



Diseño de cerramiento acústico para el control de ruido de una zaranda en el área industrial

Juan Diego Úsuga Varela

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor

Silvio Andrés Salazar Martínez, Magíster (MSc) en Ingeniería

Asesor externo de la empresa Ventilación y Control Ambiental

Jorge Mario Hernández Torreglosa, Especialista (Esp) en ventilación y aire acondicionado

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	Úsuga Varela [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] J. D. Úsuga Varela, “Propuesta de diseño de cerramiento acústico para el control de ruido de una zaranda en el área industrial”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Pedro León Simanca.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
III. ALCANCE Y LIMITACIONES.....	11
IV. OBJETIVOS	12
V. MARCO TEÓRICO	13
El Sonido y el ruido.....	13
Componentes Del Sonido.....	13
Frecuencia del sonido.....	14
Propagación Del Sonido.....	15
Velocidad Del Sonido	16
Fuentes Acústicas	16
Presión Sonora.....	17
Nivel De Intensidad Del Sonido / Nivel De Presión Sonora (SPL)	17
Acústica.....	18
Acústica Medioambiental.....	19
Acústica Arquitectónica	19
Acondicionamiento Acústico	20
Aislamiento Acústico	20
VI. REFERENTES TEÓRICOS	20
Diseño acústico de recintos cerrados	20
Propagación del sonido en un recinto cerrado	21
Sonido reflejado	21
Sonido directo	22

Fenómenos acústicos para el diseño interior de recintos	22
Fenómenos acústicos dimensionales	25
Marco normativo	27
Criterios Acústicos Para Recintos	30
Curvas NC	30
Tiempo De Reverberación	32
Análisis de materiales y elementos para acondicionamiento acústico de recintos	33
Absorción de aire	35
Absorción de las superficies vibrantes.....	35
Materiales absorbentes.....	35
Materiales reflejantes	39
Materiales aislantes	39
Materiales absorbentes.....	39
Medición Del Sonido	41
Decibel	41
Instrumentación acústica.....	41
Sonómetro	41
VII. METODOLOGÍA	45
VIII. RESULTADOS Y ANÁLISIS	46
Planteamiento del problema	46
Valores de referencia.....	46
Diseño de control acústico de la zaranda	47
Evaluación de ruido antes de la implementación del control acústico.....	47
Niveles de ruido de referencia.....	48
Cálculo de atenuación acústica	48

Estimación de potencia sonora en campo abierto	48
Cálculo de atenuación acústica al interior del cerramiento.....	49
Definición de las cantidades de ruido a ser escuchadas por fuera, a un metro del cerramiento	50
Componentes del control acústico.....	51
Programa de cálculo y resumen de resultados	52
Cálculo de silenciador acústico tipo Splitter para el ingreso de aire.....	53
Implementación de control acústico para la zaranda	54
Recomendaciones de operación.....	54
Fotografías del cerramiento acústico.....	55
Evaluación de ruido luego de la implementación del control acústico	56
Comparación niveles de ruido antes y después del control acústico en zona de zaranda	56
Comparación niveles de ruido antes y después del control acústico en zona de portería	57
Comparación niveles de ruido evaluados respecto a lo esperado en diseño	58
Mapa de ruido de ruido generado por la zaranda antes y después del control acústico	58
VII. CONCLUSIONES	61
VIII. REFERENCIAS	62

LISTA DE TABLAS

TABLA I. Niveles de presión sonora correspondientes a sonidos y ruidos típicos, y valoración subjetiva asociada.....	18
TABLA II. Estándares máximos permisibles Res. 0627 de 2006.....	29
TABLA III. Curvas NC Recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalente en (dBA).	31
TABLA IV. Estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido	46
TABLA V. Niveles de ruido generados por la zaranda	47
TABLA VI. Niveles de ruido de referencia para NR 70, ISO 1996	48
TABLA VII. Cálculo de potencia sonora.....	49
TABLA VIII. Cálculo de L_p al interior del cerramiento	50
TABLA IX. Cálculo de pérdidas por transmisión y L_p al exterior del cerramiento.....	50
TABLA X. Componentes y características del cerramiento acústico	51
TABLA XI. Resultados de cálculo en altas frecuencias	52
TABLA XII. Cálculo del silenciador tipo Splitter	54
TABLA XIII. Niveles de presión sonora evaluados luego del control acústico	56
TABLA XIV. Reducción de ruido antes y después del control acústico	57
TABLA XV. Reducción de ruido antes y después del control acústico	57

LISTA DE FIGURAS

Fig. I. Mayor frecuencia, más ciclos en un segundo	15
Fig. II. Ejemplo de recorrido del sonido cuando existen las primeras reflexiones. Sofía Guzmán, 2019.....	22
Fig. III. Ejemplo de recorrido del sonido cuando existen las primeras reflexiones y como consecuencia las refracciones. Sofía Guzmán, 2019.....	23
Fig. IV. Ejemplo de recorrido sonido cuando hay absorción por parte de los materiales acústicos, cuando la energía choca con una superficie, no es la misma que cuando es apenas emitida. Sofía Guzmán, 2019	24
Fig. V. Difracción de una onda que se propaga a través del agua cuando atraviesa abertura de diferentes tamaños, (Carrión, 1998).....	25
Fig. VI. Ejemplo del fenómeno acústico reverberación “tiempo que se mantiene el sonido en el espacio una vez emitido”. Sofía Guzmán, 2019.....	25
Fig. VII. Curvas NC	31
Fig. VIII. Campo reverberante	32
Fig. IX. Absorción del sonido	34
Fig. X. Material absorbente a base de lana de vidrio (Calorcol).....	36
Fig. XI. Material absorbente a base de lana mineral (Calorcol)	36
Fig. XII. Material Absorbente a base de espuma de resina de melanina (Calorcol).....	37
Fig. XIII. Material absorbente a base de espuma de poliuretano (Calorcol)	37
Fig. XIV. Sonómetro SoundPro 3M.....	42
Fig. XV. Grafica de Ponderaciones en ‘A’, ‘C’ y ‘Z’	44
Fig. XVI. Panel acústico	51
Fig. XVII. Niveles de presión sonora al interior y exterior del cerramiento, teóricos	53
Fig. XVIII. Fotografías del cerramiento acústico	55
Fig. XIX. Comparación de niveles de presión sonora antes y después del cerramiento al interior y exterior del mismo.....	58
Fig. XX. Mapas de dispersión de ruido a nivel de piso y a nivel de plataforma de zaranda antes y después del control acústico, sin considerar ruido de fondo ni otras fuentes de ruido	60

RESUMEN

Este proyecto desarrollado con la empresa VECAM S.A.S, estudia el comportamiento del sonido dentro de un espacio interior, analizando las cualidades que determinan su calidad, así como su comportamiento en relación a diferentes materiales, considerándolo un factor importante a tomar en cuenta para el acondicionamiento acústico interior.

Se describe el proceso para obtener un diseño óptimo de acondicionamiento y aislamiento acústico para el cerramiento de una zaranda en el sector industrial. El análisis se enfocó en descubrir y mejorar las condiciones existentes acústicas del recinto.

El desarrollo del proyecto se dividió en tres etapas, donde, la primera correspondió a la medición y diagnóstico del recinto, en la que se hizo una observación y valoración del lugar, con el fin de conocer los distintos materiales, dimensiones, geometría y estructura del recinto. Adicionalmente, se realizaron cálculos y mediciones acústicas por medio de instrumentos especializados.

En la segunda etapa, se comparó la información obtenida con la información bibliográfica e investigación de las teorías acústicas para determinar el cumplimiento de las normas establecidas y recomendadas, de esta manera, establecer las soluciones para los problemas específicos identificados.

La tercera y última etapa se desarrolla en el marco de investigación de materiales que tienen un alto grado de eficiencia acústica. Estos materiales y su correcta implementación tienen como objetivo final evaluar, comprobar la efectividad de la solución planteada.

***Palabras clave* — Cerramiento acústico, zaranda, aislamiento, sonómetro, control de ruido.**

I. INTRODUCCIÓN

En las empresas industriales es muy común que la maquinaria utilizada para los procesos genere altos niveles de ruido, que pueden ocasionar inconvenientes de salud a los empleados, incomodidad en los sectores aledaños y sanciones legales, por ello es de suma importancia identificar los niveles de ruido y una solución más acertada para lograr un acondicionamiento acústico.

En los últimos años se ha producido un gran avance en lo que acondicionamiento acústico se refiere. Por un lado, se ha avanzado mucho en la tecnología de materiales. Se han creado nuevas fibras y tejidos con excelentes propiedades aislantes. Por otro lado, las técnicas constructivas también han avanzado bastante, desarrollándose nuevos diseños y conceptos arquitectónicos.

Este proyecto está conformado por un marco teórico donde se abordan conceptos del sonido, el ruido, la acústica, el diseño interior, el estudio de materiales para el acondicionamiento acústico y el mejoramiento del acondicionamiento acústico en el sector industrial con el fin de crear un ambiente donde el desempeño de los usuarios sea el correcto, acorde a la actividad destinada del espacio.

El acondicionamiento acústico parte del concepto de confort acústico, que se define como la situación en la que el nivel de ruido provocado por actividades humanas resulta adecuado para el descanso, la comunicación y la salud de las personas. Tiene como objetivo que, el sonido emitido sea propagado por igual en todas las direcciones que abarque el espacio, logrando un campo sonoro ideal.

Se realizará el diseño del cerramiento acústico para controlar el impacto del sonido que realiza la zaranda, y así tener un confort acústico para el personal de la empresa y habitantes aledaños.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La falta de control de las condiciones acústicas y emisiones de ruido de la zaranda conlleva a una fatiga auditiva, dificultad en la comprensión de los mensajes transmitidos y un entorno desagradable para las personas. Esta problemática, contribuye notablemente a “la disminución de la capacidad auditiva de uno o ambos oídos, parcial o total, permanente y acumulativa” como resultado, a la exposición a niveles perjudiciales de ruido en el ambiente laboral.

Lo anterior, deja como evidencia la importancia de crear soluciones de acondicionamiento y aislamiento acústico, en el interior, principalmente el tiempo de reverberación, el cual impide que los sonidos como el de la voz se escuchen con claridad.

El establecer una solución mediante un diseño acústico, surge para mejorar la calidad auditiva de los empleados y de los habitantes aledaños, aportando a la salud, desarrollo y tranquilidad de los individuos y su comunidad. De acuerdo con estas necesidades y condiciones acústicas evidenciadas en el recinto de la zaranda, surge la pregunta:

¿Podría un diseño acústico, para el recinto de la zaranda generar soluciones de mejora para la calidad auditiva y el confort de los espacios de las empresas del sector industrial?

III. ALCANCE Y LIMITACIONES

Alcances

- Proponer soluciones que permitan controlar el tiempo de reverberación para las actividades desarrolladas en el recinto.
- Proponer soluciones para el control de ruido al exterior del recinto.
- Seleccionar el material acústico para la solución de la problemática.
- Optimización del ruido en el recinto

Limitaciones

- El uso de equipos y dispositivos, con funcionalidades limitadas.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Diseñar el control acústico requerido para reducir el ruido producido por el funcionamiento de la zaranda de separación.

B. Objetivos específicos

- Evaluar el nivel de ruido producido por la zaranda utilizando criterios de desempeño previamente establecidos en diferentes normativas.
- Selección del material acústico para evitar la propagación del ruido.
- Diseñar los paneles acústicos y los silenciadores tipo splitter con los requerimientos de las normas.

V. MARCO TEÓRICO

Un parámetro de acondicionamiento acústico básicamente consiste en un sistema de materiales que permitan que las ondas sonoras se reflejen, absorban y transmitan en un determinado nivel de ruido. Se tienen las siguientes variables:

El Sonido y el ruido.

Es evidente que el sonido forma parte de la vida diaria del ser humano, es así como también el ruido crea efectos dentro del cuerpo y la mente. Es necesario conocer los conceptos básicos sobre el sonido y su origen, y como este es percibido por el ser humano, para así establecer parámetros de confort acústico dentro de un espacio. Existen una serie de variables que modifican la manera cómo se percibe el sonido, y cuando el sonido deja de ser estimulador y cuando es molesto, considerado ruido. El tema de la percepción es distinto para cada persona que sea usuaria del mismo espacio, ya que cada una de ellas es distinta, por lo que su nivel de tolerancia no es el mismo.

Desde el punto de vista de la física, el sonido es la resultante de que una fuente sonora, vibre y por ello origine una modificación en la presión del aire que rodea a la fuente a esto se añade lo que manifestó Antoni Carrión [1], “vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico y denso, el mismo que es capaz de producir una sensación auditiva”. Por esto, podemos decir que toda vibración de partículas en un medio elástico la podemos llamar como fuente de sonido.

Componentes Del Sonido

A partir de la vibración antes mencionada, las características existentes en un sonido o ruido, las cuales son: amplitud, frecuencia y longitud de onda.

Definiremos a la amplitud como el valor máximo de desplazamiento alcanzado. Amplitud del sonido, es el nivel sonoro, a mayor amplitud mayor sensación auditiva. De otro modo, podemos definir que la amplitud, es la distancia recorrida de una partícula desde su punto de reposo hasta su punto máximo en el eje vertical hablando gráficamente.

La frecuencia (f), como lo menciona Bartí [2], “es el número de vibraciones o de variaciones de la presión acústica por segundo, dando la sensación de tonalidad. Un sonido de baja frecuencia es un sonido de tonalidad grave. Un sonido de alta frecuencia es un sonido de tonalidad aguda”, agregando a lo anterior, es necesario aclarar la idea de oscilación, para que un cuerpo se escuche debe vibrar, ósea desplazarse en movimientos cíclicos, normalmente alrededor de un centro o punto de reposo cuando este cuerpo a recorrido los puntos de valor máximo y mínimos dentro de un determinado tiempo, se puede decir que la partícula ha realizado una oscilación completa.

Como último elemento encontramos la longitud de onda, “es la distancia entre dos puntos consecutivos del campo sonoro que hallan en el mismo esta de vibración en cualquier instante de tiempo”. Complementando, “la longitud de onda es la distancia entre dos crestas consecutivas del grafico que representa el movimiento ondulatorio” [3].

Frecuencia del sonido

Definiremos la frecuencia como la cantidad de oscilaciones que el cuerpo tiene en la unidad de tiempo (el segundo), así mismo, “El número de ciclos completos por segundo que tiene una onda es lo que se conoce como frecuencia. Por ejemplo 10 ciclos en un segundo son 10 Hertz y así sucesivamente como se muestra en (**Fig. I**)”. [4].

El oído humano presenta distinta sensibilidad respecto a las frecuencias, que es el factor que determinará el umbral de confort de una persona dentro de un espacio. Puede percibir ondas sonoras de frecuencias entre los 20 y los 20.000 Hz. Este rango de frecuencias varía entre las personas y disminuye con la edad.

Los sonidos con frecuencias inferiores a los 20 Hz se denominan infrasonidos, mientras que los que tienen una frecuencia superior a los 20 kHz se denominan ultrasonidos.

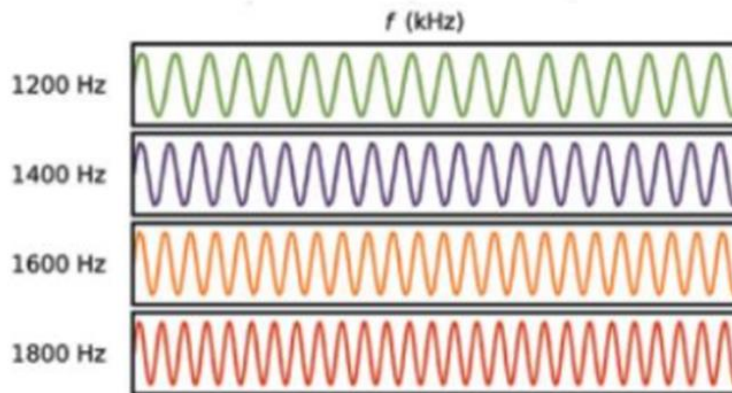


Fig. I. Mayor frecuencia, más ciclos en un segundo

Fuente: (Carrión, 1998)

Propagación Del Sonido

Las ondas de sonido son el ejemplo más común de ondas longitudinales. Se desplazan en cualquier medio material con una rapidez que depende de las propiedades del medio estas ondas se dividen en 3 categorías que son las ondas audibles, ondas infrasónicas y ondas ultrasónicas.

Es por esto por lo que: Bartí [2] afirma: “La onda acústica es un fenómeno asociado a una vibración, pero no comporta ningún desplazamiento físico de materia.

En una onda transversal, el desplazamiento de las partículas sobre su punto de equilibrio es perpendicular al sentido de propagación de la onda acústica”.

Éstas son las propiedades que definen al sonido y la propagación del mismo según Santiago Valero Granados [5], en el libro “Acústica aplicada al interiorismo”

Reflexión: Se produce, cuando una onda, que se propaga por un medio choca contra un obstáculo de propiedades elásticas distintas.

Refracción: Es la desviación que experimentan las ondas sonoras en la dirección de su propagación por un medio cuando el sonido pasa a un medio diferente, cambiando la velocidad de su propagación.

Difracción: Es el fenómeno de propagación no rectilínea que ocurre cuando una onda se encuentra con un obstáculo de dimensiones menores a su longitud de onda, con lo que es capaz de rodearlo.

Resonancia: Ocurre cuando hay un objeto interpuesto el camino de propagación de una onda, éste se pone a vibrar cuando recibe energía del movimiento ondulatorio. La energía absorbida se emplea en producir un movimiento de vibración del objeto entero y se dice que dicho cuerpo entra en resonancia con la onda recibida. Se ha de tener en cuenta que todos los cuerpos tienen frecuencias propias de vibración; si esa frecuencia propia coincide con la de la onda “resuenan” al paso de ésta.

Atenuación: Se produce cuando hay dos sonidos simultáneamente de dos frecuencias distintas, la intensidad de uno supera a la del otro en cantidad suficiente, el sonido del más débil puede llegar a ser inaudible.

Periodo: El periodo (T) es el tiempo requerido para que se realice un ciclo completo. Se calcula como el inverso de la frecuencia.

Velocidad Del Sonido

Carrión [1] afirma que: “La velocidad de propagación del sonido (c), es función de la elasticidad y densidad del medio de propagación. Debido a que, en el aire, ambas magnitudes dependen de la presión atmosférica estática P0 y de la temperatura, considerando lo anterior las condiciones normales de 1 atmosfera de presión y 22°C de temperatura, la velocidad de propagación del sonido es de aproximadamente, 345m/s”.

Existe una relación importante entre la velocidad del sonido (c), la longitud de onda (λ) y la frecuencia (f).

$$c = \lambda * f \quad \text{ó} \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad \text{ó} \quad f = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

Fuentes Acústicas

“Se llama fuente acústica a cualquier elemento que radia sonido. Si escuchamos un sonido, es porque en algún lugar alguna cosa vibra. Las vibraciones son siempre el origen del sonido. Las vibraciones pueden ser perceptibles por el cuerpo humano en función de su amplitud y frecuencia. Las frecuencias si son de amplitud suficiente se pueden detectar fácilmente a través del cuerpo,

mientras que las altas frecuencias no son perceptibles corporalmente, pero si podemos llegar a escuchar su efecto, cuando una superficie está vibrando” [2].

Las fuentes sonoras pueden ser direccionales o bien omnidireccionales. Las primeras radian el sonido en una dirección preferente del espacio, por ejemplo, una bocina. Las segundas radian el sonido en todas las direcciones del espacio. Esta propiedad de la fuente depende de sus dimensiones, de las frecuencias radiadas y de su ubicación [1].

Presión Sonora

La presión sonora constituye la manera más habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro. Una fuente sonora produce una cierta cantidad de energía por unidad de tiempo, esto es una cierta potencia sonora. Esta es una medida básica de cuanta energía acústica puede producir una fuente sonora con independencia del contorno. Cuando medimos una el nivel de presión sonora, esta no solo dependerá de la potencia radiada y de la distancia radiada respecto de la fuente, también dependerá de la cantidad, de energía absorbida y de la cantidad de energía transmitida.

Puesto que la presión sonora es una magnitud variable de un punto a otro, en ciertas circunstancias es conveniente utilizar como medida de amplitud del sonido otras magnitudes en lugar de presión, siendo estas magnitudes tales como: Potencia, presión e intensidad.

Nivel De Intensidad Del Sonido / Nivel De Presión Sonora (SPL)

El ruido, igual que sucede con otros contaminantes, afecta al ser humano. Las afectaciones pueden ser de tipo fisiológico o bien psicológico. Las afectaciones sobre el oído son probablemente las más conocidas. También se producen afectaciones fisiológicas en diferentes partes y tejidos del cuerpo humano. El oído es un órgano sensible que está sometido al desgaste igual que otros sentidos como la vista. Por lo anteriormente mencionado, podemos notar que el sentido auditivo también tiene límites, en la **TABLA I**, se presenta una serie de niveles de presión sonora correspondiente a sonidos y ruidos típicos, junto con la valoración subjetiva asociada:

TABLA I. Niveles de presión sonora correspondientes a sonidos y ruidos típicos, y valoración subjetiva asociada

FUENTE SONORA	NIVEL DE PRESIÓN SONORA SPL (dB)	VALORACIÓN SUBJETIVA DEL NIVEL
Despegue avión (a 60 m)	120	Muy elevado
Edificio en construcción	110	
Martillo neumático	100	
Camión pesado (a 15 m)	90	Elevado
Calle (ciudad)	80	
Interior automóvil	70	
Conversación normal (a 1 m)	60	Moderado
Oficina, aula	50	
Sala de estar	40	
Dormitorio (noche)	30	Bajo
Estudio de radiodifusión	20	

Fuente: (Carrión, 1998)

Acústica

El campo de la acústica, como muchos otros campos de la ciencia, es extremadamente amplio. Engloba disciplinas tan diversas como la acústica ambiental, la acústica musical, la psicoacústica, la acústica arquitectónica, entre otras.

La acústica comenta Leo Beranek [6], “está entrando en una nueva era: la era de la ingeniería de precisión. Hace cien años la acústica era un arte. Como instrumento de medición, los ingenieros utilizaban en este campo especialmente sus oídos”. Las únicas fuentes de ruido controladas disponibles eran silbatos, gongs y sirenas.

La acústica es una de las ciencias clásicas más jóvenes. La primera referencia escrita donde se conjugan criterios acústicos y arquitectónicos corresponde al romano Vitruvio en el siglo I antes de Cristo. Sin embargo, hasta finales del siglo XIX, la acústica era considerada una ciencia inexacta y, en consecuencia, no resulta extraño que continuamente aparecieran explicaciones a través de las cuales pretendían aclarar los “misterios” de esta materia.

Acústica Medioambiental

El ruido afecta a millones de personas. Algunos estudios indican la tendencia a la concentración de la población en grandes ciudades las próximas décadas, el elevado precio de la vivienda, la necesidad de ganar espacio reduciendo al mínimo el grosor de las estructuras, la proliferación de equipos de sonido con mejores prestaciones deja entrever que presumiblemente aumentara el número de quejas por motivo de ruido ambiental.

La lucha contra el ruido es un tema que cada día preocupa más a la sociedad, la contaminación acústica es, hoy por hoy, la asignatura pendiente de las administraciones, las cuales disponen, en general, de pocos recursos para afrontar las soluciones correctas”.

Según todo lo anterior y al poder evidenciar la problemática que esto acarrea según Barti [2] “es de vital importancia seguir un protocolo que dictamine donde está el problema, haciendo unas mediciones acústicas que realmente valoren la molestia que perciben las personas, la evolución de un suceso acústico viene determinada por numerosos parámetros. La actitud subjetiva del individuo, el entorno físico en el que se percibe el ruido, el nivel de presión acústica, percibido, su espectro en frecuencia, y su evolución temporal son algunos de los factores que determinan la forma de evaluar los sonidos”.

Es por lo anterior que la acústica medioambiental se encarga de realizar un correcto procedimiento para cumplir con los lineamientos que sea coherentes con la salud de las personas y con el normal funcionamiento de las actividades diarias.

Acústica Arquitectónica

La acústica arquitectónica estudia los fenómenos vinculados con una propagación adecuada, fiel y funcional del sonido en un recinto. Esto lleva de la mano el también conocido acondicionamiento acústico. Los recintos (establecidas para un uso determinado), deben tener cualidades acústicas óptimas para dicha aplicación. Debido a estas cualidades acústicas se puede percibir y señalar el comportamiento del sonido, entre las cuales se encuentra el tiempo de reverberación, reflexiones tempranas, ecos, resonancias, entre otras.

Acondicionamiento Acústico

El acondicionamiento acústico se sitúa como elemento primordial para una sala o recinto, el no tener un óptimo acondicionamiento implica que el esfuerzo de las personas al hablar sea mayor ya que debido a las reflexiones, a las carencias de ciertas frecuencias o al exceso de estas, el público al escuchar no logre percibir el mensaje o música con claridad.

El acondicionamiento señala todas aquellas sugerencias, normas y recomendaciones las cuales dirigen el proceso para corregir falencias sonoras causadas por la geometría estructural y por el revestimiento de cada uno de los recintos, para así lograr alcanzar los indicadores de los parámetros determinados por las normas.

Aislamiento Acústico

El aislamiento acústico es la acción la cual permite proteger a un recinto del ingreso de cualquier sonido molesto, su función principal se concentra en reducir el nivel de presión sonora con el objetivo de reducir la energía de transmisión de una fuente sonora. La esencia del aislamiento radica en los materiales implementados los cuales poseen propiedades adecuadas para poder reflejar o absorber una parte significativa de la energía entrante.

Cuando una onda sonora encuentra un obstáculo debido a cierta presión sonora hace que este entre en vibración, parte de esta energía es reflejada y la que logra atravesar se transmite dentro del recinto y pone en movimiento el aire, generando así sonido.

VI. REFERENTES TEÓRICOS

Diseño acústico de recintos cerrados

La energía de las ondas sonoras en recintos cerrados, se refleja sucesivamente en las paredes, suelo y techo del espacio. El comportamiento del sonido tiene varios parámetros acústicos medibles, sin embargo, es necesario definir los fenómenos que mejor describen al mismo, teniendo en cuenta que la confortabilidad para los usuarios del espacio es a donde se quiere llegar. El sentido

de la audición es multidimensional, por lo que no se puede definir el acondicionamiento acústico por un solo parámetro [1].

El acondicionamiento acústico, finalmente es un cambiar de materiales para ajustar a las condiciones y lograr los efectos que sean gratos al oído.

Para conseguir un adecuado confort acústico, es preciso que:

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

Propagación del sonido en un recinto cerrado

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

Se puede decir que, en un punto cualquiera del recinto, la energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora, mientras que la energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el rayo sonoro, así como del grado de absorción acústico de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies implicadas. Entonces, cuando mayor sea la distancia recorrida y más absorbente sean los materiales empleados, menor será la energía asociada tanto al sonido directo como a las sucesivas reflexiones [1].

Sonido reflejado

El sonido reflejado incide sobre el receptor después de la llegada del sonido directo, su atenuación se debe a tres causas: Las dos primeras serán las mismas que afectan al sonido directo (la divergencia esférica y la absorción del aire), y la tercera se deberá a la absorción de los materiales que constituyen el acabado superficial de los cerramientos y a la frecuencia.

“Se dice que una reflexión es de orden “n” cuando el rayo sonoro asociado ha incidido “n” veces sobre las diferentes superficies del recinto antes del llegar al receptor” [1].

Sonido directo

En un punto cualquiera del recinto, la energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora. Este sonido llevará una atenuación debido a la divergencia esférica y a la absorción del aire. El aire absorbe más las altas frecuencias [7].

Fenómenos acústicos para el diseño interior de recintos

Reflexión y refracción

“Cuando la onda sonora choca con una superficie lisa, solida, plana y de dimensiones superiores a su longitud de onda, esta es devuelta en dirección opuesta formando con la superficie el mismo ángulo de incidencia”, a este fenómeno se le llama reflexión [8].

El eco es un fenómeno debido a la reflexión sobre un obstáculo de grandes dimensiones. Para que el oído humano sea capaz de diferenciar entre el sonido emitido y el reflejado la distancia mínima hasta el muro debe ser de 17 m (considerando como mínimo la velocidad del sonido 340 m/s) [1].

(Fig. II).

Primeras Reflexiones

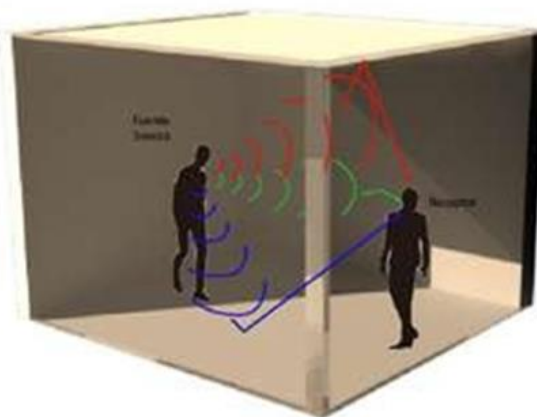


Fig. II. Ejemplo de recorrido del sonido cuando existen las primeras reflexiones. Sofía Guzmán, 2019.

La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda al cambiar de medio. Sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios

y si estos tienen índices de refracción distintos. La refracción se origina por el cambio de velocidad que experimenta la onda al cambiar de medio.

La refracción también puede producirse dentro de un mismo medio que no es homogéneo.

Generalmente hay reflexión y refracción parciales, es decir una parte de la energía sonora se refleja y otra se refracta. (**Fig. III**).

Refracción

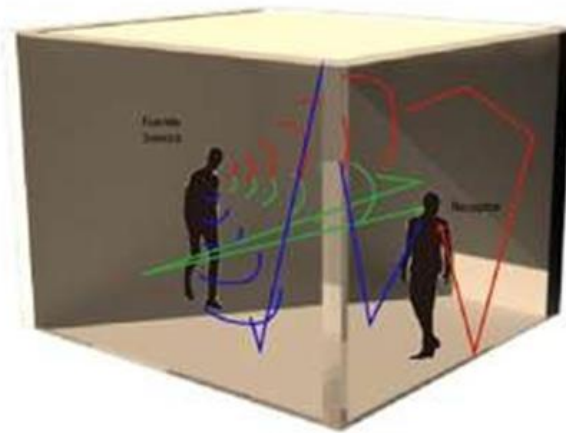


Fig. III. Ejemplo de recorrido del sonido cuando existen las primeras reflexiones y como consecuencia las refracciones. Sofía Guzmán, 2019.

Absorción

Es una superficie que, gracias a consumir energía sonora dentro de ella, la energía que refleja es menor que la energía que incide sobre ella. Un absorbente exhibe el denominado coeficiente de absorción, que es el resultado del cociente entre la energía absorbida y la energía incidente sobre la superficie bajo prueba [1].

Cuando el sonido incide sobre una superficie parte de la energía se disipa en forma de calor, otra parte se refleja y otra se transmite hacia el otro lado. (**Fig. IV**).

El sonido se disipa en el aire por una combinación de mecanismos incluyendo:

- Absorción clásica causada por procesos de transporte de la física clásica.
- Absorción molecular causada por relajación rotacional.
- Absorción molecular causada por relajación vibracional del oxígeno y nitrógeno.

Absorción

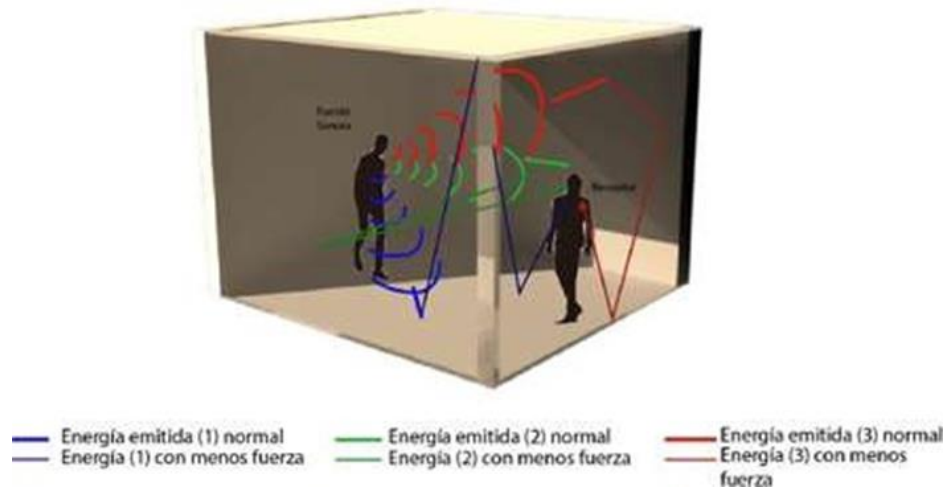


Fig. IV. Ejemplo de recorrido sonido cuando hay absorción por parte de los materiales acústicos, cuando la energía choca con una superficie, no es la misma que cuando es apenas emitida. Sofía Guzmán, 2019

Difracción

La difracción se produce básicamente a bajas frecuencias (sonidos graves) y disminuye a medida que la frecuencia aumenta. Ello significa que dichas frecuencias bajas serán las que se percibirán de forma más notoria. [1].

Así mismo, se puede generalizar de la siguiente manera: la existencia de un obstáculo entre una fuente ruidosa y un receptor atenúa de forma considerable las componentes de alta frecuencia del ruido, pero no así las de baja frecuencia, que siguen siendo percibidas a menos que las dimensiones del obstáculo sean desmesuradamente grandes.

Este fenómeno de la difracción tiene un carácter más general que el que se acaba de exponer, ya que también se presenta cuando una onda atraviesa una abertura de dimensiones pequeñas respecto a la longitud de onda. (**Fig. V**).

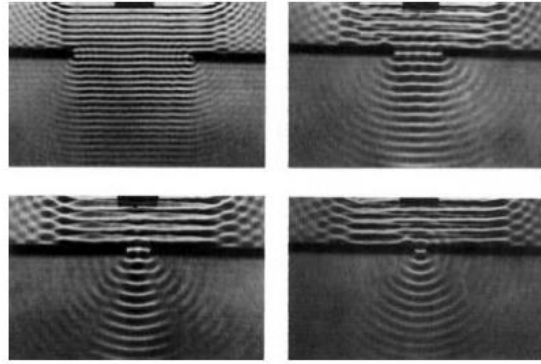


Fig. V. Difracción de una onda que se propaga a través del agua cuando atraviesa abertura de diferentes tamaños, (Carrión, 1998)

Fenómenos acústicos dimensionales

Reverberación

Luego de la revisión bibliográfica realizada se puede establecer que el fenómeno que se produce en locales cerrados, debido a la reflexión del sonido en el techo, suelo y paredes se denominan reverberación. (**Fig. VI**)

Es el fenómeno acústico de reflexión que se produce en un recinto cuando una frente de onda o campo directo incide contra las paredes, suelo y techo del mismo. El conjunto de dichas reflexiones constituye el campo reverberante. El parámetro que permite cuantificar el grado de reverberación de una sala es el tiempo de reverberación [1].

Reverberación

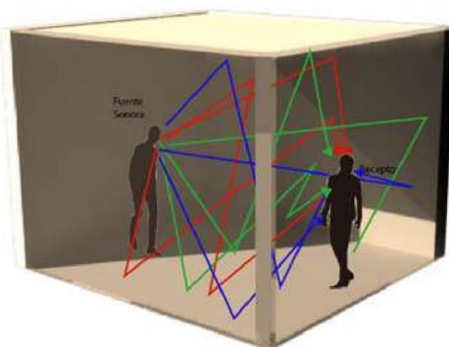


Fig. VI. Ejemplo del fenómeno acústico reverberación “tiempo que se mantiene el sonido en el espacio una vez emitido”. Sofia Guzmán, 2019

Tiempo de reverberación

La reverberación es un fenómeno derivado de la reflexión del sonido dentro de un espacio cerrado, consiste en una ligera prolongación por las diferentes superficies. Cuando una fuente sonora emite una energía acústica en un recinto, normalmente, las ondas sonoras progresan libremente, pero después de cierto tiempo, que depende de la distancia de la fuente a las superficies del contorno, estas ondas empiezan a reflejarse, superponiéndose con las ondas incidentes.

El tiempo de reverberación, es el tiempo necesario para que la intensidad acústica de un sonido en régimen estacionario se reduzca una millonésima de su valor inicial, contando a partir del instante en que la fuente deja de emitir. Se entiende como el tiempo de persistencia del sonido en el recinto hasta hacerse inaudible. Es el indicador acústico más representativo del comportamiento de un recinto, al ser más expresivo en términos globales y del que dependen de otros [7].

Se debe tomar en cuenta también el aforo, si un recinto está diseñado acústicamente sin tener en cuenta la ocupación de las personas, sucederá que, al llenarse, aumente de manera notable la absorción, disminuyendo la reverberación, con lo cual el recinto variará sus condiciones de audición [5].

La manera más habitual de calcular su valor es mediante ecuaciones basadas en la teoría estadística, siendo la más conocida y empleada la fórmula de W. Sabine:

$$T = \frac{0,161 * V}{A} \quad (2)$$

V=Volumen del recinto en m³

A=Absorción acústica total del recinto en m²

Esta fórmula indica que el tiempo de reverberación es el mismo en todos los puntos de un recinto, independientemente de la posición de la fuente dentro de él. La influencia de las soluciones absorbentes sobre el tiempo de reverberación no depende de su localización sino de su superficie de aplicación [9].

Marco normativo

Para el desarrollo de este proyecto por medio de las mediciones requeridas para el mismo, se deben seguir diferentes pasos para obtener los resultados óptimos y con estos mismos, de manera precisa y efectiva plantear un proceso de solución adecuada para el recinto en estudio. En este orden de ideas encontramos las normas ISO, las cuales son establecidas por el Organismo Internacional de Estandarización. Las cuales componen todo un sistema de herramientas, guías, recomendaciones, aplicables a gestiones específicas.

Como en toda organización se establece una jerarquía que se extiende de lo global a lo local, por lo tanto, es concerniente ajustar al proyecto el soporte metodológico de las normas técnicas colombianas (NTC), así mismo, recomendaciones expedidas por las entidades gubernamentales en cada uno de los sectores a los que se les exige el cumplimiento y verificación de las normas. A continuación, se describe las normas implementadas en el proyecto:

Normas Internacionales

ISO 9613-2

la ISO 9613 especifica un método ingenieril para calcular la atenuación de sonido durante la propagación en exteriores para predecir los niveles de ruido ambiental a una distancia de una variedad de fuentes. El método. El método predice el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A para la propagación a partir de fuentes de emisión de sonido conocido. EL método además predice un promedio de nivel de presión sonora ponderado A. El promedio de nivel de presión sonora ponderado A abarca niveles para una amplia variedad de condiciones meteorológicas. EL método especificado en esta parte de ISO 9613 consiste específicamente de algoritmos de banda de octava (con frecuencias centrales nominales a partir de 63 Hz y hasta 8 kHz) para calcular la atenuación de sondo el cual se origina a partir de una fuente puntual o un grupo de fuentes puntuales. La fuente (o fuentes) pueden estar en movimiento o estacionarias.

Los términos específicos son proporcionados en los algoritmos para los siguientes efectos físicos:

- Divergencia geométrica
- Absorción atmosférica
- Efecto del suelo
- Reflexiones de superficies
- Apantallamiento por obstáculos.

Información adicional concerniente a la propagación a través de casas bosques y sitios industriales. Este método es aplicable en la práctica a una gran variedad de fuentes y ambiente de ruido. Es aplicable, directa o indirectamente, a muchas situaciones concernientes a tráfico rodado o de ferrocarriles, fuentes de ruido industrial, actividades de construcción y muchas otras fuentes de ruido. Esto no es aplicable a ruido de aviones en vuelo u ondas explosiones de la minería o militares u operaciones similares.

Para aplicar el método de esta parte de ISO 9613, varios parámetros necesitan ser conocidos con respecto a la geometría de la fuente y del ambiente, las características de la superficie del suelo, y de la fuerza de la fuente en términos de niveles de presión sonora en bandas de octava para direcciones relevantes a la propagación [10].

ISO 1996-2

Esta norma describe cómo se pueden determinar los niveles de presión sonora que van a servir de base para la evaluación de los límites del ruido ambiental o para la comparación de escenarios en estudios espaciales. Esta determinación puede efectuarse a través de la medición directa y extrapolación de los resultados de la medición por medio de cálculos. Este documento está previsto para ser utilizado principalmente en exteriores, pero también se ofrece cierta orientación para mediciones en interiores. El mismo es flexible y, en gran medida, el usuario determina el trabajo de medición y, por consiguiente, la incertidumbre de la medición, que se determina y se reporta en cada caso. Así, no se establecen límites para la incertidumbre máxima permitida. Con frecuencia, los resultados de la medición se combinan con cálculos para corregir las condiciones de funcionamiento o propagación de referencia diferentes de las reinantes durante la medición real. Este documento puede aplicarse a todo tipo de fuentes de ruido ambiental, tales como ruido de tráfico rodado y ferroviario, ruido de aeronaves y ruido industrial [11].

Normas Nacionales

Resolución 0627 De 2006

Esta resolución del ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, la cual “establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental”, a lo largo y ancho del territorio nacional. Por medio de esta resolución, se constituyen los diferentes parámetros para cumplir las normas ambientales mínimas y las regulaciones aplicables a todas las actividades que puedan producir de manera directa o indirecta daños ambientales [12].

Esta resolución contempla las aplicaciones para las mediciones de ruido como: unidades de medida, parámetros de medida, tiempos de medición, niveles de presión sonora, cálculos, estándares máximos permisibles expresados en decibeles y horarios, como se muestra a continuación:

TABLA II. Estándares máximos permisibles Res. 0627 de 2006

Sector	Subsector	Estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido en dB(A)	
		Día	Noche
Sector A. Tranquilidad y Silencio	Hospitales, bibliotecas, guarderías, sanatorios, hogares geriátricos.	55	50
Sector B. Tranquilidad y Ruido Moderado	Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hotelería y hospedajes.	65	55
	Universidades, colegios, escuelas, centros de estudio e investigación. Parques en zonas urbanas diferentes a los parques mecánicos al aire libre.		
Sector C. Ruido Intermedio Restringido	Zonas con usos permitidos industriales, como industrias en general, zonas portuarias, parques industriales, zonas francas.	75	75
	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos.	70	60
	Zonas con usos permitidos de oficinas.	65	55
	Zonas con usos institucionales.		
	Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre.	80	75
	Residencial suburbana. Destinada a explotación agropecuaria.	55	50

Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado	Zonas de Recreación y descanso, como parques naturales y reservas naturales.		
-------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------	--	--

Criterios Acústicos Para Recintos

El hecho que exista confort acústico representa que el campo sonoro en el cual se desarrollan distintas actividades no generara ningún tipo de incomodidad significativa a las personas, intérpretes y espectadores presentes en el recinto.

Es por lo anterior que, se determinan los “objetivos y/o parámetros acústicos” básico a cumplir para que dichos espacios cumplan con los requerimientos según su actividad.

Estos parámetros consideran cumplir con lo siguiente:

- Garantizar la existencia de confort acústico
- Asegurar una correcta inteligibilidad de la palabra.
- Comprobar que el ruido de fondo en el recinto sea suficientemente bajo.
- Eliminar la existencia de ecos, ni focalizaciones de sonido ni eco flotante.
- Corroborar que el nivel de campo de reverberante sea igualmente, suficientemente bajo.

Curvas NC

Parámetro que por sus siglas en inglés “Noise Criteria”, (criterio para la evaluación de ruido), el cual estima el nivel de aislamiento acústico en base a un determinado ruido de fondo y la actividad del recinto, este parámetro es muy comúnmente utilizado en proyectos de acústica arquitectónica para poder controlar el ruido y este no perturbe la comunicación en una sala.

“Se considera ruido de fondo todo aquel ruido que se percibe en una sala cuando la misma no se realiza ninguna actividad. Dicho ruido puede ser debido al sistema de climatización, a las demás instalaciones eléctricas y/o hidráulicas, e incluso puede provenir del exterior del recinto (por ejemplo, el ruido de tráfico)” [1].

“Las curvas NC son, además, utilizadas de forma generalizada para establecer los niveles de ruido máximos recomendables para diferentes tipos de recintos en función de su aplicación (oficinas, salas de conferencias, teatros, salas de conciertos, etc.) (Fig. VII).

Se dice que un recinto cumple una determinada especificación NC (por ejemplo: NC 20) cuando los niveles de ruido de fondo, medidos en cada una de dichas bandas de octava, están por debajo de la curva correspondiente”.

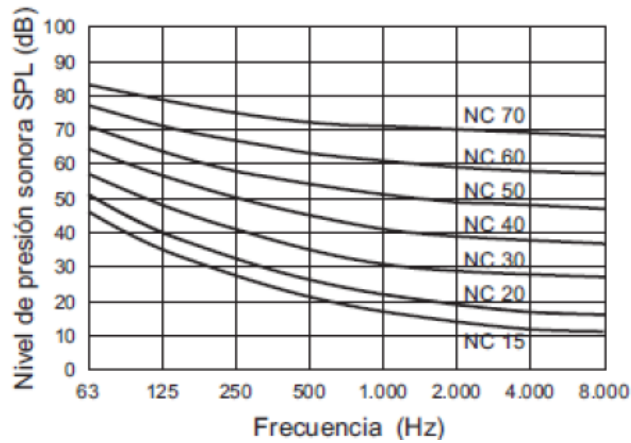


Fig. VII. Curvas NC

“Según se puede observar, las curvas NC siguen de forma aproximada la evolución de la sensibilidad del oído en función de la frecuencia. Ello significa que, para una determinada curva NC, los niveles SPL máximos permitidos a bajas frecuencias (sonidos graves) son siempre más elevados que los correspondientes a frecuencias altas (sonidos agudos), ya que el oído es menos sensible a medida que la frecuencia considerada es menor”. **TABLA III.**

TABLA III. Curvas NC Recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalente en (dBA).

TIPOS DE RECINTOS	CURVA NC RECOMENDADA	EQUIVALENCIA EN dBA
Estudios de grabación	15	28
Salas de conciertos y teatros	15-25	28-38
Hoteles (habitaciones individuales)	20-30	33-42
Salas de conferencias / Aulas	20-30	33-42
Despachos de oficinas / Bibliotecas	30-35	42-46
Hoteles (vestíbulos y pasillos)	35-40	46-50
Restaurantes	35-40	46-50
Salas de ordenadores	35-45	46-55
Cafeterías	40-45	50-55
Polideportivos	40-50	50-60
Talleres (maquinaria ligera)	45-55	55-65
Talleres (maquinaria pesada)	50-65	60-75

Tiempo De Reverberación

Se considera al tiempo de reverberación como el parámetro principal en un estudio de acondicionamiento acústico, mediante el cual se puede determinar la disminución en la intensidad del sonido en caer 60 decibeles, por lo que se puede decir que este parámetro mide la velocidad con la que un sonido desaparece en un recinto.

“Uno de los requisitos básicos para conseguir un buen confort acústico y una correcta inteligibilidad de la palabra es que el nivel de campo reverberante $L_r(r)$, sea suficientemente bajo. La zona de campo reverberante es aquella donde predomina el sonido reflejado y reverberante, y a ella pertenecen todos los puntos situados a una distancia de la fuente sonora superior a la distancia crítica D_c [1], (Fig. VIII).

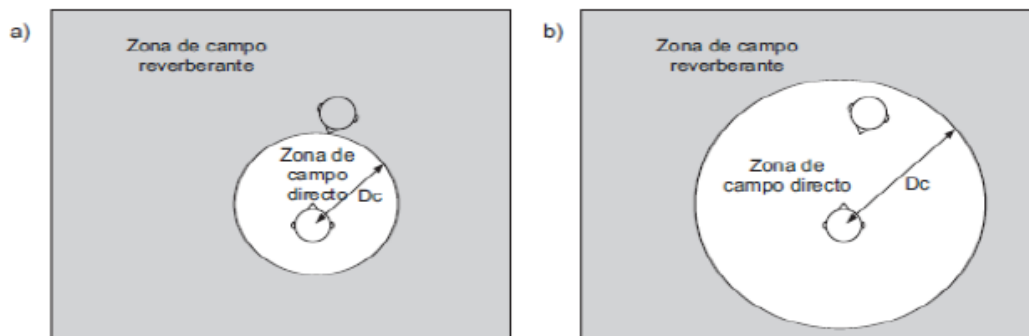


Fig. VIII. Campo reverberante

Si el espacio objeto de estudio tiene un gran volumen y/o está escasamente o nualmente tratado con materiales absorbentes (espacios excesivamente “vivos”), el nivel de campo reverberante resultará muy alto, ya que el tiempo de reverberación del mismo será demasiado elevado. Ello significa que la distancia crítica D_c será pequeña. Por lo tanto, a poco que uno se aleje de la fuente sonora, se hallará dentro de la zona de campo reverberante donde la inteligibilidad de la palabra no es buena.

Según Carrión, se establece que: “en general, el valor más adecuado de RT_{mid} depende tanto del volumen del recinto como de la actividad a la que se haya previsto destinarlo”. Por lo anteriormente mencionado en la siguiente tabla, se presentan valores de RT_{mid} recomendados para diferentes tipos de recintos.

Para el cálculo del tiempo de reverberación, en general, “la fórmula clásica por excelencia y aceptada como de referencia a nivel internacional por su sencillez de cálculo, es la denominada fórmula de Sabine”, la fórmula anteriormente mencionada contempla todos los elementos para poder construir un diagnóstico acústico, como se presenta a continuación:

$$RT_{mid} = \frac{0,161V}{A_{tot} + 4mV} = (\text{en segundos}) \quad (3)$$

Análisis de materiales y elementos para acondicionamiento acústico de recintos

El éxito en el diseño acústico interior de cualquier tipo de recinto, es la elección de materiales que se utilizarán como revestimientos, una vez establecido el volumen del espacio y las superficies en el mismo, con la intención de obtener unos tiempos de reverberación óptimos.

Absorción del sonido

En un recinto cualquiera, la reducción de la energía asociada a las ondas sonoras, tanto en su propagación a través del aire como cuando inciden sobre sus superficies límite, es determinante en la calidad acústica final del mismo. Dicha reducción de energía, en orden de mayor a menor importancia, es debida a una absorción producida por:

- Personas y puestos de trabajo.
- Materiales absorbentes, colocados sobre determinadas zonas de modo que de revestimiento al recinto.
- Todas aquellas superficies límite del recinto que pueden entrar en vibración como puertas, ventanas, paredes separadoras ligeras.
- El aire
- Materiales rígidos y no porosos utilizados en la construcción de paredes y techo del recinto como el hormigón.

“Cuando la onda sonora choca con un material poroso o fibroso, las paredes de los canales formados por sus celdas o fibras generan fricción en la onda y, de esta manera parte de la energía se transforma en energía calórica, estos se llaman absorbentes simples” [8], (**Fig. IX**).

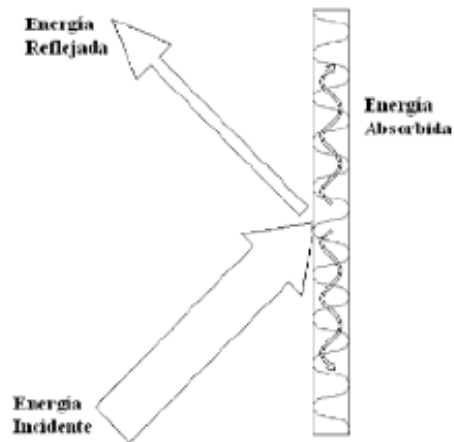


Fig. IX. Absorción del sonido

Fuente: (Jaramillo, 2007)

En el diseño acústico de salas frecuentemente se enfrenta el problema de modificar las reflexiones que ocurren en las superficies límites de la sala. Por ejemplo, en fábricas es necesario que el ruido emitido por las maquinas al menos no se propague a sectores lejanos por medio de las reflexiones; en este caso se está interesado en lograr que las superficies involucradas sean lo más absorbentes posible. Por otra parte, en el caso de auditorios y salas de concierto se debe lograr suficiente intensidad del sonido en todos los sectores aprovechando las reflexiones, pero evitar al mismo tiempo un aumento excesivo de la reverberación, pues esto podría perjudicar la inteligibilidad.

Absorción de los materiales utilizados en la construcción de las paredes y techo de un recinto

Los materiales muy rígidos y con porosidad nula, dan lugar a una mínima absorción del sonido. Si bien, desde un punto de vista físico, la disipación de energía en forma de calor, y por tanto la absorción del sonido, se produce en las capas de aire adyacentes a cada una de las superficies consideradas a efectos prácticos, este fenómeno habitualmente se representa en forma de coeficientes de absorción asignados a dichas superficies. Su efecto es únicamente apreciable cuando no existe ningún material absorbente en el recinto, ya sea en forma de revestimiento de alguna de sus superficies, o bien de personas presentes en el mismo.

Si bien los valores son muy bajos, un material con mayor rugosidad presenta coeficientes de absorción más elevados. Ello se debe a que su superficie es mayor y, por tanto, la capa de aire adyacente donde se produce la disipación de energía también lo es [1].

Absorción de aire

La absorción producida por el aire solo es significativa en recintos de grandes dimensiones, a frecuencias relativamente altas (≥ 2 kHz) y con porcentajes bajos de humedad relativa (del orden de un 10 a un 30%). Dicha absorción se representa por la denominada constante de atenuación del sonido en el aire [1].

Absorción de las superficies vibrantes

La presencia en una sala de superficies límite susceptibles de entrar en vibración, como, por ejemplo, puertas, ventanas y paredes separadoras ligeras, también da lugar a una cierta absorción que en principio conviene tener presente [13].

Materiales absorbentes

La absorción que sufren las ondas sonoras cuando inciden sobre los distintos materiales absorbentes utilizados como revestimiento de las superficies límites del recinto, así, como su dependencia en función de la frecuencia, varían considerablemente de un material a otro. Los materiales absorbentes se utilizan generalmente para conseguir uno de los siguientes objetivos:

- Obtención de los tiempos de reverberación más adecuados en función de la actividad (o actividades) a la cual se haya previsto destinar el espacio objeto de diseño.
- Prevención o eliminación de ecos.
- Reducción del nivel de campo reverberante en espacios ruidosos (restaurantes, fábricas, estaciones, etc.)

Estos materiales presentan un gran número de canales a través de los cuales la onda sonora puede penetrar. La disipación de energía en forma de calor se produce cuando la onda entra en contacto con las paredes de dichos canales. Cuanto mayor sea el número de canales, mayor será la absorción producida.

El mecanismo de absorción del sonido antes mencionado es propio de todos los materiales porosos, siempre y cuando los poros sean accesibles desde el exterior. Normalmente estos materiales están formados por sustancias fibrosas o granulares a las que se les confiere un grado suficiente de compacidad a través de un proceso de prensa o de tejeduría, estos se fabrican básicamente a partir de:

- Lana de vidrio (**Fig. X**)
- Lana mineral (**Fig. XI**)
- Espuma a base de resina de melanina (**Fig. XII**)
- Espuma de poliuretano (**Fig. XIII**)



Fig. X. Material absorbente a base de lana de vidrio (Calorcol)

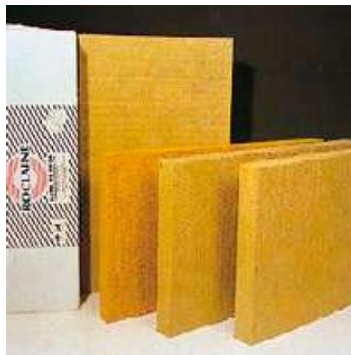


Fig. XI. Material absorbente a base de lana mineral (Calorcol)

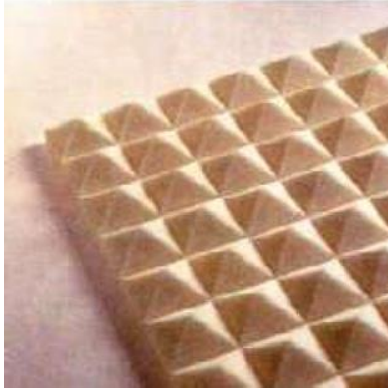


Fig. XII. Material Absorbente a base de espuma de resina de melanina (Calorcol)



Fig. XIII. Material absorbente a base de espuma de poliuretano (Calorcol)

Variación de la absorción en función del espesor del material

Siguiendo la hipótesis anterior de que el material absorbente está colocado delante de una pared rígida y partiendo de que su espesor inicial es D , al aumentar dicho espesor también aumenta la absorción que produce, especialmente a frecuencias bajas y medias.

El hecho de que la pared sea rígida obliga a que las partículas de aire situadas en sus inmediaciones no se muevan, es decir, a que su velocidad sea nula. Además, al alejarse de la pared, los valores de dicha velocidad seguirán siendo próximos a cero.

Otra forma de justificar el aumento de absorción con el espesor consiste en tener presente que el camino recorrido por la onda sonora en el interior del material de mayor grosor es también mayor, y, además, que la velocidad de las partículas de aire en el interior del nuevo tramo de material adquiere valores más elevados [13].

Variación de la absorción en función de la porosidad del material

De igual manera siguiendo la misma hipótesis, al aumentar la porosidad del material, también aumenta la absorción a todas las frecuencias. Este efecto es de esperar, ya que la penetración de la onda sonora incidente es mayor a medida que se incrementa el grado de porosidad [13].

Variación de la absorción en función de la densidad del material

Si la densidad del material es baja, existen pocas pérdidas por fricción y, en consecuencia, la absorción es pequeña. A medida que la densidad va aumentando, se produce un incremento progresivo de absorción hasta llegar a un valor límite, a partir del cual la absorción disminuye, debido a que existe una menor penetración de la onda sonora en el material, es decir, una mayor reflexión de energía. Desde un punto de vista práctico, es aconsejable que los materiales absorbentes utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos tengan una densidad situada entre, aproximadamente, 40 y 70 kg/ m³, no debiéndose superar en ningún caso los 100 kg/m³, respectivamente [13].

Variación de la absorción en función de la densidad de la distancia del material a la pared rígida

Si se pretenden obtener coeficientes de absorción elevados a bajas frecuencias, no es imprescindible hacer uso de materiales muy gruesos. Basta con utilizar un material con un espesor medio y colocarlo a una cierta distancia de la pared rígida, sabiendo que la máxima absorción se producirá a aquella frecuencia para la cual la distancia “d” del material a la pared sea igual a $\lambda / 4$ (en ese caso, λ es la longitud de onda del sonido cuando se propaga a través del aire existente entre el material y la pared).

Cuanto mayor sea “d” menor será la frecuencia a la que la absorción será máxima. Por lo tanto, para aumentar la absorción será máxima, así, para aumentar la absorción a bajas frecuencias, es preciso incrementar la separación entre el material y la pared [13].

Materiales reflejantes

Están formados por materiales lisos no porosos totalmente rígidos, capaces de reflejar la mayor parte de la energía que incide sobre ellos. Estos materiales pueden ser: Reflectores Planos, Reflectores curvos.

Están diseñados para mejorar la difusión del sonido en la sala, aportando una dispersión espacial y temporal de las ondas acústicas que contribuye a distribuir homogéneamente el sonido por toda la sala. Ayudan a romper las reflexiones indeseadas y reducir los efectos de los modos resonantes, sin disminuir el tiempo de reverberación.

Los difusores acústicos utilizan superficies con geometrías irregulares y patrones matemáticos para dispersar uniformemente, y en múltiples direcciones la energía sonora [14].

Materiales aislantes

Aquellos que no dejan pasar el ruido, lo reflejan o rebotan. Suelen ser rígidos, compactos, densos y no porosos: casi impenetrables (especialmente el aire).

Las ondas de sonido se absorben suavizando el eco y la reverberación, sin embargo, a diferencia de los materiales absorbentes, los aislantes no permiten que el sonido se disperse en el material, puesto que es poco denso o poroso [15].

Materiales absorbentes

Son de estructura granular o fibrosa, siendo importante el espesor de la capa y la distancia de esta a la pared. El espesor del material se elige de acuerdo con el valor del coeficiente de absorción empleado, ya que, si es demasiado delgado, se reduce el coeficiente de absorción a bajas frecuencias, mientras que si es muy grueso resulta muy caro.

En la práctica, el empleo de materiales fibrosos absorbentes se asocia a varias cubiertas perforadas que pueden ser de madera contrachapada, cartón, yeso entre otros.

En un panel acústico, el incremento de su espesor aumenta la absorción principalmente a las frecuencias de 250, 500 y 1000Hz, con un efecto prácticamente despreciable fuera de este rango.

Si se monta este material dejando un espacio de aire entre el mismo y la pared, aumenta la absorción a 250Hz y algo a 125Hz. Existe también una disminución característica de absorción a 500Hz en todos los montajes con espacio de aire, pero no existe o es muy pequeño el cambio a frecuencias más altas. La mayoría de los materiales presentan cambios insignificantes en la absorción a medida que el espacio de aire se incrementa de 20 a 40 cm [16].

La absorción por frecuencia sonora en estos materiales depende básicamente de los siguientes factores:

Espesor del material: a mayor espesor del material menor la frecuencia a partir de la cual la absorción es mayor.

Montaje: el montaje del material con respecto a la superficie a tratar también influye en el comportamiento del material. La distancia de montaje es crucial a la hora de proyectar absorbentes acústicos en cualquier proyecto de ingeniería acústica. Variando la distancia de montaje se puede hacer que un material como la lana mineral de roca de 5 cm de espesor tenga un máximo de absorción a 125 Hz. Para realizar eso, se debe separar dicho material a una distancia de 68 cm. Definido esto por la longitud, dividiendo la velocidad del sonido a 23° entre la frecuencia a estudio, ejemplo $\lambda = 343(m/s)/125Hz = 2.7m$.

En la mayoría de los casos para absorber bajas frecuencias resulta inviable realizar estos montajes por la evidente reducción del espacio, al menos en paredes [14].

Otra variable de montaje es el uso de pliegues en el material. Como ejemplo una cortina plegada al 180% frente a una cortina extendida, la absorción a lo largo de la frecuencia será más distribuida en frecuencia debido a las distintas distancias de absorción que dan los pliegues.

Porosidad del material y densidad: a mayor porosidad de un material, mayor absorción a todas las frecuencias, si la densidad del material es baja las pérdidas por fricción son menores y en consecuencia la absorción acústica disminuye en todo el rango espectral. Sin embargo, a medida que la densidad del material aumenta la absorción también lo hace hasta un valor límite de densidad en el que la penetración de las ondas acústicas empieza a disminuir y en consecuencia la absorción acústica [14].

Medición Del Sonido

Decibel

Tal vez la herramienta más útil jamás creada para los profesionales de audio es el decibelio (dB). Permite los cambios en los parámetros del sistema tales como la potencia, voltaje, o la distancia al estar relacionados con cambios de nivel al ser escuchados por un oyente. En resumen, el decibelio es una forma de expresar “cuanto” de una manera que sea relevante para la percepción humana de la sonoridad.

A diferencia de las unidades de medida, el decibel, es una unidad que se utiliza para expresar la relación entre dos valores de presión sonora, o tensión y potencia eléctrica (aunque nos centraremos solamente en la presión sonora). Su nombre se deriva del científico e inventor inglés, Alexander Graham Bell, que, con sus trabajos con el habla, (técnica de discurso en tonos claros), sus experimentos con el sonido, (construcción de máquina que simulaba la voz humana) y su invención del teléfono. Como se afirmó arriba, el decibelio se presta para medir distintos valores por fuera del fenómeno del sonido, por lo que es necesario especificar a qué medida será utilizado.

Instrumentación acústica

El equipo básico para medir una señal acústica es el sonómetro. Es un dispositivo electrónico destinado a proporcionar una medida objetiva y repetible de la presión sonora [1].

Los datos que nos proporciona el sonómetro son sobre la intensidad del sonido más no la calidad del mismo.

Sonómetro

“Debido a la complejidad del funcionamiento del oído humano, hasta el momento actual no ha sido posible diseñar un aparato de medida objetiva del sonido que sea capaz de dar unos resultados del todo equivalentes, para cualquier tipo de sonido”, más, sin embargo, el alcance de la tecnología nos asemeja cada vez más, (junto con cálculos y algoritmos integrados) a un punto más exacto de referencia de escucha e incluso hasta imperceptibles [1].

“los sonómetros pueden ser de valores instantáneos o integradores y que, de la mano a normas internacionales vigentes actualmente, se consideran cuatro tipos de equipo de medida consolidados en:

Tipo 0: sonómetros con las mayores exigencias, adecuados para los trabajos de investigación en laboratorio.

Tipo 1: sonómetros adecuados para trabajos de campo de precisión

Tipo 2: sonómetros con exigencias menores, apropiados para trabajos de prospección general.

Tipo 3: sonómetro válido que únicamente ofrecen un nivel aproximado.

El sonómetro SoundPro hace fácil documentar y analizar las exposiciones al ruido, este instrumento portátil incluye dos sonómetros virtuales que toman bandas completas o a tercios de octava con medición en tiempo real simultáneamente con sonido de banda ancha y características históricas entrando en intervalos entre un segundo a sesenta minutos. Reúne todos los requisitos para la medición de ruido y el análisis de frecuencia, Este equipo integrador de precisión e impulsos reúne todas las normativas (clase 1 EN/IEC 61672, ANSI S1.4-1983, ANSI S1.43-1997 EN/IEC61260, etc.).

A continuación, se muestra el sonómetro utilizado para medir las diferentes áreas en campo:



Fig. XIV. Sonómetro SoundPro 3M

Las ponderaciones frecuenciales que más aparecen en un sonómetro son 'A', 'C' y 'Z' y debajo se detalla una breve explicación de cada una de ellas.

Ponderación 'A'

La ponderación 'A' es la estándar de las frecuencias audibles diseñadas para reflejar la respuesta al ruido del oído humano, que no es muy sensible a frecuencias bajas y altas, pero sí lo es entre 500 Hz y 6 kHz.

El filtro de ponderación 'A' cubre el rango completo de frecuencia de 20 Hz a 20 kHz, pero la forma se aproxima a la sensibilidad de frecuencia del oído humano. Así que el valor ponderado en A de una fuente de ruido es una aproximación a cómo percibimos el ruido.

Las mediciones hechas con ponderación 'A' se indican así "dB(A)" para informar que son decibelios ponderados en 'A'.

Ponderación 'C'

La ponderación 'C' es la estándar de las frecuencias audibles usadas comúnmente para la medición del nivel de presión Sonora Peak.

Las mediciones hechas con ponderación 'C' se indican así "dB(C)" para informar que son decibelios ponderados en 'C'.

Ponderación 'Z'

La ponderación Z es una respuesta de frecuencia plana entre 10Hz y 20kHz ± 1.5 dB excluyendo la respuesta de micrófono.

Las mediciones hechas con ponderación 'Z' se indican así "dB(Z)" para informar que son decibelios ponderados en 'Z'. (**Fig. XV**)

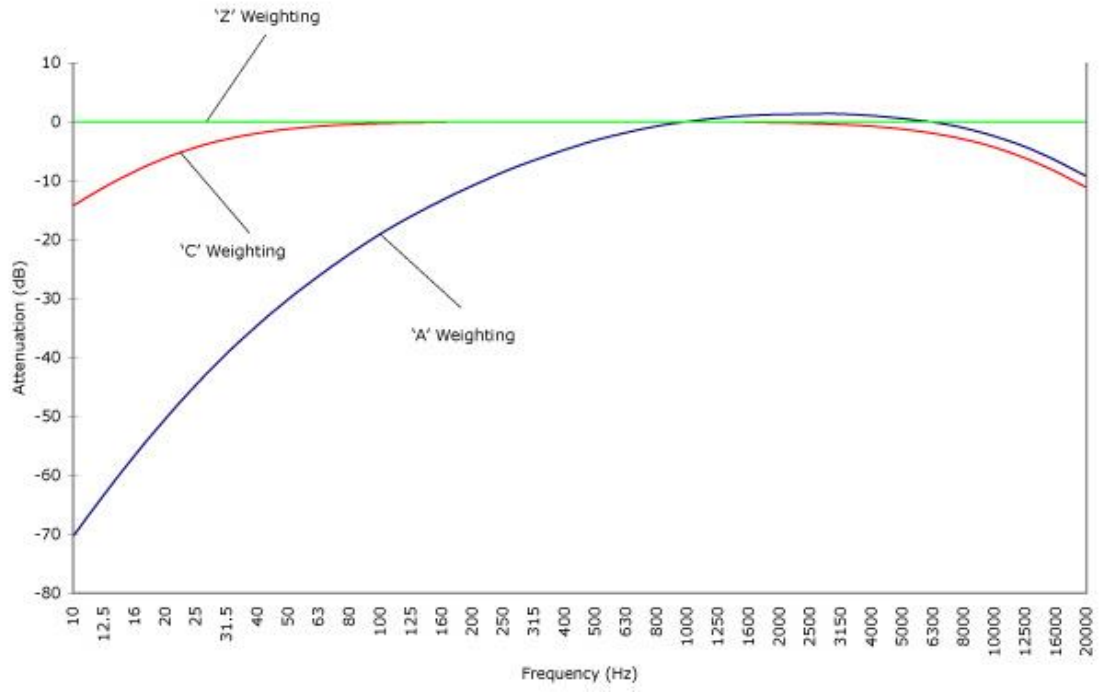


Fig. XV. Grafica de Ponderaciones en 'A', 'C' y 'Z'

VII. METODOLOGÍA

El aislamiento acústico total de un recinto se determina mediante el aislamiento acústico de todos los límites y depende tanto del nivel de ruido existente en el exterior del recinto como del nivel de ruido máximo admisible en el interior del recinto.

Realizar un estado del arte o estudio de la bibliografía disponible, de modo de involucrarse en el tema de acústica.

Estudio de acuerdo a Normas y criterios existentes de los requerimientos acústicos básicos y de aislación para este tipo de lugares.

Determinar los niveles y espectros del ruido en el interior y exterior del recinto.

Realización de una caracterización teórica del recinto en cuanto a geometría, capacidad y ubicación.

Análisis de los resultados obtenidos en la evaluación.

Determinar los niveles máximos de presión acústica permitidos en el interior, de acuerdo con los diferentes índices de valoración existentes, según el empleo que se vaya dar al recinto.

Determinar los niveles de aislamiento de las superficies límites y calcular el aislamiento acústico.

Determinar el nivel de ruido existente en el recinto y seleccionar el sistema de construcción más adecuado y conveniente según las características del espacio para las superficies límites.

Diseñar paneles acústicos y silenciadores tipo splitter con las diferentes medidas tomadas del área.

VIII. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Planteamiento del problema

Una empresa dedicada a la fabricación de cal viva cuenta con una zaranda para la separación de rocas y arena. Este proceso genera un nivel de ruido que excede los valores permisibles de exposición, por lo que la empresa ha decidido implementar una solución que le permita disminuir los niveles de ruido y cumplir con las normativas nacionales e internacionales.

Valores de referencia

Los valores de referencia para los niveles máximos de ruido generados durante la operación normal de la zaranda deben ser los recomendados por la Resolución 0627 de 2006 del Ministerio de Medioambiente, los cuales son mostrados en la **TABLA IV**.

TABLA IV. Estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido

Sector	Subsector	Estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido en dB(A)			
		Día	Noche		
Sector A. Tranquilidad y Silencio	Hospitales, bibliotecas, guarderías, sanatorios, hogares geriátricos.	55	50		
Sector B. Tranquilidad y Ruido Moderado	Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hotelería y hospedajes.	65	55		
	Universidades, colegios, escuelas, centros de estudio e investigación.				
Sector C. Ruido Intermedio Restringido	Parques en zonas urbanas diferentes a los parques mecánicos al aire libre.	75	75		
	Zonas con usos permitidos industriales, como industrias en general, zonas portuarias, parques industriales, zonas francas.				
	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos.			70	60
	Zonas con usos permitidos de oficinas.			65	55
	Zonas con usos institucionales.				
	Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre.			80	75
Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado	Residencial suburbana.	55	50		
	Rural habitada destinada a explotación agropecuaria.				
	Zonas de Recreación y descanso, como parques naturales y reservas naturales.				

Diseño de control acústico de la zaranda

A continuación, se presentan las evaluaciones de ruido generado por la zaranda sin ningún control acústico y los cálculos y diseño del cerramiento implementado para la reducción de ruido requerida.

Evaluación de ruido antes de la implementación del control acústico

Con el fin de conocer los niveles de ruido generados en la zaranda, se realizaron evaluaciones de los niveles de ruido en operación normal. En dichas evaluaciones se tomaron los niveles equivalentes de ruido en dB(Z) en cada uno de los espectros de frecuencia, desde 125 Hz hasta 4000 Hz, con el fin de conocer en qué frecuencias se presentan los mayores niveles de ruido, debido a que el diseño de control acústico se debe realizar en cada una de las frecuencias que excedan la condición de riesgo, en mayor cantidad de decibeles. En la **TABLA V** se describen los niveles de ruido máximos evaluados.

TABLA V. Niveles de ruido generados por la zaranda

Nivel de presión sonora Lp dB(Z)								
Punto de evaluación		Frecuencia (Hz)						Nivel equivalente Leq dB(A)
#	Descripción	125	250	500	1000	2000	4000	
1	Cerramiento segundo nivel	87,5	92,8	97,0	98,5	99,8	96,1	109,1
2	Cerramiento segundo nivel	82,2	93,6	96,7	97,4	98,8	94,1	108,5
3	Cerramiento segundo nivel	85,3	93,6	96,0	97,7	98,9	94,6	108,6
4	Alrededor de zaranda	88,5	97,2	99,9	100,3	101,1	96,5	110,8
5	Alrededor de zaranda	88,3	93,5	98,5	97,2	98,7	94,1	108,5
6	Alrededor de zaranda	88,4	97,7	98,5	99,5	100,6	95,8	110,3
7	Cerramiento primer nivel	90,0	96,1	98,7	100,5	101,5	96,7	111,0
8	Cerramiento primer nivel	93,8	96,8	98,5	100,2	102,2	96,8	111,6
9	Cerramiento primer nivel	88,9	95,6	96,7	100,0	100,3	96,5	110,2
10	Cerramiento primer nivel	85,8	92,1	94,3	95,3	96,1	93,2	105,8
11	Costado de la portería	84,6	71,4	74,0	72,7	72,5	66,6	83,4

Niveles de ruido de referencia

De acuerdo a la norma colombiana el nivel de ruido requerido para una empresa del sector industrial, es de 75 dB(A).

Según la norma colombiana el nivel de ruido requerido para el vecino más cercano a la empresa, es de 75 dB(A), según la Resolución 0627 de 2006, para un “Sector C. Tranquilidad y Ruido Intermedio Restringido”. Por lo anterior, para el diseño del control acústico se consideró para el cálculo de atenuación, la selección de un NR 70, según la ISO 1996, cuyos niveles de ruido por frecuencia se muestran en la **TABLA VI**.

TABLA VI. Niveles de ruido de referencia para NR 70, ISO 1996

F(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
NR-70 Lp dB(Z)	82.9	77.1	73	70	67.5	65.7

Cálculo de atenuación acústica

A continuación, se presentarán paso a paso los cálculos realizados de atenuación acústica para la reducción de ruido en inmediaciones la zaranda.

Estimación de potencia sonora en campo abierto

Para el diseño adecuado del control acústico, primero se procede a calcular la potencia sonora (L_w) producida por la zaranda, teniendo en cuenta los niveles de presión sonora (L_p) evaluados alrededor, con el fin de estimar el cambio en los niveles de presión sonora de la fuente una vez se encierre. En la **TABLA VII** se presenta el cálculo de la potencia sonora.

TABLA VII. Cálculo de potencia sonora

Parámetro	Frecuencia						Leq dB(A)
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
Corrección	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1,0	Calculado
Lp medido	95,4	101,6	103,6	104,8	106,0	101,1	110,5
Lp reflexiones	92,6	99,2	101,3	102,5	103,8	98,8	108,2
Lp directo	92,2	97,9	99,7	100,8	102,1	97,2	106,6
Lw	109,6	115,3	117,1	118,3	119,5	114,6	124,0

Cálculo de atenuación acústica al interior del cerramiento

Para determinar los niveles de presión sonora en cada frecuencia, una vez se han realizado los cerramientos con el material absorbente dispuesto hacia la parte interna, se utiliza la siguiente expresión:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (4)$$

Donde, L_p es el nuevo nivel de presión sonora al interior del cerramiento; L_w es la potencia sonora, calculada anteriormente; Q es el factor de direccionalidad, el cual de acuerdo a la disposición de la fuente corresponde a uno (1); r es la distancia de la fuente al punto de medición internamente, en este caso sería uno (1); y R es la constante del recinto, la cual es calculada teniendo en cuenta los elementos constructivos de las paredes y los coeficientes de absorción acústica de los mismos.

En la **TABLA VIII** se muestra el cálculo de los niveles de presión sonora al interior del cerramiento, teniendo en cuenta el material absorbente en las paredes y los espacios abiertos que quedarán por el proceso. Como se puede observar, el nivel de presión al interior del cerramiento se reducirá de 110,5 dB(A) a 108,8 dB(A).

TABLA VIII. Cálculo de Lp al interior del cerramiento

Parámetro	Frecuencia						Leq dB(A)
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
Corrección	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1,0	Calculado
Lw	109,6	115,3	117,1	118,3	119,5	114,6	124,0
Lp sin encerrar	95,4	101,6	103,6	104,8	106,0	101,1	110,5
Lp reflexiones	98,1	100,3	100,6	101,8	103,3	98,3	107,7
Lp directo	88,0	93,7	95,5	96,7	97,9	93,0	102,4
Lp interior	98,5	101,1	101,8	103,0	104,4	99,4	108,8

Definición de las cantidades de ruido a ser escuchadas por fuera, a un metro del cerramiento

Para determinar los niveles de presión sonora en cada frecuencia, al exterior del cerramiento, se debe restar a los niveles de presión sonora del interior del cerramiento, el respectivo valor de pérdidas por transmisión (TL), de acuerdo a la masa por unidad de área de las paredes, según la siguiente formula:

$$TL_{material} = 20 \log MF - 47 \quad (5)$$

Donde, M corresponde a la masa de las paredes, en kg/m² y F la respectiva frecuencia de análisis en Hz. Para un cálculo conservador, se recomienda restarle 5 dB adicionales a la expresión anterior.

En la **TABLA IX** se muestran los respectivos TL por frecuencia y los valores de presión sonora esperado al exterior del cerramiento.

TABLA IX. Cálculo de pérdidas por transmisión y Lp al exterior del cerramiento

Parámetro	Frecuencia						Leq dB(A)
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
Lp interior	98,5	101,1	101,8	103,0	104,4	99,4	108,8
TL	15,8	21,8	27,8	33,8	39,9	45,9	
Lp exterior	82,7	79,3	73,9	69,1	64,6	53,6	76,1

Componentes del control acústico

A continuación, en la **TABLA X** se indican los componentes y características del cerramiento acústico para la zaranda de acuerdo a los cálculos acústicos realizados:

TABLA X. Componentes y características del cerramiento acústico

COMPONENTE	CARACTERISTICAS
Paredes, techo y ventanas	Exterior en lámina metálica A-36 calibre 12 Interior en Lana mineral de roca de 2" de espesor y densidad de 80 kg/m ³ Protección de material acústico en Malla IMT 20 calibre 12
Silenciador tipo Splitter	Exterior en lámina metálica A-36 calibre 12 Bandejas en lámina metálica A-36 calibre 16 con relleno en Lana mineral de roca de 2" de espesor y densidad de 80 kg/m ³ Protección de material acústico en Malla IMT 20 calibre 12

NOTA: Todos los elementos metálicos irán protegidos con acabado en poliuretano en color gris con un espesor final entre 4 y 5 mils.

En la (**Fig. XVI**) se muestran una fotografía del panel utilizado para el cerramiento acústico.

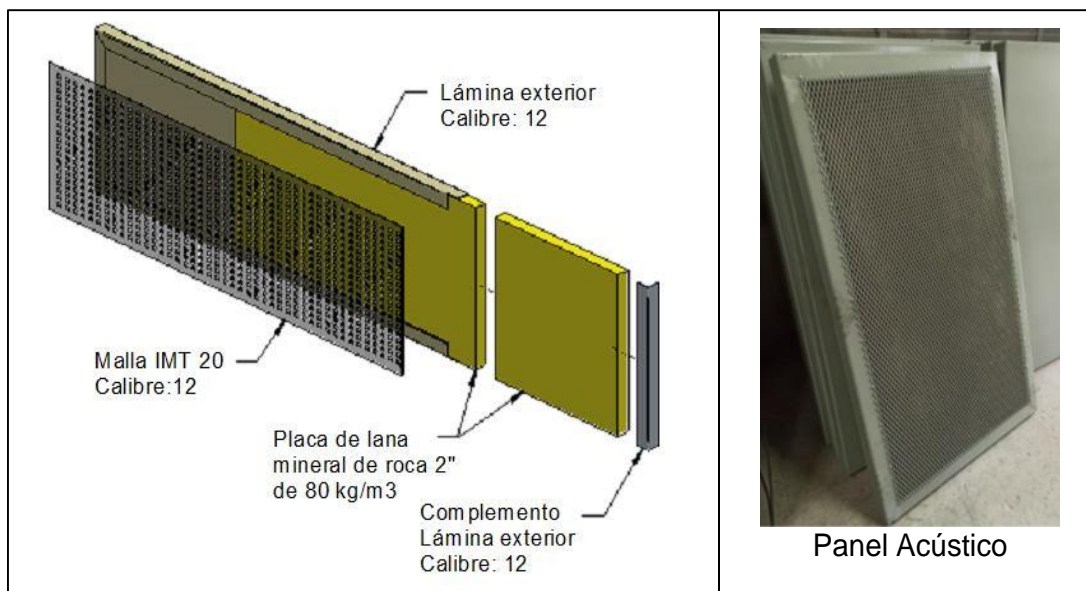


Fig. XVI. Panel acústico

Programa de cálculo y resumen de resultados

Por medio de un programa de cálculo realizado en la empresa VECAM S.A.S, se determinan las especificaciones de los materiales del cerramiento, (espesores del material acústico y calibres de la lámina de los paneles) que garanticen la disminución del ruido.

A continuación, en la **TABLA XI** se presenta un resumen con los resultados de los cálculos donde se puede observar el VALOR FINAL RESULTANTE TEÓRICO DE 76.1 dB(A) calculado para las altas frecuencias, medido a un metro de distancia desde la pared del control acústico implementado.

TABLA XI. Resultados de cálculo en altas frecuencias

DIMENSIONES DEL ENCERRAMIENTO Y UBICACIÓN DE LA FUENTE DENTRO DEL MISMO									
Ancho (B)	5,7	Largo (A)	10	Alto (H)	4,4	Peso/área paredes	22	Corrección por directividad	3 dB
Distancia 'x' desde encerramiento a fuente	4	Distancia a la otra pared	5	Distancia 'y' desde encerramiento a fuente	2,35	Distancia a la otra pared	2,35		2,35
NIVELES DE ABSORCIÓN EN PAREDES									
Piso		57,0 m ²	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	
			1,14	1,71	1,71	1,71	2,28	3,99	
Pared Norte	Pared	44,0 m ²	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03	
			3,52	4,84	2,20	1,32	0,88	1,32	
	Tratamiento acústico	44,0 m ²	0,26	0,68	1,14	1,13	1,06	1,07	
			11,44	29,92	50,16	49,72	46,64	47,08	
Pared Sur	Pared	43,6 m ²	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03	
			3,49	4,80	2,18	1,31	0,87	1,31	
	Tratamiento acústico	43,6 m ²	0,26	0,68	1,14	1,13	1,06	1,07	
			11,34	29,65	49,70	49,27	46,22	46,65	
	Espacios abiertos	0,4 m ²	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
			0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	
Pared Este	Pared	25,1 m ²	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03	
			2,01	2,76	1,25	0,75	0,50	0,75	
	Tratamiento acústico	25,1 m ²	0,26	0,68	1,14	1,13	1,06	1,07	
			6,52	17,05	28,59	28,34	26,58	26,84	
Pared Oeste	Pared	25,1 m ²	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03	
			2,01	2,76	1,25	0,75	0,50	0,75	
	Tratamiento acústico	25,1 m ²	0,26	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	
			6,52	17,05	17,05	17,05	17,05	17,05	
Techo	Pared	57,0 m ²	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05	
			2,85	2,28	1,14	2,28	2,85	2,85	
	Tratamiento acústico	20,0 m ²	0,26	0,68	1,14	1,13	1,06	1,07	
			5,20	13,60	22,80	22,60	21,20	21,40	
Absorción total	Sabinos	251,8	56	127	178	176	166	170	
RESULTADOS NIVELES DE POTENCIA SONORA EN CAMPO CERRADO									
	Parámetro	Frecuencia						Leq dB(A)	
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz		
	Corrección	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1,0	Calculado	
Condiciones de ruido de la fuente	Lw	109,6	115,3	117,1	118,3	119,5	114,6	124,0	
	Lp sin encerrar	95,4	101,6	103,6	104,8	106,0	101,1	110,5	
Lp interior luego del encerramiento	Lp reflexiones	98,1	100,3	100,6	101,8	103,3	98,3	107,7	
	Lp directo	88,0	93,7	95,5	96,7	97,9	93,0	102,4	
	Lp interior	98,5	101,1	101,8	103,0	104,4	99,4	108,8	
Lp exterior cerramiento completo	TL	15,8	21,8	27,8	33,8	39,9	45,9		
	Lp exterior	82,7	79,3	73,9	69,1	64,6	53,6	76,1	

En la (**Fig. XVII**) se presentan los niveles de presión sonora esperada al interior y exterior del cerramiento, por la influencia del ruido transmitido a través la zaranda cuando realiza su proceso, sin la influencia de otros ruidos aledaños (sin ruido de fondo).

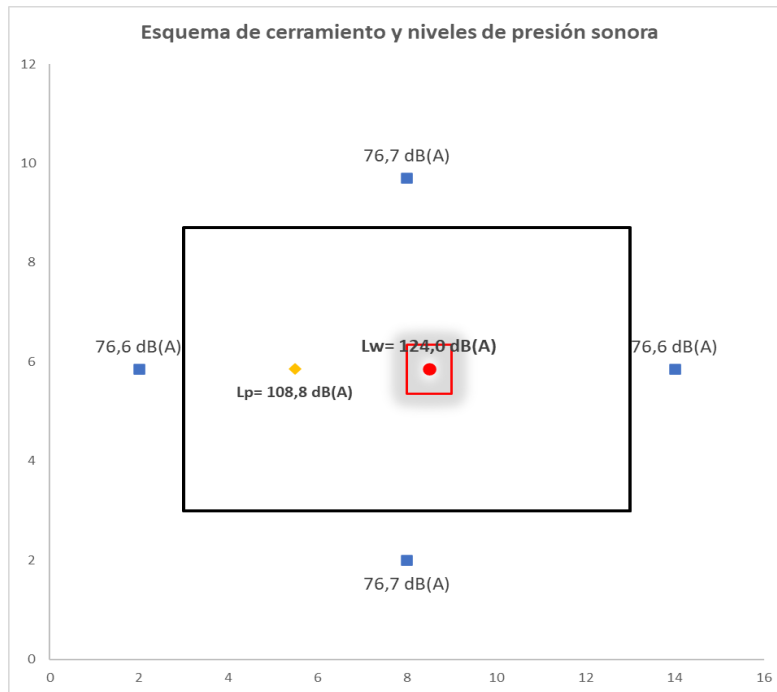


Fig. XVII. Niveles de presión sonora al interior y exterior del cerramiento, teóricos

Cálculo de silenciador acústico tipo Splitter para el ingreso de aire

Los splitter son elementos que permiten la entrada o salida de aire del encerramiento a través de ranuras abiertos, pero no permiten la salida del ruido emitido del interior del cerramiento.

Con la finalidad de garantizar un ingreso de aire al cerramiento para la refrigeración de los motores de la zaranda y evitar la salida del ruido desde el interior del cuarto, se requiere diseñar e instalar un silenciador tipo Splitter, en la **TABLA XII** se presenta el cálculo del silenciador acústico diseñado.

TABLA XII. Cálculo del silenciador tipo Splitter

Caudal	1000	cfm				
Vel máxima	585	fpm				
Área requerida	1,7	ft2				
Área requerida	246,2	in2				
# de splitters	1					
# de ranuras por splitter	5					
Long (unidad)	600	23,6				
Ancho(unidad)	600	23,6				
Alto ranura (mm)	38	1,50				
Área abierta	1,23	ft2				
Vel Real	813	fpm				
Do	6000	236,2				
S	114300	177,2				
Do/S	0,052	1,33				
Espesor del mat acústico	2	pulg				

	Frecuencia Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Coefficiente de absorción	0.5	0.85	0.95	1.1	1.0	1.0
Panel Black 2" CALORCOL	0.5	0.85	0.95	1.1	1.0	1.0
D _o /S	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
Ruido dBlin (Z)	98.5	101.1	101.8	103.0	104.4	99.4
Longitud de Atenuación a 1 metro)	20.9	43.9	51.3	63.0	55.1	55.1
NR 70	74.2	67.8	63.2	60	57.4	55.4
long	1.16	0.76	0.75	0.68	0.85	0.80
long seleccionada	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
La (long) dBlin	12.5	26.3	30.8	37.8	33.1	33.1
corr a dBA	-16.1	-8.6	-3.2	0	1.2	1
Ruido atenuado dBA	69.9	66.2	67.8	65.2	72.6	67.4
NPS dBA equiv	76.7					

Implementación de control acústico para la zaranda

Recomendaciones de operación

Con el fin de garantizar la reducción de ruido requerida durante la operación de la zaranda, se requiere atender a las siguientes recomendaciones de operación:

- Mantener todas las puertas cerradas y ajustadas.
- Verificar el estado de los paneles acústicos, en caso de mostrar deterioro o golpes que propicien el desprendimiento del material acústico, es necesario reemplazarlos.

- Evitar que las gotas de agua que puedan ingresar por el techo del cerramiento, caigan y permanezcan directamente sobre él, ya que se va deteriorando la calidad de los elementos constructivos del techo del cerramiento.

Fotografías del cerramiento acústico

En la (**Fig. XVIII**) se muestran algunas fotografías del cerramiento acústico de la zaranda instalado.



Fig. XVIII. Fotografías del cerramiento acústico

Evaluación de ruido luego de la implementación del control acústico

En la **TABLA XIII** se muestran los niveles de ruido en los puntos indicados en tercias de octavas.

TABLA XIII. Niveles de presión sonora evaluados luego del control acústico

Nivel de presión sonora Lp dB(Z)								
Punto de evaluación		Frecuencia (Hz)						Nivel equivalente Leq dB(A)
#	Descripción	125	250	500	1000	2000	4000	
1	Vía al costado de la portería	67,6	65,4	65,3	63,4	65,2	61,6	75,0
2	Debajo de silenciador inicio de ciclo	75,2	80,5	77,8	78,2	79,6	72,6	89,3
3	Debajo de silenciador (caída de rocas a elevador)	77,0	80,8	80,7	81,6	83,5	78,3	93,2
4	Quemadores inicio de ciclo	76,4	77,2	80,0	78,7	79,7	74,9	90,0
5	Quemadores (caída de rocas a elevador)	79,6	82,1	82,0	83,0	83,5	77,8	93,4
6	Portería	72,8	67,7	68,7	69,2	66,6	62,8	79,1
7	Pared lado sur	57,6	60,3	65,4	62,5	60,6	61,5	73,4
8	Entrada a cuarto de control	60,2	60,7	62,8	59,3	56,8	58,0	69,8

Comparación niveles de ruido antes y después del control acústico en zona de zaranda

En la **TABLA XIV** se muestran la reducción de los niveles de ruido antes y después de la implementación del control acústico.

TABLA XIV. Reducción de ruido antes y después del control acústico

Nivel de presión sonora Lp dB(Z)							
Descripción	Frecuencia (Hz)						Nivel equivalente Leq dB(A)
	125	250	500	1000	2000	4000	
Ruido antes del cerramiento	93,8	96,8	98,5	100,2	102,2	96,8	111,6
Ruido después del cerramiento	57,6	60,3	65,4	62,5	60,6	61,5	73,4
Reducción de ruido	36,2	36,5	33,1	37,7	41,6	35,3	38,2

De acuerdo a los resultados anteriores, se puede determinar que:

Los niveles de ruido evaluados fueron tomados en el momento del inicio del ciclo de la zaranda, es decir, al momento de evaluar no hay descarga de piedra caliza al elevador.

La reducción de ruido percibido en los alrededores del cerramiento es de 38,2 dB(A), en el costado sur a nivel de piso. Sin embargo, durante el proceso se evidencia niveles de ruido de fondo elevados, que se generan en zonas aledañas las cuales no cuentan con control acústico.

Comparación niveles de ruido antes y después del control acústico en zona de portería

En la **TABLA XV** se muestran la reducción de los niveles de ruido antes y después de la implementación del control acústico.

TABLA XV. Reducción de ruido antes y después del control acústico

Nivel de presión sonora Lp dB(Z)							
Descripción	Frecuencia (Hz)						Nivel equivalente Leq dB(A)
	125	250	500	1000	2000	4000	
Ruido antes del cerramiento	84,6	71,4	74,0	72,7	72,5	66,6	83,4
Ruido después del cerramiento	72,8	67,7	68,7	69,2	66,6	62,8	79,1
Reducción de ruido	11,8	3,7	5,3	3,5	5,9	3,8	4,3

Como se puede evidenciar, a un costado de la portería la reducción de ruido percibido es de 4,3 dB(A), lo que implica un óptimo desempeño del control acústico instalado, sin embargo, se evidencia que los niveles de ruido elevados se dan por el ruido de fondo de otros procesos de la planta.

Comparación niveles de ruido evaluados respecto a lo esperado en diseño

Teniendo en cuenta los niveles de ruido evaluados con los esperados teóricos indicados, se concluye que el cerramiento cumple con los parámetros de diseño.

En la (**Fig. XIX**) se muestra la comparación de los distintos niveles de presión sonora, antes y después del control acústico, esperados desde el diseño.

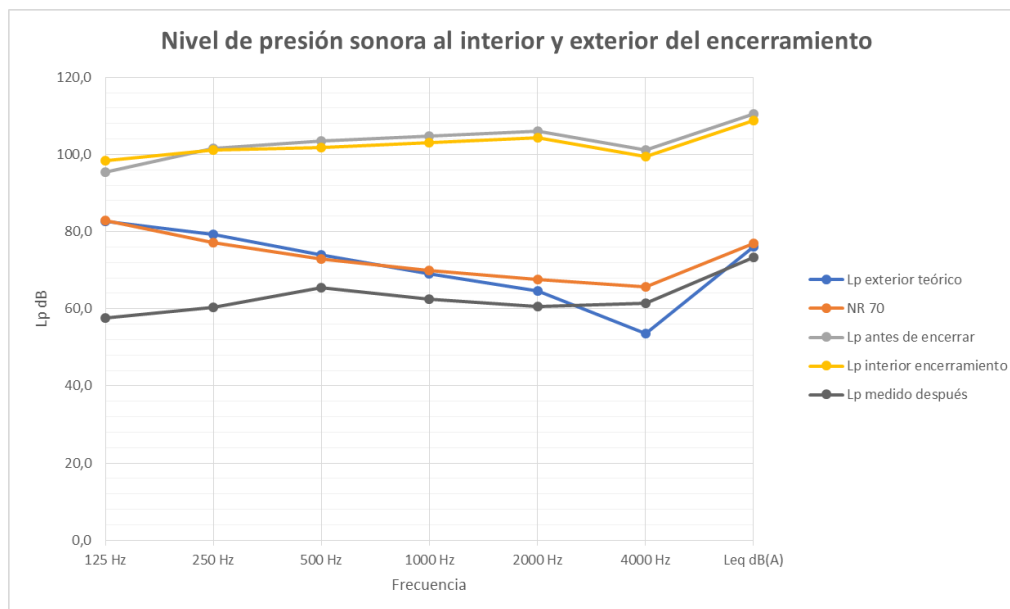
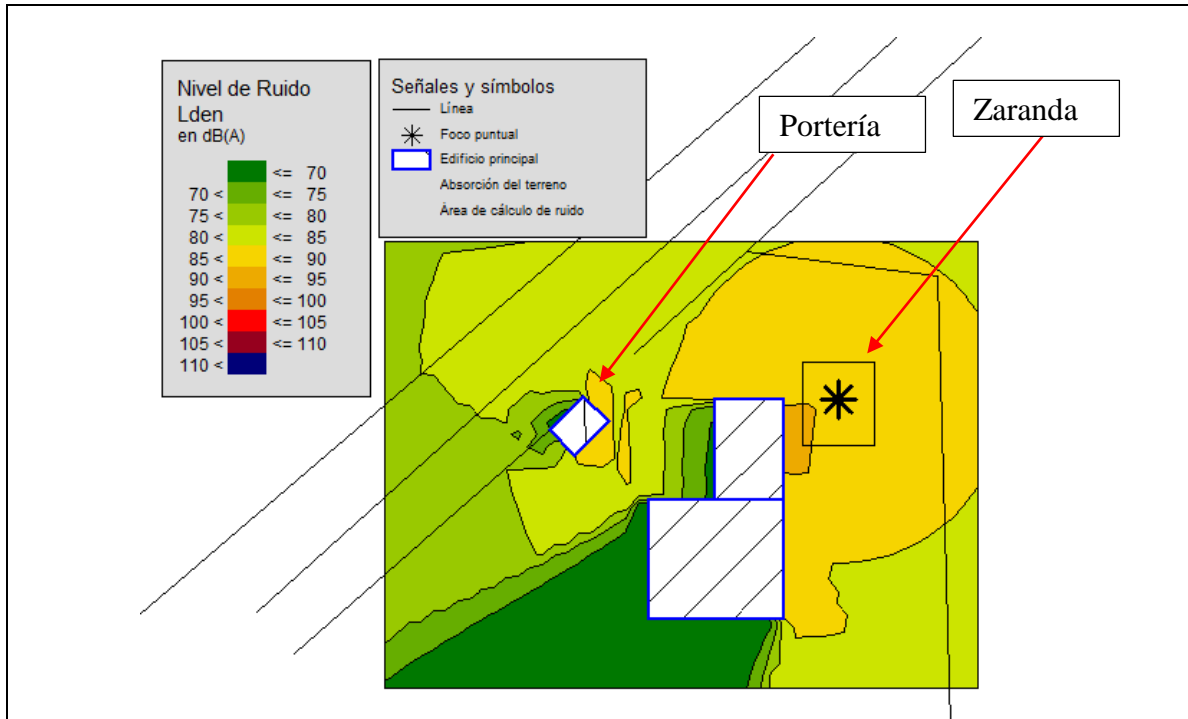


Fig. XIX. Comparación de niveles de presión sonora antes y después del cerramiento al interior y exterior del mismo

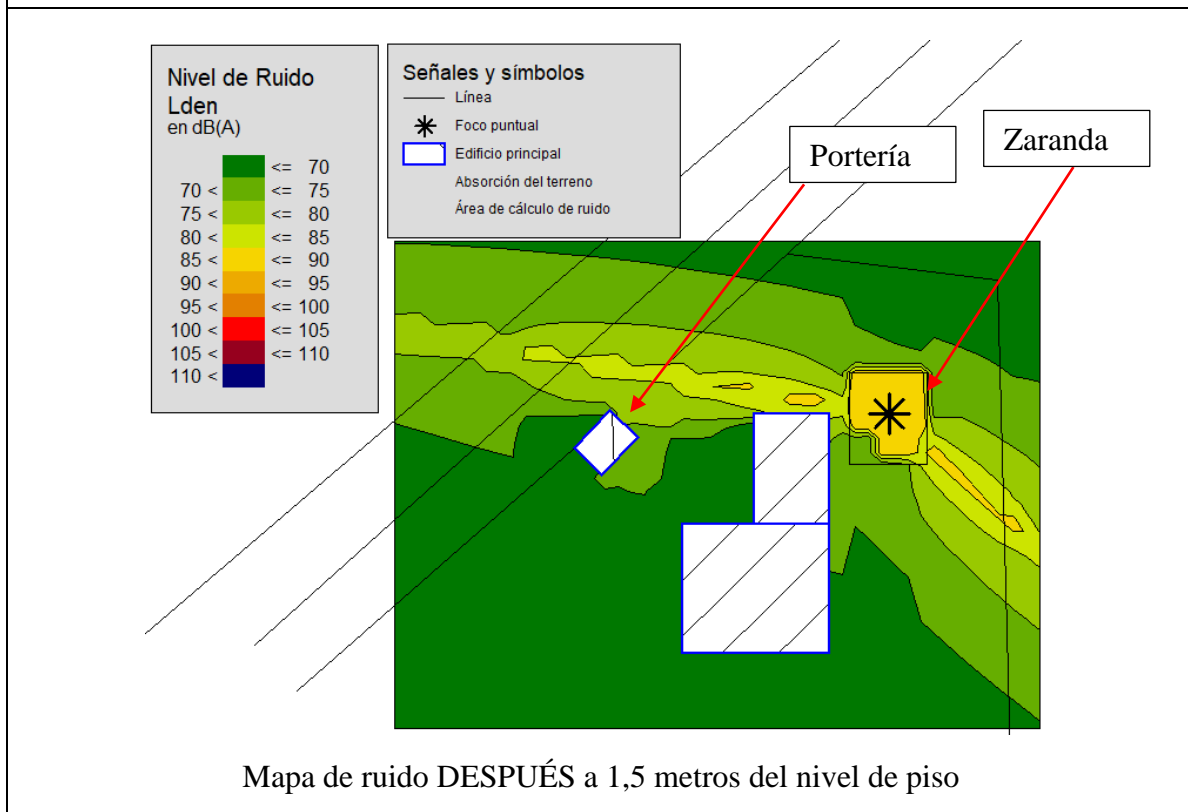
Mapa de ruido de ruido generado por la zaranda antes y después del control acústico

El software utilizado para generar los mapas de ruido en las áreas medidas es el SoundPLAN, ya sean estudios de ruido para instalaciones comerciales e industriales, planes de desarrollo o instalaciones de tráfico, este programa tiene una intuitiva interfaz de usuario que permite una rápida curva de aprendizaje y proporciona exactamente las opciones que necesita para los casos estándar en las evaluaciones de ruido.

En la (Fig. XX) se muestran los mapas de dispersión de ruido teóricos generados por la zaranda (sin considerar ruido de fondo generado por otras fuentes).



Mapa de ruido ANTES a 1,5 metros del nivel de piso



Mapa de ruido DESPUÉS a 1,5 metros del nivel de piso

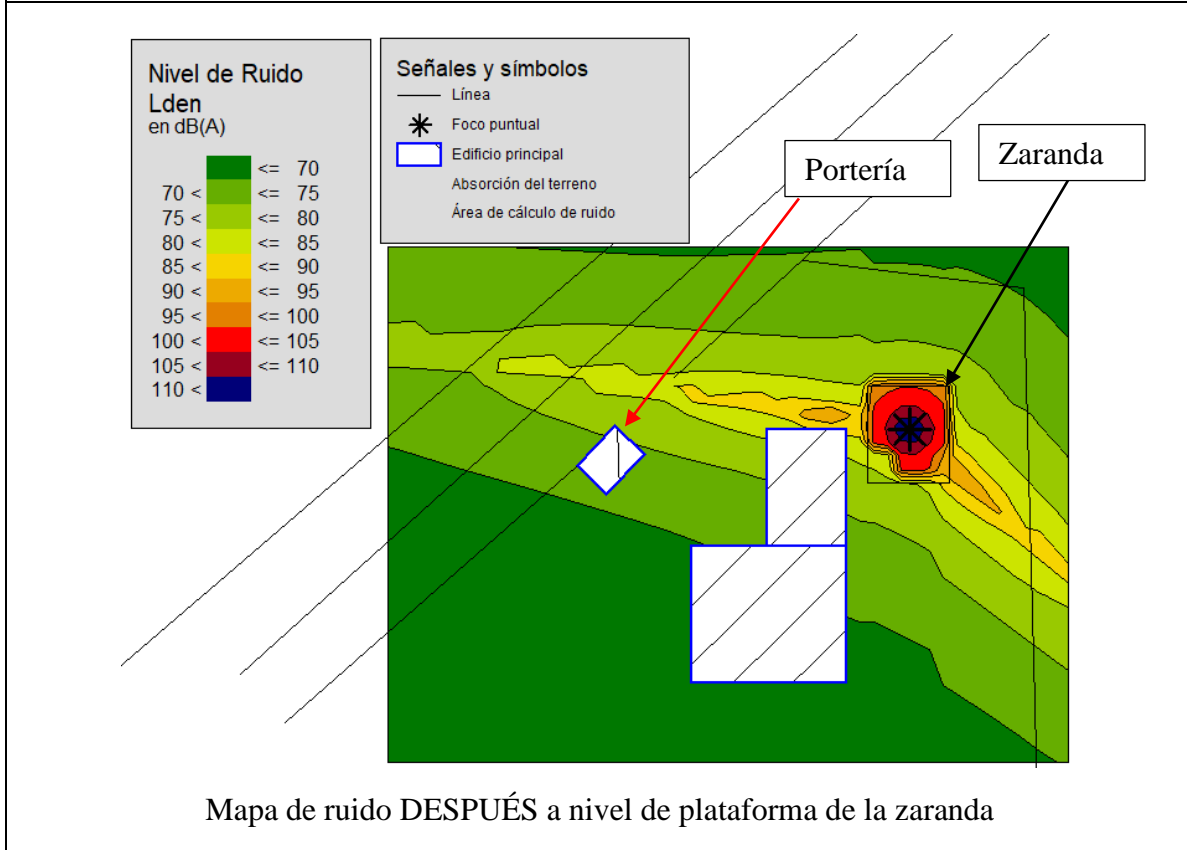
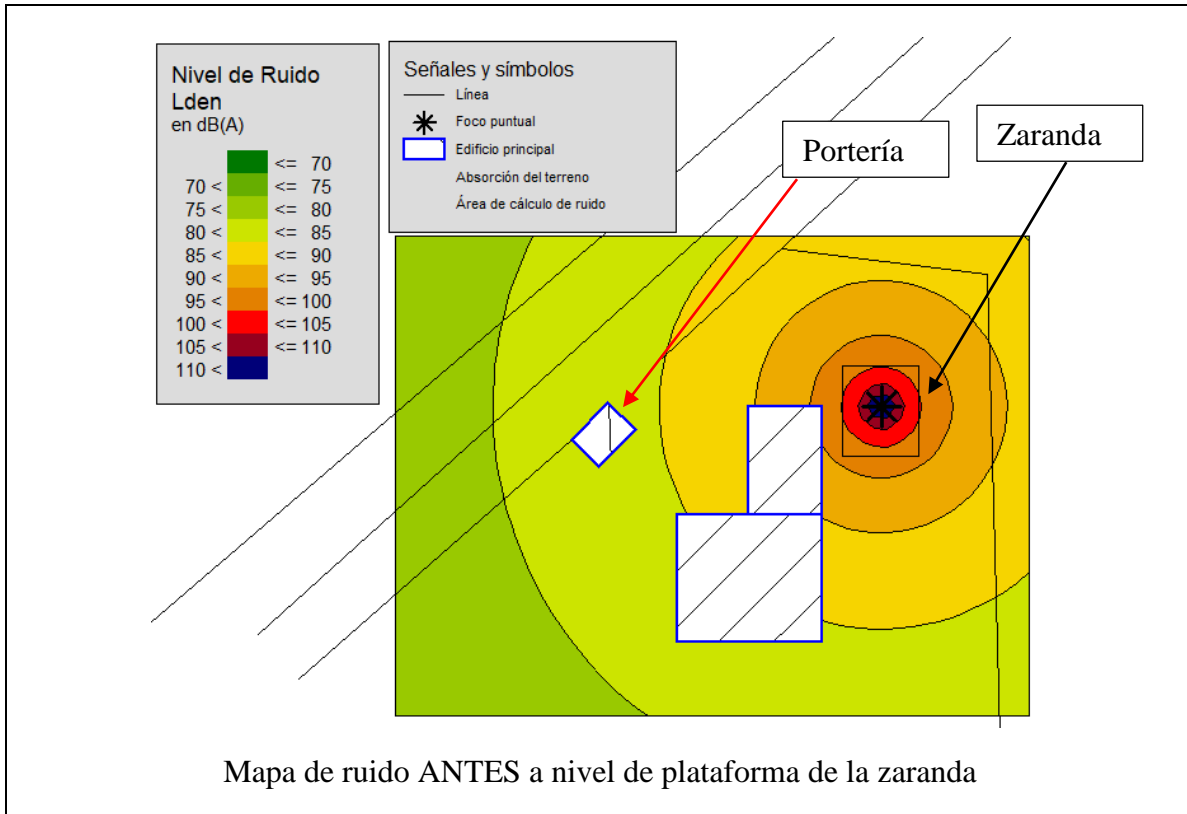


Fig. XX. Mapas de dispersión de ruido a nivel de piso y a nivel de plataforma de zaranda antes y después del control acústico, sin considerar ruido de fondo ni otras fuentes de ruido

VII. CONCLUSIONES

Para el correcto diseño de un espacio arquitectónico acústico es necesario conocer y entender principios que envuelven a esta disciplina; desde el punto de vista de las instalaciones, el conocimiento de estos nos ayudará a generar las propuestas adecuadas que resulten en un espacio funcional y confortable.

Los diseños estudiados y aplicados controlan notablemente las condiciones acústicas y los niveles de ruido cumpliendo así con los parámetros y reglamentos que se establecen en la norma internacional ISO 1996-2 y la resolución nacional 0627 de 2006. Se mejoraron las condiciones acústicas dentro del recinto con niveles óptimos de ruido, logrando así con excelente calidad y un correcto diseño acústico para las diferentes actividades que en el recinto se efectúen.

La toma de medidas, el levantamiento de plano y el registro fotográfico, ayudaron a identificar cada uno de los materiales y dimensiones que constituyen el espacio, con lo anterior, se pudieron determinar las fallas acústicas y dar una idea global de la problemática del recinto.

Las mediciones de ruido permitieron validar que los curvas NC se encuentran por encima de las recomendaciones para el recinto, permitiendo establecer requerimientos y necesidades para el cumplimiento de los objetivos, basados en cálculos acústicos y la aplicación de elementos constructivos sostenibles como propuesta para el desarrollo del proyecto.

Del mismo modo se diseñó un sistema para mejorar las condiciones acústicas internas del recinto, encontrado 111,6 dB(A) antes del cerramiento y por medio de implementar los paneles acústicos con lana mineral de roca, se logró reducir un 34% el nivel de ruido quedando de 73,4 dB(A), el cual se encuentra en el valor promedio recomendado para este tipo de recintos.

Se evidencio mediante la toma de medidas la importancia de la teoría, de la bibliografía y su trabajo en conjunto con nuevas tecnologías como los son programas de análisis acústicos para poder llegar a un resultado más acertado.

Por lo tanto, se logró cumplir con el objetivo general de este proyecto de grado, es decir, evaluar, investigar, analizar, planificar y aplicar cada uno de los parámetros acústicos en el recinto, también diseñar, proponer un diseño de acondicionamiento y aislamiento acústica que contribuyen a la calidad de vida de quienes entran en contacto con este espacio.

VIII. REFERENCIAS

- [1] A. Carrión, Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Barcelona: UPC, 1998.
- [2] R. Barti, Acústica Medioambiental. Alicante: Club Universitario, 2010.
- [3] K. Barret, Fisiología medica de Ganong. México: McGraw-Hill, 2007.
- [4] S. Garcia, Manual para radialistas analfatecnicos, 2010.
- [5] S. V. Granados, Acústica aplicada al interiorismo. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2011.
- [6] L. Beranek, Acústica. Buenos Aires, 1969.
- [7] L. Ruiz, Representación Gráfica de la primera reflexión en espacios destinados a la palabra, Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña, 2014.
- [8] A. Jaramillo, La ciencia del sonido. Medellín, 2007.
- [9] F. P. Palacios, Escuchando el sonido: concepciones sobre acústica en alumnos de distintos niveles educativos. Andalucía: Universidad de Granada Campus Universitario de Cartuja, 1997.
- [10] ISO 9613-2. International Standard. Industrial noise - Description of the calculation method part 2.
- [11] ISO 1996-2. International Standard. Determination of environmental noise levels part 2, (2007).
- [12] Resolución 0627. norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental, (2006).
- [13] R. Avilés López & R. Perera Martín, Manual de acústica ambiental y arquitectónica. Madrid: Ediciones Paraninfo, 2017.
- [14] M. Hernández Van Maess, Ingeniería Acústica Fácil. Ingeniería Acústica para profesionales, 2012.
- [15] J. L. Córdova, Materiales de aislamiento acústico sostenible. Cuenca: Universidad de Cuenca, 2014.
- [16] J. S. Vendrell, L. Galiana, & A. L. Reyna, Acústica Arquitectónica y Urbanística. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia, 2011.
- [17] R. Barrón, Industrial noise control and acoustics. Louisiana: Marcel Dekker Inc, 2001.
- [18] R. Serway, Physics for scientists and engineers. Belmont: Thompson Brooks, 2004.
- [19] R. B. Domingo, Acústica Medioambiental. Alicante: Editorial Club Universitario, 2010.