

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE INSONORIZACIÓN PARA UNA SALA DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA COMPUESTA POR EQUIPOS
ELECTRÓGENOS EN UN PARQUE DE ENTRETENIMIENTO ACUÁTICO”**

Presentado por:

Julio César Ramos Estrada

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de:

INGENIERO MECÁNICO

Puerto La Cruz, Junio 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE INSONORIZACIÓN PARA UNA SALA DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA COMPUESTA POR EQUIPOS
ELECTRÓGENOS EN UN PARQUE DE ENTRETENIMIENTO ACUÁTICO”**

ASESORES

Prof. Orlando Ayala
Asesor Académico

Ing. José Antonio Clavier
Asesor Industrial

Puerto La Cruz, Junio 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE INSONORIZACIÓN PARA UNA SALA DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA COMPUESTA POR EQUIPOS
ELECTRÓGENOS EN UN PARQUE DE ENTRETENIMIENTO ACUÁTICO”**

JURADO

El Jurado hace constar que asignó a esta tesis la calificación de:

APROBADO

Prof. Orlando Ayala
Asesor Académico

Prof. Carlos Gomes
Jurado Principal

Prof. José Rengel
Jurado Principal

Puerto La Cruz, Junio 2010

RESOLUCIÓN

De acuerdo con el artículo 41 del Reglamento de Trabajos de Grado:

“Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados para otros fines, con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo al Consejo Universitario, para su autorización”

DEDICATORIA

La vida es una sola y siempre y estará llena de retos, para los cuales debemos estar dispuestos siempre a superarlos, por medio de las diversas formas y actitudes que nos planteemos para resolverlos y éste trabajo es una meta que he logrado con esfuerzo y dedicación, por lo cual me siento satisfecho, aca se los dedico con cariño:

A mi Dios inicialmente, por iluminar el camino que he recorrido desde que estoy en este mundo, por darme fortaleza para seguir adelante y acompañarme cada día de mi vida.

A mis padres Sheila de Ramos y Julio Ramos, que con mucho sacrificio han logrado salir adelante y son unos padres únicos y excepcionales, formándome como un hombre de bien, gracias a ustedes soy quien soy, les debo la vida los amo. Gracias por su amor, paciencia y apoyo incondicional en todas mis metas.

A mi primo César Alexander Estrada †, men aunque no estás físicamente siempre te llevo conmigo en mis pensamientos para donde y cuando vaya. Se que siempre me has cuidado desde tu partida... Te ha tocado el tren equivocado pero bueno asi es la vida... Este logro es tuyo también donde quiera que estés...

A mi primo-hermano Gilbert David, gracias por estar cada vez que te he necesitado mi pana, siempre he contado contigo incondicionalmente, también formas parte de esta meta cumplida.

A mis amigos de la Universidad Sergio Guerra, Ramón González, Oscar Salvatierra, Jhosberth Calderón, Jonnattan Rodríguez, que buenos y únicos momentos los que compartimos a lo largo del desarrollo de la carrera en el Departamento de Mecánica, son parte importante del logro de esta meta.

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso por darme la vida y salud necesaria para poder alcanzar los sueños y las metas que me he propuesto en esta vida.

A mis Padres Sheila de Ramos y Julio Ramos, por su ayuda en todos los aspectos durante todos los días de mi vida, gracias por traerme al mundo, criarme, darme todo lo que he necesitado y gracias por apoyarme en todo, simplemente son los mejores. Les estaré eternamente agradecido.

A VECOIN 2000 C.A., por haberme brindado la oportunidad de desarrollar pasantías dentro de sus instalaciones, con especial agradecimiento al personal Del Departamento de Ingeniería y Mantenimiento, al Sr. Ramón Clavier y al Asesor Industrial Ing. José Clavier.

Al Profesor Orlando Ayala quién fue el asesor de este proyecto, muchísimas gracias por su paciencia, sus consejos y su dedicación que me guiaron para poder culminar con éxito esta meta. De verdad Muchas gracias profesor.

A todos mis compañeros y amigos de carrera, en especial a: Sergio Guerra, Ramón González, Oscar Salvatierra, Jhosberth Calderón. Porque pasamos muchos

días estudiando y también compartiendo fuera de la Universidad, pero sin embargo siempre estuvieron ahí para apoyarme en todo lo concerniente a la carrera.

A Sheila Arriechi, a quien siempre le estaré agradecido porque desde antes de comenzar la Universidad y durante la misma, siempre me ha dado consejos, apoyado y ayudado en parte de mis metas de manera incondicional, gracias de verdad.

A Vivian Guevara, porque siempre ha estado allí incondicionalmente para darme apoyo y consejos, porque me ayudó bastante en el desarrollo de este proyecto desde sus inicios hasta el final. Formas parte importante de este logro. Muchísimas gracias.

A mis amistades fuera de la universidad, David Gallardo, José Miguel Sandoval, Francisco Sánchez, Manuel Estrada, José Lozada, Heiward Carico, quienes de una u otra manera siempre me han ayudado a cumplir mis metas.

A mi novia Marien Alejandra, por estar día a día apoyándome, soportándome, y tenerme tanta paciencia. Y por el cariño que me has dado. Gracias por todo.

A mis primas Lizmar Veitía y Lisset Veitía, quienes me ayudaron en gran manera desde el comienzo hasta el final de este proyecto y por supuesto me han acompañado en otras etapas de mi vida desde que vivo acá en Barcelona, las quiero muchote.

RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad la implementación de un sistema de insonorización en una subestación eléctrica, donde se encuentran dos grupos de equipos electrógenos, los cuales emiten altos niveles de ruido hacia el exterior y contaminan acústicamente las áreas adyacentes de ésta. Para dicha implementación fue necesario determinar las propiedades acústicas del ruido emitido por los equipos (P , L_p , W , L_w , I , L_i , entre otras), y las características del espacio físico donde se encontraban ubicados. Luego de establecer dichas cuantificaciones, se procedió a determinar la absorción sonora antes y después de tratar acústicamente, para así recomendar los materiales absorbentes a instalar en las superficies internas de la subestación. Seguidamente se determinó el nivel de reducción de ruido producto de dichos materiales instalados. Posteriormente fueron diseñados los silenciadores para las ventanas traseras y delantera de la subestación, utilizando materiales acústicos con características similares a los recomendados previamente, y de esta manera terminar de constituir el sistema de insonorización. Una vez conformado dicho sistema, se determinaron los niveles de ruido en las zonas adyacentes a la sala, obteniendo excelentes resultados, logrando disminuir estos niveles de 110 dB hasta 61,93 dB en la salida del silenciador delantero, donde se encontraba el área más crítica, permitiendo de ésta manera cumplir con lo establecido en la norma COVENIN 1565-95.

ÍNDICE GENERAL

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN.....	ix
ÍNDICE GENERAL	x
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 RESEÑA DE LA EMPRESA	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3 OBJETIVOS	6
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos	6
CAPÍTULO II	8
MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 ANTECEDENTES.....	8
2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	9
2.2.1 Sonido	9
2.2.2 Ondas Sonoras	10
2.2.3 Tipos de Ondas Sonoras	10
2.2.3.1 Ondas Planas	10

2.2.3.2	Ondas Esféricas	11
2.2.4	Decibel	12
2.2.5	Decibel Ponderado (dBA).....	13
2.2.6	Velocidad del Sonido.....	15
2.2.7	Nivel de Presión Sonora	17
2.2.8	Potencia Sonora	18
2.2.9	Nivel de Potencia Sonora.....	19
2.2.10	Intensidad Acústica.....	23
2.2.11	Nivel de Intensidad Acústica	24
2.2.12	Difracción del Sonido	26
2.2.13	Reflexión del Sonido	26
2.2.14	Superposición del Sonido	27
2.2.15	Reverberación	28
2.2.16	Tiempo de Reverberación.....	28
2.2.17	El Ruido	30
2.2.18	Tipos de Ruido.....	30
2.2.18.1	Ruido Continuo	31
2.2.18.2	Ruido Transitorio.....	31
2.2.18.3	Ruido Objetivo	32
2.2.18.4	Ruido Subjetivo	32
2.2.19	Procedimientos de Medición de Ruido.....	32
2.2.20	Instrumentos de Medición Acústica	33
2.2.21	Control de Ruido.....	33

2.2.22	Materiales Acústicos.....	34
2.2.23	Coefficiente de Absorción del Sonido (α).....	35
2.2.24	Coefficiente de Reducción de Ruido	35
2.2.25	Absorción Sonora de un Local.....	40
2.2.26	Nivel de Reducción de Ruido	41
2.2.27	Silenciadores Acústicos	41
2.2.28	Tipos de Silenciadores Acústicos	42
2.2.28.1	Silenciadores Resistivos	42
2.2.28.2	Silenciadores Reactivos.....	43
2.2.29	Grupos Electrógenos.....	44
2.2.30	Clasificación de los Grupos Electrógenos	45
2.2.31	Insonorización.....	46
CAPÍTULO III.....		48
DESARROLLO DEL PROYECTO		48
3.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	48
3.2	ANÁLISIS DEL ÁREA.....	49
3.3	MEDICIÓN DE LOS ÍNDICES DE RUIDO EN LA SALA SIN INSONORIZACIÓN.....	50
3.3.1	Calibración del Sonómetro	50
3.3.2	Selección de los Puntos de Medición de los Niveles de Presión Sonora..	51
3.3.3	Procedimiento de Medición de Niveles de Presión Sonora.....	52
3.3.4	Evaluación de los Niveles de Presión Sonora Obtenidos Durante las Mediciones	52

3.4	DEDUCCIÓN DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL RUIDO GENERADO EN EL RECINTO EN ESTUDIO	54
3.4.1	Identificación de las Paredes de la Subestación.....	54
3.4.2	Determinación de las Áreas Internas de la Subestación	55
3.4.3	Determinación del Volumen Real de la Subestación.....	55
3.4.4	Cálculo de la Absorción Sonora de la Subestación antes y después de ser Tratada Acústicamente.....	56
3.4.5	Determinación del Tiempo de Reverberación de la Subestación antes y después del Tratamiento Acústico	56
3.4.6	Cálculo del Nivel de Reducción de Ruido en la Subestación sin Instalar los Atenuadores de Ruido en la Entrada y Salida de Aire (en las ventanas)	57
3.4.7	Deducción de la Presión Sonora Efectiva del Ruido dentro de la Sala de Generación Eléctrica	57
3.4.8	Obtención del Nivel de Potencia Sonora de los Grupos Electrónicos Instalados en la Subestación.....	58
3.4.9	Cálculo de la Velocidad del Sonido en el Área de los Grupos Electrónicos	58
3.4.10	Obtención de la Magnitud de la Intensidad Sonora Dentro la Subestación	59
3.5	SELECCIÓN DEFINITIVA DE LOS MATERIALES ACÚSTICOS PARA LA PROPUESTA DE INSTALACIÓN EN LAS SUPERFICIES INTERNAS DE LA SUBESTACIÓN.....	59
3.5.1	Designación de los Materiales Acústicos	60
3.5.2	Propuesta de Instalación de los Materiales Acústicos Seleccionados	61

3.6	DISEÑO DE LOS ATENUADORES DE RUIDO PARA LAS ABERTURAS DE VENTILACIÓN	62
3.6.1	Determinación del Área de las Cavidades para los Silenciadores de Entrada y Salida de Aire de la Caseta	62
3.6.2	División del Área Perpendicular al Paso de Aire de los Silenciadores en Secciones de Igual Medida.....	63
3.6.3	Determinación de la Absorción Sonora por Sección de los Silenciadores	65
3.6.4	Cálculo del Nivel de Reducción de Ruido por Sección de los Silenciadores	68
3.6.5	Deducción del Nivel de Reducción de Ruido Total de los Silenciadores	68
3.7	DETERMINACIÓN DEL DESCENSO CUANTITATIVO TEÓRICO-PRÁCTICO DEL NIVEL DE PRESIÓN SONORA DENTRO Y FUERA DE LA SUBESTACIÓN	69
3.7.1	Obtención del Descenso del Nivel de Potencia Sonora a las Afueras de la Subestación.....	69
3.7.2	Cálculo para Obtener del Nivel de Presión Sonora a la Salida de los Silenciadores de la Subestación	70
3.8	VERIFICACIÓN DE QUE LOS NIVELES DE RUIDO CUMPLAN CON LAS NORMATIVAS ESTABLECIDAS	72
	CAPÍTULO IV	73
	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	73
4.1	RESULTADOS OBTENIDOS LUEGO DE ANALIZAR EL ÁREA FÍSICA DE LA SUBESTACIÓN.....	73

4.1.1	Características Físicas Internas de la Subestación.....	73
4.1.2	Características Físicas Exteriores de la Subestación	78
4.2	ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES DE LOS NIVELES DE PRESIÓN SONORA TOMADAS EN LA SUBESTACIÓN Y SUS ALREDEDORES	79
4.3	ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS DE LA SUBESTACIÓN....	82
4.3.1	Características Superficiales Internas de la Caseta.....	82
4.3.2	Cálculo del Volumen Real Interno del Recinto Estudiado.....	85
4.4	DETERMINACIÓN DE VALORES ACÚSTICOS RELEVANTES EN LA SUBESTACIÓN	85
4.4.1	Características Generales del Ruido Procedente de los Grupos Electrógenos sin Protección Sonora.....	85
4.4.2	Absorción Sonora de la Subestación sin Tratamiento Acústico	87
4.4.3	Absorción Sonora de la Sala de Generación con Tratamiento Acústico ..	88
4.4.4	Deducción del Nivel de Reducción de Ruido en el Interior de la Subestación	91
4.5	RESULTADOS OBTENIDOS CON LA INSTALACIÓN DE LOS SILENCIADORES EN LA SALA DE GENERACIÓN	92
4.5.1	Rendimiento Acústico de los Silenciadores Traseros.....	92
4.5.2	Rendimiento Acústico del Silenciador Delantero.....	104
4.6	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA TOTAL DEL SISTEMA DE INSONORIZACIÓN PROPUESTO EN EL PROYECTO	113
4.6.1	Eficiencia del Recubrimiento Instalado en las Superficies Internas de la Subestación	113
4.6.2	Eficiencia con los Silenciadores Posteriores Instalados en la Caseta.....	114

4.6.3	Eficiencia con el Silenciador Delantero Instalado en la Subestación.....	115
4.7	ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO GLOBAL DEL SISTEMA DE INSONORIZACIÓN PROPUESTO.....	117
	CAPÍTULO V	121
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	121
5.1	CONCLUSIONES	121
5.2	RECOMENDACIONES.....	123
	BIBLIOGRAFÍA	125
	METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO.....	128

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El ruido es el contaminante ambiental más extendido de la actualidad. Los procesos o actividades industriales se reconocen como importantes focos generadores de este agresor físico.

En la mayoría de los ambientes de plantas se emiten ruidos excesivos que comprometen directamente la salud y la seguridad del personal que labora o circula cerca de los mismos. En ocasiones, también, se afecta la comunidad aledaña y la biodiversidad del entorno, por tales razones se impone la toma de medidas que mitiguen esta situación.

Entre las medidas que se pueden tomar en cuenta para reducir los niveles de ruido generados por fuentes sonoras, se pueden mencionar las siguientes: atacar directamente la fuente emisora de ruido, interferir el medio de propagación del ruido o sencillamente proteger de manera directa a las personas perjudicadas por el ruido existente en un área determinada.

1.1 RESEÑA DE LA EMPRESA

VECOIN 2000 C.A., es una empresa 100% Venezolana fundada en el año 2000, especializada en la prestación de servicios de ingeniería para el desarrollo de proyectos relacionados con las áreas de:

- ✓ Elaboración de proyectos de instalaciones eléctricas y mecánicas.
- ✓ Instalación de generadores eléctricos (independientes y sincronizados).
- ✓ Construcción de obras eléctricas y mecánicas.
- ✓ Automatización y control de sistemas electromecánicos
- ✓ Mantenimiento y servicios de equipos electromecánicos.

ofreciendo soluciones de alta confiabilidad y calidad al cliente, esta empresa se encuentra ubicada en Lechería sector las Garzas, Estado Anzoátegui, específicamente en la Avenida Jorge Rodríguez (antigua avenida Intercomunal), C.C. Gaspar, a continuación se puede apreciar la ubicación de la empresa mediante la Fig. 1.1.



Figura 1.1. Ubicación de la Empresa VECOIN 2000 C.A, en la Avenida Jorge Rodríguez al lado de los depositos de Empresas Polar ^[Google Earth].

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente VECOIN 2000 C.A., está encargada de la construcción e implementación del sistema eléctrico de potencia y el de generación eléctrica del parque de diversiones acuáticas Kariña, ubicado en las afueras de la ciudad de Barcelona (en la autopista Piritu–Barcelona sector los Potocos), Estado Anzoátegui, el cual funciona como sitio de recreación distracción y esparcimiento para el público en general del país y se muestra en la Fig. 1.2.

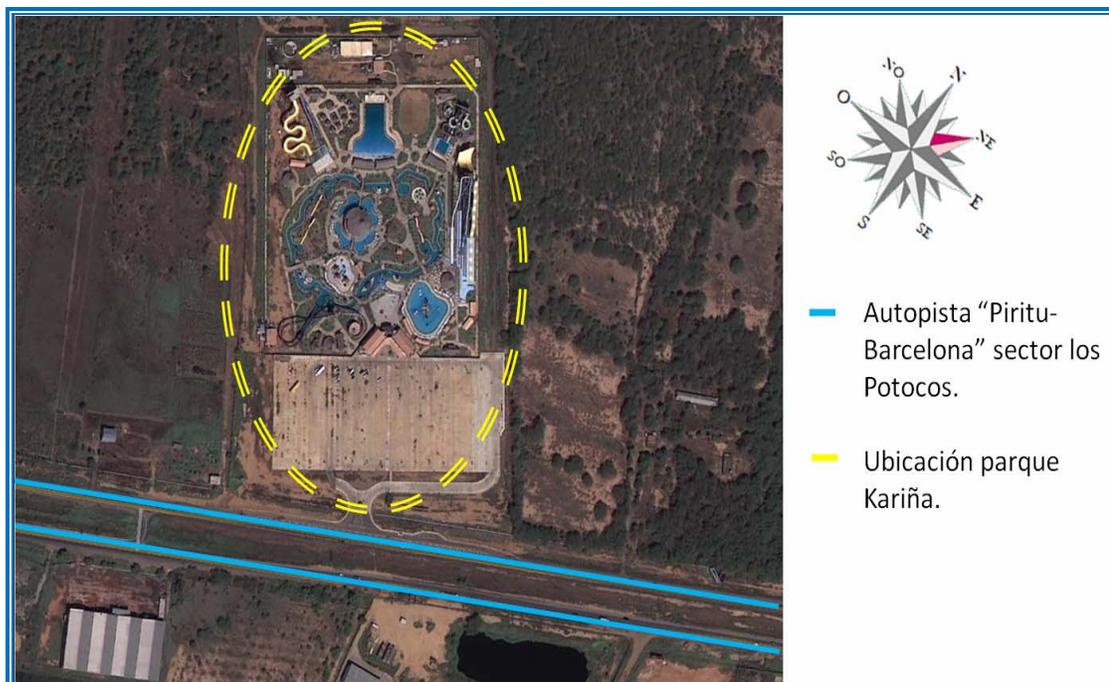


Figura 1.2. Ubicación parque Kariña en la autopista “Piritu-Barcelona” sector los Potocos ^[Google Earth].

A continuación en la Fig. 1.3 se muestra el sitio de ubicación de la sala de generación eléctrica (dentro del círculo punteado amarillo) en las instalaciones del parque de esparcimiento acuático, donde se logra apreciar que ésta se encuentra cerca de las aéreas destinadas para el esparcimiento del público en general.

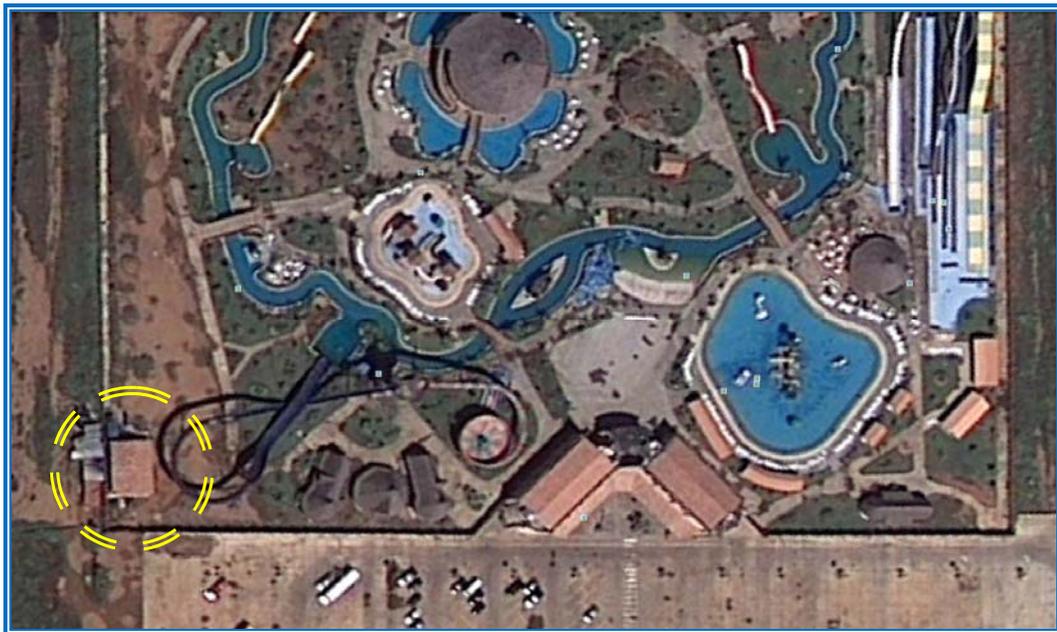


Figura 1.3. Ubicación de la subestación Eléctrica en las instalaciones del parque Kariña ^[Google Earth].

Los equipos electrógenos que están instalados, están diseñados para generar energía eléctrica, en régimen continuo durante ocho (8) horas diarias, es decir, durante la jornada laboral de trabajo del parque. Los requerimientos de energía eléctrica del parque durante la noche, serán suministrados mediante el sistema eléctrico público.

Hay que destacar que los niveles de ruido que producen estos equipos durante su funcionamiento (normalmente sobre los 110 dB cuando no hay ningún tipo de aislamiento acústico), sobrepasan los límites del umbral de audición recomendado para las personas que se encontrarán en las instalaciones del parque (están sobre los 110 dB), por tal motivo, surge la necesidad de proponer el diseño de un sistema para la insonorización del recinto donde están instalados los grupos electrógenos.

El diseño del sistema de insonorización para el recinto en estudio, se basa en la medición de los índices acústicos con un equipo especializado para tal fin (sonómetro), los cuales posibilitan el cálculo de los parámetros característicos del sonido (ruido en este caso particular) entre los cuales están el nivel sonoro, la potencia sonora, tiempo de reverberación, entre otros. Posteriormente se elegirán los posibles materiales acústicos atenuantes del nivel sonoro, a ser implementados en el recubrimiento de las paredes internas, techo y el piso del recinto, contribuyendo así a la disminución del ruido producto del funcionamiento de los grupos electrógenos, tanto dentro como fuera de la sala de generación, hasta el límite tolerable por el oído humano (no debe exceder los 85 dB en un periodo de 8 horas continuas).

Dicho sistema de insonorización también está conformado por los silenciadores acústicos que se instalarán tanto en las ventanas de entrada y como en la de salida de aire de la subestación eléctrica permitiendo la circulación del viento desde afuera hacia adentro y viceversa, de manera tal que recicle el aire en el recinto y al mismo tiempo disminuyan los índices de ruido producto de dichas aberturas de ventilación (son obligatorias debido a que los grupos electrógenos deben tener espacio suficiente de aspiración y expulsión de aire para el correcto funcionamiento de los mismos).

Es importante resaltar que la realización de esta propuesta de diseño de insonorización, tomará en cuenta los límites auditivos establecidos en el marco legal, buscando cumplir con las normas vigentes en Venezuela (Gaceta Oficial N° 4.418 y COVENIN 1565-95), relacionadas con la disminución de los altos niveles de ruido producidos por los generadores eléctricos sometidos a estudio.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de insonorización en una sala de generación eléctrica constituida por equipos electrógenos que producen altos niveles de ruido en un parque de entretenimiento acuático.

1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Analizar el área interna y externa de la sala de generación eléctrica donde están instalados los equipos electrógenos.

- ✓ Medir los índices de ruido producidos por los grupos electrógenos con el equipo especializado (sonómetro) dentro y fuera de la sala de generación eléctrica.

- ✓ Calcular los parámetros característicos del ruido en el recinto estudiado, relacionados con la insonorización de las paredes, piso y techo del mismo.
- ✓ Seleccionar los materiales a utilizar para la atenuación del ruido en función a su coeficiente de absorción del sonido y demás propiedades.
- ✓ Diseñar los paneles atenuadores de ruido a ser utilizados en las ventanas de entrada y salida del flujo de aire de ventilación de la caseta.
- ✓ Determinar el grado de disminución de ruido en función a los niveles sonoros generados por los equipos y la capacidad de absorción acústica que poseen los materiales seleccionados.
- ✓ Comprobar si los niveles de ruido obtenidos en el diseño propuesto cumplen con las normativas establecidas en la gaceta oficial N° 4.418, aprobada en abril de 1992.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

A continuación, se presenta un resumen de los trabajos de investigación desarrollados en la Universidad de Oriente, relacionados con el tema de este proyecto, los cuales sirvieron de apoyo por su contenido para el desarrollo del trabajo de grado:

- ✓ Rojas, R. ^[1], realizó un estudio para determinar los niveles de ruido existentes, la frecuencia y cómo estos pueden afectar la salud de los trabajadores en las unidades de procesos y plantas de la Refinería Puerto La Cruz. Se fundamentó en la medición de los diversos parámetros del ruido tales como el nivel equivalente continuo (Leq), niveles por banda de octavas entre otros, guiándose por las normativas vigentes (COVENIN 1565-95), y la elaboración de mapas acústicos para un análisis posterior de los niveles de ruido existentes. Determinó que el uso de la protección auditiva suministrada a los trabajadores del área, puede disminuir el riesgo de lesiones.
- ✓ Pereira, A. ^[2], estableció en un estudio cuantitativo y cualitativo, de los riesgos físicos ocupacionales (ruido, vibraciones e iluminación deficiente), en las instalaciones de una planta de extracción de gas. Este estudio contiene la identificación, determinación de causas, medición y evaluación de riesgos, las

cuales permitieron proponer medidas generales para su respectivo control, estipulada en las leyes competentes y así notificar los riesgos existentes en la planta, al personal responsable en el entorno de seguridad y bienestar laboral de los trabajadores de la misma.

- ✓ Hernández, P. ^[3], se concentró en realizar un estudio de la reducción de ruido, implementando el uso de barreras para controlar la transmisión del ruido que sale de la fuente hasta el receptor, dichas barreras absorben energía acústica produciéndose una atenuación del ruido debido a la estructura porosa de los filtros acústicos que la conforman.

- ✓ Verseci E. ^[4], hizo una evaluación del nivel de presión sonora producida en las dos unidades de turbogas existentes en la sala de máquinas de la planta generadora de electricidad CADAFE, ubicada en Guanta, utilizando un equipo adecuado de alta precisión. Dicha evaluación permitió determinar que los niveles de presión sonora producidos por las unidades de turbogas sonrepasaban los 115 dB en el entorno de la sala de maquinas.

2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.2.1 Sonido

El sonido es una perturbación que se propaga en forma de onda, a través de un medio elástico, produciendo variaciones de presión o vibraciones de partículas que pueden ser percibidas bien por el oído humano, o bien por instrumentos

específicos para tal fin; este movimiento de las partículas es un movimiento armónico simple, asociado a una gráfica sinusoidal ^[5].

2.2.2 Ondas Sonoras

Las ondas sonoras en el aire son causadas por las variaciones de presión por encima y por debajo del valor estático de la presión atmosférica (la presión atmosférica tiene un valor aproximadamente de 10^5 Pa). Estas variaciones de presión se originan de muchas maneras, por ejemplo ^[6]:

- ✓ Por una corriente de aire pulsante, como la que producen las aspas del ventilador al girar.
- ✓ Por torbellinos que se producen cuando una corriente de aire choca con una obstrucción, como ocurre en una salida de aire de un sistema de ventilación.
- ✓ Por el vuelo supersónico de un avión, que crea ondas de choque.
- ✓ Por la vibración de una superficie, creada por una rotura de la misma.

2.2.3 Tipos de Ondas Sonoras

2.2.3.1 Ondas Planas

Son aquellas ondas sonoras que tienen la misma dirección de propagación en todos los puntos, debido a que los puntos de compresión máxima forman superficies planas perpendiculares a la dirección de propagación, un ejemplo de éstas ondas se puede apreciar mediante la Fig. 2.1 ^[6].

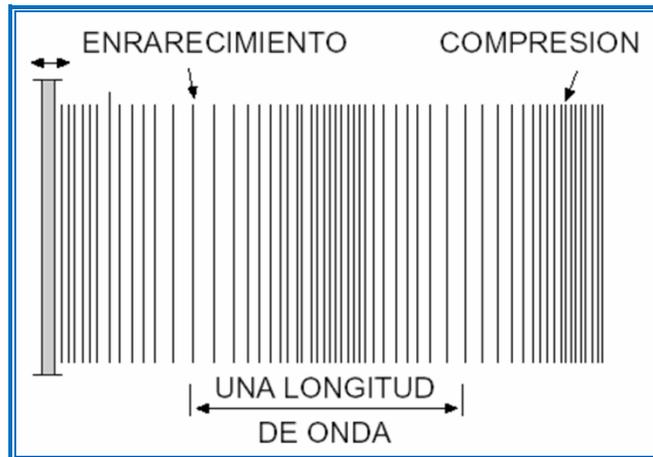


Figura 2.1 Comportamiento de ondas planas ^[6].

2.2.3.2 Ondas Esféricas

Son las ondas emitidas por fuentes sonoras donde sus puntos de máxima compresión forman esferas concéntricas, la Fig. 2.2 muestra el comportamiento general de las ondas esféricas, propagándose en el aire ^[6].

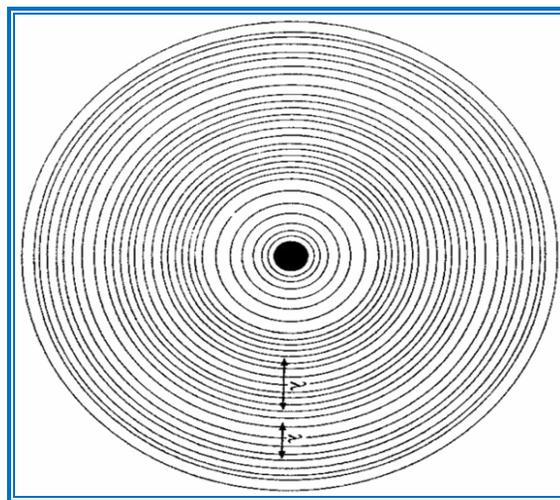


Figura 2.2 Comportamiento de las ondas esféricas ^[6].

2.2.4 Decibel

El decibel representa una medida relativa entre dos cantidades proporcionales. Cada cantidad medida en decibeles es expresada en una proporción relativa a una referencia ya sea de potencia, presión, intensidad o cualquier cantidad que se esté considerando en el momento de la medida.

Por esta razón cualquier persona usa el decibel al usar la palabra nivel, nivel de potencia sonora, nivel de presión sonora, etc., para recordar que se está refiriendo a una cantidad de referencia y que su medida es relativa y no absoluta.

Como se muestra en las Ecs. 2.1 y 2.2 un decibel es la proporción “r” dada por:

$$\log_{10} r = 0,1 \quad (2.1)$$

ó

$$10\log_{10} r = 1\text{dB} \quad (2.2)$$

donde “r”: es la proporción entre la magnitud que se estudia y la magnitud de referencia ^[7].

2.2.5 Decibel Ponderado (dBA)

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^[7].

A continuación se muestra la tabla 2.1, 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.

Tabla 2.1. Valores que adiciona el filtro de ponderación A, a cada banda de frecuencia de un sonido determinado ^[6].

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
315	-6,6	16000	-6,6
400	-4,8	20000	-9,3

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)^[6].

2.2.6 Velocidad del Sonido

Es la velocidad de propagación de las ondas sonoras, un tipo de ondas mecánicas longitudinales producido por variaciones de presión del medio. Estas variaciones de presión (captadas por el oído humano) producen en el cerebro la percepción del sonido. El sonido no se transporta por el vacío porque no hay átomos a través de las cuales transmitirse. La velocidad del sonido se obtiene mediante la Ec. 2.3:

$$C = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (2.3)$$

donde:

C = Velocidad del Sonido

γ = Coeficiente de dilatación adiabática = $C_p / C_v = 1,4$ para el aire,

R = Constante de los gases = $8,31 \text{ (J/mol}\cdot\text{°K)}$,

M = Masa de 1 mol en kg/mol = $0,0288 \text{ kg/mol}$ para el aire,

T = Temperatura absoluta (°K).

Para temperaturas cercanas a la temperatura ambiente, esta expresión puede aproximarse (para el aire), por la Ec. 2.4:

$$C = 331,3 + 0,606T \quad (2.4)$$

donde:

C = Velocidad del sonido (m/s).

T = Temperatura (°C).

En la figura 2.3 se observa el comportamiento de la velocidad del sonido en el aire^[8].

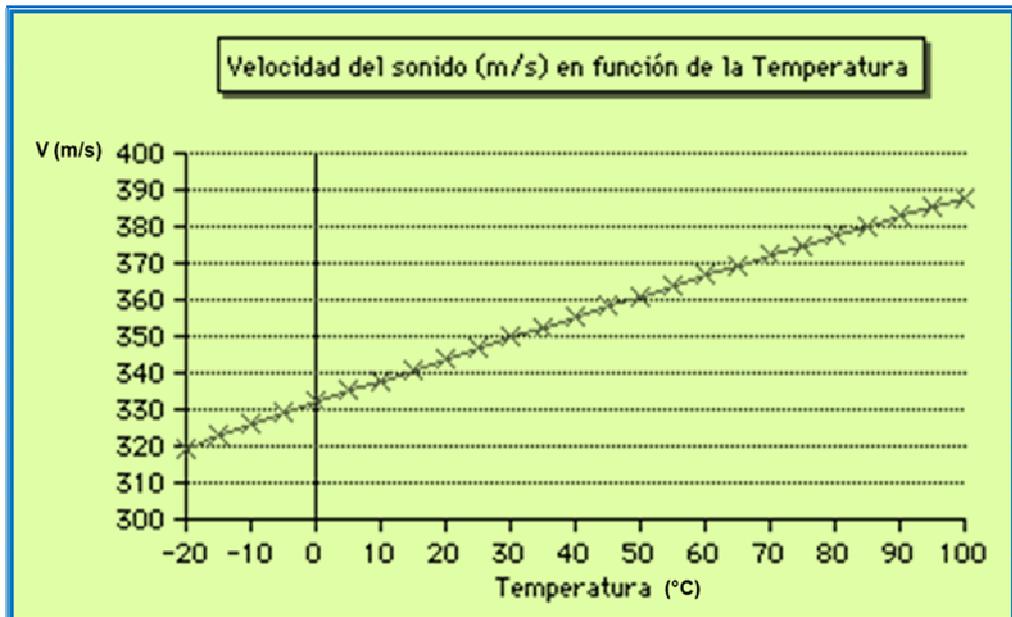


Figura 2.3. Comportamiento de la velocidad del sonido en el aire^[8].

2.2.7 Nivel de Presión Sonora

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

$$\text{NPS} = 20 \log \frac{P}{20} \quad (2.5)$$

donde:

NPS: Nivel de Presión Sonora (dB).

P: Presión Sonora (μPa).

Por ejemplo, la presión sonora de un sonido de $20\mu\text{Pa}$ (20 micropascales) corresponde a un nivel de presión sonora de 0 dB, una presión sonora de $40\mu\text{Pa}$ (40 micropascales) corresponde a un nivel de presión sonora de 6dB y una presión sonora de $200\mu\text{Pa}$ (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 $20\mu\text{Pa}$. La ecuación relacionada anteriormente se muestra gráficamente en la Fig. 2.4.

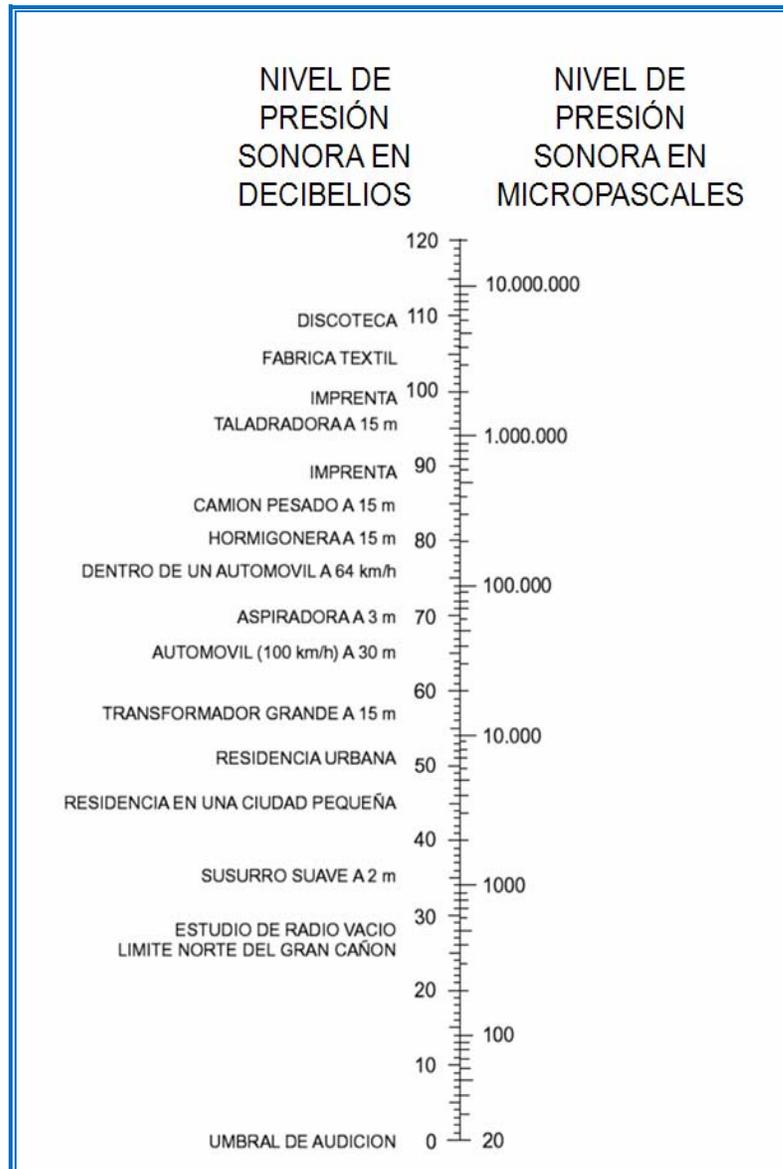


Figura 2.4. Relación entre el nivel de presión sonora en micropascales y el nivel de presión sonora en decibelios (referidos a $20\mu\text{Pa}$)^[6].

2.2.8 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 Ec. ^[4]:

$$W = I_{\text{PROM}} (4\pi r^2) \quad (2.6)$$

donde:

$W =$ Potencia Sonora (Watts).

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

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

2.2.9 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 expresión ^[6]:

$$L_W = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (2.7)$$

donde:

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 siguiente Ec. ^[6]:

$$L_W = L_p + 10(\log A) - 6 \quad (2.8)$$

donde:

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 siguiente expresión ^[6]:

$$L_W = L_p + 20(\log R) + 10,9 - C \quad (2.9)$$

donde:

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 C 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 (10^5 Pa ó 1000 mbar) respectivamente. Dicha ecuación no considera amortiguamiento por aire y vapor de agua en el medio de transmisión.

En la Fig. 2.5 se muestra la gráfica para la obtención del término de corrección C.

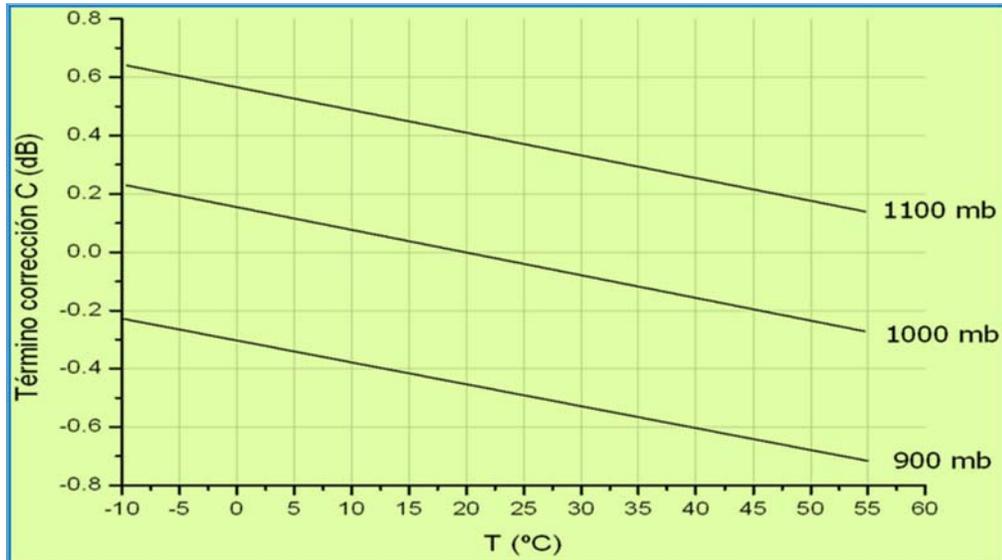


Figura 2.5. Término de corrección C en función de la temperatura, para 3 valores de presión atmosférica: 900 mbar, 1000 mbar y 1100 mbar (1000mbar = 1 atmósfera) ^[6].

La Tabla 2.2, presenta una diversidad de fuentes de sonido con su respectivo nivel de potencia en decibeles (tomando como referencia 1picovatio) y en vatios (W).

Tabla 2.2. Nivel de potencia sonora (referido a 1pW) medido de varias fuentes acústicas ^[6].

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	

2.2.10 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 una onda por unidad de superficie. Para una onda plana se representa con la Ec. 2.10 [8].

$$I = \frac{P^2}{\rho C} \quad (2.10)$$

donde:

I = Intensidad Acústica (W/m^2).

P = Presión Sonora Efectiva (Pa).

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

ρ = Densidad del aire (Kg/m^3).

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

$$I = \frac{P^2}{4\rho C} \quad (2.11)$$

donde:

I = Intensidad Acústica (W/m^2).

P = Presión Sonora (Pa).

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

ρ = Densidad del aire (Kg/m^3).

2.2.11 Nivel de Intensidad Acústica

Se define, al nivel de intensidad sonora de las ondas acústicas mediante la Ec. ^[8]:

$$NIS = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (2.12)$$

donde:

NIS: Nivel de Intensidad Sonora (dB).

I: Intensidad Sonora (W/m^2).

I_0 : Intensidad Sonora de Referencia ($10^{-12} W/m^2$).

A continuación se muestra en la tabla 2.3, los valores de diversos niveles de intensidad:

Tabla 2.3. Valores de niveles de intensidad sonora de fuentes comunes de sonido ^[8].

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

2.2.12 Difracción del Sonido

Es el cambio en la dirección de la propagación de las ondas sonoras cuando chocan con un obstáculo. Un ejemplo familiar de difracción es el cambio de dirección de las ondas sonoras sobre un muro, alrededor de la esquina de un edificio, después de chocar contra un muro que contenga una abertura y la dispersión de las ondas sonoras en una columna situada en una habitación ^[6].

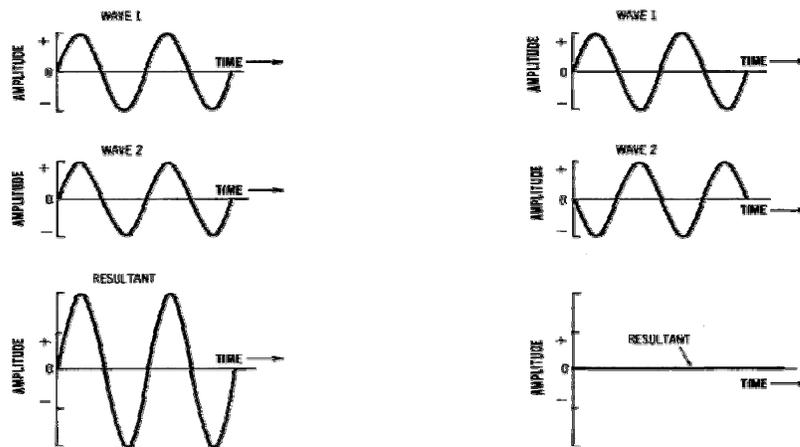
2.2.13 Reflexión del Sonido

La geometría acústica asume que se puede representar la salida de las ondas esféricas desde un origen de sonido como “rayos” viajando perpendiculares al avance frontal de la onda.

En las ondas monodimensionales como las producidas por la compresión de un muelle, la reflexión lleva consigo una inversión del sentido del movimiento ondulatorio. En las ondas bi o tridimensionales la inversión total se produce únicamente cuando la incidencia es normal, es decir, cuando la dirección, en la que avanza la perturbación es perpendicular a la superficie reflectante. Si la incidencia es oblicua se produce una especie de rebote, de modo que el movimiento ondulatorio reflejado cambia de dirección, pero conservando el valor del ángulo que forma con la superficie límite ^[7].

2.2.14 Superposición del Sonido

El principio de superposición dice que alguna porción de un medio puede transmitir simultáneamente cualquier número de ondas diferentes con efectos mutuos no adversos, lo cual es frecuentemente llamado interferencia, una inadecuada elección de palabras. Si distintas ondas de sonido viajan simultáneamente a través de una región dada del medio de aire, las partículas de aire en la región responderán a la suma vectorial de cada sistema de ondas. En la Fig.2.6, se presentan dos casos: (A) se dice que dos ondas alcanzan un punto dado en fase cuando ambas producen en él oscilaciones sincrónicas o acompañadas. En tal caso la oscilación resultante tendrá una amplitud igual a la suma de las amplitudes de las ondas individuales, y la interferencia se denomina constructiva porque en la onda resultante se refuerzan los efectos individuales. (B) si por el contrario las oscilaciones producidas por cada onda en el punto considerado están contrapuestas, las ondas llegan en oposición de fase y la oscilación ocasionada por una onda será neutralizada debida a la otra. En esta situación la interferencia se denomina destructiva [9].



A) Ondas 1 y 2 de igual amplitud y en fase sumando el doble de la amplitud dada

B) Ondas 1 y 2 de igual amplitud pero 180° de desfase, produciendo una resultante de cero

Figura 2.6. Los extremos de la superposición de ondas sonoras ^[9].

2.2.15 Reverberación

Se define reverberación como la persistencia del sonido en un espacio total o parcialmente cerrado, después de que la fuente de sonido ha cesado, esta persistencia es el resultado de reflejo repetido y/o la dispersión ^[6].

2.2.16 Tiempo de Reverberación

El sonido producido por una fuente sonora puntual emitido al aire libre se atenúa en 6 dB al propagarse el doble de la distancia. Por ejemplo, dos personas que hablan en un espacio abierto perciben su conversación sólo durante los pocos instantes que dura la emisión de cada palabra. Esto no ocurre en un recinto donde el sonido puede tardar mucho más en extinguirse debido a las reflexiones de las paredes sobre todo si el recinto tiene poca absorción acústica. Esto puede provocar la pérdida de nitidez de la conversación o en general del sonido emitido. El parámetro utilizado para prever y caracterizar las respuestas de distintos locales a este fenómeno es el tiempo de reverberación T_r definido como el tiempo necesario para que un impulso sonoro interrumpido bruscamente se atenúe en 60 dB.

El tiempo de reverberación varía con la frecuencia siendo más elevado a frecuencias bajas que a las medias y a las altas.

El cálculo de T_R se realiza utilizando la expresión general de Sabine representada en la Ec. 2.13 ^[5]:

$$T_R = 0,161 \left(\frac{V}{A+4mV} \right) \quad (2.13)$$

donde:

T_R : Tiempo de reverberación (s).

V : Volumen del recinto (m^3).

A : Absorción acústica del recinto (sabinos métricos).

$4mV$: Absorción acústica del aire del recinto (Sólo se utiliza para locales grandes, donde el volumen sea mayor a $1000m^3$).

Los coeficientes $4mV$ dependen de la temperatura y de la humedad relativa del recinto ^[5].

El término de absorción sonora utilizada en la ecuación anterior, será definido más adelante en el desarrollo del proyecto.

Para pequeños locales la fórmula precedente se puede aproximar con la Ec.2.14:

$$T_R = 0,161 \left(\frac{V}{A} \right) ; \quad V < 1000\text{m}^3 \quad (2.14)$$

2.2.17 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 ^[10].

2.2.18 Tipos de Ruido

2.2.18.1 Ruido Continuo

Cuando se manifiesta ininterrumpidamente durante más de diez minutos.

Dentro de éste 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 ± 3 dB.
- ✓ **Ruido continuo variable:** si la variación oscila entre ± 3 y ± 6 dB.
- ✓ **Ruido continuo fluctuante:** si la variación entre límites difiere ± 6 dB.

2.2.18.2 Ruido Transitorio

Es aquel que se manifiesta ininterrumpidamente durante un período de tiempo igual o menor a cinco minutos. También, 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 es posible determinar; ruido transitorio aleatorio, cuando se produce de 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; y ruido de fondo, que constituye un matiz del ruido ambiental y se caracteriza por la ausencia de un foco 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.

2.2.18.3 Ruido Objetivo

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

2.2.18.4 Ruido Subjetivo

Cuando las condiciones objetivas de la fuente quedan supeditadas a la voluntad del manipulador de la fuente ^[11].

2.2.19 Procedimientos de Medición de Ruido

Cuando se realizan las medidas acústicas, hay que seguir los siguientes pasos básicos ^[6]:

- ✓ Determinar qué cantidades (índices) hay que medir.
- ✓ Seleccionar los instrumentos incluido el tipo de micrófono que se va a utilizar. A menudo 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.

2.2.20 Instrumentos de Medición Acústica

Hay disponibles muchos tipos de aparatos distintos para medir los niveles sonoros. Entre ellos, el más utilizado es el sonómetro, que es un aparato para la medida del nivel de presión sonora ponderado en frecuencia y en tiempo. La mayoría de éstos son de tamaño pequeño, poco peso y funcionan con pilas. Es esencial un estudio detallado del manual del fabricante para el uso de cada aparato.

Los componentes principales de un sonómetro son: el micrófono, el preamplificador, el amplificador, el promediador de tiempo (Rectificador) y el indicador ^[6].

2.2.21 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 el diagrama ilustrado en la Fig. 2.7, que contiene tres partes principales: La fuente, la vía y el receptor ^[12].

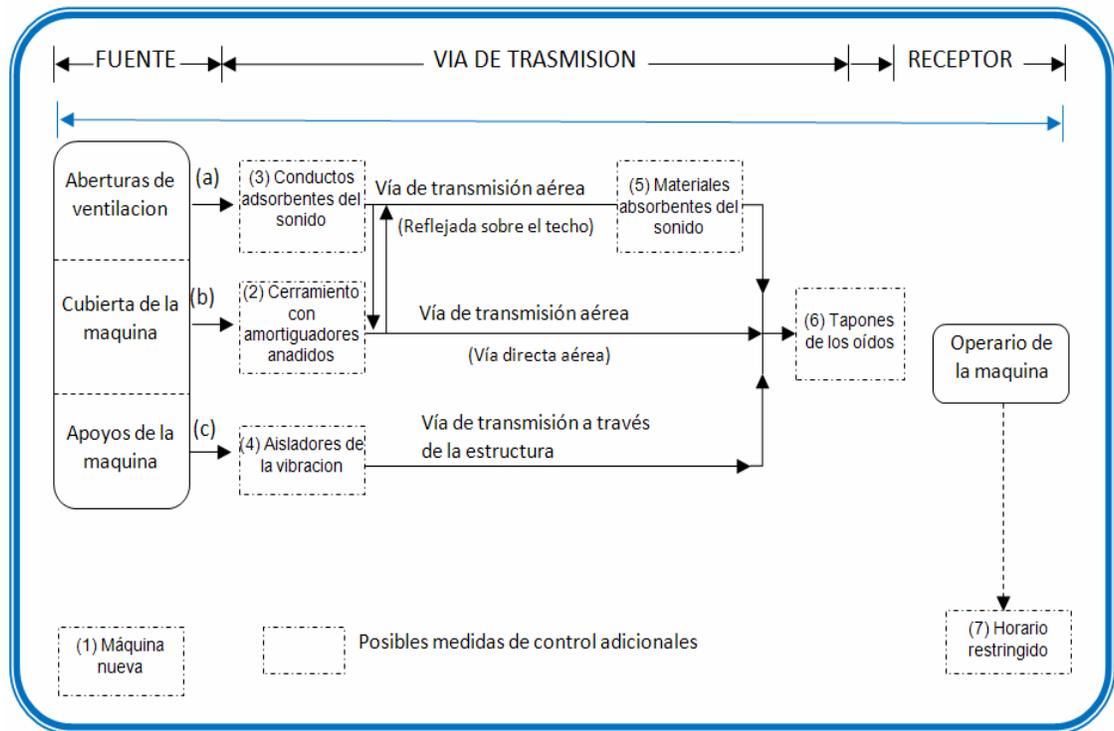


Figura 2.7. Diagrama de bloques del Sistema de Control de Ruido ^[12].

2.2.22 Materiales Acústicos

En términos generales, 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 ^[8]:

- 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.

2.2.23 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)^[6].

2.2.24 Coeficiente de Reducción de Ruido

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; y se determina por la Ec. siguiente:

(2.15)

donde:

NRC : Coeficiente de Reduccion 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 presentan las tablas 2.4 y 2.5, con los coeficientes de absorción del sonido y sus respectivos coeficientes de reducción de ruido ^[6].

Tabla 2.4. Coeficientes de absorción del sonido de materiales de construcción ^[6].

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/m² (40 oz/yd²)	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73	0,5525
Sobre pelusa o espuma de caucho de 1350 g/m² (40 oz/yd²) 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/m² (10oz/yd²), 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/m² (14 oz/yd²), 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/m² (18 oz/yd²), drapeado hasta la mitad de su área	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65	0,58

Tabla 2.4. Coeficientes de absorción del sonido de materiales de construcción

(continuación) ^[6].

Coefficientes 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/m³ (1,5 a 3,0 lb/ft³)	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/m³ (1,5 a 3,0 lb/ft³)	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

Tabla 2.4. Coeficientes de absorción del sonido de materiales de construcción
(continuación) ^[6].

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

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 2.5. Coeficientes de reducción de ruido de alfombras sobre hormigón desnudo ^[6].

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

2.2.25 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:

$$A_{\text{SUPERFICIE}} = (\alpha_1 S_1) + (\alpha_2 S_2) + (\alpha_3 S_3) \quad (2.16)$$

donde :

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

α_1 : Coeficiente de absorción de la superficie 1 (Adimensional).

S_1 : Superficie 1 (m^2).

La absorción sonora de un local se obtiene también mediante:

$$A_{\text{SUPERFICIE}} = (NRC_1 S_1) + (NRC_2 S_2) + (NRC_3 S_3) + \dots + \dots \quad (2.17)$$

donde :

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

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

S_1 : Superficie 1(m²) [6].

2.2.26 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. 2.18, detallada a continuación:

(2.18)

donde :

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) [6].

2.2.27 Silenciadores Acústicos

Los silenciadores son elementos que se intercalan en los conductos por donde 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 ^[13].

2.2.28 Tipos de Silenciadores Acústicos

2.2.28.1 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 Fig. 2.8, se muestra un silenciador resistivo ^[14].

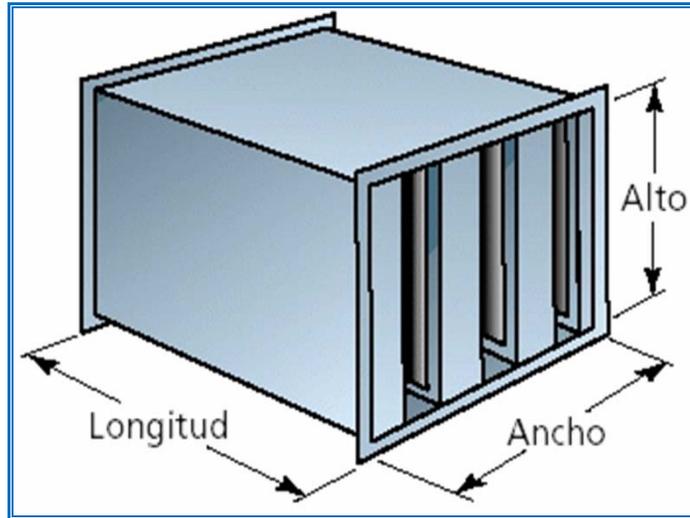


Figura 2.8. Silenciador Resistivo^[14].

2.2.28.2 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 Fig. 2.9 un silenciador reactivo^[14].

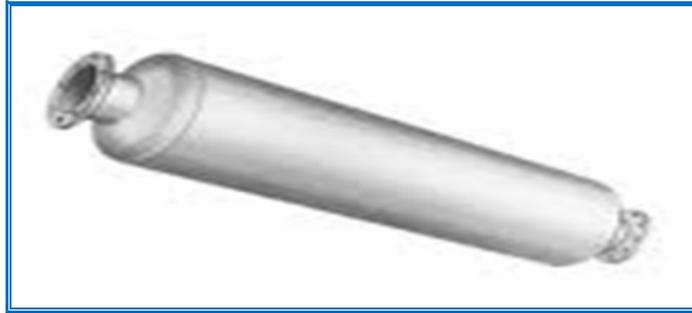


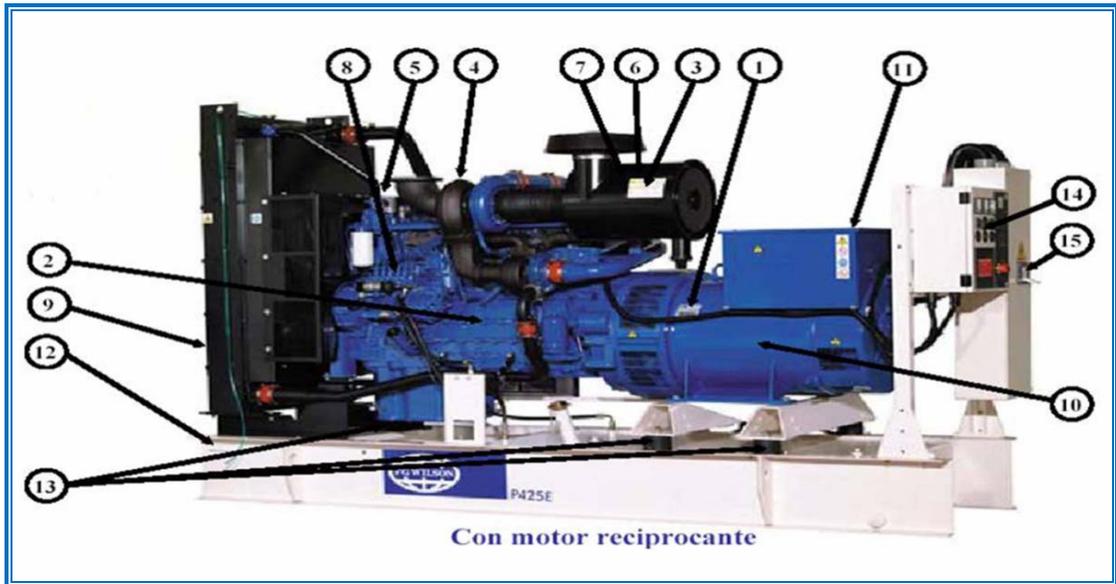
Figura 2.9. Silenciador Reactivo^[14].

2.2.29 Grupos Electr6genos

Es el equipo principal que conforma una central el6ctrica. Est6 compuesto por un motor de combusti3n interna, el cual realiza una conversi3n de energa t6rmica a mec6nica y un generador de electricidad que realiza la conversi3n de energa mec6nica en el6ctrica.

Tambi6n cuenta con equipos perif6ricos de control (como el gobernador y regulador de tensi3n), supervisi3n (como la alarma de funciones de motor diesel) y de protecci3n como el interruptor de salida (breaker) que protege el generador de sobrecargas y cortocircuitos el6ctricos^[15].

En la Fig. 2.10, se puede visualizar un grupo electr6geno con sus partes principales.



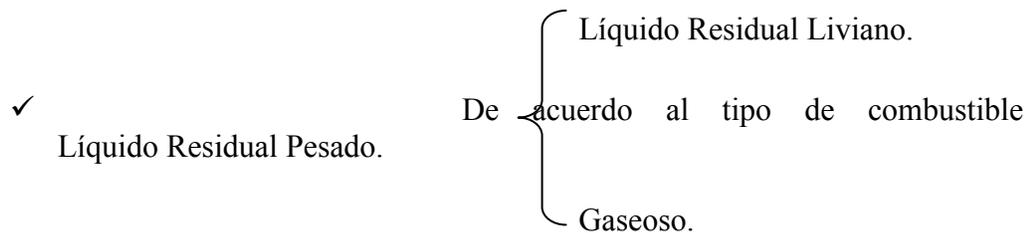
1.- Etiqueta con todas las características técnicas. 2.- Motor Diesel. 3.- Filtro de Aire. 4.- Turbo-cargador (si aplicase). 5.- Control de Velocidad (ubicado al otro lado) 6.- Motor de Arranque, (ubicado al otro lado de la Fig.). 7.- Batería. (Ubicada al otro lado) 8.- Bomba de inyección de gasoil. 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).

Figura 2.10. Partes Principales de un Grupo Electrónico ^[16].

2.2.30 Clasificación de los Grupos Electrónicos

✓ Continuo Liviano (Prime). De { Emergencia (Standby).
acuerdo al régimen de trabajo
Continuo Pesado (Continuos).

✓ Motor Rotativo (Turbina). De { Motor Reciprocante (Pistón).
acuerdo con el tipo de motor



2.2.31 Insonorización

Es el tratamiento acústico del medio adyacente a una fuente sonora, que busca la disminución en la magnitud de la presión acústica emitida por la misma, para ello son implementados cercos o barreras de materiales acústicos en la periferia de la fuente, los cuales interfieren con la propagación de la onda sonora mediante una acción aislante, absorbente y/o difusora, ya sea para disminuir la transmisión a recintos adyacentes o viceversa. Es importante resaltar que para la implementación de estos materiales se deben medir diversas características del sonido y obtener los parámetros necesarios para la correcta selección de los materiales acústicos a instalar en el recinto circundante a la fuente sonora.

En el caso de los grupos electrógenos debido a su perfil de máquinas térmicas de combustión interna, generan niveles de ruidos molestos al oído humano, por lo que es necesario agregar dispositivos de atenuación del sonido. Para el caso de grupos electrógenos de instalación a la intemperie se han creado cabinas de protección y de atenuación de sonido (Canopias) y para el caso de salas de generación que estén ubicadas cerca de oficinas o residencia, habrá que

adecuarlas para atenuar los sonidos molestos sin producir modificaciones a las condiciones de operación de los grupos electrógenos ^[17].

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL PROYECTO

A continuación, se describe detalladamente la metodología utilizada para dar cumplimiento a los objetivos planteados para la realización del presente trabajo. Aquí se explican detalladamente las etapas del proyecto con todos sus procedimientos y datos necesarios para su desarrollo.

3.1 RECOPIACIÓN 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 la sala, 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.

3.2 ANÁLISIS DEL ÁREA

Este análisis estuvo basado en la realización de inspecciones visuales (fotografías y planos se podrán observar en el desarrollo del Capítulo IV), en el campo donde se encontraba el recinto que contenía los grupos electrógenos, es decir, se observó el espacio físico de la subestación tanto por dentro como por fuera de la misma, para así obtener mayor cantidad de detalles a nivel acústico. 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.

Se logró observar que las instalaciones están construidas de manera muy básica (sólo bloques y tabelones con friso de cemento tanto en paredes como techo y una losa de concreto en el piso).

También se pudo apreciar que la puerta (para el acceso del personal) es de lámina de acero entamborada de igual manera el portón (destinado para el acceso de máquinas pasadas y herramientas para el mantenimiento de los grupos electrógenos), sin ningún tipo de tratamiento acústico, lo que produce altos niveles de reflexión en el área interna de subestación siendo contraproducente a nivel acústico.

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, se logró el acceso a todo lo relacionado en cuanto a características, especificaciones y recomendaciones del fabricante para el buen funcionamiento de los mismos. De manera tal de cumplir con todos los aspectos tanto de seguridad como rendimiento de los equipos.

3.3 MEDICIÓN DE LOS ÍNDICES DE RUIDO EN LA SALA 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 la sala de generación estudiada. Dicha medición se ejecutó mediante la utilización del instrumento especializado (sonómetro) tomando en cuenta la norma COVENIN 1671, en la cual aparecen las consideraciones básicas que deben ser tomadas en cuenta al momento de realizar las medidas en el área de estudio.

3.3.1 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).

3.3.2 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 de la subestación tratando de ubicarlos de una manera más homogénea posible en las direcciones de medición.

Dentro de la subestación se hicieron mediciones en las zonas que se podían realizar según la norma COVENIN 1671 (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 de la subestación, se creó un mapa referencial (incluido en el Capítulo IV), 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.

3.3.3 Procedimiento de Medición de Niveles de Presión Sonora

Estas medidas se realizaron siguiendo lo expresado en la norma COVENIN 1671, 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 10 segundos por cada punto de medición (tiempo de medición recomendado en la norma COVENIN 1671), para obtener de esta manera una buena lectura en el sonómetro del nivel de ruido en cada sitio de medida.

3.3.4 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 norma COVENIN 1565-95, donde 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 85 dB; éstos niveles de presión sonora se encuentran ubicados en un valor de 110 dB, lo cual supera excesivamente los valores de la norma.

En la Fig. 3.1 se observa la ubicación de la subestación con respecto al norte geográfico, observándose también la respectiva orientación de sus paredes externas.

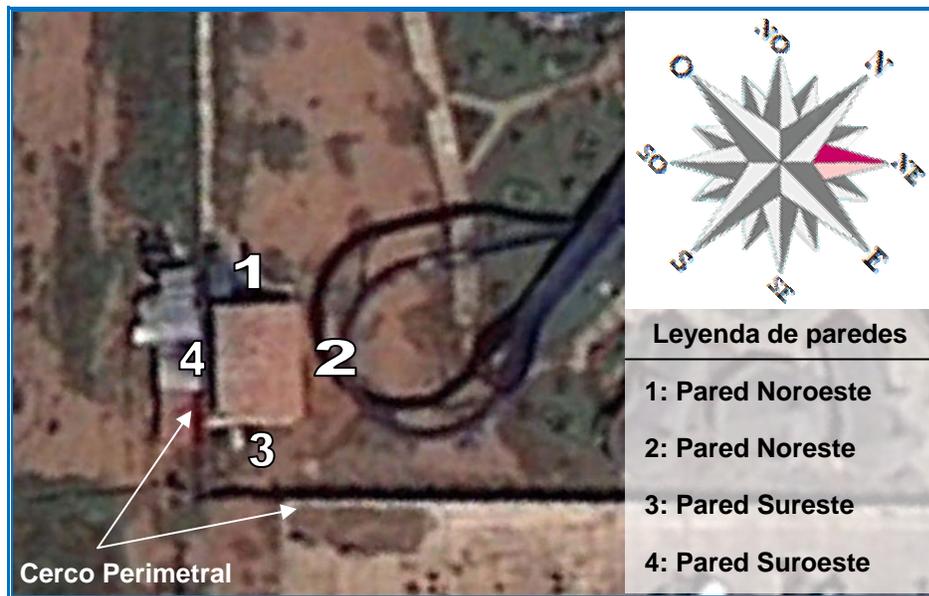


Figura 3.1. Orientación geográfica de la caseta e identificación perimetral externa ^[Google Earth].

En relación a los niveles de presión sonora a las afueras de la subestación, se obtuvieron valores considerablemente altos a distancias cortas (95 dB a 10 m) y medias (84 dB a 25 m), específicamente en el área frontal o anterior (pared noreste) de la subestación, donde está ubicada la ventana principal de entrada de aire para la ventilación de los sistemas de generación eléctrica. Considerando que el proyecto se desarrolla en el entorno de un parque de diversiones, en el cual hay gran afluencia de personas, dichos niveles de ruido son bastante altos.

En la parte trasera o posterior de la caseta (pared suroeste) los niveles de presión sonora son de 110 dB a la salida inmediata (1 m de distancia), donde se encuentran las ventanas de salida de flujo de aire de los grupos electrógenos, en este lado de la caseta está ubicado el cerco perimetral (de concreto armado) del parque, el cual crea cierta reflexión del ruido generado por los equipos, produciendo la desviación del ruido a las áreas adyacentes de la caseta.

En el resto de las paredes de la subestación que son los lados noroeste (donde está ubicado el portón) y suroeste (pared sellada) se aprecian niveles sonoros un poco altos de 97 dB por el lado del portón a una distancia de 3 m y un valor aceptable de 80 dB a 10 m del lado suroeste (pared sellada).

3.4 DEDUCCIÓN DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL RUIDO GENERADO EN EL RECINTO EN ESTUDIO

A continuación se presentarán una serie de ecuaciones para los cálculos que competen directamente con el tratado de insonorización de la subestación.

3.4.1 Identificación de las Paredes de la Subestación

Para no crear confusión con las áreas de las paredes, éstas fueron identificadas según la dirección en que se muestran en la Fig. 3.1 (mostrada anteriormente) y a continuación se detallan.

- ✓ **Pared noroeste:** contiene el portón (número 1 en la Fig. 3.1).
- ✓ **Pared noreste:** contiene la ventana principal para la entrada de aire hacia los grupos electrógenos (número 2 en la Fig. 3.1).
- ✓ **Pared sureste:** es totalmente lisa (número 3 en la Fig. 3.1).
- ✓ **Pared suroeste:** contiene las ventanas de salida de ventilación de la caseta (número 4 en la Fig. 3.1).

3.4.2 Determinación de las Áreas Internas de la Subestación

Seguidamente se calculan las áreas por separado de cada superficie interna de la caseta, es decir, se calcula el área de cada pared sin incluir las ventanas ni la puerta ni el portón, 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) de la caseta.

3.4.3 Determinación del Volumen Real de la Subestación

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

3.4.4 Cálculo de la Absorción Sonora de la Subestación antes y después de ser Tratada Acústicamente

Luego de haber obtenido las áreas internas de la caseta por separado se procedió a obtener la absorción sonora de la caseta en condiciones normales, es decir, con sus materiales originales de construcción y luego con la propuesta de instalación de los materiales acústicos dentro de la subestación y para ello se utilizó la Ec. 2.17.

3.4.5 Determinación del Tiempo de Reverberación de la Subestación 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 (Ec. 2.14), con la finalidad de establecer que tan absorbente o reflectante es la sala de generación.

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 de la caseta. Luego se calculó nuevamente el tiempo de reverberación y se notó una reducción en el mismo, debido a los diversos materiales acústicos seleccionados.

3.4.6 Cálculo del Nivel de Reducción de Ruido en la Subestación sin Instalar los Atenuadores de Ruido en la Entrada y Salida de Aire (en las ventanas)

A través de la Ec. 2.18 se consiguió determinar la cantidad de decibeles que reducen los diversos materiales acústicos sometidos a prueba para el tratamiento sonoro propuesto en la subestación; es muy importante destacar que el nivel de reducción de ruido obtenido en la subestación, es sin la respectiva instalación de los silenciadores (que serán propuestos para ser colocados en las ventanas).

3.4.7 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 de la subestación tiene un valor de 110 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 Ec. 2.5, se obtuvo la Ec. 3.1, mediante la cual se logró calcular la presión sonora efectiva del nivel sonoro (110 dB).

$$P = \log^{-1}(1,3 + 0,05NPS) \quad (3.1)$$

3.4.8 Obtención del Nivel de Potencia Sonora de los Grupos Electrógenos Instalados en la Subestación

La potencia sonora de los grupos electrógenos ubicados en la caseta, pudo ser obtenida posteriormente de medir la magnitud del nivel de presión sonora y determinar la absorción sonora de la misma, utilizando la Ec. 2.8.

Después se procedió a determinar la potencia sonora despejando W de la Ec. 2.7, obteniendo la siguiente expresión matemática:

$$W = \log^{-1}(0.1L_w - 12) \quad (3.2)$$

3.4.9 Cálculo de la Velocidad del Sonido en el Área de los Grupos Electrógenos

A través de la Ec. 2.4, y teniendo en cuenta la temperatura en el medio de medición, se determinó la magnitud de la velocidad del sonido dentro de la caseta (subestación) en 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 de la subestación. Cabe destacar que éste valor es para

la temperatura de 28 °C, temperatura que prevaleció dentro del recinto al momento de las mediciones de los niveles de presión sonora.

3.4.10 Obtención de la Magnitud de la Intensidad Sonora Dentro la Subestación

Luego de haber determinado el valor la presión sonora efectiva y la velocidad del sonido dentro de la subestación, se logró calcular la intensidad sonora de la fuente de ruido en estudio ubicada dentro de la subestación, utilizando la Ec. 2.10. Tomando la densidad del aire con un valor de 1,2 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 de la caseta a través de la Ec. 2.12.

3.5 SELECCIÓN DEFINITIVA DE LOS MATERIALES ACÚSTICOS PARA LA PROPUESTA DE INSTALACIÓN EN LAS SUPERFICIES INTERNAS DE LA SUBESTACIÓN

En ésta fase del proyecto 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.

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.

3.5.1 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 y el portón).

- ✓ Paneles de lana de vidrio de 2 pulgadas de espesor, instalados con cubierta de lamina plástica y panel frontal de metal perforado, con un NRC = 0,86 (para el techo).

- ✓ Alfombra acrílica de nudo grueso con 14 mm de altura y superficie superior cortada, con un NRC = 0,5 (para el suelo).

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 y haber calculado

reiteradamente sus absorciones acústicas y niveles de reducción de ruido respectivamente.

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 donde el oído humano tiene la mayor sensibilidad de percepción acústica.

La selección de un material para el techo y otro distinto para las paredes, se derivó por la razón de que no se deben correr riesgos en cuanto a la temperatura de funcionamiento de los equipos electrógenos de la sala de generación, es decir, que implementar un sólo material en todas las superficies internas, tal como el seleccionado para el techo, podría conllevar a un incremento considerable en la temperatura interna de la subestación (el cual afectaría el funcionamiento de los equipos), debido al panel de metálico que posee dicho material.

En cuanto al material propuesto para el piso, fue seleccionado porque es el que tiene mayor altura de pelo y porque es de material acrílico, el cual ofrece una buena resistencia y durabilidad en cuanto a tráfico de personas y materiales se refiere.

3.5.2 Propuesta de Instalación de los Materiales Acústicos Seleccionados

Los materiales que fueron escogidos previamente deberán ser instalados mediante un montaje TIPO A como se especifica en la norma ASTM, E-795;

el cual se caracteriza por ser una implementación directa a través de un material adherente entre la superficie tratada y el material acústico seleccionado, es decir, sin ningún material o cavidad de aire entre las superficies para la adhesión de las mismas.

3.6 DISEÑO DE LOS ATENUADORES DE RUIDO PARA LAS ABERTURAS DE VENTILACIÓN

Hay que resaltar que los silenciadores, que fueron diseñados para las ventanas, son silenciadores resistivos. Debido a que en las condiciones de la subestación 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 por ejemplo). Para el diseño de los atenuadores de ruido, también conocidos como silenciadores acústicos, fue seleccionado el mismo material absorbente que se escogió anteriormente para el techo de la subestación, debido a su buen coeficiente de reducción de ruido. Se efectuaron una serie de pasos los cuales se detallan a continuación:

3.6.1 Determinación del Área de las Cavidades para los Silenciadores de Entrada y Salida de Aire de la Caseta

Se obtuvieron las áreas transversales de los silenciadores posteriores por donde deberá salir el aire (dos silenciadores idénticos), y el área transversal del silenciador delantero para la entrada del aire a la subestación.

3.6.2 División del Área Perpendicular al Paso de Aire de los Silenciadores en Secciones de Igual Medida

El área transversal al paso del aire debió ser fraccionada en secciones con igual medida, tanto para el silenciador delantero (6 secciones), como en los traseros (4 secciones cada silenciador), con el fin de lograr obtener mayor superficie interna para recubrir con el material absorbente de ruido recomendado.

En la Fig.3.2 se muestran las medidas de los silenciadores posteriores y también se observa como fue dividida el área transversal al flujo de aire en secciones iguales, estas secciones tienen una altura de 0,885 m y un ancho de 0,56 m.

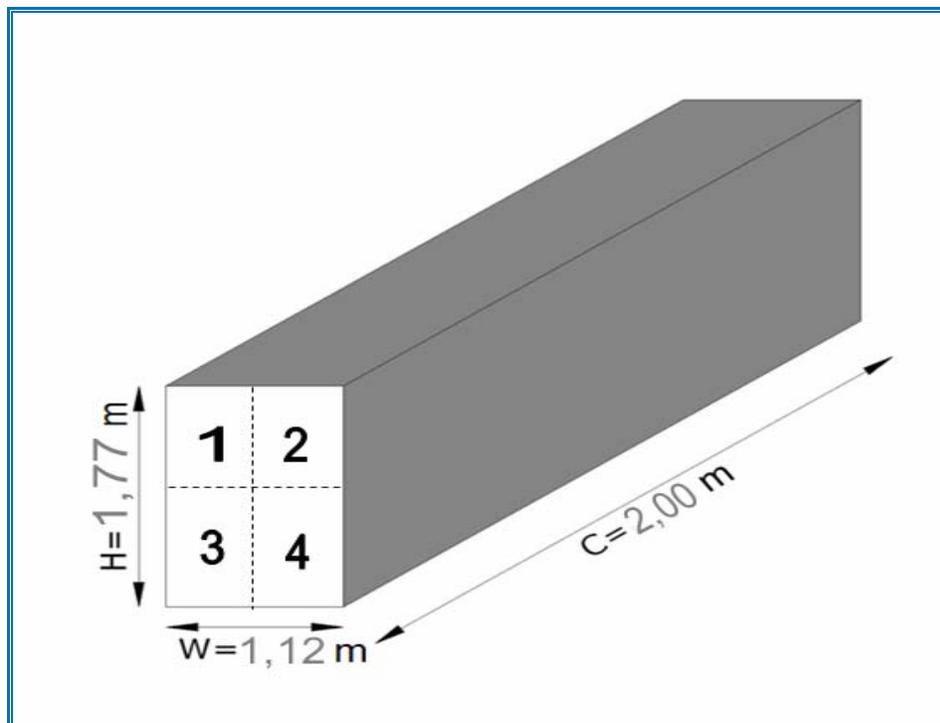


Figura 3.2. División del área transversal al paso de aire de los silenciadores traseros.

De igual manera, en la Fig. 3.3 se muestra como fue dividida la sección transversal al flujo de aire en el silenciador delantero, estas seis divisiones tienen 1,1 m de ancho y una altura de 0,75 m.

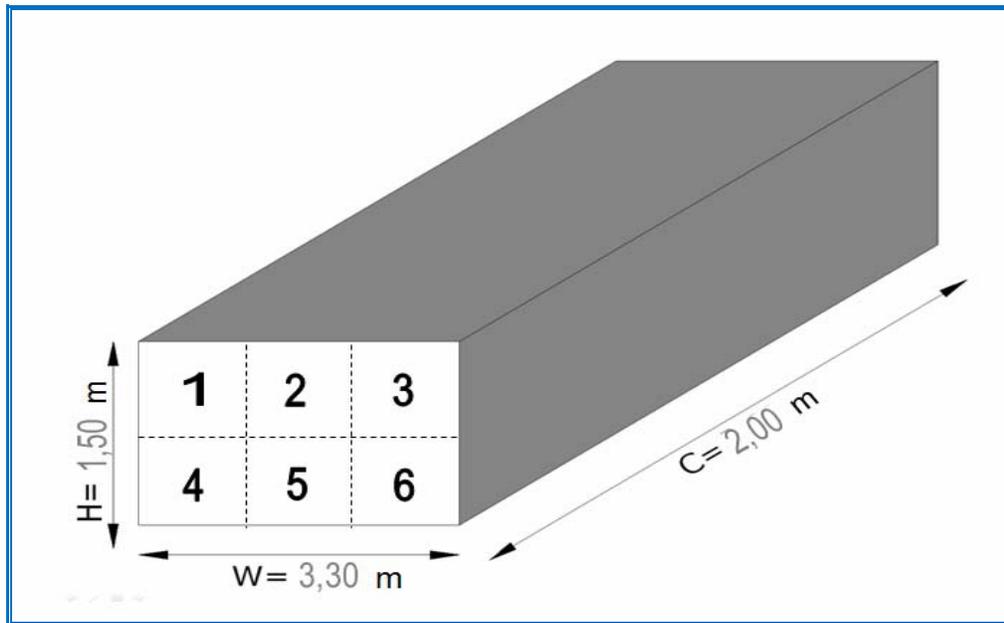


Figura 3.3. División del área transversal al paso de aire del silenciador delantero.

Como se dijo previamente las secciones transversales de los tres silenciadores fueron divididas de manera homogénea, con la finalidad de incrementar las superficies internas de los mismos, en las cuales serán instalados los materiales acústicos seleccionados.

Dichas divisiones fueron necesarias debido a que a mayor superficie a revestir mayor será el valor de la absorción sonora luego de tratar acústicamente, es decir, que mientras mayor sea la superficie interna, mayor será la absorción sonora de la misma.

3.6.3 Determinación de la Absorción Sonora por Sección de los Silenciadores

Posteriormente de haber seccionado las secciones transversales del paso de aire de los silenciadores, se procedió a calcular la absorción sonora de cada sección, mediante la Ec. 2.17, teniendo en cuenta que la profundidad que fue escogida (luego de varias proposiciones) para todos los silenciadores resultó ser de 2 metros de longitud, es decir, que cada silenciador tendrá dos metros de profundidad por los cuales circulará el aire hacia y desde la subestación respectivamente.

Dicha profundidad fue establecida debido a que el cálculo de la absorción sonora fue realizado varias veces con diversas profundidades, que variaron desde los 0,5 m hasta los 3 m, siendo la longitud de 2 m la que ofreció un rendimiento óptimo en cuanto a absorción y nivel de reducción de ruido se refiere.

La longitud de 2 m quedó establecida como longitud final, debido a que a partir de dicha longitud el rendimiento acústico se incrementaba pobremente, es decir, que a los 2,5 m y 3 m de longitud, la absorción no aumentaba considerablemente.

Para obtener la absorción sonora antes de tratar acústicamente las secciones, se tomaron en cuenta las cuatro superficies internas paralelas al paso del aire, con su respectivo coeficiente de reducción de ruido y las superficies perpendiculares

al flujo de aire se asumieron como ventanas abiertas con un $NRC=1$ (equivale a un 100% de absorción y se muestra en tabla 2.4).

Luego de haber calculado la absorción sonora de los ductos sin material acústico, se procedió a calcularla nuevamente con la Ec. 2.17, pero con la implementación del material acústico seleccionado, para las mismas superficies (paralelas al flujo de aire), con la diferencia que en este caso se agregó a las zonas perpendiculares al flujo de aire, la instalación de rejillas o difusores fijos, con el fin de direccionar el paso del aire que entra y sale de los silenciadores y la subestación respectivamente.

A dichos difusores igualmente se le instaló material acústico (en la cara interna del silenciador), de manera tal que ayuden a disminuir los niveles de presión sonora a la salida de cada silenciador.

En la Fig. 3.4 se observa la manera en que se recomienda ser instalados los difusores tanto en la entrada como en la salida de los atenuadores de ruido luego de haber sido tratados acústicamente.

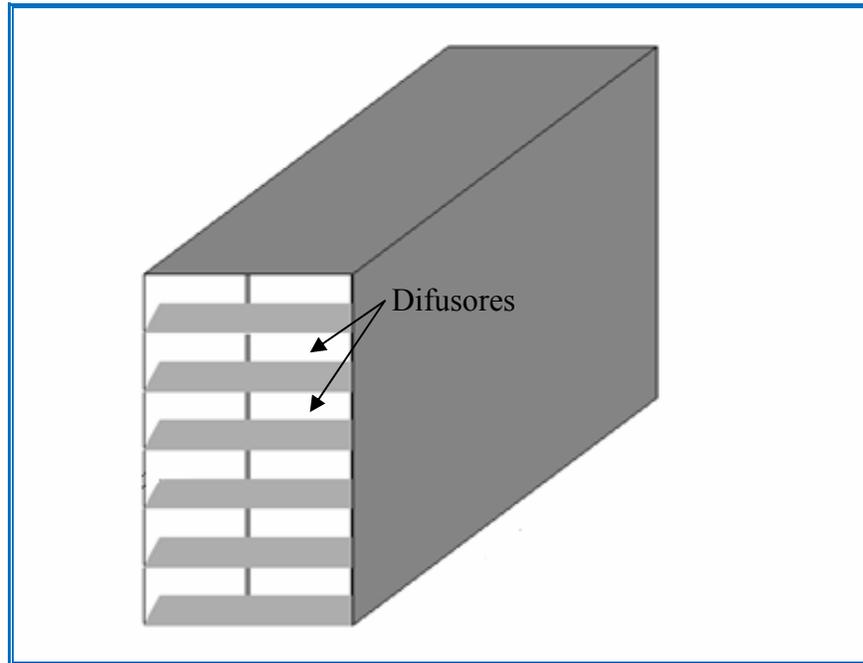


Figura 3.4. Instalación de difusores en los silenciadores traseros y delantero.

Las medidas de los difusores fueron distintas entre los silenciadores traseros y delantero debido a las dimensiones de los mismos (los silenciadores); y éstos fueron instalados con una inclinación de 45 grados con respecto a la horizontal, con el fin de desviar un poco la dirección en que viaja el ruido que entra y sale de cada silenciador.

La inclinación de 45 grados fue escogida debido a que si se recomendaba un ángulo de mayor valor con respecto a la horizontal, se podría ver afectado el flujo de aire que circula en el silenciador, lo cual afectaría la temperatura de funcionamiento de los equipos electrógenos y no sería conveniente.

3.6.4 Cálculo del Nivel de Reducción de Ruido por Sección de los Silenciadores

Para la obtención del nivel de reducción de ruido por sección del silenciador, se utilizó la Ec. 2.18, a través de la cual se relacionan las absorciones sonoras antes y después del tratamiento acústico respectivamente.

Es trascendente señalar que esta reducción de nivel de ruido obtenida, será la reducción de ruido por cada sección del silenciador (4 secciones cada silenciador trasero y 6 secciones el silenciador delantero).

3.6.5 Dedución del Nivel de Reducción de Ruido Total de los Silenciadores

Previamente se obtuvo el nivel de reducción de ruido por cada sección de silenciador. Para conseguir el nivel de reducción de ruido total del silenciador se sumaron los NRR obtenidos de cada sección en la que fue dividido el mismo, con la finalidad de conocer la magnitud del nivel de reducción de ruido total.

En el caso de los silenciadores traseros el NRR total, se obtuvo sumando los cuatro NRR obtenidos por medio de la Ec. 2.18, de las cuatro secciones en las que fue dividido cada silenciador y de la misma manera se determinó el NRR total del silenciador delantero.

3.7 DETERMINACIÓN DEL DESCENSO CUANTITATIVO TEÓRICO-PRÁCTICO DEL NIVEL DE PRESIÓN SONORA DENTRO Y FUERA DE LA SUBESTACIÓN

Se hace referencia a un “descenso cuantitativo teórico-práctico”, debido a que en esta sección fueron utilizados valores reales (medidos en la subestación) y valores teóricos obtenidos mediante la serie de cálculos realizados previamente. A continuación se explica de manera detallada como se determinó dicho descenso.

3.7.1 Obtención del Descenso del Nivel de Potencia Sonora a las Afueras de la Subestación

Para saber que tan efectivo fueron los efectos aportados por el tratamiento acústico, tanto dentro como afuera de la subestación eléctrica, fue necesario sustraerle al valor del nivel de potencia sonora (L_{WP}), obtenido mediante la Ec. 2.8, las magnitudes obtenidas de los niveles de reducción de ruido de la subestación y de los silenciadores respectivamente, es decir, que al nivel de potencia sonora calculado dentro de subestación, se le restaron los niveles de reducción de ruido, tanto de la caseta como el de los silenciadores implementados en la misma. De manera de obtener el nuevo nivel de potencia sonora a la salida de los silenciadores tanto delantero como traseros.

Se habla de sustracción, debido a que los niveles de reducción de ruido representan la cantidad en que se verán disminuidos los niveles de potencia

sonora y los niveles de presión sonora respectivamente, tanto dentro como fuera de la subestación.

El nivel de reducción de ruido de la subestación y el de los silenciadores, representa decibeles relacionados con energía (en éste caso sería potencia sonora en vatios), es decir, dB referidos a 1 picovatio, ésto se debe a que los materiales acústicos, dado su coeficiente de reducción de ruido (NRC), absorben parte de la energía sonora (en vatios) que choca contra la superficie del mismo; por dicha razón se le restaron algebraicamente al nivel de potencia sonora predominante en el interior de la subestación.

3.7.2 Cálculo para Obtener del Nivel de Presión Sonora a la Salida de los Silenciadores de la Subestación

Una vez calculado el nuevo nivel de potencia sonora a la salida de los silenciadores traseros, es decir, fuera de la subestación (lado suroeste), se despejó de la Ec. 2.8 el nivel de presión sonora (L_p), y se obtuvo la siguiente ecuación:

$$L_p = L_w - 10(\log A) + 6 \quad (3.3)$$

Previamente calculado el nuevo nivel de potencia sonora a la salida del silenciador delantero, es decir, fuera de la caseta del lado noreste, de la Ec. 2.9 se despejó el nivel de presión sonora (L_p), y se obtuvo la siguiente ecuación:

$$L_p = L_w - 20(\log R) - 10,9 + C \quad (3.4)$$

Donde el término de corrección C, fue extraído de la Fig. 2.5 y tuvo un valor de 0,08 dB utilizando 1000 milibares de presión y 28 °C de temperatura respectivamente.

Este nuevo nivel de presión sonora obtenido fuera de la subestación, representa el valor en dB hasta los que disminuyen los niveles de presión sonora desde el interior hacia a la salida de la subestación, pasando por los silenciadores instalados en la misma, a una distancia prudencial de 1 m, es decir, que dicho nivel de presión sonora estará ubicado aproximadamente a 1 m de la salida del silenciador.

Después de obtener el valor del nuevo nivel de presión sonora a la salida de cada silenciador, se pudo establecer que tan eficiente fue el tratamiento acústico propuesto a la sala de generación y la instalación de los silenciadores en las lumbreras para la respectiva ventilación de los equipos ubicados en el interior de la misma.

Es importante estar al tanto que este nuevo nivel de presión sonora obtenido, se encuentra ubicado a una distancia máxima de acercamiento de 1 m de los silenciadores por el exterior de la subestación, debido a que la norma COVENIN 1671, indica que esta es la distancia máxima de proximidad para la medición de los niveles de presión sonora.

3.8 VERIFICACIÓN DE QUE LOS NIVELES DE RUIDO CUMPLAN CON LAS NORMATIVAS ESTABLECIDAS

En esta sección simplemente se procedió a la demostración de que los nuevos niveles de presión sonora con la incorporación del tratamiento acústico, cumplen con los niveles de presión sonora establecidos tanto en la norma COVENIN 1565-95 y la Gaceta Oficial N° 4418, aprobada en abril de 1992 en Venezuela.

Ambas publicaciones exigen un nivel de presión sonora máximo de 85 dB en un tiempo estimado de 8 horas continuas de exposición a determinado sonido o ruido generado por una fuente acústica.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

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 la subestación y sus inmediaciones.

4.1 RESULTADOS OBTENIDOS LUEGO DE ANALIZAR EL ÁREA FÍSICA DE LA SUBESTACIÓN

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

4.1.1 Características Físicas Internas de la Subestación

Mediante el análisis del área interna de la subestación se pudo apreciar que la misma tenía acabados de construcción típicos, 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 friso normal de 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).

En la Fig. 4.1, se pueden apreciar los grupos electrógenos dentro de la subestación y las características físicas del suelo de la misma.



Figura 4.1. Detalles del suelo de la Subestación

En cuanto a la puerta y portón que son utilizados para el acceso y salida del personal que manipula los generadores de la sala, los mismos están fabricados de láminas de acero sin ningún tratamiento o superficie acústica que ayude a la reducción del ruido que se presenta en la sala de generación. En la Fig. 4.2 se puede observar detalladamente la puerta y en la Fig. 4.3 se aprecia el portón.



Figura 4.2. Detalles de puerta de acceso de la Subestación



Figura 4.3. Detalles del portón de acceso de la Subestación

Tanto Fig. 4.2 como en la 4.3 también se puede observar las características básicas de las superficies de las paredes internas de la sala de generación eléctrica.

Con respecto a las ventanas a través de las cuales entra y sale el aire de la sala de generación, sólo tenían una reja (fabricada en cabillas cuadradas de media pulgada) 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 adyacencias de la subestación y del parque de diversiones.

A continuación, en las Fig. 4.3 y 4.4, se muestran las ventanas para la circulación del aire dentro de la subestación.



Figura 4.3. Ventana delantera de acceso del aire de la Subestación



Figura 4.4. Ventana posterior de salida del aire de la Subestación

En la figura anterior se puede observar al fondo de la ventana el muro perimetral de concreto armado del parque de diversiones.

En general a nivel interno, en lo que concierne acústicamente a la subestación, 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.

4.1.2 Características Físicas Exteriores de la Subestación

En lo que corresponde a las superficies externas de la sala de generación, se pudo apreciar que para su construcción tampoco fueron tomados en cuenta ningún tipo o medio que ayude a la atenuación del sonido generado por los grupos electrógenos dentro de la misma. Dichos detalles se ven en la Fig. 4.5.



Figura 4.5. Subestación eléctrica del parque de diversiones

4.2 ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES DE LOS NIVELES DE PRESIÓN SONORA TOMADAS EN LA SUBESTACIÓN Y SUS ALREDEDORES

Posteriormente de haber calibrado el sonómetro y después de tomar en cuenta las recomendaciones dadas por la norma COVENIN 1671, 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.

Dichas mediciones quedaron registradas tanto en magnitud y ubicación, en el croquis que se muestra a continuación en la Fig. 4.6.

El mapa de la Fig. 4.6, fue realizado con la finalidad de ver los distintos niveles de presión sonora que se presentan en la sala de generación eléctrica y los alrededores de la misma.

Observando la siguiente Fig. 4.6 se puede establecer que las mediciones fueron tomadas hasta una distancia de 40 m en dirección noreste, partiendo del muro perimetral del parque y hasta una distancia de 42 m en dirección noroeste, partiendo también desde el muro perimetral del parque.

La superficie de medición tuvo un área en total de 1680 m², en la cual se registraron 282 puntos de medición de los niveles de presión sonora.

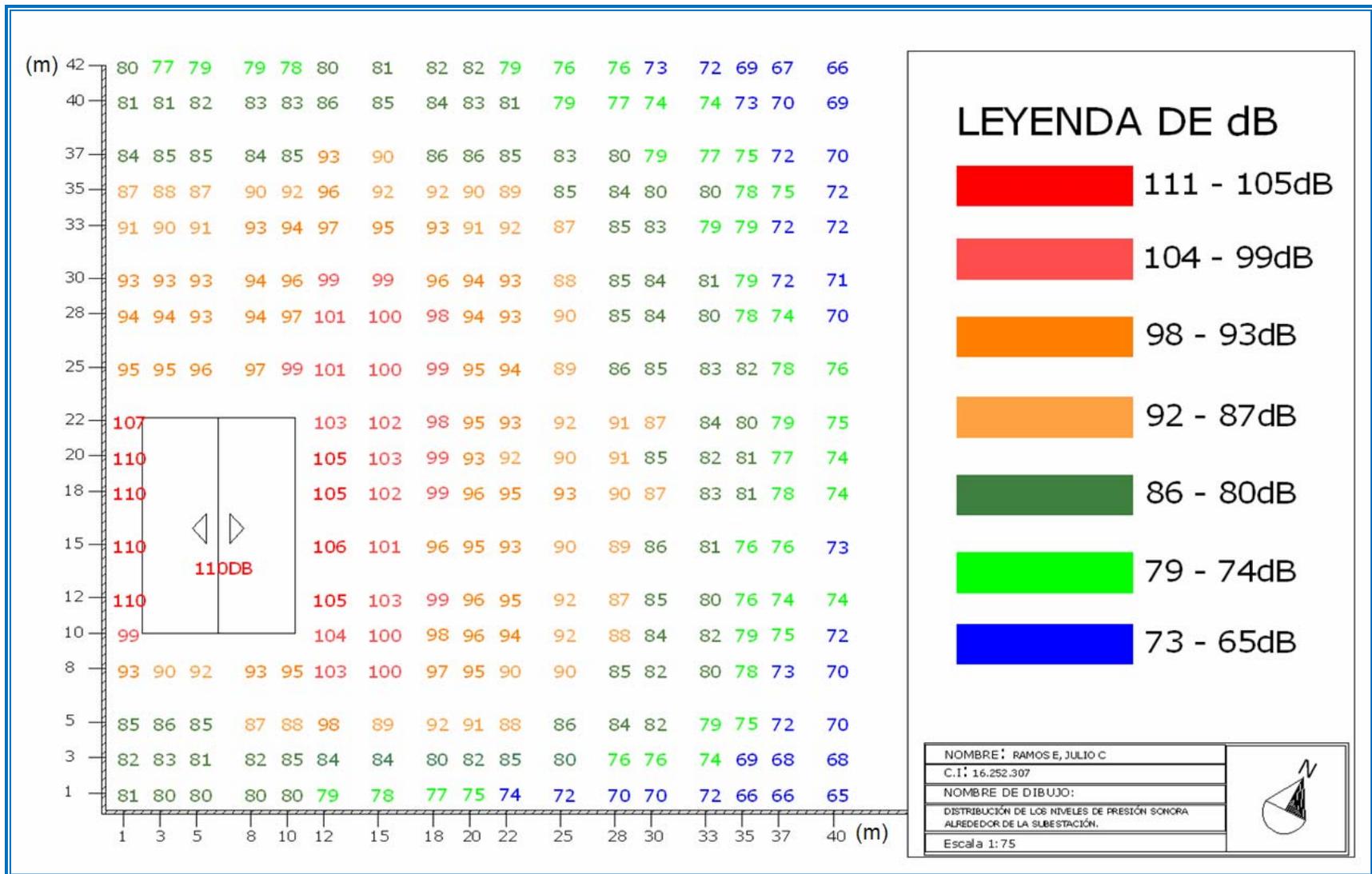


Figura 4.6. Distribución de los niveles de presión sonora en la subestación y sus alrededores.

En el mapa se logra observar el comportamiento de los niveles de presión sonora del ruido producido por los grupos electrógenos.

Los mayores índices de ruido registrados se encuentran en el interior de la subestación (de manera uniforme) y en los alrededores (específicamente entre la subestación y el muro periférico), con una magnitud de 110 dB.

Debido a que el muro perimetral del parque se encuentra a una distancia de 2 m de la subestación por el lado suroeste, el mismo limita físicamente, por lo que fue imposible seguir tomando mediciones en esa dirección.

En los alrededores más próximos de la subestación, por la parte noreste se tienen unos valores de 105 dB a una distancia de 2 m los cuales van disminuyendo progresivamente hasta una magnitud de 73 dB a una distancia de 30 m.

En cambio para el sector noroeste se pudieron tomar más mediciones que en el sector suroeste. En éste sector fueron registrados unos valores máximos de 99 dB a una distancia de 3 m de la pared, desde allí se notó el descenso progresivo de los niveles de presión sonora hasta una distancia de 20 m en esa dirección, ubicándose en los 79 dB aproximadamente.

Para la dirección sureste fue sólo posible medir a una distancia máxima de 10 m, debido a que se encontraba el muro perimetral del parque. A ésta distancia fue registrado un nivel de presión sonora de 80 dB siendo bastante tolerable por el oído

humano y el máximo índice sonoro registrado en esta dirección fue de 95 dB a una cercanía de 2 m de la pared del recinto.

En general se puede ver en el mapa que los niveles de presión sonora van reduciendo de manera progresiva desde el interior de la caseta donde hay una magnitud de 110 dB, hacia los exteriores donde se registran unos índices tolerables por el oído humano de 80 dB a una distancia promedio de 20 m partiendo desde la periferia de la subestación.

4.3 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS DE LA SUBESTACIÓN

Luego de haber obtenido los niveles de presión sonora de la sala de generación eléctrica y sus adyacencias, 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 de la caseta sin incluir los grupos electrógenos, dichas características se conocen a continuación.

4.3.1 Características Superficiales Internas de la Caseta

Las características internas de la caseta se presentan en la Fig. 4.7, en la cual se logra observar todas las medidas de las superficies de la subestación. Éstas medidas fueron utilizadas principalmente para determinar el área de cada

superficie interna y el respectivo cálculo del volumen real de la sala de generación. De tal manera que partiendo de éstos valores se pudieran calcular los parámetros acústicos del recinto en estudio.

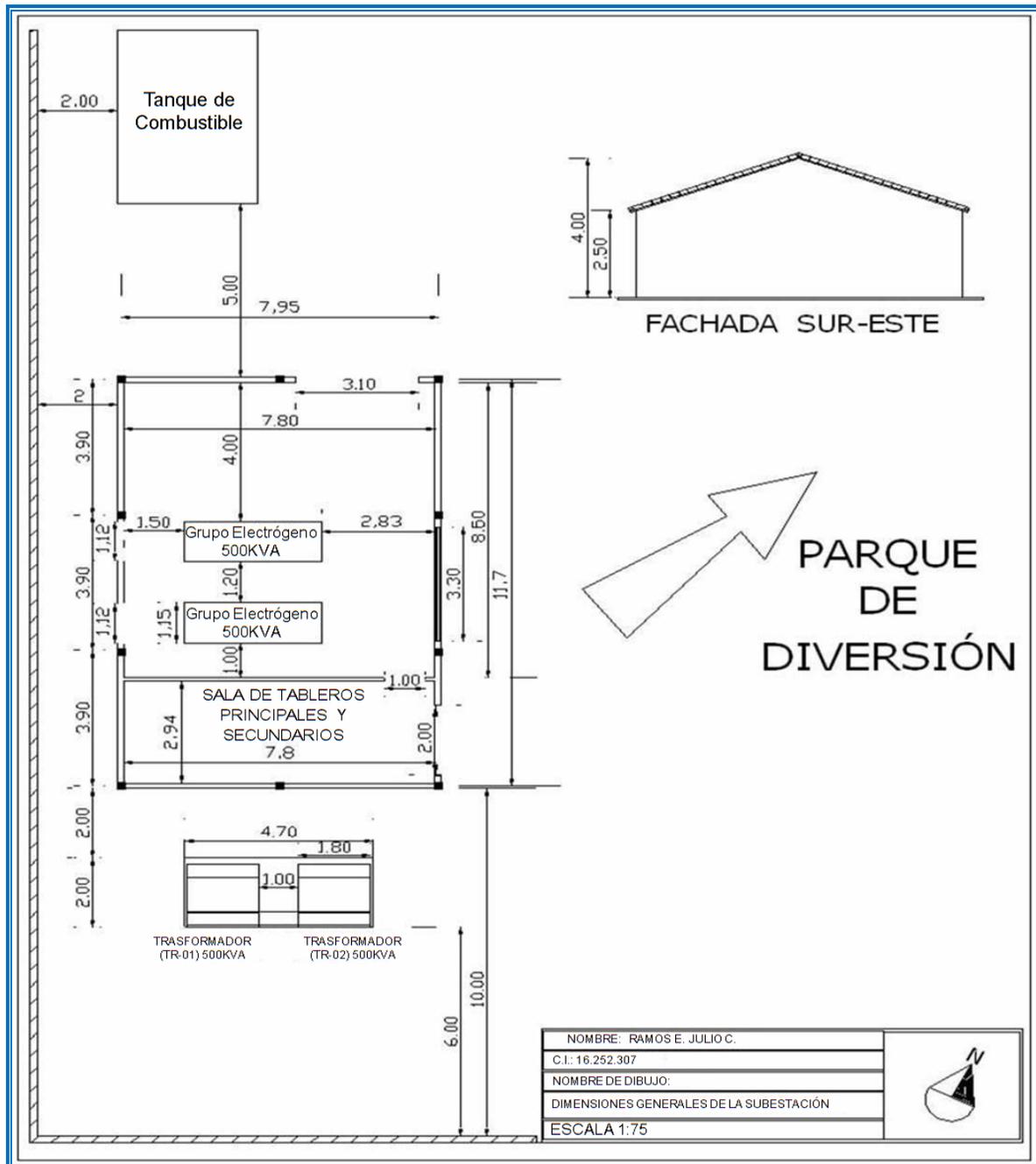


Figura 4.7. Medidas de la subestación.

Luego de conocer las dimensiones físicas de la subestación por medio de la figura 4.7, fueron calculadas las áreas (m²) 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 4.1.

Tabla 4.1. Distribución de superficies internas de la subestación

Superficie	Área de la superficie (m²)
Pared Suroeste	17,29
Pared Noroeste	18,53
Pared Noreste	16,30
Pared Sureste	23,59
Ventanas	8,91
Portón	6,82
Puerta	1,76
Techo	71,06
Piso	57,5
Área Total =	221,76

4.3.2 Cálculo del Volumen Real Interno del Recinto Estudiado

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

$$V_R = 196,355 \text{ m}^3$$

4.4 DETERMINACIÓN DE VALORES ACÚSTICOS RELEVANTES EN LA SUBESTACIÓN

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 de la sala de generación, tanto antes como después de tratar acústicamente, esto con el fin de establecer la efectividad del tratamiento acústico realizado al recinto.

4.4.1 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 de la subestación, se realizó la tabla 4.2, la cual se muestra a continuación:

Tabla 4.2. Propiedades acústicas del ruido dentro de la Subestación.

Ecuación Utilizada	Parámetro Acústico	Magnitud del Parámetro	Unidad del Parámetro
2.4	Velocidad del Sonido	348,28	(m/s)
2.8	Nivel de potencia sonora	121,89	(dB referido a 1pW)
2.11	Intensidad sonora	0,0239	(W / m ²)
2.12	Nivel de Intensidad sonora	103,75	(dB)
3.1	Presión Sonora Efectiva	6,31	(Pa)
3.2	Potencia sonora	1,55	(Watts)

Para el caso del cálculo de la potencia sonora de la fuente de ruido, se utilizó la Ec. 3.2, usando la magnitud del nivel de potencia sonora obtenido mediante la Ec. 2.8 y se obtuvo un valor de 1,55 Watts, el cual compagina de manera lógica con los valores reflejados en la tabla 2.2. En cuanto al valor calculado del nivel de intensidad sonora, se puede observar que ajusta con los valores sonoros expuestos en la tabla 2.3 del Capítulo II desarrollado previamente, donde se exponen varias fuentes de sonido con sus respectivos niveles de intensidad; y éste ruido es semejante al ruido de la fuente sonora de 100 dB mostrado en dicha tabla. El valor de la presión sonora efectiva calculada a partir de la Ec. 3.1, concuerda apropiadamente con el valor que corresponde a los 110 dB mostrados en la Fig. 2.4.

4.4.2 Absorción Sonora de la Subestación sin Tratamiento Acústico

Para el cálculo de la absorción sonora previa al tratamiento acústico, se utilizó la Ec. 2.17, donde se incluyen todos los materiales y sus características. Los resultados se resumen en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Parámetros físicos y acústicos de la subestación sin tratamiento sonoro.

Superficie	Material de construcción	Área de la superficie(m²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
Pared Suroeste	Bloque de Hormigón	17,29	0,36	6,224
Pared Noroeste	Bloque de Hormigón	18,53	0,36	6,671
Pared Noreste	Bloque de Hormigón	16,30	0,36	5,868
Pared Sureste	Bloque de Hormigón	23,59	0,36	8,492
Ventanas	Aire	8,91	1	8,910
Portón	Metal	6,82	0,008	0,054
Puerta	Metal	1,76	0,008	0,014
Techo	Bloque de Hormigón	71,06	0,36	25,582
Piso	Hormigón	57,5	0,016	0,920
Absorción Sonora Total =				62,735

La tabla 4.3, muestra todas las características físicas y acústicas de la sala de generación eléctrica, es importante resaltar que éstas características generales son sin tratamiento acústico.

Utilizando la Ec. 2.14 y teniendo en cuenta el volumen real y la absorción sonora calculados previamente, se determinó el tiempo de reverberación antes del tratamiento acústico, del que se obtuvo una magnitud de 0,504 segundos.

4.4.3 Absorción Sonora de la Sala de Generación con Tratamiento Acústico

Es muy importante destacar que los materiales acústicos seleccionados para la instalación en las superficies internas de la caseta 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 donde 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 la subestación, se muestra la tabla 4.4, donde se puede apreciar las nuevas características físicas y acústicas propuestas para el recinto.

Tabla 4.4. Características físicas y acústicas de la subestación luego de tratar acústicamente.

Superficie	Material de construcción	Área de la superficie(m²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
Pared Suroeste	Fibra de vidrio	17,29	0,76	13,140
Pared Noroeste	Fibra de vidrio	18,53	0,76	14,082
Pared Noreste	Fibra de vidrio	16,30	0,76	12,388
Pared Sureste	Fibra de vidrio	23,59	0,76	17,928
Ventanas	Aire	8,91	1	8,910
Portón	Fibra de vidrio	6,82	0,76	5,183
Puerta	Fibra de vidrio	1,76	0,76	1,338
Techo	Panel de Fibra de vidrio	71,06	0,86	61,111
Piso	Alfombra Acrílica	57,5	0,5	28,750
Absorción Sonora Total =				162,83

De la tabla 4.4 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.

Con la implementación de los materiales absorbentes a las superficies se logró incrementar la absorción sonora del recinto, ubicándose en un valor de 162,83 Sabinos Métricos.

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.

Cabe resaltar que las ventanas del local 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 (en la sección 4.5).

Ahora, nuevamente utilizando la ecuación 2.14 se calculó el nuevo tiempo de reverberación de la subestación, tomando en cuenta la instalación de los materiales absorbentes. Éste tuvo un valor de 0,186 segundos, donde se hace notar que se logró una reducción en más de 50% en el mismo.

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.

4.4.4 Deducción del Nivel de Reducción de Ruido en el Interior de la Subestación

Para saber en qué cantidad de dB disminuyó el ruido predominante en el recinto, se utilizó la Ec. 2.18.

Luego de aplicar dicha ecuación, se determinó un nivel de reducción de ruido de 4,14 dB.

Por lo tanto el nivel de potencia sonora del ruido presente dentro de la subestación, disminuiría de 121,89 dB hasta los 117,75 dB.

Estos 117,75dB de nivel de potencia sonora obtenida, se utilizaron en la Ec. 3.3 y se determinó el nuevo nivel de presión sonora dentro de la subestación, el cual resultó ser de 101,63 dB, es decir, que los niveles de presión sonora disminuirían desde 110 dB hasta 101,63 dB con la implementación del recubrimiento de las superficies internas de la caseta.

Hay que resaltar que se hubiera podido tener una mayor reducción de los niveles de presión sonora mediante la instalación de los materiales acústicos, tomándose medidas drásticas con respecto a las ventanas, tales como clausura ó disminución del tamaño de las mismas. Sin embargo ninguna de las dos propuestas se tomaron en cuenta debido a que los grupos electrógenos requieren de la circulación de aire a sus alrededores para su correcto funcionamiento.

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.

4.5 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA INSTALACIÓN DE LOS SILENCIADORES EN LA SALA DE GENERACIÓN

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

4.5.1 Rendimiento Acústico de los Silenciadores Traseros

Hay que tener en cuenta que cada silenciador posterior se encuentra en la pared suroeste de la subestación y fue dividido en cuatro secciones de iguales dimensiones para su respectivo estudio y diseño acústico. Dicha división fue hecha tanto en la ventana como en el silenciador y en la Fig. 3.2 se puede apreciar como quedó establecida la misma.

A continuación en la Fig.4.8, se pueden ver las dimensiones físicas, altura (0,885 m), ancho (0,56 m) y profundidad (0,20 m) respectivamente, de una sección de ventana elegida para dicho diseño (son 4 secciones idénticas), para así instalar el silenciador. También se puede ver que cada lado de la sección fue identificado (con números), con la finalidad de facilitar la comprensión de los datos expuestos en la tabla 4.5.

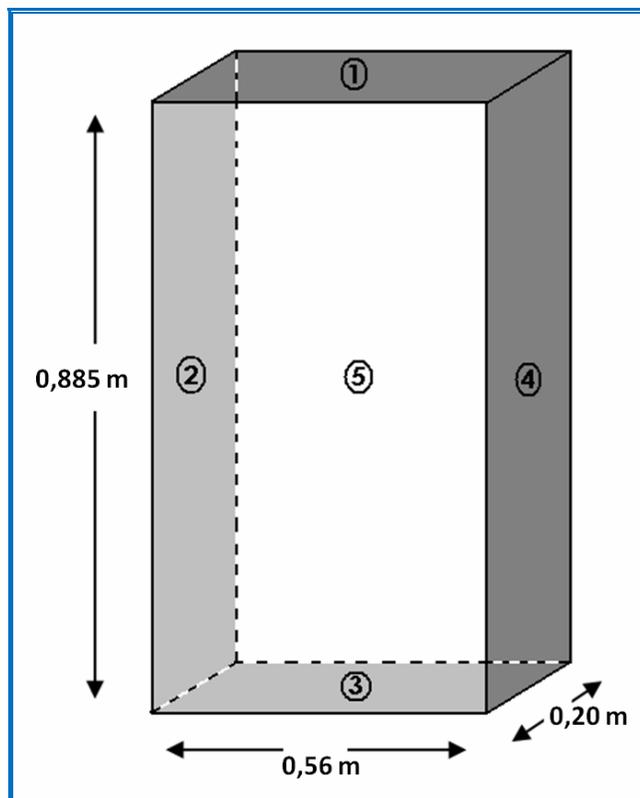


Figura 4.8. Dimensiones de una sección de ventana para la implementación del silenciador trasero.

A continuación en la tabla 4.5, se observan las características tanto físicas como acústicas de la sección de ventana elegida, sin tratamiento sonoro en las superficies internas de la misma.

Tabla 4.5. Parámetros físicos y acústicos de una sección de ventana para colocar los silenciadores traseros sin tratar acústicamente.

Superficie	Material de construcción	Área de la superficie(m ²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
1	Bloque de Hormigón	0,112	0,36	0,0403
2	Aire	0,177	1	0,177
3	Aire	0,112	1	0,112
4	Bloque de Hormigón	0,177	0,36	0,0637
5	Aire	0,4956	1	0,4956
Absorción Sonora Total =				0,8886

La primera columna de la izquierda muestra la superficie que se trató en ese momento, es decir, que 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente, son las caras de la sección mostradas en la figura 4.8, y así sucesivamente se aplicó con el resto de las superficies de las secciones tanto de las ventanas como de los silenciadores en general.

Mediante la tabla 4.5, se puede decir que la absorción sonora total de una sección de ventana es baja. Es de esperarse un valor bajo de absorción sonora debido a que es sólo una sección de ventana.

A continuación en la Fig.4.9 se muestran las dimensiones de una sección de silenciador, como se puede apreciar tanto la altura como el ancho permanecen constantes con respecto a la sección de ventana, es decir, sólo cambia la profundidad de la sección (se incrementó a 2 m), debido a que se trata de una sección de silenciador. También se pueden ver identificadas sus respectivas caras (A y B).

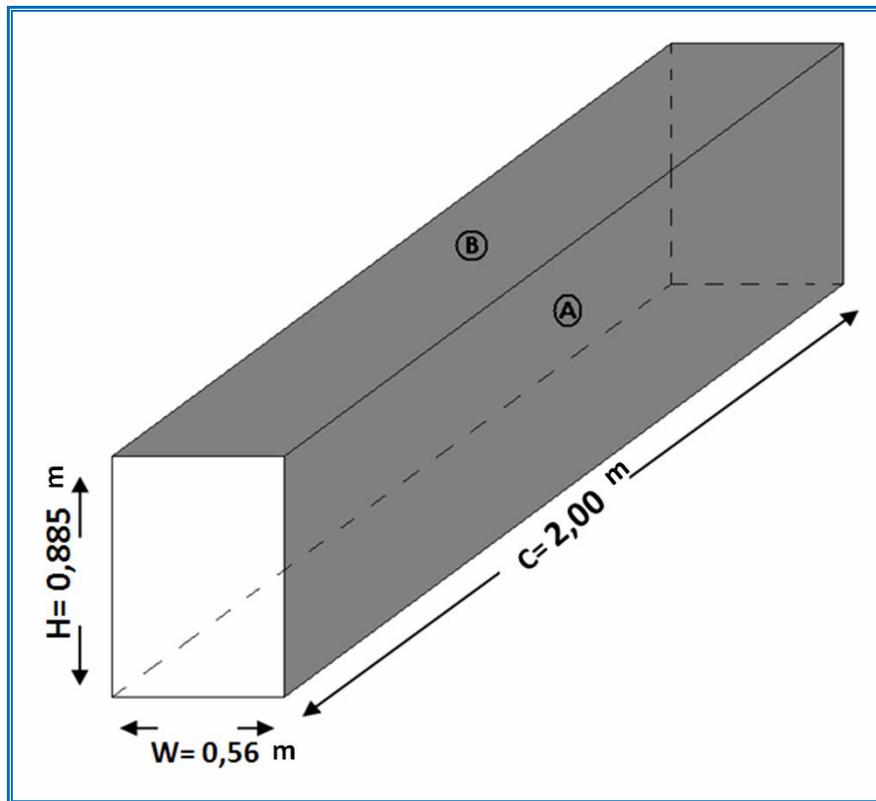


Figura 4.9. Dimensiones de una sección del silenciador trasero.

Ya conocidas las medidas de la sección de silenciador, en la siguiente Fig.4.10, se aprecian las medidas (altura = $Z = X$, ancho= W) de los difusores que serán instalados tanto en la entrada como en la salida de cada sección, una vez

propuesta la instalación de los materiales absorbentes de ruido, es decir, luego de tratar acústicamente la sección de silenciador.

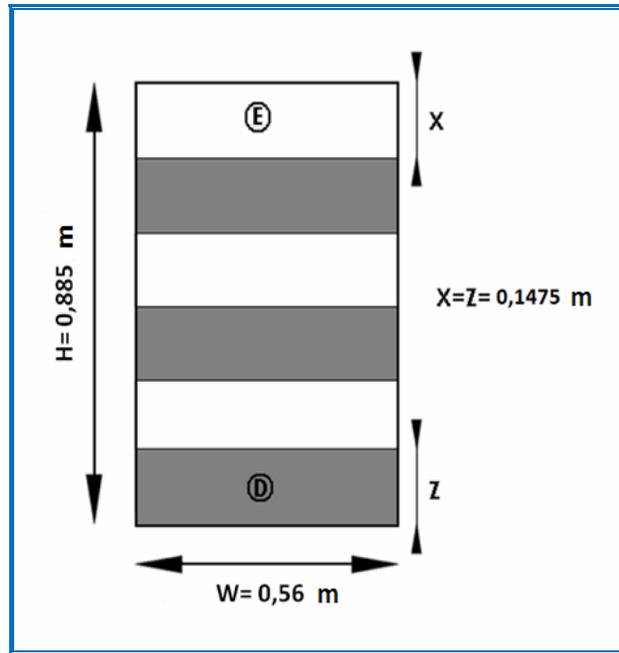


Figura 4.10. Medidas de difusores anteriores y posteriores de la sección del silenciador trasero.

Detallando la figura 4.10 se observa de manera frontal la sección del silenciador en estudio y también se pueden apreciar las dimensiones de los difusores (color gris) identificados con la letra “D”, que serán instalados a 45 grados (con respecto a la horizontal) en la entrada y salida de cada sección de silenciador, con el fin de ayudar a disminuir los decibeles a través del material acústico que se le agregó y direccionar hacia abajo parte del ruido que viaja a través de la sección.

También se observa que las entradas para el flujo de aire están identificadas con la letra “E”, con el fin de facilitar el entendimiento y diferenciar las diversas superficies expuestas en la siguiente tabla 4.6.

En la tabla 4.6, se reflejan las características y los resultados obtenidos después de tratar acústicamente la sección del silenciador, lográndose observar que la absorción sonora de la misma se ha incrementado considerablemente, tomando en cuenta que las superficies internas de la sección fueron revestidas con el material absorbente seleccionado y especificado en la tabla 2.4. También se agregaron los difusores para direccionar el flujo del aire que pasa a través de sección, a éstos difusores de igual forma se le agregó el material absorbente de sonido por el lado que va dentro del silenciador.

Tabla 4.6. Cuantificaciones físicas y acústicas de una sección de los silenciadores traseros luego de tratar acústicamente.

Superficie	Material de construcción	Área de la superficie(m²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
2(A)	Panel de Fibra de vidrio	3,54	0,86	3,0444
2(B)	Panel de Fibra de vidrio	2,24	0,86	1,9264
6(D)	Panel de Fibra de vidrio	0,4956	0,86	0,4262
3(E)	Aire	0,2478	1	0,2478
Absorción Sonora Total =				5,6448

Este nuevo valor de absorción sonora de la sección, es más alto con respecto al valor de la absorción sonora obtenido en la sección de ventana sin tratamiento acústico, debido a que los materiales implementados a ésta sección tienen un mayor coeficiente de reducción de ruido, lo cual conlleva a un buen aporte en la disminución del nivel de potencia sonora en la sección.

Después de determinar el valor de la absorción sonora de la sección de silenciador tratada acústicamente, se determinó mediante la Ec. 2.18, el nivel de reducción de ruido de la misma y se consiguió obtener un valor de 8,03 dB, es decir, que cada sección del silenciador trasero reducirá ésta cantidad de decibeles al nivel de potencia del ruido que pase por ella.

Posteriormente de calcular el nivel de reducción de ruido de cada sección de silenciador, finalmente se procedió a obtener el nivel de reducción de ruido total por cada silenciador trasero, de manera tal que se sumaron los cuatro NRR de cada sección (4 idénticas) de silenciador y se obtuvo una reducción total de 32,12 dB a la salida del silenciador trasero.

Lo que quiere decir que cada silenciador trasero disminuirá en 32,12 dB al nivel de potencia sonora del ruido que circule a través de ellos.

Una vez determinado el NRR de los silenciadores traseros, se procedió a restar dicho NRR al nivel de potencia que se determinó dentro de la subestación luego de tratarla acústicamente, es decir, a los 117,75 dB obtenidos en la sección 4.4.4

con lo que se obtiene un nivel de potencia sonora de 85,63 dB a la salida del silenciador.

Debido a que el cerco perimetral del parque impidió, por razones físicas, las aplicación de la Ec. 3.4 (L_p en espacios abiertos), se utilizó la Ec 3.3 (L_p en espacios cerrados), a través de la cual se determinó el valor del nivel de presión sonora a la salida del silenciador.

Para la debida utilización de la Ec. 3.3, parte del área suroeste o trasera de la subestación, se asumió como un espacio cerrado y se planteó un “volumen de control” en dicho sector, cuyas características físicas se pueden observar en la Fig.4.11.

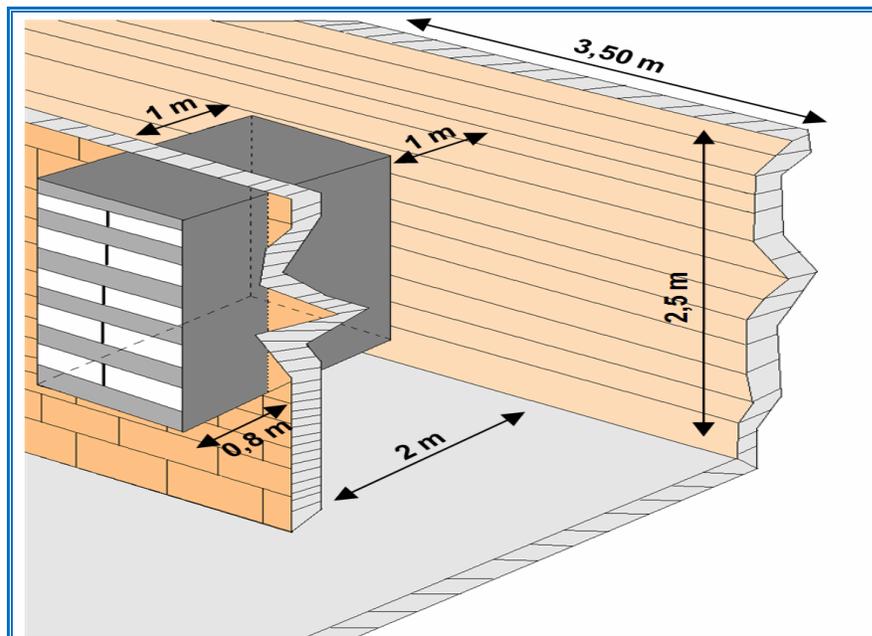


Figura 4.11. Características y dimensiones físicas del área suroeste de la subestación donde se encuentran los silenciadores posteriores.

En la figura anterior se pueden observar tanto las dimensiones del cerco perimetral (hormigón) como las de la pared (bloque de hormigón), donde se encuentra el silenciador (ambas superficies tiene un largo de 3,5 m y una altura de 2,5 m respectivamente), también se observan las dimensiones del piso (hormigón) el cual posee 2 m de ancho (separación entre pared y cerco) y 3,5 m de largo.

Con respecto a las superficies laterales (2 m de ancho y 2,5 m de alto) y superior al silenciador (3,5 m de largo y 2 m de ancho), fueron asumidas como “ventanas abiertas” de manera tal de poder aplicar la Ec. 2.8.

Finalmente las dimensiones del “volumen de control” planteado fueron 3,5 m de largo, 2,5 m de alto y 2 m de ancho.

Una vez conocidas las características físicas del volumen de control, se procedió a determinar la absorción sonora del mismo mediante la Ec. 2.17 y sus resultados se resumen en la siguiente tabla 4.7.

Tabla 4.7. Parámetros físicos y acústicos de las superficies internas del volumen de control en el sector suroeste de la subestación.

Superficie	Material de construcción	Área de la superficie (m ²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
Pared suroeste	Bloque de hormigón	6,77	0,36	2,4372
Cerco perimetral	Hormigón	8,75	0,016	0,14
Piso	Hormigón	7	0,016	0,112
Ventanas abiertas	Aire	17	1	17
Absorción Sonora Total =				19,69

Con la absorción sonora total que ofrece el volumen de control planteado, finalmente, mediante la Ec. 2.8, se logró determinar los niveles de presión sonora a la salida de los silenciadores ubicados en la parte posterior de la sala de generación.

Dichos niveles de presión sonora tienen un valor de 78,7 dB en el sector posterior o suroeste de la subestación.

Tanto el nivel de potencia sonora como el nivel de presión sonora a la salida del silenciador, se pueden observar en la Fig. 4.12, en la cual se muestra el diseño final propuesto de los silenciadores traseros.

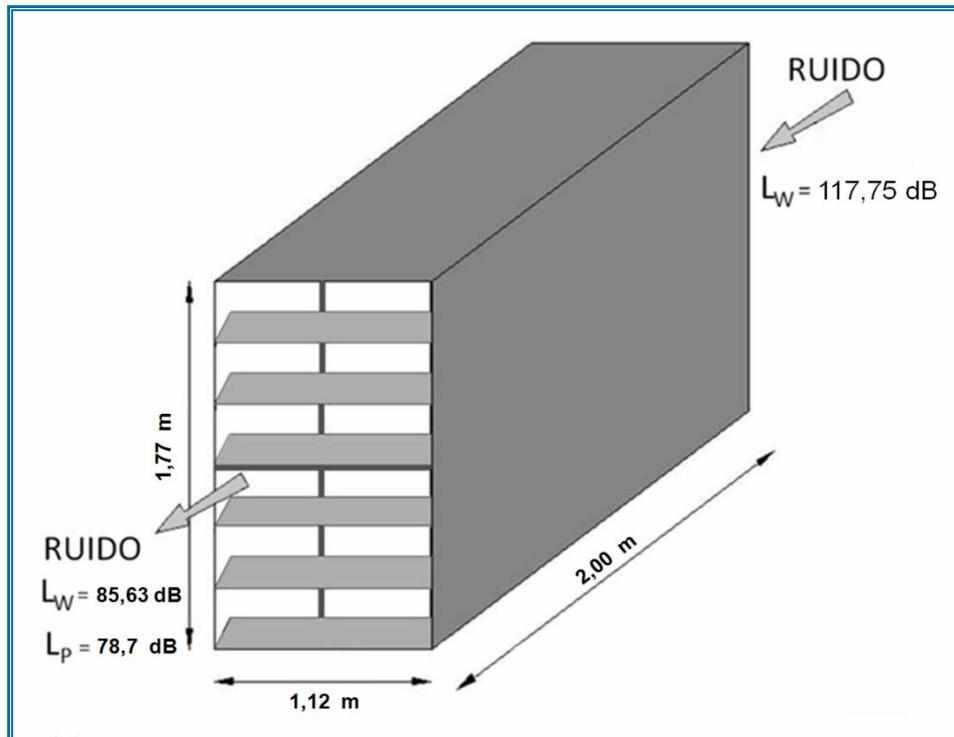


Figura 4.12. Diseño propuesto para los silenciadores posteriores.

La Fig. 4.12, muestra las características principales de los silenciadores posteriores, tales como sus dimensiones y aporte acústico en la reducción del ruido que circula a través de ellos.

Cabe destacar que los materiales absorbentes del ruido se encuentran adheridos a todas las superficies internas del silenciador, es decir, que el material

acústico se encuentra tanto en las caras internas de los difusores como en las caras internas del silenciador.

En la Fig.4.13, se observan detalladamente las medidas tanto de los difusores como las medidas frontales y posteriores de un silenciador trasero.

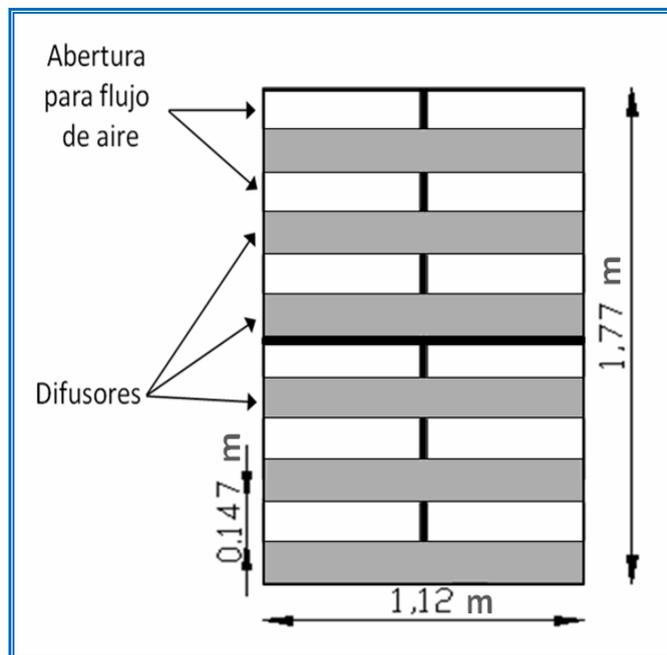


Figura 4.13. Vista frontal y trasera de los silenciadores posteriores.

Como se puede ver en la figura anterior, cada difusor tiene una altura de 0,147 m y un ancho de 1,12 m (ancho del silenciador) y el espacio libre para el flujo de aire posee las mismas dimensiones.

Cada silenciador trasero tiene un total de 6 difusores frontales y 6 difusores posteriores distribuidos de la misma manera en que se muestran en la Fig. 4.13.

4.5.2 Rendimiento Acústico del Silenciador Delantero

Para el silenciador delantero esencialmente fue utilizado el mismo procedimiento de cálculo anterior, con y sin tratamiento acústico respectivamente. Teniendo en cuenta que cada silenciador se encuentra en la pared noreste de la subestación el cual fue dividido en seis secciones con dimensiones iguales para su respectivo estudio y diseño acústico.

Dichas divisiones fueron realizadas tanto en la ventana como en el silenciador y se pueden ver en la Fig. 3.3.

A continuación, en la Fig. 4.14, se observan las medidas de la sección de ventana antes de tratar acústicamente y su respectiva identificación de caras (1, 2, 3, 4 y 5)

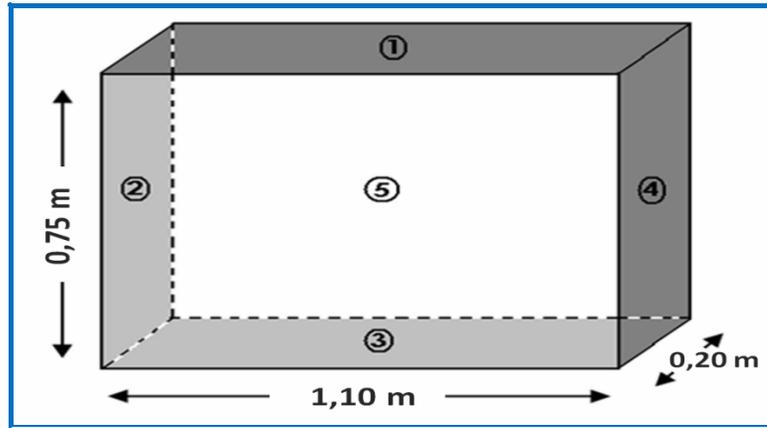


Figura 4.14. Medidas de sección de ventana para instalar el silenciador delantero.

Los resultados de los cálculos sonoros realizados antes y después de tratar acústicamente las secciones se ven reflejados tanto en la tabla 4.8 como en la tabla 4.9 respectivamente y son mostradas a continuación.

Tabla 4.8. Parámetros físicos y acústicos de una sección de ventana delantera sin tratar acústicamente.

Superficie	Material de construcción	Área de la superficie(m ²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
1	Bloque de Hormigón	0,22	0,36	0,0792
2	Aire	0,15	1	0,15
3	Aire	0,22	1	0,22
4	Bloque de Hormigón	0,15	0,36	0,054
5	Aire	0,825	1	0,825
Absorción Sonora Total =				1,3282

En la tabla 4.8 están expuestos los materiales que conforman la sección de ventana y sus respectivas características acústicas, también se muestran los resultados obtenidos en cuanto a la absorción sonora se refiere.

Comparando la absorción sonora conseguida en la sección de ventana delantera, con la absorción sonora obtenida en la sección de ventana trasera, se nota un aumento en la misma, derivado a que esta última absorción sonora calculada, se refiere a una superficie de mayor área con respecto al área de la superficie de la sección de ventana trasera.

Por ende la absorción sonora de la sección de ventana delantera sin tratamiento acústico es mayor en comparación a la absorción sonora de la sección de ventana trasera sin tratar acústicamente.

A continuación, en la Fig. 4.15, se observan las medidas de la sección de silenciador delantero y en la 4.16 sus respectivos difusores instalados luego de tratar acústicamente. También se aprecia la identificación de las caras (A y B), con la finalidad de facilitar la comprensión de la tabla 4.9.

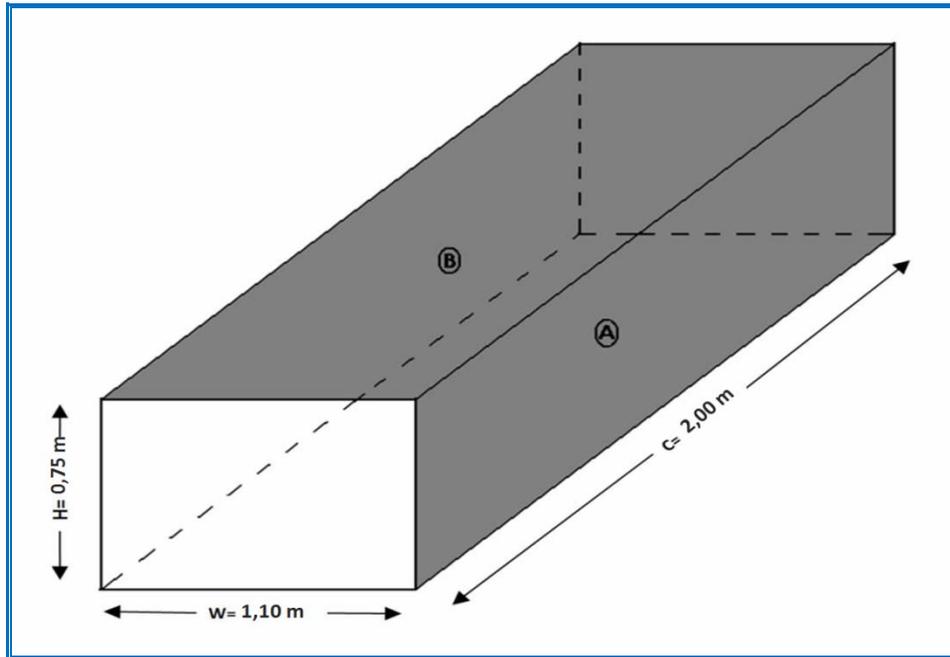


Figura 4.15. Medidas de sección de silenciador delantero.

A continuación en la Fig.4.16, se observan las medidas de los difusores (identificados por la letra “D”) que serán instalados en la sección del silenciador delantero una vez realizado el tratamiento acústico de la misma.

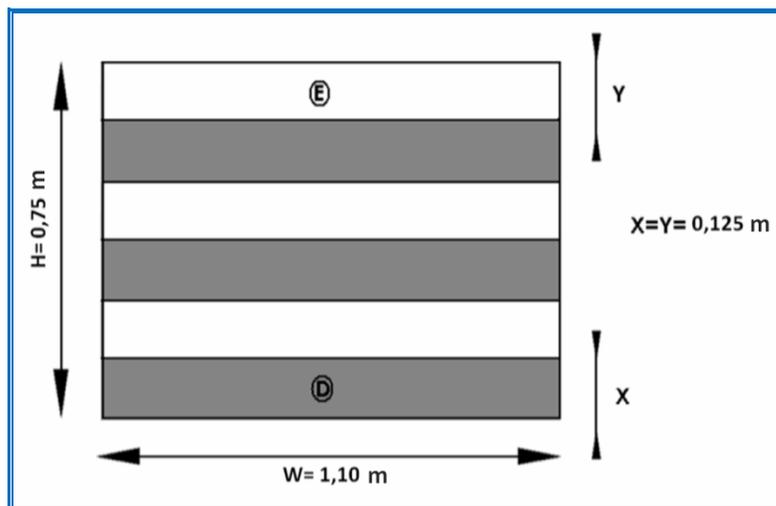


Figura 4.16. Medidas de difusores anteriores y posteriores de la sección del silenciador delantero.

Después de calcular la absorción sonora de la sección sin ningún tratamiento acústico, se procedió a determinarla nuevamente luego de haber implantado los materiales absorbentes en las superficies internas y los difusores de la sección de silenciador, dichos resultados y características se muestran en la siguiente tabla 4.9.

Tabla 4.9. Parámetros físicos y acústicos de una sección del silenciador delantero luego de tratar acústicamente.

Superficie	Material de construcción	Área de la superficie (m ²)	NRC	Absorción Sonora (Sabinos Métricos)
2(A)	Panel de Fibra de vidrio	3,0	0,86	2,58
2(B)	Panel de Fibra de vidrio	4,4	0,86	3,784
6(D)	Panel de Fibra de vidrio	0,825	0,86	0,7095
3(E)	Aire	0,4125	1	0,4125
Absorción Sonora Total =				7,486

Tanto la superficie A como la superficie B se colocan 2 veces debido a que en la sección de silenciador las mismas poseen una sección paralela a ellas con dimensiones y características acústicas idénticas. Lo mismo sucede con los difusores (D) en la sección de silenciador, son 3 adelante y 3 atrás de la misma, llevando a una totalidad de 6 difusores.

Se puede decir que el valor de mayor importancia reflejado en la tabla 4.19, es el valor de la absorción sonora total, el cual fue obtenido luego de tratar las superficies internas de la sección, el cual es un valor bastante aceptable en comparación al obtenido en la sección de ventana sin ningún tipo de tratamiento acústico.

Después de conocer las absorciones sonoras de cada sección, antes y después de tratar acústicamente fue usada la Ec. 2.18, con la finalidad de conocer el nivel de reducción de ruido de la misma, obteniéndose un valor de 7,5 dB de reducción, en los niveles de potencia sonora del ruido que pasa a través de cada sección, es decir, que cada sección del silenciador delantero, disminuirá los niveles de potencia sonora en 7,5 dB.

Una vez establecida la reducción de ruido que aporta cada sección del silenciador, se calculó el nivel de reducción de ruido global del silenciador delantero, mediante la sumatoria de los NRR de las 6 secciones en que fue dividido previamente, obteniéndose un nivel de reducción en la potencia sonora de 45 dB.

Dicho nivel de reducción de potencia se le restó al nivel de potencia sonora de la subestación luego de tratarla acústicamente, es decir, que a 117,75 dB se le restaron los 45 dB obtenidos previamente. Lo cual llevó a determinar el nivel de potencia sonora a la salida del silenciador delantero. Éste nivel de potencia sonora a la salida del silenciador resultó ser de 72,75dB.

Luego fue usada la Ec. 3.4 y se calculó el nivel de presión sonora del ruido a la salida del silenciador, a una distancia de 1 m, el cual resultó ser de 61,93 dB.

Una vez realizados los cálculos necesarios para el tratamiento acústico, en la Fig. 4.17, se presentan las especificaciones principales del silenciador delantero.

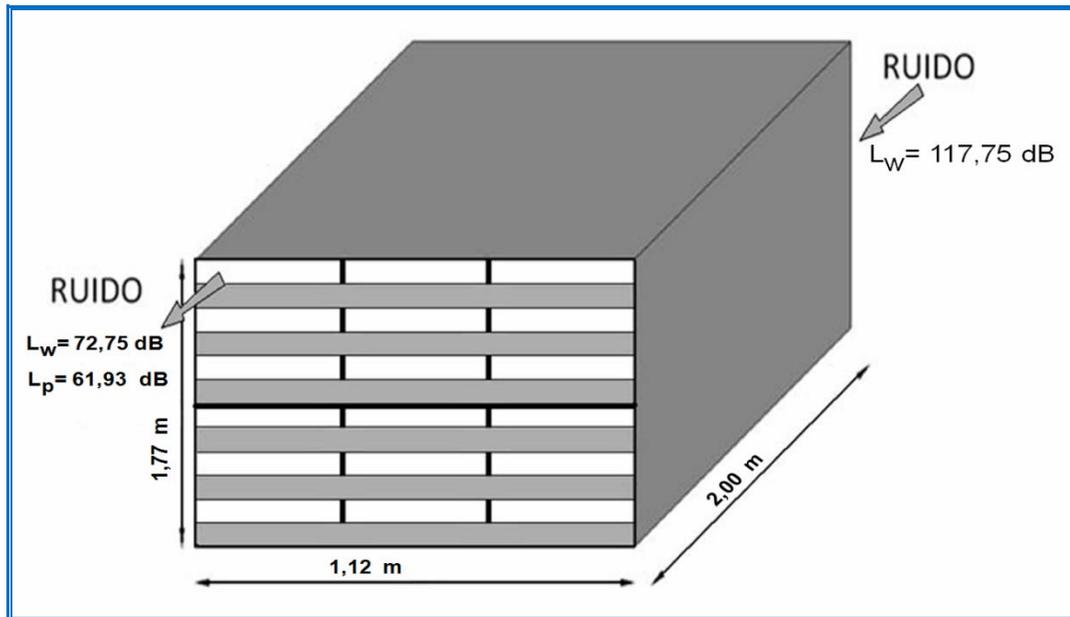


Figura 4.17. Diseño propuesto para el silenciador delantero.

En la Fig. 4.17, se observan las medidas finales del silenciador delantero, tanto altura, ancho y profundidad del mismo. También se puede ver el resultado acústico que ejecuta sobre el ruido que circula a través del mismo.

El material de construcción para la estructura metálica interna y externa de este silenciador y de los traseros, es lámina galvanizada de calibre 18, con el objetivo de que los mismos soporten la corrosión generada por las condiciones de intemperie a las cuales están expuestos; y el material acústico absorbente recomendado para colocar en las superficies internas de los silenciadores posee un $NRC = 0,86$ (similar al sugerido para el techo de la subestación).

En la Fig. 4.18 se aprecian las medidas de los difusores fijos instalados tanto en la entrada como en la salida del silenciador.

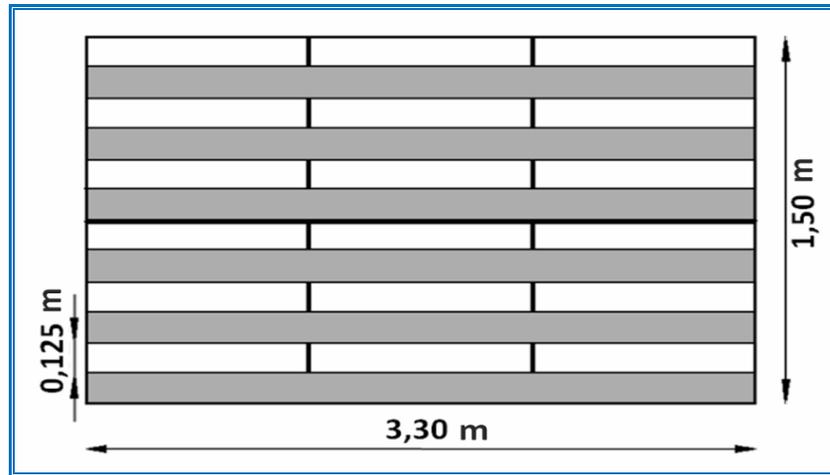


Figura 4.18. Vista frontal del silenciador delantero.

Como se puede ver en la Fig. 4.18, la altura de los difusores es la misma altura para las cavidades de flujo del aire hacia el silenciador, ésta medida quedó establecida en 0,125 m de altura y 3,3 m de ancho.

Con respecto a la instalación de los materiales absorbentes, fue realizada de la misma manera que en los silenciadores traseros, es decir, se colocaron en todas las superficies internas de sus caras y sus difusores respectivamente.

De igual manera que en los silenciadores traseros, el silenciador delantero posee 6 difusores fijos ubicados tanto en la entrada como en la salida del mismo.

Los difusores de todos los silenciadores se encuentran instalados a una inclinación de 45 grados con respecto a la horizontal, con la finalidad de desviar la dirección en que viaja el ruido desde el interior de la caseta hacia las áreas externas de la misma.

4.6 ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA TOTAL DEL SISTEMA DE INSONORIZACIÓN PROPUESTO EN EL PROYECTO

Luego de haber deducido todos los valores relevantes a nivel acústico de la subestación, con el tratamiento aplicado a las superficies internas de la caseta y con la instalación de los silenciadores anteriores y posteriores, se procedió a determinar en qué cantidad se reducen los niveles de presión sonora presentes dentro y fuera de la subestación.

4.6.1 Eficiencia del Recubrimiento Instalado en las Superficies Internas de la Subestación

En esta sección básicamente se determinó en cuanto disminuyen los niveles de presión sonora dentro de la caseta debido a la instalación de los materiales

absorbentes del sonido, es decir, se calculó el nuevo nivel de presión sonora dentro de la subestación sin la instalación de los silenciadores en las ventanas.

Para este cálculo se utilizó el nivel de potencia sonora obtenido en la sección 4.4.4, que resultó ser de 117,75 dB y la absorción sonora obtenida luego de tratar acústicamente. Dicho nivel de potencia y absorción sonora se usaron en la Ec. 3.3 y se obtuvo un nivel de presión sonora de 101,63 dB en el interior de la subestación eléctrica.

Observando el valor del nivel de presión sonora logrado anteriormente, se aprecia que hay una baja reducción en el nivel de presión sonora dentro y fuera de la subestación y que conlleva a que fuera de las estación se escape ese nivel de ruido por las ventanas de no instalar los silenciadores.

Es importante resaltar que el nivel de reducción de ruido obtenido mediante los materiales absorbentes recomendados, podría ser mayor, esto debido a que al momento de determinar la absorción sonora después de tratar acústicamente el local, no se tomaron en cuenta los materiales con que éste está construido, es decir, que al momento de determinar la absorción sonora con los materiales absorbentes, se asumió que la subestación está construida sólo de material acústico sin tomar en cuenta los NRC que ofrecen los materiales que se encuentran debajo del material absorbente recomendado.

4.6.2 Eficiencia con los Silenciadores Posteriores Instalados en la Caseta

Como se pudo observar en la Fig.4.12, los silenciadores traseros permiten disminuir los niveles de potencia sonora existentes dentro de la subestación desde los 117,75 dB hasta los 85,63 dB a la salida de los mismos. De la misma manera en dicha figura se observa los niveles de presión sonora de 78,7 dB a la salida del silenciador.

Hay que recalcar que estos valores deducidos, son la cantidad de decibeles que hay a la salida de cada silenciador trasero.

Observando el valor calculado de nivel de presión sonora se puede establecer que los silenciadores traseros arrojan buenos resultados acústicos. Tomando en cuenta que el sector suroeste donde se encuentran los silenciadores traseros de la subestación es una zona en la cual no se permite la libre circulación de personas que no laboren en el parque y que la exposición de los que trabajen en la subestación será por cortos periodos de tiempo (inferior a 1 hora) por esa zona, se considera que dichos silenciadores permiten cumplir con la normativa.

De esta manera dichos silenciadores permiten cumplir de manera general con las normativas y exigencias establecidas tanto en la norma COVENIN 1565-95 como en la Gaceta Oficial N° 4418, aprobada en abril de 1992 en Venezuela.

4.6.3 Eficiencia con el Silenciador Delantero Instalado en la Subestación

En la Fig.4.17, se muestran los niveles de presión sonora y de potencia sonora a la salida del silenciador.

Tomando en cuenta el valor del nivel de reducción de ruido aportado por el silenciador, se concluye que el mismo permite cumplir sin ningún inconveniente y de manera confiable la meta establecida en el proyecto, en la cual se estipuló reducir los niveles de presión sonora por debajo de los 85 dB, debido a que los niveles de presión sonora del ruido generados por los grupos electrógenos, están ubicados inicialmente en 110 dB en el interior de la caseta y disminuyen hasta 101,63 dB con la implementación de los materiales absorbentes en las superficies internas de la misma.

Estos 101,63 dB predominan en el interior de la subestación y van hacia el exterior de la misma, en ausencia de los silenciadores. Con la instalación del silenciador delantero éstos se reducen hasta los 61,93 dB a la salida del mismo.

El valor del nivel de presión sonora, a una distancia de 1 m de la salida del silenciador es de 61,93 dB, el cual es bastante inferior a los niveles de exposición máxima establecidos en las normativas venezolanas tal como la COVENIN 1565-95 y la gaceta oficial mencionada en los objetivos específicos del proyecto.

4.7 ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO GLOBAL DEL SISTEMA DE INSONORIZACIÓN PROPUESTO

En la Fig. 4.19 se muestra gráficamente el descenso progresivo de los niveles de presión sonora generados por los equipos electrógenos, partiendo desde el interior de la subestación y pasando por el silenciador delantero que está ubicado en la pared noreste de la misma, hasta una distancia de 35 m de alejamiento en la dirección noreste.

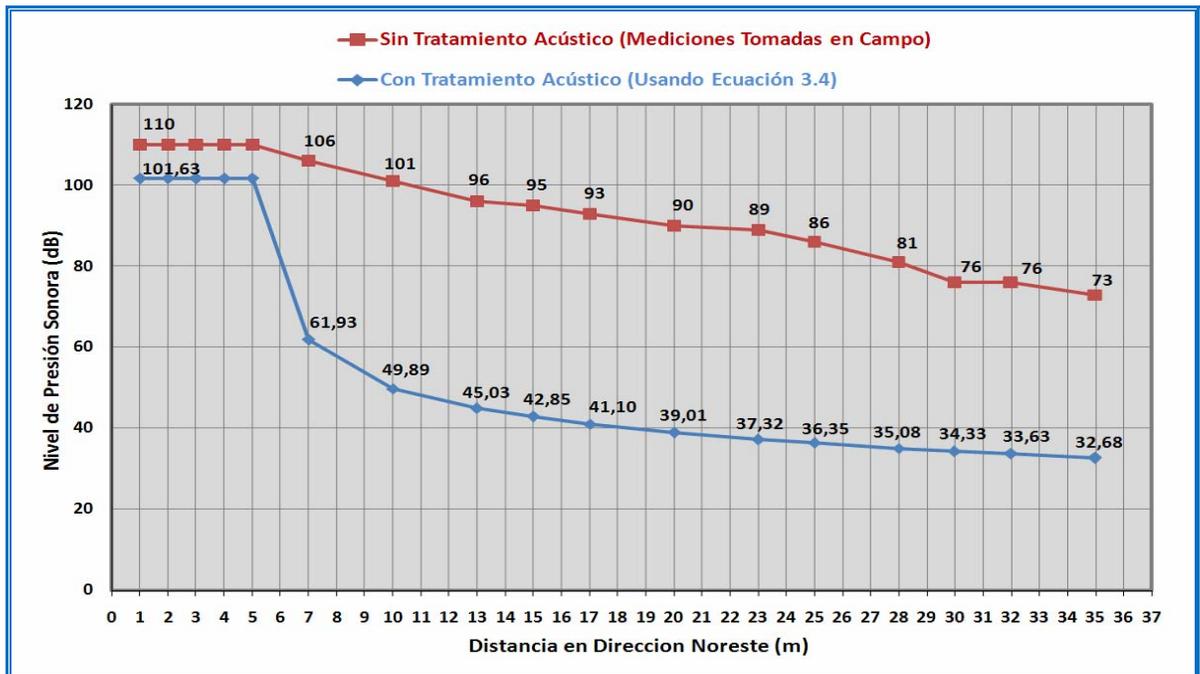


Figura 4.19. Comportamiento de los niveles de presión sonora con y sin tratamiento acústico respectivamente en la dirección noreste partiendo desde el interior de la subestación.

En la gráfica anterior se pueden observar dos conductas o tendencias distintas entre ellas; esto debido a que una representa el comportamiento de los niveles de presión sonora antes de insonorizar la subestación (color naranja), y la otra simboliza el comportamiento de los mismos después de haber realizado el tratamiento acústico al recinto estudiado (color azul).

Como se mencionó previamente la gráfica naranja de la Fig.4.19 muestra la tendencia del descenso de los niveles de presión sonora medidos en campo, en la dirección noreste antes de tratar acústicamente la subestación, es decir, sin la instalación de materiales absorbentes del sonido en las superficies internas y sin ningún dispositivo o silenciador en la ventana de la sala de generación.

En ésta tendencia se observa que los índices de ruido van decreciendo de manera progresiva, desde los 110 dB dentro de la subestación hasta los 73 dB a una distancia de 35 m en dirección noreste.

Dicho comportamiento sonoro no permite cumplir con los niveles de exposición estipulados en la norma COVENIN 1565-95, debido a que se puede observar que a una distancia de 25 m los índices de ruido todavía superan dichos niveles estipulados por la norma. Este comportamiento se debe a que la subestación carece de medidas acústicas y no posee silenciadores en sus ventanas para la respectiva reducción de niveles sonoros hacia el exterior y alrededores de la caseta.

Se dice que no permite cumplir con lo estipulado en la norma, ya que a una distancia de 15 m de la subestación existen áreas para la caminata y recreación en las instalaciones del parque, donde el ruido se mantiene por encima de lo requerido por la norma.

En cambio la gráfica azul muestra los niveles de presión sonora en la misma dirección, después de haber propuesto la instalación de los materiales absorbentes en el interior y el respectivo silenciador en la ventana de la pared noreste de la subestación.

Dicha gráfica se obtuvo aplicando la Ec. 3.4, partiendo desde un metro de proximidad desde la salida del silenciador delantero (como lo indica la norma COVENIN 1671) hasta una distancia de 35 m de alejamiento en la dirección noreste.

Esta gráfica muestra un comportamiento distinto con respecto a la gráfica anterior (naranja), partiendo desde 101,63 dB en el entorno interior de la caseta, esto debido a que en ese tramo los índices sonoros se ven disminuidos por el nivel de reducción de ruido que ejercen los materiales absorbentes instalados en el interior de la subestación.

El resultado de la implementación del silenciador delantero del sistema de insonorización en la caseta, se nota directamente en la gráfica azul y se observa que a una distancia de 2 m en el exterior de la subestación se tienen unos 61,93 dB de nivel de presión sonora, los cuales son mucho menores a los 106 dB de ruido existentes a la misma distancia sin tratamiento acústico.

Cabe destacar que estos 61,93 dB están ubicados a un metro de distancia del silenciador, debido a que el mismo sobresale un metro hacia el exterior de la subestación.

Como se puede observar en la grafica azul, a medida que se incrementa la distancia de alejamiento con respecto a la subestación, se ven reducidos progresiva y constantemente los niveles de presión sonora, alcanzando unos 34,33 dB a una distancia de 25 m de alejamiento desde la pared noreste de la subestación en la dirección mencionada previamente.

Lo que lleva a concluir que el sistema de insonorización conformado por el revestimiento interno y los silenciadores propuestos, brindan muy buenos resultados desde la salida de los atenuadores de ruido.

Como se dijo anteriormente la instalación del sistema de insonorización a la caseta resulta una muy buena opción acústica, porque éste permite cumplir de manera bastante confiable con todos los requerimientos establecidos en la norma COVENIN 1565-95 y los expuestos en la Gaceta Oficial N° 4418, aprobada en abril de 1992 en Venezuela.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- ✓ La arquitectura de la caseta donde se localizan los grupos electrógenos no cuenta con las consideraciones acústicas mínimas que deben ser tomadas para la construcción de espacios reductores de ruido.
- ✓ Los niveles de presión sonora del lado noroeste son 93 dB a 15 m y de 87 dB a 20 m del lado noreste, lo cual indica que estos niveles no cumplen con lo estipulado en la norma COVENIN 1565-95.
- ✓ El área acústica más crítica de la subestación se encuentra del lado noreste, debido a que es la que perjudica en mayor parte y directamente al parque de diversiones.
- ✓ Las superficies internas de la subestación en general, son reflectantes y por ende carecen de un apropiado coeficiente de reducción de ruido que genere una buena absorción sonora.
- ✓ Los materiales absorbentes que fueron seleccionados deberán ser instalados mediante un montaje TIPO A como se especifica en la norma ASTM E-795,

debido a que dicho montaje ayuda a disminuir el nivel de presión sonora del ruido en las frecuencias centrales de 1000hz.

- ✓ Luego de tratar acústicamente la caseta, el tiempo de reverberación en el interior de la misma, disminuye en más del 50 % sin tomar en cuenta los silenciadores instalados.
- ✓ Los silenciadores traseros disminuyen los niveles de presión sonora hasta los 78,7 dB distribuidos homogéneamente en la salida del aire por el lado suroeste de la subestación.
- ✓ El silenciador delantero reduce los niveles de presión sonora de 101,63 dB hasta los 61,93 dB a un metro de la entrada de aire de la subestación en la pared noreste.
- ✓ El silenciador delantero es más eficiente que los silenciadores traseros debido a que reduce mayor cantidad del ruido generado por los equipos.
- ✓ El conjunto de los tres silenciadores y el recubrimiento de las superficies internas de la subestación, permiten cumplir sin ningún inconveniente los niveles máximos exigidos en la Gaceta Oficial N° 4418 aprobada en abril de 1992 en Venezuela y lo establecidos en la norma COVENIN 1565-95.

5.2 RECOMENDACIONES

- ✓ Dotar al personal que labore en área de los grupos electrógenos con tapones de oídos o en su defecto protectores auditivos, para evitar lesiones auditivas producidas por los altos niveles de presión sonora existentes dentro de la subestación.

- ✓ Realizar el mismo estudio acústico para la otra subestación existente en el extremo noroeste del parque de diversiones.

- ✓ Cubrir los silenciadores con pintura anticorrosiva para prolongar su tiempo de vida.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rojas, R. A. **“Evaluación del riesgo físico ruido en las unidades de procesos y plantas de la refinería de puerto la cruz”**. Trabajo de Grado, Departamento de Sistemas Industriales, UDO, Puerto la Cruz (2006).
- [2] Pereira, A. **“Estudio de los riesgos físicos ocupacionales en cuanto a ruido, vibración e iluminación de la planta de extracción Santa Bárbara, ubicada en el Municipio Santa Bárbara, Estado Monagas”**. Trabajo de Grado, Departamento de Sistemas Industriales, UDO, Puerto la Cruz (2003).
- [3] Hernández, P. M. **“Reducción del nivel sonoro en una sala de turbinas a gas de CADAFE”**. Trabajo de Grado, Departamento de Mecánica, UDO, Puerto la Cruz (1990).
- [4] Verseci, E. **“Evaluación de ruidos en una sala con turbinas a gas”**. Trabajo de Grado, Departamento de Mecánica, UDO, Puerto la Cruz (1986).
- [5]. Catálogo Tecsound-Texsa. **“Sistemas de aislamiento acústico para obra nueva y rehabilitación”**. Segunda Edición, Texsa S.A, España (2004).

- [6] Harris, C. M. **“Manual de medidas acústicas y control de ruido”**. Mc.Graw-Hill. Tercera Edición, Volumen I. España (1995).
- [7] Crocker, M. J. y Price A. J. **“Noise y noise control”**. CRCPRESS Inc. Volumen 1 (1975).
- [8] Miyara, F. **“Control de ruido”**. Universidad de Rosario. Argentina (1999).
- [9] Ballou, G. **“Handbook for sound engineers”**. Howard W. Sams & Company, Tercera Edición, Indianapolis-Indiana, USA (1987).
- [10] Kogan, M. P. **“Análisis de la eficiencia de la ponderación “A” para evaluar efectos del ruido en el ser humano”**. Valdivia, Chile (2005).
- [11] García, B y Garrido, F. J. **“Contaminación acústica en nuestras ciudades”**. Fundación “La Caixa”. España (2003).
- [12] Harris, C. M. **“Manual de medidas acústicas y control de ruido”**. Mc.Graw-Hill. Tercera Edición, Volumen II. España (1995).
- [13] <http://www.directindustry.es/prod/acustica-integral/silenciador-54856-362357.html>, (17 de Septiembre del 2009)

- [14] <http://www.decibel.com.ar/espanol/silenciadores.php>, (6 de Octubre del 2009)
- [15] Comelecinsa Power Systems C.A. **“Manual de criterios y normas técnicas para la instalación de grupos electrógenos de suministro de energía eléctrica de emergencia”**.
- [16] Comelecinsa Power Systems C.A. **“Cursos de certificación para ingenieros y técnicos en grupos electrógenos”**. Modulo N° 1.
- [17] Comelecinsa Power Systems C.A. **“Cursos de certificación para ingenieros y técnicos en grupos electrógenos”**. Modulo N° 3.
- [18] FG Wilson (engineering) LTD. **“Grupo eléctrico manual del usuario”**. Reino Unido (2005).

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

TÍTULO	“DISEÑO DE UN SISTEMA DE INSONORIZACIÓN PARA UNA SALA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA COMPUESTA POR EQUIPOS ELECTRÓGENOS EN UN PARQUE DE ENTRETENIMIENTO ACUÁTICO”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Ramos Estrada Julio César	CVLAC: 16.252.307 E MAIL: julioramos_jcre@hotmail.com

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Ruido

Sonido

Normas COVENIN

Sistema de insonorización

Grupos Electrógenos

Riesgos Ocupacionales

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Mecánica

RESUMEN (ABSTRACT):

El presente proyecto tiene como finalidad la implementación de un sistema de insonorización en una subestación eléctrica, donde se encuentran dos grupos de equipos electrógenos, los cuales emiten altos niveles de ruido hacia el exterior y contaminan acústicamente las áreas adyacentes de ésta. Para dicha implementación fue necesario determinar las propiedades acústicas del ruido emitido por los equipos (P , L_P , W , L_W , I , L_I , entre otras), y las características del espacio físico donde se encontraban ubicados. Luego de establecer dichas cuantificaciones, se procedió a determinar la absorción sonora antes y después de tratar acústicamente, para así recomendar los materiales absorbentes a instalar en las superficies internas de la subestación. Seguidamente se determinó el nivel de reducción de ruido producto de dichos materiales instalados. Posteriormente fueron diseñados los silenciadores para las ventanas traseras y delantera de la subestación, utilizando materiales acústicos con características similares a los recomendados previamente, y de esta manera terminar de constituir el sistema de insonorización. Una vez conformado dicho sistema, se determinaron los niveles de ruido en las zonas adyacentes a la sala, obteniendo excelentes resultados, logrando disminuir estos niveles de 110 dB hasta 61,93 dB en la salida del silenciador delantero, donde se encontraba el área más crítica, permitiendo de ésta manera cumplir con lo establecido en la norma COVENIN 1565-95.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU (X)	JU
Orlando, Ayala	CVLAC:	11.420.758			
	E_MAIL	omayah@gmail.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU (X)
Carlos, Gomes	CVLAC:	10.305.208			
	E_MAIL	carlos.j.gomes@gmail.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU (X)
José, Rengel	CVLAC:	9.278.475			
	E_MAIL	rengel66@hotmail.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU (X)

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

AÑO	MES	DÍA
2010	06	30

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS INSONORIZACIÓN.doc	Aplicación/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M
N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7
8 9.

ALCANCE

ESPACIAL:.....(OPCIONAL)

TEMPORAL:.....(OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

INGENIERO MECÁNICO

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

PREGRADO

ÁREA DE ESTUDIO:

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

INSTITUCIÓN:

UNIVERSIDAD DE ORIENTE. NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajo de grado:
“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo participara al Consejo Universitario”.

Julio César Ramos Estrada

AUTOR

Orlando Ayala

Carlos Gomes

José Rengel

TUTOR

JURADO 1

JURADO 2

POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS
