

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño de una Cámara Semianecoica para Ensayos Acústicos

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Juan José Peralta Coello

John Andrés Pozo Villón

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

A mi papá y hermanos por estar conmigo en las buenas y malas, abuelos por su amor incondicional, amigos y a todos los que me acompañaron y ayudaron en este largo camino por siempre sacarme una sonrisa, en especial, a mi mamá que siempre está conmigo, es mi pilar y motivación.

Juan José Peralta Coello


AGRADECIMIENTOS

A Dios porque me mantuvo en el camino a pesar de las grandes dificultades y contratiempos que tuve, a mi profesora guía de la materia, a mis tutores y a todos los profesores que conocí en estos años por el conocimiento impartido. A las personas que me ayudaron a mi crecimiento personal y académico, a las personas recientes que he ayudado a compartir mis aprendizajes y a mi compañero de tesis, John Pozo, sin él no hubiera sido posible este proyecto.

Juan José Peralta Coello

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Juan José Peralta Coello y John Andrés Pozo Villón y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Juan José Peralta Coello



John Andrés Pozo Villón

EVALUADORES

.....
Emérita Delgado Plaza Ph.D

PROFESORA DE LA MATERIA

.....
Msc. Galo Durazno Palacios

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El ruido de la ciudad ocasiona malestar general y enfermedades, existen leyes que restringen el ruido, pero no se las toma a consideración. La cámara semianecoica se usa para absorber las ondas sonoras provenientes de su interior para poder estudiar los diferentes niveles acústicos y frecuencias de la fuente, con la finalidad que se realicen ensayos acústicos o calibración de equipos. Estos estudios se efectúan bajo estándares internacionales, además, dicha cámara está aislada del exterior. Se diseñó una cámara semianecoica siguiendo los parámetros de diseño, teniendo a consideración materiales absorbentes y aislantes de sonidos para cumplir con las especificaciones de diseño de las normativas y de los requerimientos del cliente. Se optó por el diseño de una cámara reverberante, para tener diferentes tipos de ensayos, que junto a la cámara semianecoica estarán en un laboratorio de acústica, aislado del ruido cotidiano, teniendo iluminación en el laboratorio, climatización y los planos de estos. El diseño de la propuesta planteada no solo cumple con las regulaciones de normas, sino de las condiciones de confort en cuanto a temperatura e iluminación. En la región este tipo de cámaras son casi inexistentes, y en la gran mayoría se usa para otro tipo de estudios, al tener un laboratorio de acústica en Ecuador, no solamente garantiza el cumplimiento de normativas de los ensayos acústicos o la calibración de instrumentos, asegura un servicio económico, debido a que no se tendrá que recurrir en la compra de equipos en el extranjero.

Palabras Clave: Semianecoica, aislante, reverberante, iluminación, climatización.

ABSTRACT

The noise of the city causes general discomfort and diseases, there are laws that restrict noise, but they are not considered. The semi-anechoic chamber absorbs the sound waves coming from its interior to study the different acoustic levels and frequencies of the source, with the purpose of carrying out acoustic tests or equipment calibration. These studies performer under international standards, in addition, said chamber is isolated from the outside. A semi-anechoic chamber designed made parameters, considering sound absorbent, and insulating materials to comply with the design specifications of the regulations and customer requirements. The design of a reverberant chamber was chosen, in order to have different types of tests, which together with the semi-anechoic chamber will be in an acoustics laboratory, isolated from daily noise, having lighting in the laboratory, air conditioning and their plans. The design of the proposed proposal not only complies with standard regulations, but also with comfort conditions in terms of temperature and lighting. Due to the fact that this type of chambers are almost non-existent in the region, and in the vast majority it is used for other types of studies, having an acoustics laboratory in Ecuador not only guarantees compliance with acoustic testing regulations or the instrument calibration, ensures an economical service, because you will not have to resort to buying equipment abroad.

Keywords: *semi-anechoic, insolation, reverberation, illumination, climatization.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ABREVIATURA	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Definición del Problema	1
1.2 Justificación del problema	1
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Marco Teórico	3
1.4.1 El sonido.....	3
1.4.2 Generación y propagación del sonido	3
1.4.3 Conceptos físicos básicos	4
1.4.4 Bandas de frecuencia	6
1.4.5 Aislamiento y absorción acústica.....	7
1.4.5.1 Pérdida por Transmisión	7
1.4.5.2 Tiempo de Reverberación	8
1.4.6 Materiales absorbentes	8
1.4.7 Modelos de acondicionamiento acústico	9
1.4.7.1 Modelo basado en capas	9
1.4.7.2 Modelo basado en cuñas	10
1.4.8 Aislamiento Acústico.....	11
1.4.8.1 Lana de Roca y de Vidrio	11
1.4.8.2 Paredes.....	12
1.4.8.3 Pared Simple.....	13
1.4.8.4 Pared doble.....	15

CAPÍTULO 2.....	16
2. METODOLOGÍA.....	16
2.1 Parámetros del diseño	17
2.1.1 Especificaciones del diseño.....	17
2.1.2 Requerimientos del diseño del cliente	18
2.2 Diseño de la cámara semianecoica.....	18
2.2.1 Dimensionamiento de la cámara	18
2.2.2 Dimensionamiento de la cuña.....	19
2.2.3 Sistema de climatización	20
2.2.3.1 Caudal de aire.....	22
2.2.3.2 Velocidad de aire	22
2.2.3.3 Diseño de ductos	23
2.2.3.4 Potencia sonora de ventiladores.....	24
2.2.4 Sistema de iluminación.....	25
2.3 Puerta.....	28
2.4 Techo	28
2.5 Diseño de forma.....	28
2.6 Matriz de decisión	29
2.7 Características de solución generada	32
2.8 Diseño de forma.....	32
CAPÍTULO 3.....	34
3. Cálculos y Resultados.....	34
3.1 Dimensiones mínimas de la cámara.....	34
3.2 Dimensiones de cuña.....	35
3.3 Aislamiento Acústico	38
3.3.1 Tiempo de Reverberación	40
3.4 Sistema de climatización.....	42
3.4.1 Red de conductos de impulsión.....	43
3.4.2 Red de conductos de retorno	51
3.4.3 Nivel de potencia sonora en las rejillas.....	52
3.4.4 Nivel de potencia sonora de ventilador.....	53
3.4.5 Atenuación debido a los ductos.....	54

3.4.6	Capacidad de unidad enfriadora.....	55
3.5	Sistema de iluminación	56
3.5.1	Cámara semianecoica	56
3.5.2	Cámara reverberante.....	58
3.5.3	Sala de computo.....	59
3.6	Análisis de costos.....	61
3.6.1	Costos totales.....	64
Capítulo 4	65
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	65
4.1	Conclusiones.....	65
4.2	Recomendaciones.....	66

Bibliografía

Anexos

ABREVIATURA

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
FUMCORAT	Fundación Médica contra el Ruido, Ambiente, Contaminantes y Tabaquismo
OMS	Organización Mundial de la Salud
ISO	International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
COA	Código Orgánico del Ambiente

SIMBOLOGÍA

dB	Decibelio
dBA	Decibelio en ponderación A
P	Presión
P _s	Presión Sonora
P ₀	Presión Atmosférica
T	Tiempo
Hz	Hertzios
f	Frecuencia sonora
c	Velocidad de Propagación
NPS	Nivel de Presión Sonora
E _i	Energía Incidente
E _r	Energía Reflejada
E _a	Energía Absorbida
E _t	Energía Transmitida
TL	Pérdida por Transmisión
τ	Relación W_T y W_i
W_T	Energía sonora transmitida
W_i	Energía sonora incidente
RT	Tiempo de Reverberación
V	Volumen del recinto
A_{tot}	Absorción total del recinto
$\bar{\alpha}$	Coeficiente medio de absorción
S_{tot}	Superficie total
α_i	Coeficiente de absorción de la superficie i
S_i	Área de la superficie i
°C	Celsius
s	Segundos
λ	Longitud de Onda
α	Coeficiente de Absorción Acústica
f_r	Frecuencia de Resonancia

f_0	Frecuencia natural
d	Distancia entre paredes
m_1	Masa por unidad de superficie de la pared M1
m_2	Masa por unidad de superficie de la pared M2
s'	Rigidez dinámica del material
P_{ref}	Presión de Referencia
STC/RW	Clase de transmisión sonora
M	Masa por unidad de área
R	Aislamiento de pared simple por ley de masas
L	Longitud mínima
W	Ancho mínimo
H	Altura mínima
l	Largo máximo del objeto de prueba
w	Ancho máximo del objeto de prueba
h	Alto máximo del objeto de prueba
L'	Longitud útil
W'	Ancho útil
H'	Altura útil
D	Longitud entre aire y altura de cuña
Q	Caudal
L_{eq}	Longitud equivalente
L	Longitud del tramo recto
D_e	Diámetro circular equivalente de un conducto rectangular
a	Longitud de un lado del conducto
b	Longitud del lado adyacente del conducto
Q	Caudal de aire
v	Velocidad del aire en el conducto
S_d	Área de la sección transversal del conducto
Φ_T	Flujo luminoso total
E_m	Nivel de iluminación medio
S	Superficie para iluminar
C_u	Coeficiente de utilización
C_m	Coeficiente de mantenimiento

K	Índice local
H	Altura loca
a	Ancho local
b	Largo del local
NL	Número de luminarias
Φ_L	Flujo luminoso de una lampara
V_T	Volumen total

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Desarrollo de la presión sonora P_s a través del tiempo (Isbert, 1998)	4
Figura 1.2 Presión sonora a 1 y 10 Hz (Isbert, 1998)	4
Figura 1.3 Absorción acústica (Autoría Propia)	7
Figura 1.4 Modelo basado en capas (Barrionuevo & Gonzalez, 2012)	9
Figura 1.5 Disposición de las cuñas tipo Cremer (Mattia, 2003)	10
Figura 1.6 Cuña piramidal tipo Wedge (Mas Acoustics, s.f.)	11
Figura 1.7 Masa por unidad de área de materiales habituales (ISOVER, 2000)	13
Figura 1.8 Aislamiento Acústico de una pared Simple (ISOVER, 2000).....	14
Figura 1.9 Masa superficial y aislamiento (ISOVER, 2000)	14
Figura 2.1 Metodología para el desarrollo de la cámara semi anecoica.....	16
Figura 2.2 Dimensionamiento de cuña (Autoría Propia).....	19
Figura 2.3. Esquema de dimensiones mínimas de la cámara semianecoica.	20
Figura 2.4 Aislador de resorte (Rossing, 2007)	21
Figura 2.5 Soporte de tuberías con almohadillas de neopreno. (Rossing, 2007)	21
Figura 3.1 Esquema de dimensiones para cuña. Medidas en mm.	36
Figura 3.2 Vista isométrica de cuña diseñada. Medidas en mm.....	37
Figura 3.3 Vista isométrica de un conjunto de cuñas	37
Figura 3.4 Vista superior de la distribución de espacio.	38
Figura 3.5 Pérdida de Transmisión de pared doble (Software DBKAisla).	39
Figura 3.6 Corte transversal de pared.	40
Figura 3.7 Esquema de distribución de conductos de impulsión, medidas en mm.....	43
Figura 3.8 Esquema de distribución de conductos de retorno. Medidas en mm.	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Frecuencias en bandas de octavas y tercios de octava. (iso, 1975).....	6
Tabla 1.2 Propiedades de espuma de poliuretano (garcía torres, 2017).....	10
Tabla 1.3 Características generales de la lana de roca y de vidrio	12
Tabla 1.4 Niveles de aislamiento del stc (tolliver, 2012).....	12
Tabla 2.1 Velocidades típicas en ductos. (trott & welch, 2000)	22
Tabla 2.2 Factores de influencia y su descripción	28
Tabla 2.3 Escala de importancia	29
Tabla 2.4 Comparación por pares de los factores de influencia.....	29
Tabla 2.5 Matriz de decisión para modelo de acondicionamiento acústico	30
Tabla 2.6 Matriz de decisión para sistema de climatización.....	31
Tabla 2.7 Matriz de decisión para iluminación.....	31
Tabla 2.8 Características de solución.....	32
Tabla 3.1 Resultados de dimensionamiento.....	35
Tabla 3.2 Dimensiones útiles de la cámara semianecoica	38
Tabla 3.3 Coeficiente de absorción de materiales.....	41
Tabla 3.4 Dimensiones de habitaciones.....	42
Tabla 3.5 Longitudes equivalentes y caudales por tramo.....	43
Tabla 3.6 Resultados del conducto de entrada de aire.	50
Tabla 3.7 Resultados del conducto de retorno.	52
Tabla 3.8 Resultados de atenuación en ductos.....	55
Tabla 3.9 Resultado de luminarias.	61
Tabla 3.10 Lista de rubros de obra civil (Cámara de la construcción de guayaquil, 2019).	61
Tabla 3.11 Lista de rubro de sistema de climatización.	64

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del Problema

Los avances tecnológicos han puesto a disposición del ser humano herramientas de medición de sonido. Sin embargo, estas tecnologías se encuentran con desafíos, como ruidos de la naturaleza o de fuentes artificiales. Una medición precisa del ruido generado por una herramienta o dispositivo requiere de un ambiente aislado que brinde silencio casi absoluto. Por este motivo, se busca implementar un laboratorio de acústica para la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP), con el objetivo de realizar ensayos acústicos, pretendiendo calibrar equipos de medición acústica y vibraciones para la industria local, a través del diseño de una cámara semianecoica con condiciones de campo libre. Se debe de cumplir con los criterios de diseño según la normativa ISO 3745, para que se puedan realizar ensayos según las normas internacionales, como lo es la UNE-EN ISO 17025. Este tipo de sala se usa para la medición de la presión acústica de algún producto que se requiera investigar o comercializar, permitiendo según normativas mejorar su nivel de ruido mediante una serie de ensayos acústicos, como por ejemplo los componentes de vehículos que generan ruidos excesivos, motores, bombas de agua, equipos de climatización, medir el ruido de drones, la correcta calibración de equipos de medición sonora, equipos para ensayos de laboratorios existentes en el campus, etc.

1.2 Justificación del problema

La acústica es de suma importancia a nivel industrial y a nivel local. Los niveles de ruido en ciertas zonas de la ciudad de Guayaquil exceden los límites recomendados. La Fundación Médica contra el Ruido, Ambiente, Contaminantes y Tabaquismo (FUMCORAT) señala que la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que en el día no exista más de 60 dBA ni en la noche más de 40 dBA. La presión sonora, cuando excede los 55 dBA, se convierte en una de las principales causantes del trastorno del sueño (Berglund, Lindvall, & Schwela, 1999). El concepto dBA mide la unidad de ruido

promedio entre altas y bajas frecuencias, por lo que refleja la percepción del ser humano.

Los límites admisibles de nivel sonoro son determinados por la ley ambiental según su Código Orgánico del Ambiente (COA), y por el Reglamento de Seguridad y Salud de los Trabajadores, según el decreto ejecutivo 2393, para el ruido ambiental y ocupacional, respectivamente. Sólo en el mes de agosto del 2022, se registró 337 denuncias por contaminación acústica en la ciudad. En Urdesa, en un día ordinario se registra 82.3 dBA. La ordenanza para Prevenir y Mitigar el Ruido en su artículo 9 establece que los locales tienen que presentar aislamiento acústico, aunque la mayoría no los presenta (Alcaldía de Guayaquil, 2022).

Por esto se considera desarrollar en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP), una cámara semianecoica. Este vocablo griego significa capacidad de absorber ondas sonoras sin reflejarlas. Se busca promover la industria manufacturera, la construcción y se impulsará con el avance científico y tecnológico en la industria acústica del país debido a la creación de equipos que cumplan con normativas internacionales. Se fomentará el crecimiento económico sostenido e inclusivo, el empleo pleno y productivo, debido a que se contará con técnicos especializados, teniendo actividades profesionales, técnicas y administrativas que aportaran de gran medida a los estudios de la acústica en la universidad y en la ciudad. La cámara contará con las especificaciones de todos los materiales usados, así como el diseño de sistemas eléctricos y de climatización, cumpliendo con los estándares internacionales que permitan realizar diferentes tipos de ensayos.

Dicha construcción tendrá infraestructura resiliente, promoviendo la industrialización y fomentando la innovación. De esta manera, la ESPOL, contará con un laboratorio de acústica que preste servicios a la industria ecuatoriana. Otro de dichos servicios será la medición de diferentes materiales y elementos de insonorización para edificaciones e industrias.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar una cámara semianecoica que cumpla con los requisitos para ensayos acústicos, aplicando principios fundamentales de ingeniería mecánica en el campo de la acústica.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Definir los criterios de diseño en función de las normativas existentes.
2. Diseñar los componentes estructurales de insonorización, sistemas eléctricos y de climatización.
3. Realizar el análisis preliminar de costos de implementación del diseño de la cámara para futuras implementaciones.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 El sonido

El sonido es una vibración mecánica que tiene diferentes medios por los que se puede propagar, y estos son líquidos, sólidos o gaseosos, y es la acústica la disciplina que estudia los diversos aspectos relacionados con el sonido y su relación con la ingeniería (Miyara, 1999)

1.4.2 Generación y propagación del sonido

Cuando un elemento entra en vibración da lugar a la generación de sonido, y se transmite por medio de las partículas cercanas a una fuente llamada fuente sonora. La transmisión de la perturbación de una partícula a otra se conoce como propagación de la onda sonora (Isbert, 1998). En la Figura 1.1 se muestra como la presión sonora P_s se desarrolla a través del tiempo, la que se obtiene como la suma de la presión P_0 (presión atmosférica) y la presión P .

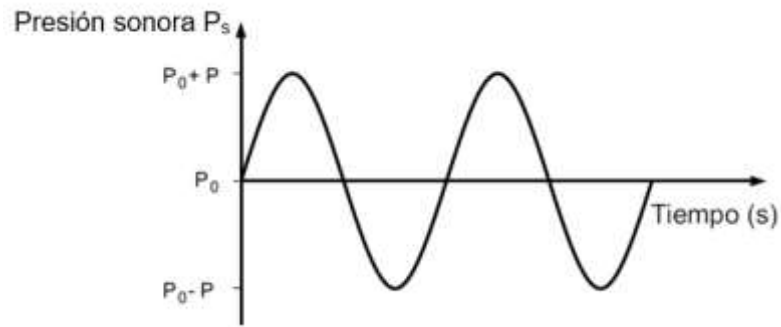


Figura 1.1 Desarrollo de la presión sonora P_s a través del tiempo (Isbert, 1998)

1.4.3 Conceptos físicos básicos

Frecuencia del sonido (f). Es el número de oscilaciones por segundo y se mide en hertzios (Hz). En la Figura 1.2 se presenta como en un mismo tiempo se tiene diferentes frecuencias.

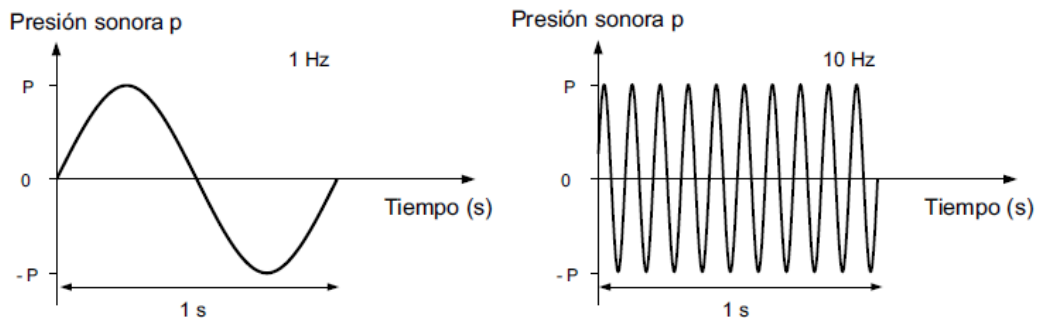


Figura 1.2 Presión sonora a 1 y 10 Hz (Isbert, 1998)

Velocidad de propagación (c). Depende de las características del medio de propagación y la densidad. El medio más usual para la propagación del sonido es el aire. La temperatura y presión atmosférica son variables influyentes; en condiciones normales la presión es de una atmósfera y la temperatura será fijada de acuerdo con la normativa para cámaras semianecoicas igual a 30°C. En su libro Acoustic el autor Leo L. Beranek propone la Ecuación 1.1 para el cálculo de la velocidad del sonido en el aire (Beranek L., 1954):

$$c = 331,4 + 0,607 T \quad (1.1)$$

Donde:

c: velocidad del aire en [m/s]

T: temperatura en [°C]

Longitud de onda (λ), Es igual a la distancia recorrida por la onda sonora luego de completar un ciclo. Se calcula a partir de una ecuación de velocidad del sonido.

$$c = f \cdot \lambda \quad (1.2)$$

Donde:

c: velocidad del sonido en [m/s]

f: frecuencia en [Hz]

λ : longitud de onda en [m]

Nivel de presión sonora (NPS). Mide la magnitud del campo sonoro empleando una escala logarítmica. El rango de percepción del oído humano va desde 2×10^{-5} Pa hasta 100 Pa, valor cercano del umbral del dolor.

$$NSP = 10 \log \frac{P^2}{P_{ref}^2} = 20 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad (1.3)$$

Donde:

NSP: nivel de presión sonora en [dB]

P: presión en [Pa]

P_{ref} : presión de referencia en [Pa]

El Ruido. Se define al ruido como la combinación de todas las frecuencias o perturbación acústica indeseable. El proyecto de Ordenanza para prevenir y mitigar el ruido en el cantón Guayaquil, lo define como todo sonido externo indeseable capaz de afectar e incluso producir daños en la salud de las personas (Dirección de Medio Ambiente de la M.I. Municipalidad de Guayaquil, 2014).

1.4.4 Bandas de frecuencia

En términos de acústica, el sonido es la agrupación de frecuencias a diferentes intensidades, que van de sonidos graves a sonidos agudos. El conjunto de frecuencias que abarcan estos extremos se conoce como banda de frecuencia. Esta agrupación de frecuencias en bandas se da en octavas y tercios de octavas, y alrededor de una frecuencia central, que resulta de la suma de la amplitud de las frecuencias unitarias alrededor de la misma (Casado García).

Las bandas de octavas y tercios de octavas son las más empleadas en acústica. En las octavas, la frecuencia alta es el doble de la anterior ($f_2=2f_1$), y en las bandas de tercios de octavas la relación es $f_2/f_1=2^{1/3}$. La norma UNE-EN ISO 266 detalla las frecuencias preferentes a utilizar para las mediciones acústicas mostradas en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Frecuencias en bandas de octavas y tercios de octava. (ISO, 1975)

Bandas de octavas [Hz]	Bandas de tercios de octavas [Hz]	Bandas de octavas [Hz]	Bandas de tercios de octavas [Hz]
16	16	500	500
	20		630
	25		800
31,5	31,5	1000	1000
	40		1250
	50		1600
63	63	2000	2000
	80		2500
	100		3150
125	125	4000	4000
	160		5000
	200		6300
250	250	8000	8000
	315		10000
	400		12500
-	-	16000	16000

1.4.5 Aislamiento y absorción acústica

El aislamiento acústico pretende reducir el ruido al lugar que se esté ocupando, reduciendo la energía transmitida y aumentando la reflejada. La absorción busca disipar la energía y mejorar las condiciones interiores de la cámara. La Figura 1.3 muestra el comportamiento que tiene la energía de una onda sonora. Parte de la energía incidente (E_i) es reflejada (E_r), una parte es absorbida (E_a), y otro porcentaje de energía se transmite (E_t).

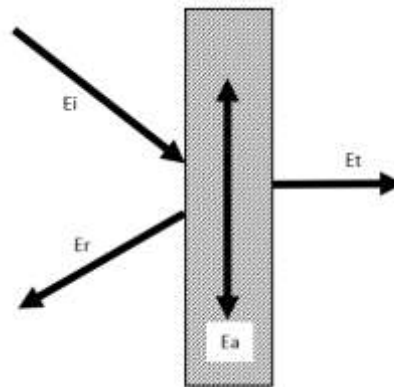


Figura 1.3 Absorción acústica (Autoría Propia)

1.4.5.1 Pérdida por Transmisión

Es la relación entre la energía sonora incidente y la energía sonora transmitida, debido a esto es una medida de energía sonora que no se transmite. Se expresa en decibelios (dB) y posee un valor diferente para cada frecuencia. Se calcula a partir de la Ecuación 1.4.

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (1.4)$$

$$\tau = \frac{W_T}{W_i} \quad (1.5)$$

Donde:

TL: Pérdida de transmisión [dB]

τ : Relación W_T/W_i

W_T : Energía sonora transmitida [dB]

W_i : Energía sonora incidente [dB]

1.4.5.1.1 Clase de Transmisión de Sonido (STC)

Es una evaluación de que tan bien la pared reduce la transmisión de sonido. Es una clasificación estandarizada por la norma ASTM E413.

1.4.5.2 Tiempo de Reverberación

Según la norma ISO 3382, es el tiempo que tarda el nivel de presión sonora en una habitación disminuir 60 dB de su nivel original después que el sonido de la fuente sonora haya finalizado. De forma abreviada se representa como RT, TR o T60 y se calcula con la Ecuación 1.6, complementada con la Ecuación 1.7 y 1.8.

$$RT = \frac{0.161 \cdot V}{A_{tot}} \quad (1.6)$$

Siendo:

$$A_{tot} = \bar{\alpha} S_{tot} \quad (1.7)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S_{tot}} \quad (1.8)$$

Donde:

RT: Tiempo de reverberación en [s]

A_{tot} : Absorción total del recinto en [dB]

$\bar{\alpha}$: coeficiente de absorción medio [dB]

S_{tot} : superficie total en [m²]

α_i : coeficiente de absorción de la superficie i [dB]

El tiempo de reverberación obtenido a partir de materiales de absorción son ideales si se consiguen tiempos de reverberación cortos, por lo que su utilidad es de gran importancia para determinar la acústica de la sala. La expresión de la ecuación 1.6 se denomina ecuación de Sabine, existen variables de este tipo de ecuación, pero es aceptada como referencia a nivel internacional.

1.4.6 Materiales absorbentes

Las ondas sonoras incidentes son absorbidas según el material utilizado como revestimiento en la cámara. Se debe realizar una correcta selección

de material para lograr la más apropiada absorción de todas las bandas de frecuencia de interés (Isbert, 1998). Entre los materiales con mejor coeficiente de absorción se encuentran los materiales porosos como la lana de vidrio, lana de roca y la espuma de poliuretano.

1.4.7 Modelos de acondicionamiento acústico

Entre los métodos más empleados para crear las condiciones de campo libre se encuentra en modelo basado en capas y el modelo basado en cuñas.

1.4.7.1 Modelo basado en capas

Se emplean capas de tejido, sean estas telas o material tejido, con una alta resistencia al flujo y de grosores variados. En este modelo de acondicionamiento se deja un espacio mínimo de 0.1 m, entre la pared y la capa de material, que sirve para la absorción de baja frecuencia. Sin embargo, los parámetros de elección resultan en una tarea compleja, para lograr una configuración óptima, dado que se pueden establecer un gran número de combinaciones y diferentes materiales, con buenos resultados. Una desventaja de este modelo es que los materiales en su mayoría no son resistentes al fuego, por lo que se hace necesario implementar un proceso de tratamiento químico del material tejido, incrementando así el costo de implementación en una cámara semianecoica.

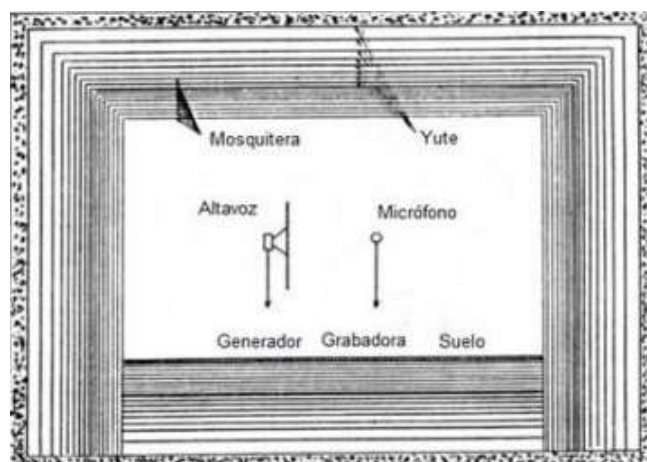


Figura 1.4 Modelo basado en capas (Barrionuevo & Gonzalez, 2012)

1.4.7.2 Modelo basado en cuñas

El principal elemento de una cámara semianecoica para la disipación de la energía sonora son las cuñas. Su geometría es un factor influyente dado que incrementa el área de absorción del sonido incidente. El material más utilizado para la fabricación de este elemento es la espuma de poliuretano, con un coeficiente de absorción próximo a 1.

Tabla 1.2 Propiedades de espuma de poliuretano (García Torres, 2017)

Propiedad	Valor
Densidad	40 kg/m ³
Modulo elástico	2,2e+7 7N/m ²
Límite elástico:	2,35e+7N/m ²
Coefficiente de absorción acústica	0,4 – 0,99

Entre los diferentes tipos de cuña se pueden encontrar:

- **Cuña tipo Cremer.** Consiste en un cubo y por su geometría se combina entre los diferentes tamaños y densidades, para lograr la mayor absorción de la energía sonora al interior de la cámara. Usualmente se fabrican en fibra de vidrio.

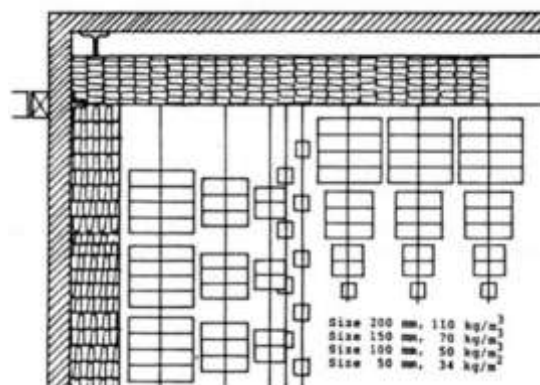


Figura 1.5 Disposición de las cuñas tipo Cremer (Mattia, 2003)

- **Cuña tipo Wedge.** Posee una absorción acústica mayor a la cuña tipo Cremer. El material usual de fabricación es la espuma de poliuretano. Su forma permite una eficiencia absorbente que

depende de la altura de esta. Estas cuñas tienen una altura de fabricación de 0,1 a 3 metros. La Figura 1.6 muestra un modelo de cuña comercial.

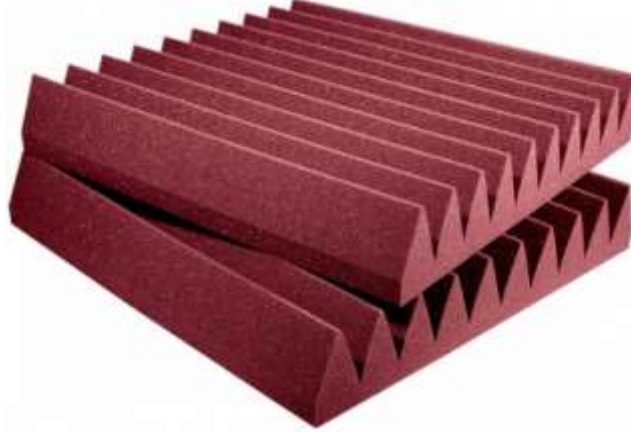


Figura 1.6 Cuña piramidal tipo Wedge (Mas Acoustics, s.f.)

1.4.8 Aislamiento Acústico

Un buen aislamiento es lo más importante para que los ensayos que se realicen se den de la mejor manera, esto se efectúa dependiendo del nivel de ruido existente en el ambiente, por lo que es necesario tener en cuenta los materiales absorbentes.

1.4.8.1 Lana de Roca y de Vidrio

La lana de roca y la lana de vidrio se utilizan como materiales aislantes de recubrimiento. Se aplican en función del uso que se vayan a dar. Ambos materiales consiguen un aislamiento térmico y acústico satisfactorio porque son materiales con alta densidad.

Las opciones de colocación de estos materiales son el insuflado o inyectado en cámara de aire dentro de las paredes o el soplado en grandes espesores. Ambos materiales son incombustibles (Cantitec, 2017). Estas opciones son eficientes al momento del aislamiento acústico y térmico.

Tabla 1.3 Características generales de la lana de roca y de vidrio

Características	Lana de Roca	Fibra de Vidrio
Densidad (Kg/m ³)	60 (espesor 50 mm)	48 (espesor 25 mm)
	12 (espesor 38 mm)	12 (espesor 38 mm)
Euroclase	A1	A1
Resistencia a la humedad	No posee propiedades hidrófugas	Resistente al agua, evita aparición de hongos

La Euroclase es una clasificación de los materiales y la resistencia que tienen al fuego, según la norma UNE-EN 13501, siendo A1 una clase no combustible, no tiene reacción al fuego. La densidad y espesor de la lana de roca y fibra de vidrio dependerán del proveedor, por lo que es un dato muy variado.

1.4.8.2 Paredes

La absorción y el aislamiento se deben tomar en consideración en el momento de diseñar paredes. El aislamiento acústico de una pared se puede medir en función de la unidad STC (Clase de Transmisión Sonido), o R_w , según el sistema de unidades. Permite conocer la eficacia de la utilización de un tabique, por lo que es una forma de calidad. La forma de medición del STC, es mediante la utilización de dos cámaras, se tiene ruido en una cámara y se toma lectura en otra. La reducción de decibelios es el STC y se cataloga según el rango medido.

Tabla 1.4 Niveles de aislamiento del STC (Tolliver, 2012)

STC (dBA)	Sonidos que se pueden escuchar.	Grado de Control
15-25	Voz Normal.	Malo
25-35	Discurso en Voz Alta.	Regular
35-45	Discurso en Voz Alta, audible e ininteligible.	Bueno

45-55	Sonidos fuertes como instrumentos musicales se escuchan débilmente.	Muy Bueno
55-más	Insonorización Superior, inaudible	Excelente

1.4.8.3 Pared Simple

Para paredes simples el aislamiento acústico aumentará si se aumenta la masa superficial, es decir si la pared es más densa (ISOVER).

La ley de masas es un indicador para el análisis del aislamiento acústico. Solo funciona en un rango de frecuencias, para tener un mayor entendimiento se utiliza la frecuencia natural f_0 y la frecuencia crítica f_c . El valor de la frecuencia se lo puede encontrar tabulados en gráficas como se muestra en la Figura 1.7, teniendo el valor de la masa por unidad de superficie y el material a utilizar.

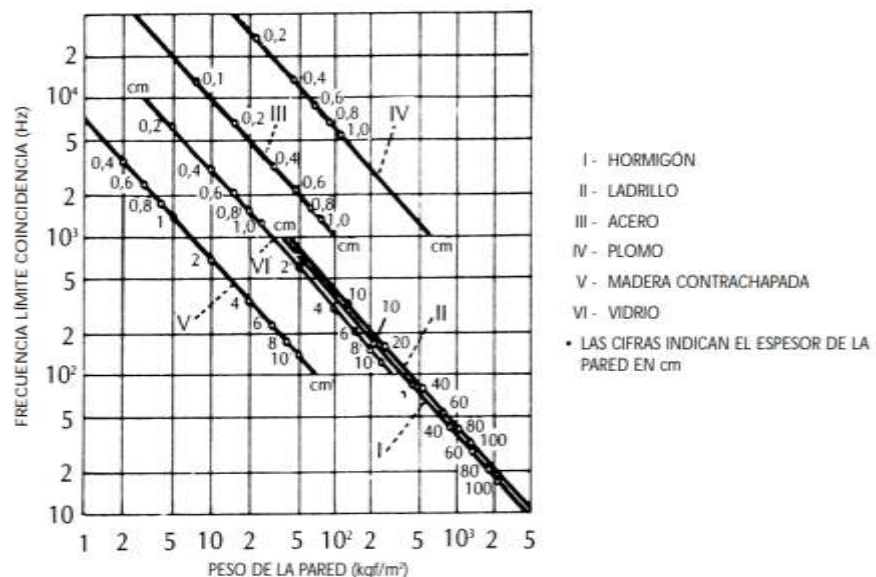


Figura 1.7 Masa por unidad de área de materiales habituales (ISOVER, 2000)

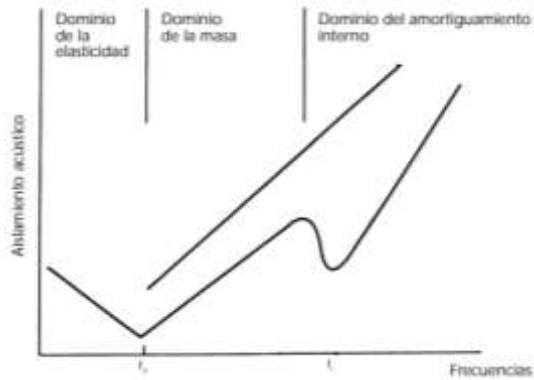


Figura 1.8 Aislamiento Acústico de una pared Simple (ISOVER, 2000)

En la Figura 1.8, si $f < f_0$, la frecuencia es muy baja, con un aislamiento casi nulo. Si la frecuencia está entre f_0 y f_c , se encuentra entre la zona de dominio de masa, se rige mediante Ecuación 1.9.

$$R = 20 \log(M \cdot f) - 47 \quad (1.9)$$

Donde:

R: aislamiento de pared simple por ley de masas [dB]

M: Masa por unidad de área [Kg/m^2]

f: es frecuencia en [Hz]

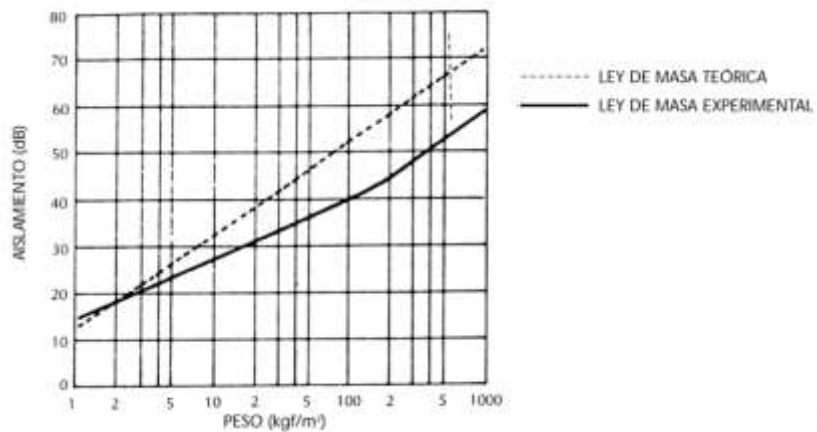


Figura 1.9 Masa superficial y aislamiento (ISOVER, 2000)

En general, mientras mayor sea la masa superficial, mayor será el aislamiento tal como se muestra en la Figura 1.9. Para los muros externos las paredes que se utilizan son de concreto, teniendo un espesor mayor de 80 cm.

1.4.8.4 Pared doble

Al dividir una pared simple en dos y colocar un material absorbente en medio se puede conseguir un mayor aislamiento acústico, tomando en consideración la misma masa por unidad de área en las paredes. Cuando una onda entra en incidencia con la primera pared estará en movimiento y al encontrarse luego con el material entre ambas paredes disipa energía sonora, llegando con menor energía a la segunda pared. Al usar este tipo de paredes se producirá la resonancia. Lo que se busca es encontrar los niveles más bajos de frecuencia de resonancia posible y se emplea la Ecuación 1.10.

$$f_r = 60 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (1.10)$$

Donde:

f_r : Frecuencia de resonancia [Hz]

d: Distancia de ambas paredes [m].

m_1, m_2 : masa por unidad de superficie de las paredes en [Kg/m^2]

Al usar paredes dobles, se analiza que no tengan el mismo espesor, para evitar el efecto de la frecuencia crítica. Además, al diseñar paredes con diferentes materiales, uno de ellos puede ser más blando que el otro, por lo tanto, la frecuencia crítica será elevada, haciendo que no tenga repercusiones negativas al respecto.

Al usar estos tipos de paredes se aumenta en gran medida el aislamiento y para aprovechar en mayor medida las paredes dobles se debe colocar un material absorbente acústico, con esto se mejorará el aislamiento global.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Se efectuó el diseño de la cámara semianecoica. Además, se realizó mediciones y ensayos acústicos en condiciones de campo libre, cumpliendo con normativas nacionales e internacionales. En la Figura 2.1 se muestra la metodología utilizada para el desarrollo de la solución a la problemática.

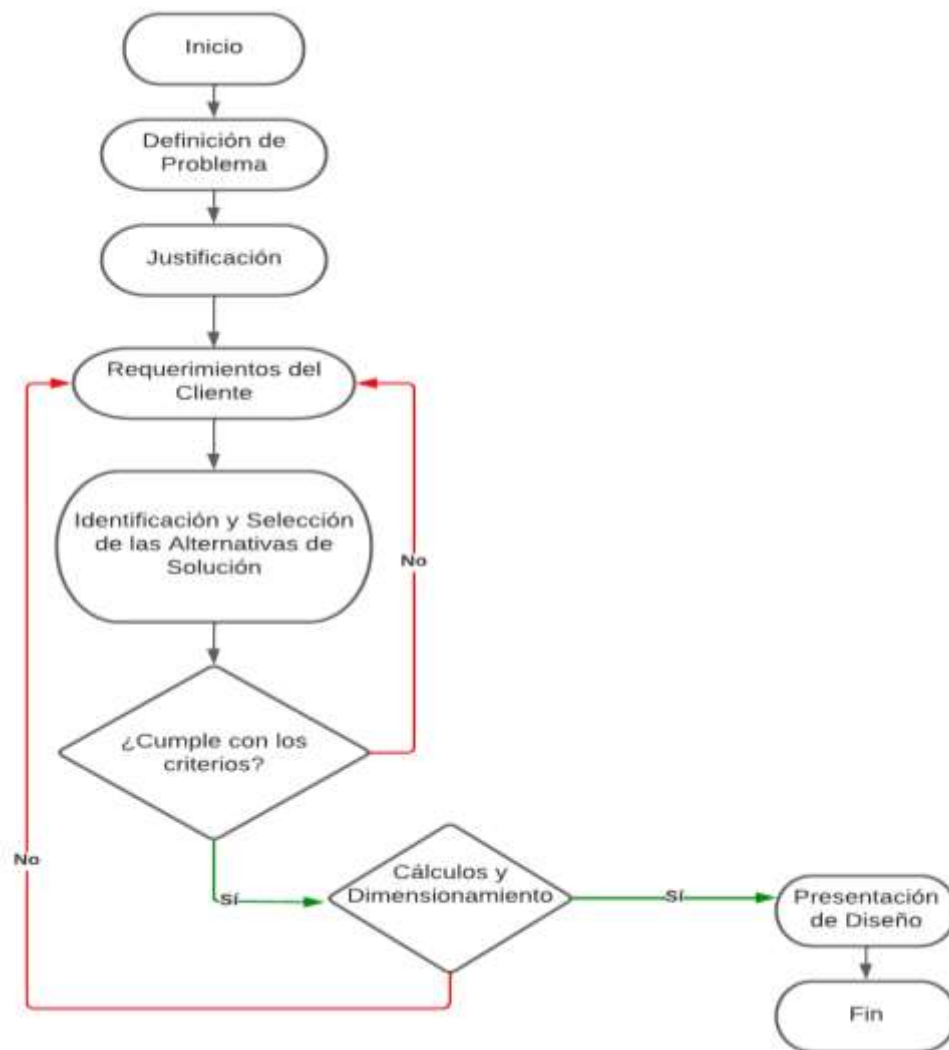


Figura 2.1 Metodología para el desarrollo de la cámara semi anecoica (Autoría Propia)

La finalidad del proyecto es diseñar un laboratorio que permita realizar ensayos acústicos y de calibración de equipos de medición acústica. Las cámaras se diseñaron para probar dispositivos en entornos reales, ayudando a controlar el nivel

de ruido. Para el correcto diseño de la cámara semianecoica, se estableció los requerimientos tanto del espacio físico disponible como los establecidos en las normas internacionales y locales. A partir de lo antes mencionado, se plantean alternativas de solución que se desempeñan de forma eficiente. Esto incluyó la correcta selección de materiales aislantes y absorbentes y el diseño del sistema de climatización, entre otros aspectos, como la obra civil. A continuación, se evaluó la alternativa más conveniente y su cumplimiento de los requerimientos.

En caso afirmativo, se procedió con el diseño de la cámara. Para ello se consideró principios físicos, cálculos matemáticos y dimensionamiento. De existir alguna discrepancia en los resultados, se reevalúa los parámetros de diseño que conllevan su cumplimiento. Finalmente, el proceso concluyó con el modelado tridimensional de la solución y un análisis de costos. Esto se hizo para que en un futuro se pueda implementar de forma física.

2.1 Parámetros del diseño

Los parámetros para el diseño de la cámara semianecoica están dados por la normativa ISO 3745, y por los requerimientos del cliente.

2.1.1 Especificaciones del diseño

La normativa ISO 3745 plantea determinadas características básicas que debe cumplir una cámara semianecoica, son:

- El volumen de la sala de pruebas debe ser al menos 200 veces mayor el volumen de la fuente sonora.
- El coeficiente de absorción del tratamiento de techos y paredes debe ser igual o superior a 0,99 en el rango de la frecuencia de interés.
- La profundidad del tratamiento de techos y paredes debe ser mayor a $\lambda/4$, donde λ es la longitud de onda de la frecuencia central de la banda de frecuencia más baja de interés.
- El plano reflectante (piso) deberá poseer un coeficiente de absorción acústica inferior a 0,06 en las frecuencias de interés.
- Frecuencia de corte 100 Hz.

2.1.2 Requerimientos del diseño del cliente

- Cámara climatizada, con temperatura entre 15 °C a 30 °C.
- Laboratorio acústico para calibración de equipos de medición acústica, realizar ensayos acústicos en paneles, entre otros.
- Laboratorio que cumpla con estándares internacionales.

2.2 Diseño de la cámara semianecoica

El diseño de la cámara semianecoica incluyó además del dimensionamiento, el sistema de climatización y la distribución de las luminarias, cumpliendo estándares y normativas en el área de la acústica.

2.2.1 Dimensionamiento de la cámara

La normativa ISO 3745 recomienda que, para las mediciones de una fuente sonora, el volumen de la sala de pruebas sea al menos 200 veces el volumen de la fuente, y el nivel de la presión sonora se mida comenzando a 0,5 m del centro acústico de la fuente hasta la distancia que se desea evaluar. Se debe establecer al menos 10 puntos de medición a lo largo de la trayectoria del micrófono, a una distancia no mayor a 0,1 m entre puntos, dando como resultado una distancia mínima de 1,4 m.

Los elementos de absorción siendo la cuña y el espacio de aire deben superar $\lambda/4$, donde λ es la longitud de onda de la frecuencia de interés. Con los lineamientos antes mencionados, se plantearon las Ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 para establecer las dimensiones mínimas de la cámara.

$$L = \left(\frac{\lambda}{4} \times 2\right) + l + (1,4 \times 2) \quad (2.1)$$

$$W = \left(\frac{\lambda}{4} \times 2\right) + w + (1,4 \times 2) \quad (2.2)$$

$$H = \frac{\lambda}{4} + h + 1,4 \quad (2.3)$$

Donde:

L, W, H: longitud mínima, ancho mínimo y altura mínima [m]

λ : longitud de onda de la frecuencia de corte [m]

l, w, h : largo, ancho y altura máxima del objeto de prueba respectivamente [m].

2.2.2 Dimensionamiento de la cuña

El diseño de la cuña se encuentra directamente relacionado con la longitud de onda de la frecuencia de corte de la cámara semianecoica.

El dimensionamiento de la cuña se observa en la Figura 2.2, donde la distancia D corresponde a $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de la frecuencia de corte y el ángulo θ se recomienda sea alrededor de 30° (Beranek & Sleeper, 1946). Para las dimensiones de la base se utilizó una longitud de 400 milímetros por lado, que es una medida empleada en las cuñas comerciales.

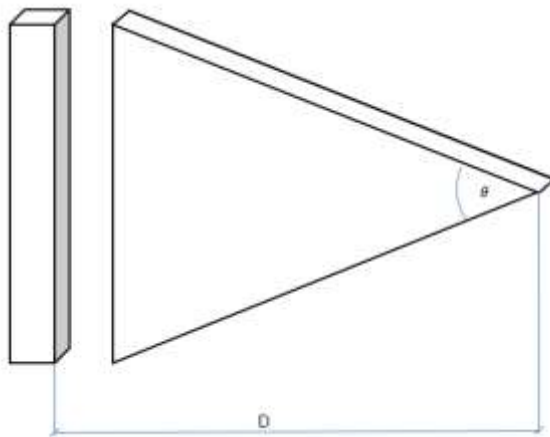


Figura 2.2 Dimensionamiento de cuña (Autoría Propia)

Luego de dimensionar el elemento absorbente, las dimensiones útiles de la cámara corresponden a las Ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6.

$$L' = L - 2D \quad (2.4)$$

$$W' = W - 2D \quad (2.5)$$

$$H' = H - D \quad (2.6)$$

Donde:

L', W', H' : longitud, ancho y altura útiles de la cámara respectivamente en [m]

L, W, H: longitud, ancho y altura mínima de la cámara respectivamente en [m]

D: longitud del espacio de aire y la altura de la cuña en [m]

La Figura 2.3 muestra la vista frontal de la cámara semianecoica especificando las distancias descritas.

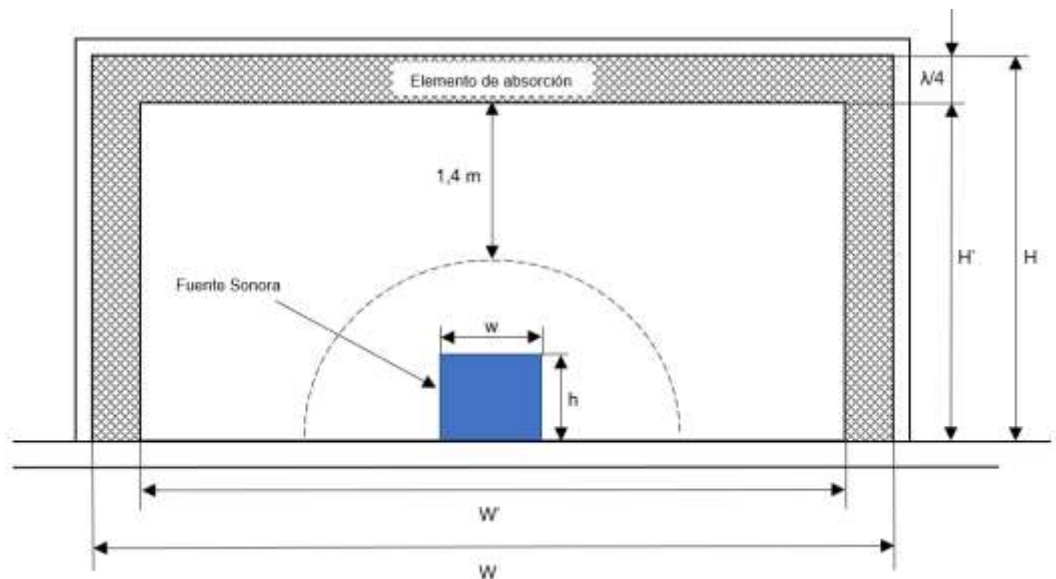


Figura 2.3. Esquema de dimensiones mínimas de la cámara semianecoica.

2.2.3 Sistema de climatización

En el diseño se climatizó la cámara a la temperatura indicada en la norma ISO 3745, dentro del rango entre 15 °C a 30 °C. Además, se siguió las sugerencias básicas de la empresa McQuay en su guía de aplicación (McQuay International, 2004). Los puntos más significativos fueron:

- Que la ruta de los ductos debe ser la más directa.
- Evitar cambios de dirección bruscos.
- Ubicar material absorbente en el sistema de ductos.

Las vibraciones que se producen en los sistemas climatización pueden llevar la turbulencia del flujo de aire y las vibraciones hasta el interior de edificaciones. Las herramientas más comunes que se utilizan para minimizar la transferencia de vibraciones de las unidades de climatización a la estructura del edificio son los resortes y las almohadillas (Rossing,

2007). Las Figura 2.4 y 2.5 muestran los métodos para reducir la transferencia de vibraciones de los equipos y el ruido entre la tubería y el piso respectivamente. El primero consiste en colocar un resorte que funciona como amortiguador y el segundo emplea almohadillas de neopreno como el elemento absorbente en las uniones y conexiones. También se puede emplear las almohadillas de neopreno para la sujeción de un equipo al piso, colocándolas entre la base del equipo y el piso.

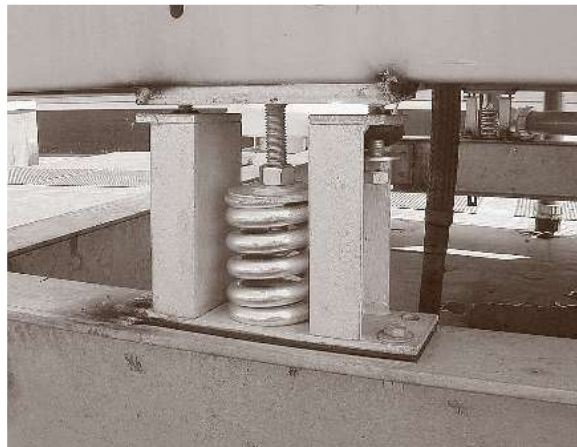


Figura 2.4 Aislador de resorte (Rossing, 2007)

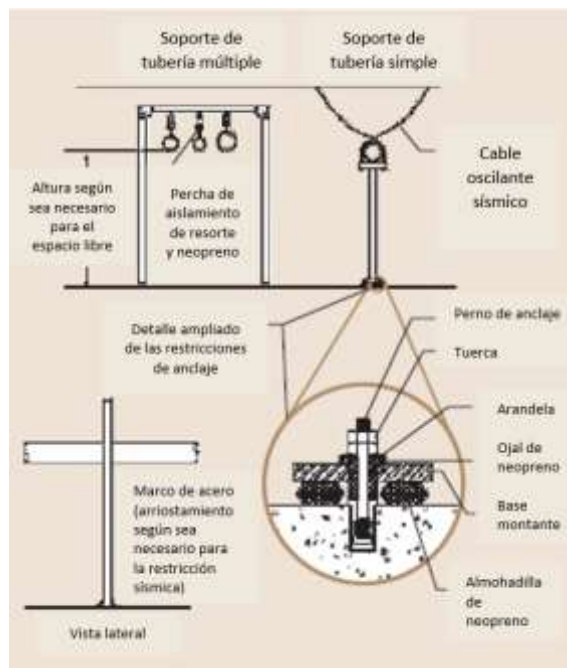


Figura 2.5 Soporte de tuberías con almohadillas de neopreno. (Rossing, 2007)

2.2.3.1 Caudal de aire

Para el dimensionamiento del sistema de climatización la norma ISO 3745 establece un criterio de temperatura dentro del rango de 15°C a 30°C, que garantiza un sesgo menor a 0,2 dB en el cálculo del nivel de potencia sonora. Este rango de temperatura en el aire permite una corrección máxima por humedad de aproximadamente 0,04 dB, y puede despreciarse según indica la normativa. La cantidad de volumen de aire a suministrar se calculó con la Ecuación 2.7 que incluye un parámetro denominado número de renovaciones por hora, y según la Norma DIN 1946 recomienda para espacios de este tipo, de 3 a 6 renovaciones por hora.

$$Q = V_T \cdot \text{número de renovaciones por hora} \quad (2.7)$$

Donde:

Q: caudal de aire en [m³/h]

V_T: volumen total de la cámara en [m³]

2.2.3.2 Velocidad de aire

En sistemas de ventilación, las altas velocidades en los conductos requieren de más potencia lo que significa mayor ruido. Sin embargo, los requerimientos de diseño de la cámara semianecoica deben emplear bajas velocidades para propiciar un flujo de aire más silencioso

Tabla 2.1 Velocidades típicas en ductos. (Trott & Welch, 2000)

Sistema	Velocidad [m/s]
Sistema de alta velocidad, ductos principales	20
Sistema de alta velocidad, ductos ramales	15
Sistema de baja velocidad, ductos principales	10
Sistema de baja velocidad, ductos ramales	6
Conductos en áreas silenciosas	3 - 4

2.2.3.3 Diseño de ductos

El objetivo del sistema de conductos y rejillas fue distribuir el aire más frío y mezclarlo con el aire de la habitación, por lo que se ubicaron rejillas de suministro en la parte baja de las paredes y la rejilla de extracción en la parte superior de estas. La distribución permitirá el ingreso del aire frío atravesando la habitación y al calentarse, éste suba. No obstante, el diseño incluyó una velocidad de aire suficiente para establecer una circulación forzada hasta las rejillas de extracción en la parte superior. (Trott & Welch, 2000).

Para el cálculo del tamaño del ducto se empleó el método de pérdida de carga constante, que considera la pérdida de carga por unidad de longitud en todo sistema constante. (ASHRAE, 2021)

El método empleado aplica el parámetro de longitud equivalente L_{eq} . Siendo la longitud modificada que considera accesorios y curvas, entre otros elementos propios del sistema como un valor que incluye las pérdidas. Es común tomar dicha longitud al tramo recto, incrementado en un 50% como se muestra en la Ecuación 2.8.

$$L_{eq} = 1,5 L \quad (2.8)$$

Donde:

L_{eq} : longitud equivalente en [m]

L: longitud del tramo recto en [m]

El autor Huebscher establece la relación entre los conductos rectangulares y circulares para determinar el diámetro equivalente, (Ecuación 2.9) (Huebscher, 1948), siendo la base de la Tabla B1 adjunta en la sección de Anexos.

$$D_e = \frac{1,30 (ab)^{0,625}}{(a+b)^{0,25}} \quad (2.9)$$

Donde:

D_e : diámetro circular equivalente de un conducto rectangular en [mm]

a: longitud de un lado del conducto en [mm]

b: longitud del lado adyacente del conducto en [mm]

El cálculo de las dimensiones del conducto se debe conocer el caudal y la velocidad del aire. Ver ecuación 2.10.

$$Q = v \cdot S \quad (2.10)$$

Donde:

Q: caudal de aire en [m³/s]

v: velocidad del aire en el conducto en [m/s]

S: área de la sección transversal del conducto en [m²]

2.2.3.4 Potencia sonora de ventiladores

Los sistemas de climatización se componen de elementos que generan sonidos que se pueden transmitir a los lugares adyacentes por distintos medios. Los ventiladores son elementos que transmiten ruidos por medio de los ductos y llegan a afectar las actividades en las habitaciones donde alcanza el flujo de aire.

Los ventiladores centrífugos con alabes son los más empleados en este tipo de aplicaciones. Mediante la Ecuación 2.11 se estima la potencia acústica de los ventiladores (Orces Pareja, 2023).

$$L_w = L_{w1} + 10 \cdot \log Q + 20 \cdot \log p \quad (2.11)$$

Donde:

L_w: potencia sonora en [dB]

L_{w1}: nivel de potencia específica en [dB]

Q: caudal en [m³/s]

p: presión total en [kPa]

Otras variables como la frecuencia de paso de álabes y la eficiencia estática del ventilador (Ecuaciones 2.12 y 2.13 respectivamente) se requieren calcular para obtener el nivel de potencia sonora del ventilador (Orces Pareja, 2023)

$$f_B = n \cdot N \quad (2.12)$$

Donde:

f_B : frecuencia de paso de álabe en [Hz]

n: revoluciones por segundo en [rps]

N: número de álabes

$$\eta = \frac{Q \cdot p}{P_{ent}} \quad (2.13)$$

Donde:

η : eficiencia estática del ventilador [adimensional]

Q: caudal en [m³/s]

p: presión total en [kPa]

P_{ent} : potencia en el eje del ventilador en [kW]

2.2.4 Sistema de iluminación

Dadas las características que posee una cámara semianecoica, la iluminación es otro parámetro importante. Este se debe caracterizar por su alta luminiscencia y poca emisión de calor. La iluminación se distribuyó de tal manera, con el fin de evitar cambios bruscos en los niveles de iluminación del área de trabajo. Los requerimientos mínimos de iluminación para ensayos de laboratorio en cámaras anecoicas y semianecoicas fueron de 500 lux (Laborda Grima, Recalde Ruiz, Tolsa Martínez, m, & Marqués Giménez , s.f.) y 300 lux para salas de estudio y laboratorios de edificios educativos (INEN, 2004).

Para el diseño del sistema de iluminación se empleó el método de cálculo de los lúmenes. Dicho método fue práctico y sencillo para hallar el nivel de iluminación de un área determinada y descrito en el Manual del alumbrado de Westinghouse, que considera cuatro aspectos importantes: nivel de iluminación requerido, coeficiente de utilización, coeficiente de mantenimiento y el número de luminarias requeridas (Westinghouse Electric Corporation, 2000).

Se calculó el flujo luminoso total necesario, es decir, cuanta luz requiere la habitación mediante la Ecuación 2.14.

$$\Phi_T = \frac{E_m \cdot S}{C_u \cdot C_m} \quad (2.14)$$

Donde:

Φ_T : flujo luminoso total en [lm]

E_m : nivel de iluminación medio en [lux]

S : superficie para iluminar en [m²]

C_u : coeficiente de utilización [adimensional]

C_m : coeficiente de mantenimiento [adimensional]

El coeficiente de utilización es un factor que toma en cuenta las dimensiones del local, las reflectancias de las paredes, techo y suelo de la habitación. Con la Ecuación 2.15 se calculó el índice local K que involucró las dimensiones de la habitación.

$$K = \frac{5H(a+b)}{ab} \quad (2.15)$$

Donde:

K: Índice local [adimensional]

H: altura del local en [m]

a: ancho del local en [m]

b: largo del local en [m]

La cámara semianecoica incluyó en el diseño paredes y techo con cuñas acústicas de espuma de poliuretano, por consiguiente el coeficiente de reflexión es de 0,31 (Wang, Liu, Dong, & Zuo, 2021), y el suelo reflectante de concreto tiene un coeficiente de reflexión de 0,35 (Koppel, et al., 2017). Por medio de la Tabla B3 provista por el fabricante de las luminarias, adjunta en la sección de Anexos, se determina el coeficiente de utilización interpolando los datos.

El coeficiente de mantenimiento se ve influenciado por factores como el envejecimiento de las lámparas, la acumulación de suciedad o al tipo de ambiente. En este caso el coeficiente utilizado es de 0,8 en un ambiente limpio como el previsto en este diseño (Westinghouse Electric Corporation, 2000).

Con el parámetro de flujo luminoso total se calculó el número de luminarias mediante la Ecuación 2.1.6

$$NL = \frac{\Phi_T}{\Phi_L} \quad (2.16)$$

Donde:

NL: número de luminarias

Φ_T : flujo luminoso total en [lm]

Φ_L : flujo luminoso de una lámpara en [lm]

La distribución de luminarias a lo ancho de la cámara se establece a partir del uso de la ecuación 2.17 y a lo largo de la cámara se determina a partir de la Ecuación 2.18.

$$NL_{ancho} = \sqrt{\frac{NL \cdot a}{b}} \quad (2.17)$$

Donde:

NL_{ancho} : número de luminarias a lo ancho

NL: número de luminarias

a: ancho del local [m]

b: largo del local [m]

$$NL_{largo} = NL_{ancho} \cdot \frac{b}{a} \quad (2.18)$$

Donde:

NL_{largo} : número de luminarias a lo largo

NL_{ancho} : número de luminarias a lo ancho

a: ancho del local [m]

b: largo del local [m]

2.3 Puerta

La puerta seleccionada para el diseño fue una puerta acústica especial, con certificación cortafuego y rellena de lana de roca de 60 Kg/m². Posee marco perimetral y cierre hermético.

2.4 Techo

El techo seleccionado fue gypsum, debido a su facilidad de empleo y de instalación, teniendo un tiempo estimado de 2 horas, y una larga vida útil, dicho material viene recubierto con fibra de vidrio.

2.5 Diseño de forma

Luego de establecer los requisitos de diseño y los parámetros que establecen las normativas de acondicionamiento acústico, se presenta en la tabla 2.2 los factores de influencia más relevantes que sirvieron como punto de partida para el planteamiento de alternativas de la cámara semianecoica en combinación con los materiales insonorizantes.

Tabla 2.2 Factores de influencia y su descripción

Factor de influencia	Descripción
Vida útil	Tiempo de vida de la cámara y sus componentes.
Disponibilidad de materiales	Adquisición de materiales que cumplan con los requisitos mínimos establecidos en las diferentes normativas.
Espacio útil	Capacidad de realizar ensayos de equipos, instrumentos y/o materiales en distintas geometrías y tamaños.
Mantenimiento	Adquisición y reemplazo de componentes de climatización, eléctricos y/o insonorización.
Costo	Debe incurrir en menos gastos en su implementación en comparación con las demás alternativas.
Eficiencia	La operatividad de los sistemas debe consumir la menor cantidad de recursos.

2.6 Matriz de decisión

Para seleccionar la alternativa más viable requirió establecer una ponderación que indique el grado de importancia para cada factor de influencia. Cada factor de influencia se le asignó un valor de importancia en comparación, y la escala se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Escala de Importancia

Valor	1	2	3	4	5
Detalle	Nada importante en comparación	Poco Importante en comparación	Igual de importante	Importante en comparación	Muy importante en comparación

La Tabla 2.4 muestra el peso relativo de la comparación por pares de los factores de influencia

Tabla 2.4 Comparación por pares de los factores de influencia.

	Vida útil	Disponibilidad de materiales	Espacio útil	Mantenimiento	Costo	Eficiencia	Total fila	Peso relativo
Vida útil	3	5	2	2	4	3	19	20,9
Disponibilidad de materiales	4	3	2	2	4	3	18	19,7
Espacio útil	1	1	3	1	1	1	8	8,8
Mantenimiento	3	2	1	3	3	3	15	16,5
Costo	4	3	1	3	3	1	15	16,5
Eficiencia	5	3	1	3	1	3	16	17,6
Total							91	100,0

En la Tabla 2.4 se puede observar el alcance que tiene una cámara semianecoica tanto para pruebas de materiales y estudios de nivel acústico, lograr una extensa vida útil es una prioridad. Seguido en relevancia la disposición de materiales es muy importante. Debido a que se trata de un espacio cerrado y aislado, la eficiencia es el tercer factor de importancia dado que los sistemas medición, climatización e iluminación deben ajustarse a los requerimientos mínimos para los ensayos y pruebas acústicas, a través del empleo de la menor cantidad de recursos energéticos. El mantenimiento y el costo fueron factores de igual importancia debido a que la calidad y durabilidad

de los materiales, deben cumplir los requerimientos de las normativas locales e internacionales. Si bien el espacio útil es una característica importante, posee el menor peso relativo dado que se buscó aprovechar al máximo el espacio.

Para el diseño de forma de la cámara semianecoica se consideraron los siguientes aspectos para la propuesta de la mejor alternativa: modelo de acondicionamiento acústico, tipo de sistema de climatización y eficiencia lumínica. Se empleó una escala del 1 al 3, para representar el valor de la opción, siendo 1 la opción menos importante, 2 medianamente importante y 3 representa la opción más importante. En la Tabla 2.5 se presenta la evaluación de los tipos de acondicionamiento acústico entre el modelo basado en capas que emplea fibras y materiales tejidos para absorción y el modelo basado en cuñas, que emplea formas geométricas fabricadas en polímeros que disipan el ruido incidente.

Tabla 2.5 Matriz de decisión para modelo de acondicionamiento acústico

	Modelo basado en capas		Modelo basado en cuñas	
	Escala	Resultado	Escala	Resultado
Vida útil (20,9%)	2	0,42	2	0,42
Disponibilidad de materiales (19,7%)	3	0,59	3	0,59
Espacio útil (8,8%)	1	0,09	3	0,26
Mantenimiento (16,5%)	2	0,33	2	0,33
Costo (16,5%)	2	0,33	3	0,5
Eficiencia (17,6%)	3	0,53	3	0,53
Total		2,29		2,63

En la tabla 2.6 se evalúa los sistemas de climatización. Los sistemas de expansión directa transportan el refrigerante a las áreas a climatizar con equipos que ocupan poco espacio; los sistemas de climatización por expansión indirecta son sistemas muy versátiles y adaptables donde no hay limitación en distancia, son sistemas silenciosos y se caracterizan por lograr una recuperación térmica total o parcial.

Tabla 2.6 Matriz de decisión para sistema de climatización.

	Por expansión directa		Por expansión indirecta	
	Escala	Resultado	Escala	Resultado
Vida útil (20,9%)	1	0,21	2	0,42
Disponibilidad de materiales (19,7%)	3	0,59	3	0,59
Espacio útil (8,8%)	2	0,18	3	0,26
Mantenimiento (16,5%)	2	0,33	2	0,33
Costo (16,5%)	2	0,33	2	0,33
Eficiencia (17,6%)	3	0,53	3	0,53
Total		2,17		2,46

La iluminación disponible comercialmente pone a disposición las siguientes alternativas: las lámparas incandescentes, donde un filamento se calienta al paso de una corriente eléctrica hasta alcanzar altas temperaturas y emitir radiaciones visibles al ojo humano, de alto consumo energético y una vida de útil aproximada de 1000 horas; las lámparas fluorescentes se componen de un tubo de vidrio y en su interior la luz es generada mediante la excitación de un gas inerte por descarga eléctrica. Su vida útil es hasta 10 veces mayor que la lámpara incandescente. La Tecnología Led emplea diodos que al paso de una corriente emiten luz. Destaca por su bajo consumo energético, diversidad de tamaños según las aplicaciones, baja generación de calor y poco mantenimiento. Su vida útil puede llegar alcanzar las 10000 horas (Feilo Sylvania, 2021). Estas alternativas se evaluaron en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Matriz de decisión para iluminación

	Lámparas incandescentes		Lámparas fluorescentes		Led	
	Escala	Resultado	Escala	Resultado	Escala	Resultado
Vida útil (20,9%)	1	0,21	2	0,42	5	1,05
Disponibilidad de materiales (19,7%)	4	0,70	4	0,79	4	0.79

Espacio útil (8,8%)	2	0,18	3	0,26	3	0,26
Mantenimiento (16,5%)	1	0,17	2	0,34	5	0,83
Costo (16,5%)	5	0,83	5	0,83	3	0,83
Eficiencia (17,6%)	1	0,18	3	0,53	5	0,88
Total		2,27		3,17		4,64

2.7 Características de solución generada

La evaluación de los factores de influencia y las características que deben cumplir los distintos sistemas complementarios para el diseño de la cámara semianecoica que satisfacen los requerimientos del cliente y las especificaciones de diseño, se resumen en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Características de solución

Componente	Tipo
Iluminación	Led
Acondicionamiento acústico	Cuñas
Climatización	Expansión indirecta
Aislamiento acústico	Hormigón Armado y fibra de madera, con relleno de lana de vidrio

2.8 Diseño de forma

La Figura 2.6 proyecta una vista isométrica de la cámara semianecoica, la cámara reverberante y la sala de cómputo.

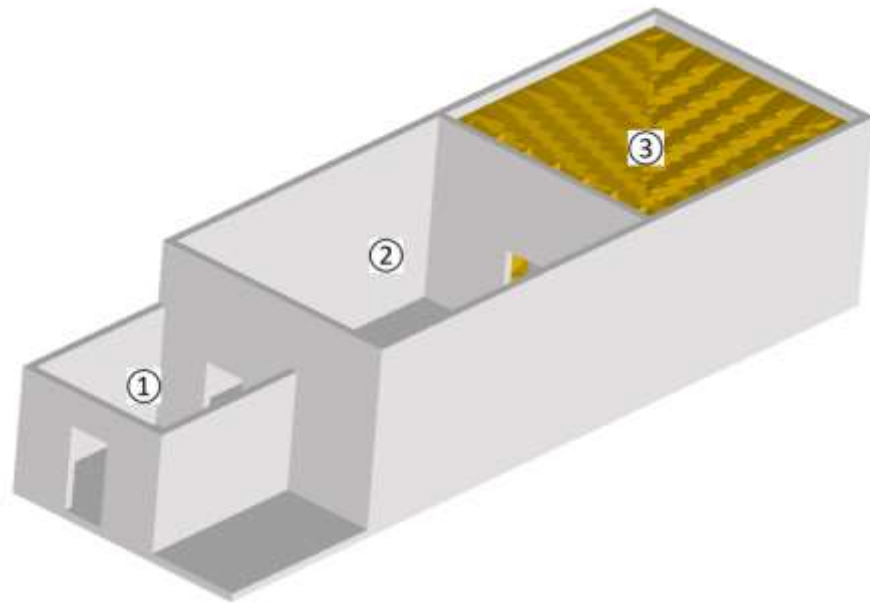


Figura 2.6. Vista isométrica del diseño final. 1. Sala de cómputo, 2. Cámara reverberante, 3. Cámara semianecoica.

CAPÍTULO 3

3. Cálculos y Resultados

A continuación, se presentan los cálculos y los resultados obtenidos en cada uno de los sistemas y componentes que integran el laboratorio acústico provisto de una cámara semianecoica, una cámara reverberante y una sala de cómputo.

3.1 Dimensiones mínimas de la cámara

Comercialmente los fabricantes de cuñas acústicas tienen en sus productos rangos de absorción desde los 100 Hz hasta los 5 KHz. Se seleccionó una frecuencia de corte de 100 Hz, porque las ecuaciones empleadas en el presente documento, a una frecuencia de corte baja resulta en una cámara más grande. Para los cálculos se emplea la velocidad de propagación del sonido en el aire (c) a una temperatura crítica de 30°C .Según la norma para cámara acústicas se determina un valor de 349,61 m/s mediante el uso de la Ecuación 1.1. Continuando con el análisis se determina la longitud de onda utilizando la Ecuación 1.2.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$
$$\lambda = \frac{349,61 \text{ m/s}}{100 \text{ Hz}}$$
$$\lambda = 3,496 \text{ m}$$

Con la longitud de onda se calcularon las dimensiones mínimas de la cámara semianecoica por medio de las Ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3. que corresponden al largo, ancho y altura, respectivamente.

$$L = \frac{\lambda}{2} + l + 2,8$$
$$L = \frac{3,496 \text{ m}}{2} + 2 \text{ m} + 2,8 \text{ m}$$
$$L = 6,548 \text{ m}$$

$$W = \frac{\lambda}{2} + w + 2,8$$

$$W = \frac{3,496 \text{ m}}{2} + 1,2 \text{ m} + 2,8 \text{ m}$$

$$W = 5,748 \text{ m}$$

$$H = \frac{\lambda}{4} + h + 1,4$$

$$H = \frac{3,496 \text{ m}}{2} + 2 \text{ m} + 1,4 \text{ m}$$

$$H = 4,274 \text{ m}$$

Los resultados obtenidos se recopilan en la Tabla 3.1. Los valores l (largo) y w (ancho) utilizados, corresponden a las dimensiones de un panel de gypsum acústico que se comercializa en la industria local y el valor de h (altura) es el mismo valor del largo del panel para obtener el máximo dimensionamiento posible de la cámara.

Tabla 3.1 Resultados de dimensionamiento.

Parámetro	Dimensión [m]
Largo	6,55
Ancho	5,75
Altura	4,27

3.2 Dimensiones de cuña

La longitud D de la cuña mostrada en la Figura 2.5 es igual a $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de la frecuencia de corte, por lo que se obtuvo el siguiente resultado:

$$D = \frac{1}{4} \cdot \lambda$$

$$D = \frac{1}{4} \cdot 3,496 \text{ m}$$

$$D = 0,874 \text{ m}$$

A partir de la Figura 2.5 se calculó el espacio de entre la pared y la base de la cuña, y la altura final de la cuña. El cálculo tomó en cuenta el ángulo de la punta de la cuña igual a 30° y una base cuadrada de 400 mm de lado, tal como se

muestra en la Figura 3.1, y mediante relación trigonométrica se obtienen las variables antes mencionadas.

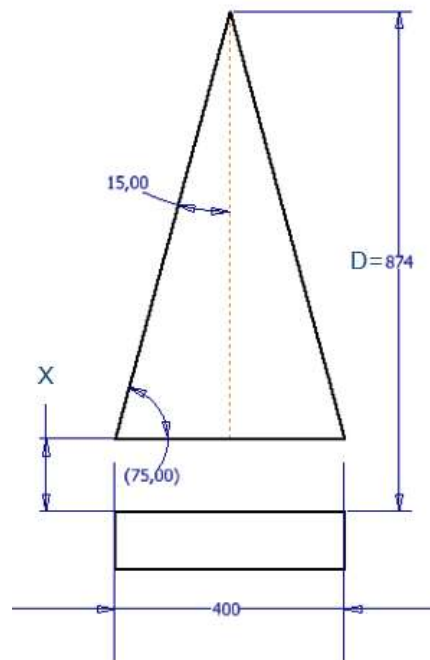


Figura 3.1 Esquema de dimensiones para cuña. Medidas en mm.

El espacio entre la base de la cuña y la pared se calculó mediante la tangente del ángulo como sigue a continuación:

$$\tan 75 = \frac{D - x}{200 \text{ mm}}$$

$$x = D - (200 \cdot \tan 75)$$

$$x = 874 \text{ mm} - (200 \text{ mm} \cdot \tan 75)$$

$$x = 128 \text{ mm}$$

Luego de determinar las distancias, la altura final de la cuña se calculó a partir de la resta del valor x de la variable D, siendo igual a 746 mm. La Figura 3.2 muestra el dimensionamiento final de la cuña y en la Figura 3.3 se presenta la distribución de un conjunto de cuñas para lograr una mejor absorción del sonido en diferentes direcciones.

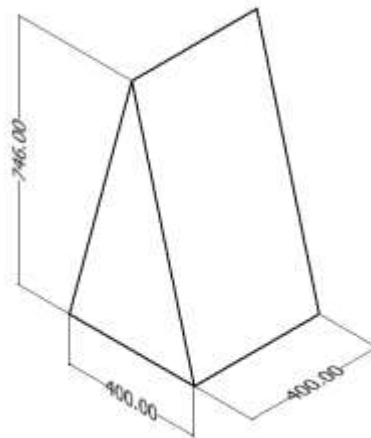


Figura 3.2 Vista isométrica de cuña diseñada. Medidas en mm

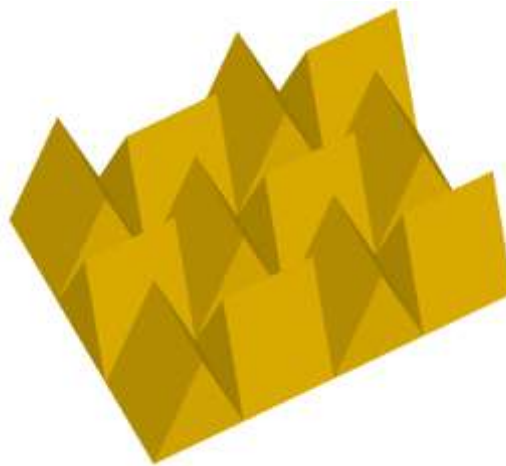


Figura 3.3 Vista isométrica de un conjunto de cuñas

Las dimensiones mínimas totales incluyen el material absorbente calculado previamente. La distancia entre las puntas de la cuña se calculó a partir de las ecuaciones posteriormente descritas cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.2.

$$L' = L - 2D = 6,55 \text{ m} - (2 \times 0,874 \text{ m}) = 4,80 \text{ m}$$

$$W' = W - 2D = 5,75 \text{ m} - (2 \times 0,874 \text{ m}) = 4,00 \text{ m}$$

$$H' = H - D = 4,27 \text{ m} - 0,874 \text{ m} = 3,40 \text{ m}$$

Tabla 3.2 Dimensiones útiles de la cámara semianecoica

Parámetro	Dimensión [m]
Largo	4,80
Ancho	4,00
Altura	3,40

Los criterios para dimensionamiento de la cámara reverberante se adjuntan en el Anexo A. Los resultados del dimensionamiento se muestran en la Figura 3.4.

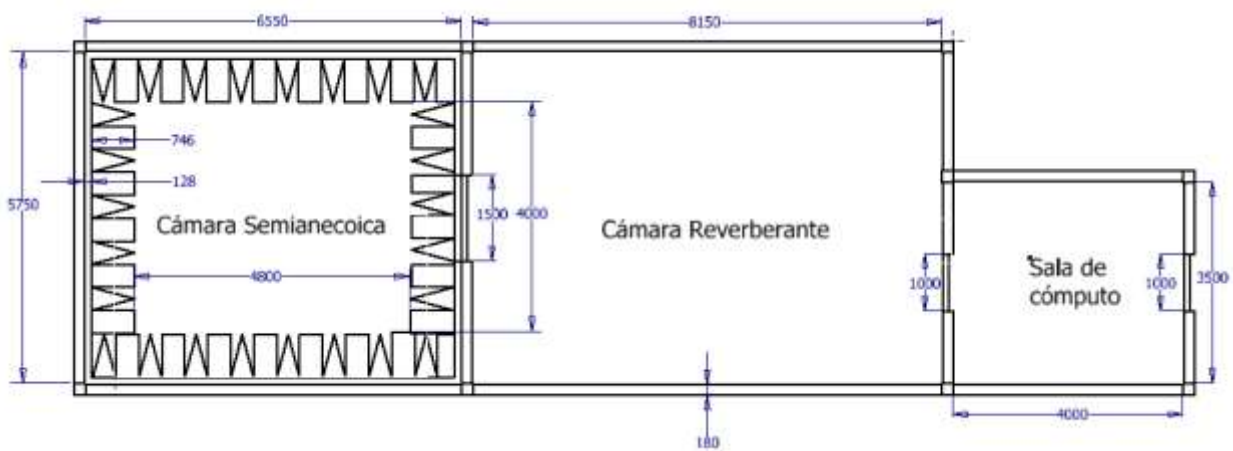


Figura 3.4 Vista superior de la distribución de espacio.

3.3 Aislamiento Acústico

Se utilizó el software DBKAisla para el cálculo del aislamiento acústico. Este software se especializa en ruidos y vibraciones, además, realiza cálculos de aislamiento en paredes simples y dobles utilizando la ley de masas corregida, siguiendo la norma ISO 12354 de transmisiones laterales.

En el análisis se utilizó paredes dobles, considerado un sistema masa-resorte-masa. Los costos de fabricación de una pared doble son inferiores que si se emplea una pared simple. La pared doble consta de una pared de hormigón armado con un enlucido de 15 mm en el interior y exterior, y un relleno de fibra de vidrio con 4 cm de espesor entre la base de madera aglomerada y la fibra de madera que tiene una densidad de 252 Kg/m^3 y una masa por unidad de área de 50.4 Kg/m^2 .

El uso del hormigón armado es indispensable por su alta densidad de 2400 Kg/m^3 , comparado con otros materiales como el yeso, también empleado en acústica. Debido a que se requiere un aislamiento máximo de 88.9 dBA, valor que se registró en un día de alta concurrencia de tráfico vehicular y ruido adyacente de maquinaria industrial, el empleo de hormigón fue fundamental. La masa superficial del hormigón armado es de 1010.4 Kg/m^2 , con un amortiguamiento de 0.08. Al utilizar una pared doble y con las características mencionadas, se logró el aislamiento acústico, debido a que el espacio entre la pared de concreto y el acondicionamiento acústico de las cuñas se relleno con fibra de vidrio. Al ser un material aislante y dadas sus características como porosidad uniforme, densidad de 48 Kg/m^3 , espesor de 4 cm y una resistencia al flujo de aire longitudinal de $9 \text{ KPa} \cdot \text{s/m}^2$ fue el material propicio para aislar la cámara del ruido exterior.

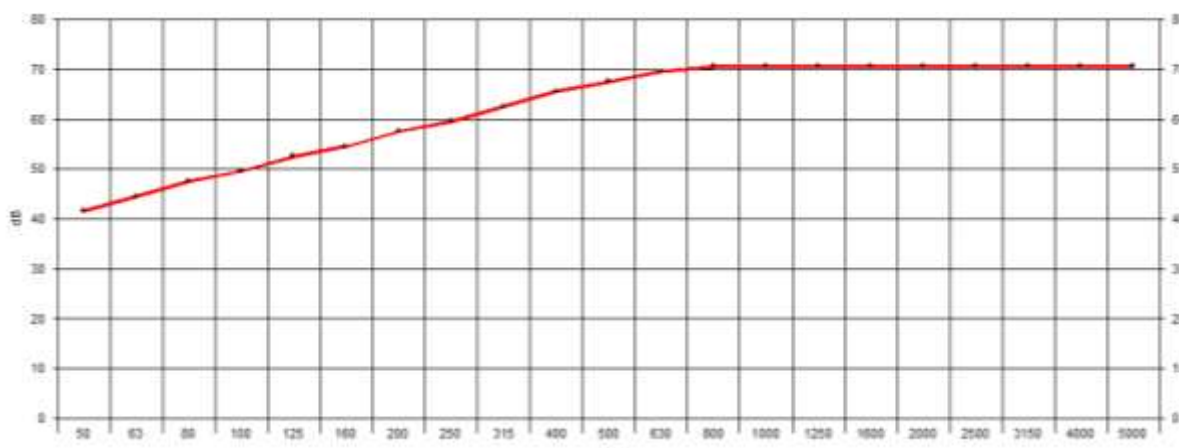


Figura 3.5 Pérdida de Transmisión de pared doble (Software DBKAisla).

La Figura 3.5 denota el aislamiento de la pared doble de hormigón, fibra de vidrio y fibra de madera, en valores de tercios de octavas. A medida que la frecuencia sea más grande, más lo será los decibeles. Lo más importante de la gráfica y los datos es la clasificación de transmisión sonora STC, o en este caso R_w , como se explica en el capítulo 1, es una medida de la eficacia de la utilización de sistemas de paredes y el material que se utiliza, en este caso de un sistema de paredes dobles, utilizando hormigón armado, fibra de vidrio y relleno de lana de roca. El R_w del sistema es de 70 dBA, esto garantiza el buen aislamiento de la cámara, debido a que según la normativa ISO 10140-2 y la norma ISO 10140-3, se debe de tener un máximo de 20 dBA dentro de la

cámara para poder realizar los diferentes ensayos acústicos con éxito. Al tener un nivel de ruido máximo de 88.9 dBA en los exteriores de la facultad en un día de gran movimiento, se tiene que al restar los 70 dBA da un valor de 18.9 dB, que cumplirá con los parámetros mínimos de diseño, a su vez este número de R_w , cumple con los ensayos realizados del nivel de aislamiento, señalado en la Tabla 1.4. La Figura 3.6 muestra el corte transversal de la pared especificando en detalle los materiales empleados para el aislamiento acústico.

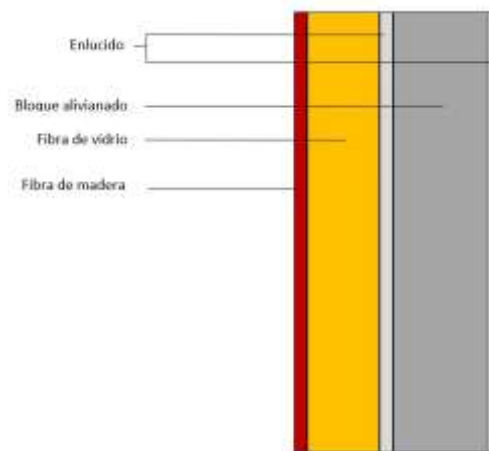


Figura 3.6 Corte transversal de pared.

A continuación, se establece la frecuencia de resonancia.

$$f_r = 60 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)}$$

$$f_r = 60 \sqrt{\frac{1}{0.4} \left(\frac{1}{1010.4} + \frac{1}{50.4} \right)} = 13.69 \text{ Hz}$$

3.3.1 Tiempo de Reverberación

La absorción acústica de los diferentes materiales se rige bajo la normativa ASTM C423. Según la norma ISO 3382, el tiempo de reverberación son los segundos que tarda el sonido en disminuir su nivel de ruido en 60 dBA. La absorción acústica de los diferentes materiales y el aislamiento es importante para garantizar tiempo de

Reverberación menor. Para encontrar el tiempo de reverberación de la cámara se tiene que seguir la ecuación de Sabine antes mencionada.

$$TR = \frac{0.161V}{A}$$

$$V = (4.8)(4)(3.40)$$

$$V = 65.28 \text{ m}^3$$

$$A = \sum (\alpha_i \cdot S_i)$$

Tabla 3.3 Coeficiente de absorción de materiales

Material u objeto	Coeficiente de absorción α_i
Fibra de madera	0.55
Fibra de vidrio (48 kg/m ³)	0.854
Hormigón armado	0.03
Puerta (rellena de lana de roca de 60 kg/m ²)	0.656
Suelo	0.01
Placa de Gypsum con fibra de vidrio	0.884

Pared sin puerta:

$$A = 3(16,32)(\alpha_{\text{Fibra de madera}} + \alpha_{\text{Fibra de vidrio}} + \alpha_{\text{Hormigón}})$$

$$A = 3(16,32)(0.55 + 0.854 + 0.08) = 70.209 \text{ m}^2$$

Pared con puerta:

$$A = (16,32 - 1.5(2))(0.55 + 0.854 + 0.03)$$

$$A = 19.50 \text{ m}^2$$

Techo:

$$A = 16.32(0.884) = 14.43 \text{ m}^2$$

Suelo:

$$A = 16.32(0.01) = 0.1632 \text{ m}^2$$

Puerta:

$$A = 16.32(0.656) = 10.7059 \text{ m}^2$$

$$A = \sum (\alpha_i \cdot S_i) = 115.008 \text{ m}^2$$

Tiempo de Reverberación:

$$TR = \frac{0.161(65.28)}{115.008}$$

$$TR = 0.091 \text{ s}$$

3.4 Sistema de climatización

Las dimensiones de los espacios a climatizar para el cálculo del suministro de aire se resumen en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Dimensiones de habitaciones.

Espacio	Longitud [m]	Ancho [m]	Altura [m]
Cámara semianecoica	6,55	5,75	4,27
Cámara reverberante	8,15	5,75	4,27
Sala de cómputo	4,00	3,50	3,80

Con las dimensiones descritas en la Tabla 3.3 se calculó el volumen de total (V_T), siendo la suma del volumen de los 3 ambientes y se calculó el caudal de aire de todo el sistema por medio de la Ecuación 2.7.

$$Q = V_T \cdot \text{número de renovaciones por hora}$$

$$Q = (V_{C. \text{ semianecoica}} + V_{C. \text{ reverberante}} + V_{\text{Sala de cómputo}}) \cdot \text{número de renovaciones por hora}$$

$$Q = [(6,55 \text{ m} \cdot 5,75 \text{ m} \cdot 4,27 \text{ m}) + (8,15 \text{ m} \cdot 5,75 \text{ m} \cdot 4,27 \text{ m}) + (4 \text{ m} \cdot 3,50 \text{ m} \cdot 3,80 \text{ m})] \cdot 5$$

$$Q = 2070,61 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

3.4.1 Red de conductos de impulsión

En la Figura 3.7 se muestra el esquema de distribución de la red de ventilación a 0,4 m del nivel del piso. En cada tramo se procedió a calcular la longitud equivalente que es un excedente en un 50% por pérdidas de carga y se estableció el caudal en cada tramo, y dichos resultados se muestran en la Tabla 3.5.

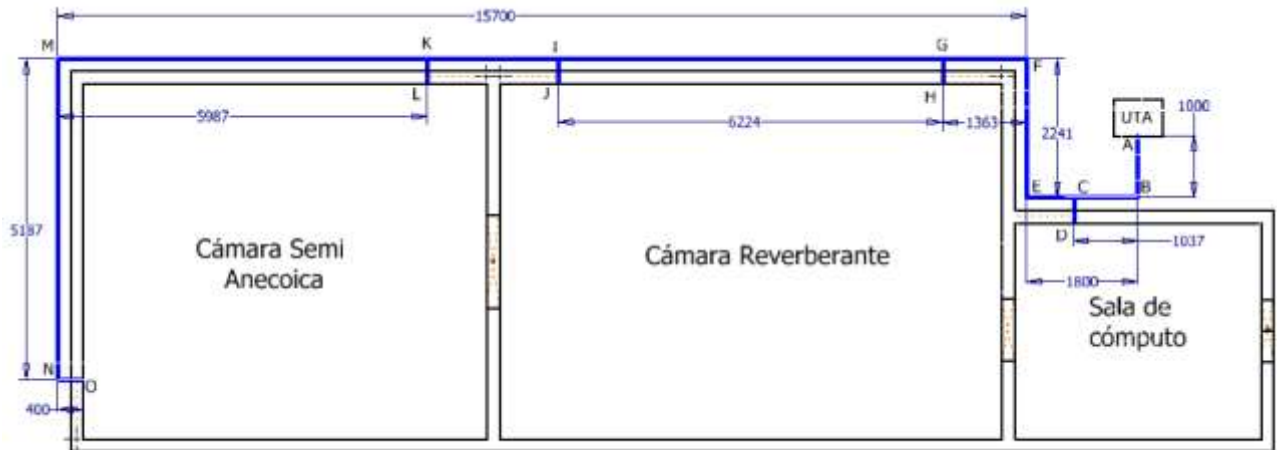


Figura 3.7 Esquema de distribución de conductos de impulsión, medidas en mm.

Tabla 3.5 Longitudes equivalentes y caudales por tramo

	Tramo	Longitud equivalente L_{eq} [m]	Caudal \dot{Q} [m ³ /h]
CONDUCTO PRINCIPAL	AB	1,50	2070,61
	BC	1,56	2070,61
	CE	1,14	1656,49
	EF	3,36	1656,49
	FG	2,04	1656,49
	GI	9,34	1242,37
	IK	3,19	828,25
	KM	8,98	414,12
	MN	7,78	414,12
DEVIRACIÓN	CD	0,60	414,12
	GH	0,60	414,12
	IJ	0,60	414,12
	KL	0,60	414,12
	NO	0,60	414,12

Con los resultados de la Tabla 3.5 se calculó la sección transversal, teniendo como dato la velocidad para conductos principales en sistemas de baja velocidad igual 10 m/s, y el caudal en cada tramo.

Tramo AB / BC

Se calculó la sección transversal del conducto:

$$S_d = \frac{Q}{v}$$

$$S_d = \frac{2070,61 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$S_d = 0,058 \text{ m}^2$$

Se determinó el diámetro de la tubería:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,058 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$D = 0,271 \text{ m} \sim 271 \text{ mm}$$

A partir de la Tabla B1 de la sección de Anexos, se ha seleccionado el diámetro más cercano para hallar su equivalente rectangular. Para el tramo AB y BC su equivalente en conducto rectangular fue de 250x250 mm. Del conducto rectangular se obtuvo una sección transversal real de 0,0625 m², Calculando la velocidad real a partir de la ecuación 2.10:

$$v = \frac{Q}{S}$$

$$v = \frac{2070,61 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0,0625 \text{ m}^2}$$

$$v = 9,20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Por medio de la Ecuación 2.9 se determina el diámetro circular equivalente del conducto rectangular seleccionado (250x250 mm):

$$D_e = \frac{1,30 (ab)^{0,625}}{(a + b)^{0,25}}$$

$$D_e = \frac{1,30 (250 \cdot 250)^{0,625}}{(250 + 250)^{0,25}}$$

$$D_e = 273,3 \text{ mm} \sim 0,273 \text{ m}$$

Finalmente, con los datos de diámetro equivalente (273 mm) y el caudal de 2070,61 m³/h (575,17 l/s) en el tramo AB y BC, se determina la pérdida de carga unitaria a través de la Gráfica B1, obteniendo un valor de 10 Pascal por metro (Pa/m), igual a 1,02 milímetros de columna de agua por metro (mm.c.a/m). Este valor se establece como una constante para todo el conducto (método de pérdida de carga constante).

Tramo CE / EF / FG

El procedimiento para el cálculo de cada tramo es similar al tramo AB y BC calculado previamente. Se determina la sección transversal del conducto:

$$S_d = \frac{Q}{v}$$

$$S_d = \frac{1656,49 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$S_d = 0,046 \text{ m}^2$$

Se calcula el diámetro de la tubería:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,046 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$D = 0,242 \text{ m} \sim 242 \text{ mm}$$

A partir del valor antes calculado, se utiliza la Tabla B1 presentada en la sección de Anexos, donde se selecciona el diámetro más cercano para

hallar su equivalente rectangular. Para el tramo CE su equivalente en conducto rectangular fue de 200x250 mm. En el conducto rectangular se determina una sección transversal real de 0,05 m². Además del uso de la Ecuación 2.10 calculamos la velocidad real:

$$v = \frac{Q}{S}$$

$$v = \frac{1656,49 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0,05 \text{ m}^2}$$

$$v = 9,20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tramo GI

Se realiza el mismo procedimiento de lo anteriormente explicado, se parte del cálculo de la sección transversal del conducto.

$$S_d = \frac{Q}{v}$$

$$S_d = \frac{1242,37 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$S_d = 0,035 \text{ m}^2$$

Se determinó el diámetro de la tubería

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,035 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$D = 0,211 \text{ m} \sim 211 \text{ mm}$$

En la Tabla B1 (ver anexos), se selecciona el diámetro más cercano para hallar su equivalente rectangular. Para el tramo GI su equivalente en conducto rectangular fue de 150x250 mm. La sección transversal real del conducto rectangular fue de 0,038 m², posteriormente se calculamos la velocidad real:

$$v = \frac{Q}{S}$$

$$v = \frac{1242,37 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0,038 \text{ m}^2}$$

$$v = 9,08 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tramo IK

Se calculó la sección transversal del conducto.

$$S_d = \frac{Q}{v}$$

$$S_d = \frac{828,25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$S_d = 0,023 \text{ m}^2$$

Se determinó el diámetro de la tubería

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,023 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$D = 0,171 \text{ m} \sim 171 \text{ mm}$$

Se utiliza la Tabla B1 (Anexos) para la selección del diámetro más cercano para hallar su equivalente rectangular. Para el tramo IK su equivalente en conducto rectangular fue de 100x250 mm con una sección transversal real de 0,025 m². Posteriormente se calculamos la velocidad real:

$$v = \frac{Q}{S}$$

$$v = \frac{828,25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0,025 \text{ m}^2}$$

$$v = 9,20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tramo KM / MN

Sección transversal del conducto:

$$S = \frac{Q}{v}$$
$$S = \frac{414,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$
$$S = 0,012 \text{ m}^2$$

Diámetro de la tubería

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$$
$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,012 \text{ m}^2}{\pi}}$$
$$D = 0,124 \text{ m} \sim 124 \text{ mm}$$

A partir de la Tabla B1 (Anexos), se realiza la selección del diámetro más cercano para hallar su equivalente rectangular. Para el tramo KM y MN su equivalente en conducto rectangular fue de 100x200 mm con sección transversal real de 0,02 m². Se determina la velocidad real:

$$v = \frac{Q}{S}$$
$$v = \frac{414,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0,02 \text{ m}^2}$$
$$v = 5,75 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tramo CD / GH / IJ / KL / NO

Se calculó la sección transversal del conducto, teniendo como dato la velocidad para ducto ramales o derivaciones en sistemas de baja velocidad a igual 3 m/s:

$$S_d = \frac{Q}{v}$$

$$S_d = \frac{414,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{3 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$S_d = 0,038 \text{ m}^2$$

Se determinó el diámetro de la tubería

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,038 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$D = 0,219 \text{ m} \sim 219 \text{ mm}$$

Usando la Tabla B1 (Anexos), se selecciona el diámetro más cercano para hallar su equivalente rectangular. Para cada derivación su equivalente en conducto rectangular fue de 200x200 mm, con una sección transversal real de 0,04 m². Se calcula la velocidad real:

$$v = \frac{Q}{S}$$

$$v = \frac{414,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0,04 \text{ m}^2}$$

$$v = 2,88 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para una mejor comprensión de los resultados en la Tabla 3.6 se muestra los resultados del tamaño de conducto, velocidad y pérdida total por fricción en cada tramo de entrada de aire.

Tabla 3.6 Resultados del conducto de entrada de aire.

	Tramo	Longitud equivalente L_{eq} [m]	Caudal \dot{Q} [m ³ /h]	Sección (axb) [mm]	Velocidad v [m/s]	Perdidas por fricción [mm.c.a/m]*	Perdidas por fricción total [mm.c.a]**
CONDUCTO PRINCIPAL	AB	1,50	2070,61	250x250	9,20	1,02	1,53
	BC	1,56	2070,61	250x250	9,20	1,02	1,59
	CE	1,14	1656,49	200x250	9,20	1,02	1,16
	EF	3,36	1656,49	200x250	9,20	1,02	3,43
	FG	2,04	1656,49	200x250	9,20	1,02	2,08
	GI	9,34	1242,37	150x250	9,08	1,02	9,53
	IK	3,19	828,25	100x250	9,20	1,02	3,25
	KM	8,98	414,12	100x200	5,75	1,02	9,16
DERIVACIÓN	MN	7,78	414,12	100x200	5,75	1,02	7,94
	CD	0,60	414,12	200x200	2,88	1,02	0,61
	GH	0,60	414,12	200x200	2,88	1,02	0,61
	IJ	0,60	414,12	200x200	2,88	1,02	0,61
	KL	0,60	414,12	200x200	2,88	1,02	0,61
	NO	0,60	414,12	200x200	2,88	1,02	0,61

*milímetros de columna de agua / metro.

**milímetro de columna de agua.

Adicionalmente en los puntos D, H, J, L y O se selecciona la rejilla de impulsión a partir de la Tabla B2 establecida en Anexos, con el fin de conocer la pérdida de carga adicional que se produce en el sistema de conductos. La selección se realizó con los parámetros de caudal y velocidad de flujo hallados en la Tabla 3.6. Con un caudal de salida de 414,12 m³/h y una velocidad de 2,88 m/s, se selecciona la rejilla de 425x225 mm, e interpolando los datos de la Tabla B2 se establece una pérdida de 5,42 Pascal (Pa) igual 0,55 mm.c.a. en cada salida. La pérdida total para las 5 rejillas de impulsión fue de 2,75 mm c.a.

La ubicación de las rejillas de impulsión en las paredes se realizó a 400 mm del piso y 800 mm desde la pared lateral. Se consideró instalar 2 rejillas por habitación y una rejilla en la sala de cómputo según el diseño mostrado en la Figura 3.7. Una vista lateral se muestra en los planos de la sección de Anexos.

Finalmente se calculó la presión requerida en cabezal para el conducto. Con el fin de climatizar todo el recinto, se sumaron las pérdidas de carga de las 5 rejillas y las perdidas en cada tramo registradas en la Tabla 3.6, del que se obtuvo un total de 45,47 mm.c.a. Por lo tanto, el ventilador a seleccionar debe proporcionar un caudal de 2070,61 m³/h y una presión de 45,47 mm.c.a. La unidad de manejadora de aire también debe ser capaz de manejar ese mismo caudal.

3.4.2 Red de conductos de retorno

En la Figura 3.8 se muestra el esquema de distribución de los conductos de retorno. En sistemas de ventilación la altura mínima de la rejilla desde el nivel del piso es de 8 pies (2450 mm). Sin embargo, por conveniencia se ubicaron en el diseño a 2800 mm de altura debido a las dimensiones de las cuñas que se ubicarán en las paredes y a 800 mm de distancia de la pared. Se consideró que el caudal es el mismo para el retorno y las velocidades teóricas en el conducto principal igual a 10 m/s y en ramales o derivaciones 3 m/s, empleadas para el cálculo de la velocidad real. Los resultados de la Tabla 3.7 se realizaron siguiendo el mismo proceso empleado en la red de impulsión.

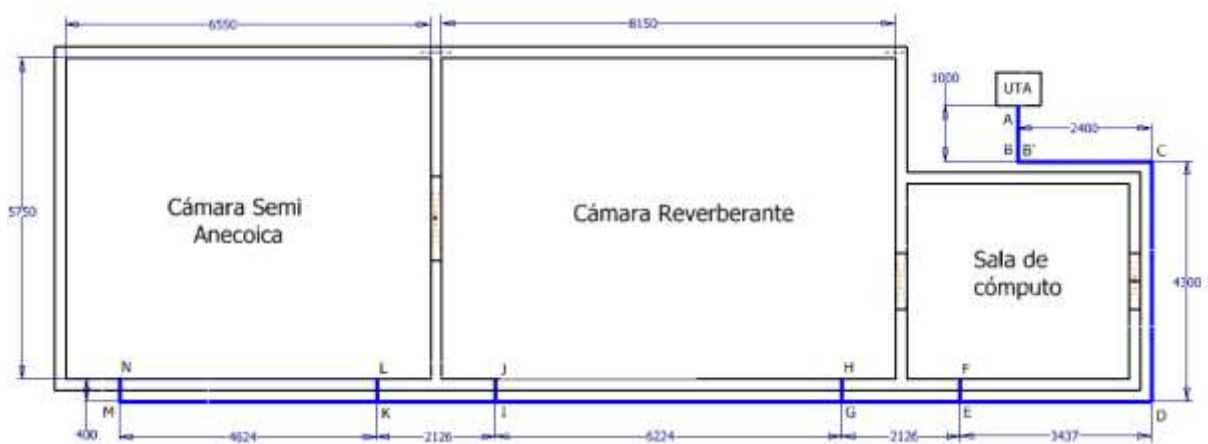


Figura 3.8 Esquema de distribución de conductos de retorno. Medidas en mm.

Tabla 3.7 Resultados del conducto de retorno.

	Tramo	Longitud equivalente L_{eq} [m]	Caudal \dot{Q} [m ³ /h]	Sección (axb) [mm]	Velocidad v [m/s]	Perdidas por fricción [mm.c.a/m]	Perdidas por fricción total [mm.c.a]
CONDUCTO PRINCIPAL	AB	1,50	2070,61	250x250	9,20	1,02	1,53
	BB'	4,32	2070,61	250x250	9,20	1,02	4,41
	B'C	3,60	2070,61	250x250	9,20	1,02	3,67
	CD	6,45	2070,61	250x250	9,20	1,02	6,58
	DE	5,16	2070,61	250x250	9,20	1,02	5,26
	EG	3,19	1656,49	200x250	9,20	1,02	3,25
	GI	9,34	1242,37	150x250	9,08	1,02	9,53
	IK	3,19	828,25	100x250	9,20	1,02	3,25
DERIVACIÓN	KM	6,64	414,12	100x200	5,75	1,02	6,77
	CD	0,60	414,12	200x200	2,88	1,02	0,61
	GH	0,60	414,12	200x200	2,88	1,02	0,61
	IJ	0,60	414,12	200x200	2,88	1,02	0,61
	KL	0,60	414,12	200x200	2,88	1,02	0,61
	NO	0,60	414,12	200x200	2,88	1,02	0,61

En los puntos F, H, J, L y N el caudal de retorno fue 414,12 m³/h, por consiguiente se seleccionada rejilla de retorno de 425x225 mm, de igual forma que el sistema de impulsión. Siendo la misma dimensión de la rejilla la pérdida es igual a 0,55 mm c.a. en cada retorno. La pérdida total para las 5 rejillas de retorno fue de 2,75 mm.c.a.

A continuación, se calculó las perdidas por fricción de todo el conducto de retorno de la Tabla 3.7, estas sumadas a las pérdidas de carga de las 5 rejillas, se obtuvo un total de 50,05 mm.c.a. Por lo tanto, el ventilador de flujo de retorno a seleccionar debe proporcionar un caudal de 2070,61 m³/h y una presión de 50,05 mm.c.a. (490,81 Pa).

3.4.3 Nivel de potencia sonora en las rejillas

Dado al uso de rejillas de impulsión y retorno dentro de la cámara semianecoica, estas son consideradas como punto de generación de ruido por el paso del aire. Por tanto, se estimó el nivel de potencia sonora generada mediante la Tabla B2 (Anexos).

La estimación toma como punto de partida los valores de caudal y velocidad del aire en los puntos de impulsión y retorno de aire, y mediante interpolación de los datos de la tabla se determinó un ruido 15,42 dBA en cada rejilla.

3.4.4 Nivel de potencia sonora de ventilador

Los ventiladores son equipos generadores de sonidos que llegan a transmitir ruidos por el sistema de ductos. Lo cual se hace imprescindible estimar el nivel de potencia sonora generado, para el correcto diseño acústico de la cámara semi anecoica. El nivel de potencia específica de la Ecuación 2.11 se selecciona de la Tabla B4 de la sección Anexo B y es igual a 90 dB.

$$L_w = L_{w_1} + 10 \cdot \log Q + 20 \cdot \log p$$

$$L_w = 90 \text{ dB} + 10 \cdot \log 2070,61 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} + 20 \cdot \log 0,491 \text{ kPa}$$

$$L_w = 116,98 \text{ dB}$$

También es necesario calcular la frecuencia de paso de los álabes, multiplicando las revoluciones por segundo (rps) por el número de alabes. El autor Nicolás Marín Escobar indica que el diseño óptimo de un ventilador centrífugo con 14 álabes hacia atrás es más eficiente, considerando un tamaño de hélice de 12,25 pulgadas (31,11 cm) (Marín Escobar, 2016).

Utilizando la Ecuación 2.12, considerando las revoluciones por segundo de 30 rps, un valor usual en este tipo de aplicaciones, se determina la frecuencia.

$$f_B = n \cdot N$$

$$f_B = 30 \text{ rps} \cdot 14 \text{ álabes}$$

$$f_B = 420 \text{ Hz}$$

El valor obtenido se encuentra en la banda de octavas de 500 Hz.

A partir de la Tabla B5 de la sección Anexo B, se obtiene un incremento de frecuencia del álabes (BFI) de 3 dB, añadiendo este valor a manera de corrección a la variable L_w .

Con los datos de caudal Q de 0,575 m³/s, una presión p de 0,492 kPa y una potencia de entrada en el eje del ventilador apropiada de 0,55 kW, se calcula la eficiencia estática del ventilador (uso de la Ecuación 2.13).

$$\eta = \frac{Q \cdot p}{P_{ent}}$$
$$\eta = \frac{0,573 \frac{m^3}{s} \cdot 0,491 kPa}{0,55 kW}$$
$$\eta = 51\%$$

A partir, de la eficiencia del 51% a sabiendo que se utilizara un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia atrás, de la Tabla B6 (Anexos B) se obtiene una corrección de 12 dB adicionales a L_w .

Finalmente, se resta 6 dB por emplear un 51% de la potencia, resultando en total una potencia sonora del ventilador (L_w) de 125,98 dB.

3.4.5 Atenuación debido a los ductos

Para el cálculo se considera las dimensiones según el esquema de la Figura 3.7. Con el fin de lograr una mayor atenuación se considera un revestimiento con un espesor de 25 mm, y una densidad de 24 a 48 kg/m³, teniendo en cuenta pérdidas por radiación. De la Tabla B6 de la sección de Anexos B se obtiene los siguientes niveles de atenuación por metro mostrados en la Tabla 3.8. Para la estimación de la atenuación se interpolan los valores la Tabla B6, dado que los tamaños de sección definidos no se encuentran.

Tabla 3.8 Resultados de atenuación en ductos.

	Tramo	Longitud L [m]	Sección (axb) [mm]	Atenuación [dB/m]	Atenuación total [dB]
CONDUCTO PRINCIPAL	AB	1,00	250x250	5,7	5,7
	BC	1,04	250x250	5,7	5,9
	CE	0,76	200x250	6,1	4,6
	EF	2,24	200x250	6,1	13,7
	FG	1,36	200x250	6,1	8,3
	GI	6,22	150x250	6,9	42,9
	IK	2,13	100x250	7,8	16,6
	KM	5,99	100x200	8,2	49,1
	MN	5,19	100x200	8,2	42,6
DEVIRACIÓN	CD	0,40	200x200	6,7	2,7
	GH	0,40	200x200	6,7	2,7
	IJ	0,40	200x200	6,7	2,7
	KL	0,40	200x200	6,7	2,7
	NO	0,40	200x200	6,7	2,7
Total de atenuación [dB]					202,9

En la Tabla 3.8 se presenta los resultados de atenuación, siendo de 202,9 dB por conducto revestido. Este valor supera la potencia sonora generada por el ventilador (125,98 dB), por las distancias de los ductos mostradas en el esquema de la Figura 3.7. Este resultado afirma que la ubicación de los equipos de climatización lejos de la cámara semianecoica es la ideal.

3.4.6 Capacidad de unidad enfriadora

El sistema de climatización además de la selección de la Unidad de Tratamiento de Aire con las capacidades antes descritas, se debe seleccionar un componente enfriador en el sistema de expansión indirecta. En este caso lo recomendado es un chiller que emplea refrigerante R32, por su economía, eficiencia y poder de refrigeración (Elnur Gabarron, s.f.). El cálculo de la carga térmica y caudal de agua son datos fundamentales para su selección.

Se establecieron dichos datos mediante un software de modelado de energía y cálculo de carga de edificios de Carrier, fabricante de equipos de climatización. De acuerdo con las características físicas que posee la edificación se obtuvo una carga térmica de 3,6 toneladas de refrigeración (TR) y un caudal de agua de 8,55 galones por minuto (GPM). Por lo tanto, el chiller seleccionado debe cumplir con los requerimientos descritos. En la sección de Anexos se incluye el procedimiento llevado a cabo para obtener un archivo de resultados.

3.5 Sistema de iluminación

El sistema de iluminación se diseñó para cada espacio con los valores de la Tabla 3.2 para cámara semianecoica y la Tabla 3.3 para la cámara reverberante y la sala de cómputo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada cámara.

3.5.1 Cámara semianecoica

Se calculó el índice de local K con la Ecuación 2.15.

$$K = \frac{5H(a + b)}{ab}$$
$$K = \frac{5 \cdot 3,40 \text{ m} \cdot (4,00 \text{ m} + 4,80 \text{ m})}{4,00 \text{ m} \cdot 4,80 \text{ m}}$$
$$K = 7,79$$

Con los coeficientes de reflexión del poliuretano y el concreto, 0,31 y 0,35 respectivamente, se calculó el coeficiente de utilización por medio de interpolación de datos de la Tabla B3 de la sección de Anexos, y se obtuvo un valor de 0,52.

Se calculó el flujo total necesario Φ_T para la cámara mediante la Ecuación 2.14.

$$\Phi_T = \frac{E_m \cdot S}{C_u \cdot C_m}$$

$$\Phi_T = \frac{500 \text{ lux} \cdot (4,80 \text{ m} \cdot 4,00 \text{ m})}{0,52 \cdot 0,8}$$

$$\Phi_T = 23076,92 \text{ lm}$$

Dada la configuración interior de la cámara semianecoica se eligieron lámparas LED tipo bala. Se escogió este tipo de luminaria por la poca área superficial que ocupa (215 mm de diámetro). Además, la tecnología led ofrece un excelente ahorro de energía. El flujo luminoso de esta luminaria es de 4000 lm (Sylvania, 2021). Con esta información empleó la Ecuación 2.16 y hallamos el número de luminarias para cumplir con los requisitos para este tipo de espacios.

$$NL = \frac{\Phi_T}{\Phi_L}$$

$$NL = \frac{23076,92 \text{ lm}}{4000 \text{ lm}}$$

$$NL = 5,77 \sim 6 \text{ luminarias}$$

Finalmente se calculó la distribución del número de luminarias a lo ancho y a lo largo de la cámara utilizando la Ecuaciones 2.17 y 2.18:

$$NL_{ancho} = \sqrt{\frac{NL \cdot a}{b}}$$

$$NL_{ancho} = \sqrt{\frac{6 \text{ luminarias} \cdot 4 \text{ m}}{4,8 \text{ m}}}$$

$$NL_{ancho} = 2,24 \text{ luminarias}$$

$$NL_{largo} = NL_{ancho} \cdot \frac{b}{a}$$

$$NL_{largo} = 2,24 \text{ luminarias} \cdot \frac{4,80 \text{ m}}{4 \text{ m}}$$

$$NL_{largo} = 2,69 \text{ luminarias}$$

De los resultados obtenidos se aproximó a números enteros para distribuir la totalidad de las luminarias calculadas, por lo que resultan 2 luminarias a lo ancho y 3 luminarias a lo largo.

3.5.2 Cámara reverberante

Se calculó el índice de local K a partir de la Ecuación 2.15.

$$K = \frac{5H(a + b)}{ab}$$
$$K = \frac{5 \cdot 4,27 \text{ m} \cdot (5,75 \text{ m} + 8,15 \text{ m})}{5,75 \text{ m} \cdot 8,15 \text{ m}}$$
$$K = 6,33$$

Con el coeficiente de reflexión del concreto para paredes y piso, igual a 0,35, se calculó el coeficiente de utilización interpolando los valores de la Tabla B3 de la sección de Anexos, y se obtuvo un valor de 0,59.

Se calculó el flujo total necesario Φ_T para la cámara mediante el uso de la Ecuación 2.14.

$$\Phi_T = \frac{E_m \cdot S}{C_u \cdot C_m}$$
$$\Phi_T = \frac{300 \text{ lux} \cdot (8,15 \text{ m} \cdot 5,75 \text{ m})}{0,59 \cdot 0,8}$$
$$\Phi_T = 29785,49 \text{ lm}$$

Se selecciono el mismo tipo de lámpara que la cámara semianecoica y se aplicó la Ecuación 2.16 para determinar el número de luminarias.

$$NL = \frac{\Phi_T}{\Phi_L}$$
$$NL = \frac{29785,49 \text{ lm}}{4000 \text{ lm}}$$
$$NL = 7,45 \sim 8 \text{ luminarias}$$

Finalmente se calculó la distribución del número de luminarias a lo ancho y a lo largo de la cámara utilizando las Ecuaciones 2.17 y 2.18:

$$NL_{ancho} = \sqrt{\frac{NL \cdot a}{b}}$$

$$NL_{ancho} = \sqrt{\frac{8 \text{ luminarias} \cdot 5,75 \text{ m}}{8,15 \text{ m}}}$$

$$NL_{ancho} = 2,37 \text{ luminarias}$$

$$NL_{largo} = NL_{ancho} \cdot \frac{b}{a}$$

$$NL_{largo} = 2,37 \text{ luminarias} \cdot \frac{8,15 \text{ m}}{5,75 \text{ m}}$$

$$NL_{largo} = 3,35 \text{ luminarias}$$

De los resultados obtenidos se aproximó a números enteros para distribuir la totalidad de las luminarias calculadas de forma simétrica, por lo que resultan 2 luminarias a lo ancho y 4 luminarias a lo largo.

3.5.3 Sala de computo

Se calculó el índice de local K con la Ecuación 2.15.

$$K = \frac{5H(a + b)}{ab}$$

$$K = \frac{5 \cdot 2,8 \text{ m} \cdot (3,5 \text{ m} + 4 \text{ m})}{3,5 \text{ m} \cdot 4 \text{ m}}$$

$$K = 7,5$$

Con el coeficiente de reflexión del concreto para paredes y piso, igual a 0,35, se obtuvo el coeficiente de utilización interpolando los valores de la Tabla B3, y se obtuvo un valor de 0,53.

Se calculó el flujo total necesario Φ_T para la cámara mediante la Ecuación 2.14.

$$\Phi_T = \frac{E_m \cdot S}{C_u \cdot C_m}$$

$$\Phi_T = \frac{300 \text{ lux} \cdot (3,5 \text{ m} \cdot 4 \text{ m})}{0,53 \cdot 0,8}$$

$$\Phi_T = 9905,66 \text{ lm}$$

Se eligió el mismo tipo de lampara que la cámara semianecoica y se aplicó la Ecuación 2.16 y se obtiene el número de luminarias de este tipo.

$$NL = \frac{\Phi_T}{\Phi_L}$$

$$NL = \frac{9905,66 \text{ lm}}{4000 \text{ lm}}$$

$$NL = 2,47 \sim 3 \text{ luminarias}$$

Dado que se obtuvo un total de luminarias que no se puede distribuir simétricamente, se opta por instalar 4 luminarias debido a que el cálculo se realizó para un mínimo de 300 lux en esta habitación, por lo que incrementar una luminaria mejora la iluminación, superando los requerimientos mínimos. Finalmente se calculó la distribución del número de luminarias a lo ancho y a lo largo de la cámara utilizando las Ecuaciones 2.17 y 2.18:

$$NL_{ancho} = \sqrt{\frac{NL \cdot a}{b}}$$

$$NL_{ancho} = \sqrt{\frac{4 \text{ luminarias} \cdot 3,5 \text{ m}}{4 \text{ m}}}$$

$$NL_{ancho} = 1,87 \text{ luminarias}$$

$$NL_{largo} = NL_{ancho} \cdot \frac{b}{a}$$

$$NL_{largo} = 1,62 \text{ luminarias} \cdot \frac{4 \text{ m}}{3,5 \text{ m}}$$

$$NL_{largo} = 2,13 \text{ luminarias}$$

De los resultados obtenidos se aproxima a números enteros para distribuir la totalidad de las luminarias, por lo que resultan 2 luminarias a lo ancho y 2 luminarias a lo largo.

La Tabla 3.9 muestra el total de luminarias en cada cámara y su distribución a lo largo y ancho. El plano de distribución de las luminarias se encuentra adjunto en la sección de Anexos.

Tabla 3.9 Resultado de luminarias.

Cámara	Número de luminarias a largo	Numero de luminarias a lo ancho	Total luminarias por cámara
Semianecoica	3	2	6
Reverberante	4	2	8
Sala de cómputo	2	2	4
Total de iluminarias			18

3.6 Análisis de costos

La Tabla 3.10 muestra una estimación del presupuesto de la obra civil para el laboratorio acústico que incluye la cámara semianecoica, la cámara reverberante y la sala de cómputo. Los valores de los materiales son referenciales, y están sujetos a cambios que pueda haber en los distribuidores.

Tabla 3.10 Lista de rubros de obra civil (Cámara de la Construcción de Guayaquil, 2019).

Rubro	Descripción	Unidad	Cantidad	(1) Equipo	(2) M. obra	(3) Materiales	Subtotal costos directos: (1) + (2) + (3)	Costo total
01	Trabajos preliminares							
	Trazado y replanteo	M2	110,48	0,01	1,18	0,56	1,75	193,34
02	Movimiento de tierra							

	Excavación a pulso	M3	55,24	0,04	8,16	-	8,20	452,97
	Relleno compactado con material del sitio	M3	82,85	5,13	0,31	-	5,44	450,70
03	Hormigón simple							
	Replanto	M3	0,54	0,52	2,14	3,15	5,81	3,13
	Muro de hormigón piedra base	M3	14,94	-	116,59	121,38	237,97	3555,27
04	Hormigón armado							
	Plintos	M3	2,34	16,08	120,51	180,96	317,54	743,04
	Riostras	M3	3,83	16,09	144,64	203,07	363,79	1393,32
05	Paredes y enlucidos							
	Pared de bloque de 15 cm.	M2	242,88	-	11,52	9,13	20,65	5015,47
	Enlucido de paredes interior	M2	213,09	0,03	3,21	3,79	7,02	1495,89
	Enlucido de paredes exterior	M2	271,75	0,05	4,89	4,14	9,08	2467,49
06	Pisos							
	Contrapiso hormigón 6 cm.	M2	110,33	0,78	4,10	7,79	12,67	1397,88
	Piso de cerámica	M2	110,33	-	8,47	13,21	21,68	2391,95
07	Carpintería							
	Puerta	Un.	2	-	61,29	93,75	155,04	310,08
	Batiente plano en boquete puerta	Un.	2	-	12,39	14,00	26,39	52,78

08	Instalación eléctrica							
	Punto de luz	Pto.	18	0,20	23,16	19,41	42,77	769,86
	Tomacorriente 110 V.	Pto.	9	0,20	23,16	18,18	41,55	373,95
	Tablero general distribución	Un.	1	-	59,32	45,80	105,12	105,12
	Tomacorriente 220 V.	Pto.	5	0,50	29,58	27,92	58,00	290,00
	Punto televisión	Pto.	1	-	44,06	9,61	53,67	53,67
	Punto sonido	Pto.	7	-	44,92	18,48	63,40	443,80
09	Empaste y Pintura							
	Pintura interior	M2	213,09	-	3,03	2,31	5,34	1137,90
	Pintura exterior		271,75	-	4,02	2,69	6,71	1823,44
10	Estructura metálica							
	Estructura	ML	166,03	-	14,95	16,04	30,99	5145,27
11	Losa metálica							
	Losa espesor 10,5 cm.	M2	110,48	-	-	-	75	8286,00
12	Gypsum	M2	17	-	-	10	10	170
13	Puerta Acústica	M2	1	-	-	1400	1400	1400
14	Fibra de Vidrio	M2	62.32			4.72	4.72	294.15
15	Fibra de Madera	M2	62.32			2.25		140.22
Total general								40356.69

La Tabla 3.11 muestra un precio referencial de los materiales y equipos para el sistema de climatización. Estos rubros representan un valor promedio entre los distintos proveedores en el mercado ecuatoriano, por lo que, al momento de la

implementación, se puede optar por mejores alternativas tecnológicas y económicas.

Tabla 3.11 Lista de rubro de sistema de climatización.

Rubro	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo total
01	Ductos y accesorios			
	Tubería con aislamiento	M	88	1400
	Accesorios de cobre, uniones, refrigerante, etcétera.	Un.	1	250
	Elementos de fijación y soporte de equipos, tuberías, ductos.	Un.	1	280
	Rejillas	Un.	10	1190
02	Equipos			
	Unidad manejadora de aire	Un.	1	6200
	Chiller	Un.	1	6500
Total general				15820

3.6.1 Costos totales

- Costo total de obra civil: \$ 40356.69
- Costo total sistema de climatización: \$ 15820,00
- Costo de investigación: \$2000
- Costo total de construcción del laboratorio de acústica: \$ 58176,69

El costo total que conlleva la construcción del laboratorio acústico asciende a \$58176,69. Resulta difícil proyectar el tiempo de recuperación de capital invertido, debido a que, en la región la existencia de este tipo de cámaras es limitado, y aún más obtener precios referenciales de estudios y pruebas en laboratorio. Sin embargo, estudios en campo como mediciones de acústicas tienen un precio referencial entre \$380 y \$480 para mediciones de aislamiento acústico. Aunque los análisis de laboratorio conllevan el estudio de más variables y un análisis mucho más minucioso, se puede establecer un punto de partida y establecer valores que a largo plazo reflejen rentabilidad.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

En la actualidad la contaminación viene de un sin número de fuentes, incluso a nivel sonoro. Las perturbaciones llegan a impedir que se desarrollen con normalidad las actividades cotidianas, y llegan a tener repercusiones graves como perturbación del sueño, falta de concentración, estados de tensión, estrés e incluso enfermedades. El desarrollo de este documento ha abarcado el proceso de diseño de una cámara semianecoica bajo parámetros acústicos nacionales e internacionales, con el objetivo de ser un referente en el Ecuador en la investigación en el campo de la acústica. Contar con un laboratorio con el alcance que este proyecto propone, crea la oportunidad de ofrecer servicios de caracterización del comportamiento de materiales de insonorización y equipos antes de su comercialización.

Poder realizar este tipo de ensayos en el país brinda la oportunidad a las empresas fabricantes de materiales aislantes y/o equipos que generen ruido en general, contar con un aval en sus características técnicas del grado de insonorización o el bajo nivel de generación de ruido, respectivamente, haciendo que sus productos propicien una mejor calidad de ambiente a nivel acústico.

El diseño de los sistemas que se cubren en la propuesta planteada requirió de una investigación exhaustiva de las distintas alternativas disponibles, con el fin de lograr no solo los niveles de ruido permisibles según la norma, sino también las condiciones de confort en cuanto a temperatura e iluminación. Lograr las condiciones de aislamiento y acondicionamiento permite ampliar en un futuro las especialidades de estudio, por la baja frecuencia de corte utilizada, según lo permitieron los materiales que al momento se encontraban disponibles en el mercado local.

El aislamiento acústico dependerá en gran medida de la densidad y la masa por unidad de área de las paredes, también de los materiales de estas, teniendo sistemas que se pueden usar como paredes simples o paredes dobles, dependiendo del nivel de insonorización que se requiera.

Se diseñó un laboratorio de acústica para la realización de ensayos, cumpliendo los requerimientos mínimos. Dependiendo de la prueba se deberá de utilizar la cámara semianecoica o la cámara reverberante, de esta manera se buscará calificar instrumentos y materiales acústicos bajo parámetros internacionales, siendo los primeros en el país en realizarlo.

Se seleccionó de manera correcta materiales aislantes y absorbentes que permitieron lograr los niveles de potencia sonora al interior de la cámara que garanticen que los ensayos y pruebas obtengan los resultados de mediciones fidedignas.

El uso de materiales con mayor densidad ayuda a que exista mayor aislamiento acústico, pero el costo será mayor.

A nivel regional la existencia de cámaras semianecoicas es limitada y aunque los costos de implementación son elevados, se espera que el alcance tanto en la investigación como en los servicios a ofrecer se obtenga a mediano plazo una rentabilidad creciente, por el interés que se pueda captar en el sector privado para complementar un óptimo diseño de nuevos materiales y productos.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda en el momento de registrar el nivel de ruido en el lugar donde se quiera insonorizar, se debe de tener la mayor cantidad de ruido posible de lo que se realice en un día promedio, por lo que es necesario varias medidas del nivel de ruido.

Se debe reconocer los diferentes tipos de aislamientos acústicos existentes y los materiales a utilizar deben ser los más densos posibles para mejorar el aislamiento.

El diseño de la cámara semianecoica consideró no solo las condiciones ambientes al interior, también se tomaron en cuenta para el dimensionamiento criterios de ubicación de equipos de sonido. Se recomienda que revisar los lineamientos establecidos en la norma ISO 3745 para comprender que las geometrías no solo dependen del objeto a testear sino también del tipo de datos que se desea registrar para fines específicos, por ejemplo, el alcance sonoro que puede tener una fuente analizada.

Se recomienda no optar por rejillas de tamaño diferente al establecido. La selección se basa en el caudal de aire, velocidad y alcance, variables interrelacionadas. En las tablas de selección se observó que rejillas más grandes producen niveles de potencia sonora más elevados, contrario al objetivo del interior de la cámara semianecoica, que es minimizar las posibles fuentes de ruido. Razón por la cual se diseñó el sistema con dos rejillas de impulsión.

El diseño de cámara reverberante se realizó por conveniencia constructiva con paredes paralelas, sin embargo, cumple los criterios de volumen mínimo. Es por eso que, para mejorar el tiempo de reverberación se recomienda la instalación de paneles de madera o algún polímero, en paredes y/o techo para dispersar las ondas incidentes y mejora la acústica de la habitación.

Se recomienda tener una mezcla de materiales aislantes y absorbentes, debido a la gran eficacia que estos tienen, debido a que parte de la onda que incide se refleja y otra parte se absorbe, por lo tanto, los aislantes hacen que la gran

mayoría de esta onda rebote, teniendo energía reflejada, y el absorbente hace que la energía transmitida se pueda disipar.

Bibliografía

- Alcaldía de Guayaquil. (29 de agosto de 2022). *Alcaldía de Guayaquil*. Recuperado el 2 de noviembre de 2022, de <https://www.guayaquil.gob.ec/municipio-ha-atendido-337-denuncias-por-contaminacion-acustica-en-el-comercio/>
- ASHRAE. (2021). *HandBook Fundamental SI*. Peachtree Corners, GA: ASHRAE.
- Barrionuevo, D., & Gonzalez, J. (Mayo de 2012). *Criterios generales para el diseño de cámaras anecóicas*. Recuperado el 28 de octubre de 2022, de <https://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/fundamentosdeacusticayelectroacustica/pub/file/FAyE0512E1-Barrionuevo-Gonzalez.pdf>
- Beranek, L. (1954). *Acoustic*. American Institute of Physics.
- Beranek, L., & Sleeper, H. (1946). The design and construction of anechoic sound chambers. *The Journal of the Acoustical Society of America*. doi:<https://doi.org/10.1121/1.1916351>
- Berglund, B., Lindvall, T., & Schwela, D. (1999). *Guías para el ruido urbano*. Londres: OMS.
- Cámara de la Construcción de Guayaquil. (Abril de 2019). *Precio unitarios de rubros*. Obtenido de https://www.cconstruccion.net/precios_files/rubros.pdf
- Cantitec. (30 de julio de 2017). *Cantitec Impermeabilizaciones y Aislamientos*. Obtenido de <https://www.cantitec.es/diferencias-entre-lana-de-roca-y-fibra-de-vidrio/>
- Carrier Corporation. (2016). *HAP Quick Reference Guide - 10th Edition*. Carrier Corporation.
- Casado García, M. (s.f.). *La acústica en el dominio de la frecuencia*. León: Universidad de León.
- De la Colina, C., Rodriguez, R., Pfretzschner, j., & Moreno, A. (s.f.). *Caracterización Actualizada de la Cámara Reverberante del Instituto de Acústica*. Madrid: Instituto de Acústica del CSIC.
- Dirección de Medio Ambiente de la M.I. Municipalidad de Guayaquil. (8 de Julio de 2014). *Ordenanza para prevenir y mitigar el ruido en el cantón Guayaquil*. Recuperado el 3 de noviembre de 2022, de <https://www.guayaquil.gob.ec/wp-content/uploads/Documentos/Ordenes%20Dia/2014/Odenes%20del%20día%20mes%20de%20Julio%20del%202014/Orden%20del%20día%20de%20la%20sesión%20ordinaria%20del%20jueves%2010%20de%20Julio%20del%202014.%20pdf/Punto%204.2.%20pdf.pdf>

- Elnur Gabarron. (s.f.). *Gas refrigerante R32 características y ventajas con respecto al R410A*. Recuperado el 28 de Diciembre de 2022, de <https://www.elnur.es/gas-refrigerante-r32-caracteristicas-y-ventajas-con-respecto-al-r410a/>
- Feilo Sylvania. (2021). *Guía técnica de iluminación*. Sylvania.
- Gallegos Guzmán, F. E., & Montalvo Echeverría, D. X. (2008). *Diseño de una cámara anecoica y una cámara reverberante*. Escuela Politécnica Nacional, Quito. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1062>
- García Torres, D. (2017). *Caracterización de propiedades mecánicas de paneles sándwich de polietileno y espuma polietileno/poliuretano*. Universidade da Coruña, La Coruña. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2183/21811>
- Huebscher, R. (1948). *Friction equivalents for round, square and rectangular ducts*. ASHVE Transactions (Renamed ASHRAE Transactions).
- INEN. (9 de Enero de 2004). *Iluminación natural en escuelas. INEN 1 153*. Recuperado el 7 de diciembre de 2022, de https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_1153.pdf
- Isbert, A. C. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- ISO. (1975). *266 - Acoustics: Preferred frequencies for measurements*. Switzerland: ISO.
- ISO. (2003). *3745 Acoustics. Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure. Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms*. Switzerland: ISO.
- ISOVER. (2000). *Manual de Aislamiento en la Edificación*. Madrid: ISOVER.
- Koppel, T., Shishkin, A., Haldre, H., Toropovs, N., Vilcane, I., & Tint, P. (2017). Reflection and transmission properties of common construction material at 2.4 GHz frequency. *ScienceDirect*, 158-165. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.045>
- Laborda Grima, R., Recalde Ruiz, D., Tolsa Martínez, R., m, & Marqués Giménez, N. (s.f.). *Manual de seguridad y salud para operaciones en talleres mecánicos y de motores térmicos*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: <https://www.spri.upv.es/msmecanico1.htm>
- Marín Escobar, N. (2016). *Diseño óptimo y simulación de un ventilador centrífugo*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11059/7481>

- Mas Acoustics. (s.f.). *Auralex Studiofoam Wedges*. (Mas Acoustics) Recuperado el noviembre de 2022, de <https://masacoustics.com/105-auralex-studiofoam-wedges.html>
- Mattia, M. (Abril de 2003). *Brüel Acoustics. Anechoic Chambers*. Obtenido de <http://www.bruel-ac.com/tr/tr9602/tr9602.html>
- McQuay International. (2004). *HVAC Acoustic Fundamentals*. McQuay.
- Miyara, F. (1999). *Acústica y Sistemas de sonido*. Rosario, Argentina: Universidad Nacional del Rosario.
- Orces Pareja, E. (2023). *Consideraciones de diseño acústico en sistemas de acondicionamiento de aires (HVAC) de edificios*. Guayaquil.
- Rossing, T. (2007). *Springer Handbook of Acoustics*. New York: Springer.
- Sylvania. (2021). *Iluminación LED. Lámparas y luminarias*. Sylvania.
- Tolliver, B. (2012). *Fundamentos de Acústica: Control de ruido y calidad de sonido*. Owens Corning, 29.
- Trott, A., & Welch, T. (2000). *Refrigeration and Air Conditioning*. Woburn: Butterworth-Heinemann.
- Trox Technik. (2018). *Tablas de Selección Rápida*. Zaragoza: Trox.
- Wang, B., Liu, Y., Dong, M., & Zuo, G. (2021). Study on changing the dielectric constant and radar reflection of foamed polyurethane by adding graphite. *IOPscience*, 8. doi:10.1088/1742-6596/1980/1/012004
- Westinghouse Electric Corporation. (2000). *Manual del Alumbrado*. Bloomfield, NJ: Dossat 2000.

Anexos

ANEXO A. Diseño de Cámara Reverberante

La cámara reverberante se utiliza para medir la potencia sonora emitida por una fuente y el coeficiente de absorción sonoro de diferentes materiales. Es todo lo contrario a una cámara anecoica o semianecoica, sus paredes reflejan el sonido del lugar. No existe una forma ideal de construcción de una cámara reverberante (De la Colina, Rodriguez, Pfretzschnner, & Moreno).

La forma de construcción de la cámara reverberante se basa en la normativa UNE-EN 20354, que exige que el volumen de la cámara sea aproximadamente mínimo de 200 m³. También los materiales usados al construir la cámara deben tener baja densidad. La mejor forma de construcción de la cámara reverberante es con formas no uniformes ni tampoco simétricas, debido a que esto ayudará a que el campo reverberante producido en su interior sea lo más difuso posible (Gallegos Guzmán & Montalvo Echeverría, 2008).

La razón para crear una cámara reverberante es poder estudiar la absorción acústica de diferentes materiales o elementos acústicos, diferenciar a partir del mismo material pero diferentes densidades y espesor el nivel de absorción que se tenga, comprobando a su vez la clasificación STC, siguiendo las normativas existentes. La Figura A4 propone una alternativa de dimensionamiento de la cámara reverberante con las condiciones impuestas por la normativa.

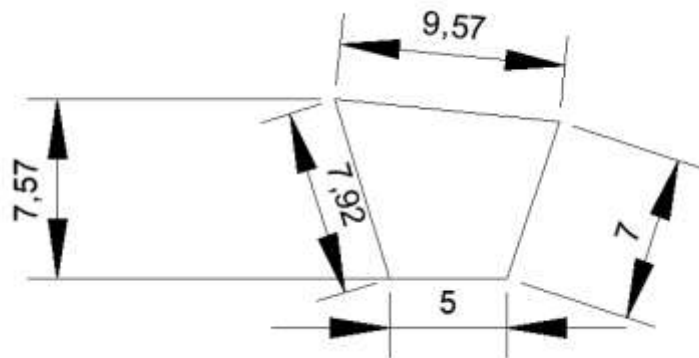
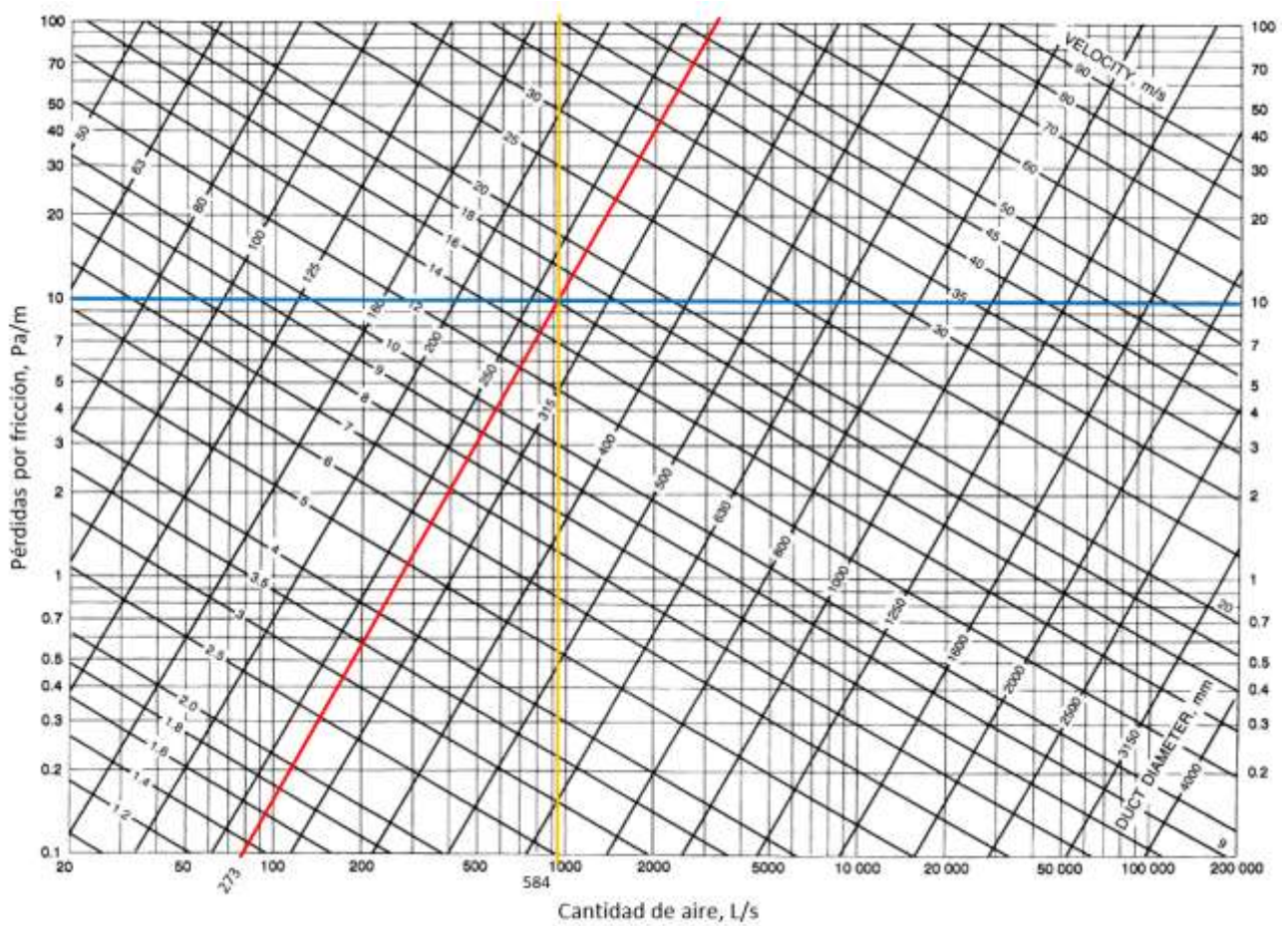


Figura A4 Esquema constructivo de la cámara reverberante, vista en planta (Autoría Propia)

Al tener una altura de 3.99 m, y al tener un área de 51.59 m², se tiene que el volumen total de la cámara reverberante es de 205.84 m³, por lo que cumple con la medida mínima de volumen. En consideración se tiene que la cámara semianecoica tiene un volumen de 150.27 m³, es muy diferente dimensionar una cámara semianecoica que una reverberante, puesto que en esta pide un volumen mínimo, y una geometría poco usual, por su parte las normativas que ayudan en el dimensionamiento de la cámara semianecoica cumplen con otros parámetros. Sin embargo, la forma propuesta en la Figura A4 es poco viable a nivel constructivo, por lo que se emplearon las dimensiones de la cámara semianecoica que se ubica adyacente: 5,75 metros de ancho y 4,27 metros de altura. Un cálculo matemático sencillo nos permite obtener una longitud de cámara de 8,15 metros, de lo que se consigue un volumen de 200,1 m³, cumpliendo con el requerimiento mínimo.

ANEXO B. Gráficas y Tablas de selección.

En esta sección se presentan las gráficas y tablas empleadas para los obtener los resultados obtenidos.



Gráfica B1. Gráfico de fricción para conducto redondo. (ASHRAE, 2021)

Tabla B1. Equivalentes circulares de conductos rectangulares para igual fricción y flujo de aire. (ASHRAE, 2021)

Longitud del lado b, mm	Longitud de un lado del conducto rectangular a, mm										
	100	150	200	250	300	400	500	600	800	1 000	1 200
	Diámetro circular del conducto, mm										
200	152	189	219								
250	169	210	244	273							
300	183	229	266	299	328						
400	207	260	305	343	378	437					
500		287	337	381	420	488	547				
600		310	365	414	457	533	598	656			
800			414	470	520	609	687	755	875		
1 000				517	574	674	762	840	976	1 093	
1 200					620	731	827	914	1 066	1 196	1 312
1 400						781	886	980	1 146	1 289	1 416
1 600						827	939	1 041	1 219	1 373	1 511
1 800							988	1 096	1 286	1 451	1 598
2 000								1 034	1 147	1 348	1 680

Tabla B2. Rejillas de impulsión y retorno para techo o pared de lamas fijas. (Trox Technik, 2018)

Caudal m³/h	H			L																									
	225	325	425	225	325	425	525	625	825	1.025	1.225	325	425	525	625	825	1.025	1.225	425	625	525	625	825	1.025	1.225	825	1.025	1.225	
100	V _{ef}	4,6	3,1	2,5																									
	Δp	17	7	5																									
	dB(A)	21	<15	<15																									
	ALC	4,6	3,8	3,4																									
200	V _{ef}	9,3	6,2	5,1	4,0	3,3	2,5																						
	Δp	66	29	20	12	8	5																						
	dB(A)	39	30	25	20	15	<15																						
	ALC	9,2	7,5	6,8	6,0	5,5	4,8																						
300	V _{ef}		9,3	7,6	6,0	4,9	3,8	3,0	2,5																				
	Δp		66	44	27	19	11	7,0	5,0																				
	dB(A)		40	36	31	27	20	15	<15																				
	ALC		11,3	10,2	9,1	8,2	7,2	6,4	5,8																				
400	V _{ef}				7,9	6,5	5,1	4,0	3,3	2,5																			
	Δp				49	33	20	12	8	5,0																			
	dB(A)				38	34	28	23	17	<15																			
	ALC				12,1	11,0	9,6	8,5	7,8	6,8																			
500	V _{ef}					8,2	6,3	5,0	4,1	3,2	2,5																		
	Δp					52	31	19	13	8	5,0																		
	dB(A)					40	34	29	23	18	<15																		
	ALC					13,7	12,1	10,7	9,7	8,5	7,6																		
600	V _{ef}						7,6	6,0	4,9	3,8	3,0	2,5																	
	Δp						44	27	19	11	7	5																	
	dB(A)						39	34	29	22	17	<15																	
	ALC						14,5	12,8	11,6	10,2	9,1	8,3																	
800	V _{ef}							7,9	6,5	5,1	4,0	3,4	2,7	2,6	2,3														
	Δp							49	33	20	13	9	6	5	4														
	dB(A)							41	36	30	25	21	16	16	15														
	ALC							17,1	15,5	13,6	12,2	11,1	10,0	9,7	9,2														
1.000	V _{ef}								8,2	6,3	5,1	4,2	3,4	3,2	2,9	2,6													
	Δp								52	31	20	14	9	8	6	5													
	dB(A)								42	36	31	27	22	22	20	17													
	ALC								19,4	17,0	15,2	13,9	12,6	12,1	11,5	10,9													
1.250	V _{ef}									7,9	6,3	5,3	4,3	4,0	3,6	3,2	2,7												
	Δp									48	31	21	14	12	10	8	6												
	dB(A)									42	37	34	29	28	26	23	19												
	ALC									21,3	19,1	17,4	15,7	15,1	14,4	13,6	12,4												
1.500	V _{ef}										9,5	7,6	6,3	5,1	4,8	4,3	3,9	3,2	2,5	2,2									
	Δp										69	44	31	20	18	15	12	8	5	4									
	dB(A)										47	42	38	33	33	31	28	24	18	17									
	ALC										25,6	22,9	20,9	18,8	18,2	17,3	16,3	14,9	13,0	12,2									
1.750	V _{ef}											8,8	7,4	6,0	5,6	5,1	4,5	3,8	2,9	2,5	2,3								
	Δp											60	42	28	24	20	16	11	6	5	4								
	dB(A)											46	42	38	37	35	32	28	22	19	18								
	ALC											26,7	24,4	22,0	21,2	20,2	19,0	17,4	15,2	14,2	13,5								
2.000	V _{ef}												8,4	6,9	6,4	5,8	5,1	4,3	3,3	2,9	2,6	2,2							
	Δp												55	36	32	26	20	14	8	6	5	4							
	dB(A)												45	42	41	39	35	32	25	23	20	18							
	ALC												27,8	25,1	24,2	23,1	21,8	19,9	17,4	16,3	15,5	14,3							

H en mm
Altura nominal de la rejilla
L en mm
Longitud nominal de la rejilla
V_{ef} en m/s
Velocidad efectiva de salida

dB(A)
Nivel de potencia sonora
Δp en Pa
Pérdida de carga

ALC en m
Alcance de la vena de aire a una velocidad residual de 0,5 m/s con lamas a 0° y efecto techo

Tabla B3. Coeficiente de utilización de luminaria led. (Feilo Sylvania, 2021)

		Coefficients of Utilization Zonal Cavity Method																		
pfc		0.20																		
pcc		.8				.7				.5				.3				.0	0	
pw		0	.7	.5	.3	0	.7	.5	.3	0	.5	.3	0	.5	.3	0	.5	.3	0	0
	0	119	119	119	119	116	116	116	116	111	111	111	106	106	106	102	102	102	100	
	1	111	108	104	101	109	105	102	100	101	99	97	97	95	94	94	92	91	89	
	2	104	97	92	8	101	95	91	86	92	88	84	89	86	83	86	83	81	79	
	3	97	88	82	77	94	87	81	76	84	79	75	81	77	73	79	75	72	70	
	4	90	81	74	68	88	79	73	68	77	71	67	75	70	66	73	69	65	63	
	5	85	74	67	61	83	73	66	61	71	65	60	69	64	60	68	63	59	57	
	6	79	68	61	56	78	67	60	55	66	60	55	64	59	55	63	58	54	52	
	7	75	63	56	51	73	63	56	51	61	55	50	60	54	50	59	54	50	48	
	8	70	59	52	47	69	58	52	47	57	51	47	56	50	46	55	50	46	44	
	9	67	55	48	26	65	55	48	43	54	47	43	53	47	43	52	47	43	41	
	10	63	52	45	40	62	51	45	40	50	44	40	50	44	40	49	44	40	38	

Tabla B4. Potencia sonora producida por varios tipos de ventiladores (Orces Pareja, 2023).

Tipo de ventilador	Tamaño de hélice	Frecuencias centrales de bandas de octava, Hz								
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	BFI*
Ventiladores centrífugos										
Aerodinámicos, curvados hacia atrás.	Por encima de 0.75 m	85	85	84	79	75	68	64	62	3
	Por debajo de 0.75 m	90	90	88	84	79	73	69	64	3
Ventiladores radiales:										
Baja presión (presión estática de 4 a 10 p.c.a.)	Por encima de 1 m	101	92	88	84	82	77	74	71	7
	Por debajo de 1 m	112	104	98	88	87	84	79	76	7
Presión media (presión estática de 10 a 20 p.c.a.)	Por encima de 1 m	103	99	90	87	83	78	74	71	8
	Por debajo de 1 m	113	108	96	93	91	86	82	79	8
Alta presión (presión estática de 20 a 60 p.c.a.)	Por encima de 1 m	106	103	98	93	91	89	86	83	8
	Por debajo de 1 m	116	112	104	99	99	97	94	91	8
Curvados hacia adelante	Todos	98	98	88	81	81	76	71	66	2
Ventiladores axiales										
Axiales con aletas guías:										
Hub-ratio 0.3-0.4	Todos	94	88	88	93	92	90	83	79	6
Hub-ratio 0.4-0.6	Todos	94	88	91	88	86	81	75	73	6
Hub-ratio 0.6-0.8	Todos	98	97	96	96	94	92	88	85	6
Turboaxiales	Por encima de 1 m	96	91	92	94	92	91	84	82	7
	Por debajo de 1 m	93	92	94	98	97	96	88	85	7
Helicoidales	Todos	93	96	103	101	100	97	91	87	5

*BFI = Incremento de frecuencia del álabe

Tabla B5. Ajuste por eficiencia del ventilador (Orces Pareja, 2023).

Ventilador de álabes aerodinámicos y axiales		Ventilador centrífugo curvado hacia atrás		Ventilador centrífugo curvado hacia adelante	
Eficiencia, %	Aumento, dB	Eficiencia, %	Aumento, dB	Eficiencia, %	Aumento, dB
80 a 72	0	75 a 67	0	65 a 58	0
71 a 68	3	66 a 64	3	57 a 55	3
67 a 60	6	63 a 56	6	54 a 49	6
59 a 52	9	55 a 49	9	48 a 42	9
51 a 44	12	48 a 41	12	41 a 36	12

Tabla B6. Atenuación para ductos, dB/m (Orces Pareja, 2023)

		Frecuencia central de banda de octava, Hz								
		63	125	250	500	1000	2000*	4000*		
Ducto rectangular										
Dimensiones		Relación área/perímetro								
cmxcm	(pulg.xpulg.)	cm/cm ²	(pulg.xpulg. ²)							
10x20	(4x18)	0.3	(0.75)	0.7	2.1	3.3	8.2	22.4	21.2	8.4
15x30	(6x12)	0.2	(0.5)	0.6	1.9	2.6	6.3	17.3	15.7	7.6
20x30	(8x12)	0.17	(0.42)	0.6	1.8	2.4	5.8	14.9	16.3	8.7
25x41	(10x16)	0.13	(0.33)	0.5	1.7	2.1	4.9	13.5	13.3	7.9
30x30	(12x12)	0.13	(0.33)	0.6	1.7	2.3	5.4	14.8	14.9	8.8
30x61	(12x24)	0.10	(0.25)	1.2	0.8	1.8	4.1	11.1	9.5	6.5
30x91	(12x36)	0.09	(0.22)	1.2	0.8	1.6	3.6	9.8	5.8	4.2
38x38	(15x15)	0.11	(0.27)	1.2	0.8	2.0	4.7	12.7	12.6	8.3
38x76	(15x30)	0.08	(0.20)	1.2	0.8	1.6	3.5	9.5	8.1	6.1
46x71	(18x28)	0.07	(0.18)	1.2	0.8	1.5	3.4	9.3	8.8	7.0
46x91	(18x36)	0.07	(0.17)	1.2	0.7	1.4	3.1	8.5	7.1	5.8
61x91	(24x36)	0.05	(0.14)	1.1	0.7	1.3	2.9	7.8	7.3	6.6
61x122	(24x48)	0.05	(0.13)	1.1	0.6	1.3	2.6	6.3	5.8	5.5
76x76	(30x30)	0.05	(0.13)	1.1	0.7	1.4	3.0	8.2	7.6	7.0
76x152	(30x60)	0.04	(0.10)	0.4	0.6	1.3	2.2	4.4	4.9	5.1
91x91	(36x36)	0.04	(0.11)	0.4	0.7	1.3	2.7	6.6	6.7	6.7
91x182	(36x72)	0.03	(0.08)	0.4	0.6	1.0	2.0	3.3	4.3	4.9
107x107	(42x42)	0.04	(0.10)	0.4	0.6	1.2	2.4	5.2	5.9	6.5
122x122	(48x48)	0.03	(0.08)	0.4	0.6	1.1	2.2	4.3	5.4	6.2
Ducto circular										
Diámetro, cm										
15.2 (6)		0.7	1.6	3.3	5.9	7.2	7.2	6.6		
30 (12)		0.5	1.0	2.3	4.9	7.2	7.2	4.9		
61 (24)		0.3	0.7	1.6	3.3	5.6	3.0	1.6		
122 (48)		0.1	0.3	1.0	2.0	2.0	1.6	1.6		

ANEXO C. Procedimiento de obtención de carga térmica.

Para cálculo de la carga térmica se empleó el software de modelado de energía y cálculo de carga de edificios HAP de Carrier, y la Guía de Referencia Rápida del HAP (Carrier Corporation, 2016). Dicho software cuenta con el soporte para el Cumplimiento de la Norma ASHRAE 90.1-2013, que determina la eficiencia mínima de ASHRAE para equipos de flujo de refrigerante variable; también cuenta con el soporte para el Cumplimiento de la Norma ASHRAE 62.1-2016, que establece los requisitos de ventilación del sistema utilizando el procedimiento de tasa de ventilación según el tipo de uso de espacio.

1. En la barra de menú se crea un nuevo proyecto, y se selecciona las normativas a aplicar en ventilación y energía. Ver Figura C1.

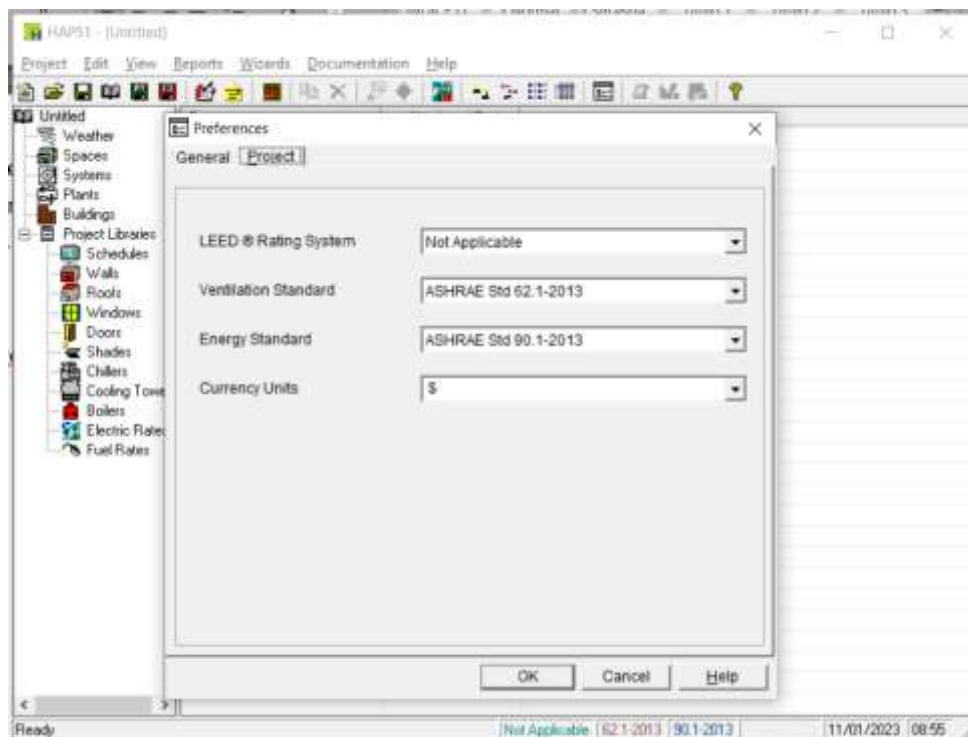


Figura C1. Ventana de nuevo proyecto.

2. En *weather* del árbol de elementos, se selecciona la región, locación y ciudad donde se realiza el proyecto para definir las condiciones climáticas. Ver Figura C2.

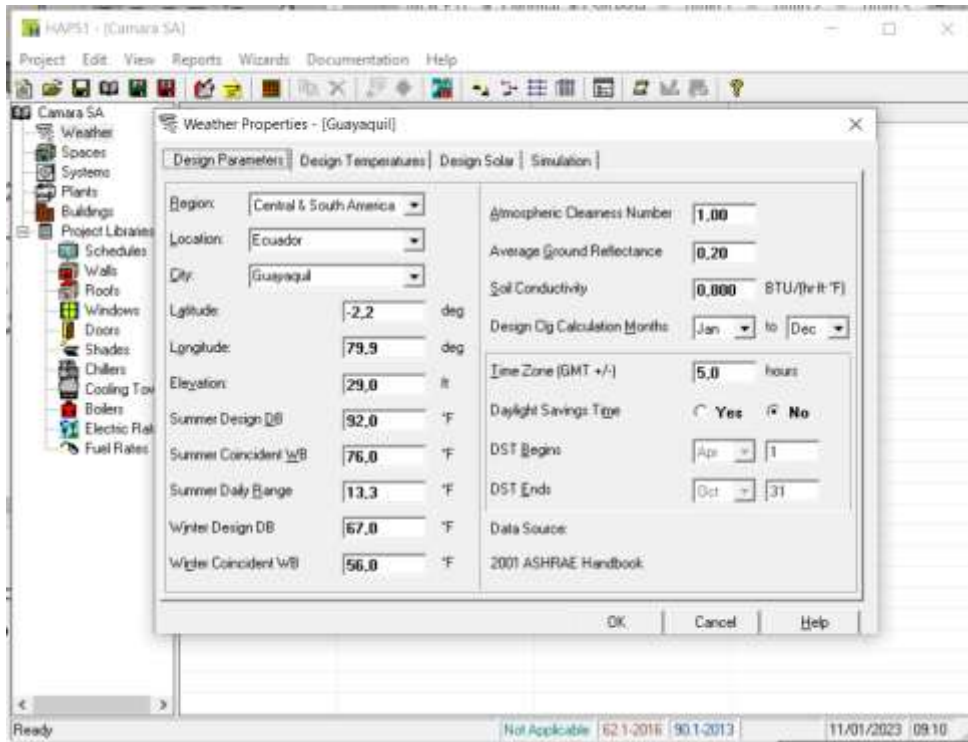


Figura C2. Ubicación geográfica y características climáticas.

3. En *spaces* del árbol de elementos, se ingresan todos los datos como área, altura de habitación, tipo de uso del espacio, el consumo de potencia de los equipos en el interior, el número de personas que ocupan el espacio, características de las paredes, piso y techo y el flujo de aire de la habitación. Ver figura C3.

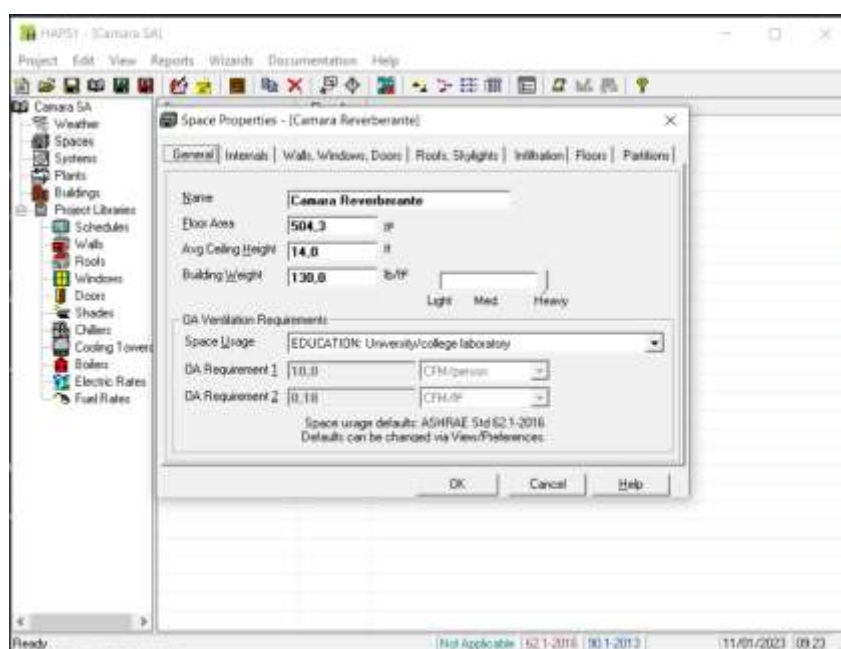


Figura C3. Características de la habitación.

4. En *systems* del árbol de elementos, se crea el apartado para generación del reporte de resultados. Se establecen propiedades para cada habitación como tipo de sistema de climatización, unidad de enfriamiento y componentes del sistema como el ventilador, suministro del ventilador, entre otros. Ver Figura C4.

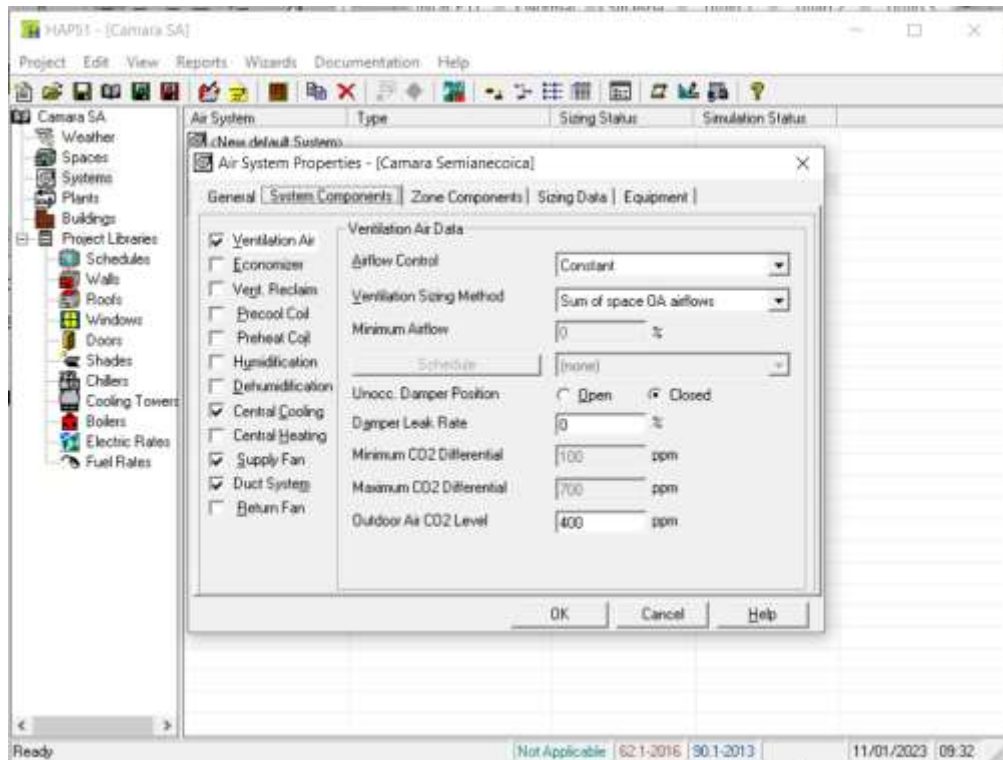


Figura C4. Características para el reporte.

5. La generación del reporte contiene los resultados de la carga térmica en la habitación y el flujo de agua para el enfriador, entre otros parámetros. Para cada espacio se generó un reporte, puesto que difieren en ciertas características. Ver Figura C5.

Air System Sizing Summary for Camara Semianecoica

Project Name: Camara SA 01/11/2023
 Prepared by: abc 07-47

Air System Information

Air System Name Camara Semianecoica
 Equipment Class CW AHU
 Air System Type SZCAV

Number of zones 1
 Floor Area 405,3 ft²
 Location Guayaquil, Ecuador

Sizing Calculation Information

Calculation Months Jan to Dec
 Sizing Data Calculated

Zone CFM Sizing Sum of space airflow rates
 Space CFM Sizing Individual peak space loads

Central Cooling Coil Sizing Data

Total coil load 1,3 Tons
 Total coil load 15,2 MBH
 Sensible coil load 12,9 MBH
 Coil CFM at Feb 1500 860 CFM
 Max block CFM 860 CFM
 Sum of peak zone CFM 860 CFM
 Sensible heat ratio 0,849
 CFM/Ton 677,2
 ft²/Ton 319,0
 BTU/(hr ft²) 37,6
 Water flow @ 10,0 °F rise 3,05 gpm

Load occurs at Feb 1500
 OA DB / WB 92,0 / 76,0 °F
 Entering DB / WB 77,7 / 68,2 °F
 Leaving DB / WB 63,8 / 62,9 °F
 Coil ADP 62,3 °F
 Bypass Factor 0,100
 Resulting RH 64 %
 Design supply temp 58,0 °F
 Zone T-stat Check 1 of 1 OK
 Max zone temperature deviation 0,0 °F

Air System Sizing Summary for Camara Reverberante

Project Name: Camara SA 01/11/2023
 Prepared by: abc 07-46

Air System Information

Air System Name Camara Reverberante
 Equipment Class CW AHU
 Air System Type SZCAV

Number of zones 1
 Floor Area 504,3 ft²
 Location Guayaquil, Ecuador

Sizing Calculation Information

Calculation Months Jan to Dec
 Sizing Data Calculated

Zone CFM Sizing Sum of space airflow rates
 Space CFM Sizing Individual peak space loads

Central Cooling Coil Sizing Data

Total coil load 1,5 Tons
 Total coil load 18,3 MBH
 Sensible coil load 10,8 MBH
 Coil CFM at Jan 1800 442 CFM
 Max block CFM 1145 CFM
 Sum of peak zone CFM 1145 CFM
 Sensible heat ratio 0,586
 CFM/Ton 289,2
 ft²/Ton 329,8
 BTU/(hr ft²) 36,4
 Water flow @ 10,0 °F rise 3,67 gpm

Load occurs at Jan 1800
 OA DB / WB 89,2 / 75,3 °F
 Entering DB / WB 80,6 / 70,1 °F
 Leaving DB / WB 58,0 / 57,2 °F
 Coil ADP 55,5 °F
 Bypass Factor 0,100
 Resulting RH 60 %
 Design supply temp 58,0 °F
 Zone T-stat Check 0 of 1 OK
 Max zone temperature deviation 4,1 °F

Air System Sizing Summary for Sala de Computo

Project Name: Camara SA 01/11/2023
 Prepared by: abc 07-48

Air System Information

Air System Name Sala de Computo
 Equipment Class CW AHU
 Air System Type SZCAV

Number of zones 1
 Floor Area 150,6 ft²
 Location Guayaquil, Ecuador

Sizing Calculation Information

Calculation Months Jan to Dec
 Sizing Data Calculated

Zone CFM Sizing Sum of space airflow rates
 Space CFM Sizing Individual peak space loads

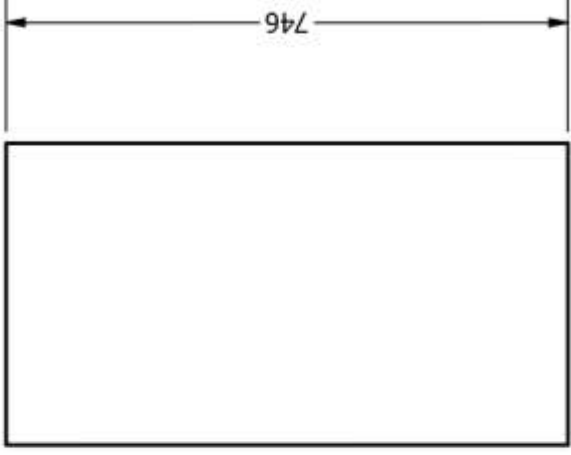
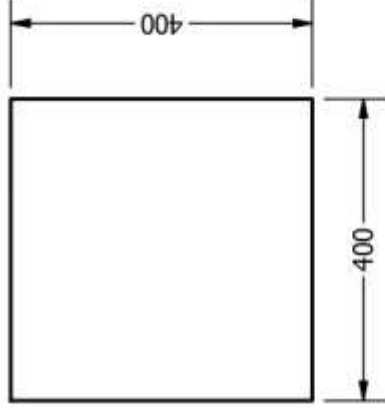
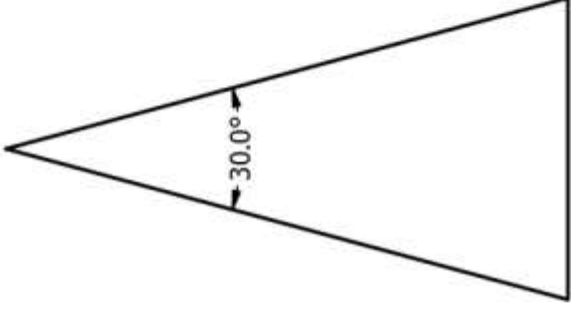
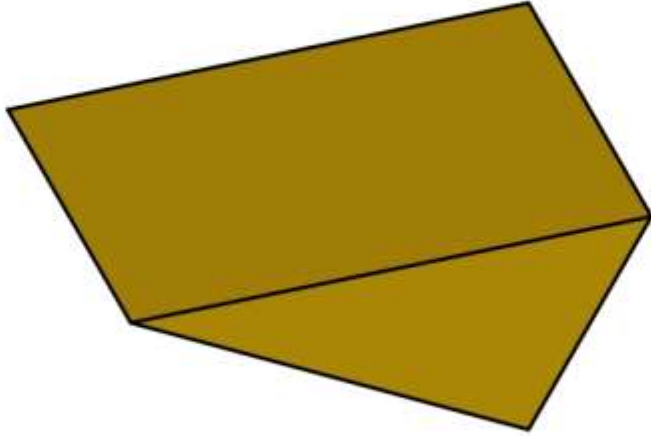
Central Cooling Coil Sizing Data

Total coil load 0,8 Tons
 Total coil load 9,1 MBH
 Sensible coil load 7,2 MBH
 Coil CFM at Feb 1400 370 CFM
 Max block CFM 370 CFM
 Sum of peak zone CFM 370 CFM
 Sensible heat ratio 0,791
 CFM/Ton 486,2
 ft²/Ton 198,0
 BTU/(hr ft²) 60,6
 Water flow @ 10,0 °F rise 1,83 gpm

Load occurs at Feb 1400
 OA DB / WB 91,6 / 75,9 °F
 Entering DB / WB 78,5 / 67,2 °F
 Leaving DB / WB 60,4 / 59,4 °F
 Coil ADP 58,4 °F
 Bypass Factor 0,100
 Resulting RH 57 %
 Design supply temp 58,0 °F
 Zone T-stat Check 1 of 1 OK
 Max zone temperature deviation 0,0 °F

Figura C5. Resultados.

Anexo D. planos



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN

Escala: 1:10 A4

espol

Cuña Anecoica

Diseño de Cámara
Semlanecoica

Fecha:
13/12/2022

Diseñado por: Juan Peralta Coello & John Pozo Villón

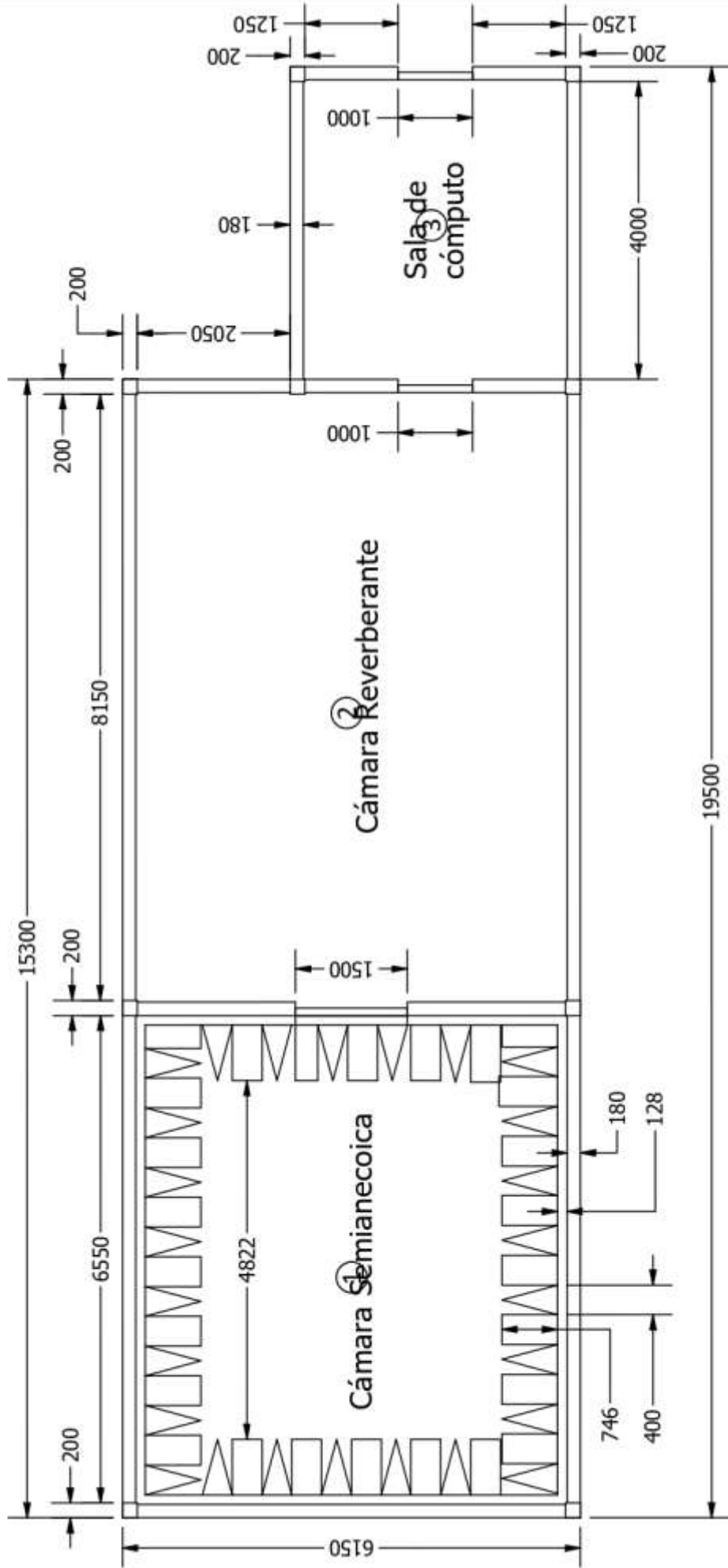
Dibujado por: Juan Peralta Coello & John Pozo Villón

Unidad: mm

Aprobado por: Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong

Revisado por: Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong

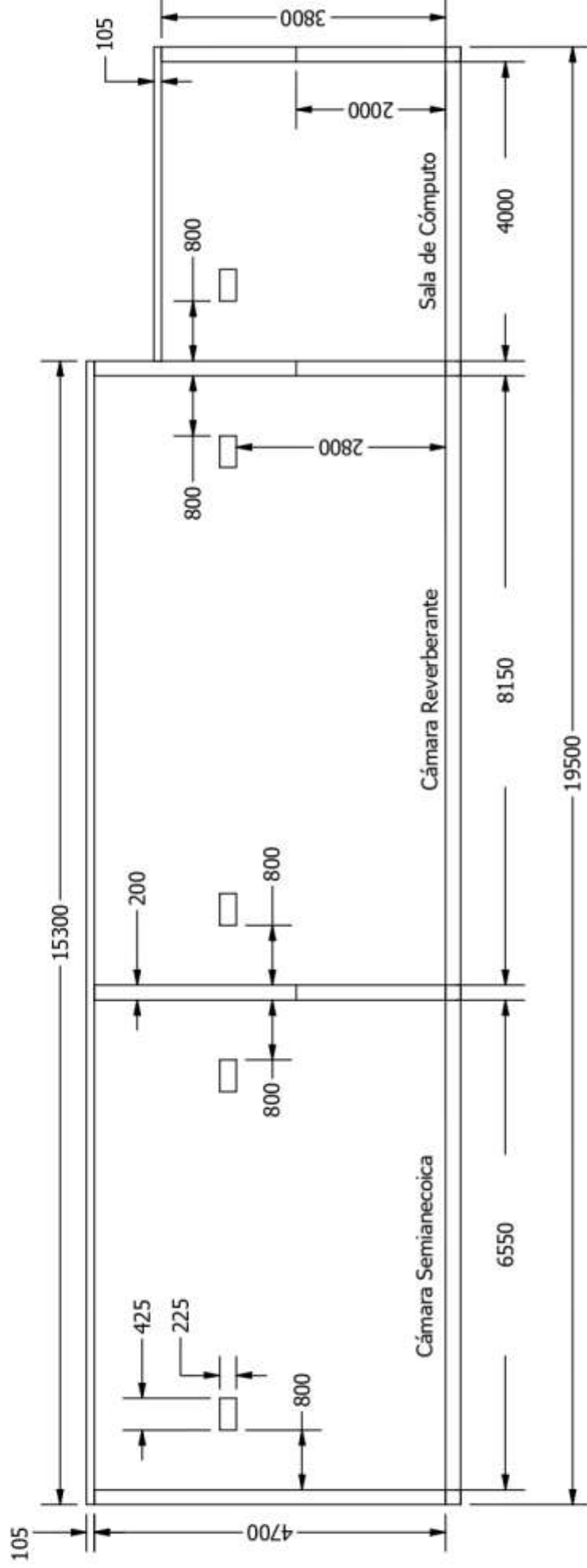
PL. No. 01




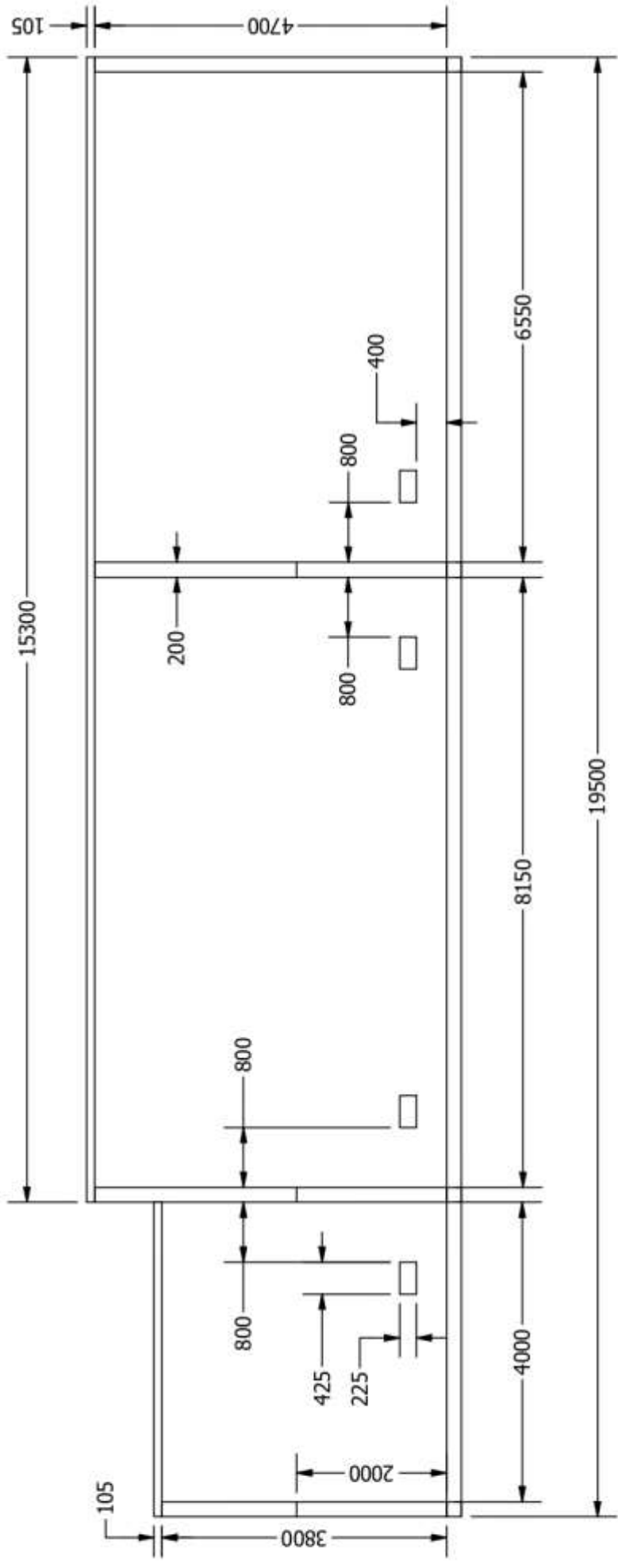
TABLA


Item	Descripción
1	Cámara Semianecoica
2	Cámara Reverberante
3	Sala de Cómputo

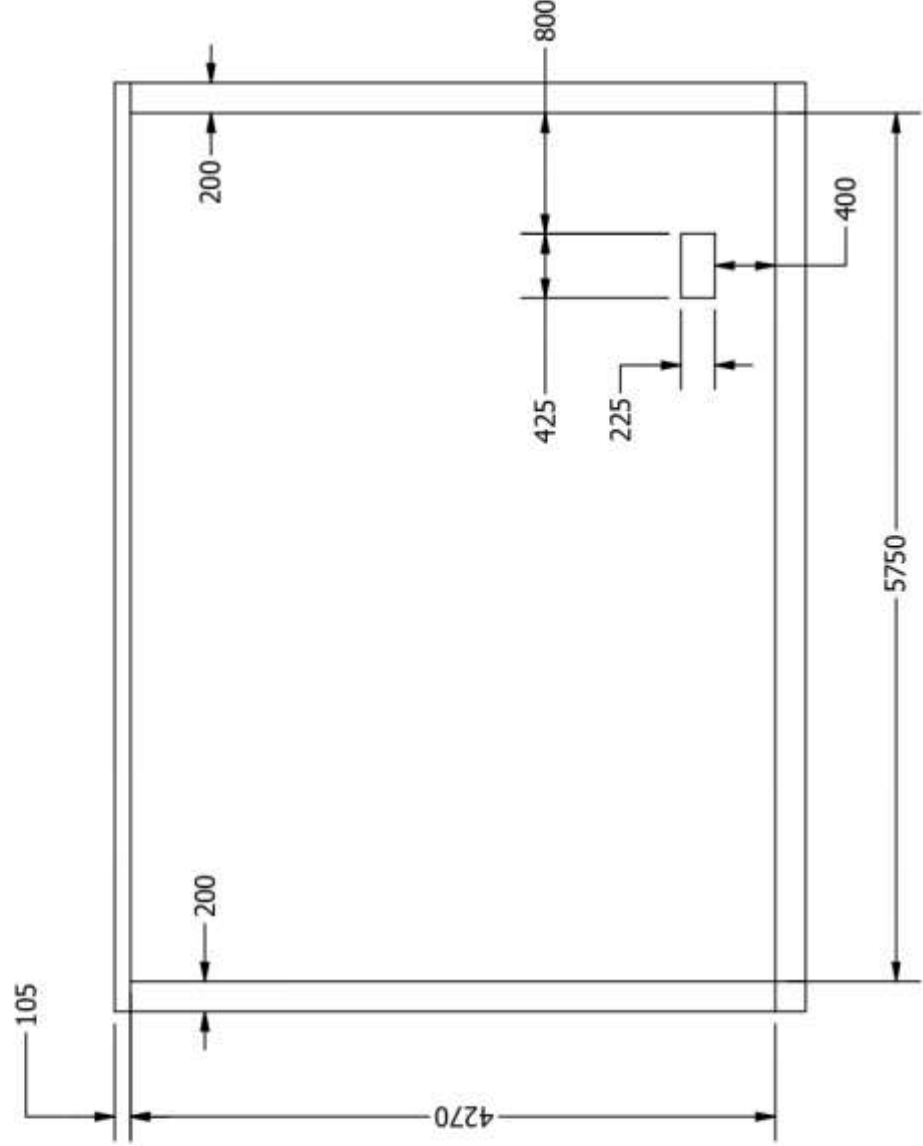
espol	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		Escala: 1:80	A4
	Planta Arquitectónica - Implantación		Diseño de Cámara Semianecoica	Fecha: 14/12/2022
Diseñado por: Juan Peralta Coello & John Pozo Villón		Unidad: mm		
Aprobado por: Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong		Revisado por: Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong		
		PL. No. 02		




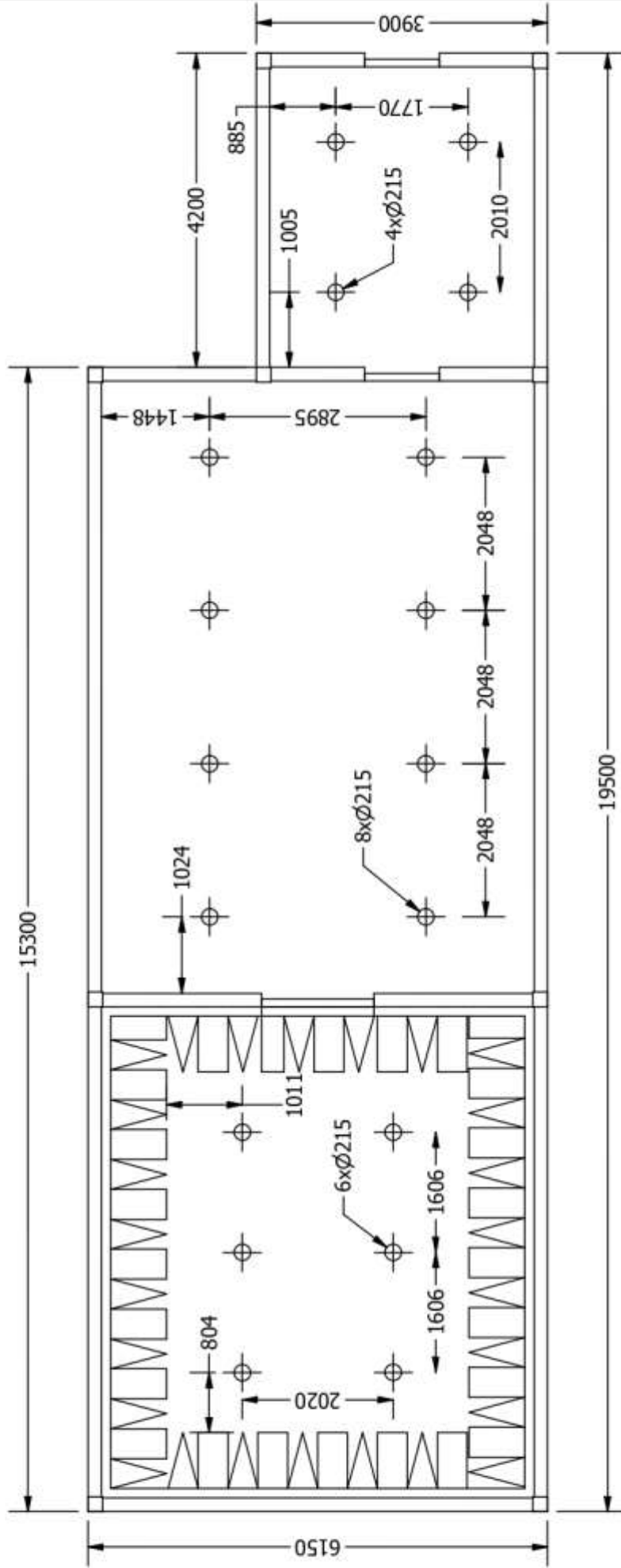
		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		Escala: 1:80	A4
		Vista lateral 1		Diseño de Cámara Semianecoica	Fecha: 14/12/2022
Diseñado por: Juan Peralta Coello & John Pozo Villón		Dibujado por: Juan Peralta Coello & John Pozo Villón		Unidad: mm	
Aprobado por: Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong		Revisado por: Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong		PL. No. 02	




		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		Escala: 1:80	A4
		Vista lateral 2		Diseño de Cámara Semianecolca	Fecha: 14/12/2022
Diseñado por: Juan Peralta Coello & John Pozo Vilión		Dibuñado por: Juan Peralta Coello & John Pozo Vilión		Unidad: mm	
Aprobado por: Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong		Revisado por: Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong		PL. No. 03	



		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		Escala: 1:50 A4
		Vista posterior		Fecha: 14/12/2022
Diseñado por: Juan Peralta Coello & John Pozo Villón		Diseño de Cámara Semianecolca		Unidad: mm
Aprobado por: Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong		Dibuñado por: Juan Peralta Coello & John Pozo Villón		PL. No. 04
Revisado por: Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong		Revisado por: Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong		



		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN		Escala: 1:80	A4
		Distribución de luminarias		Diseño de Cámara Semianecolca	Fecha: 14/12/2022
Diseñado por: Juan Peralta Coello & John Pozo Vilión		Dibujado por: Juan Peralta Coello & John Pozo Vilión		Unidad: mm	
Aprobado por: Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong		Revisado por: Galo Durazno, Jorge Silva, Carlos Yoong		PL. No. 06	