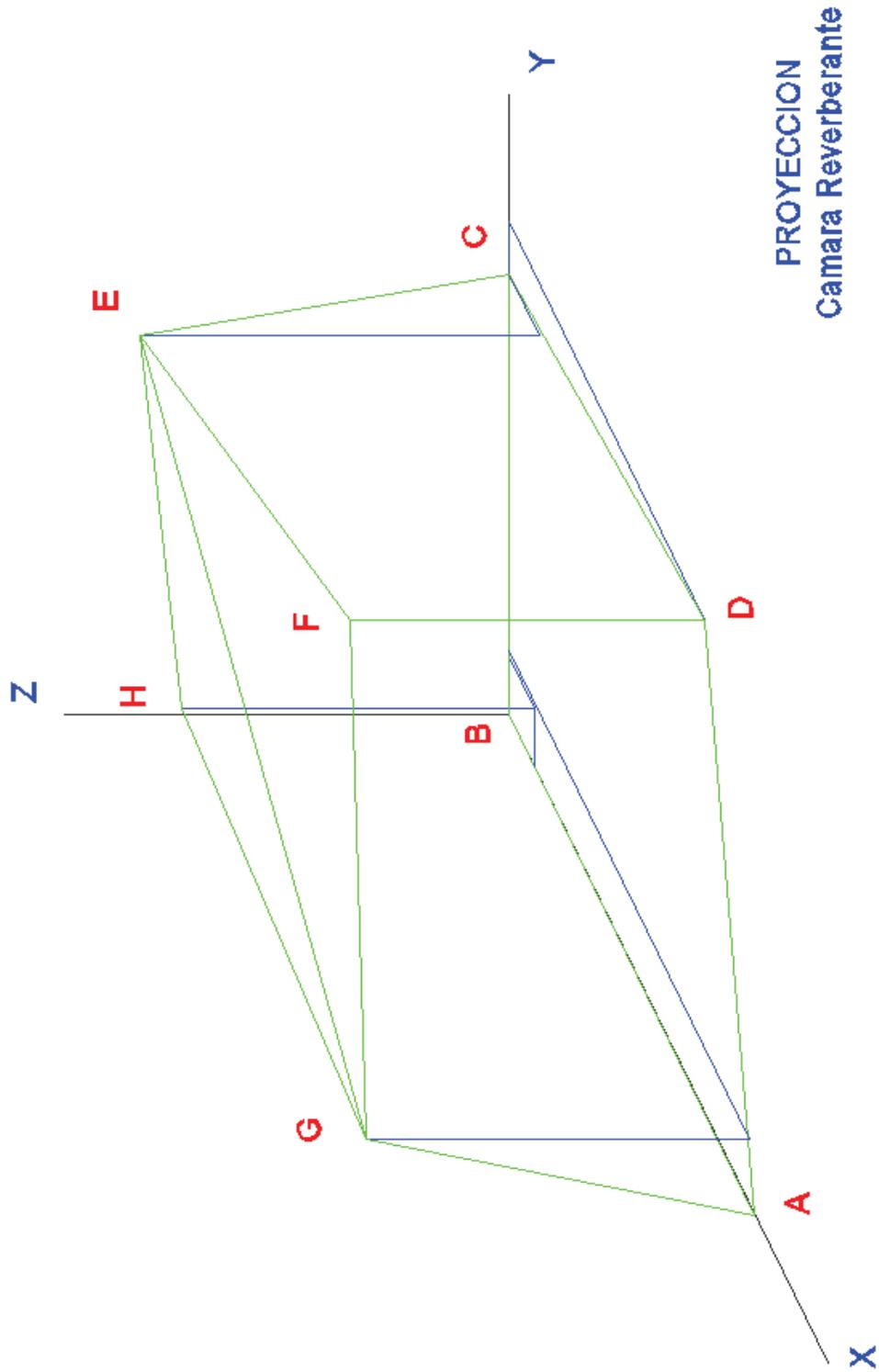


Figura 3.3. Proyección de la Cámara Reverberante.

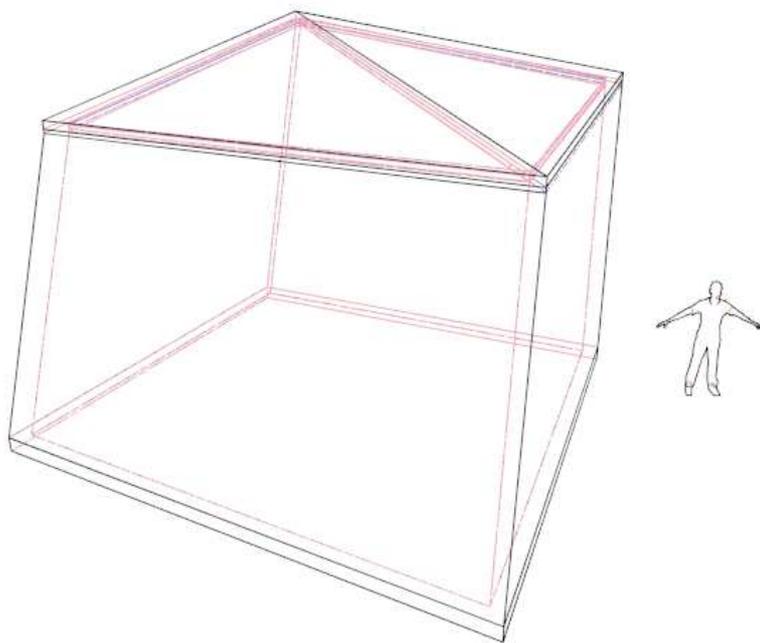


Figura 3.4. Levantamiento superficies 3D (Construction Line).

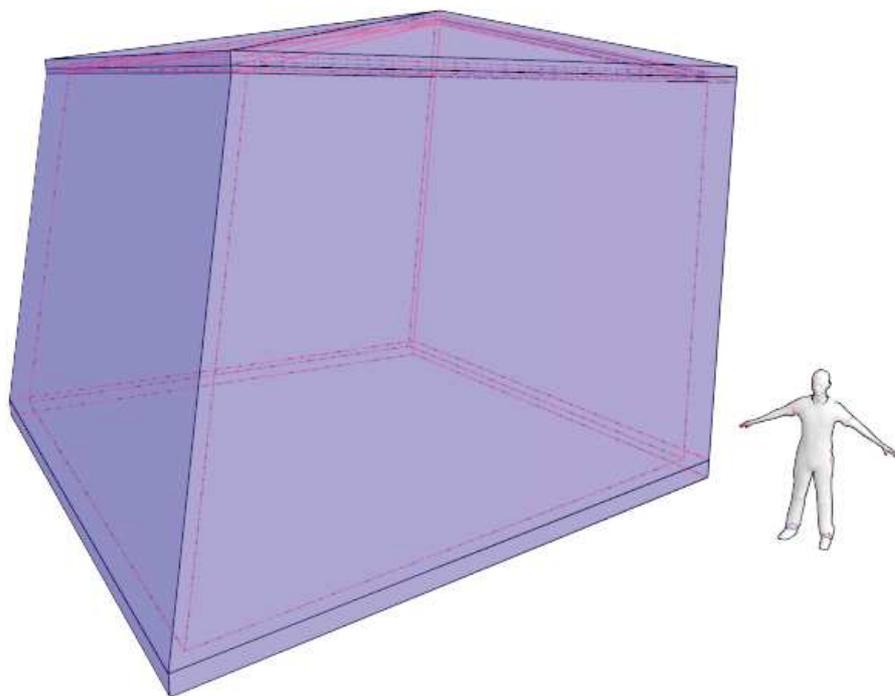


Figura 3.5. Levantamiento de superficies 3-D sin texturas.

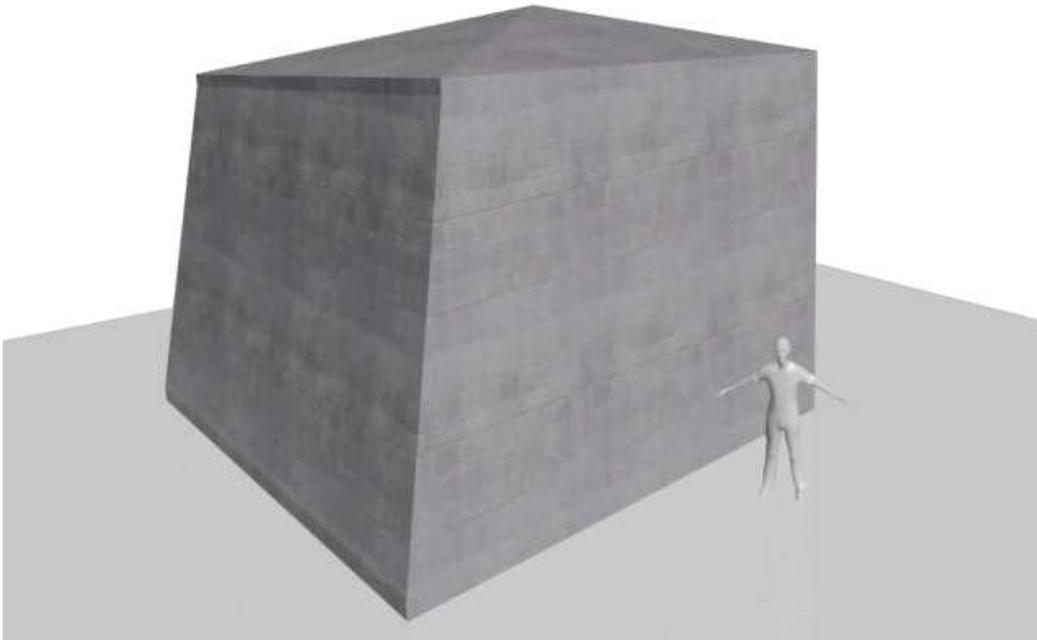


Figura 3.6. Levantamiento superficies con texturas exteriores.

Para establecer el volumen de este cuerpo complejo, se utilizó el programa SolidWorks; que permite calcular este parámetro sin la necesidad de realizar cálculos matemáticos complejos tales como descomposición de un sólido en cuerpos regulares, matrices, etc. El método consiste en trazar cada una de las aristas del cuerpo, realizar su respectiva proyección en 3-D utilizando el programa Autocad, importarlo hacia el programa SolidWorks, en el mismo seleccionar la pestaña Calcular y dentro de esta opción presionar Propiedades de Sección (ver figura 3.7.); para de esta manera, poder obtener el volumen requerido.

La superficie interior total de la sala obtenida bajo este método es de **147,53 m²**.

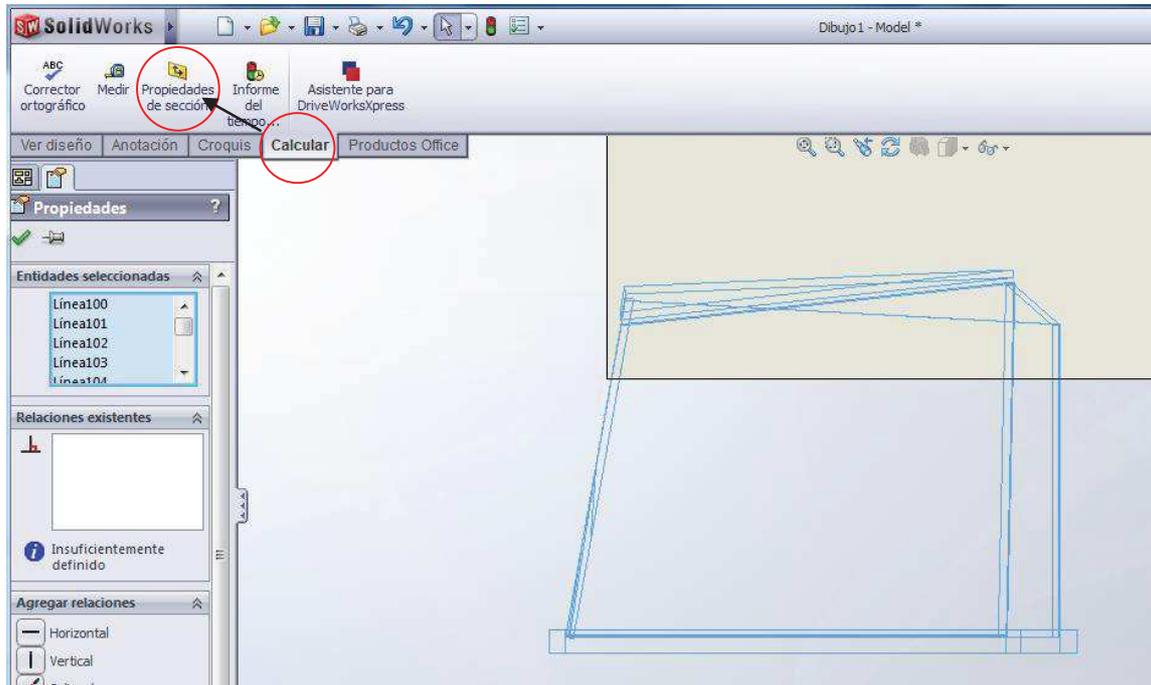


Figura 3.7. Descripción Gráfica para hallar el volumen interior en el programa SolidWorks.

3.1.1. TIEMPOS DE REVERBERACIÓN MÍNIMOS RECOMENDADOS PARA CÁMARA REVERBERANTE.

Para calcular los tiempos de reverberación mínimos recomendados, se realizaron cálculos a partir de la absorción equivalente de Sabine, recomendada en la norma ISO 354. Para lo cual tenemos, la siguiente fórmula:

$$T_{60} = 0,161 * \left(\frac{V}{A} \right) [s] \quad (\text{Fórmula 3.1.})$$

Donde:

V: Volumen de la sala, 198 [m³] --- Valor menor al mínimo requerido por normativa (UNE, ISO, IRAM)

A: Absorción sonora equivalente de la sala, [m²]

Los cálculos fueron realizados según las recomendaciones obtenidas en base a normativa, coeficientes de absorción de los materiales y superficies interiores de la sala (Vea Anexo 1). Se obtuvieron los siguientes valores:

Frecuencia por bandas de tercio de octava [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Tiempo de reverberación T_{60} [seg]	21,61	21,61	21,61	10,8	10,8	21,61

Tabla 3.2. Valores de T_{60} obtenidos de la sala actual.

Pero según recomendaciones realizadas, los tiempos de reverberación para salas de medición de coeficiente de absorción sonora, deben cumplir con los siguientes valores, por frecuencia específica:

Frecuencia [Hz]	Tiempo de reverberación [s]
125 Hz	$T_{60} > 15$
500 Hz	$T_{60} > 12$
2000 Hz	$T_{60} > 6$

Tabla 3.3. Valores de T_{60} recomendados por Normativa (ISO, ASTM, IRAM).

Las mediciones de tiempo de reverberación se deben realizar en varias posiciones del espacio interior de la sala. El rango de frecuencia de medición es de 100[Hz] a 4[kHz] en bandas de tercio de octava, y se utiliza como fuente sonora, una fuente

omnidireccional, que se encontrará emitiendo ruido blanco (ruido de nivel constante en todas las frecuencias) filtrado en banda de octava.

Para el caso de cálculo de absorción interior, como recomienda la norma ASTM, para calcular el coeficiente de absorción promedio de la sala, se debe dividir la absorción de la sala vacía por el área de las superficies interiores de la misma. El coeficiente obtenido deberá ser menor que 0,06; una vez realizada la respectiva corrección de absorción sonora producida por el medio de propagación, en este caso, el aire.

3.2. PROCEDIMIENTOS PARA EVALUAR EL DISEÑO DE LA CÁMARA REVERBERANTE

A continuación se proceden a describir varios factores que nos permiten denotar los criterios técnicos establecidos para la obtención de un comportamiento óptimo dentro de la cámara reverberante.

3.2.1. DIFUSIÓN SONORA

En las salas reverberantes, un campo sonoro difuso es aquel que es capaz de satisfacer las siguientes condiciones:

- Densidad de energía sonora, promediada temporalmente, constante en todo el campo sonoro (Difusión espacial).
- Tasa de incidencia de energía sonora promediada en el tiempo, para cualquier punto dado en el campo sonoro, independiente de la dirección de incidencia (Difusión direccional).

En el caso de la difusión no existen procedimientos prácticos para su cuantificación, y generalmente la difusión de la sala es evaluada por simple inspección del campo de presión sonora.

La difusión espacial se logra mediante una distribución uniforme del campo sonoro, y se puede comprobar experimentalmente midiendo niveles de presión sonora entre 100 y 400 Hz en diferentes alturas, empleando como fuente sonora ruido blanco y receptando señales en bandas de tercio de octava.

Finalmente, se calcula la desviación entre los niveles de presión sonora máximos y mínimos diferentes en ubicaciones. Se logra una buena distribución del campo sonoro en el rango de bajas frecuencias si $\Delta P = P_{max} - P_{min} < \pm 3[\text{dB}]$, y en el rango de frecuencias medias y altas $\Delta P = P_{max} - P_{min} < \pm 1,5[\text{dB}]$.

El diseño de una cámara reverberante satisface una difusión direccional plana si $d > 0,95$, sin que existan difusores y/o elementos de difusión suspendidos en la cámara. La difusión direccional plana es:

$$d = 1 - \frac{i}{i_0} \quad (\text{Fórmula 3.3.})$$

Donde

d : difusión direccional plana

i : coeficiente de difusión de la cámara de medición (Sala reverberante)

i_0 : coeficiente de difusión de la cámara anecóica

El coeficiente de difusión es:

$$i = \frac{\Delta \langle I \rangle}{\langle I \rangle} \quad (\text{Fórmula 3.4.})$$

donde:

$\langle I \rangle$: Intensidad sonora media [watt/m²]

$\Delta \langle I \rangle$: Desviación media de la intensidad sonora [watt/m²]

Además se tiene que:

$$\langle I \rangle = \frac{\int_0^{2\pi} I d\theta}{2\pi} \quad (\text{Fórmula 3.5.})$$

$$\Delta \langle I \rangle = \frac{\int_0^{2\pi} |I - \langle I \rangle| d\theta}{2\pi} \quad (\text{Fórmula 3.6.})$$

I : intensidad sonora [watt/m²]

El coeficiente i_0 se puede obtener de igual manera q i

En la práctica, la difusión direccional dentro de una sala reverberante se obtiene a partir de mediciones de niveles de presión sonora NPS utilizando una fuente sonora emitiendo tonos puros de 2 [kHz], y el receptor debe rotar alrededor de la fuente en un plano de 0° a 360°. Dicha medición se realiza en varias posiciones y a diferentes alturas del receptor, como se muestra en la siguiente figura:

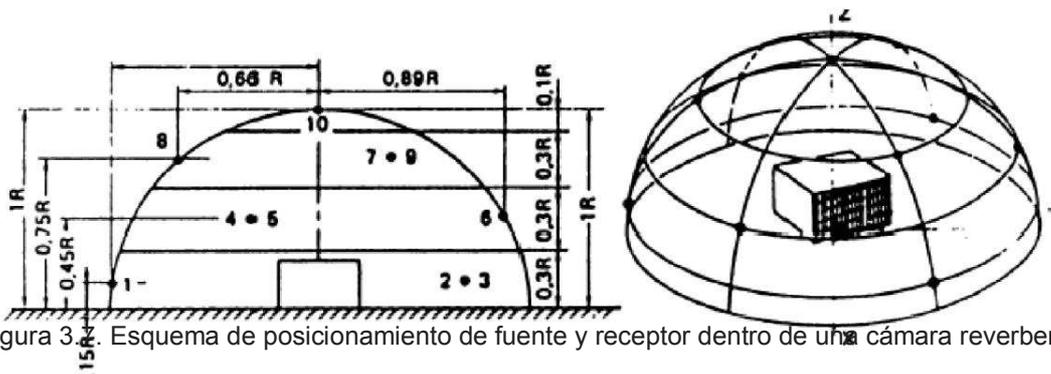


Figura 3. Esquema de posicionamiento de fuente y receptor dentro de una cámara reverberante.

Otro método utilizado para determinar el grado de difusión dentro de una sala reverberante, es el de utilizar difusores tanto fijos como móviles en el interior de la sala, y proceder a realizar mediciones de coeficientes de absorción en la sala.

El procedimiento consiste en:

Colocar material absorbente dentro que aproximadamente tenga una superficie de $10\text{[m}^2\text{]}$, tenga alrededor de 5 a 10[cm] de espesor, y cuyo coeficiente de absorción sonora sea mayor que 0,9 para las frecuencias comprendidas entre 500 y 4000[Hz] .

Efectuar las mediciones de absorción sonora dentro de la sala reverberante, de la muestra de ensayo, bajo los siguientes parámetros:

- i. Sin la colocación de paneles difusores.
- ii. Con una pequeña cantidad de difusores fijos.
- iii. Calcular el valor medio del coeficiente de absorción sonora en el rango de 500 a 4000[Hz] .
- iv. Mediante esto, puede obtenerse el número óptimo de difusores para el cual el valor de coeficiente de absorción alcanza un máximo y permanece constante, la cantidad de difusores se podrá calcular una vez implementada la sala.

CAPÍTULO IV

4. DISEÑO ACUSTICO Y ARQUITECTONICO DE LA CAMARA REVERBERANTE

No existe una forma ideal para la construcción de cámaras reverberantes, pero lo mejor es seleccionar formas no uniformes ni simétricas para que el campo reverberante producido en su interior sea lo más difuso posible, evitando así focos de reverberación en distintos puntos de la cámara.

Para la elaboración de una cámara reverberante, existen lineamientos tanto acústicos como arquitectónicos que se deben seguir, para poder obtener resultados óptimos de funcionamiento requeridos para este tipo de recintos; entre los cuales podemos enumerar los siguientes:

4.1. NIVELES DE RUIDO DE FONDO AL INTERIOR DE LA CAMARA REVERBERANTE

4.1.1. NIVEL DE RUIDO DE FONDO DE LAS SALAS

La metodología de un plan de diseño y construcción de una sala con bajo nivel de ruido de fondo debe considerar el diseño acústico del local, el control de reverberación y ruido externo e interno.

Para poder evaluar la cantidad de ruido de fondo, es importante establecer y conocer su volumen y los coeficientes de absorción sonora de los materiales interiores; tomar en cuenta las características de recintos adyacentes y el espectro de fuentes sonoras próximas a la cámara reverberante, que permitan determinar parámetros físicos de la transmisión y absorción sonora deseada.

Dentro del diseño acústico deben establecerse como requisito el nivel de ruido de fondo al interior del local, los planos con sus especificaciones geométricas, descripción del acondicionamiento interno, estimación teórica del aislamiento sonoro de diversos elementos constructivos que componen el local como: paredes, puertas, techos, suelos. Además, establecer procedimientos de atenuación al ruido exterior, en el caso que existieran, de tal manera, mejorar el nivel interior de ruido de fondo. Calcular el tiempo de reverberación, absorción sonora y transmisión estructural, y señalar los elementos absorbentes presentes en el recinto.

También se debe supervisar periódica y rigurosamente la ejecución de la obra de manera que se cumpla con lo establecido en el diseño para que se alcancen los niveles sonoros deseados y necesarios.

Si se desea realizar una evaluación que describa detalladamente los procedimientos de medición de ruido ambiente, se recomienda consultar y utilizar ISO 1996.

Para la implementación de la cámara reverberante, se debe tener en cuenta, que el nivel de ruido de fondo del lugar en donde se situará el laboratorio, debe ser muy bajo, se recomienda que los niveles oscilen entre los 45 y 50 [dB(A)].

Según criterios de diseño, con respecto al ruido de fondo que debe poseer un recinto, hay que tener en cuenta las curvas NC.

Dichas curvas, evalúan el grado de molestia que un determinado ruido ambiental provoca sobre un espectador; se hace en comparación de los niveles de ruido existentes en la sala, para cada banda de octava comprendida entre los 63 [Hz] y los 8[kHz].

Las curvas NC recomendadas para este tipo de espacios es la NC-15 hasta NC-25; estos valores son sugeridos para recintos de registro y reproducción sonora, por su bajo nivel de ruido de fondo interior.

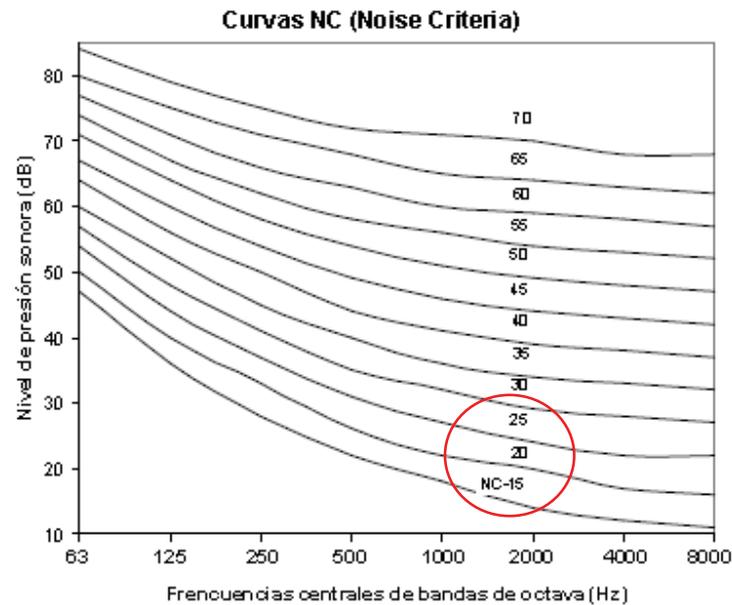


Figura 4.1. Ilustración de las curvas NC (Noise Criteria – L.L.Beranek-1957).

Curvas NC15 – NC25 recomendadas para este tipo de recintos.

4.2. AISLAMIENTO ACÚSTICO

Para obtener y garantizar que los niveles de ruido de fondo dentro del predio, y viceversa, sean bajos, se recomienda definir ciertas características constructivas de los diferentes elementos que constituyen las superficies limitantes de la sala, como por ejemplo paredes, puertas, techos, pisos, etc.

4.2.1. DISEÑO DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO DE LA CÁMARA REVERBERANTE

Es importante mencionar que la mayoría de ruido o sonido que ingresa a un espacio, es transmitida por el aire. Y si lo que se requiere es mantener un nivel acústico aceptable dentro de un recinto, es menester realizar un aislamiento adecuado. En la

mayoría de casos, colocar paneles absorbentes u otro tipo de barreras acústicas, no sustituyen lo que un buen aislamiento acústico puede lograr.

Lo anterior conlleva a la implementación de cerramientos discontinuos y paredes dobles que poseerán la siguiente estructura:

4.2.1.1. PAREDES y PISO

El comportamiento acústico de elementos macizos se debe principalmente en su masa o peso por metro cuadrado. En general, las paredes macizas de hormigón o símil, presentarán un buen comportamiento acústico frente a ruidos aéreos producidos en el exterior y de ambientes adyacentes, debido a su densidad y a sus espesores mayores de 10[cm].

Según la Ley de Masa, los muros que posean un peso comparable al del hormigón (aproximadamente $2300[\text{Kg}/\text{m}^3]$), ofrecerá valores de aislamiento acústico similares. Se debe considerar en paredes de ladrillo el aporte de la masa del mortero de pega, así como el uso de unidades robustas y pesadas.

Para entender el comportamiento de los elementos que poseen más de una superficie que lo constituye (tipo tabique), se debe asimilar como primera regla que éstos se comportan como elementos dobles, en los cuales cada cara actúa como un cuerpo macizo individual.

Mientras menor sea el grado de interacción mecánica entre ambas caras se logrará un mejor comportamiento acústico.

Para lograr un aislamiento acústico adecuado para este tipo de particiones, es recomendable aplicar la teoría especificada en la ley de masa-aire-masa y su atenuación; que afirma que, si se construyen paredes dobles separadas por una cámara de aire (preferiblemente rellena de material absorbente), se va obtener una

pérdida por transmisión sonora muy superior comparada respecto a si se implementaría la construcción con paredes simples.

Lo anterior se debe principalmente a la buena elección de materiales que permitan lograr un coeficiente de pérdida por transmisión de las paredes (TL) bastante efectivo. Si se quiere conseguir un ambiente sonoro con un nivel de ruido de fondo interior bastante bajo, es recomendable que este tipo de particiones posean un TL superior a 55[dB].

Según este criterio, se recomienda que las paredes sean dobles, elaboradas en ladrillo tipo mampón de 15[cm], con cámara de aire de 15[cm] de espesor rellena de arena seca entre ambas paredes. En la cara interior debe existir un revestimiento de caucho semirrígido de ½ pulgada de espesor, que servirá como superficie de apoyo y sobre todo, como separador estructural entre el revestimiento interno y las superficies rígidas que conforman la cámara reverberante. Como elemento constructivo final en su cara interior, se recomienda colocar planchas de acero inoxidable color mate de 4[mm] de espesor. Esto con la finalidad de lograr un campo sonoro muy reverberante al interior del recinto.

Como acabado externo, se recomienda la utilización de piedra laja, que brindará al espacio de un aspecto sobrio y muy versátil para lo que se quiere llegar a mostrar.

Para obtener los datos del aislamiento acústico aportados por la partición anteriormente descrita, se empleó el programa de simulación INSUL; el cual, nos permite simular la cantidad de atenuación que genera una partición, al ser tratada acústicamente.

A continuación se muestra la partición y sus respectivos cálculos de TL.

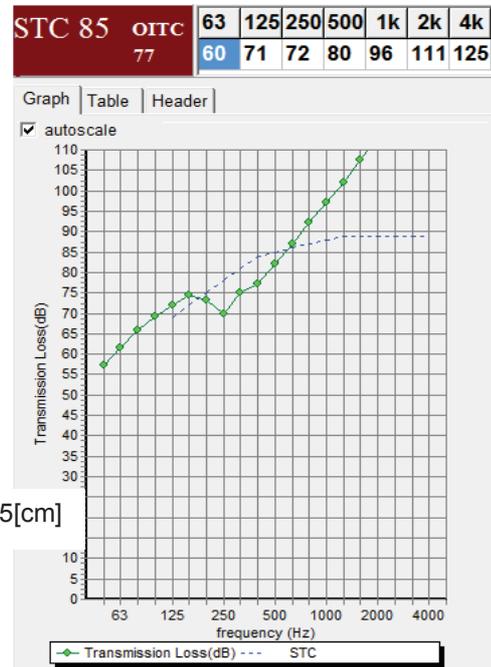
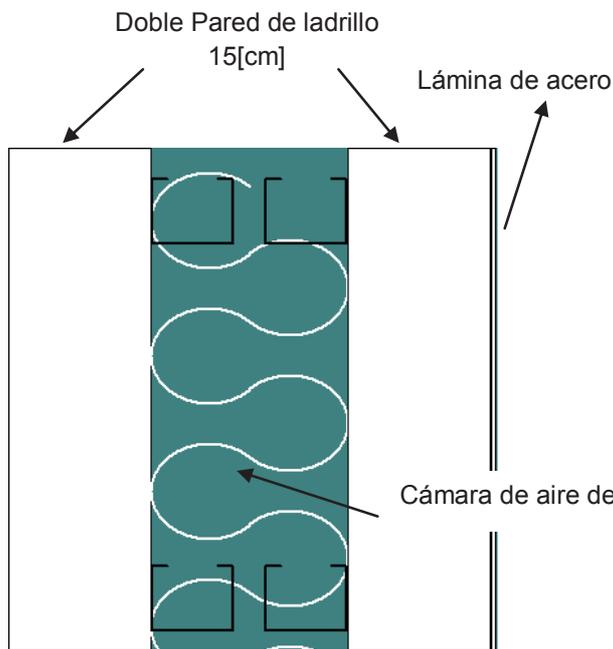


Figura 4.2. Corte Lateral del Aislamiento Acústico Figura 4.3. Curva STC de la partición diseñada

En la tabla anterior se muestra, la pérdida de transmisión sonora (TL) por frecuencia de la partición diseñada. En la curva, se puede apreciar que la atenuación en bajas frecuencias es considerable, ya que oscila entre los 55 y 60 [dB]. De la misma manera, ocurre en las frecuencias medias y altas, en donde se observa que el sistema de aislamiento acústico es completamente efectivo a partir de 1,5[Khz].

Se expone a continuación, el gráfico que muestra los revestimientos tanto interno como externo que poseerá la cámara reverberante:

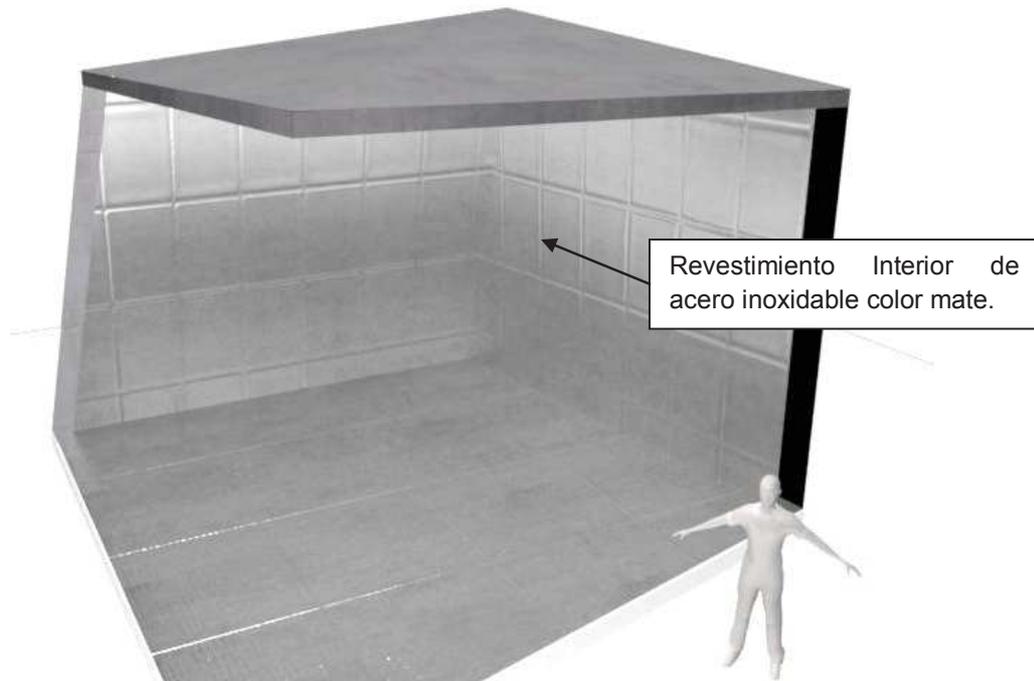


Figura 4.4. Vista interior y exterior de la sala reverberante.

Para el aislamiento contra la vibración externa y su respectiva transmisión sonora, se ha seleccionado un piso falso constituido por una plancha de caucho semirrígido de $\frac{1}{2}$ pulgada de espesor unido directamente a la losa estructura y cadena; sobre él, se colocarán vigas de madera de 2[plg] x 4[plg] espaciadas una distancia de 24[plg] (60,1 [cm]), y en el espacio interior formado, se colocará doble capa de fibra de vidrio de 2[plg] comprimido. Sobre esta configuración se colocará una plancha de caucho semirrígido de $\frac{1}{2}$ pulgada de espesor, que soportará en su cara exterior placas de acero inoxidable color mate de 5[mm] de espesor.

Con el objetivo de desacoplar mecánicamente la unión entre mampostería y piso, se propone colocar entre las placas de acero, una junta de caucho semirrígido, a manera de calafateado, para de esta manera impedir que estas dos superficies posean puntos de apoyo rígidos entre ellas.

A continuación se procede a detallar la composición de cada una de las particiones anteriormente descritas:

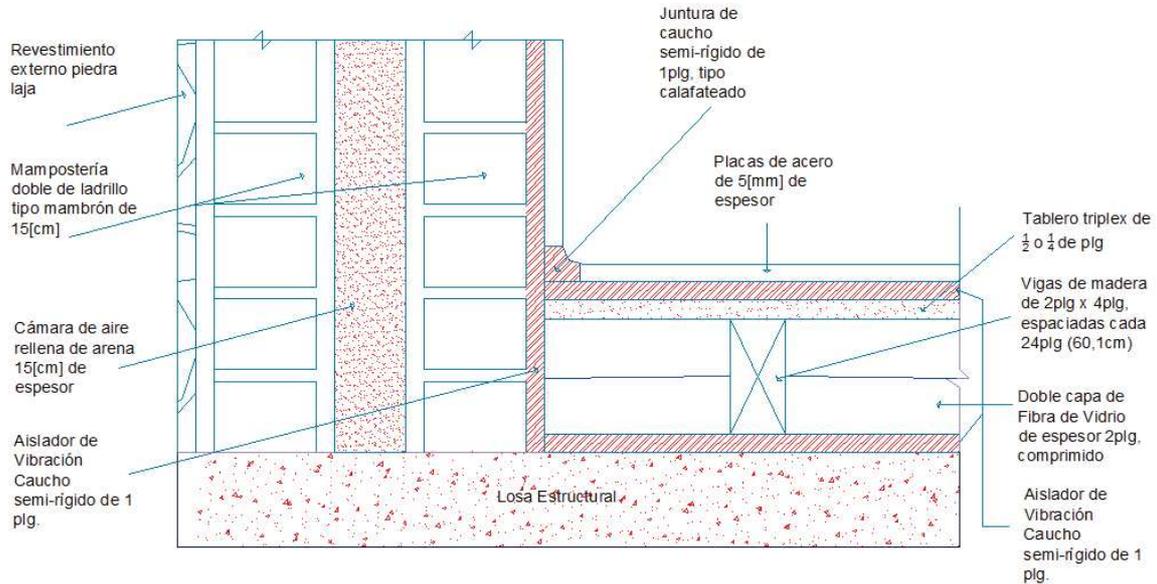


Figura 4.5. Aislamiento propuesto para paredes y piso de la cámara reverberante.

4.2.1.2. PUERTAS

El aislamiento acústico de las puertas no depende exclusivamente del tipo de puerta utilizada ni tampoco de su conformación interior, sino también de su marco y el sellamiento periférico de las juntas.

Para lograr el efecto de aislamiento acústico requerido para este tipo de espacios, implementado puertas con coeficientes de transmisión sonora (STC) adecuados, basaremos nuestro diseño en los valores de STC recomendados para este tipo de particiones.

Razón por la cual es recomendable que los valores STC para este tipo de puertas se encuentre por encima de los 40.

La propuesta del diseño de puertas contará con doble hoja de acero inoxidable color mate (evitar brillo e inconvenientes con su manipulación) de 4 o 5[mm] de espesor

mínimo. Es recomendable también que, una de las hojas de acero posea mayor o menor espesor con relación a la otra hoja, esto sería de gran beneficio, ya que se evitarían resonancias entre ellas, debido a la igualdad de frecuencias críticas.

Las hojas están montadas en un bastidor metálico de perfilaría de acero, que proporcionará una separación de 2[plg] entre las placas; y la misma estructura rígida soportará sobre ella, láminas de caucho natural semirrígido de 4 [mm] de espesor, que servirá como desacoplador mecánico entre las hojas de acero y el material utilizado en el espacio de separación entre placas. La cámara de aire propuesta se encontrará rellena de arena seca, esto con el fin evitar resonancias internas, y por ende, la deficiencia en el aislamiento acústico de esta partición.

El sistema de cierre es similar al usado en frigoríficos, con manillas que funcionan a presión operables desde ambos lados de la puerta y su marco, dejando un cierre hermético. Así se evitará toda fuga sonora desde el exterior de la sala a su interior, y viceversa.

A continuación se procede a mostrar un corte del sistema de cierre de la puerta propuesta:

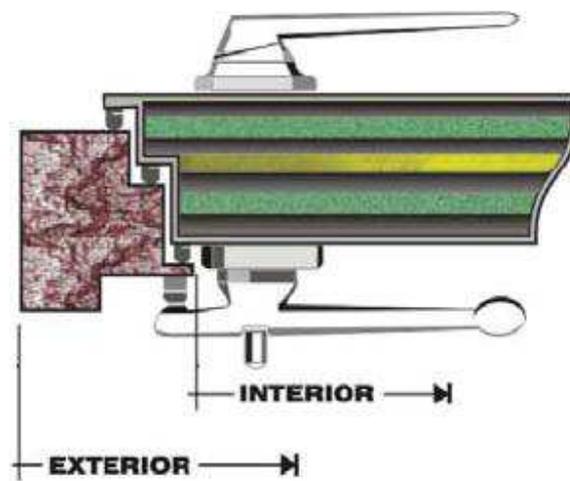


Figura 4.6. Sistema de cierre con tiraderas a ambos lados y sus respectivas juntas perimetrales.

Cabe recalcar, que la instalación juega un papel muy importante a la hora de obtener un alto grado de aislamiento acústico. Hay que tener muy en cuenta, que las grietas conformadas entre marco y mamposterías, y demás vías de escape de sonido se encuentre bien selladas. Para lo cual, se recomienda que el marco se encuentre montado sobre material elastómero de 4[mm] de espesor como mínimo, y si fuese el caso, sellar grietas existentes con la ayuda de espuma de poliuretano inyectable.

La pérdida de transmisión sonora de la puerta propuesta en este diseño, como elemento individual, fue obtenida mediante modelamiento de particiones en el programa INSUL, y los resultados conseguidos fueron los siguientes:

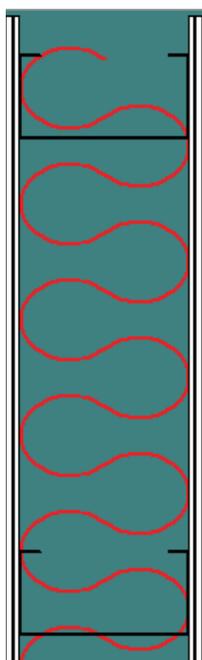


Figura 4.7. Corte Lateral de la puerta con tratamiento Acústico

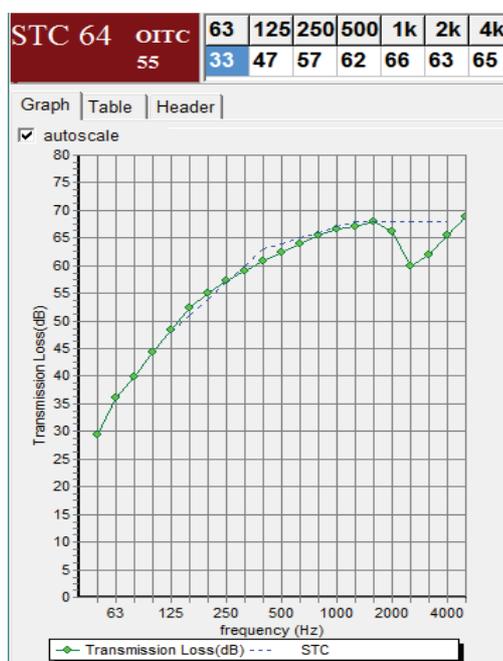


Figura 4.8. Curva STC de la partición diseñada

Según lo anterior, se puede concluir que la puerta con tratamiento acústico diseñada para este espacio, cumple con las recomendaciones realizadas anteriormente, que mencionaban que los valores STC deben ser mayores a 40; en el caso de esta partición, el valor de STC es 64.

Es importante indicar también, que el presente diseño posee una mejora con respecto a varias recomendaciones de STC encontradas en la bibliografía [1], [15], [25], [27]. En algunos casos, el valor de STC no supera 50, siendo que, los diseños son particiones dobles, con amplias cámaras de aire y considerable espacio entre puertas.

A continuación se muestra el detalle constructivo de la puerta y sus respectivos elementos:

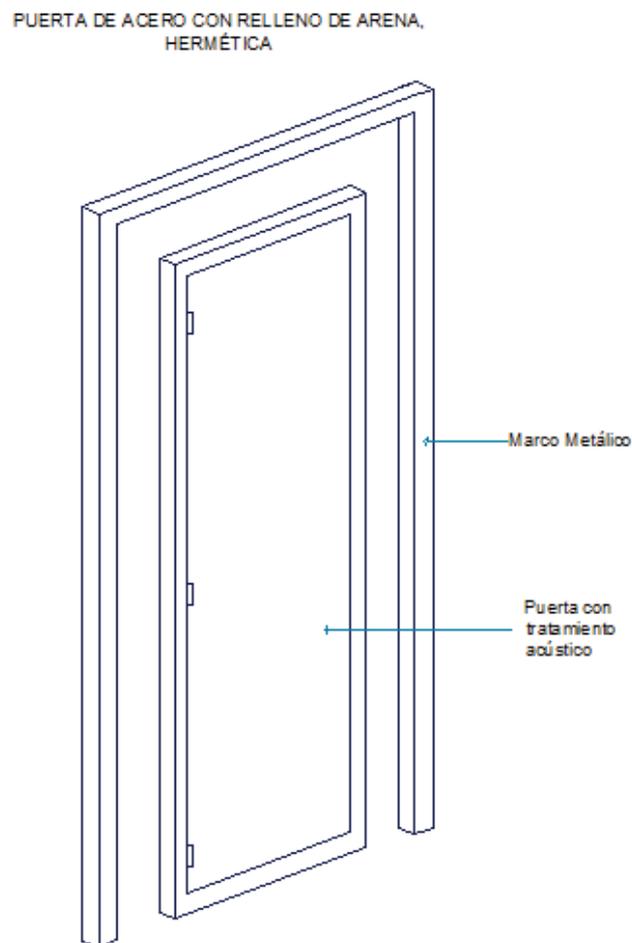


Figura 4.9. Perspectiva de la puerta propuesta.

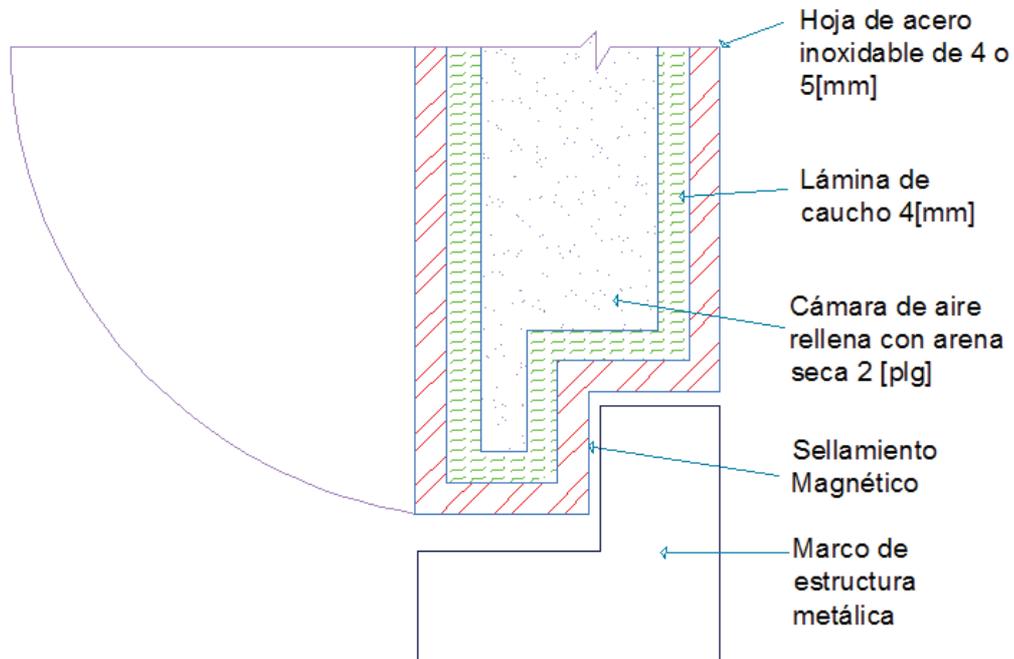


Figura 4.10. Corte longitudinal de la puerta diseñada.

4.2.1.3. MATERIALES PARA REVESTIMIENTO INTERNO

El éxito en el diseño acústico de cualquier tipo de recinto, una vez fijado su volumen y definida la forma, radica en primer lugar en la elección de los materiales más adecuados para utilizar como revestimientos del mismo, con objeto de obtener unos tiempos de reverberación óptimos.

Según se pudo describir anteriormente, el revestimiento interno de la cámara reverberante será realizado en base a planchas de acero unidas entre sí, mediante soldadura especial; todo esto por alcanzar la premisa de obtener un ambiente sonoro altamente difuso interiormente.

4.2.1.3.1. TECHO

Como la construcción del techo se prevé será efectuada de manera similar a la superficie conformada por el piso, tanto en aislamiento como en acondicionamiento acústico, se estima que tendrá las mismas características que las demás particiones.

Para poder aumentar las características reverberantes del recinto, se recomienda utilizar paneles reflectantes convexos, elaborados de cualquier tipo de material que posea la rigidez suficiente, y sea de fácil maniobrabilidad; para poder mantener la misma línea estética del recinto, los paneles reflectantes deben ser elaborados en acero inoxidable de 1[mm] de espesor.

A continuación se muestra la forma que deberá tener los paneles reflectores convexos y su respectivo sistema de montaje.

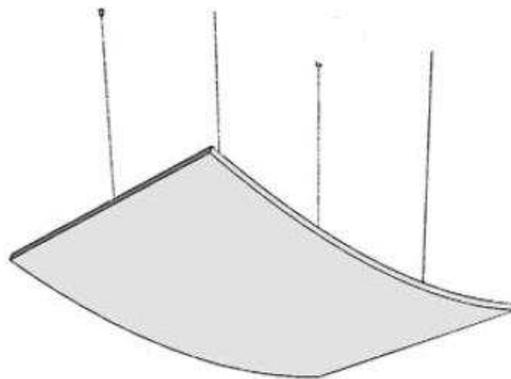


Figura 4.11. Panel Reflector Convexo.

La idea de implementar los paneles reflectores convexos, es la de reforzar el sonido directo mediante reflexiones útiles y por ende, aumentar sustancialmente el campo reverberante.

Siguiendo esta idea es que se propone que dichos paneles tengan distintas alturas y que cubran un área equivalente al 60% del total del área conformada por el techo, y

su distribución será realizada indistintamente en el interior del recinto, con la finalidad de proporcionar un campo reverberante lo más difuso posible.

Los paneles se encontrarán ensamblados al siguiente diseño de montaje, para de esta manera evitar cualquier tipo de transmisión sonora (vibración) desde el panel hacia el techo y viceversa.

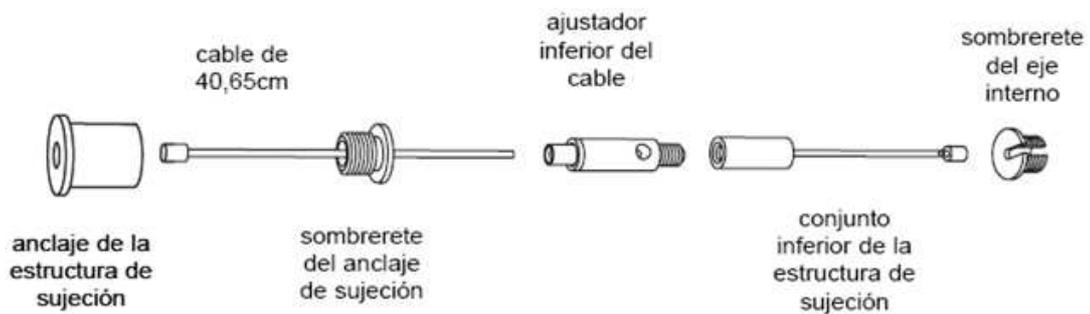


Figura 4.12. Sistema de sujeción de paneles reflectores al techo.

CAPÍTULO 5

5. INSTRUMENTACIÓN REQUERIDA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA SALA REVERBERANTE.

Para poder estimar la cantidad de instrumentación básica requerida en una cámara reverberante, se supondrá que dentro de la sala, se van a realizar mediciones de coeficientes de absorción sonora de materiales. Lo anterior, se basa en el hecho de que, para poder medir el tiempo de reverberación de una sala, se realizan comparaciones entre la sala recubierta por el material de interés y la misma sala sin el recubrimiento del mismo.

Según lo anterior, se procede a crear un campo sonoro al interior de la sala reverberante, con la ayuda de refuerzo sonoro electroacústico (parlantes), y mediante la emisión de ruido de banda estrecha con espectro de frecuencia continuo efectuado por software especializado en la generación de ondas. El sonido emitido por el parlante, es captado por un micrófono omnidireccional con su respectivo preamplificador, y luego, llevado de vuelta hacia el computador, quien será el encargado de registrar lo captado por el micrófono.

A continuación se procede a describir el instrumental requerido para la cámara reverberante propuesta, cabe señalar, que la marca elegida fue Brüel & Kjær:

Cantidad	Descripción	Modelo
1	Amplificador para fuente sonora	2716
1	Micrófonos de medición de alta precisión	Type 4180
1	Preamplificador para micrófono	2699
1	Trípode para micrófono portátil	UA- 0803
1	Calibrador	3541
1	Fuente sonora omnidireccional	4296 Ominipower
1	Computador con Software 7830	

Tabla 5.1. Descripción del instrumental especializado, requerido para el laboratorio marca Brüel & Kjær.

Para poder determinar de mejor manera lo descrito anteriormente, se mostrará a continuación, el esquema de la cadena electroacústica propuesta:

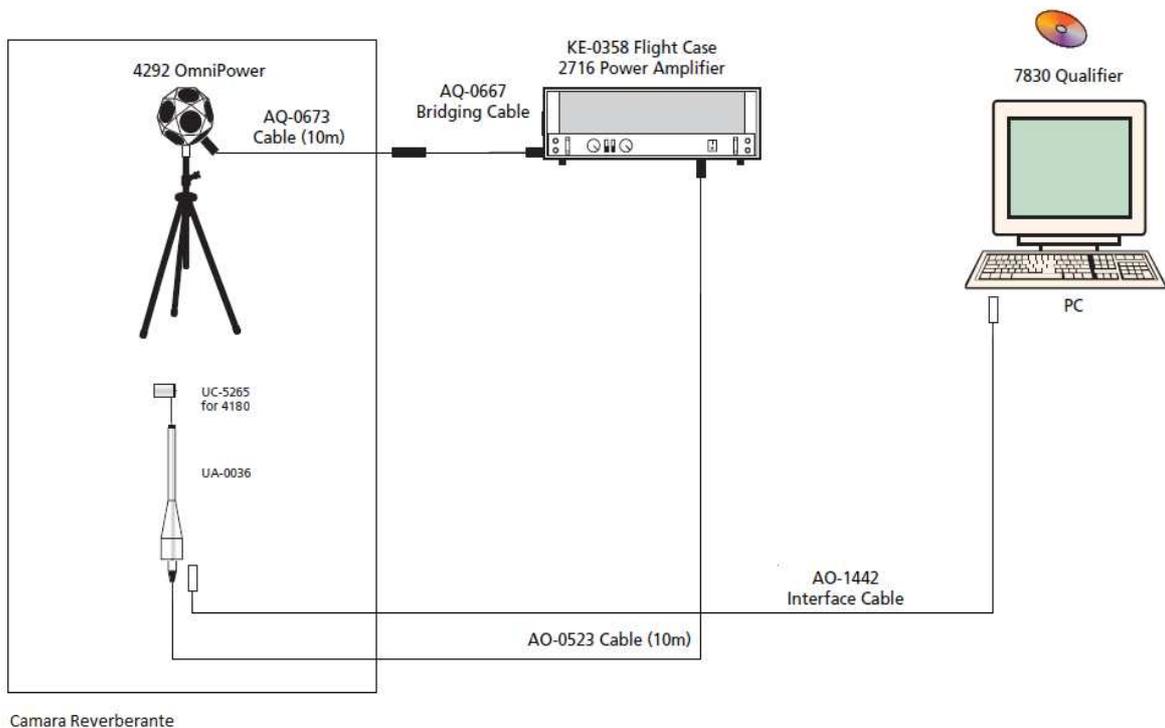


Figura 5.1. Sistema electroacústico requerido para de la cámara reverberante.

CAPÍTULO 6

6. ANÁLISIS DE COSTOS REQUERIDOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA REVERBERANTE E INSTRUMENTAL PROPUESTO

Una vez finalizada la etapa de diseño del recinto, se procede a la elaboración del presupuesto requerido para su construcción e implementación. Se detallan los valores y metrajes correspondientes a los rubros presupuestados para la elaboración de la cámara reverberante de la Universidad de las Américas, en donde se incluyen trabajos de obra civil, eléctrica, acústica, y su respectiva mano de obra.

Los costos que no incluyen la superficie del terreno, instalación de aguas, alcantarillado, teléfono y fax.

En la Tabla 6.1., encontramos los costos directos requeridos en la parte de obra civil.

Código	Rubro	Unidad	Cantidad	Costo. Unitario	Costo Total
<i>DESALOJOS Y EXCAVACIONES</i>					
1	Desbanque a mano	M3	20,5	10	205,00
2	Excavación en fango	M3	16	15	240,00

3	Desalojo material con volqueta	M3	25	18,75	468,75
4	Limpieza general obra	M2	32	1,25	40,00
ESTRUCTURA					
5	Replanteo h.s. 140 kg/m2	M3	6,4	90	576,00
6	Plintos h.s. ciclópeo 210 kg/m2	M3	4,5	180	810,00
7	H. Premezclado 210 kg/cm2 losa inc. Encofrado	M3	7,8	220	1716,00
8	H. Premezclado 210 kg/cm2 columnas inc. Encofrado met.	M3	1,12	215,78	241,67
9	Acero de refuerzo	KG	1000	2,25	2250,00
10	Impermeabilización losas	M2	24,68	22,61	558,01
11	Doble mampostería de ladrillo mampón	M2	90,23	18,64	1681,89
12	Lámina de caucho 1[plg] intermedio paredes	M2	90,23	90	8120,70
13	Relleno arena seca	M3	13,54	12	162,48
14	Bajantes de agua	U	3	35	105,00
ACABADOS					
15	Enlucido vertical mortero	M2	59	7	413,00
16	Enlucido horizontal mortero	M2	56,23	12	674,76

17	Alisado de pisos mortero	M2	32,83	5,1	167,43
18	Lámina de caucho 1[plg] para piso, calafateado y techo	M2	120,02	90	10801,80
19	Tríplex 1/2[plg] sobre piso y techo	M2	57,51	18	1035,18
20	Vigas de madera	U	20	19,94	398,80
21	Lana de vidrio 2[plg] doble capa	M2	65,66	3,33	218,65
22	Placas de acero inoxidable (4 mm)color mate, incluido puertas	M2	147,74	167	24672,58
23	Piedra laja paredes exteriores	M2	90,23	30	2706,90
24	Puntos de luz	U	8	50	400,00
OTROS					
25	Paneles reflectores y sistemas de sujeción	U	1	125	125,00
				SUB	
				TOTAL	58789,61
				IVA	7054,75
				TOTAL	65844,36

En la Tabla 6.2., encontramos los costos indirectos requeridos por el Arquitecto, Ingeniero Civil, Ingeniero Eléctrico, Diseño Acústico.

Especificación	Costo Aproximado (USD)
Arquitecto (Director Técnico)	10% total de la obra
Ingeniero Civil	2800,00
Ingeniero Eléctrico	1500,00
Diseño Acústico	2500,00

Los datos anteriormente expuestos, fueron estimados en base a cotización realizada por la empresa Constructora Moreno (*Ambato - Ecuador*).

En la Tabla 6.3., se pueden observar los costos de los instrumentos electroacústicos que conformarán el laboratorio de mediciones.

Pg. 1			
No. 003	EQUIPO B&K		
	PARA:	Paul Lozada	12-mar-10
	Atn.:	Paul	
	Direc.:	Lozada	
	Tel:	Cel: 094144005	

CARACTERISTICAS RELEVANTES:

2716	Amplificador para fuente sonora 2716	\$	2.915,00
4180	Micrófonos de precisión 4180	\$	3.239,00
2699	Preamplificador para micrófono 2699	\$	681,00
UA-0803	Trípode UA-0803	\$	284,00
3541	Calibrador 3541	\$	7.586,00
4296	Fuente sonora omnidireccional 4296	\$	4.131,00
7830	software 7830 Omnipower (sin computador)	\$	3.438,00
		\$	22.273,50
	Descuento especial: 5%	\$	1.114,00
	Favor remitirse a catálogos adjuntos		
PRECIO (condición FOB Dinamarca)		\$	21.159,83

VEINTIUN MIL CIENTO CINCUENTA Y
SON: NUEVE DOLARES 83/00

CONDICIONES COMERCIALES

VALOR TOTAL:	\$	27.761,69
--------------	----	------------------

El costo anterior, no incluye cableado, ni asistencia técnica para su instalación.

CONCLUSIONES

Mediante el siguiente trabajo investigativo, se han podido identificar varios detalles, que a continuación se proceden a enumerar:

- ✓ Análisis y comparación de normas internacionales, para la obtención de recomendaciones para medidas constructivas, volúmenes de aire internos, humedad relativa interior de la cámara, y varias otras características específicas referentes a las muestras de análisis, dentro de la cámara reverberante. Es importante mencionar que para la implementación de cualquier tipo de laboratorio de medición, es indispensable regirse a lo citado en la normativa específicamente elaborada para la creación de estos espacios. Si esto no es cumplido a cabalidad, los análisis realizados al interior de la sala, no serán valederos, al no cumplir con estos requisitos.

- ✓ El tiempo de reverberación T_{60} obtenido para el diseño propuesto, cumple eficientemente con las recomendaciones exigidas por normativa anteriormente mencionada, para laboratorios de medición de propiedades acústicas.

- ✓ Propuesta de materiales que posean excelentes características de aislamiento acústico. Es indispensable que la cámara reverberante al igual que varios espacios que cumplan la función de laboratorio, posean un ruido de fondo lo más bajo e imperceptible posible, para de esta manera, evitar que cualquier tipo de ruido pueda perjudicar las características mínimas requeridas en el interior. Es por esta razón, que los diseños de particiones deben ser lo más exigentes y siempre tratar de que cumplan con todas las

especificaciones técnicas tanto en calidad de material, como en prestaciones técnicas.

- ✓ La instrumentación sugerida como parte de la sala, según el fabricante es la más recomendable, debido a las características técnicas que poseen cada uno de los dispositivos propuestos; por su exactitud a la hora de entregar datos, versatilidad en el manejo, y rapidez de procesamiento de información.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Harris, C., **MANUAL DE CONTROL DE RUIDO**, McGraw-Hill, Madrid, España 1977, Tomo I.
- [2] Sommerhoff, J., **ACUSTICA DE LOS LOCALES**, Inst. De Acústica, Universidad Austral de Chile, Valdivia 1989.
- [3] Josse, R., **LA ACUSTICA EN LA CONSTRUCCION**, Edit. Gustavo Gilli, Barcelona, 1975
- [4] Ginn, K., **ARCHITECTURAL ACOUSTICS**, Bruel y Kjaer, Dinamarca, 1978.
- [5] Tsui, Ch, Voorhees, C and Yang, J., **“The Design of Small Reverberation Chambers for Transmission Loss Measurement”**, Applied Acoustic, 1976,p. 165-175
- [6] Donato, R., **“Angular Distribution of Lower Room Modes”**, J Acoust Soc. AM., Vol. 41, #6, 1967, p. 1496-1499
- [7] ASTM E 596-90, **“Laboratory Measurement of the Noise Reduction of Sound Isolating Enclosure”**, 1990
- [8] **“Acústica Arquitectónica”**, Compendio Conferencias empresa ISOTEX, 6 de abril de 1994, Bs.As., Argentina. Conferencia **“Soluciones Acústicas en la Arquitectura Española”**, Ing. Fernando Igualador Pascual.
- [9] Taibo, L., **“Medición de Parámetros Acústicos en Laboratorio”**, Informe del Centro de Investigacion en Acústica CINAC, del sistema INTI, Bs-As Argentina, 1982.
- [10] Palleti, Pierce and Toth, **“A Smale-Scale Multi-Purpose Reverberation Room”** Applied Acoustic, 1976, p. 287-302

- [11] Pancholy, M., Chhappgar, A. and Mohanan, V., “**Design and Construction of an Anechotic Chamber at the Nation Physical Laboratory on India**”, Applied Acoustics 14(1981), p.101-111.
- [12] **UNE 74-041-80**, “Medición de Coeficiente de Absorción en Cámara Reverberante”, 1980
- [13] **ASTM C423-90a**, “Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method”, 1990.
- [14] **ISO 140**, “Acoustics – Measurement of sound Insulation in Buildings and of Buildings Elements”, 1978.
- [15] Duanqui, Zheng and Jinjng, “**Acoustics Desing of a Reverberation Chamber**”, Applied Acoustic (32), 1991, p. 83-91
- [16] Recuero, M. y Gil, C., **ACUSTICA ARQUITECTONICA**, Ed. Benzal, España, 1993.
- [17] **IRAM 4065**, “Metodo de Medicion del Coeficiente de Absorción de Sonido en Sala Reverberante”, 1970.
- [18] **ISO 354**, “Acoustics – Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room”, 1985.
- [19] **UNE 74-040-84**, “Medida del Aislamiento Acústico de los Edificios y de los Elementos Constructivos”, 1984.
- [20] Waterhouse, R. V., “**On Standard Methods of Measurements in Architectural Acoustics**”. J. Acoust. Soc. Am., 29(5), May 1957,
- [21] Méndez, A., “**Descripción y Detalles Constructivos del Laboratorio de Acústica de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires**”, Separada de la Revista de Ingeniería, Octubre 1985-Septiembre 1986, # 124, Argentina.

- [22] Silva Díaz, Víctor j., Tesis de Grado: **CONSIDERACIONES PRACTICAS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE SALAS CON BAJO RUIDO DE FONDO**, Valdivia, Chile, 1991.
- [23] **ASTM E 413-87**, "Classification for Rating Sound Insulation", 1987.
- [24] **ASTM E 989-89**, "Standard Classification for Determination of Impact Insulation class (IIC)", 1989
- [25] Beranek, L.L., **Acústica**, Ed. Edicient, Bs.As, Argentina, 1987.
- [26] Beranek, L.L., **NOISE AND VIBRATION CONTROL**, McGraw-Hill, E.E.U.U., 1971.
- [27] V.O. Knudsen **Acoustical designing in architecture**
- [28] Lothar Cremer **Principles and applications of room acoustics**
- [29] Suárez Enrique, Vergara Felipe., Tesis de Grado: **"DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DE LABORATORIO NORMALIZADO DE MEDICIÓN DE PROPIEDADES ACÚSTICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN"**, Valdivia, Chile, 1995.

ANEXOS

ANEXO 1. Tiempo de Reverberación por frecuencias, obtenido mediante cálculo de absorción.

1. Cálculo de las superficies interiores de la sala reverberante.

Partición	Superficie [m ²]
Piso	32,83
Pared 1	23,39
Pared 2	20,46
Pared 3	25,35
Pared 4	20,64
Techo	24,86
Superficie Total	147,53

2. Coeficientes de absorción del material que servirá como revestimiento interior (Acero).

Coeficiente de Absorción del Acero						
Frecuencia [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
α – Acero	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01

3. Cálculo de absorción total de la sala

<p>Absorción</p> $\bar{\alpha} * S_t = A_t$
--

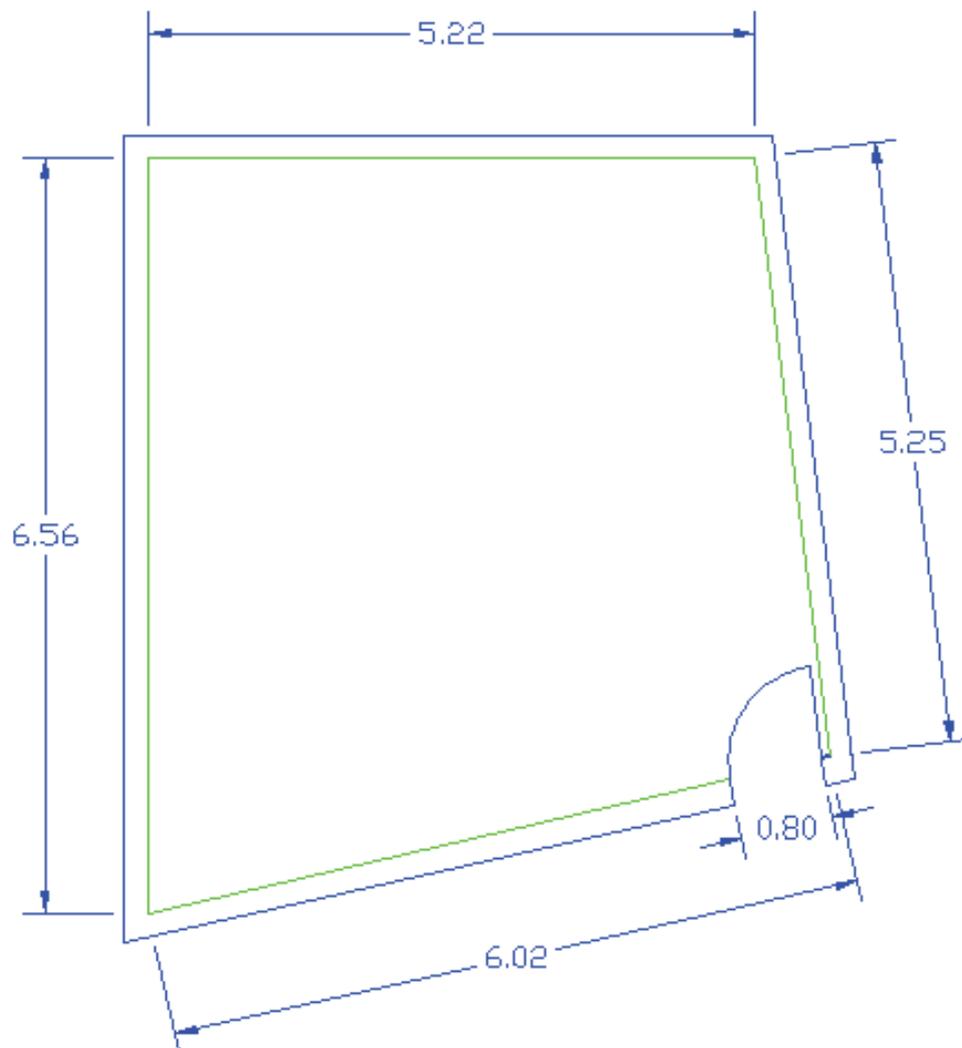
Partición	Frecuencia [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Piso	0,33	0,33	0,33	0,66	0,66	0,33
Pared 1	0,23	0,23	0,23	0,47	0,47	0,23
Pared 2	0,20	0,20	0,20	0,41	0,41	0,20
Pared 3	0,25	0,25	0,25	0,51	0,51	0,25
Pared 4	0,21	0,21	0,21	0,41	0,41	0,21
Techo	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,25
Absorción total	1,48	1,48	1,48	2,95	2,95	1,48

4. Cálculo del tiempo de reverberación total de la sala por frecuencias.

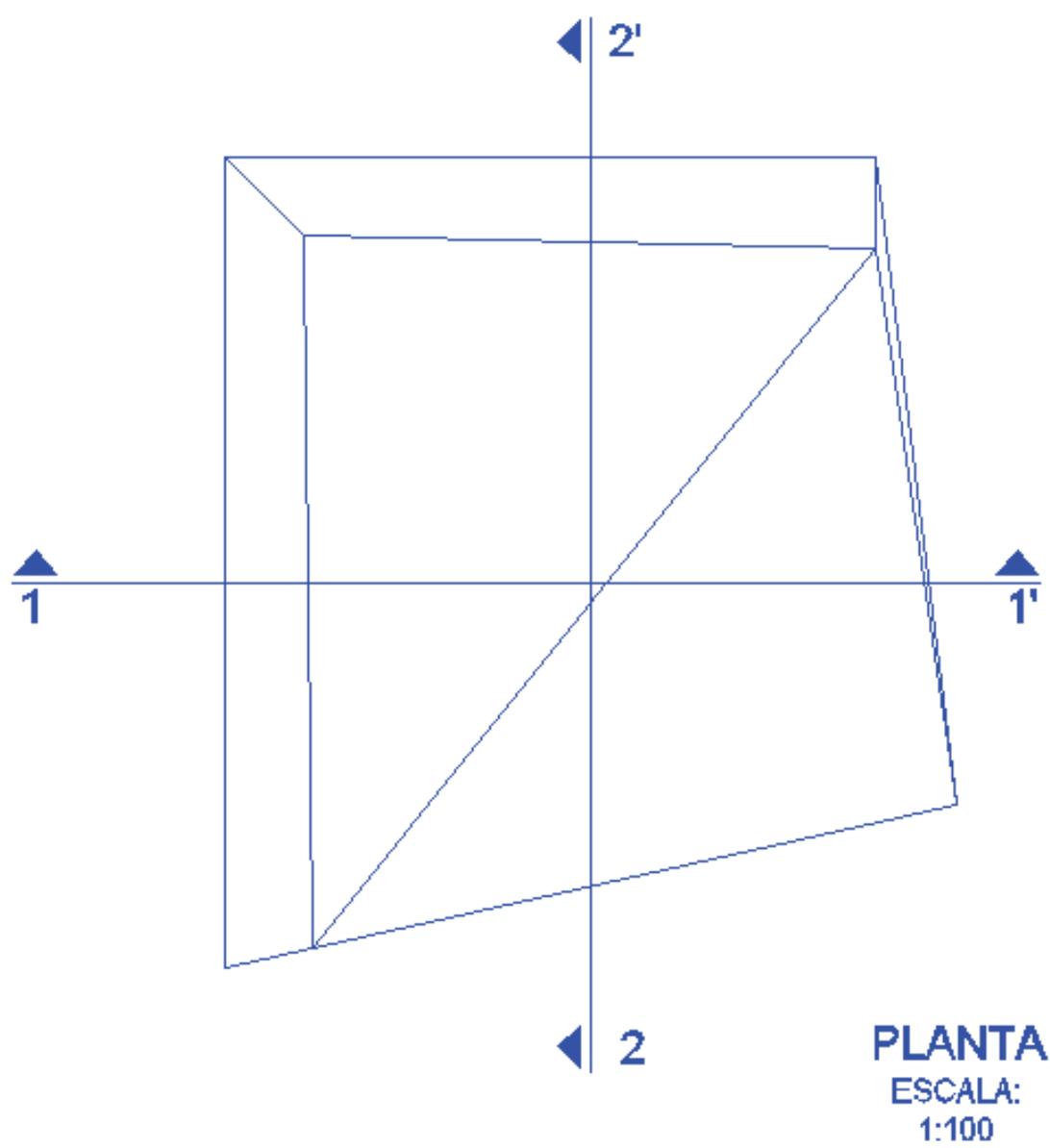
<p>Tiempo de Reverberación T60</p> $T_{60} = 0,161 * \left(\frac{V}{A} \right) [s]$

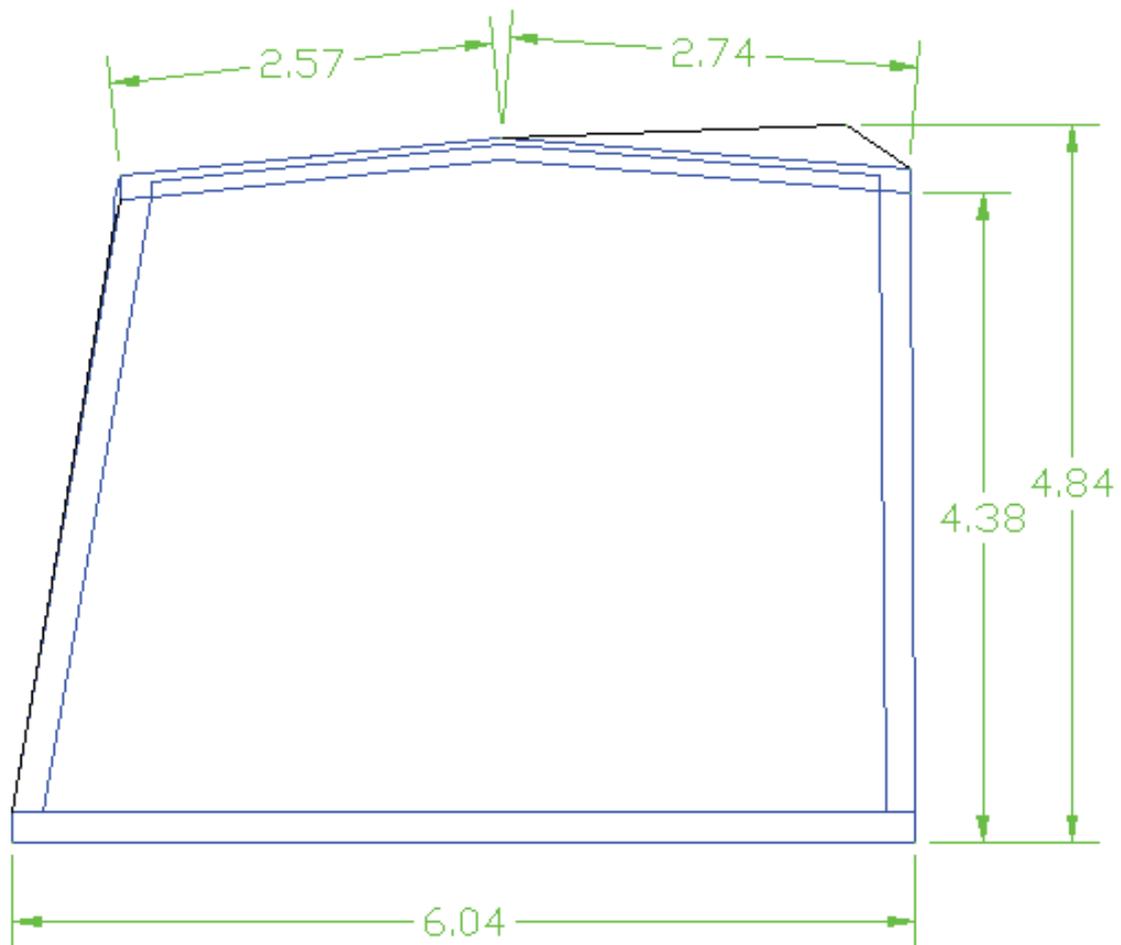
Frecuencia	125	250	500	1000	2000	4000
T₆₀	21,61	21,61	21,61	10,80	10,80	21,61

ANEXO 2. Planos y detalles constructivos de la sala reverberante. Incluyen Elevaciones de Fachadas y Cortes

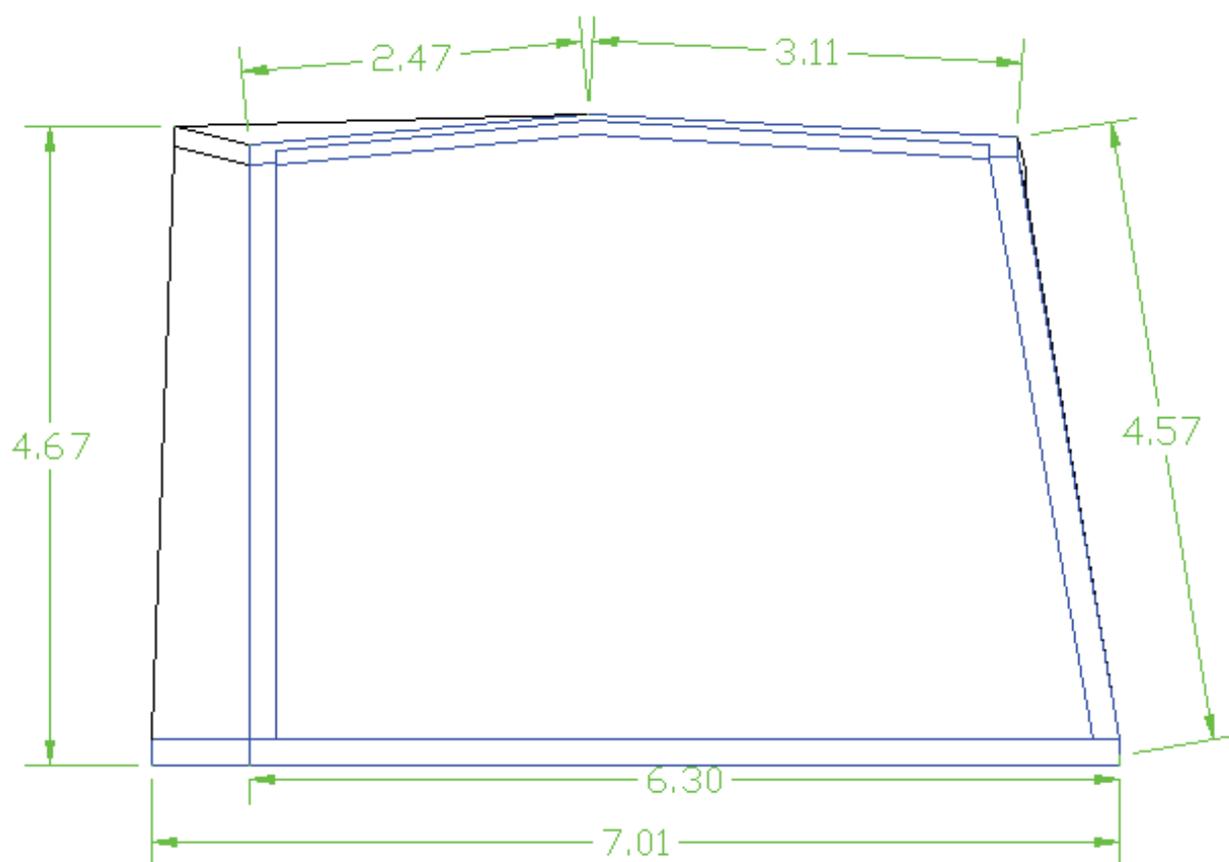


PLANTA
ESCALA:
1:100





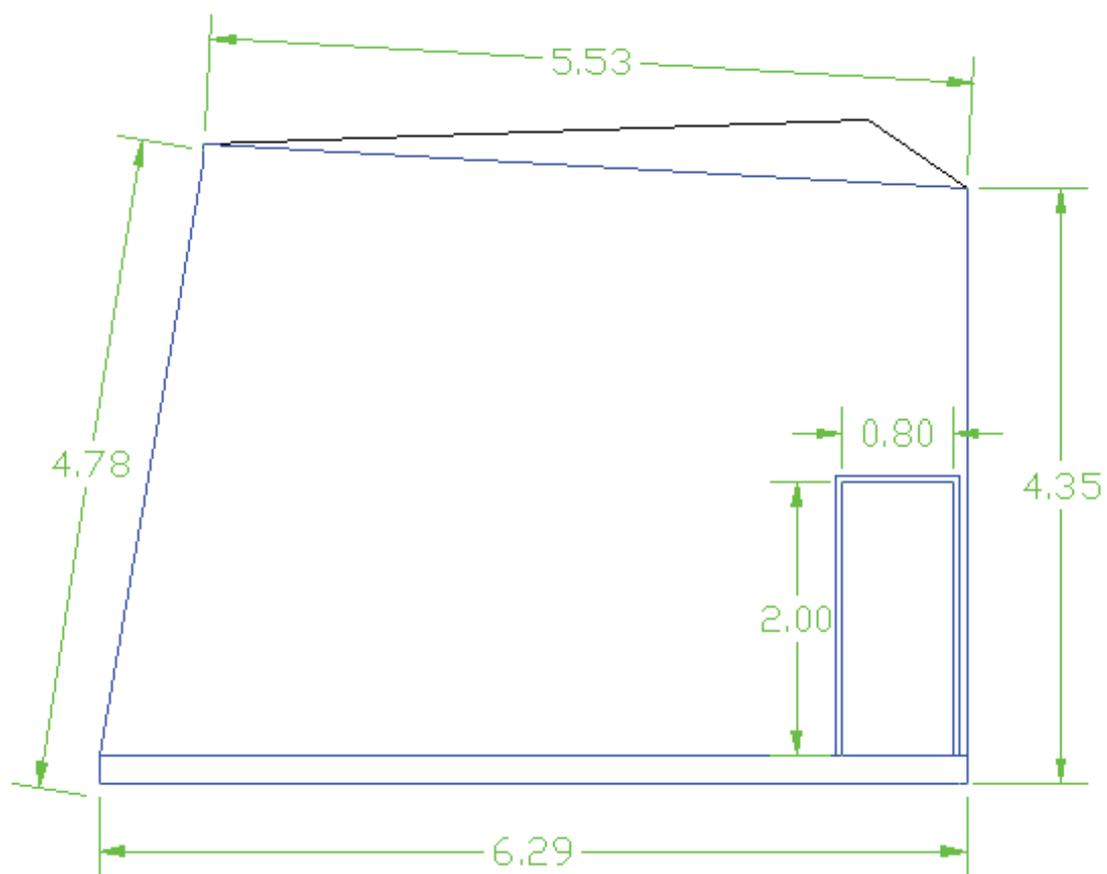
CORTE 1-1'
ESCALA
1:125



CORTE 2-2'

ESCALA

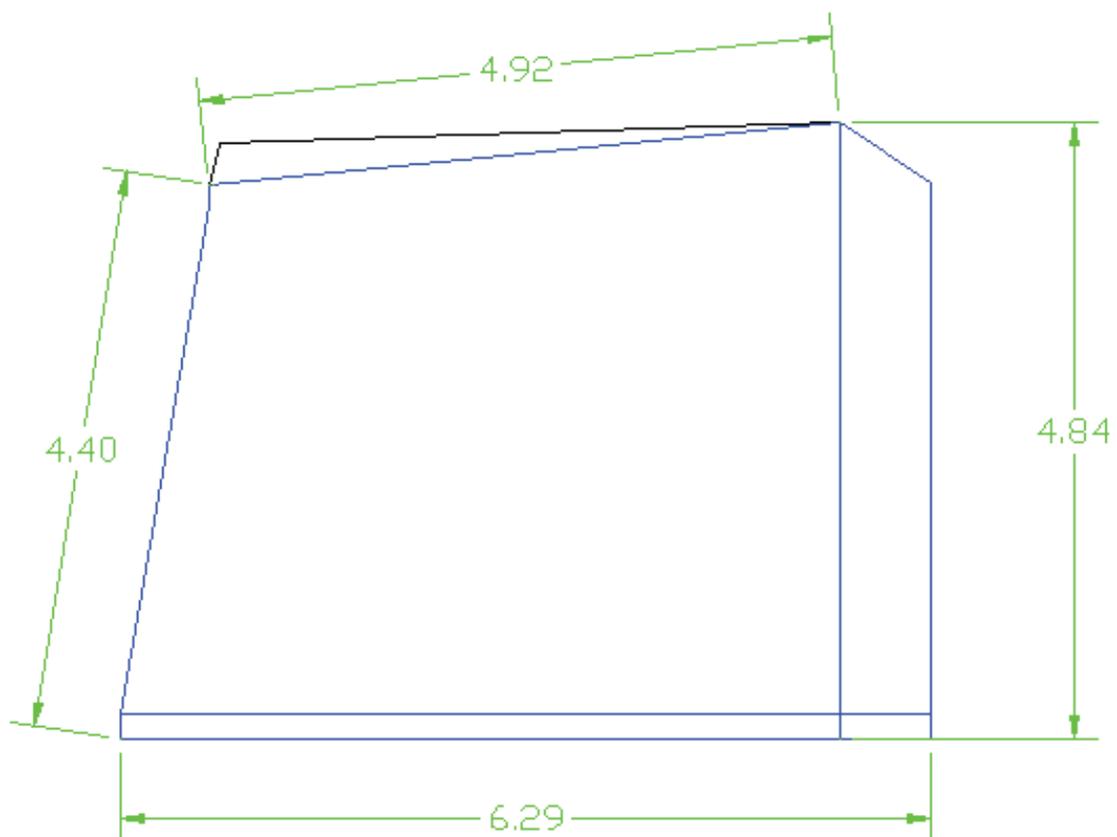
1:125



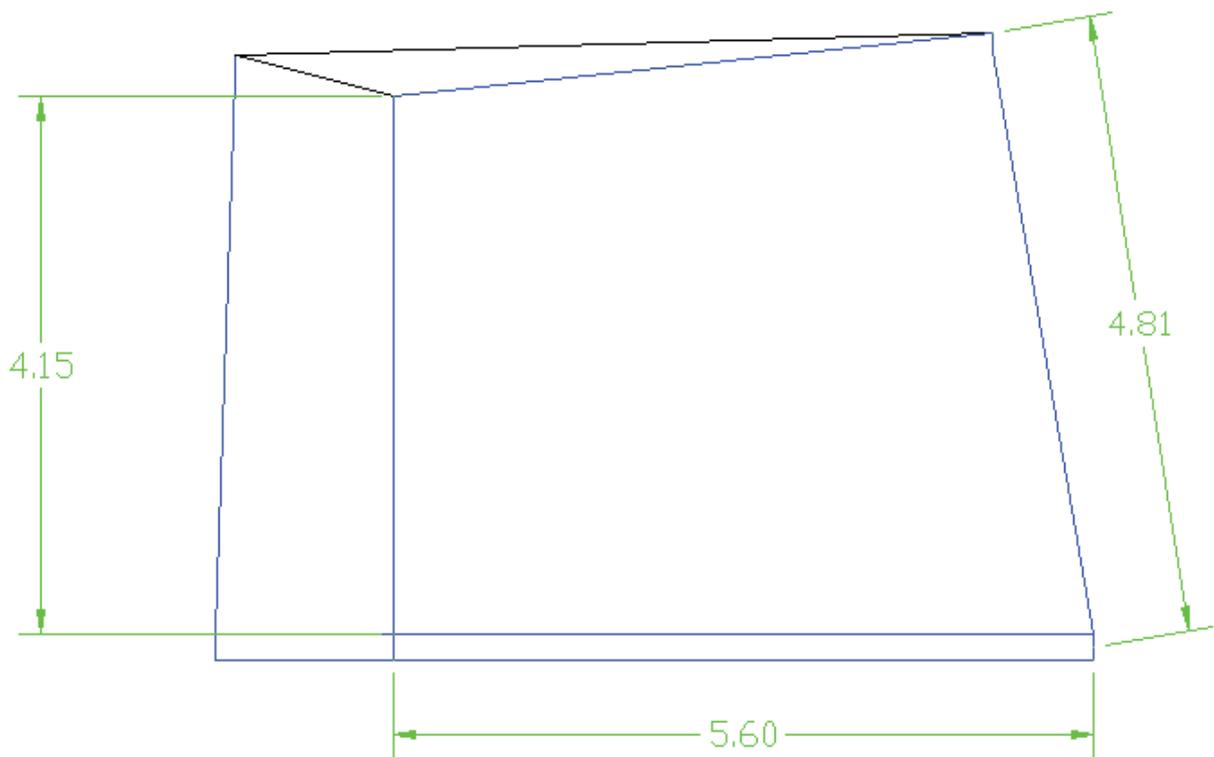
FACHADA FRONTAL

ESCALA

1:125



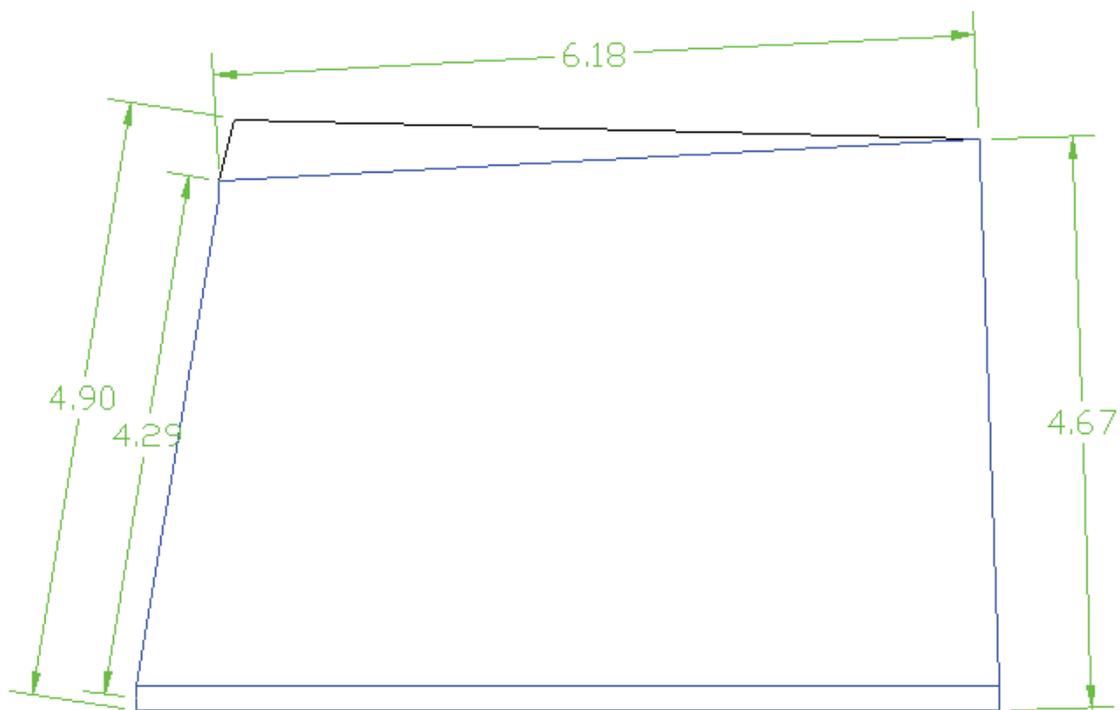
**FACHADA
POSTERIOR**
**ESCALA
1:125**



FACHADA LAT. DERECHA

ESCALA

1:125



FACHADA LAT. IZQUIERDA

ESCALA

1:125