

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO MECÁNICO

TEMA:

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE INSONORIZACIÓN Y
VENTILACIÓN PARA CUARTOS DE MÁQUINAS**

AUTORES:

**IBARRA MORALES DAVID EDUARDO
ORTIZ SALAS ALEX PAÚL**

DIRECTOR:

ING. FABIO EDUARDO OBANDO HERRERA

Quito, Mayo del 2014

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico ha sido desarrollado en su totalidad por los señores: Alex Paul Ortiz Salas y David Eduardo Ibarra Morales.

Los conceptos desarrollados, análisis, cálculos realizados conclusiones y recomendaciones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Ing. Fabio Obando
DIRECTOR DEL PROYECTO

**DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIZACIÓN DE USO
DEL TRABAJO DE GRADO**

Nosotros Alex Paul Ortiz Salas y David Eduardo Ibarra Morales autorizamos a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaramos que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

ALEX PAUL ORTIZ SALAS

CC 1715087902

DAVID EDUARDO IBARRA MORALES

CC 1002640710

DEDICATORIA

A Dios por guiarme en este camino lleno de alegrías y de pruebas, que me brindo unos padres maravillosos, una hermana amorosa y trajo a mi vida una espectacular mujer que ha estado junto a mí y me ha apoyado para lograr todas las metas propuestas a mis hijas que son el impulso más grande que se pueda tener para seguir sin parar y mejorar cada día.

Alex Ortiz

A mis padres que me brindaron todo el apoyo para poder cumplir con este objetivo, a Dios por darme la oportunidad de superar esta prueba y por poner en mí camino muchos retos y poder superarlos. A mis hermanos que siempre estuvieron pendientes durante este tiempo y me apoyaron para culminar con éxito este objetivo.

David Ibarra

AGRADECIMIENTO

Agradezco por todo el apoyo y guía de mis padres Vicente y Mirtha al igual que su cariño y comprensión a mi esposa Alexandra que ha sido la persona que más ha vivido, sufrido, y disfrutado de mi experiencia en esta universidad, a todos los ingenieros que han compartido sus conocimientos, experiencias, y que han guiado mi camino hasta llegar a culminación de esta etapa de mi vida.

Alex Ortiz

Agradezco el apoyo incondicional de mi familia que siempre estuvo junto a mí en este largo trayecto de formación, brindándome afecto y apoyo para poder cumplir con este objetivo. Al Ingeniero Fabio Obando por compartir sus conocimientos y experiencia, siendo una guía en la realización de esta tesis y así poder culminarla con éxito.

David Ibarra

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Debido a las nuevas normativas municipales enfocadas en la protección del medio ambiente y la salud de los habitantes del distrito metropolitano de la ciudad de Quito, todas las construcciones ubicadas dentro del perímetro urbano deberán cumplir con las ordenanzas municipales que rigen a la ciudad.

Para el caso particular de la presente tesis la ordenanza que interesa es la cual exige que las instalaciones en las construcciones no emitan ruidos (según norma) dentro de la zona urbana y en las zonas industriales.

En las diversas zonas se producen cortes eléctricos y caídas de tensión, lo que produce desperfectos en los sistemas eléctricos conectados a la fuente eléctrica.

Es por esta razón que se requiere un sistema que provea energía constante y sin variación.

El ruido producido por los cuartos de máquinas viene a ser parte de la contaminación acústica siendo entendido esto como sonido excesivo y molesto, que produce efectos negativos sobre la salud auditiva, física y mental de las personas.

Según organismos internacionales el ruido es considerado como un contaminante, es decir, un sonido molesto que puede producir efectos nocivos fisiológicos y psicológicos para una persona o grupo de personas.

En este caso la principal causa de la contaminación acústica está relacionada con el ruido emitido por los cuartos de máquinas, lo cual pone en riesgo a la salud de las personas, produciendo de una disminución importante en la capacidad auditiva, así como la posibilidad de trastornos que van desde lo psicológico hasta lo fisiológico por la excesiva exposición a la contaminación acústica.

Según un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS), considera los 70 dB (a), como el límite superior para la exposición de las personas al ruido.

JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En ciertos puntos de la ciudad al ser esto un problema es necesario que se cuente con energía eléctrica de una forma ininterrumpida de ahí que en caso de fallas de energía por parte de la empresa eléctrica estos sitios cuenten con un sistema de emergencia que permita el correcto funcionamiento, muchos centros comerciales y edificaciones cuentan con generadores que permiten que sus locales funcionen sin ningún problema aunque no exista el suministro de energía eléctrica por parte de E.E., pero estos equipos producen una cantidad de ruido que perturba a la comunidad que les rodean.

Según la ordenanza municipal número 0213, en el capítulo II de la contaminación acústica, sección II de la emisión de ruido de fuentes fijas dice en el Art. IL363.-En toda operación que realice emisión de ruido en áreas residenciales o colindantes a centros hospitalarios no se podrá rebasar un nivel de 55 dB(A) de las seis a las veinte horas y de 45 dB(A) de las veinte a las seis horas.

De igual manera organismos internacionales dice que la exposición a ruidos excesivos causa daños permanentes en el oído y afecta de forma adversa la eficiencia y comodidad en el trabajo.

Según lo mencionado anteriormente se crea la Ley de Seguridad e Higiene en el Trabajo (OSHA) que establece límites para la exposición al ruido.

Esta ley dice que cuando la exposición diaria a un ruido de un individuo, designado D, se compone de dos o más períodos de ruido a diferentes niveles por lo tanto el efecto combinado se calcula mediante:

$$D = (C_1/T_1) + (C_2/T_2) + \dots + (C_n/T_n)$$

Siendo C_n la duración de la exposición a un nivel de sonido especificado y T_n el tiempo total de exposición permitido a un nivel de sonido especificado. La exposición al ruido es aceptable cuando es menor o igual a 1, basado en tablas las cuales se estudiará en esta tesis.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseño y simulación de un sistema de insonorización y ventilación para cuartos de máquinas

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un estudio e investigación adecuada para cumplir con el desarrollo de esta tesis y así suplir los problemas de ruido e insonorización en zonas residenciales basándonos en normas internacionales y ordenanzas municipales que rigen estos sistemas.
- Desarrollar un estudio de alternativas, es decir un estudio del cómo, por qué y cuales materiales se deben utilizar para la elaboración del sistema de insonorización y ventilación de cuarto de máquinas.
- Elaborar los diferentes tipos de diseños tanto acústico, diseño de ventilación y diseño de control, así como también la simulación respectiva de cada uno y así obtener un correcto funcionamiento del sistema.
- Realizar un presupuesto en el cual conste todos los gastos y costos de materiales, estudio e instalación de este sistema de insonorización.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	I
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIZACIÓN DE USO DEL TRABAJO DE GRADO	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	V
JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	VI
OBJETIVOS	VII
OBJETIVO GENERAL	VII
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	VII
ÍNDICE GENERAL	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XV
ÍNDICE DE ANEXOS	XVII
RESUMEN	
ABSTRAC	
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	2
INSONORIZACIÓN	2
1.1 Sonido	2
1.2 Conceptos fundamentales del movimiento ondulatorio	3
1.3 Unidad de medida del sonido	4
1.4 Características del sonido	7
1.4.1 Nivel de presión sonora	7
1.4.2 Potencia sonora	8
1.4.3 Nivel de potencia sonora	9
1.4.4 Intensidad acústica	12
1.4.5 Nivel de intensidad acústica	12
1.5 Sonido en espacios cerrados	13
1.6 El ruido	16

1.6.1 Ruido y sus riesgos en la salud por exposición prolongada	17
1.6.2 Tipos de ruido	19
1.6.2.1 Ruido continuo	19
1.6.2.2 Ruido transitorio	20
1.6.2.3 Ruido objetivo	20
1.6.2.4 Ruido subjetivo.....	20
1.6.3 Procedimientos de medición de ruido	20
1.6.4 Instrumentos de medición acústica.....	21
1.6.5 Contaminación acústica	22
1.6.6 Control de ruido	23
1.6.6.1 Aislamiento acústico.....	24
1.6.6.2 Materiales acústicos.....	25
1.6.7 Coeficiente de absorción del sonido (α)	26
1.6.8 Coeficiente de reducción de ruido (NRC)	26
1.6.9 Absorción sonora de un local	30
1.6.10 Nivel de reducción de ruido.....	30
1.6.11 Silenciadores acústicos	30
1.6.12 Tipos de silenciadores acústicos	31
1.6.12.1 Silenciadores resistivos.....	31
1.6.12.2 Silenciadores reactivos	32
1.6.13 Grupos electrógenos	32
1.6.14 Clasificación de los grupos electrógenos.....	33
CAPITULO II	34
DESARROLLO DEL ESTUDIO DE INSONORIZACIÓN.....	34
2.1 Recopilación de información.....	34
2.2 Análisis del área	34
2.3 Medición de los índices de ruido en el cuarto de generación sin insonorización.	35
2.3.1 Calibración del sonómetro.....	36
2.3.2 Selección de los puntos de medición de los niveles de presión sonora..	36
2.3.3 Procedimiento de medición de niveles de presión sonora.....	37
2.3.4 Evaluación de los niveles de presión sonora obtenidos durante las mediciones.	37

2.4 Deducción de los parámetros característicos del ruido generado en el cuarto de generación en estudio.	38
2.4.1 Identificación de paredes del cuarto de generación.....	38
2.4.2 Determinación de las áreas internas del cuarto de generación.	39
2.4.3 Determinación del volumen real del cuarto de generación	40
2.4.4 Cálculo de la absorción sonora del cuarto de generación antes y después de ser tratada acústicamente	40
2.4.5 Determinación del tiempo de reverberación del cuarto de generación antes y después del tratamiento acústico	40
2.4.6 Cálculo del nivel de reducción de ruido en el cuarto de generación sin instalar los atenuadores de ruido en la entrada y salida de aire (en las ventanas).....	41
2.4.7 Deducción de la presión sonora efectiva del ruido dentro de la sala de generación eléctrica	41
2.4.8 Obtención del nivel de potencia sonora de los grupos electrógenos instalados en el cuarto de generación	42
2.4.9 Cálculos de velocidad del sonido en el área de los grupos electrógenos	42
2.4.10 Obtención de la magnitud de la intensidad sonora dentro del cuarto de generación.....	43
2.5 Selección definitiva de los materiales acústicos para la propuesta de instalación en las superficies internas.	43
2.5.1 Tipos de materiales acústicos	44
2.5.1.1 Lana de roca.....	44
2.5.1.2 Lana de vidrio	45
2.5.1.3 Acustifibra.	46
2.5.1.4 Placas composite.....	47
2.5.1.5 Placas texturadas:	48
2.5.2 Materiales de paneles.....	49
2.5.3 Designación de los materiales acústicos.....	52
2.6 Diseño de los atenuadores de ruido para las aberturas de ventilación.	52
 CAPITULO III.....	 54
ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	54

3.1 Resultados obtenidos luego de analizar el área física	54
3.1.1 Características físicas internas del cuarto de generación.....	54
3.2 Análisis de las mediciones de los niveles de presión sonora tomadas en el cuarto de generación y sus alrededores antes del tratamiento acústico.....	55
3.3 Análisis de los parámetros físicos del cuarto de generación	56
3.3.1 Características superficiales internas del cuarto de generación.....	56
3.3.2 Cálculo del volumen real interno del cuarto estudiado	58
3.4 Determinación de valores acústicos relevantes en el cuarto de generación	58
3.4.1 Características generales del ruido proveniente de los grupos	58
3.4.2 Absorción sonora del cuarto de generación sin tratamiento acústico.....	59
3.4.3 Absorción sonora del cuarto de generación con tratamiento acústico....	60
3.4.4 Deducción del nivel de reducción de ruido en el cuarto de generación. .	62
3.5 Resultados obtenidos con la instalación de los silenciadores en el cuarto de generación	63
3.5.1 Parámetros acústicos y físicos sin colocar silenciadores en las ventanas.	63
3.5.2 Parámetros acústicos y físicos sin colocar silenciadores en las aberturas realizadas para los silenciadores.....	66
3.5.3 Parámetros acústicos y físicos colocando los silenciadores.	68
3.5.4 Parámetros acústicos y físicos con silenciadores en las aberturas realizadas para los extractores.	70
3.6 Simulación Matemática: Cámara de insonorización	76
 CAPITULO IV.....	 94
VENTILACIÓN.....	94
4.1 Tipos de ventilación	96
4.1.1 Ventilación general y ambiental	96
4.2 Conceptos de ventilación.....	96
4.2.1 Ventilación cruzada.	96
4.2.2 Ventilación semicruzada.....	96
4.2.3 Ventilación por capas.	97
4.2.4 Ventilación natural.....	97
4.2.5 Ventilación centralizada.	98
4.2.6 Ventilación inteligente o automatizada.	98

4.2.7 Ventilación por impulsión.	98
4.2.8 Ventilación ecológica.	99
4.2.9 Ventilación sostenible.....	99
4.3 Cálculos	99
4.4 Simulación matemática del sistema de ventilación.....	101
CAPITULO V	107
COSTOS	107
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
Conclusiones	108
Recomendaciones.....	109
BIBLIOGRAFÍA	110
ANEXOS	112
Anexo 1. Fotos de cuarto de generadores	112
Anexo 2. Planos	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Onda del seno	2
Figura 2. Comportamiento de la velocidad del sonido en el aire	4
Figura 3. Relación entre el nivel de presión sonora en micropascales y el nivel de presión sonora en decibelios.....	8
Figura 4. Término de corrección C en función de la temperatura, para 3 valores de presión atmosférica: 900 mbar, 1000 mbar y 1100	10
Figura 5. Reflexión de las ondas	14
Figura 6. Foto del sonómetro	21
Figura 7. Diagrama de bloques del sistema de control de ruido	24
Figura 8. Silenciador Resistivo	31
Figura 9. Silenciador Reactivo	32
Figura 10. Partes Principales de un Grupo Electrónico	33
Figura 11. Plano cuarto de máquinas	35
Figura 12. Ubicación satelital	38
Figura 13. Plano autocad 110826.00.....	39
Figura 14. Lana de roca.....	44
Figura 15. Lana de vidrio	45
Figura 16. Placas composite.....	47
Figura 17. Placas texturadas.....	48
Figura 18. Antes de la insonorización.....	54
Figura 19. Antes de la insonorización.....	54
Figura 20. Localización del cuarto de generadores en el centro comercial	55
Figura 21. Características del cuarto de generadores.....	57
Figura 22. Áreas que delimitan la ventana.....	64
Figura 23. Silenciador de entrada 110826.00.11.....	68
Figura 24. Silenciador de entrada 110826.00.05.....	69
Figura 25. Silenciador extractor 110826.00.04.....	71
Figura 26. Silenciador de salida 110826.00.08	72
Figura 27. Silenciador de salida 110826.00.02.....	73
Figura 28. Representación tabla 41	78
Figura 29. El resorte vibrante con amortiguamiento (Murray, 1983).	78
Figura 30. Volumen relativo de aire	82

Figura 31. Graficando la función con Derive 6.....	84
Figura 32. Graficando la función con Derive 6.....	85
Figura 33. Graficando con derive 6z.....	88
Figura 34. Análisis realizado en Excel.....	90
Figura 35. Reajustes de la curva en curva Expert	91
Figura 36. Aproximación a una curva de 2° grado: $r=0,97$	91
Figura 37. Aproximación a una recta: $r = 0,67$	92
Figura 38. Aproximación a una ecuación de 3° grado: $r=0,999$	92
Figura 39. Ajuste de la curva de 3°	93
Figura 40. Ventilación de un cuarto de generadores.....	94
Figura 41. Ubicación de silenciadores	95
Figura 42. Turbina extractora.....	101
Figura 43. Sistema hidráulico	102
Figura 44. Sección silenciador	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores que adiciona el filtro de ponderación A, a cada banda de frecuencia de un sonido determinado.	6
Tabla 2. Nivel de potencia sonora (referido a 1pW) medido de varias fuentes acústicas.....	11
Tabla 3. Valores de niveles de intensidad sonora de fuentes comunes de sonido.	13
Tabla 4. Tiempos de reverberación.....	16
Tabla 5. Valores tlv para el ruido.....	19
Tabla 6. Coeficientes de absorción del sonido de materiales de construcción	29
Tabla 7. Coeficientes de reducción de ruido de alfombras sobre hormigón desnudo.....	29
Tabla 8. Características de la lana de roca.	45
Tabla 9. Características de la lana de vidrio	46
Tabla 10. Propiedades de las acustifibras.	47
Tabla 11. Propiedades de las placas composite.	48
Tabla 12. Propiedades de las placas texturadas.	48
Tabla 13. Comparativa de materiales acústicos.	49
Tabla 14. Aceros inoxidable.....	51
Tabla 15. Tipos de aceros.....	51
Tabla 16. Monitoreo de puntos de emisión sonora	56
Tabla 17. Distribución de superficies internas del cuarto de generación.....	57
Tabla 18. Propiedades acústicas del ruido dentro del cuarto de generadores.	58
Tabla 19. Parámetros físicos y acústicos del Cuarto de generación sin tratamiento sonoro.	59
Tabla 20. Características físicas y acústicas del cuarto de generación luego de tratar acústicamente, sin colocación de filtros acústicos en las ventanas.	61
Tabla 21. Dimensiones de áreas que delimitan la ventana generador Nissan.....	64
Tabla 22. Cálculos de absorción sonora de las ventanas generador Nissan.....	64
Tabla 23. Dimensiones de áreas que delimitan la ventana generador John Deer	65
Tabla 24. Cálculos de absorción sonora de las ventanas generador John Deer	65
Tabla 25. Dimensiones de las áreas de la abertura para los silenciadores echa en la pared oeste a un lado del generador John Deer	66

Tabla 26. Cálculos de absorción sonora de las aberturas para los silenciadores del generador John Deer	66
Tabla 27. Dimensiones de las áreas de abertura para los silenciadores en la pared este junto al generador John Deer y para el generador Nissan en la pared sur/oeste	67
Tabla 28. Cálculos de absorción sonora de las aberturas para los silenciadores en la pared este junto al generador John Deer y generador Nissan en la pared sur/oeste	67
Tabla 29. Áreas silenciador resistivo	68
Tabla 30. Cálculo de absorción de ruido en los silenciadores de 7 paneles.....	69
Tabla 31. Áreas de las caras de los silenciadores en contacto con el ruido	70
Tabla 32. Áreas de las caras de los silenciadores en contacto con el ruido	70
Tabla 33. Áreas de las caras de los silenciadores en contacto con el ruido	71
Tabla 34. Cálculos de absorción de ruido en los silenciadores extractores de 4 paneles	71
Tabla 35. Áreas de las caras de los silenciadores en contacto con el ruido	72
Tabla 36. Cálculos de absorción de ruido en los silenciadores a la salida del radiador Generador Nissan	73
Tabla 37. Áreas de las caras de los silenciadores en contacto con el ruido	74
Tabla 38. Cálculos de absorción de ruido en los silenciadores a la salida del radiador John Deer.....	74
Tabla 39. Cálculos de absorción sonora total en el cuarto de máquinas.....	75
Tabla 40. Variación de temperatura	77
Tabla 41. Constante de Amortiguamiento	83
Tabla 42. Variación de la amplitud de la onda	86
Tabla 43. Análisis del nivel de presión	89
Tabla 44. Presión de una onda sonora.....	90
Tabla 45. Cambios de aire.....	100

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Fotos de cuarto de generadores	112
Anexo 2. Planos	112

RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad la implementación de un sistema de insonorización y de ventilación para un cuarto de máquinas, el mismo que emite altos niveles de ruido hacia el exterior y contamina acústicamente las áreas adyacentes. Para dicha implementación fue necesario realizar un estudio de los decibeles emitidos por dichas máquinas, las propiedades acústicas del recinto al igual que las normas vigentes en la emisión de ruido, al mismo tiempo para conservar las capacidades de funcionamiento de las máquinas es necesario mantener un sistema de ventilación adecuado y así evitar daños y mal funcionamiento en las máquinas, para que estos cálculos sean aplicables se tomará como ejemplo el cuarto de máquinas del Centro Comercial Atahualpa, en este recinto se determinará la absorción sonora antes y después de tratar acústicamente, para así recomendar los materiales absorbentes a instalar en las superficies internas. Seguidamente se determinará el nivel de reducción de ruido producto de dichos materiales instalados. Posteriormente serán diseñados los silenciadores para el sistema de ventilación y de extracción, utilizando materiales acústicos con características similares a los recomendados previamente, y de esta manera terminar de constituir el sistema de insonorización y ventilación en conjunto. Con estas modificaciones se cumplirá con las normas municipales de uso de suelo.

ABSTRACT

This project aims at implementing a soundproofing and ventilation for a machine room, the same high levels of noise emitted outwards and acoustically contaminate adjacent areas. For this implementation was necessary to conduct a study of the decibels emitted by these machines, the acoustical properties of the enclosure as well as the rules in the emission of noise while preserving capabilities for operation of machines is necessary to maintain system adequate ventilation to prevent damage and malfunction of the machines, so that these calculations are applicable will be taken as example the engine room of Atahualpa Mall in this room sound absorption shall be determined before and after acoustically treated, so recommend installing absorbing materials on the inner surfaces. Subsequently reducing the level of noise arising from such materials installed is determined. Subsequently mufflers are designed for ventilation and extraction using acoustic materials with similar characteristics previously recommended, and thus constitute the end of soundproofing and ventilation together. With these modifications will comply with municipal land use regulations.

INTRODUCCIÓN

Debido a las nuevas normativas municipales enfocadas en la protección del medio ambiente y la salud de los habitantes del distrito metropolitano de la ciudad de Quito, todas las construcciones ubicadas dentro del perímetro urbano deberán cumplir con las ordenanzas municipales.

Para el caso particular de la presente tesis la ordenanza que interesa es la cual exige que las instalaciones en las construcciones no emitan ruidos (según norma) dentro de la zona urbana y en las zonas industriales.

El ruido producido por los cuartos de máquinas viene a ser parte de la contaminación acústica siendo entendido esto como sonido excesivo y molesto, que produce efectos negativos sobre la salud auditiva, física y mental de las personas.

Según organismos internacionales el ruido es considerado como un contaminante, es decir, un sonido molesto que puede producir efectos nocivos fisiológicos y psicológicos para una persona o grupo de personas.

En este caso la principal causa de la contaminación acústica está relacionada con el ruido emitido por los cuartos de máquinas, lo cual pone en riesgo a la salud de las personas, produciendo una disminución importante en la capacidad auditiva, así como la posibilidad de trastornos que van desde lo psicológico hasta lo fisiológico.

CAPITULO I

INSONORIZACIÓN

En este capítulo se realizará el estudio del término sonido y su diferencia con el ruido. También se estudiará sus características y su comportamiento en espacios cerrados, sus unidades de medida y la manera de controlar la propagación del ruido.

1.1 Sonido

Este término se emplea para designar la sensación que experimenta un observador cuando las terminaciones de su nervio auditivo recibe un estímulo, pero también es empleado para describir las ondas producidas por compresión del aire que puede estimular el medio auditivo de un observador.

Acústica es la parte de la física y de la técnica que estudia el sonido, ocupándose de su producción y propagación, de la naturaleza del proceso de audición, de los instrumentos y aparatos para su medida.

- **Concepto físico.-** Este concepto define al sonido como la propagación de ondas mecánicas en el aire o en otros medios elásticos. Para estudiar el sonido en una dimensión, se utiliza la forma de onda sinusoidal simple. Ver Figura 1 (Colombit & S.A., Agosto, 2006).

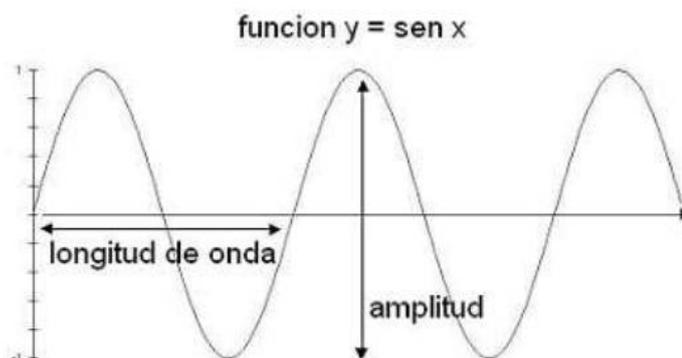


Figura 1. Onda del seno

Fuente: www3.uji.es/~agrandio/tesis/35dce272.jpg

1.2 Conceptos fundamentales del movimiento ondulatorio

- **Longitud de onda.**- Es la distancia que una onda viaja a través del tiempo hasta completar un ciclo. Puede ser medida en los picos o en los valles. Esta situación se aplica para ondas senoidales y periódicas (ecuación 1).

$$L = \frac{c}{f} \quad [ec .1]$$

En Dónde:

c = Velocidad del sonido en m/s

f = Frecuencia de la onda sonora en Hz

L = Longitud de onda en m

- **Amplitud.**- Es la distancia por encima y por debajo de la línea central de la onda de sonido. La línea central es la línea horizontal, llamada cero grados. La flecha vertical en la figura de nota la amplitud. La mayor distancia arriba y debajo de la línea central da el volumen de sonido.
- **Frecuencia.** La frecuencia se mide en Hercios (Hertz, Hz) y permite saber a cuantos ciclos por segundo va esa onda. Un ciclo es cuando la onda sube hasta un punto máximo de amplitud, baja hasta atravesar la línea central y llega hasta el punto de amplitud máximo negativo y vuelve a subir hasta alcanzar la línea central. El tono o altura del sonido depende de su frecuencia, es decir el número de oscilaciones por segundo. Cuanto mayor sea la frecuencia, más agudo será el sonido. Cuantos más ciclos por segundo, más elevado será el tono. La altura de un sonido corresponde a nuestra percepción del mismo como más grave o más agudo.
- **Velocidad del sonido.** La velocidad del sonido es independiente de la frecuencia y la intensidad del sonido, dependiendo únicamente de la densidad y la elasticidad del medio. Así, es mayor en los sólidos que en los líquidos y en éstos mayores que en los gases. En el aire y en condiciones normales es de 344 m/s.

En el aire se tiene la ecuación 2:

$$c = \sqrt{\frac{1,4P_0}{\rho}} \quad [ec. 2]$$

En Dónde:

c = Velocidad del sonido

P_0 = Presión Atmosférica

ρ = Densidad del aire

$\rho = 1,18 \text{ Kg/m}^3$

En la figura 2 se observa el comportamiento de la velocidad del sonido en el aire (Miyara, 1999).

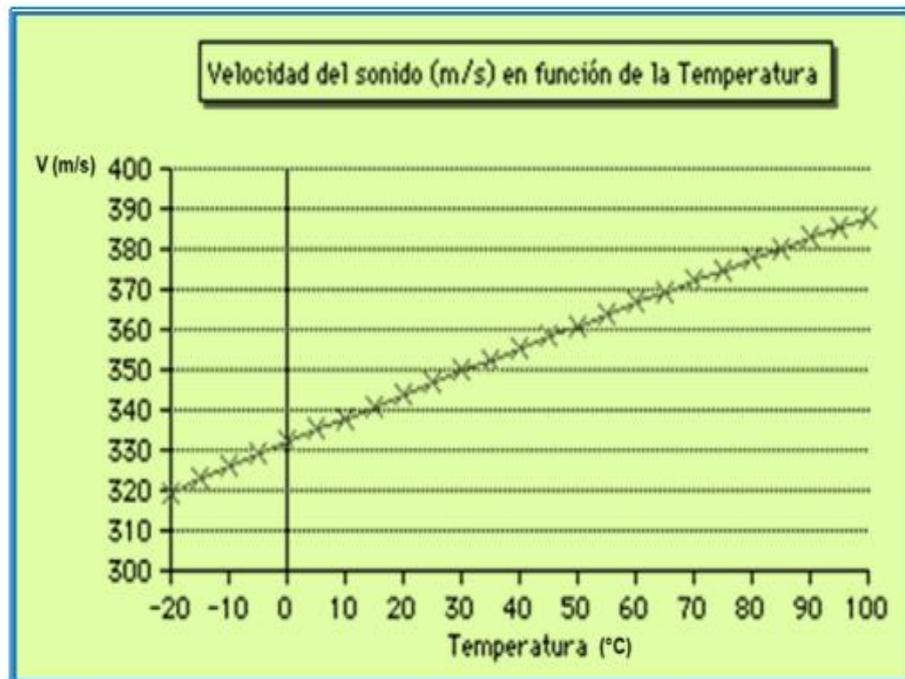


Figura 2. Comportamiento de la velocidad del sonido en el aire.
Fuente: Miyara, F. "Control de ruido". Universidad de Rosario. Argentina (1999).

1.3 Unidad de medida del sonido

- **Decibelio dB.** El decibelio es una unidad logarítmica de medida utilizada en diferentes disciplinas de la ciencia. En todos los casos se usa para comparar una cantidad con otra de referencia. En la acústica la mayoría de las veces el decibelio se utiliza para comparar la presión sonora, en el aire, con una presión de referencia. Este nivel de referencia tomado en acústica, es una aproximación

al nivel de presión mínimo que hace que el oído humano sea capaz de percibirlo. No es el mismo nivel de referencia para la presión acústica que para la intensidad acústica o para la potencia acústica.

Valores referenciales

Nivel de Referencia para la Presión Sonora = $0.00002 = 2E-5$ Pa (rms)

Nivel de Referencia para la Intensidad Sonora = $0.000000000001 = 1E-12$ w/m²

Nivel de Referencia para la Potencia Sonora = $0.000000000001 = 1E-12$ w

El decibelio es la décima parte del Bel. El Bel es el logaritmo en base 10 de la relación de dos potencias o intensidades, siendo esta unidad demasiado grande por lo que se ha normalizado en el uso de la décima parte del Bel, siendo este el decibelio o decibel.

Como se muestra en las ecuaciones 3, 4. Un decibel es la proporción “r” dada por:

$$\log_{10} r = 0,1 \quad [\text{ec. 3}]$$

$$10\log_{10} r = 1\text{dB} \quad [\text{ec. 4}]$$

Dónde r: es la proporción entre la magnitud que se estudia y la magnitud de referencia.

- **dB (A) o ponderación “A”.** El oído humano no percibe igual las distintas frecuencias y alcanza el máximo de percepción en las medias, de ahí que para aproximar más la unidad a la realidad auditiva, se ponderan las unidades.

Por este motivo se definió el decibel de ponderación A (dBA), el cual es una unidad de nivel sonoro medido con un filtro previo que quita parte de las bajas y las muy altas frecuencias.

De esta manera, durante la medición el sonómetro filtra el sonido que percibe para conservar solamente las frecuencias más dañinas para el oído humano. Razón por la cual la exposición medida en dBA es un buen indicador del riesgo auditivo.

A continuación se muestra la tabla 1, la cual exhibe como se logra obtener los niveles sonoros con ponderación A de un sonido, con determinada frecuencia y nivel sonoro, mediante la utilización del filtro de ponderación A.

Frecuencia (Hz)	Curva A (dB)	Frecuencia (Hz)	Curva A (dB)
10	-70,4	500	-3,2
12,5	-63,4	630	-1,9
16	-56,7	800	-0,8
20	-50,5	1000	0
25	-44,7	1250	0,6
31,5	-39,4	1600	1,0
40	-34,6	2000	1,2
50	-30,2	2500	1,3
63	-26,2	3150	1,2
80	-22,5	4000	1,0
100	-19,1	5000	0,5
125	-16,1	6300	-0,1
160	-13,4	8000	-1,1
200	-10,9	10000	-2,5
250	-8,6	12500	-4,3

Tabla 1. Valores que adiciona el filtro de ponderación A, a cada banda de frecuencia de un sonido determinado.

Fuente: Harris, C. M. “Manual de medidas acústicas y control de ruido”. Mc.Graw-Hill. Tercera Edición, Volumen I. España (1995).

Cabe destacar que el valor del nivel sonoro que muestran los sonómetros con filtro de ponderación A, es un valor promediado de todas las frecuencias del sonido que está midiendo, es decir, el sonómetro muestra un valor único que incluye todas las frecuencias del sonido medurado.

Todos los sonómetros vienen por defecto con la ponderación A y a menos que se indique lo contrario, la medida arrojada por el aparato será con filtro de ponderación A, es decir, que si un sonómetro muestra una medida en dB, ésta medida será en dB(A) (Harris, 1995).

1.4 Características del sonido

1.4.1 Nivel de presión sonora

Por definición, el nivel de presión sonora ecuación 5, de las ondas sonoras con una presión sonora igual a P es igual a:

$$NPS = 20 \log \frac{P}{20} \quad [ec. 5]$$

Dónde:

NPS : Nivel de presión sonora (dB).

P : Presión sonora (μPa).

Por ejemplo, la presión sonora de un sonido de $20\mu Pa$ (20 micropascales) corresponde a un nivel de presión sonora de 0 dB, una presión sonora de $40\mu Pa$ (40 micropascales) corresponde a un nivel de presión sonora de 6dB y una presión sonora de $200\mu Pa$ (200 micropascales) corresponde a un nivel de presión sonora de 20 dB. Así, doblar cualquier valor de presión sonora corresponde a un aumento en 6dB en el nivel de presión sonora. Dichos niveles de presión sonora se obtienen tomando como referencia una presión sonora de $20\mu Pa$.

La ecuación relacionada anteriormente se muestra gráficamente en la Fig. 3 (FIBERGLASS, 1999).

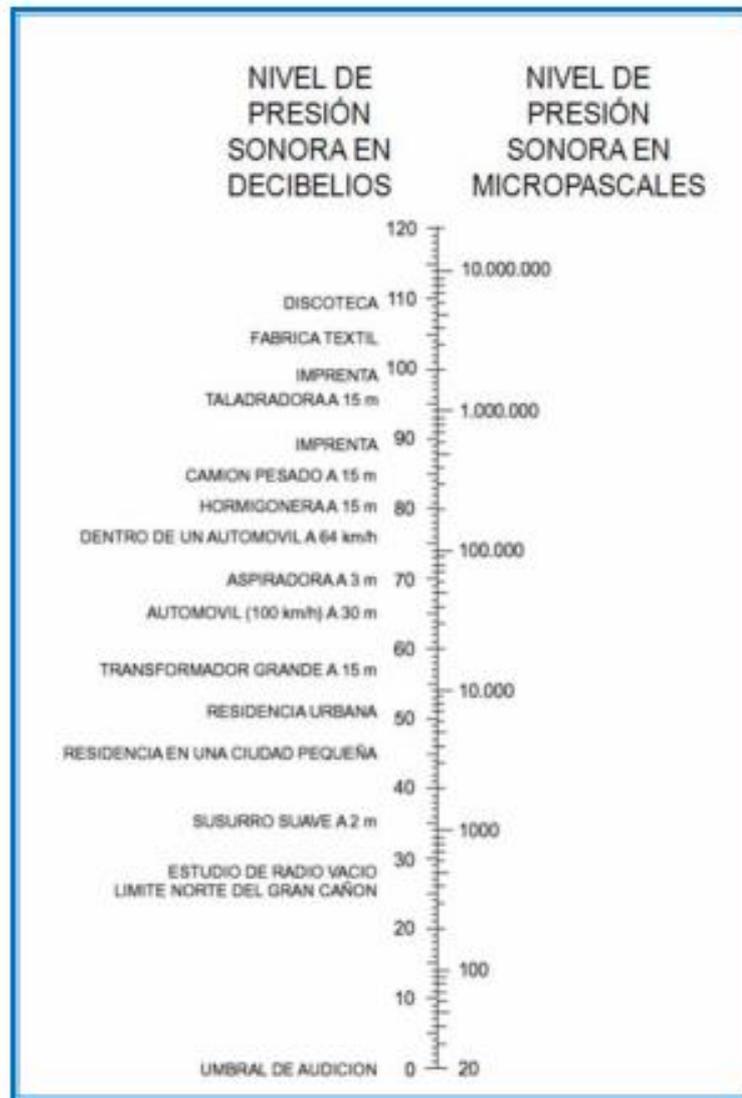


Figura 3. Relación entre el nivel de presión sonora en micropascales y el nivel de presión sonora en decibelios

Fuente: <http://www.fiberglasscolombia.com/imagenes/notas1/NTArq43.pdf>

1.4.2 Potencia sonora

La potencia sonora (W) de una fuente es la cantidad de energía acústica que emite por unidad de tiempo. Si la intensidad es la cantidad de energía por unidad de superficie, la potencia será la intensidad de toda la superficie espacial que esté a una distancia constante de la fuente. Esta superficie es naturalmente la de una esfera, cuyo radio es la distancia a la fuente. La relación se expresa por la siguiente Ecuación 6. (FIBERGLASS, 1999)

$$W = I_{PROM}(4\pi r^2) \quad [ec. 6]$$

Dónde:

W = Potencia Sonora (Watts).

I_{PROM} = Intensidad promedio (W/m^2).

$4\pi r^2$ = Superficie de una esfera a una distancia r (m2).

1.4.3 Nivel de potencia sonora

La potencia sonora de una fuente se expresa en vatios o en alguna fracción de vatios. A menudo resulta más cómodo expresarla sobre una escala logarítmica quedando expresado como nivel de potencia sonora cuya unidad es el decibel (dB) y se obtiene mediante la siguiente Ecuación 7.

$$L_W = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad [ec. 7]$$

Dónde:

L_W = Nivel de potencia sonora (dB).

W : Potencia de la fuente (Watts).

W_0 : Potencia de referencia (1pW).[]

Para medios o campos difusos (locales total o parcialmente cerrados) el nivel de potencia sonora se obtiene mediante la Ecuación 8:

$$L_W = L_p + 10(\log A) - 6 \quad [ec. 8]$$

Dónde:

L_W : Nivel de potencia sonora (dB referido a 1pW).

L_p : Nivel de presión sonora del campo (dB).

A : Absorción sonora antes de tratamiento acústico (Sabinos Métricos).

El nivel de potencia sonora en espacios abiertos o campos libres se puede determinar por medio de la Ecuación 9:

$$L_W = L_p + 20 (\log R) + 10,9 - C \quad [ec. 9]$$

Dónde:

L_w : Nivel de potencia sonora (dB referido a 1pW).

L_p : Nivel de presión sonora del campo abierto (dB).

R : Distancia de alejamiento de la fuente (m).

C : Término de corrección (dB).

En la ecuación anterior el término de corrección depende de la temperatura y la presión atmosférica, es habitualmente insignificante salvo para temperaturas y/o presiones que difieran significativamente de 20°C y 1 atm (105 Pa ó 1000 mbar), respectivamente. Dicha ecuación no considera amortiguamiento por aire y vapor de agua en el medio de transmisión.

En la Figura 4 se muestra la obtención del término de corrección C .

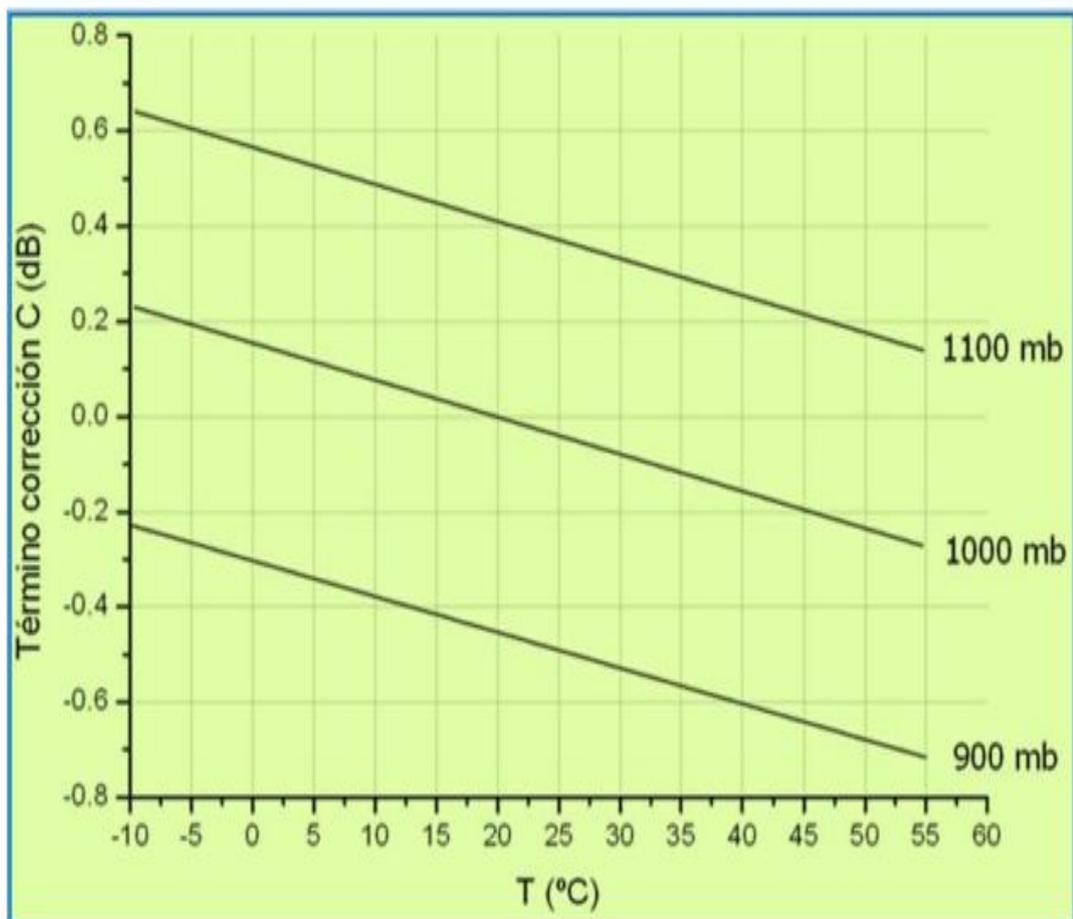


Figura 4. Término de corrección C en función de la temperatura, para 3 valores de presión atmosférica: 900 mbar, 1000 mbar y 1100

Fuente: Harris, C. M. "Manual de medidas acústicas y control de ruido". Mc.Graw-Hill. Tercera Edición, Volumen I. España (1995).

La Tabla 2, presenta una diversidad de fuentes de sonido con su respectivo nivel de potencia en decibeles (tomando como referencia 1picovatio) y en vatios (W).

Potencia (W)	Nivel de Potencia Sonora. (dB)	Fuente
100.000.000	200	Motor de un Cohete
10.000	160	Motor de un avión turbojet
1.000	150	
100	140	Aeroplano ligero en crucero
10	130	
1	120	
0.1	110	Tractor oruga 150Hp
0.01	100	Motor eléctrico 100Hp. 2600rpm
0.001	90	
0.0001	80	Aspiradora
0.00001	70	Gaita Escocesa
0.000001	60	
0.0000001	50	
0.00000001	40	Habla susurrada
0.000000001	30	

Tabla 2. Nivel de potencia sonora (referido a 1pW) medido de varias fuentes acústicas.
Fuente: Harris, C. M. “Manual de medidas acústicas y control de ruido”. Mc.Graw-Hill. Tercera Edición, Volumen I. España (1995).

1.4.4 Intensidad acústica

Dado que en una onda sonora sólo hay energía en los puntos por los que está pasando la perturbación, resulta que la energía se va propagando junto con la perturbación. Esta propiedad fundamental se verifica también para otros fenómenos ondulatorios, como los electromagnéticos. Se define la intensidad acústica “I”, como la potencia (energía por unidad de tiempo) transmitida por un onda por unidad de superficie. Para una onda plana se representa con la ecuación 10.

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad [ec. 10]$$

Dónde:

I = Intensidad Acústica (W/m²).

p^2 = Presión Sonora Efectiva (Pa).

C = Velocidad de Propagación del Sonido (m/s).

ρ = Densidad del aire (Kg/m³).

En campo difuso cerca de las paredes la intensidad se obtiene por ecuación 11:

$$I = \frac{p^2}{4\rho c} \quad [ec. 11]$$

Dónde:

I = Intensidad Acústica (W/m²).

p^2 = Presión Sonora (Pa).

C = Velocidad de Propagación del Sonido (m/s).

ρ = Densidad del aire (Kg/m³).

1.4.5 Nivel de intensidad acústica

Se define, al nivel de intensidad sonora de las ondas acústicas mediante la ecuación 12

$$NSI = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [ec. 12]$$

Dónde:

NIS: Nivel de Intensidad Sonora (dB).

I : Intensidad Sonora (W/m²).

I_0 : Intensidad Sonora de Referencia (10⁻¹² W/m²).

En la Tabla 3, se indica los valores de diversos niveles de intensidad:

140 dB	Umbral del dolor
130 dB	Avión despegando
120 dB	Motor de avión en marcha
110 dB	Concierto
100 dB	Perforadora eléctrica
90 dB	Tráfico
80 dB	Tren
70 dB	Aspiradora
50/60 dB	Aglomeración de Gente
40 dB	Conversación
20 dB	Biblioteca
10 dB	Respiración tranquila

Tabla 3. Valores de niveles de intensidad sonora de fuentes comunes de sonido.
Fuente: Miyara, F. "Control de ruido". Universidad de Rosario. Argentina (1999).

1.5 Sonido en espacios cerrados

El comportamiento del sonido alrededor de una fuente en un espacio cerrado, es distinto de lo que sería si la misma fuente estuviera al aire libre, lejos de cualquier superficie reflejante, esto debido a que el sonido se refleja sobre los límites del cerramiento y parte de la energía sonora es reflejada, parte absorbida y parte transmitida a través de las paredes del mismo.

- Reflexión

Cuando las ondas sonoras viajan hacia afuera de la fuente en todas las direcciones. Cuando las ondas sonoras se encuentran con un obstáculo que no pueden traspasar ni rodear rebota sobre el objeto. Cuando el obstáculo es fijo, como una pared, el módulo de la velocidad se conserva, ver figura 5. En la propagación del sonido, también se cumplen las leyes de la reflexión de las

ondas, es decir, $\hat{i} = \hat{r}$ (ángulo de incidencia = ángulo de reflexión) (Wikipedia, 2013).

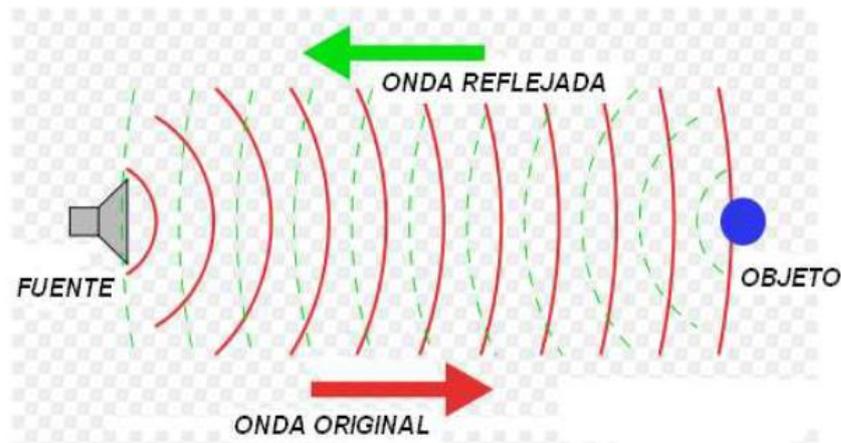


Figura 5. Reflexión de las ondas

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Reflexi%C3%B3n_%28sonido%29

- Refracción

Es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio a otro. Sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si éstos tienen índices de refracción distintos.

La refracción se origina en el cambio de velocidad que experimenta la onda. El índice de refracción es precisamente la relación entre la velocidad de la onda en un medio de referencia (el vacío para las ondas electromagnéticas) y su velocidad en el medio de que se trate. (Wikipedia, 2013).

- Ondas estacionarias

Una onda estacionaria se produce por la suma de una onda y su onda reflejada sobre un mismo eje. Dependiendo cómo coincidan las fases de la onda incidente y de la reflejada, se producirán modificaciones en el sonido (aumenta la amplitud o disminuye), por lo que el sonido resultante puede resultar desagradable. En determinadas circunstancias, la onda estacionaria puede hacer que la sala entre en resonancia (Wikipedia, 2013).

- Eco

Es la reflexión única de un mensaje sonoro sobre una pared reflectante lejana. Es un fenómeno conocido que pone en manifiesto la reflexión de las ondas sonoras. En condiciones normales, las ondas sonoras se propagan a una velocidad de 330 metros por segundo.

El eco se explica como la onda reflejada la cual nos llega en un tiempo superior al de la persistencia acústica.

Se conoce como persistencia acústica al fenómeno por el cual el cerebro humano interpreta como un único sonido dos sonidos diferentes recibidos en un corto espacio de tiempo. Para que el oído perciba dos sonidos como diferentes, ambos sonidos deben tener una diferencia entre sí de al menos 70 milisegundos para sonidos secos (palabra) y 100 milisegundos para sonidos complejos.

Si consideramos que la velocidad del sonido es de 330 m/s, para que se perciban dos sonidos como distintos la diferencia entre el recorrido directo y el recorrido reflejado del sonido debe ser de al menos aproximadamente 34 metros (Wikipedia, 2013).

- Reverberación

Se produce reverberación cuando las ondas reflejadas llegan al oyente antes de la extinción de la onda directa, es decir, en un tiempo menor que el de persistencia acústica del oído.

El período de reverberación es el tiempo requerido para que el sonido en un recinto caiga hasta una millonésima de su intensidad original o decrezca 60 dB. El tiempo de reverberación de un recinto se calcula por la ecuación 13

$$T = 0,16 \times \left(\frac{V}{A}\right) \quad [ec. 13]$$

T = Tiempo de reverberación en segundos

V = Volumen del local en metros cúbicos

A = Coeficiente de absorción medio del recinto

Tiempos de reverberación de algunos recintos tabla 4 (SONIDO TEMA 1).

TIEMPOS CARACTERÍSTICOS DE REVERBERACIÓN TR		
FUNCIONES / Utilización del lugar y del volumen	TR mínimo en s	TR máximo en s
Sala de conferencias	0,6	1,3
Anfiteatro	0,6	1,6
Sala de cine	0,5	1,2
Teatro	1	1,8
Sala de conciertos (variedades)	1,4	2
Sala de conciertos (música orquestal)	1,6	3
Lugares de culto	1,8	3,2
Restaurante / Cafetería		1,8
Night club	0,6	1,6
Gimnasio / Piscina / Pabellón deportivo		2,7
Sala polivalente	1,4	2
Local industrial		3

Tabla 4. Tiempos de reverberación
Fuente: <http://books.google.com.ec/books>

1.6 El ruido

Algunas de las ondas sonoras que inciden sobre los oídos de las personas contienen información deseada o útil. Otras de ellas son parte de un entorno natural y están tan integrados a nuestra percepción del ambiente que muchas veces ni siquiera las notamos. Sin embargo, existe otro tipo de ondas sonoras que no son bien acogidas. Estos sonidos no deseados reciben el nombre de ruido. El ruido puede provocar efectos de variada índole, que van desde simples molestias hasta problemas clínicos no reversibles o alteraciones psíquicas severas.

1.6.1 Ruido y sus riesgos en la salud por exposición prolongada

“El ruido puede ser definido como un “sonido indeseable”. Es una forma de vibración que puede conducirse a través de sólidos, líquidos o gases. Es una forma de energía que hay en el aire, vibraciones invisibles que entran al oído y crean una sensación auditiva.”

Existen cuatro factores de primer orden que determinan el riesgo de pérdida auditiva:

- Nivel de presión sonora
- Tipo de ruido
- Tiempo de exposición al ruido
- Edad

También existen otros factores a más de estos citados como son las características del trabajador receptor del ruido, ambiente de trabajo, distancia del foco sonoro y posición respecto a este, sexo, enfermedades, y sordera por traumatismo craneal.

Entre los efectos del ruido sobre el hombre, se incluye:

- Efectos psicológicos: por ejemplo, el ruido puede sorprender, molestar e interrumpir la concentración, el sueño o el descanso, incrementa el estrés.
- Interposición entre las comunicaciones orales y, como consecuencia, entre el rendimiento y la seguridad en el trabajo.
- Efectos fisiológicos: por ejemplo, el ruido ocasiona pérdidas de las facultades auditivas, dolor aural, náuseas y reducción del control muscular (cuando la exposición es intensa).
- Efectos Cardiovasculares: Incrementa los latidos y por tanto el trabajo del corazón.

Criterio de los peligros de lesión: Si el oído está expuesto a niveles elevados de ruido por un período suficiente de tiempo, puede haber alguna disminución auditiva. Un número de factores puede influir en los efectos de la exposición al ruido; entre ellos tenemos:

- Variación de la susceptibilidad individual.
- Energía total del sonido.
- Distribución de la frecuencia del sonido.
- Otras características de la exposición al ruido, tales como, su continuidad o si consiste en una serie de impactos.
- Tiempo diario de exposición total.
- Tiempo que lleva la persona trabajando en un ambiente de ruido.

El aumento progresivo de los niveles de mecanización en los diferentes puestos de trabajo y el incremento de los ritmos de producción así como la incorporación de nuevas tecnologías en algunas aplicaciones en las que antes el trabajo era sustancialmente manual, son responsables de que muchas actividades se desarrollen en un ambiente cada vez con mayor contaminación sonora.

La NIOSH (National Institute Of Occupational Safety and Health) que es el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional estableció en un estudio que el nivel de aceptación sonora para un tiempo de exposición de 8 horas es de 85 dB(A) que tiene una aceptación de riesgo del 10 al 15 por 100, por lo tanto el nivel permitido para un ruido continuo es de 85 dB (A).

Las exposiciones diarias al ruido se componen a veces de dos o más períodos de exposición al ruido a distintos niveles, entonces, se debe tomar en consideración el efecto global, en lugar del efecto individual de cada período; esto es conocido como la Dosis de Ruido (ecuación 14):

$$D = \frac{t_1}{TLV_1} + \frac{t_2}{TLV_2} + \frac{t_3}{TLV_3} + \dots + \frac{t_n}{TLV_n} \quad [ec. 14]$$

t_i = Tiempo de exposición real.

TLV_i = Tiempo máximo permitido a ese nivel de ruido medido.

Cuando este valor es MAYOR que la unidad entonces se debe considerar que existe riesgo pues la exposición global sobrepasa el valor límite; el ambiente es más peligroso si la dosis es mayor.

Para el caso de ruidos continuos, los niveles sonoros medidos en decibeles estarán relacionados con el tiempo de exposición según lo indica la siguiente tabla 5:

Tiempo de exposición en horas	Nivel Sonoro dB(A)
16	80
8	85
4	90
2	95
1	100
½	105
¼	110
1/8	115*

*Ninguna exposición a ruido continuo o intermitente que sobrepase los 115 dBA.

Tabla 5. Valores tlv para el ruido

Fuente: MARTÍNEZ, P. Juan Manuel, Manual de Seguridad e Higiene Industrial

1.6.2 Tipos de ruido

1.6.2.1 Ruido continuo

Cuando se manifiesta ininterrumpidamente durante más de 10 minutos; dentro de este tipo de ruidos se encuentran los siguientes:

- **Ruido continuo uniforme:** Si las variaciones de la presión acústica, utilizando la posición de respuesta lenta del equipo de medición, varían +- 3dB.
- **Ruido continuo variable:** Si la variación oscila entre +-3 y +- 6dB.
- **Ruido continuo fluctuante:** Si la variación entre límites difiere +- 6dB.

1.6.2.2 Ruido transitorio

Este se manifiesta ininterrumpidamente durante un período de tiempo igual o menor a cinco minutos. Dentro de este tipo de ruido se diferencian tres categorías:

- **Ruido transitorio periódico:** Cuando el ruido se repite con mayor o menor exactitud, con una periodicidad de frecuencia que si es posible determinar.
- **Ruido transitorio aleatorio:** Cuando se produce de una forma totalmente imprevisible, por lo que para su correcta valoración es necesario un análisis estadístico de la variación temporal del nivel sonoro durante un tiempo suficientemente significativo.
- **Ruido de fondo:** Constituye un matiz del ruido ambiental y se caracteriza por la ausencia de uno o varios focos perturbadores en el exterior, y que equivale a un nivel de presión acústica que supera el 90% de un tiempo de observación suficientemente significativo, en ausencia del ruido objeto de la inspección.

1.6.2.3 Ruido objetivo

Es aquel que servirá para identificar a una fuente sonora o vibrante que funciona de forma automática o aleatoria, sin que intervenga persona alguna que pueda variar las condiciones de funcionamiento de la fuente.

1.6.2.4 Ruido subjetivo

Cuando las condiciones objetivas de la fuente quedan supeditadas a la voluntad del manipulador de la fuente.

1.6.3 Procedimientos de medición de ruido

Para realizar nuestras mediciones acústicas, hay que seguir los siguientes pasos básicos:

- Determinar qué cantidades hay que medir.

- Seleccionar los instrumentos incluido el tipo de micrófono que se va a utilizar, resulta útil hacer un diagrama de bloques de todos los instrumentos y equipamientos necesarios.
- Determinar el número mínimo de posiciones del micrófono y su localización.
- Comprobar la sensibilidad del sistema de medida, realizando todas las calibraciones necesarias.
- Medir los niveles sonoros de la fuente, anotando todos los valores de los parámetros relevantes seleccionados en los instrumentos.
- Aplicar todas las correcciones necesarias a las medidas observadas.
- Hacer un registro escrito de los datos relevantes (niveles de presión sonora, niveles de potencia sonora, etc.). Estos datos incluyen los valores de los parámetros relevantes seleccionados en los instrumentos, cualquier suceso inusual durante el funcionamiento de la fuente de ruido y las condiciones ambientales si son significativas.

1.6.4 Instrumentos de medición acústica

Existen muchos tipos de aparatos para medir los niveles sonoros. Entre ellos, el más utilizado es el sonómetro (figura 6), que es un dispositivo que nos permite tomar una medida del nivel de presión sonora ponderado en frecuencia y en tiempo. La mayoría de éstos son de tamaño pequeño, poco peso y fácil funcionamiento. Es esencial un estudio detallado del manual del fabricante para el uso de cada aparato.



Figura 6. Foto del sonómetro
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Los componentes principales de un sonómetro son: el micrófono, el preamplificador, el amplificador, el promediador de tiempo (Rectificador) y el indicador.

1.6.5 Contaminación acústica

Se llama contaminación acústica al exceso de sonido que altera las condiciones normales del medio ambiente en una determinada zona. Si bien el ruido no se acumula, traslada o mantiene en el tiempo como otras contaminaciones, también puede causar grandes daños en la calidad de vida de las personas si no es controlada. El término contaminación acústica hace referencia al ruido (entendido como sonido excesivo y molesto), provocado por las actividades humanas (en este caso en la industria), que produce efectos negativos sobre la salud auditiva, física y mental de las personas.

Este término está estrechamente relacionado con el ruido debido a que esta se da cuando el ruido es considerado como un contaminante, es decir, un sonido molesto que puede producir efectos nocivos fisiológicos y psicológicos para una persona o grupo de personas. Las principales causas de la contaminación acústica son aquellas relacionadas con las actividades humanas como el transporte, la construcción de edificios y obras públicas, la industria, entre otras.

Se ha dicho por organismos internacionales, que se corre el riesgo de una disminución importante en la capacidad auditiva, así como la posibilidad de trastornos que van desde lo psicológico (paranoia, perversión) hasta lo fisiológico por la excesiva exposición a la contaminación sónica.

Un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS), considera los 50 dB (decibeles), como el límite superior deseable.

Dentro de este punto de contaminación acústica debemos tener en cuenta el Reglamento para el Control de Contaminación por Ruido N° 28718-S el cual considera:

1°- Que la salud de la población es un bien de interés público tutelado por el Estado.

2°- Que toda persona tiene derecho a un ambiente sano y ecológicamente equilibrado.

3°- Que toda persona, natural o jurídica queda sujeta a los mandatos de la Ley General de Salud, de sus reglamentos y de las órdenes generales y particulares, ordinarias y de emergencia, que las autoridades de salud dicten en el ejercicio de sus competencias.

4°- Toda persona natural o jurídica, está obligada a contribuir a la promoción y mantenimiento de las condiciones del medio ambiente natural y de los ambientes artificiales que permitan llenar las necesidades vitales y de salud de la población.

Para realizar este estudio debemos tener muy en cuenta lo que dicta este reglamento y cada uno de sus puntos deben ser revisados para ampliamente para que nuestro sistema cumpla o este desarrollado de acuerdo a la reglamentación municipal.

1.6.6 Control de ruido

El control de ruido es básicamente un problema de un sistema en que pueden modificarse sus distintos componentes para lograr un resultado final particular. Habitualmente los problemas en el control de ruido pueden representarse mediante un diagrama ilustrado en la figura 7, que contiene tres partes principales: La fuente, la vía y el receptor.

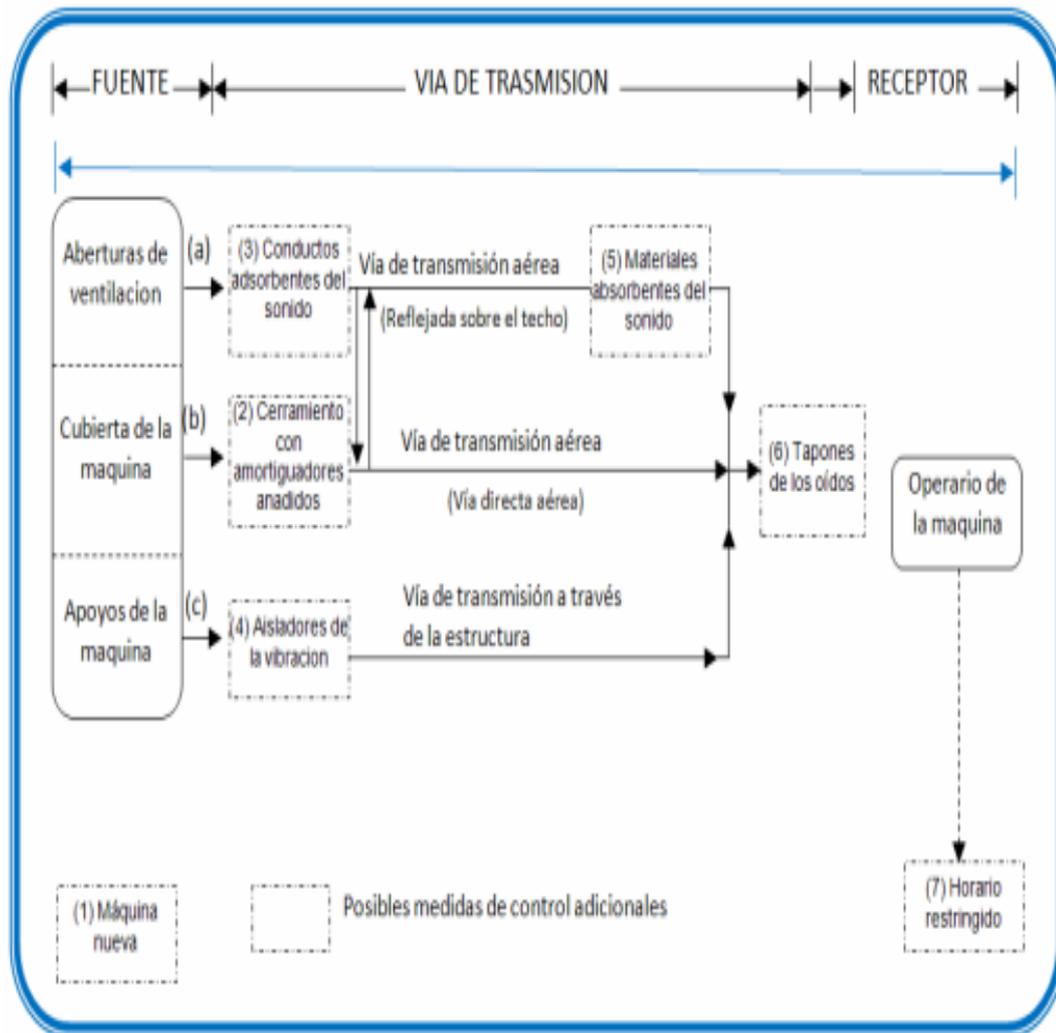


Figura 7. Diagrama de bloques del sistema de control de ruido

Fuente: Harris, C. M. “Manual de medidas acústicas y control de ruido”. Mc.Graw-Hill. Tercera Edición, Volumen II. España (1995).

1.6.6.1 Aislamiento acústico

Aislar supone impedir que un sonido penetre en un medio o que salga de él. Para aislar, se usan tanto materiales absorbentes, como materiales aislantes. Al incidir la onda sobre un elemento constructivo, una parte de la energía se refleja, otra se absorbe y otra se transmite al otro lado. El aislamiento que ofrece el elemento es la diferencia entre la energía incidente y la energía transmitida, es decir, equivale a la suma de la parte reflejada y la parte absorbida.

Existen diversos factores que intervienen en la obtención de un buen aislamiento acústico.

- Factor másico

El aislamiento acústico se consigue principalmente por la masa de los elementos constructivos: a mayor masa, mayor resistencia que se opone al choque de la onda sonora y mayor es la atenuación.

- Factor multicapa

Cuando se habla de elementos constituidos por varias capas, la disposición adecuada de estas puede mejorar el aislamiento acústico hasta niveles superiores a los que la suma del aislamiento individual de cada capa. Esta capa tiene una frecuencia de resonancia que depende del material que lo compone y de su espesor. Si el sonido (o ruido) que llega al elemento tiene esa frecuencia producirá la resonancia y al vibrar el elemento, producirá sonido que se sumará al transmitido. Por ello, si se disponen dos capas del mismo material y distinto espesor, y que por lo tanto tendrán distinta frecuencia de resonancia, la frecuencia que deje pasar en exceso la primera capa, será absorbida por la segunda.

- Factor de disipación

También mejora el aislamiento si se dispone entre las dos capas un material absorbente. Estos materiales suelen ser de poca densidad (30 kg/m^3 - 70 kg/m^3) y con gran cantidad de poros y se colocan normalmente porque además suelen ser también buenos aislantes térmicos. Así, un material absorbente colocado en el espacio cerrado entre dos capas paralelas mejora el aislamiento que ofrecerían dichas capas por sí solas.

1.6.6.2 Materiales acústicos

La finalidad de los diversos materiales acústicos es disipar la energía acústica indeseable o perjudicial y optimizar la distribución de los sonidos útiles. Aunque un mismo material puede cumplir varias funciones a la vez, resulta interesante establecer las siguientes categorías.

- a) **Materiales Absorbentes:** absorben la energía acústica de las ondas que inciden en su superficie transformándola en calor, y reduciendo por consiguiente la energía acumulada en un recinto. Poseen un coeficiente de absorción sonora considerable.
- b) **Materiales Aislantes:** impiden la propagación del sonido de un recinto a otro. Su pérdida de transmisión es elevada (producen altos niveles de reflexión sonora debido a su bajo NRC).
- c) **Materiales Difusores:** contribuyen a lograr un campo sonoro más difuso en un recinto, y por consiguiente permiten controlar resonancias y otros defectos acústicos.

1.6.7 Coeficiente de absorción del sonido (α)

Se denomina coeficiente de absorción del sonido (α) a la parte de la energía acústica absorbida cuando las ondas sonoras chocan con una superficie. El coeficiente de absorción de un material depende de la frecuencia del sonido que choca contra la superficie del material. Un coeficiente de 0,00 indica una reflexión perfecta (0% de absorción); un coeficiente de 1,00 indica una absorción perfecta (100% de absorción).

1.6.8 Coeficiente de reducción de ruido (NRC)

El coeficiente de reducción de ruido (NRC) de un material es un número único que es el valor medio de los coeficientes de absorción del material a las frecuencias de 250, 500, 1000 y 2000 Hz (Harris, 1995); y se determina por:

Dónde:

- NRC: Coeficiente de Reducción de Ruido (adimensional).
- α_{250} : Coeficiente de absorción del sonido del material a una frecuencia de 250Hz (adimensional).
- α_{500} : Coeficiente de absorción del sonido del material a una frecuencia de 500Hz (adimensional).

- α_{1000} : Coeficiente de absorción del sonido del material a una frecuencia de 1000Hz (adimensional).
- α_{2000} : Coeficiente de absorción del sonido del material a una frecuencia de 2000Hz (adimensional).

Los coeficientes de reducción de ruido son utilizados en la especificación de los materiales en aplicaciones de control de ruido. A continuación se presenta la tabla 6 y 7, con los coeficientes de absorción del sonido y sus respectivos coeficientes de reducción de ruido.

Tabla 6.- Coeficientes de absorción del sonido de materiales de construcción

Coeficientes de absorción del sonido							
Material de Construcción	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC
Balasto u otra piedra triturada:							
3,18 cm (1 ¼ in) de tamiz y 15,2 cm (6 in) de profundidad.	0,19	0,23	0,43	0,37	0,58	0,62	0,4025
3,18 cm (1 ¼ in) y 30,5 cm (12 in) de profundidad.	0,27	0,58	0,48	0,54	0,73	0,63	0,5825
3,18 cm (1 ¼ in) y 45,7 cm (18 in) de profundidad.	0,41	0,53	0,64	0,84	0,91	0,63	0,73
0,64 cm (¼ in) o menos de agregado de granito y 15,2 cm (6 in) de profundidad.	0,22	0,64	0,70	0,79	0,88	0,72	0,7525
Ladrillo no esmaltado	0,03	0,03	0,03	0,04	0,0	0,07	0,025
Ladrillo no esmaltado pintado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,0175
Alfombra pesada:							
Sobre hormigón	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65	0,2925
Sobre pelusa o espuma de caucho de 1350 g/m ² (40 oz/yd ²)	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73	0,5525
Sobre pelusa o espuma de caucho de 1350 g/m ² (40 oz/yd ²) con apoyo de látex impermeable	0,08	0,27	0,39	0,34	0,48	0,63	0,37
Bloque de hormigón tosco	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25	0,3575
Bloque de hormigón pintado	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,0675
Cortinas:							
Visillo ligero, 338 g/m ² (10oz/yd ²), colgado recto, en contacto con la pared	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35	0,14
Visillo medio, 475 g/m ² (14 oz/yd ²), drapeado hasta la mitad de su área	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60	0,5625
Visillo pesado, 610 g/m ² (18 oz/yd ²), drapeado hasta la mitad de su área	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65	0,58

(Continuación tabla 6)

Coeficientes de absorción del sonido							
Material de Construcción	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC
Tableros y mantas de fibra de vidrio:							
Lana de vidrio de 2,54 cm (1 in), 24 kg a 48 kg/m ³ (1,5 a 3,0 lb/ft ³)	0,08	0,25	0,65	0,85	0,80	0,75	0,6375
Lana de vidrio de 5,1 cm (2 in), 24 kg a 48 kg/m ³ (1,5 a 3,0 lb/ft ³)	0,17	0,55	0,80	0,90	0,85	0,80	0,7625
Lana de vidrio de 2,54 cm (1 in) y cámara de aire de 2,54 cm (1 in)	0,15	0,50	0,80	0,90	0,85	0,80	0,775
Paneles de fibra de vidrio de 5,1 cm (2 in), instalados con cubierta de lámina plástica y panel frontal de metal perforado	0,33	0,79	0,99	0,91	0,76	0,64	0,8625
Suelos:							
Hormigón o terrazo	0,01	0,01	0,015	0,02	0,02	0,02	0,0162
Baldosas de linóleo, asfalto, caucho o corcho sobre hormigón	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03
Madera	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,085
Parquet de madera sobre asfalto u hormigón	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	0,0575
Vidrio:							
Grandes paneles de placas de cristal pesado	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,0375
Cristal ordinario de ventana	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	0,065
Tablero de escayola de 1,27 cm (½ in), clavado a travesaños de 5,1 por 10,2 cm (2 por 4 in), con 41 cm (16 in) de centro a centro	0,26	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	0,065
Baldosa de mármol o esmaltada	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,0125
Coeficientes de absorción del sonido							
Material de Construcción	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC
Spray mineral sobre materiales:							
Fibra mineral de 1,27 cm (½ in)	0,05	0,15	0,45	0,70	0,80	0,80	0,525
Fibra mineral de 1,9 cm (¾ in)	0,10	0,30	0,60	0,90	0,90	0,85	0,675
Fibra mineral de 2,5 cm (1 in)	0,16	0,45	0,70	0,90	0,90	0,85	0,7375

(Continuación tabla 6)

Fibra mineral de 1,27 cm (½ in) sobre listones de metal con cámara de aire de 2,54 cm (1 in)	0,25	0,50	0,80	0,90	0,90	0,85	0,775
Masilla, escayola o cal, con acabado liso sobre baldosa o ladrillo	0,013	0,015	0,02	0,03	0,04	0,05	0,02625
Masilla, escayola o cal, con acabado burdo sobre listón	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03	0,0625
IDEN, con acabado liso	0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03	0,06
Panel de contrachapado, de 1 cm (3/8 in) de grosor	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11	0,145
La superficie del agua, como en una piscina	0,008	0,008	0,013	0,015	0,020	0,025	0,014
Ventana Totalmente Abierta	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 6. Coeficientes de absorción del sonido de materiales de construcción

Fuente: Harris C.M. " Manual de medidas acústicas y control de ruido" .Mc Graw Hill Tercera Edición.

Coeficientes de reducción de ruido de alfombras sobre hormigón desnudo.

Construcción	Peso del pelo kg/m ² (oz/yd ²)	Altura del pelo, mm (in)	Superficie	Fibra	NRC
Tejida	1,2 (35)	4 (0,175)	Cortado	Lana	0,30
Tejida	1,2 (35)	4 (0,175)	Corte	Lana	0,35
De nudo	1,1 (3,2)	14 (0,56)	Cortado	Nylon	0,50
De nudo	1,3 (32)	14 (0,56)	Cortado	Acrílica	0,50
De nudo	1,5 (43)	13 (0,50)	Cortado	Madera	0,55
Tejida	1,5 (44)	6 (0,25)	Rizo	Lana	0,30
Tejida	2,3 (66)	10 (0,375)	Rizo	Lana	0,40
Tejida	3,1 (88)	13 (0,50)	Rizo	Lana	0,40
De nudo	0,5 (15)	6 (0,25)	Rizo	Lana	0,25
De nudo	1,4 (40)	6 (0,25)	Rizo	Lana	0,35
De nudo	2,1 (60)	6 (0,25)	Rizo	Lana	0,30

Tabla 7. Coeficientes de reducción de ruido de alfombras sobre hormigón desnudo.

Fuente: Harris C.M. " Manual de medidas acústicas y control de ruido" .Mc Graw Hill Tercera Edición.

1.6.9 Absorción sonora de un local

La absorción sonora de un local se obtiene multiplicando el área de la superficie S, por su respectivo coeficiente de absorción sonora o coeficiente de reducción de ruido y se representa por la ecuación 15:

$$A_{SUPERFICIE} = (a_1 a_1) + (a_2 a_2) + (a_3 a_3) + \dots + \dots + \dots \quad [ec. 15]$$

Dónde:

$A_{SUPERFICIE}$: Absorción Sonora de local (Sabinos Métricos).

a_I : Coeficiente de absorción de la superficie 1 (Adimensional).

S_I : Superficie 1 (m^2).

La absorción sonora de un local se obtiene también mediante la ecuación 16:

$$A_{SUPERFICIE} = (NRC_1 S_1) + (NRC_2 S_2) + (NRC_3 S_3) + \dots + \dots + \dots \quad [ec. 16]$$

Dónde:

$A_{SUPERFICIE}$: Absorción Sonora de local (Sabinos Métricos).

NRC_1 : Coeficiente de Reducción de ruido de Superficie 1 (Adimensional).

S_1 : Superficie 1 (m^2)

1.6.10 Nivel de reducción de ruido

Es la cantidad (en dB) en que se reduce los niveles de presión sonora en un local que ha sido tratado acústicamente, dicha reducción se consigue mediante la Ec. detallada a continuación:

Dónde:

NRR: Nivel de Reducción de Ruido (dB).

A_A : Absorción Sonora Luego del Tratamiento Acústico (Sabinos Métricos).

A_B : Absorción Sonora Antes del Tratamiento Acústico (Sabinos Métricos).

1.6.11 Silenciadores acústicos

Los silenciadores son elementos que se intercalan en los conductos por dónde fluye un gas. Su misión es la de reducir al máximo el ruido transmitido.

La atenuación acústica debe ser la mayor posible. Dependiendo de la velocidad del gas, se exigirán unas condiciones aerodinámicas especiales. Los materiales que componen el silenciador acústico vendrán determinados por la temperatura y la presión del gas. La geometría y dimensiones del silenciador vendrán determinados en cada caso por el espacio disponible, el caudal y la pérdida de carga. Los silenciadores acústicos rectangulares se caracterizan por tener un recubrimiento de material absorbente en su interior que define su funcionamiento.

1.6.12 Tipos de silenciadores acústicos

1.6.12.1 Silenciadores resistivos

Son conductos metálicos de contorno ciego, cubiertos internamente con aislamiento sonoro y sus dos extremos abiertos, que obligan al paso del aire desde su boca de entrada hacia la de salida. Los modelos de silenciadores con sección cuadrangular se diseñan con canales paralelos y los modelos de sección circular, con canales anulares concéntricos.

Son usados en sistemas que mueven aire y que requieren de grandes atenuaciones, se conectan a la salida o entrada del flujo y sus dimensiones se adecuan a las necesidades de atenuación y características de la conexión. En la figura 8, se muestra un silenciador resistivo.

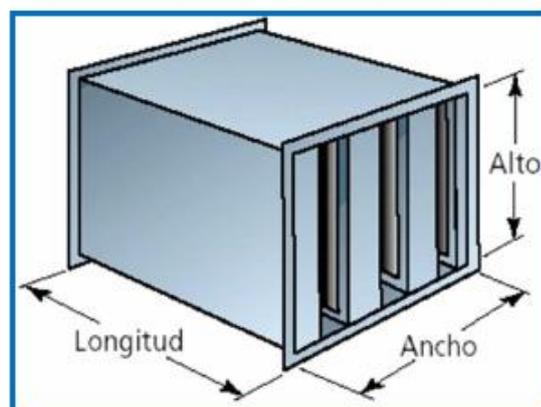


Figura 8. Silenciador Resistivo

Fuente: <http://www.decibel.com.ar/espanol/silenciadores,plp>,

1.6.12.2 Silenciadores reactivos

Son cámaras de expansión de una o dos etapas construidas en chapa metálica con o sin refuerzo aislante y/o material absorbente interior, aptas para flujos gaseosos de hasta 500 °C.

Son usados en escapes de gases, en la salida (tubo de escape) de motores de combustión interna, sopladoras, etc. A continuación se puede observar en la figura 9 un silenciador reactivo.

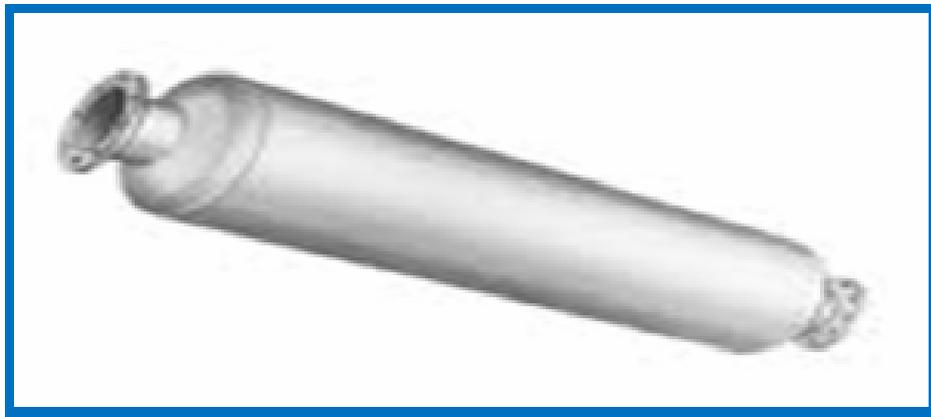


Figura 9. Silenciador Reactivo

Fuente: <http://www.decibel.com.ar/espanol/silenciadores,plp>,

1.6.13 Grupos electrógenos

Es el equipo principal que conforma una central eléctrica. Está compuesto por un motor de combustión interna, el cual realiza una conversión de energía térmica a mecánica y un generador de electricidad que realiza la conversión de energía mecánica en eléctrica.

En la figura 10, se puede visualizar un grupo electrógeno con sus partes principales.



Con motor recíprocante
Figura 10. Partes Principales de un Grupo Electrónico

Fuente: http://www.fgwilson.com/manuales_del_operador

1.- Etiqueta con todas las características técnicas. 2.- Motor Diesel. 3.- Filtro de Aire. 4.- Turbo-cargador (si aplicase). 5.- Control de Velocidad (ubicado al otro lado) 6.- Motor de Arranque, (ubicado al otro lado de la Fig.). 7.- Batería. (Ubicada al otro lado) 8.- Bomba de inyección de gasoil. 9.- Radiador con sus respectivas protecciones. 10.- Generador. 11.- Caja de conexiones de potencia. 12.- Skid de base y tanque diario. 13.- Base Anti-vibratorias. 14.- Tablero de Control e Instrumentación. 15.- Interruptor de salida (Breaker).

1.6.14 Clasificación de los grupos electrógenos

- **Continuo Liviano.-** De acuerdo al régimen de trabajo.
 Emergencia (Standby)
 Continuo Pesado (Continuos)
- **Motor Rotativo (Turbina).-** De acuerdo al tipo de motor.
 Motor Recíprocante (Pistón)
- **Líquido Residual Pesado.-** De acuerdo al tipo de Combustible
 Líquido Residual Liviano
 Gaseoso.

CAPITULO II

DESARROLLO DEL ESTUDIO DE INSONORIZACIÓN

A continuación se describe detalladamente la metodología utilizada para cumplir con los objetivos planteados para la realización del presente trabajo. Aquí se explican los procedimientos y datos necesarios para su desarrollo.

Para este estudio se tomará como ejemplo el sistema de insonorización del cuarto de máquinas del Centro Comercial Atahualpa.

2.1 Recopilación de información

En esta etapa inicial del trabajo se buscó y posteriormente seleccionó la información referente al problema planteado, el cual se centra en lograr la insonorización de dicho cuarto de máquinas, para así contar con una sólida base teórica que permita un desarrollo amplio del tema en estudio. Esta información se extrajo de textos especializados, catálogos de especificaciones técnicas, trabajos relacionados con el tema, tesis de grado, publicaciones en Internet, normas internacionales y nacionales afines con el tema. También hubo entrevistas realizadas a personas especializadas en el área de generadores.

2.2 Análisis del área

Este análisis estuvo basado en la realización de inspecciones visuales, en el lugar dónde se encontraba el recinto que contenía los grupos electrógenos, es decir, se observó el espacio físico tanto por dentro como por fuera del mismo, para así obtener mayor cantidad de detalles a nivel acústico, Figura 11. Se llegó a la conclusión que la estructura física carecía de algún medio o tipo de aislamiento para reducir los niveles de ruido que se producían en el área de estudio.

En cuanto a las cavidades de ventilación se apreció que estaban libres sin ningún dispositivo o silenciador que ayude a disminuir los niveles de ruido creados por los equipos generadores.

Con respecto a la información técnica, manuales y datos de funcionamiento de los equipos electrógenos y puesta en marcha, no se logró el acceso a todo lo relacionado en cuanto a características, especificaciones y recomendaciones del fabricante para el buen funcionamiento de los mismos.

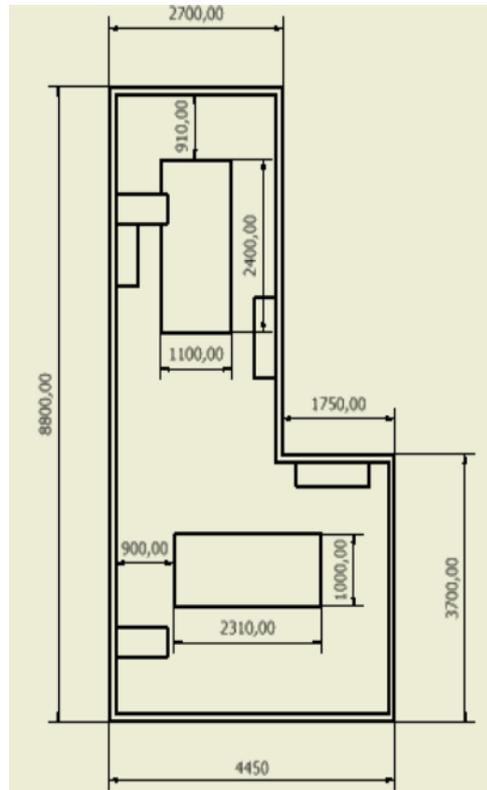


Figura 11. Plano cuarto de máquinas

Fuente: Plano autocad autores de esta tesis.

2.3 Medición de los índices de ruido en el cuarto de generación sin insonorización.

En esta etapa se procedió a la medición de los índices o niveles de presión sonora del ruido producido por los equipos electrógenos ubicados en el cuarto de generación estudiado. Dicha medición se ejecutó mediante la utilización del instrumento especializado (sonómetro) tomando en cuenta la RESOLUCIÓN N° 0002-DMA-2008 DE LA DIRECCIÓN METROPOLITANA AMBIENTAL, en la cual aparecen las consideraciones básicas que deben ser tomadas en cuenta al momento de realizar las medidas en el área de estudio.

2.3.1 Calibración del sonómetro

Acerca de la utilización y calibración correcta del sonómetro también se siguieron los pasos recomendados por el fabricante, e indicados en la norma mencionada previamente. Para este caso el sonómetro se colocó en la posición de respuesta lenta (porque se trata de un ruido continuo estable) y en ponderación de frecuencia A (selección de fábrica del instrumento).

2.3.2 Selección de los puntos de medición de los niveles de presión sonora

Con respecto a los puntos de medición, éstos se distribuyeron en un área de 1680 m², 40 m en la dirección Noreste y 42 m en dirección Noroeste (en algunos sitios no se pudo realizar mediciones por razones de impedimento físico), en los alrededores del cuarto de generación tratando de ubicarlos de una manera más homogénea posible en las direcciones de medición.

Dentro del cuarto de generación se hicieron mediciones en las zonas que se podían realizar según la RESOLUCIÓN N° 0002-DMA-2008 DE LA DIRECCIÓN METROPOLITANA AMBIENTAL (la distancia máxima de acercamiento a las paredes y superficies reflectantes debe ser de 1 m), debido a que habían áreas o zonas en las que no se pudo tomar la medida por razones de espacio físico y el respectivo cumplimiento de la norma mencionada anteriormente.

Después de haber tomado las mediciones de los niveles de presión sonora tanto dentro como fuera del cuarto de generación, se creó un mapa referencial, en el cual se representan visualmente todas las medidas realizadas en el espacio físico de estudio, mostrando el valor del nivel de presión sonora y la ubicación del mismo en el plano.

En dicho mapa se muestra un eje de coordenadas (distancias en metros) mediante el cual se puede conocer la posición de cada punto de medida y su respectivo nivel de presión sonora.

2.3.3 Procedimiento de medición de niveles de presión sonora

Estas medidas se realizaron siguiendo lo expresado en la RESOLUCIÓN N° 0002-DMA-2008 DE LA DIRECCIÓN METROPOLITANA AMBIENTAL, es decir, a una altura de 1,2 m con respecto al suelo, tanto dentro como fuera del recinto, partiendo desde una distancia mínima de 1 m de las superficies internas y externas de las paredes y techo de la caseta, y a una distancia aproximada de 50 cm de la persona que realiza la medida cumpliendo así con la norma antes mencionada.

Las medidas se realizaron durante el tiempo de medición recomendado en la RESOLUCIÓN N° 0002-DMA-2008 DE LA DIRECCIÓN METROPOLITANA AMBIENTAL, para obtener de esta manera una buena lectura en el sonómetro del nivel de ruido en cada sitio de medición.

2.3.4 Evaluación de los niveles de presión sonora obtenidos durante las mediciones.

Con respecto a los valores de los niveles de presión sonora dentro de la subestación se logró apreciar que dichos niveles superan notablemente la legislación expresada en la RESOLUCIÓN N° 0002-DMA-2008 DE LA DIRECCIÓN METROPOLITANA AMBIENTAL, Dónde se establece que los niveles de presión sonora a los que se expone una persona durante un plazo de ocho horas no debe exceder los 60 dB; éstos niveles de presión sonora se encuentran ubicados en un valor de 78 dB, lo cual supera excesivamente los valores de la norma.

En la Figura 12 se observa la ubicación del cuarto de generación con respecto a norte geográfico, al igual que la respectiva orientación de sus paredes externas.

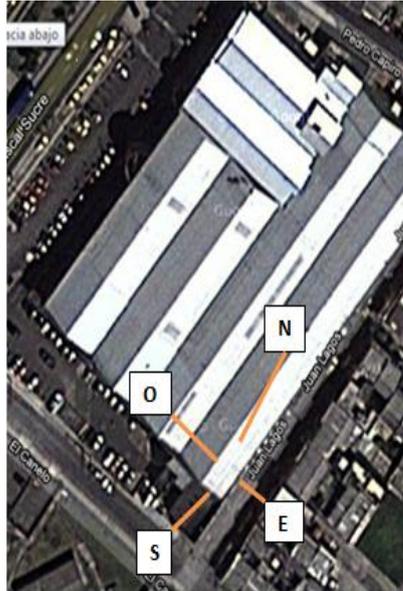


Figura 12. Ubicación satelital

Fuente: <http://www.viasatelital.com/mapas/quito.htm>

En relación a los niveles de presión sonora a las afueras del cuarto de generación, se obtuvieron valores considerablemente altos a distancias cortas y medias, específicamente en el área frontal o anterior, Dónde está ubicada la ventana principal de entrada de aire para la ventilación de los sistemas de generación eléctrica. Considerando que este cuarto de generación se ubica en una zona en el cual hay gran afluencia de personas, dichos niveles de ruido son bastante altos.

2.4 Deducción de los parámetros característicos del ruido generado en el cuarto de generación en estudio.

A continuación se presentarán una serie de ecuaciones para los cálculos que competen directamente con el tratado de insonorización del cuarto de generación.

2.4.1 Identificación de paredes del cuarto de generación

Para no crear confusión con las áreas de las paredes, éstas fueron identificadas según la dirección en que se muestran en la Figura 13.

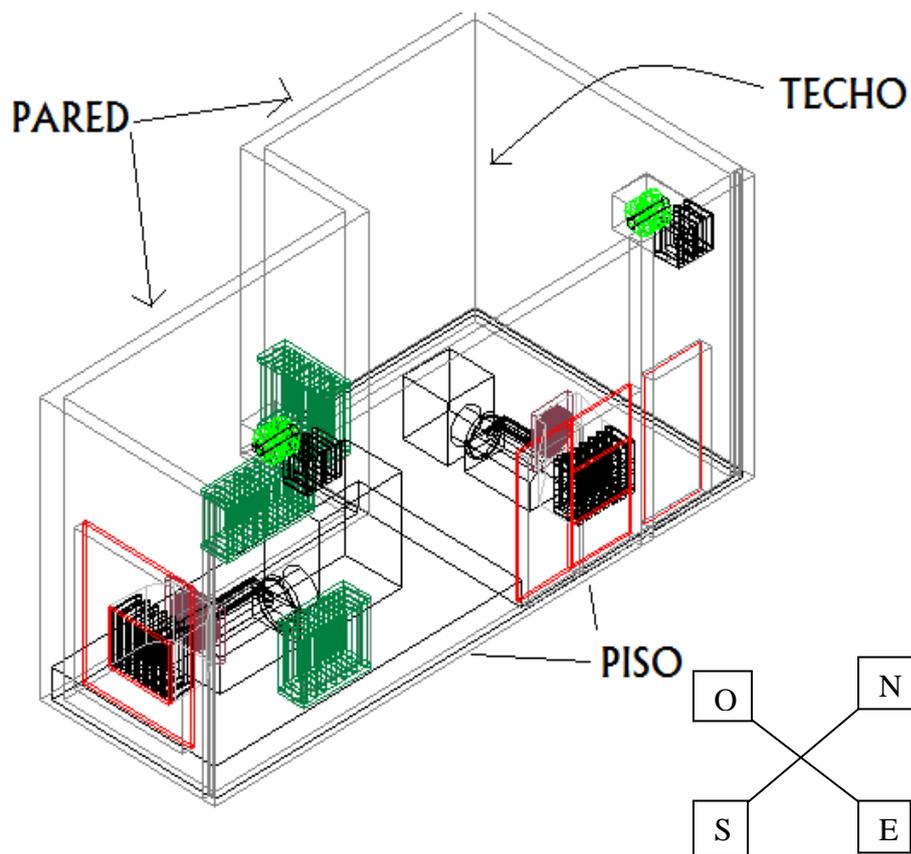


Figura 13. Plano autocad 110826.00

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

- **Pared este:** Contiene ventanas de entrada de aire y puerta de acceso hacia el grupo electrógeno.
- **Pared sur:** Contiene una ventana piso techo por la cual sale el aire del generador principal.
- **Pared oeste:** Contiene una ventana inferior por la cual ingresa aire fresco hacia el grupo electrógeno.
- **Pared norte:** Pared totalmente lisa.

2.4.2 Determinación de las áreas internas del cuarto de generación.

Seguidamente se calculan las áreas por separado de cada superficie interna del cuarto de generación, es decir, se calcula el área de cada pared sin incluir las ventanas ni la puerta, y posteriormente calcular las áreas de éstos.

De igual manera se calculan las áreas del techo y del suelo (se le resta el área ocupada por la base de los generadores eléctricos) del cuarto.

2.4.3 Determinación del volumen real del cuarto de generación

Para calcular el volumen real interno del cuarto de generación en dónde se encuentran ubicados los grupos electrógenos, se le debe restar al volumen del cuarto el volumen que ocupan los equipos generadores de electricidad, debido a que éstos son la fuente de ruido.

2.4.4 Cálculo de la absorción sonora del cuarto de generación antes y después de ser tratada acústicamente

Luego de haber obtenido las áreas internas del cuarto de generación por separado se procedió a obtener la absorción sonora del cuarto en condiciones normales, es decir, con sus materiales originales de construcción y luego con la propuesta de instalación de los materiales acústicos dentro del cuarto de generación y para ello se utilizó la ecuación 16.

2.4.5 Determinación del tiempo de reverberación del cuarto de generación antes y después del tratamiento acústico

Después de haber determinado la absorción sonora del recinto en estudio, se procedió a determinar su respectivo tiempo de reverberación, con la finalidad de establecer que tan absorbente o reflectante es el cuarto de generación. Este se determina con la ecuación 17:

$$T_R = 0,161 \left(\frac{V}{A} \right) : V < 1000m^3 \quad [ec. 17]$$

Posteriormente se volvió a calcular en varias ocasiones tanto la absorción sonora del local como su tiempo de reverberación; pero asumiendo la instalación de los materiales acústicos con diversos coeficientes de reducción de ruido (NRC), de manera tal de determinar cuál de los materiales acústicos provee mejor reducción del nivel ruido dentro del cuarto. Luego se calcula nuevamente el tiempo de

reverberación y se observa una reducción en el mismo, debido a los diversos materiales acústicos seleccionados.

2.4.6 Cálculo del nivel de reducción de ruido en el cuarto de generación sin instalar los atenuadores de ruido en la entrada y salida de aire (en las ventanas)

A través de la ecuación 18 mostrada a continuación se consiguió determinar la cantidad de decibeles que reducen los diversos materiales acústicos para el tratamiento sonoro propuesto en el cuarto de generación; es muy importante destacar que el nivel de reducción de ruido obtenido en el cuarto, es sin la respectiva instalación de los silenciadores o filtros de sonido (que serán propuestos para ser colocados en las ventanas).

$$NRR = AA - AB \quad [ec.18]$$

2.4.7 Deducción de la presión sonora efectiva del ruido dentro de la sala de generación eléctrica

Como se mencionó anteriormente el nivel de presión sonora dentro del cuarto de generación tiene un valor de 78 dB en todo el entorno, el cual se obtuvo durante el procedimiento de medición de los índices de ruido. De manera tal que despejando P de la ecuación 19.

$$NPS = 20 \log \frac{P}{20} \quad [ec.19]$$

Se obtuvo la Ec.

$$P = \log^{-1}(1,3 \div 0,05NPS)$$

Mediante la cual se logró calcular la presión sonora efectiva del nivel sonoro.

2.4.8 Obtención del nivel de potencia sonora de los grupos electrógenos instalados en el cuarto de generación

La potencia sonora de los grupos electrógenos ubicados en el cuarto, pudo ser obtenida posteriormente de medir la magnitud del nivel de presión sonora y determinar la absorción sonora de la misma, utilizando la ecuación 20:

$$L_W = L_P + 10(\log A) - 6 \quad [ec. 20]$$

Después se procedió a determinar la potencia sonora despejando W de la ecuación 21:

$$L_W = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad [ec. 21]$$

Obteniendo la siguiente expresión matemática

$$W = \log^{-1}(0,1L_w - 12)$$

2.4.9 Cálculos de velocidad del sonido en el área de los grupos electrógenos

A través de la ecuación 22:

$$C = 331,3 - 0,606T \quad [ec. 22]$$

Y teniendo en cuenta la temperatura en el cuarto de generación, se determinó la magnitud de la velocidad del sonido dentro del cuarto de estudio.

La velocidad del sonido calculada a partir de la expresión mencionada, es sólo una referencia de cuán rápido viajan en todas las direcciones las ondas sonoras del ruido presente dentro del cuarto de generación. Cabe destacar que éste valor es para la temperatura de 22°C, temperatura que prevaleció en el cuarto de generación al momento de las mediciones.

2.4.10 Obtención de la magnitud de la intensidad sonora dentro del cuarto de generación

Luego de haber determinado el valor la presión sonora efectiva y la velocidad del sonido dentro del cuarto de generación, se logró calcular la intensidad sonora de la fuente de ruido en estudio ubicada dentro del cuarto, utilizando la ecuación 23.

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad [ec.23]$$

Tomando la densidad del aire con un valor de 1,26 Kg/m³ y tomando en cuenta el valor de la velocidad del sonido y la presión sonora efectiva calculados anteriormente.

Posteriormente se obtuvo el nivel de intensidad sonora dentro del cuarto de generación a través de la ecuación 24:

$$NIS = 10 \log \frac{t}{I_0} \quad [ec.24]$$

2.5 Selección definitiva de los materiales acústicos para la propuesta de instalación en las superficies internas.

En ésta fase del estudio se procedió a la elección de los materiales acústicos que arrojaron los mejores resultados en cuanto a la disminución del nivel de ruido dentro de la sala de generación eléctrica.

A continuación realizaremos un estudio de los materiales que se pueden usar para la insonorización, estos elementos deben cumplir con las normas ambientales existentes, como con los reglamentos emitidos por las entidades que regulan estos proyectos.

El estudio de estos materiales no solo abarca el tipo de elementos acústico sino el tipo de material para los paneles que lo contiene, de igual manera aremos un estudio de su costo y de su disponibilidad en el mercado.

2.5.1 Tipos de materiales acústicos

2.5.1.1 Lana de roca

La lana de roca (figura 14), perteneciente a la familia de las lanas minerales, es un material fabricado a partir de la roca volcánica. Se utiliza principalmente como aislamiento térmico y como protección pasiva contra el fuego en la edificación, debido a su estructura fibrosa multidireccional, que le permite albergar aire relativamente inmóvil en su interior.



Figura 14. Lana de roca

Fuente: Colombit S.A. aislamiento acústico construcción liviana en seco, notas técnicas, No 30, Agosto 2006

Propiedades:

Comportamiento acústico

Debido a su estructura multidireccional y elástica, la lana de roca frena el movimiento de las partículas de aire y disipa la energía sonora, empleándose como acondicionador acústico para evitar reverberaciones y ecos excesivos. Asimismo se emplea como absorbente acústico en sistemas "masa-muelle-masa".

Comportamiento ante el fuego

La lana de roca es un material no combustible, siendo Clase A1 según la clasificación europea de reacción al fuego de los materiales de la construcción (Euroclases). Se utiliza como protección pasiva contra el fuego en edificios, pues

conserva sus propiedades mecánicas intactas incluso expuesta a temperaturas superiores a 1000°C en la tabla 8 se especifican algunas características.

PROPIEDADES	CALIBRE 1	CALIBRE 2
Espesor	50 mm (2 pul)	100mm (4 pul)
Dimensiones	1200 x 600(mm)	1200 x 600(mm)
Coefficiente de ruido NCR	0.73	0.85

Tabla 8. Características de la lana de roca.

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

2.5.1.2 Lana de vidrio

La lana de vidrio (figura 15) es una fibra mineral fabricada con millones de filamentos de vidrio unidos con un aglutinante. El espacio libre con aire atrapado entre las fibras aumenta la resistencia a la transmisión de calor.



Figura 15. Lana de vidrio

Fuente: Colombit.S.A. aislamiento acústico construcción liviana en seco, notas técnicas, No 30, Agosto 2006

Aplicaciones en edificación residencial;

- Cerramientos verticales
- Divisorias interiores y techos
- Conductos de aire acondicionado
- Aislamiento acústico para suelos
- Aislamiento acústico para falsos techos
- Aplicaciones en edificación industrial;

- Cubiertas y fachadas de doble chapa metálica
- Divisiones interiores
- Aislamiento de techos
- Conductos de aire acondicionado
- Aislamiento de conductos de aire acondicionado

La lana de vidrio es un material aislante térmico y acústico sumamente eficiente y de fácil manejo. El material posee una muy buena relación resistencia térmica / precio (mejor valor), siendo un material muy apropiado para aislaciones acústicas.

Hay una serie de detalles importantes que predefinen el aislamiento acústico de un sistema: El material aislante debe ser seleccionado por su estructura, que es fundamental para el comportamiento del aislamiento acústico. Los materiales idóneos tienen una estructura elástica. La capacidad del aislamiento para rellenar completamente una cavidad tiene un impacto positivo en el rendimiento del sistema. El ajuste correcto del aislamiento en los lugares donde los puentes acústicos suelen aparecer, en la tabla 9 tenemos algunas características necesarias para seleccionar el material adecuado.

PROPIEDADES	CALIBRE 1	CALIBRE 2
Espesor	50 mm (2 pul)	100mm (4 pul)
Dimensiones	0.4 - 0.6 x 13 m	0.4 - 0.6 x 7.5 m
Coefficiente de ruido	0.70 - 0.76	0.85
NCR		

Tabla 9. Características de la lana de vidrio

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

2.5.1.3 Acustifibra.

Es un aislamiento acústico en forma de lámina, cuya función es absorber el ruido y reducir la transmisión de sonido, se pueden utilizar en:

Recintos cerrados (oficinas, aulas, casas, etc.)

Áreas industriales

La acustifibra es un material incombustible de peso liviano, inorgánico, de dimensiones estables, además de ser fácil de instalar y sus especificaciones en el mercado son tabla 10.

PROPIEDADES	CALIBRE 1	CALIBRE 2
Espesor	25 mm (1 pulgada)	38mm (1,5 pulgada)
Dimensiones	1,22 X 2,44 m	
Resistencia Térmica	R= 4,1 (hr °FF t ² /BTU)	R= 6,25 (hr °FF t ² /BTU)
Coefficiente de Reducción NCR	NCR = 0,7	NCR = 0,9

Tabla 10. Propiedades de las acustifibras.

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

2.5.1.4 Placas composite

Revestimiento acústico de elevada prestación para reforzar la aislación y a la vez absorber los sonidos dentro de un recinto (figura 16). Se utiliza en particiones débiles de tabiques o cielorrasos, en encabinado de máquinas y motores o en todo ambiente Dónde sea necesario atenuar el nivel sonoro interior y a la vez evitar su propagación. Las terminaciones con PU o Alu (aluminio reforzado), lo hace apto para aplicaciones en lugares muy expuestos a la suciedad de grasas o aceites, o con un grado de humedad ambiental. En la tabla 11 se enumeran las características de las placas composite.



Figura 16. Placas composite

Fuente: Colombit.S.A. aislamiento acústico construcción liviana en seco, notas técnicas, No 30,

Agosto 2006

PROPIEDADES	CALIBRE 1
Espesor	30 mm
Dimensiones	1.22 x1.22 m
Coefficiente de ruido	0.60
NCR	

Tabla 11. Propiedades de las placas composite.

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

2.5.1.5 Placas texturadas:

Se utiliza como revestimiento a la vista en ambientes ruidosos en general (figura 17), cines, auditorios, o para mayor confort en áreas de trabajo, permitiendo una mejor concentración y rendimiento del personal, para tratar ambientes y especialmente para acondicionar salas de audio y video. En la tabla 12 se enumeran las características de este tipo de aislamiento.



Figura 17. Placas texturadas

Fuente: Colombit.S.A. aislamiento acústico construcción liviana en seco, notas técnicas, No 30, Agosto 2006

PROPIEDADES	CALIBRE 1
Espesor	20
Dimensiones	0.61 x 0.61
Coefficiente de ruido	0.55
NCR	

Tabla 12. Propiedades de las placas texturadas.

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

De estos materiales se realizó un cuadro comparativo (tabla 13) de sus condiciones técnicas y sus costos y así determinar cuál es el óptimo para la fabricación del sistema de insonorización.

Material	Características y propiedades acústicas/en porcentaje	Disponibilidad en el mercado/10	Costo/m ²
Lana de roca	80%	7	\$9.5
Lana de vidrio	80%	9	\$4.5
Acustifibra	70%	4	\$45
Placa comsite	60%	3	\$40
Placa texturada	60%	4	\$35

Tabla 13. Comparativa de materiales acústicos.

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Con relación a las ventanas existentes se procedió a taparlas con bloque de 10 cm de espesor que es el mismo material que recubre al cuarto de máquinas esto se realizó para abaratar costos y porque dentro de las propiedades de este tipo de elemento de construcción existe la de absorber el ruido con un NRC de 0.2 a 0.6.

2.5.2 Materiales de paneles

Existe diferente tipos de láminas de acero para usarse en la fabricación de estos elementos se realizara un análisis de sus características técnicas y su costo para determinar la lámina correcta.

Lámina de acero negro: Tipo de acero cuyos niveles de carbono se sitúan entre el 0,15% y el 0,25%; es casi hierro puro, de gran ductilidad, el acero negro es comúnmente conocido como el acero básico, es decir, el hierro normal y corriente que sale directamente del proceso de fundición. Este tipo de acero no ha pasado o sufrido algún tratamiento.

Lámina de acero galvanizado: El Acero Galvanizado por inmersión en caliente es un producto que combina las características de resistencia mecánica del Acero y la resistencia a la corrosión generada por el Cinc.

Propiedades del Acero Galvanizado:

- Resistencia a la abrasión
- Resistencia a la corrosión

Las principales ventajas de los recubrimientos galvanizados en caliente pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Duración excepcional
- Resistencia mecánica elevada
- Protección integral de las piezas (interior y exteriormente)
- Triple protección: barrera física, protección electroquímica y autocurado
- Ausencia de mantenimiento
- Fácil de pintar

Lámina de acero inoxidable: El acero inoxidable es un acero de elevada resistencia a la corrosión, dado que el cromo, u otros metales aleantes que contiene, poseen gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro (los metales puramente inoxidables, que no reaccionan con oxígeno son oro y platino, y de menor pureza se llaman resistentes a la corrosión, como los que contienen fósforo). Sin embargo, esta capa puede ser afectada por algunos ácidos, dando lugar a que el hierro sea atacado y oxidado por mecanismos intergranulares o picaduras generalizadas. Algunos tipos de acero inoxidable contienen además otros elementos aleantes; los principales son el níquel y el molibdeno.

Composición Química (%) de los Aceros Inoxidables Austeníticos y Aleaciones de Níquel

GRADO	304	304L	316	316L	317	317L	321	400	825	625	C-276	DUPLEX 2205
Designación UNS	S30400	S30403	S31600	S31603	S31700	S31703	S32100	N04400	N08825	N06625	N10276	S31803
CARBONO (C) max.	0.08	0.035*	0.08	0.035*	0.08	0.035*	0.08	0.30	0.05	0.10	0.02	0.03
MANGANESO (Mn) max.	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.00	0.50	1.00	2.00
FOSFORO (P) max.	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	----	----	0.015	0.04	0.03
AZUFRE (S) max.	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.024	0.03	0.015	0.03	0.02
SILICIO (Si) max.	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.50	0.50	0.50	0.08	1.00
CROMO (Cr) max.	18.0 a 20.0	18.0 a 20.0	16.0 a 18.0	16.0 a 18.0	18.0 a 20.0	18.0 a 20.0	17.0 a 20.0	----	19.5 a 23.5	20.0 a 23.0	14.5 a 16.5	21.0 a 23.0
NIQUEL (Ni)	8.0 a 11.0	8.0 a 13.0	10.0 a 14.0	10.0 a 15.0	11.0 a 14.0	11.0 a 15.0	9.0 a 13.0	63.0 a 70.0	38.0 a 46.0	Balance	Balance	4.5 a 6.5
MOLIBDENO (Mo)	----	----	2.0 a 3.0	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	3.0 a 4.0	----	----	2.5 a 3.5	8.0 a 10.0	15.0 a 17.0	2.5 a 3.5
OTROS ELEMENTOS	----	----	----	----	----	----	Ti = 5xC min. y 0.70 max.	Cu=Bal. Fe = 2.50 max.	Fe=Bal. Cu = 1.5 a 3.0 Al = 0.2 max. Ti = 0.6 a 1.2	Fe = 5.0 max. Al = 0.40 max. Ti = 0.40 max. Cb+Ta = 3.15 a 4.15 Co = 1.0 max.	Co = 2.50 max. W = 3.00 a 4.50 Fe = 4.00 a 7.00 V = 0.35 max.	N = 0.08 a 0.20

Tabla 14. Aceros inoxidables

Fuente es.wikipedia.org/wiki/Acero_inoxidable

En el mercado existe diferentes dimensiones y espesores para las planchas de los aceros nos enfocaremos a las planchas que van desde 0.5 hasta 0.7 y de 2.44 por 1.22 (Tabla 15) que son las que encontramos en los distribuidores comunes y son de fácil mecanizado.

Material	Dimensiones	Costo
Acero negro	2.44 x 1.22 x 0.7	\$25.44
Acero galvanizado	2.44 x 1.22 x 0.7	\$28.33
Acero inoxidable	2.44 x 1.22 x 0.7	\$48.44

Tabla 15. Tipos de aceros

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

De este cuadro y por las características se usara **LA PLANCHA DE ACERO GALVANIZADO.**

Es importante destacar que se realizaron los cálculos reiteradas veces utilizando varios materiales acústicos con características distintas hasta obtener el material con el resultado más conveniente.

2.5.3 Designación de los materiales acústicos

Luego de proponer diversos materiales para la instalación, se eligieron los siguientes para ser instalados en las superficies internas de la caseta:

- Lana de vidrio de 2 pulgadas de espesor, con un NRC = 0,76 (para todas la superficies tanto en paredes como en la puerta).
- Paneles de lana de vidrio de 2 pulgadas de espesor, con panel frontal de tol galvanizado perforado, con un NRC = 0,86

Los materiales anteriormente mencionados fueron escogidos finalmente debido a que éstos poseen el mejor rendimiento absorbente con respecto a otros materiales que fueron propuestos, los cuales no dieron buenos resultados en cuanto a la absorción acústica se refiere, es decir, los materiales fueron elegidos luego de haber planteado diversos materiales absorbentes.

Cabe destacar que para dicha selección fue tomado en cuenta el coeficiente de absorción del sonido de los materiales, en la frecuencia central de los 1000hz, ya que a ésta frecuencia es Dónde el oído humano tiene la mayor sensibilidad de percepción acústica.

2.6 Diseño de los atenuadores de ruido para las aberturas de ventilación.

Hay que resaltar que los silenciadores, que fueron diseñados para los espacios de ventilación, son silenciadores resistivos. Debido a que en las condiciones del cuarto de generación predomina una temperatura inferior a los 35 °C y el medio de propagación del ruido es aire a presión atmosférica y de baja velocidad, no fue necesario tomar en consideración un silenciador reactivo (usados a altas temperaturas y escapes de gases como el CO). Para el diseño de los atenuadores de ruido, también conocidos como silenciadores acústicos, fue seleccionado el mismo material absorbente que se escogió anteriormente, debido a su buen coeficiente de reducción de ruido.

Para la selección de los atenuadores de ruido o en este caso filtros de sonido que vamos a utilizar en nuestro cuarto de generación hemos elegido por facilidad de construcción y de costos que implican la construcción de los mismos; los atenuadores de sonido:

FLATPAC SILENCER TYPE FP020-18L

Este tipo de silenciadores cumplen con nuestras especificaciones de construcción tanto en tipo de material de construcción, dimensiones y cantidad de atenuación de decibeles requerido por nuestro sistema.

Este tipo de silenciadores ya están contruidos y los podemos encontrar en el mercado, estos están seleccionados del manual **ACOUSTICAL SOLUTIONS INC.** De procedencia americana y están probados bajo normas **ASTM** y bajo los nuevos estándares **ISO** en control acústico y medio ambiente.

CAPITULO III

ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se exponen y analizan los resultados conseguidos en el desarrollo del trabajo, para lograr la disminución de los niveles de presión sonora en el cuarto de generación y sus inmediaciones.

3.1 Resultados obtenidos luego de analizar el área física

Luego de haber observado directamente las características del espacio real del cuarto de generación tanto por el interior como por el exterior se lograron determinar las siguientes particularidades expuestas a continuación.

3.1.1 Características físicas internas del cuarto de generación

Mediante el análisis del área interna del cuarto de generación se pudo apreciar que la misma tenía acabados de construcción típicos (como se muestran en las figuras 18 y 19), es decir, los materiales que predominaban en la estructura eran materiales que se utilizan para edificaciones de uso común, tales como: paredes y techo con bloque normal y cemento, lo cual produce reflexiones de las ondas sonoras del ruido generado por los grupos electrógenos presentes en la sala. En cuanto al piso se caracterizó por ser una losa de concreto sin ningún tipo de recubrimiento (igual que paredes y techo).



Figura 18. Antes de la insonorización
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra



Figura 19. Antes de la insonorización
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Con respecto a las ventanas a través de las cuales entra y sale el aire del cuarto de generación, sólo tenían rejas para protección de los generadores y para evitar que entraran personas no autorizadas a manipular los grupos electrógenos. A través de éstas ventanas se salía el ruido sin ningún tipo de dispositivo o silenciador que conlleve a la disminución de los niveles de presión sonora, los cuales contaminan acústicamente las zonas adyacentes del cuarto de generación.

En general a nivel interno, en lo que concierne acústicamente al cuarto de generación, se puede decir que está construida de manera inadecuada para el fin que está siendo utilizada. Debido a que no fueron tomadas en cuenta las previsiones y consideraciones necesarias a nivel de construcción acústica, para cumplir con la respectiva disminución de los niveles de presión sonora que se generan dentro de la misma.

3.2 Análisis de las mediciones de los niveles de presión sonora tomadas en el cuarto de generación y sus alrededores antes del tratamiento acústico

Posteriormente de haber calibrado el sonómetro y después de tomar en cuenta las recomendaciones dadas por RESOLUCIÓN N° 0002-DMA-2008 DE LA DIRECCIÓN METROPOLITANA AMBIENTAL, en la cual aparecen las consideraciones elementales que deben ser tomadas en cuenta al instante de ejecutar las medidas en el área de estudio. Se procedió a tomar las mediciones de los niveles de presión sonora tanto dentro como fuera de la subestación Figura 20 y tabla 16.



Figura 20. Localización del cuarto de generadores en el centro comercial
Fuente: Gestor ambiental

Evaluación fuentes emisoras de ruido: 11 de Septiembre 2009
Operación de Generadores Eléctricos

MONITOREO # 3: (3er trimestre) Fecha: 29 de Julio 2009			Durante operación normal de la planta industrial.		
PUNTOS DE MONITOREO	NPS eq [dB(A)] Periodo Diurno (valores mínimos)	NPS eq [dB(A)] Periodo Diurno (valores máximos)	NPS eq [dB(A)] Periodo Diurno (valor promedio)	Norma y Límites Aplicables *	Observación
LÍMITE NORTE	Pto.#7: 51.4 Pto #8: 54.8	Pto.#7: 56.6 Pto #8: 56.1	Pto.#7: 55.1 Pto #8: 55.5	60 db para área comercial en horario diurno	CUMPLE
LÍMITE SUR (Afectación directa por la fuente emisora)	Pto.#1: 80.9 Pto #2: 74.5	Pto.#1: 81.8 Pto #2: 78.8	Pto.#1: 81.3 Pto #2: 76.1		NO CUMPLE
LÍMITE ESTE (Afectación directa por la fuente emisora)	Pto.#5: 71.0 Pto #6: 58.0	Pto.#5: 71.8 Pto #6: 59.8	Pto.#5: 71.4 Pto #6: 59.0		NO CUMPLE
LÍMITE OESTE (Existe influencia del tráfico vehicular Av. Mariscal Sucre)	Pto.#3: 62.7 Pto #8: 54.8	Pto.#3: 65.0 Pto #8: 56.1	Pto.#3: 63.5 Pto #8: 55.5		CUMPLE (Ruido de Fondo 64.5 dB)

Tabla 16. Monitoreo de puntos de emisión sonora

Fuente: Gestor ambiental

3.3 Análisis de los parámetros físicos del cuarto de generación

Luego de haber obtenido los niveles de presión sonora de la sala de generación eléctrica y sus zonas adyacentes, se obtuvieron los parámetros característicos del recinto en estudio.

Posteriormente fueron calculadas también las particularidades físicas internas de la subestación, tales como el área de cada superficie por separado y el volumen total del cuarto sin incluir los grupos electrógenos, dichas características se conocen a continuación.

3.3.1 Características superficiales internas del cuarto de generación

Las características internas del cuarto se presentan en la Fig. 21, en la cual se logra observar todas las medidas de las superficies del cuarto de generación. Éstas medidas fueron utilizadas principalmente para determinar el área de cada superficie interna y el respectivo cálculo del volumen real del cuarto de generación. De tal manera que partiendo de éstos valores se pudieran calcular los parámetros acústicos del recinto en estudio.

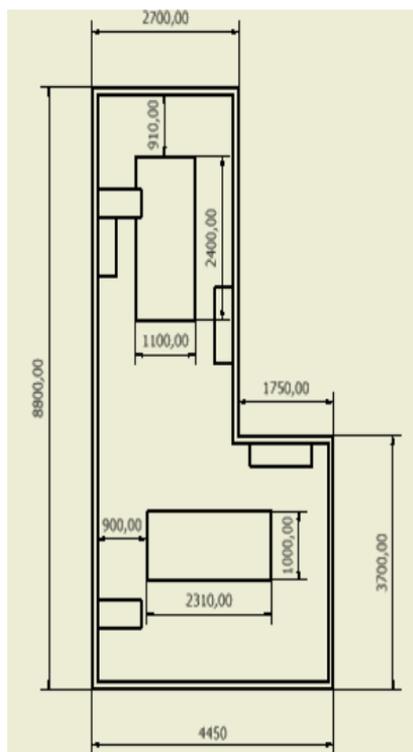


Figura 21. Características del cuarto de generadores

Fuente los autores

Luego de conocer las dimensiones físicas del cuarto de generación por medio de la figura 21, fueron calculadas las áreas (m^2) de cada superficie interna de la misma, con la finalidad de saber la distribución en cuanto a área se refiere de cada superficie, dicha distribución se presenta en la siguiente tabla 17.

Superficie	Área de la Superficie (m^2)
Pared Este	19.78
Pared Sur	6.34
Pared Oeste	44.09
Pared Norte	18.13
Ventanas; Puerta	21.16
Piso	27.64
Techo	24.64
Área Total	164.78

Tabla 17. Distribución de superficies internas del cuarto de generación

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

3.3.2 Cálculo del volumen real interno del cuarto estudiado

Una vez obtenidas todas las áreas de las superficies internas del cuarto, se procedió a calcular el volumen real interno del mismo sustrayendo el volumen que ocupan los equipos electrógenos y se obtuvo el siguiente valor:

$$V = 110.346 \text{ m}^3$$

3.4 Determinación de valores acústicos relevantes en el cuarto de generación

Después de haber obtenido todos los valores relacionados en cuanto a volumen y áreas de las superficies, se procedió al cálculo de las absorciones sonoras del cuarto de generación, tanto antes como después de tratar acústicamente, esto con el fin de establecer la efectividad del tratamiento acústico realizado al cuarto.

3.4.1 Características generales del ruido procedente de los grupos

Electrógenos sin Protección Sonora

Con el fin de agrupar las características del ruido generado por los equipos electrógenos ubicados dentro del cuarto de generación, se realizó la tabla 18:

Ecuación Utilizada	Parámetro Acústico	Magnitud del Parámetro	Unidad del Parámetro
$C = 331.3 + 0.606T$	Velocidad del Sonido	344.63	(m/s)
$L_{w} = L_p + 10(\log A) - 6$	Nivel de Potencia Sonora	83.62	(dB referido a 1pW)
$I = \frac{P^2}{\rho C}$	Intensidad Sonora	0.1158	(W / m2)
$NIS = 10 \log \frac{I}{I_0}$	Nivel de Intensidad Sonora	110.637	(dB)
$P = \log^{-1}(1,3 + 0,05NPS)$	Presión Sonora Efectiva	7.094	(Pa)
$W = \log^{-1}(0,1L_w - 12)$	Potencia Sonora	4.81	(Watts)

Tabla 18. Propiedades acústicas del ruido dentro del cuarto de generadores.

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

3.4.2 Absorción sonora del cuarto de generación sin tratamiento acústico

Para el cálculo de la absorción sonora previa al tratamiento acústico, se utilizó la ecuación 16.

Dónde se incluyen todos los materiales y sus características. Los resultados se resumen en la tabla 19.

Superficie	Material de construcción	Área de la superficie(m²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
Paredes	Bloque hormigón pintado	88.34	0.0675	5.962
Piso	Hormigón o Terraso	27.646	0.0162	0.44
Techo	Hormigón o Terraso	27.646	0.0162	0.44
Ventanas	Aire	4.059	1	4.059

Absorción Sonora Total = 10.91

Tabla 19. Parámetros físicos y acústicos del Cuarto de generación sin tratamiento sonoro.

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

La tabla 19, muestra todas las características físicas y acústicas del cuarto de generación eléctrica, es importante resaltar que éstas características generales son sin tratamiento acústico.

Utilizando la ecuación 25:

$$T_R = 0,161 \left(\frac{V}{A} \right) \quad : \quad V < 1000m^3 \quad [ec. 25]$$

Teniendo en cuenta el volumen real y la absorción sonora calculados previamente, se determinaron el tiempo de reverberación antes del tratamiento acústico, del que se obtuvo una magnitud de **1,634 segundos**.

3.4.3 Absorción sonora del cuarto de generación con tratamiento acústico

Es muy importante destacar que los materiales acústicos seleccionados para la instalación en las superficies internas del cuarto de generación fueron escogidos bajo el criterio del material absorbente que tuviera mayor NRC a la frecuencia de 1000hz respectivamente, debido a que a ésta frecuencia es dónde el oído humano tiene la mayor sensibilidad auditiva.

Los valores acústicos del material escogido son valores obtenidos por medio de pruebas de laboratorio o montajes acústicos idealizados para tal fin, es decir, son referenciales; de tal manera, que el material a ser instalado no tendrá la misma eficiencia en el local.

Expuestas las razones y observaciones por las cuales se escogió el material absorbente para el cuarto, se muestra la tabla 20, dónde se puede apreciar las nuevas características físicas y acústicas propuestas para el mismo.

Superficie	Material de construcción	Área de la superficie(m2)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
Paredes	Bloque hormigón pintado	97.77	0.0675	6.599
Piso	Hormigón o Terraso	27.646	0.0162	0.44
Techo	Hormigón o Terraso	27.646	0.0162	0.44
Paneles	Lana de Vidrio 2”	21.16	0.7625	16.13
Ventanas	Aire	4.059	1	4.059

Absorción Sonora Total = 27.669

Tabla 20. Características físicas y acústicas del cuarto de generación luego de tratar acústicamente, sin colocación de filtros acústicos en las ventanas.

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

De la tabla 21 se observa que las características tanto físicas como acústicas del recinto son bastante distintas, debido a la instalación de los diversos materiales seleccionados para el tratamiento.

Observando este valor se nota un considerable ascenso en la magnitud de la absorción sonora. Comparando ambos valores de absorción, se puede decir que la absorción sonora luego del tratamiento acústico se incrementó en más de un 150%,

resultando ser muy razonable y es debido a la implementación de los materiales absorbentes a las distintas superficies internas de la subestación.

Ahora, nuevamente utilizando la ecuación 26

$$T_R = 0,161 \left(\frac{V}{A} \right) \quad : \quad V < 1000m^3 \quad [ec\ 26]$$

Se calculó el nuevo tiempo de reverberación del cuarto de generación, tomando en cuenta la instalación de los materiales absorbentes. Éste tuvo un valor de **0,642 segundos**, dónde se hace notar que se logró una reducción en más de 50% en el mismo.

Cabe resaltar que las ventanas del cuarto todavía permanecen sin ningún dispositivo o medio silenciador que evite o disminuya la salida del ruido hacia el exterior de la subestación. los cálculos y resultados pertinentes a estos silenciadores se presentarán más adelante del desarrollo del proyecto.

Ésta reducción en el tiempo de reverberación tiene como consecuencia directa que el local tendrá menos reflexiones del ruido presente internamente, siendo unos de los propósitos principales de la instalación de los materiales acústicos dentro del área estudiada.

3.4.4 Deducción del nivel de reducción de ruido en el cuarto de generación.

Para saber en qué cantidad de dB disminuyó el ruido predominante en el cuarto, se utilizó la ecuación 27:

$$NRR = AA-AB \quad [ec.\ 27]$$

Luego de aplicar dicha ecuación, se determinó un nivel de reducción de ruido de **16.75 dB**.

Por lo tanto el nivel de potencia sonora del ruido presente en el cuarto de generación, disminuiría de 83.62 dB hasta los 66.87 dB.

Estos 66.87 dB de nivel de potencia sonora obtenida, se utilizaron en la ecuación 28:

$$L_p = L_w - 10(\log A) + 6 \quad [ec. 28]$$

Y se determinó el nuevo nivel de presión sonora en el cuarto de generación, el cual resultó ser de 46.45 dB, es decir, que los niveles de presión sonora disminuirían desde 67.24 dB hasta 46.45 dB con la implementación del recubrimiento de las superficies internas del cuarto.

Se tomó en cuenta que los grupos electrógenos necesitan de aberturas para la circulación de aire fresco en sus alrededores para su buen funcionamiento, por lo cual no se tomó medidas drásticas de insonorización con respecto a ciertas ventanas.

Con respecto a la reducción del tamaño de las ventanas, el fabricante de los equipos electrógenos recomienda, que tanto el área de la ventana para entrada de aire como el área de la de salida del aire, deberá ser mayor o igual a 1.5 veces el área del radiador del equipo, por ende no se pudo disminuir el área de las ventanas ya que éstas cumplían exactamente con dicha recomendación del fabricante expuesta en el manual del equipo.

3.5 Resultados obtenidos con la instalación de los silenciadores en el cuarto de generación

En ésta sección del capítulo se estudió la contribución de los silenciadores, a ser instalados en el cuarto de generación, para la reducción de los niveles de presión sonora del ruido presente dentro y fuera de la sala de generación.

3.5.1 Parámetros acústicos y físicos sin colocar silenciadores en las ventanas.

En el cuarto existe 1 ventana (figura 22) en el espacio del generador Nissan, sus dimensiones se muestran en la tabla 21 y Cálculos de absorción sonora de las ventanas generador Nissan en la tabla 22.

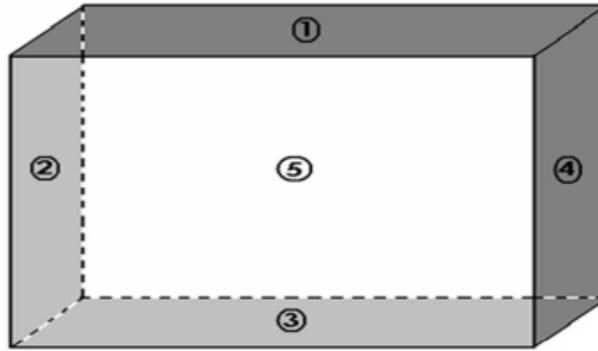


Figura 22. Áreas que delimitan la ventana
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Áreas:	Dimensiones:
1	largo 2.52m x ancho 0.2m
2	alto 0.9m x ancho 0.2m
3	largo 2.52m x ancho 0.2m
4	alto 0.9m x ancho 0.2m
5	alto 0.9m x largo 2.52m

Tabla 21. Dimensiones de áreas que delimitan la ventana generador Nissan
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Superficie	Material de Construcción	Área de la superficie(m ²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
1	Bloque hormigón	0.504	0.36	0.1814
	Bloque hormigón	0.18	0.36	0.0648
3	Bloque hormigón	0.504	0.36	0.1814
	Bloque hormigón	0.18	0.36	0.0648
4	Bloque hormigón	0.18	0.36	0.0648
5	Aire	2.268	1	2.268

Total =2.7604

Tabla 22. Cálculos de absorción sonora de las ventanas generador Nissan
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Ventana correspondiente al área del generador John Deer. En esta área existen 4 ventanas (figura 22) y el resultado que se obtiene se lo multiplica por 4 para determinar el área real, en la tabla 23 se muestran las dimensiones de esta ventana y en la tabla 24 se calcula la de absorción sonora de las ventanas generador John Deer

Áreas:	Dimensiones:
1	largo 1.76m x ancho 0.2m
2	alto 0.9m x ancho 0.2m
3	largo 1.76m x ancho 0.2m
4	alto 0.9m x ancho 0.2m
5	alto 0.9m x largo 1.76m

Tabla 23. Dimensiones de áreas que delimitan la ventana generador John Deer
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Superficie	Material de Construcción	Área de la superficie(m ²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
1	Bloque hormigón	0.352	0.36	0.1267
	Bloque hormigón	0.18	0.36	0.0648
3	Bloque hormigón	0.352	0.36	0.1267
	Bloque hormigón	0.18	0.36	0.0648
4	Bloque hormigón			
5	Aire	1.584	1	1.584

Total =1.967

Tabla 24. Cálculos de absorción sonora de las ventanas generador John Deer
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Resultado total: 1.967 x 4 = 7.868

3.5.2 Parámetros acústicos y físicos sin colocar silenciadores en las aberturas realizadas para los silenciadores.

Se colocaran 3 silenciadores en las aberturas de ventilación (figura 22) en el cuarto de máquinas, el primer silenciador está ubicado en la pared oeste a un lado del generador John Deer y sus dimensiones se muestran en la tabla 25 y las medidas de absorción sonora constan en la tabla 26.

Áreas:	Dimensiones:
1	largo 1.50m x ancho 0.2m
2	alto 0.7m x ancho 0.2m
3	largo 1.50m x ancho 0.2m
4	alto 0.7m x ancho 0.2m
5	alto 0.7m x largo 1.5m

Tabla 25. Dimensiones de las áreas de la abertura para los silenciadores echa en la pared oeste a un lado del generador John Deer

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Superficie	Material de construcción	Área de la superficie(m2)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
1	Bloque hormigón	0.675	0.36	0.243
	Bloque hormigón	0.14	0.36	0.0504
2	Bloque hormigón	0.675	0.36	0.243
	Bloque hormigón	0.14	0.36	0.0504
3	Bloque hormigón	0.675	0.36	0.243
	Bloque hormigón	0.14	0.36	0.0504
4	Bloque hormigón	0.675	0.36	0.243
	Bloque hormigón	0.14	0.36	0.0504
5	Aire	1.05	1	1.05

Total=1.6368

Tabla 26. Cálculos de absorción sonora de las aberturas para los silenciadores del generador John Deer

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

En la tabla 27 se indican las dimensiones de las áreas de abertura para los silenciadores en la pared este junto al generador John Deer y para el generador Nissan en la pared sur/oeste (figura 22), los cálculos de los niveles de absorción sonora constan en la tabla 28.

Áreas:	Dimensiones:
1	largo 1.13m x ancho 0.2m
2	alto 0.9m x ancho 0.2m
3	largo 1.13m x ancho 0.2m
4	alto 0.9m x ancho 0.2m
5	alto 0.9m x largo 1.13m

Tabla 27. Dimensiones de las áreas de abertura para los silenciadores en la pared este junto al generador John Deer y para el generador Nissan en la pared sur/oeste

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Superficie	Material de Construcción	Área de la superficie(m2)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
1	Bloque hormigón	0.226	0.36	0.0813
	Bloque hormigón			
2	Bloque hormigón	0.18	0.36	0.0648
	Bloque hormigón			
3	Bloque hormigón	0.226	0.36	0.0813
	Bloque hormigón			
4	Bloque hormigón	0.18	0.36	0.0648
	Bloque hormigón			
5	Aire	1.017	1	1.017

Total=1.3092

Tabla 28. Cálculos de absorción sonora de las aberturas para los silenciadores en la pared este junto al generador John Deer y generador Nissan en la pared sur/oeste

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

A este resultado lo multiplicamos por 2 ya que la otra abertura es una ventana

$$1.3092 \times 2 = 2.6184$$

3.5.3 Parámetros acústicos y físicos colocando los silenciadores.

Se construye 3 silenciadores para permitir la circulación de aire en el cuarto de generadores, se usara el espacio de una de las ventanas y se bloquearan 4 de las 5 ventanas para disminuir la cantidad de ruido que emitimos al exterior.

Dos silenciadores son iguales tanto en sus dimensiones como en los materiales utilizados. Los números de paneles en estos silenciadores son 7 (B) como se muestra en la figura 23 teniendo 12 caras (A) en contacto con el ruido y 6 espacios entre paneles (C).

En la tabla 29 se tiene las dimensiones en metros cuadrados, este dato se requiere para obtener los niveles de reducción de ruido, con estos datos se obtiene los niveles de absorción sonora en la tabla 30.

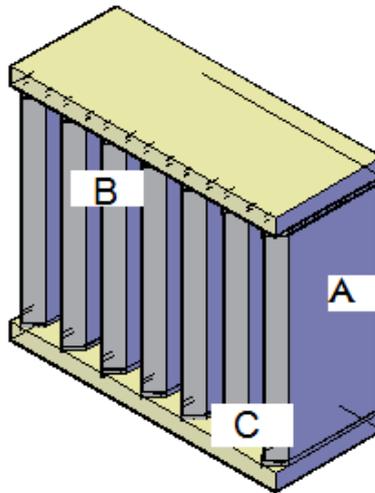


Figura 23. Silenciador de entrada 110826.00.11.

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Elaborado por: Alex Ortiz y David Ibarra

Áreas:	Dimensiones:
A	largo 0.46m x alto 0.9m
B	alto 0.9m x ancho 0.1m
C	Alto 0.9 x ancho 0.071m

Tabla 29. Áreas silenciador resistivo

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Superficie	Material de Construcción	Área de la superficie(m ²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
12(A)	Panel de lana de vidrio	4.968	0.7625	3.7881
7(B)	Panel de lana de vidrio	0.63	0.7625	0.4803
6©	Aire	0.3834	1	0.3834

TOTAL=4.6518

Tabla 30. Cálculo de absorción de ruido en los silenciadores de 7 paneles
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Como son dos silenciadores este resultado se multiplica por este número para obtener el resultado total de atenuación de sonido.

$$4.6518 \times 2 = 9.3036$$

El tercer silenciador es de nueve paneles (B), tiene 16 caras (A) y 8 espacios entre paneles para el estudio y se observa en figura 24, las ares de interés se muestran en la tabla 31.

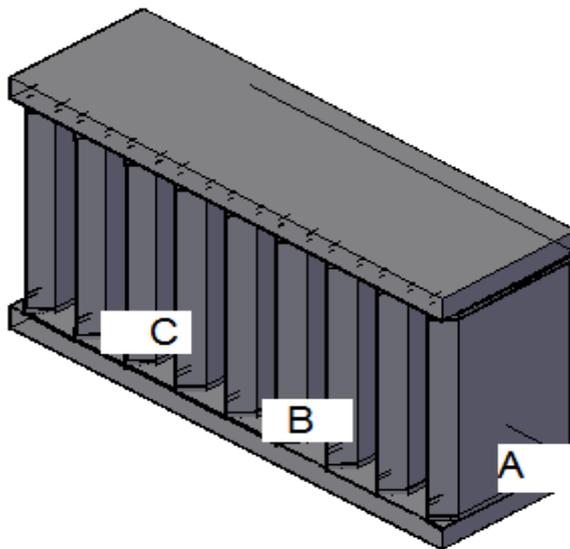


Figura 24. Silenciador de entrada 110826.00.05.

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra
Elaborado por: Alex Ortiz y David Ibarra

Áreas:	Dimensiones:
A	largo 0.46m x alto 0.7m
B	alto 0.7m x ancho 0.1m
C	Alto 0.7 x ancho 0.075m

Tabla 31. Áreas de las caras de los silenciadores en contacto con el ruido

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

En la tabla 32 se muestra el cálculo de absorción de ruido en los silenciadores de entrada de aire que contiene 9 paneles

Superficie	Material de Construcción	Área de la superficie(m ²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
16(A)	Panel de lana de vidrio	5.152	0.7625	3.7881
9(B)	Panel de lana de vidrio	0.63	0.7625	0.4803
8(C)	Aire	0.0525	1	0.0525
Total =				4.3209

Tabla 32. Áreas de las caras de los silenciadores en contacto con el ruido

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

3.5.4 Parámetros acústicos y físicos con silenciadores en las aberturas realizadas para los extractores.

Para que no existan acumulación de aire caliente sobre cada generador se colocaran dos extractores con silenciadores para que el ruido no escape por estas salidas.

De igual manera se realizaran dos silenciadores (figura 25) con similares características pero de 4 paneles (B) para los extractores de esta manera no existe la posibilidad de que el ruido fluya al exterior a través de estos equipos, en la tabla 33 tenemos aéreas de las caras de los silenciadores en contacto con el ruido.

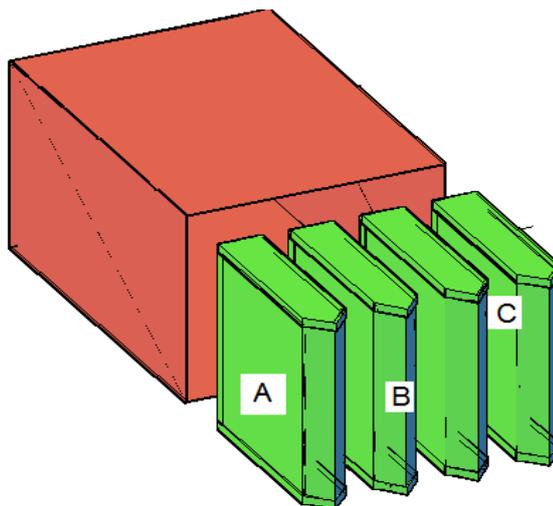


Figura 25. Silenciador extractor 110826.00.04.
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Áreas:	Dimensiones:
A	largo 0.46m x alto 0.48m
B	alto 0.48m x ancho 0.1m
C	Alto 0.48 x ancho 0.066m

Tabla 33. Áreas de las caras de los silenciadores en contacto con el ruido
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

En la tabla 34 realizamos cálculos de absorción de ruido en los silenciadores extractores de 4 paneles

Superficie	Material de Construcción	Área de la superficie(m ²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
6(A)	Panel de lana de vidrio	1.3248	0.7625	1.01016
4(B)	Panel de lana de vidrio	0.192	0.7625	0.1464
3(C)	Aire	0.09504	1	0.09504

Total=1.2516

Tabla 34. Cálculos de absorción de ruido en los silenciadores extractores de 4 paneles
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Como son 2 extractores este resultado se lo multiplica por este número para obtener el resultado total.

$$1.2516 \times 2 = 2.5032$$

De igual manera se colocara silenciadores (figura 26) para la salida de los radiadores de los generadores y de esta manera el sonido que sale de este cuarto disminuirá.

Generador Nissan

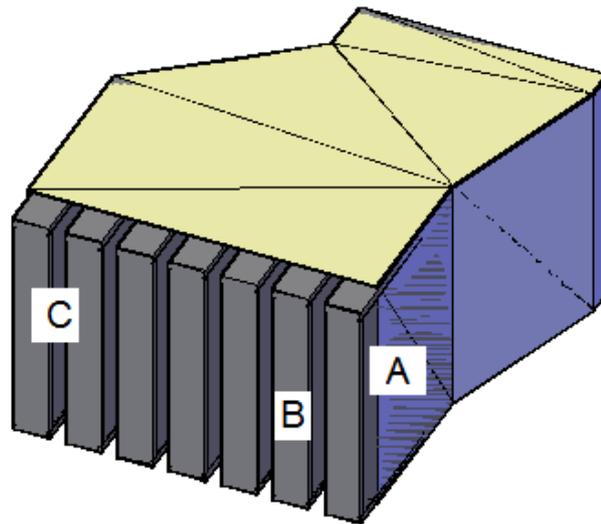


Figura 26. Silenciador de salida 110826.00.08.
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

En la Tabla 35 tenemos las áreas en contacto con el ruido de las caras en los silenciadores

Áreas:	Dimensiones:
A	largo 0.46m x alto 0.73m
B	alto 0.73m x ancho 0.1m
C	Alto 0.73 x ancho 0.05m

Tabla 35. Áreas de las caras de los silenciadores en contacto con el ruido
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

En la Tabla 36 se calculó la absorción de ruido en los silenciadores colocados a la salida del radiador **Generador Nissan.**

Superficie	Material de Construcción	Área de la superficie(m2)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
12(A)	Panel de lana de vidrio	4.0296	0.7625	3.0725
7(B)	Panel de lana de vidrio	0.511	0.7625	0.3896
6(C)	Aire	0.219	1	0.219

Total=3.6811

Tabla 36. Cálculos de absorción de ruido en los silenciadores a la salida del radiador **Generador Nissan**

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Generador John Deer: De igual manera se coloca silenciadores (figura 27) para la salida del radiador en el generador

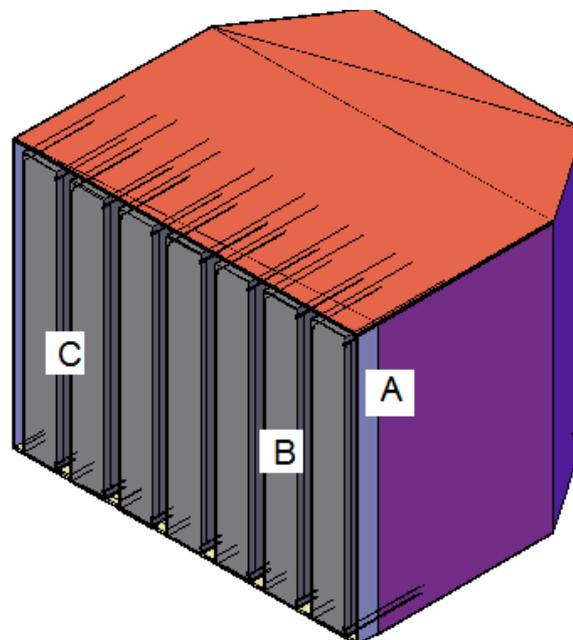


Figura 27. Silenciador de salida 110826.00.02.

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

La Tabla 37 muestra las áreas de las caras en los silenciadores

Áreas:	Dimensiones:
A	largo 0.46m x alto 0.81m
B	alto 0.81m x ancho 0.1m
C	Alto 0.81 x ancho 0.061m

Tabla 37. Áreas de las caras de los silenciadores en contacto con el ruido

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

En la tabla 38 se calcula los niveles de absorción de ruido en los silenciadores colocados a la salida de los radiadores Generador John Deer

Superficie	Material de Construcción	Área de la superficie(m ²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
12(A)	Panel de lana de vidrio	4.472	0.7625	3.4092
7(B)	Panel de lana de vidrio	0.511	0.7625	0.4323
6(C)	Aire	0.2964	1	0.2964

Total=4.1379

Tabla 38. Cálculos de absorción de ruido en los silenciadores a la salida del radiador John Deer

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Absorción sonora total de las ventanas con silenciadores acústicos 23.9467 Sabinos métricos.

En la Tabla 39 tenemos la absorción sonora total del cuarto de generación incluyendo los filtros de sonido en los espacios de ventilación y extractores.

Superficie	Material de construcción	Área de la superficie(m ²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
Paredes	Bloque hormigón pintado	97.77	0.0675	6.599
Piso	Hormigón o Terraso	27.646	0.0162	0.44
Techo	Hormigón o Terraso	27.646	0.0162	0.44
Paneles	Lana de Vidrio 2"	21.16	0.7625	16.13
Espacios ventilación	Filtros de sonido	29.5344	0.7625	22.5199
Ventilación	Aire	1.3537	1	1.3537

Absorción Sonora Total = 47.4826

Tabla 39. Cálculos de absorción sonora total en el cuarto de máquinas.

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Realizando el tratamiento acústico en el cuarto de generación se ha logrado aumentar considerablemente la absorción.

- Absorción sonora sin tratamiento acústico 10.91 Sabinos Métricos.
- Absorción sonora con tratamiento acústico 47.4826 Sabinos Métricos.

Con lo antes mencionado y aplicando la ecuación 31

$$NRR = AA - AB$$

Se obtiene que la reducción de ruido sea de 33,57 dB

El estudio de sonido realizado antes de tratar acústicamente el cuarto de generación nos dio una medición máxima de 83 Decibelios, y después del tratamiento acústico tenemos 49,43.

Por lo que se puede concluir que el cuarto de generación se encuentra dentro de los parámetros que permite el Municipio de Quito y las normas ambientales.

3.6 Simulación Matemática: Cámara de insonorización

Cálculos preliminares:

Partiendo de la fuente sonora, se determinará la ecuación que gobierna la velocidad de sonido desde la fuente hasta las paredes de la cámara de insonorización.

La rapidez del sonido c en un medio gaseoso viene dado por la ecuación 32 (OGATA, 1987)

$$c = \sqrt{kRT} \quad [ec. 32]$$

Dónde:

k es la relación de calores específicos, C_p/C_v

R es la constante de gas

T es la temperatura absoluta

Ya que los cambios de presión y temperatura al paso de una onda sonora son despreciables, el proceso se considera isentrópico, entonces tenemos la ecuación 33:

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{constante} \quad [ec. 33]$$

Por lo tanto,

$$\frac{dp}{d\rho} = \frac{kp}{\rho}$$

Puesto que $p = \rho RT$

Se obtiene:

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{kp}{\rho}} = \sqrt{kRT}$$

Por lo que se podrá simular como varía la rapidez del sonido, con la temperatura tabla 40:

$$c = \sqrt{kRT}$$

Con las constantes:

$$k = 1,4$$

$$R_{aire} = 287 \text{ N.m/kg.}^\circ K$$

T (°C)	T (°K)	c (m/s)
6	279	334,8
7	280	335,4
8	281	336,0
9	282	336,6
10	283	337,2
11	284	337,8
12	285	338,4
13	286	339,0
14	287	339,6
15	288	340,2
16	289	340,8
17	290	341,4
18	291	341,9
19	292	342,5
20	293	343,1
21	294	343,7
22	295	344,3
23	296	344,9
24	297	345,4
25	298	346,0
26	299	346,6
27	300	347,2
28	301	347,8
29	302	348,3
30	303	348,9
31	304	349,5
32	305	350,1
33	306	350,6
34	307	351,2
35	308	351,8

Tabla 40. Variación de temperatura
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

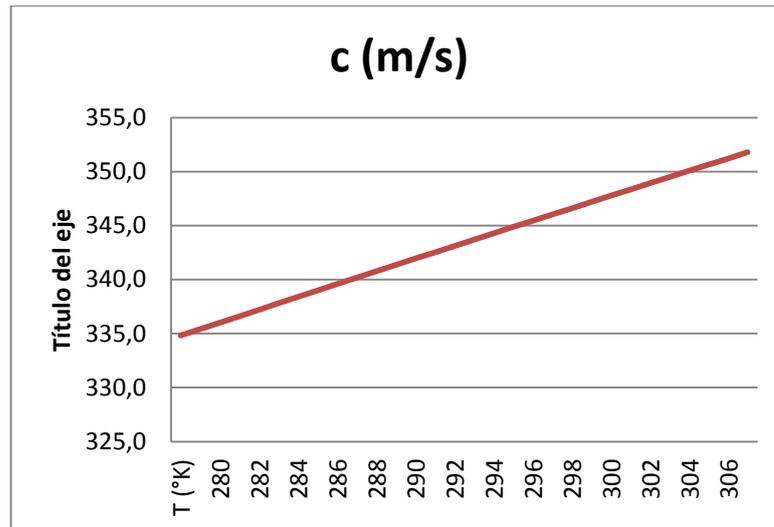


Figura 28. Representación tabla 41
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

MODELO MATEMÁTICO:

Para la simulación asumiremos un sistema de resorte vibrante con amortiguamiento (figura 23), ya que las paredes cumplen con la función de disminuir la vibración de las moléculas provocadas por el ruido.

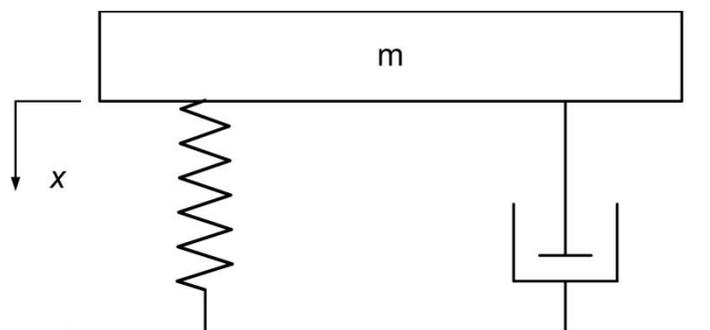


Figura 29. El resorte vibrante con amortiguamiento (Murray, 1983).
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

En un sistema mecánico con vibración, las fuerzas de fricción y otras (tales como la resistencia del aire) actúan para decrecer la amplitud de las oscilaciones y finalmente traer el sistema al reposo. Una manera para obtener una mejor aproximación a la realidad es asumir una fuerza amortiguadora. La ley exacta para esta fuerza no se conoce, puesto que depende de muchos factores variables, pero se ha encontrado de experimentos que para velocidades pequeñas, la magnitud de la fuerza amortiguadora es aproximadamente proporcional a la velocidad instantánea del peso en el resorte.

La magnitud por tanto está dada por la ecuación 34:

$$\beta \left| \frac{dx}{dt} \right| \quad [ec. 34]$$

Dónde β es la constante de proporcionalidad llamada la constante de amortiguamiento.

La fuerza amortiguadora se opone al movimiento de modo que cuando el peso va bajando la fuerza amortiguadora actúa hacia arriba, mientras que actúa hacia abajo cuando el peso va subiendo. Asumiendo hacia abajo como la dirección positiva, vemos que la fuerza amortiguadora debe ser negativa cuando dx/dt sea positiva, y debe ser positiva cuando dx/dt sea negativa. Así, con $\beta > 0$, es claro que la fuerza amortiguadora debe estar dada tanto en magnitud como en dirección por: $-\beta dx/dt$

Cuando se tienen en cuenta las fuerzas restauradoras ya consideradas, sigue por la ley de Newton que la ecuación diferencial del movimiento es 35:

$$\frac{W}{g} \frac{d^2x}{dt^2} = -\beta \frac{dx}{dt} - kx \quad [ec. 35]$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + kx = 0$$

Dónde:

m es la masa del sistema.

β es la constante de amortiguamiento.

k es la constante del resorte.

Análisis del modelo

Se parte de la ecuación 36:

$$m\ddot{x} + \beta\dot{x} + kx = 0 \quad [ec. 36]$$

Planteando la ecuación característica:

$$ms^2 + \beta s + k = 0$$

De la solución algebraica:

$$s = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4mk}}{2m}$$

Se analiza el discriminante: $\Delta = \beta^2 - 4mk$

$$\text{si } \Delta \text{ es } \begin{cases} \Delta < 0, & \text{subamortiguado inestable} \\ \Delta = 0, & \text{críticamente amortiguado} \\ \Delta > 0, & \text{sobreamortiguado} \end{cases}$$

Si $\Delta > 0$, las raíces son reales diferentes y negativas y la respuesta del sistema es una suma de términos exponenciales con signos negativos. Esto se define como un Comportamiento monótonico (función o cantidad que varía de tal forma que o bien nunca aumenta o bien nunca) estable o Sobre amortiguado.

Si $\Delta = 0$, las raíces son reales iguales y la respuesta del sistema es una expresión exponencial con signo negativo. Esto muestra un Comportamiento monótonico estable crítico o Amortiguado crítico porque si se disminuye el valor del coeficiente de amortiguamiento la respuesta es de tipo sub-amortiguado y si, por lo contrario, se aumenta el sistema es más sobre-amortiguado.

Si $\Delta < 0$, las raíces son complejas conjugadas con parte real negativa y la respuesta del sistema es una expresión exponencial sinusoidal decreciente. Esto muestra un Comportamiento oscilatorio estable o Sub-amortiguado estable (SISTEMAS LINEALES DE SEGUNDO ORDEN (I)).

Del análisis mostrado anteriormente, necesitamos que nuestro sistema sea sub amortiguado, ya que a la salida (exterior de la cámara de insonorización), también tenemos sonido (onda) pero en menor magnitud.

Para resolver la ecuación para la respuesta en el tiempo, es conveniente definir:

Frecuencia natural no amortiguada ecuación 37:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (rad/s)} \quad [\text{ec. 37}]$$

Factor de amortiguamiento relativo ecuación 38

$$\varepsilon = \frac{\beta}{2\sqrt{mk}} = \frac{\text{valor de amortiguamiento real}}{\text{valor de amortiguamiento crítico}} \quad [\text{ec. 38}]$$

Reescribiendo la ecuación se tiene:

$$\ddot{x} + 2\varepsilon\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = 0$$

Para el caso sub-amortiguado, debe cumplirse que, $0 < \varepsilon < 1$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$[s^2 X(s) - sx(0) - \dot{x}(0)] + 2\varepsilon\omega_n[sX(s) - x(0)] + \omega_n^2X(s) = 0$$

Despejando $X(s)$

$$X(s) = \frac{(s + 2\varepsilon\omega_n)x(0) + \dot{x}(0)}{s^2 + 2\varepsilon\omega_ns + \omega_n^2}$$

Condiciones iniciales:

$$x(0) = 1 \text{ mm}$$

$$\dot{x}(0) = 0 \text{ m/s}$$

Reemplazando en la ecuación tenemos:

$$X(s) = \frac{(s + 2\varepsilon\omega_n)}{s^2 + 2\varepsilon\omega_ns + \omega_n^2}$$

Se procede a reemplazar los valores de las constantes:

$$\varepsilon = \frac{\beta}{2\sqrt{mk}}$$
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Se obtiene como referencia un panel de pared:

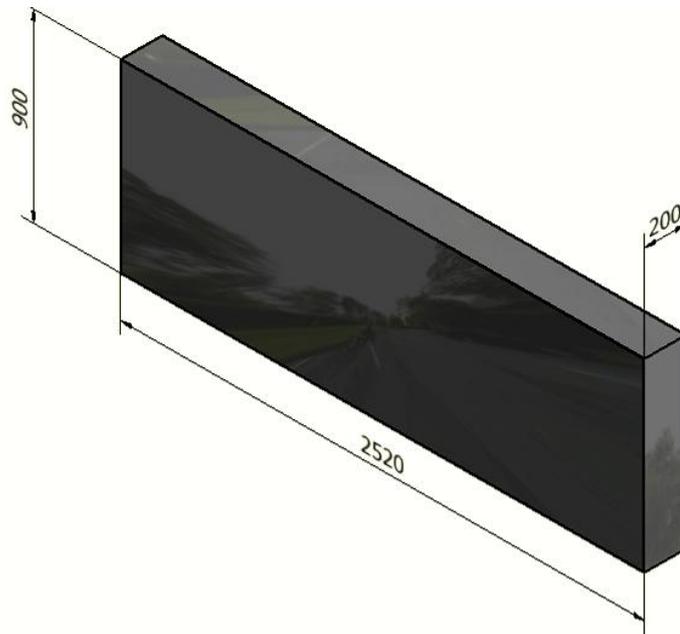


Figura 30. Volumen relativo de aire
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Para el cálculo de la masa del sistema se tomara un volumen de aire igual al del panel figura 24:

$$V_{aire} = 2520 \times 900 \times 200 = 4,53 \times 10^8 \text{ mm}^3 = 0,453 \text{ m}^3$$

Entonces la masa del aire es:

$$\delta_{aire} = 1,29 \text{ Kg/m}^3$$

$$m_{aire} = 1,29 \times 0,453 = 0,584 \text{ Kg}$$

Si bien el peso actúa hacia abajo, se asume que la masa del aire actúa sobre la pared debido a que es un gas y la presión es la misma para todas las direcciones.

Para la constante k, al no haber valores de tablas para el material del resorte, se basa en el % de elongación, del diagrama esfuerzo deformación del ladrillo (CABRERA, CALAFIORE, TOMBA, & LABADIE).

Probetas: Para los ensayos mecánicos se emplea cilindros de 27 mm de diámetro y 40 mm de altura.

Material	T	E_t (GPa)	σ_R (MPa)	ε_R (%)	σ_f (MPa)	ε_f (%)	Modo de fractura
MA1	20°C	31,5±6,4	58±12	0,30±0,00	45±16	0,17±0,05	frágil
	1000°C	35,0±4,2	76±21	0,24±0,00	70±29	0,22±0,03	cuasi-frágil a frágil
MA2	20°C	8,5±0,7	38±3	0,60±0,05	32±1	0,33±0,05	dúctil
	1000°C	38,0±0,0	60±7	0,17±0,06	58±5	0,14±0,06	cuasi-frágil

Tabla 41. Constante de Amortiguamiento
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Se sabe que:

$$k = \frac{AE}{L} = \frac{\pi(0,027)^2(31,5 \times 10^9)}{4(0,04)} = 4,5 \times 10^8 \frac{N}{m}$$

Con estos valores se calcula los demás parámetros:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{4,5 \times 10^8}{0,584}} = 27759 \text{ rad/s}$$

Para determinar la constante de amortiguamiento, se basa en la expresión que se debe cumplir en un sistema sub-amortiguado:

$$\beta^2 > 4mk$$

Para esto se calcula el valor mínimo de la constante de amortiguamiento, con:

$$\beta^2 = 4mk$$

$$\beta = \sqrt{4mk} = \sqrt{4(0,584)(4,5 \times 10^8)} = 32422 \frac{N \cdot s}{m}$$

$$\varepsilon = \frac{\beta}{2\sqrt{mk}} = \frac{32422}{2\sqrt{0,584(4,5 \times 10^8)}} = 0,99$$

Reemplazando en la ecuación:

$$\ddot{x} + 2\varepsilon\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = 0$$

$$\ddot{x} + 54963\dot{x} + 7,79 \times 10^8x = 0$$

Para las condiciones iniciales:

$$x(0) = 1 \text{ mm}$$

$$\dot{x}(0) = 0$$

$$X(s) = \frac{(s + 2\varepsilon\omega_n)}{s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$X(s) = \frac{[s + 54963]}{s^2 + 54963s + 7,79 \times 10^8}$$

Aplicando la transformada inversa:

$$x(t) = 0,001e^{-\varepsilon\omega_n t} \left(\cos \omega_n \sqrt{1 - \varepsilon^2} t + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \sin \omega_n \sqrt{1 - \varepsilon^2} t \right)$$

$$x(t) = 0,001e^{-(0,99)(27759)t} \left(\cos 27759 \times \sqrt{1 - 0,99^2} t \right. \\ \left. + \frac{0,99}{\sqrt{1 - 0,99^2}} \sin 27759 \times \sqrt{1 - 0,99^2} t \right)$$

$$x(t) = 0,001e^{-(0,99)(27759)t} (\cos 3916t + 7 \sin 3916t)$$

$$x(t) = 0,001e^{-27481t} (\cos 3916t + 7 \sin 3916t)$$

$$x(t) = 0,001e^{-27481t} (\cos 1,57t + 7 \sin 1,57t)$$

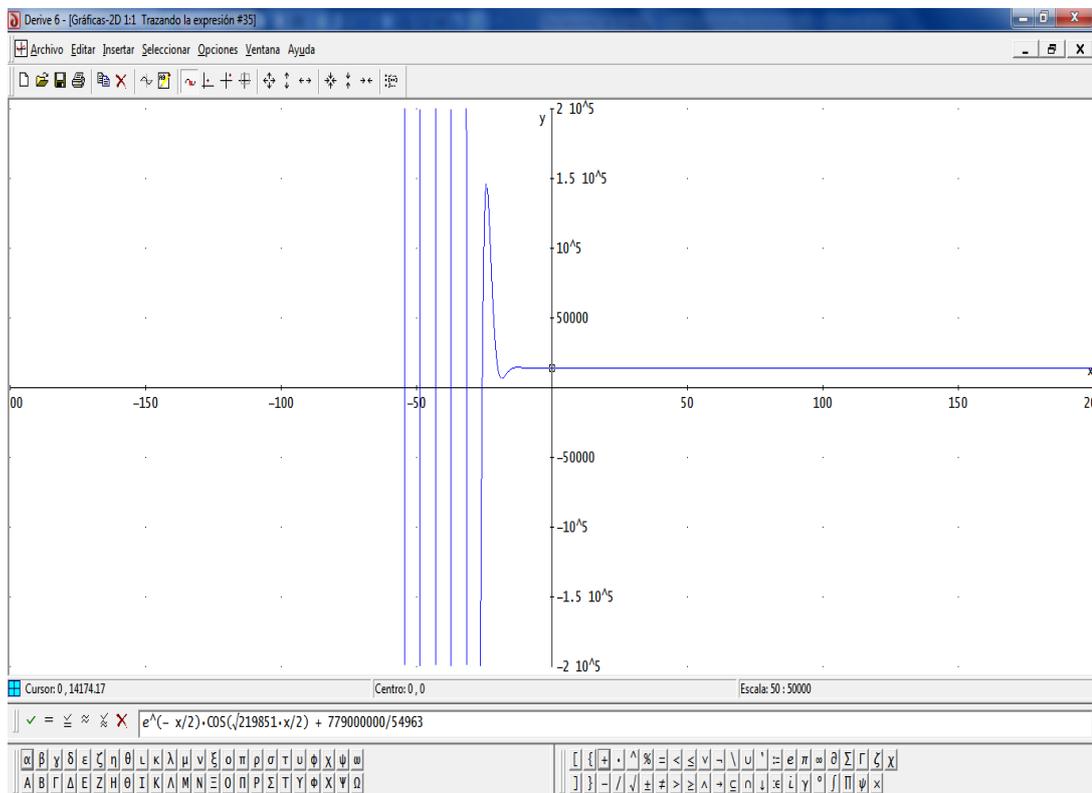


Figura 31. Graficando la función con Derive 6
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

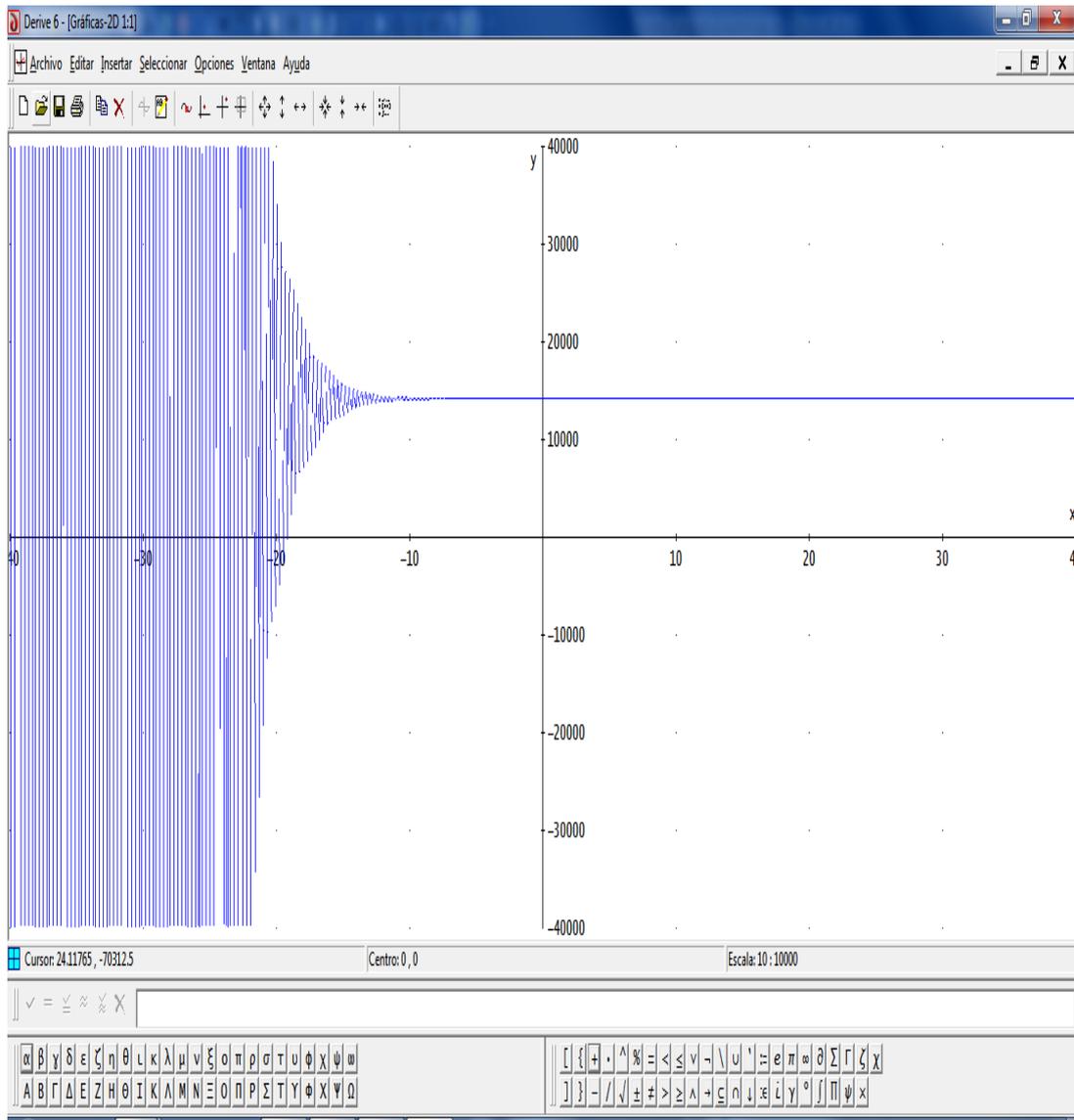


Figura 32. Graficando la función con Derive 6
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Sabiendo que:

$$t = nT, \text{ donde } T = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \varepsilon^2}}$$

Y que $\dot{x}(0) = 0$

Se escribe:

$$x(nT) = 0,001e^{-\varepsilon\omega_n nT}$$

Siendo " n " el número de ciclos, se observa como varía la amplitud de la onda en la tabla 42:

n (ciclos)	x(nT)(m)	x(nT)(μ m)
0	0,001	1000
1	1,1042E-22	1,104E-16
2	1,2192E-41	1,219E-35
3	1,3463E-60	1,346E-54
4	1,4866E-79	1,487E-73
5	1,6415E-98	1,641E-92
6	1,812E-117	1,81E-111
7	2,001E-136	2E-130
8	2,21E-155	2,21E-149
9	2,44E-174	2,44E-168
10	2,694E-193	2,69E-187
11	2,975E-212	2,98E-206
12	3,285E-231	3,29E-225
13	3,627E-250	3,63E-244
14	4,005E-269	4,01E-263
15	4,423E-288	4,42E-282
16	4,884E-307	4,88E-301
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0

Tabla 42. Variación de la amplitud de la onda

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Conclusión:

Luego de analizar el modelo matemático, se observa que la onda sonora en el ladrillo (pared) se disipa en forma rápida, llegando a la conclusión que la pared en sí constituye un aislante para el ruido, inclusive por la rigidez del material se produce el denominado eco, lo que ayuda a que el ruido no salga fácilmente al exterior.

El ruido que sale al exterior se da por los orificios de ventilación (ventanas)

Se hace el mismo análisis para la lana de vidrio

Frecuencia natural no amortiguada:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (rad/s)}$$

Factor de amortiguamiento relativo

$$\varepsilon = \frac{\beta}{2\sqrt{mk}} = \frac{\text{valor de amortiguamiento real}}{\text{valor de amortiguamiento crítico}}$$

Se sabe que la rigidez de la lana de vidrio es 10,5 Mpsi = 72,39 MPa

$$V_{\text{lana}} = 0,453 \text{ m}^3$$

Entonces la masa del aire es:

$$\delta_{\text{lana vidrio}} = 14 \text{ Kg/m}^3$$

$$m_{\text{lana vidrio}} = 14 \times 0,453 = 6,34 \text{ Kg}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{72,39 \times 10^6}{6,34}} = 3379 \text{ rad/s}$$

Para determinar la constante de amortiguamiento, se parte de la expresión que se debe cumplir en un sistema sub-amortiguado:

$$\beta^2 > 4mk$$

Para esto se calcula el valor mínimo de la constante de amortiguamiento, con:

$$\beta^2 = 4mk$$

$$\beta = \sqrt{4mk} = \sqrt{4(6,34)(72,39 \times 10^6)} = 42846 \frac{\text{N.s}}{\text{m}}$$

$$\varepsilon = \frac{\beta}{2\sqrt{mk}} = \frac{42846}{2\sqrt{6,34(72,39 \times 10^6)}} = 0,99$$

Reemplazando en la solución:

$$x(t) = 0,001e^{-\varepsilon\omega_n t} \left(\cos \omega_n \sqrt{1 - \varepsilon^2} t + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \sin \omega_n \sqrt{1 - \varepsilon^2} t \right)$$

$$x(t) = 0,001e^{-(0,99)(3379)t} \left(\cos 3379 \times \sqrt{1 - 0,99^2}t + \frac{0,99}{\sqrt{1 - 0,99^2}} \sin 3379 \times \sqrt{1 - 0,99^2}t \right)$$

$$x(t) = 0,001e^{-3345t} (\cos 477t + 7 \sin 477t)$$

$$x(t) = 0,001e^{-3345t} (\cos 5,76t + 7 \sin 5,76t)$$

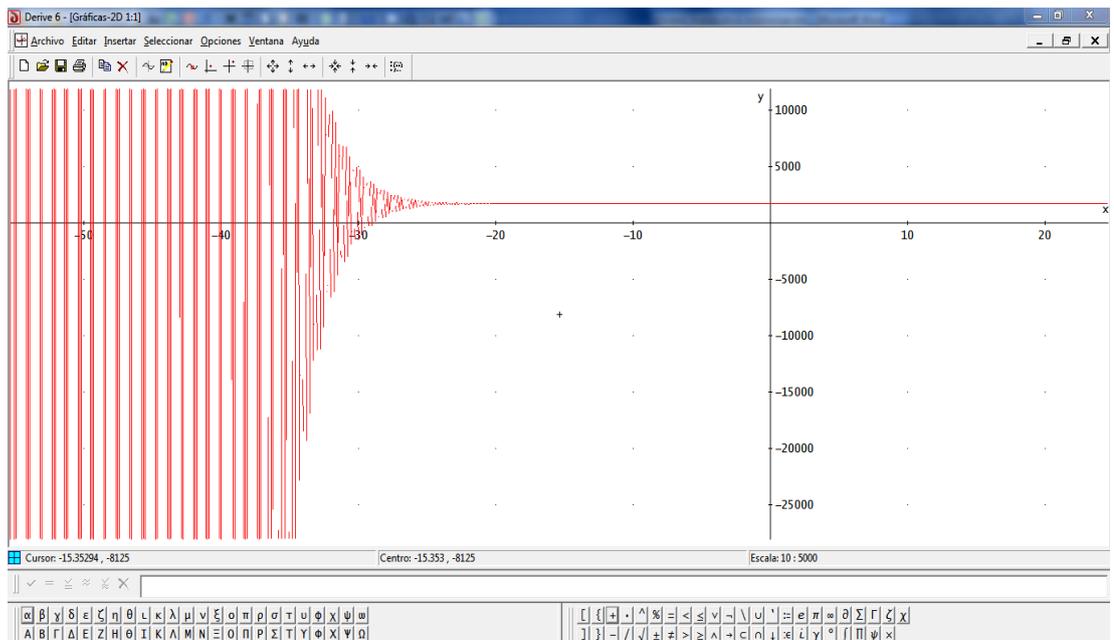
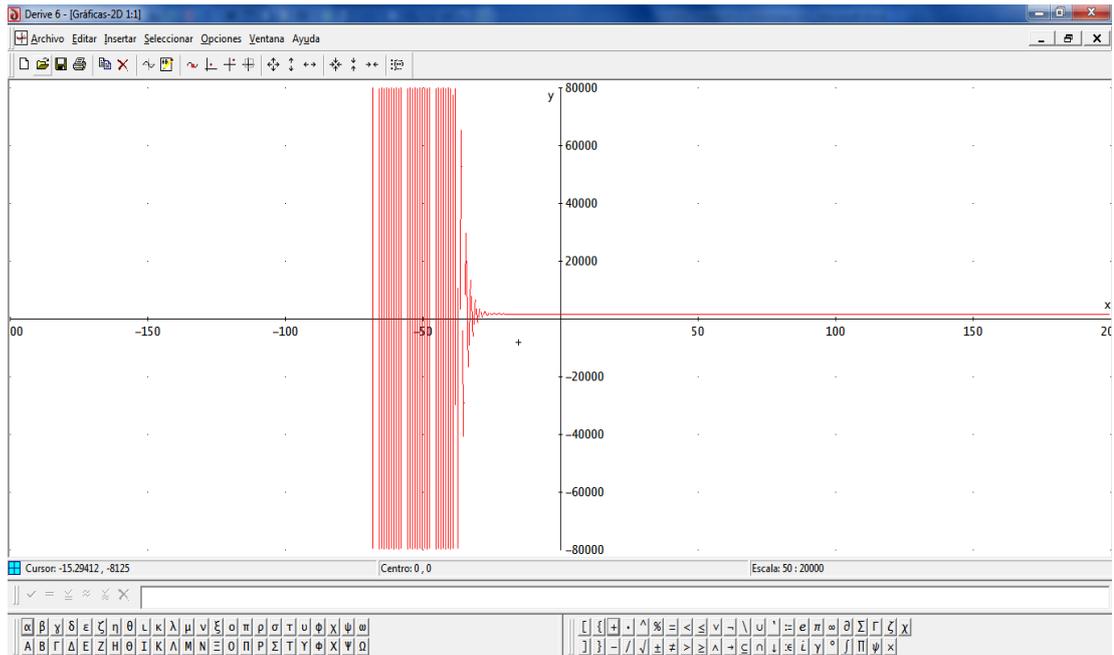


Figura 33. Graficando con derive 6z
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Como se puede apreciar en los gráficos la amplitud al final es menor, por lo que nos indica que la lana de vidrio absorbe mejor las ondas sonoras y se considera un buen aislante acústico.

Nivel de presión sonora (dB)	
Sin insonorización	67,24
Con insonorización	46,45

Tabla 43. Análisis del nivel de presión
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

El nivel de presión de una onda sonora, viene dado por la expresión:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right)$$

Dónde:

L_p es el nivel de presión sonora

p_{rms} es el valor rms de la onda de presión en el punto considerado.

p_{ref} es la presión de referencia.

Despejando p_{rms} :

$$p_{rms} = p_{ref} \cdot 10^{\frac{L_p}{20}}$$

Se sabe que $p_{ref} = 7,1 \text{ Pa}$

Antes de insonorizar se tiene:

$$p_{rms} = (7,1 \text{ Pa}) \cdot 10^{\frac{67,24}{20}} = 16340 \text{ Pa}$$

Después de insonorizar se tiene:

$$p_{rms} = (7,1 \text{ Pa}) \cdot 10^{\frac{46,45}{20}} = 1492 \text{ Pa}$$

L_p	p_{rms}
67,24	16340,24
67	15894,92
65	12625,78
64	11252,74
63	10029,02
62	8938,37
61	7966,33
60	7100,00
59	6327,88
58	5639,73
57	5026,42
56	4479,80
55	3992,62
54	3558,43
53	3171,45
52	2826,56
51	2519,18
50	2245,22
49	2001,05
48	1783,44
47	1589,49
46,45	1491,96

Tabla 44. Presión de una onda sonora
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

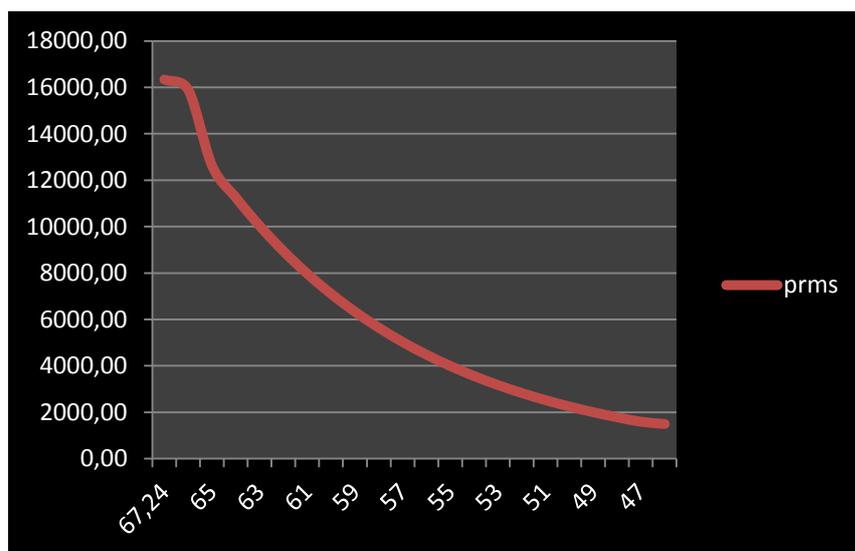


Figura 34. Análisis realizado en Excel
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Realizando un ajuste de la curva, utilizando el curvaExpert (software libre) figura 29:

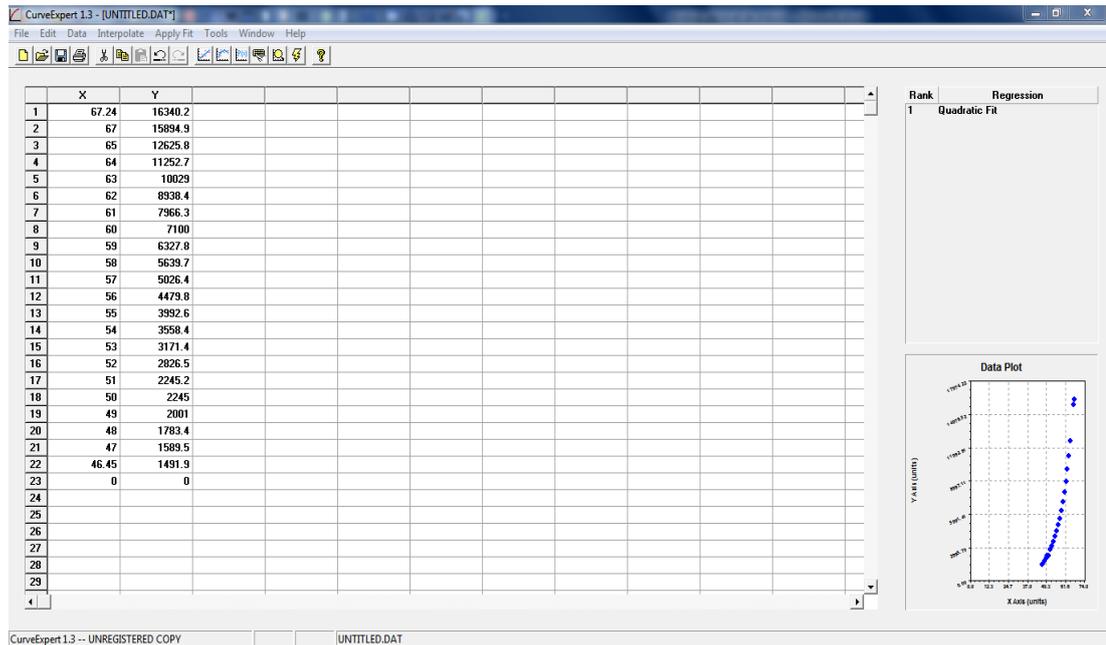


Figura 35. Reajustes de la curva en curva Expert
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

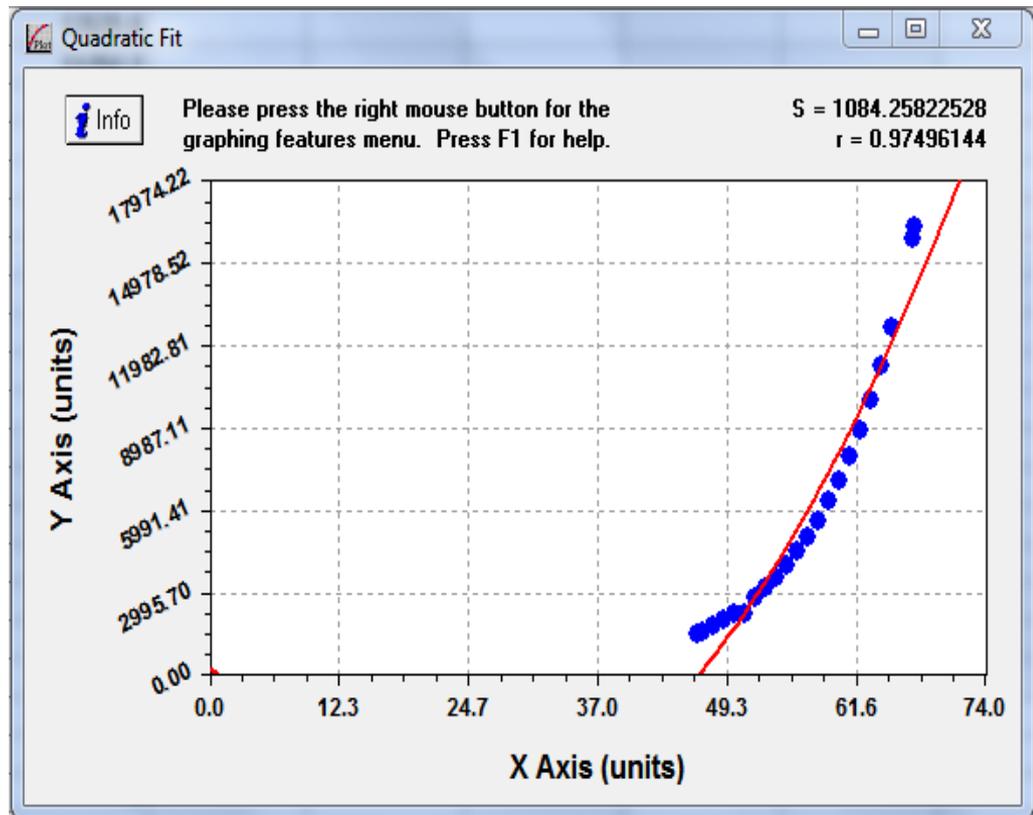


Figura 36. Aproximación a una curva de 2° grado: $r=0,97$
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

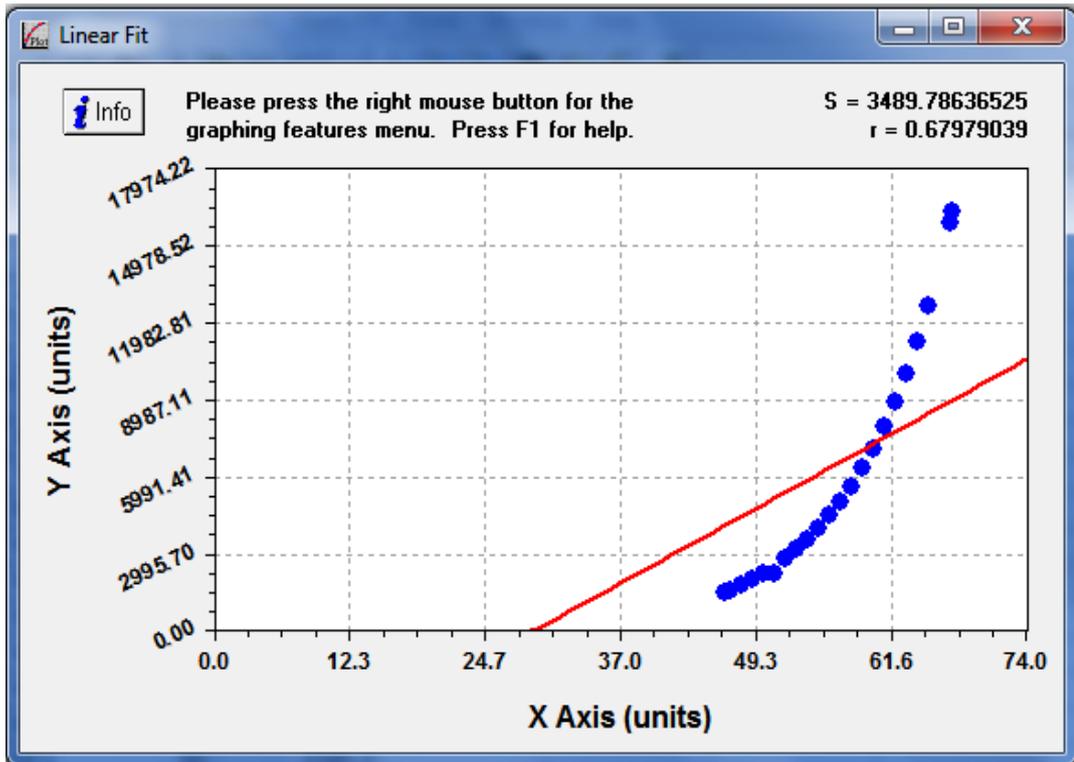


Figura 37. Aproximación a una recta: $r = 0,67$
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

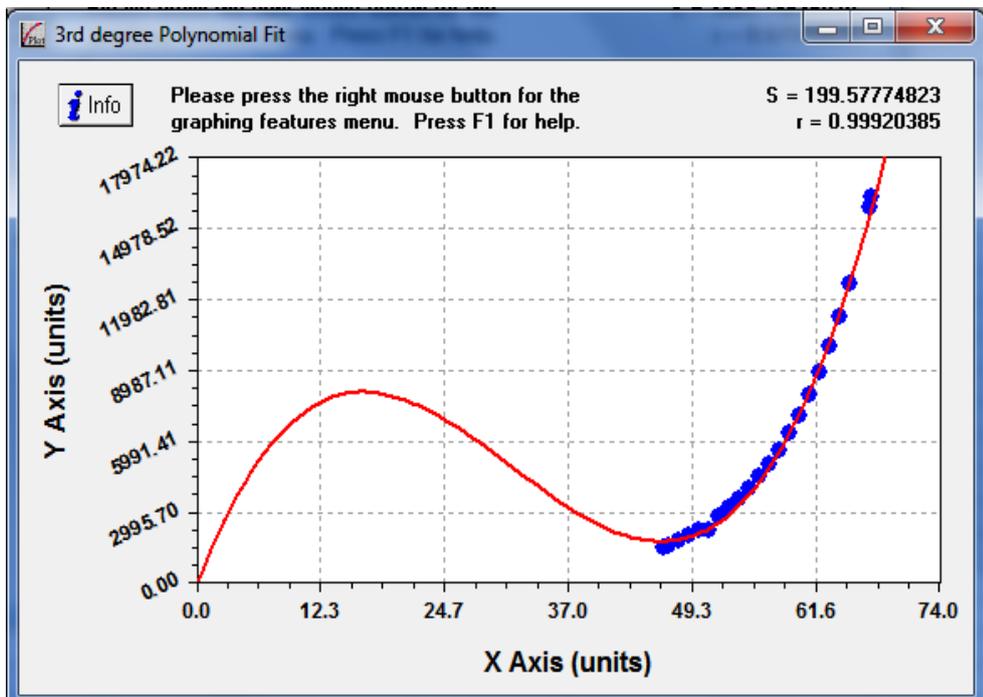


Figura 38. Aproximación a una ecuación de 3° grado: $r=0,999$
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

De las tres se escoge la que tiene mayor coeficiente de correlación: curva de 3° grado:

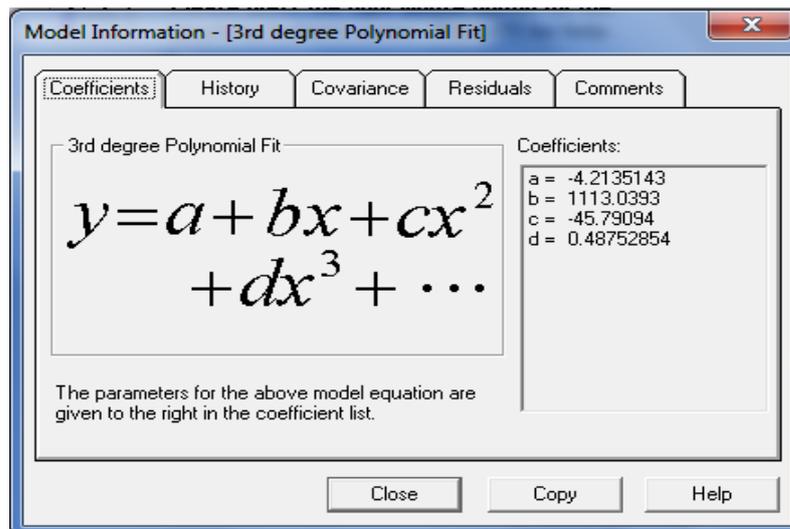


Figura 39. Ajuste de la curva de 3°
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Los datos obtenidos se ajustan a una curva de 3° con los coeficientes mostrados, lo que permite interpolar o extrapolar valores si es necesario.

Ecuación de onda:

Partiendo de la ecuación general de la presión sonora:

$$p = p_{rms}\sqrt{2} \cos(\alpha x - \omega t)$$

Entrada:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(67,24) = 422,5 \text{ rad/s}$$

$$\alpha = \frac{\omega}{c} = \frac{422,5}{344} = 1,23 \text{ m}^{-1}$$

Reemplazamos:

$$p = 7,1\sqrt{2} \cos(1,23 - 422,5t)$$

$$p = 10 \cos(1,23 - 422,5t)$$

Salida:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(46,45) = 291,8 \text{ rad/s}$$

$$\alpha = \frac{\omega}{c} = \frac{291,8}{344} = 0,85 \text{ m}^{-1}$$

Reemplazando:

$$p = 7,1\sqrt{2} \cos(0,85 - 291,8t)$$

$$p = 10 \cos(0,85 - 291,8t)$$

CAPITULO IV VENTILACIÓN

Del seis al diez por ciento del combustible consumido por un motor diesel se pierde en forma de calor radiado al aire circundante. Además el calor debido a las ineficacias del generador y de las tuberías de escape puede igualar fácilmente el calor radiado por el motor. Las elevadas temperaturas resultantes en la cuarto de generadores influyen de forma negativa en el personal de mantenimiento, en los equipos de conmutación y sobre todo en el correcto funcionamiento del grupo electrógeno.

Idealmente debe circular aire limpio, frio y seco alrededor de los equipos de conmutación, por la parte posterior del generador, a través del motor y descargarse por el radiador. Como se muestra en la figura 37.

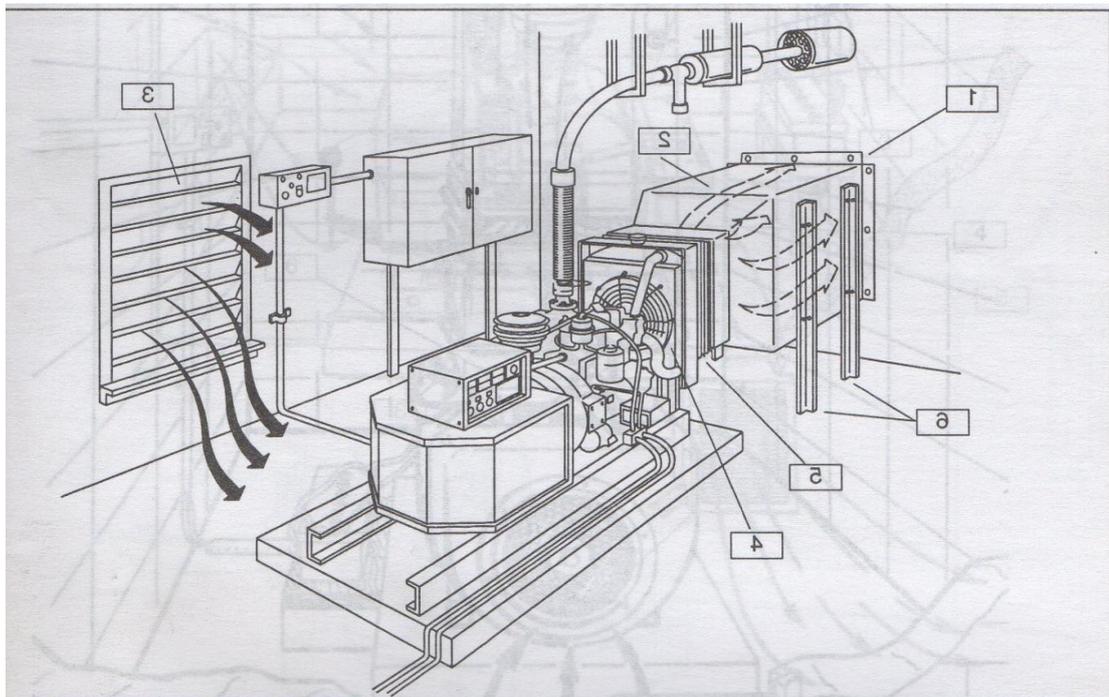


Figura 40. Ventilación de un cuarto de generadores
Fuente: Manual de Servicios Detroit Diesel 1969

Por recomendación de los fabricantes de grupos electrógenos, se deben ubicar orificios de admisión para proporcionar la máxima cantidad de aire de enfriamiento además evitar la presencia de aire caliente estancado en otras aéreas.

Cuando existe grupos electrógenos múltiples se necesita ventilación y aberturas adicionales.

Se tomará como ejemplo el cuarto de generadores del Centro Comercial Atahualpa para realizar de una forma más didáctica las aplicaciones de los cálculos.

Primero se determina el espacio físico, para observar las facilidades que pueda brindar para el diseño y realizar las modificaciones necesarias.

El cuarto de máquinas tiene una forma en L como muestra la figura 34 y tomando en cuenta que la ubicación de cada generador se realiza un plano de cómo se deben ubicar los ventiladores y los agujeros de ventilación con los insonorizadores.

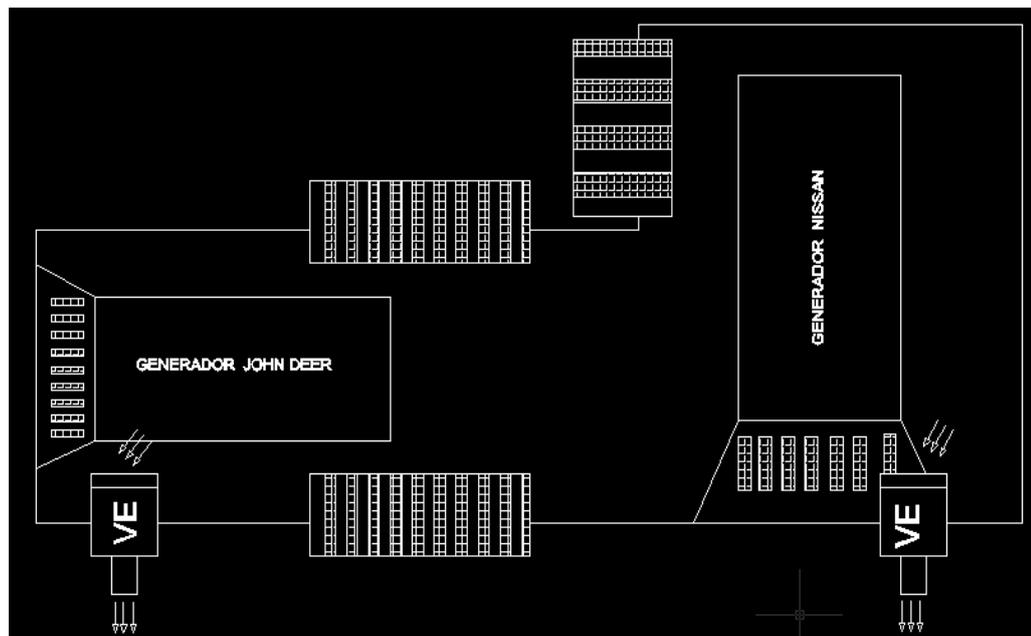


Figura 41. Ubicación de silenciadores

Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

Es bien sabido que el proceso de ventilación es la técnica de sustituir el aire ambiental existente en el interior de un recinto, el cual se considera indeseable porque carece de temperatura adecuada, pureza o humedad, por otro que aporte una mejora a estas características. Para lograrlo, se emplea un sistema de extracción de aire y otro de inyección, los cuales provocan a su paso un barrido o flujo de aire constante que se llevará todas las partículas contaminadas o no deseadas. Para poder

utilizar el término ventilación, es preciso que existan las condiciones de extracción, inyección y barrido de aire.

4.1 Tipos de ventilación

4.1.1 Ventilación general y ambiental

Consiste en ventilar toda un área por medio de un sistema de extracción e inyección de aire. En la parte central de ambos sistemas, se crea una corriente o barrido de aire. Este tipo de ventilación se realiza utilizando el volumen del recinto y multiplicándolo por un número específico de cambios de aire por hora. En los sistemas de ventilación general, se emplean cambios de aire por hora para determinar el caudal final que se requiere extraer y suministrar de aire.

4.2 Conceptos de ventilación

4.2.1 Ventilación cruzada.

Con este concepto podemos hacer que el aire cruce del extremo más lejano hasta el opuesto del recinto por ventilar, llevándose o barriendo a su paso todas las partículas contaminantes. Estos sistemas generalmente se pueden aplicar en invernaderos, bodegas, fábricas, etcétera; en sí, en Dónde se desee que todo el aire contaminado sea extraído con efectividad. Es muy importante considerar lugares Dónde se esté generando aire contaminado al aplicar la ventilación cruzada para que los contaminantes queden del lado cercano al de la extracción; de esta forma, logramos sacar los contaminantes de inmediato, en lugar de transportarlos de un lado al otro del recinto.

4.2.2 Ventilación semicruzada.

Busca una trayectoria un poco más corta por la cual pueda crearse un barrido de aire y llevarse a su paso el aire contaminado, sacándolo lo más pronto posible. Generalmente, para este tipo de ventilación, los extractores se colocan a todo lo largo de la cumbrera de un techo de dos aguas. Con esto se logra barrer todos los

contaminantes hacia el centro de la nave industrial y sacarlos de una forma más efectiva. Ésta es una forma efectiva de extraer calor, olores o contaminantes que se estén generando en muchos lugares del recinto. Es muy importante no causar un cortocircuito de aire. Este tipo de errores se provocan cuando se coloca la extracción muy cerca de la inyección de aire; por lo tanto, el aire inyectado está siendo extraído de inmediato, logrando una baja eficiencia en la renovación de aire.

4.2.3 Ventilación por capas.

Aquí se considera la porción del recinto dónde están las personas, los animales, procesos o elementos por ventilar. Este concepto se aplica en el momento en el que se calcula la altura del recinto y reduce considerablemente el volumen de aire requerido; en consecuencia, produce ahorro en equipos de ventilación, obteniendo resultados iguales. Generalmente, se puede aplicar en naves industriales dónde la altura supera los 4.5 metros. Esto quiere decir que se puede ajustar a casi cualquier caso, ya que la altura promedio norma de las naves industriales es de 6 a 7 metros; por tanto, en algunos sistemas de ventilación es muy recomendable sólo realizar los cálculos en la capa dónde se encuentra la gente. Un ejemplo de esto: si se tiene una nave industrial de 14 metros de altura y la gente radica únicamente en los primeros 2 metros de altura, podemos sumarle un par de metros para asegurar un buen resultado de ventilación y evitar la necesidad de hacer un proyecto con una altura de 14 metros, lo cual prácticamente resultaría en una cantidad excesiva de equipos de ventilación y elevaría los costos más de 200 por ciento.

4.2.4 Ventilación natural.

Se utilizan sistemas de extracción e ingestión de aire de forma estática, provocando a su paso un barrido de aire. Los elementos que la conforman pueden ser extractores gravitatorios, louvers, rejillas de paso de aire o cualquier elemento que se encuentre estático.

Es importante no confundir el sistema de ventilación natural con ventanas abiertas. Las principales funciones de las ventanas es poder ver hacia el exterior, y una consecuencia es la aireación de un recinto; sin embargo, es un error tomarlas en

cuenta como un sistema de ventilación. Cabe recordar que un sistema de ventilación se compone por un sistema de ingestión de aire y uno de extracción; por lo tanto, una ventana sólo puede cumplir con la mitad del principio de ventilación. En caso de que se desee utilizar una ventana como medio de ingestión o extracción de aire, tiene que ir acompañada de un extractor o inyector de aire.

4.2.5 Ventilación centralizada.

Vincula varios sistemas de ventilación de aire a uno troncal de extracción centralizada o inyección, creando a su paso un barrido de aire en cada uno de los recintos conectados a él. Éstos, habitualmente, se utilizan en edificios donde, por un conducto troncal, se conectan todos los baños, campanas de cocinas, boilers, así como cualquier contaminante que requiera ser extraído. De la misma forma, debe existir un sistema de ingestión de aire generalizado, por el cual se alimentará todo el edificio de aire.

4.2.6 Ventilación inteligente o automatizada.

Cuenta con sensores de humedad, temperatura, pureza, tiempo o movimiento conectados al sistema de ventilación, los cuales permiten que el sistema se encienda cuando el contaminante haya alcanzado el rango programado. Con la ventilación inteligente podemos tener ahorros considerables de energía. Son aplicables para cualquiera de los casos anteriores.

4.2.7 Ventilación por impulsión.

El sistema de ventilación por impulsión consiste en impulsar el aire de un ventilador a otro. Generalmente, se realiza con ventiladores tipo jet. El uso más común tiene lugar en túneles, estacionamientos, edificios, subterráneos o en cualquier otro en el que el flujo de aire tenga que alcanzar largas distancias para ahorrar el uso de ductos o canalizaciones, ya que el mismo recinto actúa como una gran canalización.

4.2.8 Ventilación ecológica.

En el concepto, se utilizan sistemas de extracción o ingestión que cumplan con las siguientes condiciones:

- Consumo de energía eléctrica parcial o ahorro total
- Fabricado con materiales reciclables
- Con mantenimiento parcial o nulo
- Proceso de fabricación del producto con bajo impacto ambiental
- Transportación del producto con impacto ambiental bajo
- Los equipos más sobresalientes son extractores atmosféricos, eólicos o giratorios; extractores gravitatorios y louvers.

4.2.9 Ventilación sostenible

Aquí se manejan sistemas de extracción o ingestión de aire con un diseño que garantice la integridad ecológica de los sistemas naturales que sustentan nuestros requerimientos sociales y económicos, presentes y futuros.

4.3 Cálculos

Para determinar el tipo de ventilación y los cambios de aire es necesario definir dentro que área de trabajo estaremos y cuáles son los parámetros necesarios para un correcto funcionamiento del sistema.

Primero se utilizara la tabla 45 del manual fundamentos de ventilación de GREENHECK que nos permite definir el tipo de área y la cantidad mínima o máxima para los cambios de área.

Cambios Sugeridos del Aire para una Ventilación Apropriada

$$\text{pcm} = \frac{\text{Dimensiones del lugar}}{\text{Cambio/Minutos}}$$

$$\text{Dimensiones del Lugar} = \text{Largo} \times \text{Ancho} \times \text{Alto}$$

Area	Cambio/Minutos	Area	Cambio/Minutos	Area	Cambio/Minutos
Pasillo	3-10	Salón de Baile	3-7	Tienda de Maquinaria	3-6
Atico	2-4	Comedor	4-8	Fabrica de papel	3-8
Auditorio	3-10	Tintorería	2-5	Oficina	2-8
Panadería	2-3	Cuarto de Maquinas	1-3	Empacadora	2-5
Bar	2-4	Fabrica	2-7	Cabina de Proyección	1-2
Establo	12-18	Fundición	1-5	Cuarto de Recreación	2-8
Cuarto de Calefacción	1-3	Taller	2-10	Residencia	2-6
Club de Boliche	3-7	Cuarto de Generadores	2-5	Restaurante	5-10
Cafetería	3-5	Gimnasio	3-8	Cuarto de Baño	5-7
Iglesia	4-10	Cocina	1-5	Tienda	3-7
Salón de Clases	4-6	Laboratorio	2-5	Salón de Espera	1-5
Salón para Clubes	3-7	Lavandería	2-4	Almacén	3-10

Tabla 45. Cambios de aire

Fuente: Fundamentos de Ventilación Rev 2 Septiembre 2010 SN Copyright © 2010 Greenheck Fan Corp.

Teniendo como dato que se deben realizar de 2 a 5 cambios de air por minuto en un cuarto de generadores, se determina la cantidad de pcm (pies cúbicos por minuto) que requiere con la ecuación 39 y de esta manera seleccionar el sistema de ventilación más conveniente para este trabajo.

$$\text{pcm} = \frac{\text{Dimensiones del lugar}}{\text{Cambio/Minutos}} \quad [\text{ecu. 39}]$$

El área ventilada es:

28.208 ft de largo x 13.94 ft de ancho x 13.63 ft de alto

Dando un área de 5360.47 ft cúbicos

De esto: $\text{pcm} = 5360.47 / 5 = 1072.904$

Con este dato se procede a escoger el tipo de extractor a utilizar para este cuarto así como el sistema de ventilación.

Para obtener los resultados requeridos y el correcto funcionamiento de las maquinas se usara una combinación de ventilación cruzada con un control al encendido a los generadores ya que en ese momento se requiere el funcionamiento del sistema.

Por la forma física del cuarto se colocará dos extractores de 2000 cfm para que produzcan una presión negativa dentro del cuarto y a si mantener la temperatura que los generadores requieren.

Se usaran dos ventiladores centrifugados figura 35 con la capacidad de variar su velocidad según lo requiera.

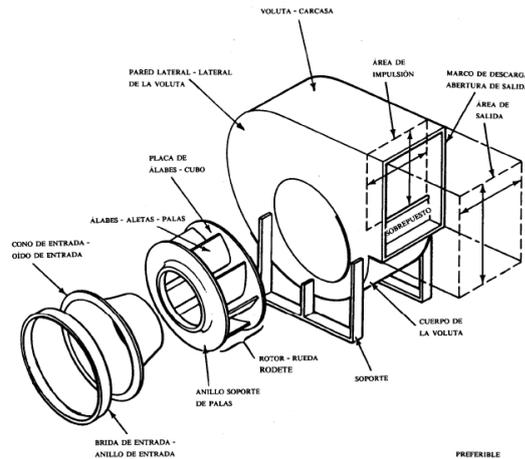


Figura 42. Turbina extractora

Fuente: Fundamentos de Ventilación Rev 2 Septiembre 2010 SN Copyright © 2010 Greenheck Fan Corp.

Debido a que se requiere disminuir el ruido que se emite este tipo de extractores son los adecuados por su baja generación de ruido y su alta eficiencia en la extracción.

4.4 Simulación matemática del sistema de ventilación

Consideraciones:

Se considera al aire como un fluido ideal, debido a que si se lo considera como fluido real, se tendría que considerar esfuerzos de la forma:

$$\text{Esfuerzos normales} \approx \sigma_{(x,y,z)}$$

$$\text{Esfuerzos tangenciales} \approx \tau_{(x,y,z)}$$

Los mismos que son muy difíciles de cuantificar, tabular y operar.

Se considera al aire como un fluido de viscosidad constante, ya que la viscosidad varía con la temperatura, consideramos que esta variación es despreciable.

La presión interna media (entre caras), varía en las tres direcciones, consideramos que es la misma variación en cualquier dirección.

Se idealiza a la cámara como un sistema hidráulico Dónde existe una entrada y una salida de fluido (figura 40), al que aplicamos la ecuación de la continuidad.

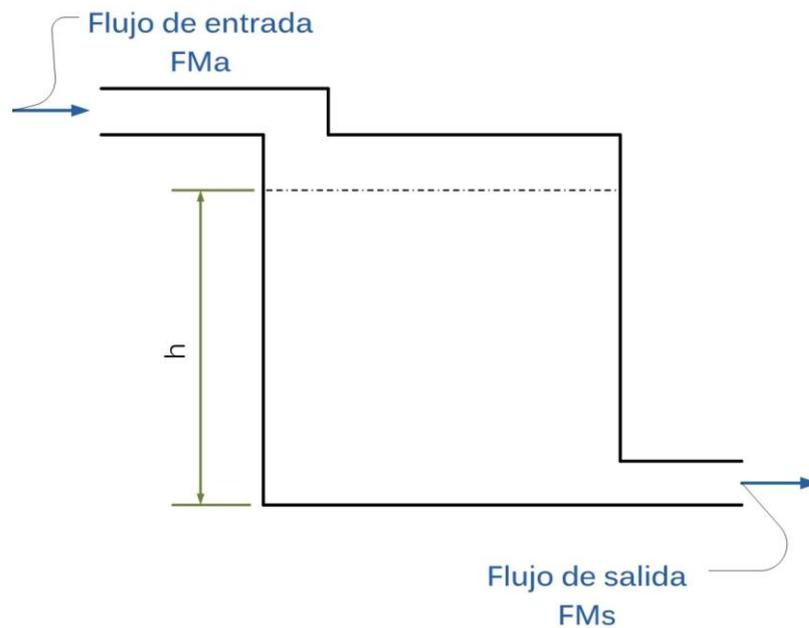


Figura 43. Sistema hidráulico
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

$$FMs - FMa - \frac{dMin}{dt} = 0 \quad [40]$$

Siendo:

$\frac{dMin}{dt}$ cantidad de fluido que permanece en la camara

Se analiza la condición de que el momento de arrancar los motores no existe entrada de aire para el enfriamiento, por lo que tenemos:

$$FMa = 0$$

$$FMs - \frac{dMin}{dt} = 0$$

Sabiendo que:

$$\delta = \frac{m}{V} \rightarrow m = \delta \cdot V$$
$$FMs = \delta \cdot Q_s$$

Siendo Q_s = caudal de salida

Reemplazando en la ecuación:

$$\delta \cdot Q_s + \frac{d(\delta V_{int})}{dt} = 0$$
$$\delta \cdot v_s \cdot A_s + \frac{d(\delta A_E \cdot h)}{dt} = 0$$

Siendo v_s = velocidad de salida del fluido.

Conociendo que la densidad permanece constante, que las secciones de entrada y de salida son iguales y que al no existir otra fuerza externa en la cámara, la velocidad de salida del fluido solo está influenciada por la gravedad, obtenemos:

$$\sqrt{2gh} + \frac{dh}{dt} = 0$$

Que en la ecuación de variación de la altura (el volumen de fluido es función de la altura, ya que las otras mediciones no varían) del fluido respecto al tiempo.

Reemplazando el valor de la gravedad, tenemos:

$$4,43\sqrt{h} + \frac{dh}{dt} = 0$$

Resolviendo la ecuación diferencial (ecuación de variables separables):

$$4,43 dt + \frac{dh}{\sqrt{h}} = 0$$

Integrando:

$$4,43 \int dt + \int \frac{dh}{\sqrt{h}} = C$$
$$4,43t + 2\sqrt{h} = C$$

Condiciones de borde: $t = 0 \rightarrow h = 3 m$

$$C = 2\sqrt{3} = 3,46$$

La solución sería:

$$4,43t + 2\sqrt{h} = 3,46$$

Despejando h:

$$h = (1,73 - 2,22t)^2$$

Análisis de la transferencia de calor:

Análisis de una sección de los silenciadores acústicos que sirven de entrada y salida de aire figura 41 Sección silenciador.

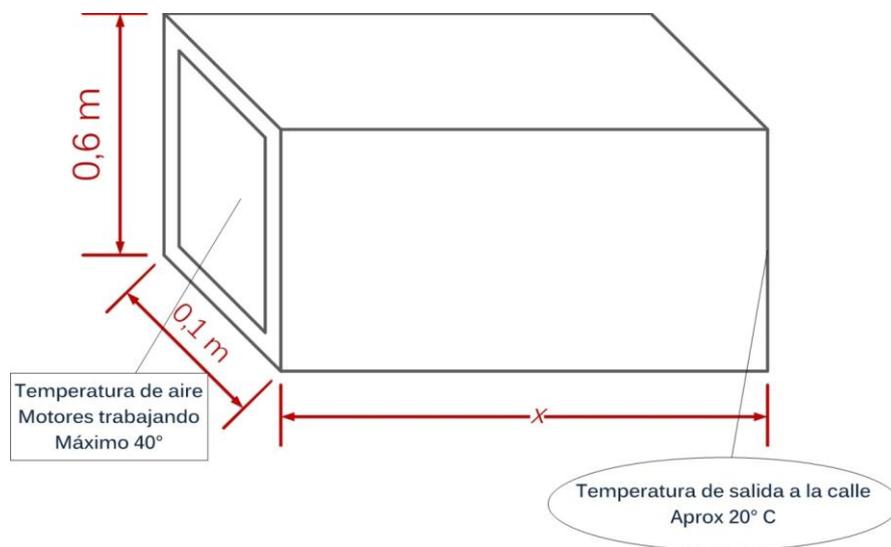


Figura 44. Sección silenciador
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

$$Q = 2000 \text{ cfm} = 0,943 \text{ m}^3/\text{s}$$

Datos del aire a 40° C, tablas (CENGEL)

$$\rho = 1,127 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$k = 0,02662 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{°C} \quad \text{conductividad térmica}$$

$$\vartheta = 1,918 \text{ kg}/\text{m} \cdot \text{s} \quad \text{viscosidad dinámica}$$

$$C_p = 1007 \text{ J}/\text{kg} \cdot \text{°C} \quad \text{Calor específico}$$

$$Pr = 0,7255 \quad \text{Número de Prandtl}$$

Calculamos el diámetro hidráulico:

$$D_h = \frac{4A_c}{p}$$

Dónde:

D_h → diámetro hidráulico

A_c → área de la sección transversal

p → perímetro

$$D_h = \frac{4 * 0,6 * 0,1}{2(0,6 + 0,1)} = 0,171$$

Velocidad media:

$$v_m = \frac{V}{A_c}$$

Dónde:

V = velocidad de entrada del aire

A_c → área de la sección transversal

$$v_m = \frac{0,943 \text{ m}^3/\text{s}}{(0,6 * 0,1)\text{m}^2} = 15,72 \text{ m/s}$$

Numero de Reynolds: ν

$$Re = \frac{v_m * D_h}{\nu}$$

Dónde:

ν → viscosidad cinemática

$$Re = \frac{15,72 * 0,171}{1,702 \times 10^{-5}} = 157938,9$$

$Re > 10000$ → flujo turbulento

Longitud de entrada:

$$L_h = L_s = 10D = 10(0,1) = 1\text{m}$$

$L_h > 0,6 \text{ m}$ → flujo turbulento en todo el conducto

Número de Nusselt:

$$N_u = \frac{h * D_h}{k} = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3}$$

$$N_u = 0,023 (157938,9)^{0,8} (0,7255)^{0,3}$$

$$N_u = 301.1$$

Despejando h (coeficiente de transferencia de calor por convección)

$$h = \frac{k}{D_h} * N_u$$

Con una conductividad térmica de: 0,02662 W/ m °C (tabla A-15) Cengel:

$$h = \frac{0.02662 * 301.1}{0,171} = 46,87 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Calculamos el área de salida:

$$A_s = p * L = (0,6 + 0,1) * 0,6 = 0,42 \text{ m}^2$$

Variación de masa de aire:

$$\dot{m} = \rho V = \left(1,127 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(0,943 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

$$\dot{m} = 1,062 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Temperatura de salida:

$$T_e = T_c - [(T_c - T_i)] \exp\left(-\frac{h A_s}{\dot{m} C_p}\right)$$

Dónde:

Tc: temperatura del conducto (22 C aprox)

$$T_e = 22 - [(22 - 40)] \exp\left(-\frac{46,87 * 0.42}{1,062 * 1007}\right)$$

$$T_e = 39,27 \text{ °C}$$

Hay que tomar en cuenta que estamos calculando para un conducto de un silenciador, para todos los silenciadores tendríamos una disminución considerable, es decir disminuimos 0,73 grados centígrados por conducto, multiplicamos por todos los conductos tendríamos la disminución aproximada de temperatura.

CAPITULO V
COSTOS

En la tabla 46 se muestra los costos del diseño, materiales, fabricación, instalación, y puesta en funcionamiento del sistema de insonorización.

Estos costos son hechos envase a los precios de materiales y mano de obra actual.

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
133	Kilogramos de ducto construido en tool galvanizado 0.5 mm de espesor	USD 6,50	USD 864.50
199	Kilogramos de tool galvanizado y tool negro perforado 0,01 mm de espesor	USD 7,00	USD 1.393
2	Ventiladores centrífugos de 2000 CFM, 220V, 60HZ, 4 tiempos, incluye caja metálica y aislamiento acústico	USD 1.750	USD 3.500
	Instalación de paneles, silenciadores, turbinas	USD 350	USD 350
	Mano de obra trabajos de obra civil pruebas y puesta en marcha	USD 800	USD 800
		SUBTOTAL	USD 6.907,50
		IVA 12%	USD 828,90
		TOTAL	USD 7.736,40

Tabla 46. Tabla de costos
Fuente: Alex Ortiz y David Ibarra

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- ✓ Se logró reducir los niveles de ruido con las adecuaciones realizadas, los parámetros son los normalizados por el Distrito Metropolitano de Quito.
- ✓ Tanto física como matemáticamente se comprobó que los cálculos realizados fueron los adecuados para la disminución del ruido.
- ✓ Los extractores colocados permiten mantener la temperatura estable dentro del cuarto de máquinas para un correcto funcionamiento de los generadores.

Recomendaciones

- ✓ Las áreas destinadas para los cuartos de máquinas en la mayoría de construcciones son improvisadas, de aquí la necesidad de planificar y adecuar los espacios para este fin, tomando en cuenta las normas de construcción y los requerimientos de las máquinas a instalarse.

- ✓ Todo el personal que ingrese a este tipo de habitaciones debe tener protección auditiva para evitar daños en su salud, caso contrario no se debe permitir su ingreso.

- ✓ Solo personal calificado debe manejar las maquinarias dentro de estos cuartos.

- ✓ Es necesario colocar señalética para indicar los riesgos que existen dentro del cuarto de máquinas.

BIBLIOGRAFÍA

CABRERA, CALAFIORE, TOMBA, & LABADIE. (s.f.). Comportamiento mecánico a alta temperatura de refractarios mgo-al₂o₃-c de uso siderúrgico; Laboratorio de Materiales Estructurales – División Cerámicos - INTEMACONICET. Mar del Plata - Argentina: Facultad de ingeniería /UNMdP.

CENGEL, Y. (s.f.). *Transferencia de Calor*. McGraw-Hill, Tabla A-15, 2° Edición .

Colombit, & S.A. (Agosto, 2006). *Aislamiento acústico construcción liviana en seco, notas técnicas*. Colombia: No. 30.

FIBERGLASS, C. S. (1999). *CONCEPTOS BÁSICOS DE ACÚSTICA. EL SONIDO II PARTE* . Obtenido de F.G.C. Notas Técnicas : <http://www.fiberglasscolombia.com/imagenes/notas1/NTArq43.pdf>

Harris, C. (1995). *Manual de Medidas Acústicas y control de ruido*. España: Mc. GrawHill, Tercera Edición, Volumen I.

Miyara, F. (1999). *Control de ruido*. Rosario - Argentina: Universidad de Rosario .

Murray, S. (1983). *Ecuaciones diferenciales aplicadas*. México: 3era Edición; Prentice Hall.

OGATA, K. (1987). *Dinámica de Sistemas*. México: Ed. Prentice Hall.

SISTEMAS LINEALES DE SEGUNDO ORDEN (I). (s.f.). Obtenido de INTRODUCCION - DOMINIO TIEMPO: <http://www.galeon.com/mcoronado/MODELAMIENTO/04SORDTI.pdf>

SONIDO TEMA 1, A. (s.f.). *Sonido*. Obtenido de TEMA ACUSTICA: http://platea.pntic.mec.es/~lmarti2/SONIDO%20_STI_.pdf

Wikipedia. (26 de Marzo de 2013). *Reflexión (sonido)* - *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Obtenido de Reflexión (sonido):
http://es.wikipedia.org/wiki/Reflexi%C3%B3n_%28sonido%29

ANEXOS

Anexo 1. Fotos de cuarto de generadores

ANTES



DESPUÉS



ANTES



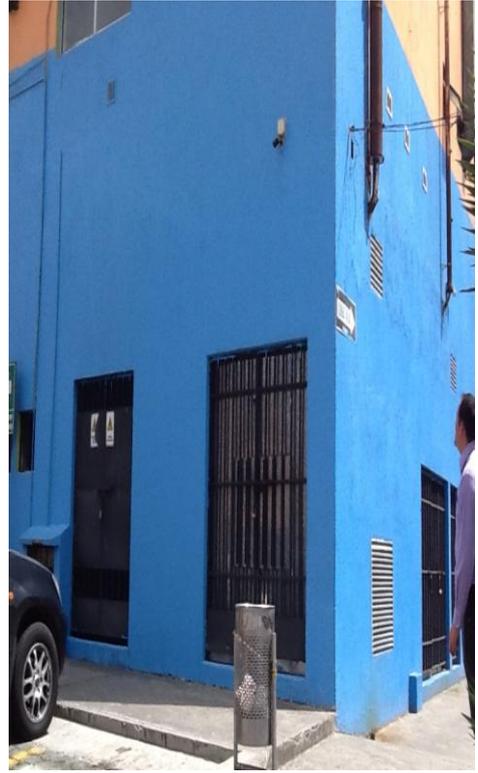
DESPUÉS



ANTES



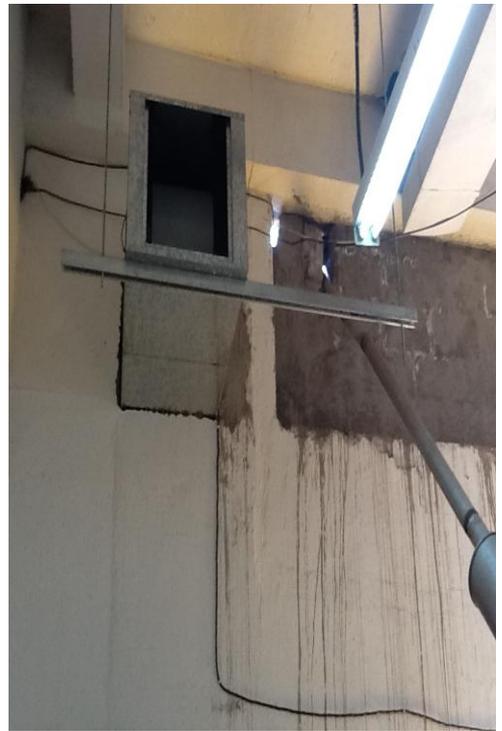
DESPUÉS



ANTES



DESPUÉS



ANTES



DESPUÉS



Anexo 2. Planos