



# Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Acústica

Profesor Patrocinante  
René Schmidt U.  
Químico  
Dpto. Calidad y Medio Ambiente  
Enap Refinerías Bio Bio

Profesor Co-Patrocinante  
Víctor Poblete R.  
Ingeniero Acústico  
Instituto de Acústica  
Universidad Austral de Chile

Profesor Informante  
Ricardo Soto N.  
Ingeniero Civil Químico  
Dpto. Calidad y Medio Ambiente  
Enap Refinerías Bio Bio

## **IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE MONITOREO CONTINUO DE RUIDO EN ENAP REFINERÍAS BIO BIO**

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Licenciado en Acústica y al título profesional de Ingeniero Acústico.

**FREDDY ANDRÉS GUZMÁN GARCÉS**  
**VALDIVIA – CHILE**  
**2006**

*Dedicado a mi madre y a mi hermano*

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>8</b>
<b>1. RESUMEN</b> .....	<b>11</b>
<b>2. SUMMARY</b> .....	<b>12</b>
<b>3. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>13</b>
<b>4. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
4.1 OBJETIVO GENERAL .....	16
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>5. ANTECEDENTES GENERALES</b> .....	<b>17</b>
5.1 FUENTES SONORAS.....	19
5.2 MEDICIONES DE EMISIÓN SONORA.....	21
5.2.1 Estándar Internacional ISO 2204:1979 .....	26
5.2.2 Series ISO 3740-3747 .....	29
5.2.3 Estándar Internacional ISO 8297:1994 .....	32
5.3 MEDICIONES DE INCIDENCIA SONORA.....	38
5.3.1 Estándar Internacional ISO 1996-1:1982 .....	42
5.3.2 Estándar Internacional ISO 1996-2:1987 .....	43
5.4. MODELOS DE PREDICCIÓN SONORA.....	44
5.4.1 Los algoritmos .....	45
5.4.2 Métodos de cálculo .....	46
5.4.3 Validación.....	47
5.4.4 Precisión y exactitud .....	48
5.4.5 Programas computacionales destinados a la modelación del ruido .....	50
5.5 ESTABLECIMIENTO DE LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES .....	52
5.5.1 Procedimientos para establecer límites.....	52
5.5.2 Regulaciones y límites de ruido en otros países .....	54
5.6 NORMATIVA LOCAL VIGENTE .....	60

5.6.1 Decreto Supremo N° 146/97 del MINSEGPRES.....	61
5.7 SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS DE RUIDO EN LA INDUSTRIA .....	67
5.7.1 Identificación de los problemas de ruido .....	67
5.7.2 Métodos de cuantificación.....	68
5.7.3 Organización y planeamiento.....	70
5.7.4 Reducción técnica del ruido .....	71
5.7.5 Costo del control de ruido .....	72
<b>6. DESCRIPCIÓN DE LA RED DE MONITOREO CONTINUO DE RUIDO.....</b>	<b>73</b>
6.1 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN .....	73
6.2 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE LA RED DE MONITOREO .....	74
6.3 SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE LA RED DE MONITOREO.....	76
6.4 RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS.....	78
<b>7. MODELO DE PREDICCIÓN DE NIVELES SONOROS EN LOS PUNTOS RECEPTORES DE MAYOR SENSIBILIDAD .....</b>	<b>80</b>
7.1 ESTÁNDAR INTERNACIONAL ISO 9613-2:1996 .....	81
7.1.1 Divergencia geométrica esférica .....	84
7.1.2 Absorción atmosférica.....	85
7.1.3 Efectos del suelo.....	85
7.1.4 Apantallamiento .....	86
7.1.5 Reflexiones .....	90
7.1.6 Follaje.....	92
7.1.7 Sitios industriales .....	93
7.1.8 Exactitud y limitaciones del método .....	94
7.2 ATENUACIÓN SONORA DEBIDA A LOS EFECTOS METEOROLÓGICOS.....	95
7.3 MODELO DE PREDICCIÓN DE NIVELES SONOROS.....	100
<b>8. APLICACIÓN .....</b>	<b>116</b>
<b>9. RESULTADOS.....</b>	<b>119</b>
9.1 DATOS DE ENTRADA .....	119
9.1.1 Condiciones prevalecientes en el área de influencia.....	119
9.1.2 Datos cualitativos .....	122
9.2 RESULTADOS OBTENIDOS .....	124
9.2.1 Atenuaciones resultantes .....	124

9.2.2 Promedio de los índices de diferencia de atenuación .....	128
9.2.3 Error estimado del modelo planteado.....	128
9.2.4 Validación del modelo .....	134
9.2.5 Seguimiento de las emisiones de ruido.....	139
<b>10. DISCUSIÓN .....</b>	<b>142</b>
<b>11. CONCLUSIONES .....</b>	<b>144</b>
<b>12. AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>145</b>
<b>13. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>146</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE ENAP REFINERÍAS BIO BIO. ....	14
FIGURA 2: MECANISMO BÁSICO DE GENERACIÓN DE RUIDO EN UNA MÁQUINA. ....	20
FIGURA 3: TRANSMISIÓN DEL RUIDO A TRAVÉS DE LAS ESTRUCTURAS DE LA BOMBA HACIA LA SUPERFICIE.....	21
FIGURA 4: DISTRIBUCIÓN DE LAS POSICIONES DE MEDICIÓN SOBRE UNA SUPERFICIE IMAGINARIA HEMIESFÉRICA Y PARALELEPÍPEDA QUE ENCIERRA A LA FUENTE SONORA. ....	30
FIGURA 5: POSICIONES DEL MICRÓFONO EN EL CONTORNO DE MEDICIÓN ALREDEDOR DE LA PLANTA. ....	33
FIGURA 6: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MÉTODO EMPLEADO EN LA DETERMINACIÓN DE ERRORES Y DESVIACIONES DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN SONORA. ....	49
FIGURA 7: RELACIONES ENTRE LAS PARTES EN EL PROCESO DE DESARROLLO, PRUEBA Y APROBACIÓN DEL SOFTWARE DE MODELACIÓN.....	51
FIGURA 8: MONITOR MAESTRANZA, MONITOR 4 SUR Y MONITOR 7 SUR.....	74
FIGURA 9: UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN. ....	75
FIGURA 10: SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE LA RED DE MONITOREO CONTINUO DE RUIDO. ....	77
FIGURA 11: INSTALACIÓN EN TERRENO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN.....	77
FIGURA 12: VISTA DE DOS OBSTÁCULOS PRESENTES ENTRE LA FUENTE (S) Y EL RECEPTOR (R).....	87
FIGURA 13: VARIABLES GEOMÉTRICAS A CONSIDERAR PARA CALCULAR LAS DIFERENCIAS ENTRE LOS CAMINOS DE PROPAGACIÓN EN PRESENCIA DE DIFRACCIÓN DOBLE. ....	90
FIGURA 14: GENERACIÓN DE UNA REFLEXIÓN ESPECULAR DESDE UN OBSTÁCULO.....	92
FIGURA 15: ATENUACIÓN A TRAVÉS DE FOLLAJE DENSO. ....	93
FIGURA 16: ATENUACIÓN SONORA DEBIDA A LA PROPAGACIÓN A TRAVÉS DE SITIOS INDUSTRIALES.....	94
FIGURA 17: PUNTOS DE MAYOR IMPACTO ACÚSTICO SOBRE EL ÁREA DE INFLUENCIA. ....	101
FIGURA 18: DETALLE DE LA ZONA EN TORNO AL PUNTO PP14.....	121

FIGURA 19: DISTRIBUCIÓN HORARIA (DESPLAZAMIENTOS POR CUARTO DE HORA)  
PARA DÍA LABORAL EN EL GRAN CONCEPCIÓN. .... 135

FIGURA 20: VALORES DE LOS PROMEDIOS DE DIFERENCIAS DE NIVELES  
OBTENIDOS PARA EL INTERVALO TEMPORAL DE COMPARACIÓN. .... 137

FIGURA 21: DISTRIBUCIÓN DE LOS PROMEDIOS DE DIFERENCIA DE NIVELES EN EL  
INTERVALO TEMPORAL DE COMPARACIÓN. .... 138

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 – PRINCIPALES NORMAS DESTINADAS A LA DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES SONOROS EMITIDOS POR FUENTES DE RUIDO INDUSTRIAL. ....	23
TABLA 2 – APLICABILIDAD DE LOS DIVERSOS MÉTODOS DE MEDICIÓN.....	25
TABLA 3 – DISMINUCIÓN DEL NIVEL DE PRESIÓN SONORA DEBIDO A LA ABSORCIÓN DEL AIRE.....	37
TABLA 4 – TÉRMINOS DE ATENUACIÓN PRESENTES EN LOS PRINCIPALES MODELOS DE PREDICCIÓN.....	47
TABLA 5 – EXACTITUD ESTIMADA PARA CADA MODELO DE PREDICCIÓN. ....	48
TABLA 6 – VALORES LÍMITES DE EXPOSICIÓN AL RUIDO INDUSTRIAL PERTENECIENTE AL CONSEJO FEDERAL SUIZO (REGLAMENTO 814.41).....	55
TABLA 7 – LÍMITES DE RUIDO ESTABLECIDOS EN DIFERENTES PAÍSES PARA LAS INSTALACIONES INDUSTRIALES EN ÁREAS RESIDENCIALES.....	56
TABLA 8 – NIVELES SONOROS RECOMENDADOS POR LA EPA PARA FUENTES DE RUIDO INDUSTRIAL. ....	57
TABLA 9 – PENALIZACIONES POR PRESENCIA DE IMPULSOS Y TONOS PUROS. ....	59
TABLA 10 – VALORES GUÍA PARA EL RUIDO URBANO EN AMBIENTES ESPECÍFICOS.....	60
TABLA 11 – NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES ESTABLECIDOS EN EL D.S. N° 146/97 DEL MINSEGPRES. ....	61
TABLA 12 – COEFICIENTE DE ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA, $\alpha$ , PARA CADA BANDA DE OCTAVA.....	85
TABLA 13 – ATENUACIÓN SONORA DEBIDO A LA PROPAGACIÓN A UNA DISTANCIA “D” A TRAVÉS DE UN FOLLAJE DENSO.....	93
TABLA 14 – ATENUACIÓN SONORA DEBIDA A LA PROPAGACIÓN A TRAVÉS DE PLANTAS INDUSTRIALES.....	94
TABLA 15 – EXACTITUD ESTIMADA DEL MODELO DE PREDICCIÓN PARA RUIDO DE BANDA ANCHA.....	95
TABLA 16 – CLASIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS DE ACUERDO A PASQUILL Y TURNER.....	96
TABLA 17 – CATEGORIZACIÓN DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS SEGÚN PASQUILL.....	97
TABLA 18 – PROMEDIO ANUAL DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. ....	120
TABLA 19 – VALORES PROMEDIO DEL FLUJO VEHICULAR. ....	122

TABLA 20 – PRINCIPALES FUENTES SONORAS PERTENECIENTES A LA REFINERÍA QUE INCIDEN DIRECTAMENTE EN LOS PUNTOS DE EVALUACIÓN. .... 123

TABLA 21 – ATENUACIONES RESULTANTES EN LOS DISTINTOS CAMINOS DE PROPAGACIÓN DESDE CADA FUENTE SONORA HACIA EL MONITOR MAESTRANZA. .... 125

TABLA 22 – ATENUACIONES RESULTANTES EN LOS DISTINTOS CAMINOS DE PROPAGACIÓN DESDE CADA FUENTE SONORA HACIA EL MONITOR 4 SUR. .... 125

TABLA 23 – ATENUACIONES RESULTANTES EN LOS DISTINTOS CAMINOS DE PROPAGACIÓN DESDE CADA FUENTE SONORA HACIA EL MONITOR 7 SUR. .... 126

TABLA 24 – ATENUACIONES RESULTANTES EN LOS DISTINTOS CAMINOS DE PROPAGACIÓN DESDE CADA FUENTE SONORA HACIA EL PUNTO PP12. .... 126

TABLA 25 – ATENUACIONES RESULTANTES EN LOS DISTINTOS CAMINOS DE PROPAGACIÓN DESDE CADA FUENTE SONORA HACIA EL PUNTO PP14. .... 127

TABLA 26 – ATENUACIONES RESULTANTES EN LOS DISTINTOS CAMINOS DE PROPAGACIÓN DESDE CADA FUENTE SONORA HACIA EL PUNTO PP15. .... 127

TABLA 27 – VALORES PROMEDIO DE LOS ÍNDICES DE DIFERENCIA DE ATENUACIÓN. .... 128

TABLA 28 – ERROR ESTIMADO EN LA APLICACIÓN DE LA CONSTANTE  $\bar{K}_{jM,PP12}$ , EXPRESADO EN DECIBELES. .... 129

TABLA 29 – ERROR ESTIMADO EN LA APLICACIÓN DE LA CONSTANTE  $\bar{K}_{jM,PP14}$ , EXPRESADO EN DECIBELES. .... 130

TABLA 30 – ERROR ESTIMADO EN LA APLICACIÓN DE LA CONSTANTE  $\bar{K}_{jM,PP15}$ , EXPRESADO EN DECIBELES. .... 130

TABLA 31 – ERROR ESTIMADO EN LA APLICACIÓN DE LA CONSTANTE  $\bar{K}_{j4S,PP12}$ , EXPRESADO EN DECIBELES. .... 131

TABLA 32 – ERROR ESTIMADO EN LA APLICACIÓN DE LA CONSTANTE  $\bar{K}_{j4S,PP14}$ , EXPRESADO EN DECIBELES. .... 131

TABLA 33 – ERROR ESTIMADO EN LA APLICACIÓN DE LA CONSTANTE  $\bar{K}_{j4S,PP15}$ , EXPRESADO EN DECIBELES. .... 132

TABLA 34 – ERROR ESTIMADO EN LA APLICACIÓN DE LA CONSTANTE  $\bar{K}_{j7S,PP12}$ , EXPRESADO EN DECIBELES. .... 132

TABLA 35 – ERROR ESTIMADO EN LA APLICACIÓN DE LA CONSTANTE  $\bar{K}_{j7S,PP14}$ , EXPRESADO EN DECIBELES. .... 133

TABLA 36 – ERROR ESTIMADO EN LA APLICACIÓN DE LA CONSTANTE  $\bar{K}_{j7S,PP15}$ ,  
EXPRESADO EN DECIBELES. .... 133

TABLA 37 – DISTRIBUCIÓN DE VIAJES PROYECTADOS PARA EL GRAN  
CONCEPCIÓN ESTIMADOS PARA HORARIO NOCTURNO. .... 135

## 1. RESUMEN

El presente trabajo tiene por finalidad la implementación de una red de monitoreo continuo de ruido en la periferia del recinto perteneciente a la empresa Enap Refinerías Bio Bio, con el objeto de evaluar la incidencia sonora en su área de influencia y así verificar el cumplimiento con la normativa.

Se presentan los antecedentes científicos y técnicos para implementar y homologar la red de monitoreo continuo de ruido de acuerdo a lo establecido en el D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES. Esta herramienta de evaluación está basada en tres estaciones fijas cuyo funcionamiento se describe en el presente trabajo, planteándose un modelo que predice los niveles sonoros en los tres puntos identificados como los de mayor impacto acústico.

La validación consistió en la comparación de los niveles proyectados con datos reales, obteniendo un error de 2.3 dB, desviación inferior a los presentados por el método de ISO 9613. La aplicación se realizó siguiendo el procedimiento de evaluación de la incidencia sonora generada por fuentes que emiten ruido fluctuante, obteniendo como resultado el Nivel de Presión Sonora Corregido (NPC), y con esto, la descripción física del ruido ambiental en el área del suelo que es de interés diagnosticar, validando así la red de monitoreo continuo de ruido perteneciente a Enap Refinerías Bio Bio, homologada al D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES, como una herramienta de evaluación de las emisiones de ruidos molestos generados por la refinería, actuando como fuente sonora fija.

En adición a lo descrito anteriormente, se exponen los antecedentes generales del ruido industrial que impacta en el ambiente, proporcionando los alcances pertinentes a la emisión, medición, predicción y evaluación del control del ruido en la actividad productiva, todo esto basado en la información actualizada que se encuentra presente en los estándares y documentos competentes en la materia.

## **2. SUMMARY**

The present work has by purpose the implementation of a network of continuous monitoring of noise in the periphery of the precinct pertaining to the company Enap Refinerías Bio Bio with the intention of evaluating the sonorous incidence in the three points of major acoustic impact pertaining to the area of influence of the refinery and thus to verify the fulfilment with the norm.

The scientific and technical antecedents appear to implement and to accredit the network of continuous monitoring of noise according to the established thing in the D.S. N° 146/97 of the MINSEGPRES. This tool of evaluation is based on three fixed stations whose operation is described in the present work, considering a model that predicts the sonorous levels in the three points identified like those of greater acoustic impact.

The validation consisted of the comparison of the levels projected with real data, obtaining an error of 2,3 dB, inferior deviation to the presented ones by the method of ISO 9613. The application was made following the procedure of evaluation of the sonorous incidence generated by sources that emit fluctuating noise, obtaining like result the Sound Pressure Level Corrected (PLC), and with this, the physical description of the environmental noise in the area of the ground that is of interest to diagnose, validating therefore the network of continuous monitoring of noise pertaining to Enap Refineries Bio Bio, accredited to the D.S. N° 146/97 of the MINSEGPRES, like a tool of evaluation of the emissions of annoying noises generated by the refinery, acting as fixed sonorous source.

In addition to the described thing previously, the general antecedents of the industrial noise are exposed that hits in the environment, providing the pertinent reaches to the emission, measurement, prediction and evaluation of the control of the noise in the productive activity, all this based on the updated information that it is in the standards and competent documents in the matter present.

### 3. INTRODUCCIÓN

Enap Refinerías Bio Bio es una empresa destinada a la refinación del petróleo. A partir de ésta materia prima, se obtienen derivados del crudo, tales como gasolinas, parafinas, pitch asfáltico, entre otros.

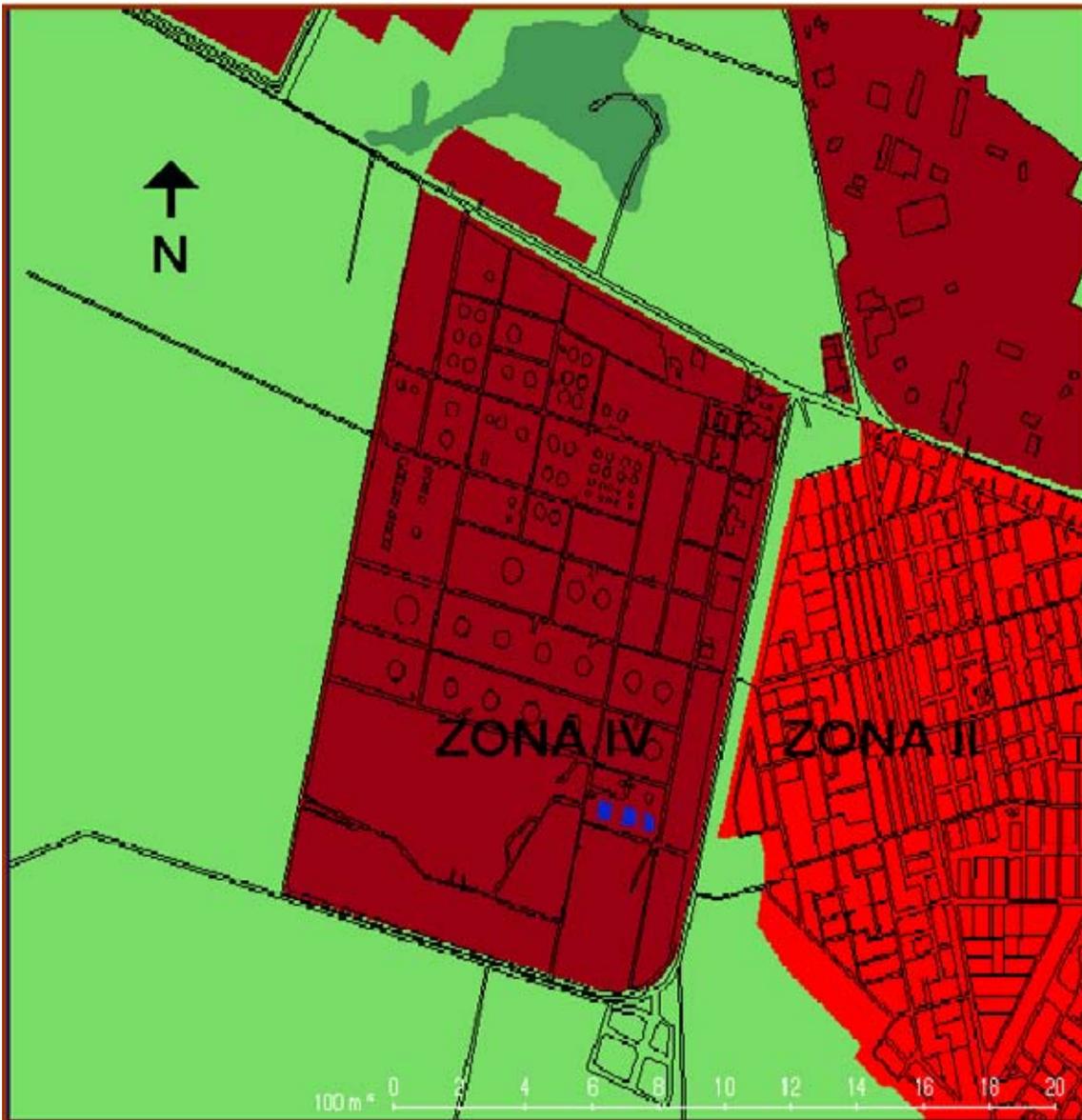
Enap Refinerías Bio Bio es una empresa del grupo ENAP que comenzó a operar en Chile el 29 de julio de 1966, con el fin de contribuir a satisfacer la demanda nacional de combustibles derivados del petróleo.

La capacidad actual de procesamiento de esta refinería es de dieciocho mil quinientos metros cúbicos diarios, lo cual le permite abastecer a más del 40 % del mercado nacional.

La empresa desarrolla sus actividades productivas en la comuna de Hualpén, Octava Región de Chile, a ocho kilómetros del Puerto de San Vicente. Si bien se encuentra en la zona industrial de la ciudad, ésta limita al Este con la población Hualpencillo, a menos de cien metros de distancia (Figura 1), lo que genera molestias a la población vecina debido a las emisiones que genera el complejo industrial.

Debido a su proceso productivo, ésta actividad industrial genera emisiones que impactan en el ambiente. Dichas emisiones se clasifican básicamente en emisiones líquidas (efluentes líquidos), emisiones sólidas y emisiones a la atmósfera, las cuales fundamentalmente consisten en Dióxido de Azufre, Material Particulado, Olores y Ruido.

En Enap Refinerías Bio Bio, la Gestión Ambiental está basada en el proceso de mejoramiento continuo, el cual permite dar cumplimiento a los compromisos y políticas ambientales de la empresa, a través de la formulación de planes que facilitan la generación de capacidades y competencias para implementar adecuadamente las acciones propuestas, las que, a su vez, deben ser medidas y monitoreadas durante su ejecución para evaluar su desempeño ambiental.



**Figura 1:** Ubicación geográfica de Enap Refinerías Bio Bio.

El impacto acústico generado por las instalaciones de proceso hacia la población colindante ha sido medido periódicamente desde 1997. Estas mediciones han sido efectuadas por la Asociación Chilena de Seguridad (ACHS), ACUS Ingeniería y Control Acústico, y personal de HFP Acoustical Consultants Inc (Canadá).

Los resultados obtenidos en dichas mediciones indican que los tres puntos de mayor impacto, ubicados en la población que se encuentra colindante a la

refinería, muestran una disminución paulatina en los niveles de ruido generados por las instalaciones de proceso de la refinería desde que se inició el programa de mitigación de ruidos en 1997.

Debido a que las medidas de mitigación no son suficientes para disminuir los impactos acústicos generados sobre el entorno humano, es necesario implementar un programa de seguimiento de emisiones de ruidos molestos, cuyo propósito puede sintetizarse en los siguientes puntos:

- a) Comprobar que las medidas de mitigación propuestas en el estudio de impacto acústico han sido realizadas.
- b) Proporcionar información acerca de la calidad de las medidas de mitigación adoptadas.
- c) Comprobar la cuantía de ciertos impactos cuando su predicción resulta difícil.
- d) Aplicar nuevas medidas de mitigación en el caso de que las ya implementadas no sean suficientes.
- e) Ser una fuente de datos para mejorar el contenido de futuros estudios de impacto acústico.
- f) Detectar alteraciones no previstas en los futuros estudios de impacto acústico, debiendo en éste caso adoptarse nuevas medidas.

De acuerdo a lo planteado, y en cumplimiento con los compromisos acordados en el Protocolo de Acuerdos Ambientales, suscrito por Enap Refinerías Bio Bio con las autoridades de la Intendencia Regional, Servicio de Salud Talcahuano (SST), Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y la Ilustre Municipalidad de Talcahuano, la refinería implementó una red de monitoreo continuo de ruido que permite cuantificar la magnitud del impacto acústico en los tres puntos receptores de mayor sensibilidad, localizar las principales fuentes de ruido y mitigar sus emisiones.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo General**

Implementar una red de monitoreo continuo de ruido que verifique el cumplimiento de las emisiones de ruidos generados por Enap Refinerías Bio Bio hacia la comunidad de acuerdo con lo establecido en el D.S. N° 146/97 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia (MINSEGPRES).

### **4.2 Objetivos Específicos**

- Homologar la red de monitoreo continuo de ruido de acuerdo a lo establecido en el D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES.
- Desarrollar un modelo de predicción de niveles de ruido, basado en un estándar internacional, que permita estimar el nivel de presión sonora en los puntos de mayor impacto acústico pertenecientes al área de influencia de la refinería.

## 5. ANTECEDENTES GENERALES

En nuestra vida diaria estamos constantemente expuestos al ruido. En muchos países industrializados se ha desarrollado el concepto llamado “ruido comunitario” (o “acústica ambiental”, según otros autores), que consiste en la exposición al ruido ambiental fuera de las áreas de trabajo, el cual, ha ido en aumento en las últimas décadas, dando como resultado un problema ambiental severo. Las principales fuentes de ruido comunitario son producidas por el transporte, industrias, obras públicas, construcción, vecindario, entre otras más<sup>[4][7][13][33][34]</sup>.

De acuerdo a un muestreo representativo realizado en 1993, casi el 25% de la población europea se encuentra expuesta a niveles de ruido superiores a los 65 dBA provocados principalmente por los medios de transporte. El ruido industrial, aún afectando a un número inferior de personas, es un grave problema para los que están en presencia del impacto acústico producido por estas fuentes. Un estudio realizado en noruega el año 1996 indica que el 5% de la población se encuentra expuesta a niveles de ruido por sobre los 55 dBA que son provocados por industrias. Teniendo en cuenta que un nivel de presión sonora de 65 dBA perturba enormemente el acto de conciliar el sueño, se presentan, en la población afectada, estados emocionales desfavorables traducidos en reacciones de molestia, quedando en claro que el ruido comunitario (o ambiental) es un problema de salud ambiental genuino<sup>[13][34]</sup>.

El ruido no solo es un problema en los países industrializados, sino también en muchos que se encuentran en vías de desarrollo, especialmente debido al progreso tecnológico, urbanización e incremento del tráfico vehicular, ferroviario y aéreo. Por lo tanto, en las últimas décadas, cada vez más países en todo el mundo han reconocido que la lucha activa contra el ruido es necesaria, incrementándose el número de naciones en establecer regulaciones para evaluar y gestionar el ruido comunitario<sup>[7][13][34]</sup>.

Las regulaciones por ruido deberían implicar una disminución de éste. El objetivo de la disminución del ruido es proteger la salud y el bienestar de la

población. Con éste fin, deben crearse condiciones aceptables de vida para que las actividades humanas más importantes puedan ser llevadas a cabo sin molestias o interferencias en la medida que esto sea posible. Para lograr este objetivo, es necesario aplicar todas las medidas necesarias en el control del ruido, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones<sup>[13]</sup>:

- prevención y mitigación de emisiones;
- aplicación de tecnología acústicamente limpia (de bajo nivel de ruido);
- restricciones temporales para las actividades que son indebidamente ruidosas.

Frecuentemente, estas medidas no son suficientes para alcanzar condiciones aceptables de vida. Por lo tanto, deben aplicarse medidas adicionales, entre las cuales podemos nombrar:

- considerar el ruido en la planificación del uso del suelo;
- medidas de reducción del ruido en su camino de propagación;
- aislamiento acústico de viviendas y edificios.

El ruido emitido por complejos industriales es generado desde un arreglo de fuentes puntuales, lineales y superficiales distribuidas espacialmente sobre la(s) superficie(s) de la(s) instalación(es) perteneciente(s) a dicho perímetro, siendo su propagación generalmente de forma esférica a una distancia igual al doble de la mayor dimensión del área que encierra al(los) foco(s) emisor(es) considerado(s). Los niveles de ruido emitidos están generalmente relacionados con la potencia sonora de la instalación y con otros parámetros pertinentes en términos acústicos. Según la naturaleza del proceso productivo de la actividad industrial, el ruido procedente de estas fuentes puede ser constante durante ciertos periodos de tiempo, fluctuar considerablemente en intervalos temporales más extensos o aumentar en determinados instantes<sup>[7][13][23][33][34]</sup>.

La medición del ruido industrial juega un papel importante en el desarrollo del control sistemático de éste contaminante ambiental. Las mediciones pueden ser utilizadas para acreditar el cumplimiento con las regulaciones o criterios de

ruido, evaluar la eficacia de los diversos métodos de control y establecer metas ambientales factibles de realizar a nivel local<sup>[13]</sup>.

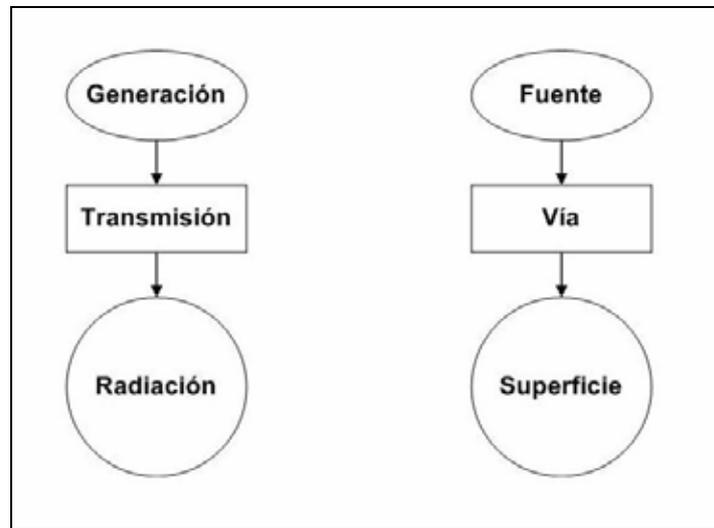
La industria basada en la refinación del petróleo, debido a su proceso productivo, cubre una gran variedad de fuentes de ruido, muchas de las cuales son de naturaleza compleja, estando en presencia de diversos tipos de equipamientos y maquinarias que actúan como fuentes sonoras, generando ruidos de banda ancha, energía sonora distribuida en la región de frecuencias bajas o altas y componentes tonales a lo largo de su espectro sonoro, dando como resultado patrones de ruido desagradables al oído humano. Las variaciones y diferencias de niveles están ligadas al proceso productivo de ésta actividad, pudiendo ocasionar ruidos impulsivos que impactan en el ambiente, lo que trae consigo un aumento considerable en las molestias sobre los receptores involucrados. Obviamente, los problemas ambientales en las empresas destinadas a la refinación del petróleo son comunes en muchos tipos de industrias<sup>[13][31]</sup>.

El ruido incidente sobre una población adyacente a una refinería de petróleo es difícil de cuantificar, debido principalmente a la fuerte influencia del ruido ambiental presente en la zona afectada (como el tráfico vehicular y aéreo, las actividades propias del vecindario, entre otras más) y a las condiciones meteorológicas presentes, como son la dirección y magnitud del viento<sup>[24]</sup>.

## **5.1 Fuentes Sonoras**

La mayor parte de las máquinas pueden considerarse como un ensamblaje de diversos componentes y piezas, siendo los componentes activos los que contienen a las fuentes de energía. Ejemplo de ello son los motores eléctricos, motores diesel, bombas, etc. Como es sabido, la potencia es convertida de una forma de energía a otra, como es el caso de energía eléctrica a mecánica. Asimismo, la máquina contiene componentes pasivos de ruido, tales como paneles, tanques de aceite, transporte de cargas, entre otras más<sup>[13]</sup>.

El mecanismo básico de radiación sonora generada por una maquinaria se muestra a continuación:



**Figura 2:** Mecanismo básico de generación de ruido en una máquina<sup>[13]</sup>.

La generación es definida como el fenómeno físico que crean las fuerzas dinámicas o presiones en un componente activo. La fuente es la ubicación del componente activo donde se lleva a cabo la generación del ruido. Un ejemplo simple de generación y fuente es la caída de un cuerpo a un disco metálico.

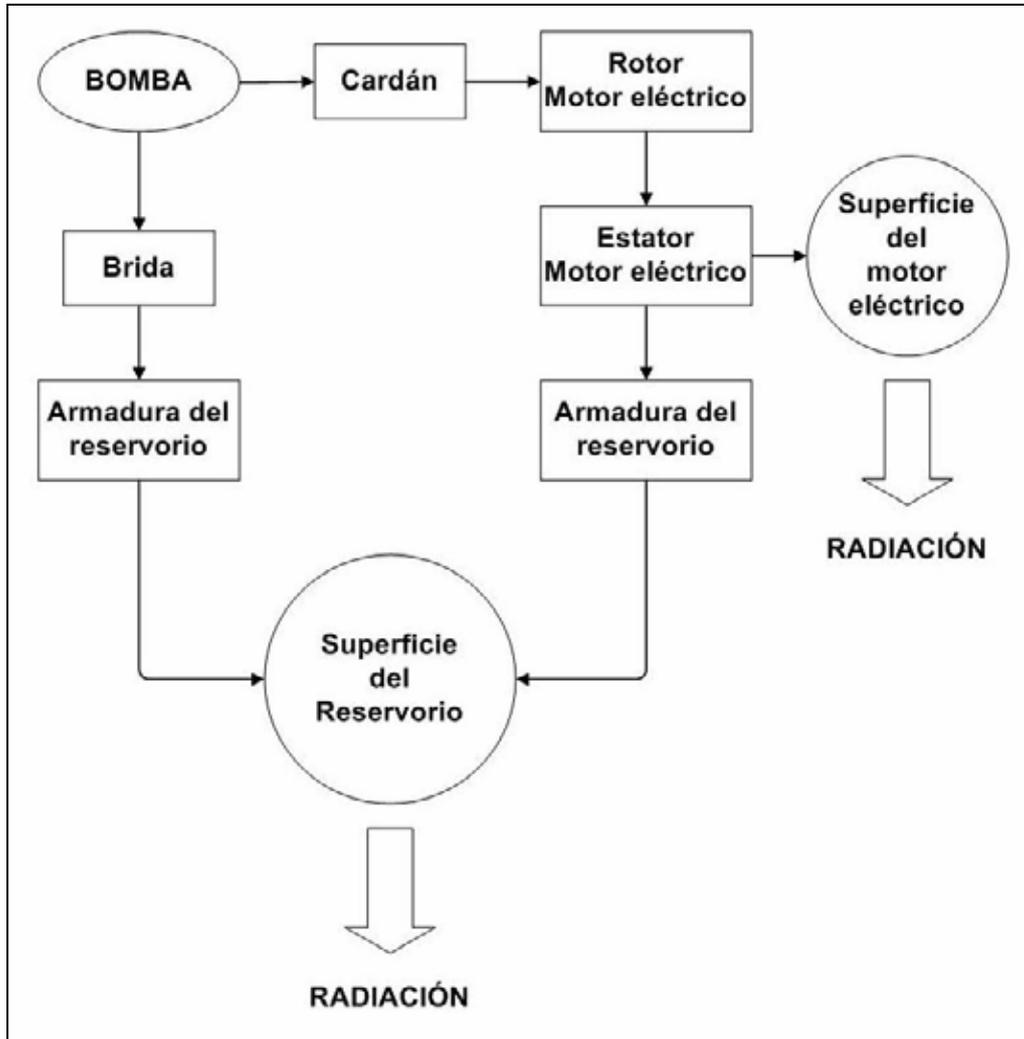
La transmisión se define como el proceso de propagación de las ondas sonoras en un medio que posee masa y elasticidad. Este medio de transporte de energía sonora puede ser gaseoso, líquido o sólido.

Las máquinas frecuentemente están formadas de partes macizas diseñadas para recepcionar las cargas estáticas de los componentes activos. A través de éstas, se transmiten fuerzas dinámicas o vibraciones en una ruta o vía de transmisión propia de cada fuente. Estas pueden ser clasificadas como fuentes que transmiten al aire libre, a líquidos o estructuras.

La radiación es el proceso de acoplamiento acústico entre la estructura y el medio que lo rodea. Para propósitos de control de ruido, la radiación es considerada desde la superficie de la estructura que proporciona la mayor

contribución al ruido producido por la máquina. Puede generarse una radiación de ruido que es transmitido a través del aire al final de ductos o tubos.

A modo de ejemplo, se muestra el caso de una bomba con la que se transmite ruido hacia la superficie, a través de las diferentes partes de su estructura.



**Figura 3:** Transmisión del ruido a través de las estructuras de la bomba hacia la superficie<sup>[13]</sup>.

## 5.2 Mediciones de Emisión Sonora

Existen muchas razones por las que se realizan mediciones de emisión en máquinas o instalaciones únicas o agrupadas. Algunas de las principales razones son<sup>[3][13][14][15]</sup>.

- comparación con otras fuentes de ruido del mismo tipo y tamaño;
- comparación con otras fuentes de ruido de distinto tipo y tamaño;
- acreditar el cumplimiento de una fuente sonora con algún límite de emisión establecido en algún estándar o criterio;
- determinar la cantidad de reducción de ruido precisa bajo ciertas circunstancias;
- desarrollar maquinaria y equipamiento silencioso, tecnología acústicamente limpia;
- investigaciones para definir las principales fuentes de ruido en las instalaciones industriales;
- evaluación de las medidas de control de ruido;
- niveles de ruido de referencia para utilizarse en modelos de predicción sonora;
- niveles sonoros de referencia a considerar en el momento de asignar la distribución espacial y orientación relativa de fuentes sonoras de nuevas instalaciones o ampliaciones pertenecientes a nuevos proyectos.

Actualmente existe una gran variedad de normas que dan a conocer los procedimientos y requisitos necesarios para realizar las mediciones destinadas a determinar la emisión generada por fuentes de ruido industrial, entregando como resultado el nivel de potencia sonora. Los principales organismos normalizadores con competencia en la materia son los siguientes:

- ISO (International Organization for Standardization)
- DIN (Deutsches Institut für Normung)
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure)
- IEC (International Electrotechnical Commission)
- BSI (British Standards Institution)
- ANSI (American National Standards Institute)
- ASTM (American Society for Testing and Materials)
- HMRI (Handleiding Meten en Rekenen Industrielawaai, Dutch)
- NT ACOU (NordTest Acoustic)

Con los métodos de medición mostrados en la Tabla 1 se estima que pueden ser evaluadas todas las situaciones de emisión sonora provenientes de actividades industriales.

**Tabla 1** – Principales normas destinadas a la determinación de los niveles sonoros emitidos por fuentes de ruido industrial.

<b>Organización</b>	<b>Referencia</b>	<b>Año</b>	<b>Título</b>
ISO, BS EN	3740	2000	Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources - Guidelines for the use of basic standards
ISO, BS EN	3744	1994	Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane
ISO, BS EN	3746	1995	Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane
ISO, BS	8297	1994	Acoustics - Determination of sound power levels of multisource industrial plants for evaluation of sound pressure levels in the environment - Engineering method
ISO, BS EN	9614-1	1993	Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity - Part 1: Measurement at discrete points
ISO, BS EN	9614-2	1996	Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity - Part 2: Measurement

			by scanning
ISO, BS EN	9614-3	2000	Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity - Part 3: Precision method for measurement by scanning
DIN	45635	varios	Geräuschmessung an Maschinen: Luftschallmessung (large number of specific standards for various machine types)
VDI	2571	1976	Schallabstrahlung von Industriebauten (Sound radiation from industrial buildings)
HMRI	II.2	1999	Geconcentreerde bronmethode (Concentrated source method)
HMRI	II.7	1999	Uitstraling gebouwen (Sound radiation from buildings)
NT ACOU	051	1985	Commuting machines: Noise
NT ACOU	070	1988	Noise sources - sound power level: Engineering method - Reference sound source, in situ
NT ACOU	080	1991	Industrial plants: Noise emission

Para seleccionar el método de medición más apropiado en una fuente de ruido en particular, deben ser evaluados los siguientes aspectos:

- a) el ambiente real de prueba;
- b) las características de la fuente; y
- c) el objetivo del ensayo.

A continuación, la Tabla 2 resume los principales aspectos de aplicabilidad de los métodos de medición usados en la actualidad<sup>[27]</sup>.

**Tabla 2** – Aplicabilidad de los diversos métodos de medición.

Condición	ISO 3744 (Ingeniería)	ISO 3746 (Estudio)	ISO 3747 (Fuente Sonora de Ref.)	NT ACOU 060 (Fuente Sonora de Ref.)	NT ACOU 070 (Fuente Sonora de Ref.)	ISO 8297 (Planta de Proceso)	ISO WG20/N45 (Extrapolación)	ISO 9614 y Nordtest (Intensidad)	Método de Esfera Nordtest	Método del Paralelepípedo Nordtest
R > 2d <sub>0</sub>	+	(+)	(+)	(+)	(+)		(+) > 2d <sub>0</sub>		+	
R < 2d <sub>0</sub>		+	+	+	+	+		+		+
Más de un plano reflectante			+	+	+	?	+	+	+	+
Suelo poroso			+	+	+		+	+	+	+
Fuentes múltiples						+	+		(+)	(+)
Fuente única	+	+	+	+	+			+	+	+
Información sobre directividad < 3 dB para ruido de fondo	+		+	+	+		+		+	
Corrección ambiental > 2 dB		+	+	+	+		+	+	+	+
Corrección ambiental > 7 dB			+	+	+		(+)	+	(+)	(+)
Número de posiciones de micrófono	10-20	4-30	5-30	3-30	3-30	varias	1-8	varias	4-8	3-30
R : radio de la esfera imaginaria; d <sub>0</sub> : dimensión máxima de la fuente sonora; + : método aplicable; (+) : aplicación limitada.										

Los estándares de medición de la ISO (International Organization for Standardization) deberían ser las normas de medición de referencia para las mediciones de emisión de ruido. A continuación, se dan a conocer los grados de precisión exigidos para los métodos de medición y descripción del ruido, a cargo de la norma ISO 2204:1979, y, posteriormente, se explican dos grupos de estándares ISO: la serie ISO 3740-3747 la cual abarca la medición de emisiones de máquinas e instalaciones únicas y la norma ISO 8297:1994,

estándar que determina el nivel de potencia sonora en plantas industriales multifuentes.

### **5.2.1 Estándar Internacional ISO 2204:1979**

Esta norma<sup>[16]</sup> describe los métodos generales para la medición del ruido y la evaluación de sus efectos sobre las personas.

Esta norma debe considerarse como una introducción a las instrucciones más especializadas contenidas en aquellas destinadas a describir los métodos de medición y evaluación acústica en los códigos de ensayo específicos y en los métodos de interpretación publicados por los organismos de normalización nacionales e internacionales.

El problema general en la clasificación de los problemas de ruido consiste principalmente en determinar las características de la fuente sonora y del ruido por ella emitido.

Para resolver los problemas de ese tipo, el nivel de presión sonora se mide en función del tiempo. Puede ser de banda ancha (todo el rango audible), o en bandas de 1/1 o 1/3 octava, o menor. Se pueden usar las redes de ponderación estandarizadas internacionalmente.

La elección del método de medición depende de las características de la fuente sonora y de su entorno, de la naturaleza del ruido y del grado de exactitud requerido para su descripción. Existen tres clases de métodos disponibles, los cuales son:

a) Método de estudio (grado 3)

Es aquel método que requiere menor cantidad de tiempo y equipos. Puede utilizarse para las comparaciones entre fuentes de ruido de características similares. El campo sonoro se describe por el nivel medido con un sonómetro. Se utiliza un número limitado de puntos de medición y no se realiza ningún

análisis detallado del entorno acústico. No obstante, se cuantifica siempre la variación del ruido medido en función del tiempo.

En caso de usar una curva de respuesta de frecuencia normalizada, se recomienda usar las redes de ponderación "A" o "C", aunque podría ser apropiado usar la escala lineal. En muchos casos prácticos, el nivel sonoro "C" otorga una buena aproximación para el nivel de presión sonora global. El nivel de presión sonora ponderado "A" es útil para la evaluación de la respuesta humana.

Este método tiene, por lo general, una validez limitada si es usado para evaluar medidas correctivas para reducir el ruido.

b) Método de ingeniería (grado 2)

Las mediciones del nivel de presión sonora se complementan con aquellas realizadas en bandas de 1/1 o 1/3 octava, o menor. Se analiza el entorno acústico con el fin de determinar su influencia sobre las mediciones. Los puntos de medición y el intervalo de frecuencias se eligen en función de las características de la fuente sonora y del entorno en la que ésta trabaja. Puede registrarse la dependencia del tiempo del nivel sonoro durante el periodo de observación.

Este método proporciona información que, generalmente, es suficiente para adoptar medidas de ingeniería en muchas situaciones.

c) Método de precisión (grado 1)

Este método da una descripción tan exacta como es posible realizar al problema del ruido.

Las mediciones del nivel de presión sonora se complementan con mediciones realizadas en bandas de 1/1 o 1/3 octava, o menor. Los registros se realizan en los intervalos de tiempo apropiados según la duración y las fluctuaciones del

ruido. Los puntos de medición y el intervalo de frecuencias se eligen de acuerdo con las características de la fuente de ruido y de su entorno, el que se analiza cuidadosamente. Si es posible, el efecto del entorno sobre las mediciones se cuantifica realizando las mediciones en condiciones controladas de laboratorio, por ejemplo, en campo libre o en cámara reverberante.

La utilización del método de precisión es requerido para situaciones complejas en las que se necesita una descripción tan exacta como es posible del campo sonoro presente al momento de las mediciones.

La instrumentación para los tres métodos debe cumplir con las especificaciones dadas en IEC 61260 (o su homóloga Norma Chilena NCh 2500). En el caso del método de precisión puede ser necesario utilizar instrumentos que cumplan con otras especificaciones, por ejemplo, en problemas relacionados con la medición de ruido impulsivo.

d) Presentación de los resultados

A partir de las mediciones efectuadas por el método de estudio, es posible calcular un nivel de presión sonora promedio (ISO 3746). Análogamente, para las mediciones realizadas por los métodos de ingeniería y de precisión, es posible calcular el nivel promedio del ruido en bandas de frecuencia, tanto para banda ancha o banda angosta.

Si el entorno es apropiado, es posible calcular también en nivel de potencia sonora de la fuente y cuantificar su directividad (ISO 3740).

Con esto, es posible evaluar la distribución de los niveles en función del tiempo para el ruido de tipo fluctuante e intermitente. En ciertos casos, esta función puede ser utilizada para calcular el nivel sonoro de un ruido estable que tenga el mismo efecto de aquel que está sujeto a ensayo (ISO 1996 e ISO 1999).

A partir del método de precisión es posible, además, evaluar las propiedades del ruido impulsivo y hacer una valoración precisa del nivel de potencia sonora de la fuente y determinar su directividad.

Cuando los datos obtenidos por estos métodos se comparan entre sí, o con otros, se debe tener la precaución de acreditar la validez de tales comparaciones en todos sus aspectos.

En ciertas ocasiones, el método de estudio conduce a resultados de gran valor para evaluar los efectos de un estímulo de ruido sobre el ser humano.

Los métodos de ingeniería y de precisión son, sin embargo, de una aplicación más amplia. A partir de los datos obtenidos utilizando estos métodos pueden ser calculados, con una precisión razonable, ciertas magnitudes relacionadas con los efectos psicofísicos del ruido sobre el ser humano.

### **5.2.2 Series ISO 3740-3747**

La serie ISO 3740-3747<sup>[3][13][14][15]</sup> es un conjunto de estándares para la medición de los niveles de emisión de ruido. Todos ellos están basados en el concepto del nivel de potencia sonora  $L_W$ . Esta serie incluye estándares de precisión (grado 1), para mediciones de laboratorio; y de estudio (grado 3), para mediciones in situ. Los niveles de potencia sonora obtenidos utilizando la serie ISO 3740-3747 deben ser esencialmente independientes de los ambientes en que son medidos.

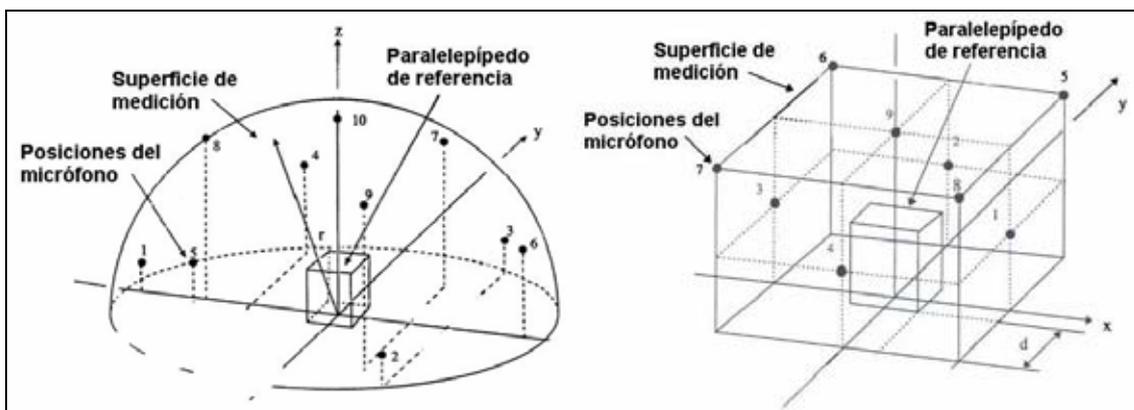
Existen dos problemas al momento de medir niveles de emisión in situ: las reflexiones casi horizontales, y el ruido de fondo generado por otras fuentes y/o procesos. Al utilizar los métodos de estudio ISO 3740-3747, se efectúan correcciones para la influencia de las reflexiones; el ruido de fondo es más difícil de manejar debido a que incide directamente, influenciando de gran forma a las mediciones. En un ambiente ruidoso, suele ser imposible aplicar métodos de cuantificación que aseguren la obtención de niveles de emisión de

ruido. En dichos casos, una buena alternativa puede ser realizar mediciones que utilicen estándares y equipos para medir intensidad sonora (ISO 9614).

Los métodos de medición de niveles de ruido in situ, de ingeniería del estándar ISO 3744 y de estudio perteneciente a ISO 3746, son de interés especial para mediciones de emisión en áreas abiertas y cerradas. El estándar ISO 3746 proporciona datos físicos que pueden ser útiles para: a) comparar máquinas que son de la misma clase y tienen el mismo tamaño; y b) clasificar el equipamiento en términos de su potencia sonora total. Si se requiere de información adicional, por ejemplo de los niveles de potencia sonora en bandas de octava, debería utilizarse la norma ISO 3744. Los datos de la ISO 3744 son apropiados para ser utilizados como referencia y determinar el nivel de presión sonora sobre un punto receptor a través de modelos de predicción sonora.

Estos estándares establecen el procedimiento para la medición y cálculo del nivel de potencia sonora, el que se describe resumidamente a continuación:

**Paso 1.** Se rodea la fuente con una superficie hipotética de área  $S$  (Figura 4), que bien puede ser un hemisferio o un paralelepípedo rectangular.



**Figura 4:** Distribución de las posiciones de medición sobre una superficie imaginaria hemisférica y paralelepípeda que encierra a la fuente sonora.

**Paso 2.** Se calcula el área de esta superficie hipotética. Si es un hemisferio,  $S$  viene dada por  $2\pi r^2$ , donde  $r$  es el radio del hemisferio; si es un

paralelepípedo rectangular,  $S$  viene dada por  $ab + 2(ac + bc)$ , donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  corresponden al largo, ancho y alto respectivamente.

**Paso 3.** Se mide el nivel de presión sonora en los puntos determinados sobre la superficie hipotética.

**Paso 4.** Se obtiene la media,  $\bar{L}_p$ , de los niveles de presión sonora medidos en el paso anterior a partir de la siguiente expresión:

$$\bar{L}_p = 10 \text{Log} \left[ \left( \frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pi}} \right] \quad \dots(5.1)$$

donde

$\bar{L}_p$  es el nivel de presión sonora promediado sobre la superficie de medición, dB;

$L_{pi}$  es el nivel de presión sonora con ponderación "A" o en bandas, que es el resultado de las  $i$  mediciones en los puntos designados;

$N$  es el número total de mediciones.

**Paso 5.** Por último, se calcula el nivel de potencia sonora a partir de la siguiente ecuación:

$$L_w = \bar{L}_p + 10 \text{Log}(S/S_0) \quad \dots(5.2)$$

donde  $S_0$  es el área de referencia,  $1 \text{ m}^2$ .

Este método, para determinar el nivel de potencia sonora, sólo puede ser utilizado si: a) las mediciones se realizan sobre un plano reflectante extendido, b) las dimensiones de la máquina no son excesivas y, c) el nivel del ruido de fondo no es excesivo.

### 5.2.3 Estándar Internacional ISO 8297:1994

Este estándar internacional<sup>[13][21]</sup> especifica un método de ingeniería para determinar el nivel de potencia sonora en plantas industriales multifuentes, el cual es relevante para la evaluación del ruido ambiental alrededor de la planta. El nivel de potencia sonora obtenido puede ser usado en un modelo de predicción para evaluar la incidencia sonora sobre un punto receptor.

Son medidos los niveles de presión sonora en las bandas de octava que van desde los 63 Hz hasta 4 kHz. Mediciones adicionales pueden ser hechas en las bandas de 31,5 Hz y 8 kHz.

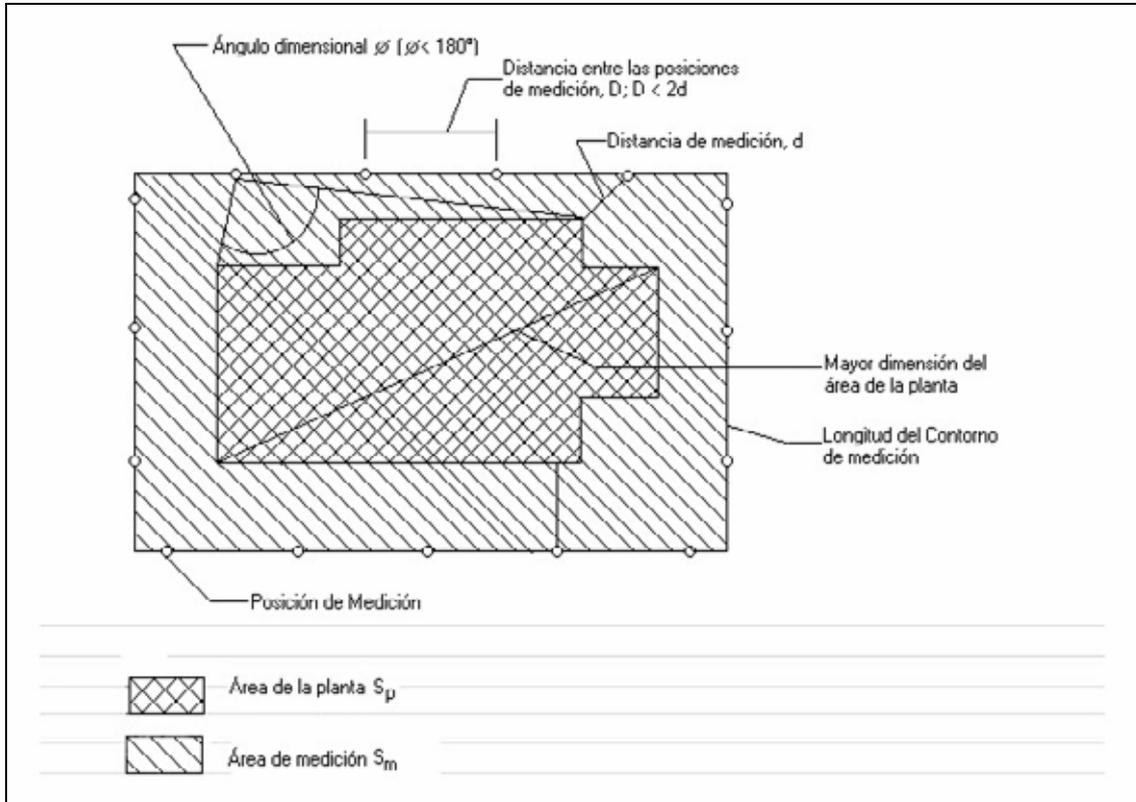
Los resultados obtenidos son expresados en niveles de potencia sonora en bandas de octava, y si es requerido, en niveles de potencia sonora con ponderación "A".

El método es aplicable en áreas industriales donde la mayoría de los equipos operan en el exterior, no encerrados en una edificación; ej: complejos petroquímicos, fábricas, etc. El método también es aplicable cuando hay movimiento de fuentes de forma cíclica u operación continua, tal como obstáculos, líneas o correas transportadoras. De esta manera, las mediciones deben ser efectuadas como mínimo en un ciclo de operación.

El método está limitado por el largo de la planta multifuente de ruido (una combinación de un número indeterminado de fuentes) teniendo sus principales dimensiones en el plano horizontal. Esto es aplicable a plantas industriales donde la mayor dimensión horizontal del área longitudinal de la instalación se encuentra aproximadamente entre los 16 m y 320 m.

El procedimiento de medición consiste en trazar una trayectoria de forma cerrada (contorno de medición) que rodea el área de la planta (Figura 5). Se procede a medir el nivel de presión sonora en posiciones equidistantes del micrófono a lo largo del contorno y, posteriormente, calcular el nivel de presión sonora promedio. Las correcciones se realizan por proximidad, direccionalidad

del micrófono y absorción del aire. Se debe cuantificar la superficie de medición, tomando en cuenta el área incluida por el contorno, la longitud de éste y la altura del micrófono, utilizando todo esto para determinar el nivel de potencia sonora correspondiente.



**Figura 5:** Posiciones del micrófono en el contorno de medición alrededor de la planta.

Las posiciones del micrófono en el contorno de medición alrededor del área de la planta deben ubicarse aplicando el siguiente procedimiento:

- La distancia promedio de medición,  $\bar{d}$ , debe ser mayor que  $0,05\sqrt{s_p}$  o 5 m, cualquiera sea el mayor valor, pero no excederá el valor  $0,5\sqrt{s_p}$  o 35 m, cualquiera sea el menor valor.

La distancia de medición promedio,  $\bar{d}$ , será tan extensa como los efectos del ruido de fondo lo permitan; la razón  $\bar{d}/\sqrt{s_p}$  deberá ser determinada con un error inferior a  $\pm 30\%$ .

- b) Desde cualquier punto sobre el contorno de medición, el área de la planta debe ser observada con un ángulo aparente incidente,  $\theta$ , menor a  $180^\circ$ .
- c) La distancia entre posiciones de medición adyacentes,  $D_m$ , en el contorno de medición no debe ser mayor a  $2\bar{d}$ .

El valor medio de las distancias de medición planificada,  $d$ , en metros, desde cada posición del micrófono al punto más cercano del perímetro de la planta, es determinado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad \dots(5.3)$$

donde,  $N$  es el número total de posiciones del micrófono a lo largo del contorno de medición. Si éste no cumple con los requisitos nombrados anteriormente, se debe seleccionar otro que reúna las condiciones.

Cuando ha sido trazado el contorno de medición en el plot plan de la planta, es necesario determinar las siguientes dimensiones con una precisión superior a  $\pm 5\%$ :

- longitud del contorno de medición,  $l$ ;
- área de medición,  $S_m$ ;
- altura característica de la planta,  $H$ .

La altura característica de la planta,  $H$ , se determina a partir del promedio de las alturas de las fuentes de ruido pertenecientes a dicha instalación, las cuales se deducen a partir de la lista de equipamiento y de la elevación del conjunto. Esta dimensión se calcula de acuerdo a:

$$H = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n h_k \quad \dots(5.4)$$

donde  $h_k$  es la altura del punto medio de la  $k$ -ava fuente de ruido, en metros.

En cada posición de medición, la altura del micrófono con respecto al suelo,  $h$ , será obtenida de acuerdo a la siguiente expresión:

$$h = H + 0,025\sqrt{S_m} \quad \dots(5.5)$$

o 5 m, cualquiera sea el mayor valor.

En cada posición de medición, la dirección de referencia del micrófono se proyecta hacia el área de la planta, tal como se especifica en IEC 651, en un ángulo de  $90^\circ$  con el contorno de medición.

El cálculo del nivel de potencia sonora, a partir de la evaluación de los niveles ambientales obtenidos de los antecedentes descritos anteriormente, se da a conocer a continuación en el siguiente procedimiento:

**Paso 1.** Calcular el nivel de presión sonora promedio a lo largo del contorno de medición,  $\bar{L}_p$ , en decibeles, para cada banda de octava con la siguiente ecuación:

$$\bar{L}_p = 10 \text{Log} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pi}} \right]; \text{ dB} \quad \dots(5.6)$$

**Paso 2.** Si cualquier valor de  $L_{pi}$  excede el valor  $\bar{L}_p$  por más de 5 dB, se deberá seleccionar un nuevo contorno de medición a una distancia mayor de la planta. Si esto no es posible, reemplazar todos los valores que excedan el promedio  $\bar{L}_p$  por más de 5 dB por  $L_{pi}^*$  ( $= \bar{L}_p + 5 \text{ dB}$ ).

**Paso 3.** Calcular un segundo valor del nivel de presión sonora promedio corregido alrededor del contorno de medición,  $\bar{L}_{pi}^*$ , en decibeles, para cada banda de octava con la siguiente ecuación:

$$\bar{L}_p^* = 10 \text{Log} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pi}^*} \right]; \text{ dB} \quad \dots(5.7)$$

donde  $L_{pi}^*$  es el nivel de presión sonora en bandas de octava en la  $i$ -ésima posición después de haber sido corregido según el paso 2.

**Paso 4.** Calcular el término de área,  $\Delta L_s$ , en decibeles, para la superficie de medición (como es definida en ISO 3744) usando la siguiente ecuación:

$$\Delta L_s = 10 \text{Log} \left[ \frac{2S_m + hl}{S_0} \right]; \text{ dB} \quad \dots(5.8)$$

donde  $S_0$  es el área de referencia, igual a  $1 \text{ m}^2$ .

**Paso 5.** Calcular el término de corrección por proximidad,  $\Delta L_F$ , en decibeles, con la siguiente ecuación:

$$\Delta L_F = \text{Log} \left[ \frac{\bar{d}}{4\sqrt{S_p}} \right]; \text{ dB} \quad \dots(5.9)$$

**Paso 6.** Calcular el término de corrección por micrófono,  $\Delta L_M$ , en decibeles, con la siguiente ecuación:

$$\Delta L_M = 3 \left[ 1 - \frac{\theta}{90} \right]; \text{ dB} \quad \dots(5.10)$$

donde  $\Delta L_M = 0 \text{ dB}$  para micrófono omnidireccional.

**Paso 7.** Calcular el término de atenuación sonora (debido a la absorción atmosférica),  $\Delta L_{\alpha}$ , en decibeles, con la siguiente ecuación:

$$\Delta L_{\alpha} = 0,5\alpha\sqrt{S_m} ; \text{dB} \quad \dots(5.11)$$

Valores típicos de  $\alpha$  tomados de la ISO 3891 son mostrados en la Tabla 3.

Los valores dados para cada banda de octava en la Tabla 3 son válidos para una temperatura de 15° C y una humedad relativa promedio de 70 %. Si las condiciones climáticas difieren notoriamente de lo anterior, debe ser usado un valor adecuado en la absorción del aire para la temperatura y humedad relativa presentes en el periodo temporal en que se realizó la medición.

**Tabla 3** – Disminución del nivel de presión sonora debido a la absorción del aire.

Frecuencia central banda de octava Hz	$\alpha$ dB/m
31	0
63	0
125	0
250	0,001
500	0,002
1000	0,005
2000	0,01
4000	0,026
8000	0,046

**Paso 8.** Calcular el nivel de potencia sonora en bandas de octava,  $L_w$ , en decibeles, con la siguiente ecuación:

$$L_w = \bar{L}_p + \Delta L_S + \Delta L_F + \Delta L_M + \Delta L_{\alpha} \quad \dots(5.12)$$

Si han sido aplicados los pasos 2 y 3, reemplazar  $\bar{L}_p$  por  $\bar{L}_{pi}^*$ .

**Paso 9.** Si es requerido, calcular el nivel de potencia sonora ponderado “A”,  $L_{WA}$ , en decibeles, con la siguiente ecuación:

$$L_{WA} = 10 \text{Log} \sum 10^{0,1(L_{wj}+C_j)} ; \text{dB} \quad \dots(5.13)$$

donde  $C_j$ , es la corrección con ponderación “A” para la  $j$ -ava banda de octava.

### 5.3 Mediciones de Incidencia Sonora

Las mediciones objetivas de los niveles sonoros son una parte indispensable en cualquier programa de protección al ruido ambiental, donde la evaluación se realiza generalmente considerando el impacto causado por una fuente sonora específica, como es el caso del ruido procedente de una actividad industrial<sup>[4]</sup>.

La evaluación del ruido en una zona habitacional es la cuantificación del ambiente acústico existente o proyectado al que está sometida la población que utiliza (o utilizará) un determinada superficie de suelo, logrando así una valoración del grado de molestia y la repercusión sobre la calidad de vida.

La evaluación del ruido en una determinada zona puede utilizarse para<sup>[15]</sup>:

- Acreditar el cumplimiento de normas, requisitos, directrices y recomendaciones dictadas por organismos nacionales e internacionales de regulación y/o normalización;
- aportar la base para elegir (o asignar) una ubicación alternativa para un uso de suelo particularmente sensible al ruido, si se determina que el lugar inicialmente previsto no es adecuado por estar expuesto a un nivel sonoro excesivo; y

- aportar datos esenciales para el diseño final del área, con el objetivo principal de minimizar el impacto acústico mediante la selección adecuada de la ubicación de las edificaciones, su forma y orientación, instalación de barreras y otros obstáculos que presentan protección a la población frente a las fuentes de ruido que dominan el campo sonoro.

La Norma Internacional ISO 1996: Acústica – Descripción y Medición del Ruido Ambiental, es el estándar general para la evaluación del ruido ambiental, sirviendo en gran medida de referencia en ésta materia. Este estándar se divide en tres partes<sup>[4]</sup>:

- ISO 1996 Parte 1 1982: Cantidades básicas y procedimientos (actualmente se encuentra la versión del año 2003).
- ISO 1996 Parte 2 1987: Adquisición de los datos pertinentes al uso del suelo (corregido en 1998).
- ISO 1996 Parte 3 1987: Aplicación a los límites de ruido.

La norma ISO 1996 debería ser el estándar de base preferido para las mediciones de ruido ambiental debido a que define la terminología básica, incluyendo el parámetro Nivel de Clasificación (o de Evaluación), y describe los procedimientos recomendados para evaluar el ruido ambiental<sup>[4][13]</sup>.

Este estándar de medición establece requisitos para los siguientes puntos<sup>[13][17][18][19][20]</sup>.

a) Instrumentación:

Los sonómetros deben ser preferentemente del tipo 1, o al menos del tipo 2. Los sonómetros promediadores integradores deben ser de la categoría P (IEC 60804).

La instrumentación puede comprender:

- sonómetro promediador-integrador con ponderación de frecuencia “A”;

- dosímetro para mediciones de nivel de exposición sonora de eventos discretos;
  - sonómetro operando en ponderación “A” y ponderación temporal “Slow”;
  - data logger para muestrear el valor en curso de nivel sonoro usando ponderación temporal “Fast”;
  - analizador de distribución estadístico para muestrear los valores en curso de los niveles sonoros.
- b) Adquisición de datos:
- Descripción geográfica del área considerada;
  - descripción de las principales características de las fuentes de ruido pertenecientes a esta área;
  - descripción de la situación del receptor;
  - información de las condiciones climáticas predominantes en el área.
- c) Evaluación del ruido:

El nivel de clasificación,  $(L_{Ar,T})_i$ , se debe determinar sobre los intervalos de tiempo de referencia relacionados con las características de la fuente:

$$(L_{Ar,T})_i = (L_{Aeq,T})_i + K_{Ti} + K_{li} \quad \dots(5.14)$$

donde

$(L_{Aeq,T})_i$  es el nivel de presión sonora continuo equivalente con ponderación “A”, durante el  $i$ -ésimo intervalo temporal de referencia;

$K_{Ti}$  es la corrección tonal aplicable al  $i$ -ésimo intervalo temporal de referencia;

$K_{li}$  es la corrección por impulso aplicable al  $i$ -ésimo intervalo temporal de referencia especificado.

d) Condiciones meteorológicas:

Las condiciones meteorológicas durante las mediciones estarán de acuerdo a los límites de ruido recomendados o regulados. Los límites de ruido están basados normalmente en los valores promedio de las condiciones meteorológicas relevantes o sólo para aquellas que son establecidas de forma específica, por ejemplo, las condiciones a favor del viento proporcionan los niveles más altos de ruido.

Para facilitar la comparación de los resultados, conviene elegir condiciones meteorológicas que correspondan a una propagación acrecentada desde la fuente al receptor. Se recomienda que los intervalos de medición correspondan a las siguientes condiciones:

- dirección del viento dentro de  $\pm 45^\circ$  en la dirección desde el centro de la fuente al centro del área especificada, soplando desde la fuente al receptor;
- velocidad del viento entre 1 m/s y 5 m/s, medida a una altura de 3 m a 11 m sobre el suelo;
- sin inversiones térmicas en las cercanías del suelo;
- sin precipitaciones fuertes.

e) Mediciones:

La altura del micrófono debe elegirse de acuerdo a la elevación real (o esperada) del receptor. En el caso de presentarse puntos de medición al aire libre cerca de edificios, las mediciones deberán llevarse a cabo en posiciones en las que el nivel de ruido es de especial interés. Las posiciones preferidas son de 1 m a 2 m de la fachada, y 1,2 m a 1,5 m sobre el nivel del suelo.

Los intervalos de tiempo de la medición deberán escogerse de tal manera que sean abarcadas todas las variaciones significativas de la emisión y transmisión del ruido. Además, la elección de los intervalos de tiempo de las mediciones deberá ser tal, que el nivel sonoro promediado a largo plazo (o el nivel de

clasificación) sea determinado con la precisión deseada, tanto para el uso de integración continua o mediante las técnicas de muestreo aplicadas.

Cuando las mediciones puedan ser afectadas por el clima presente, éstas pueden ser promediadas sobre el rango de condiciones meteorológicas encontradas en la(s) posición(es) de medición, o efectuarlas bajo aquellas establecidas de forma específica, que resulten en una propagación más estable.

f) Información que debe ser reportada:

- Técnica de medición, (instrumentos, intervalos de medición, entre otros más).
- Condiciones prevalecientes durante las mediciones (meteorología, emisión de la fuente sonora, entre otros más).
- Datos cualitativos (descripción de la fuente, receptor, geografía, condiciones del suelo, entre otros más).
- Datos cuantitativos (resultados de las mediciones, niveles de evaluación del ruido, entre otros más).
- Los resultados de todas las mediciones acústicas o cálculos de ruido provenientes de la principal fuente de ruido considerada.

A continuación, se dan a conocer los alcances de las dos primeras partes de la norma ISO 1996, dejando para el apartado “Establecimiento de Límites Máximos Permisibles” la tercera parte de éste estándar internacional.

### **5.3.1 Estándar Internacional ISO 1996-1:1982**

Esta norma<sup>[17]</sup> define las magnitudes básicas para ser empleadas en la descripción del ruido en ambientes comunitarios y describe los procedimientos básicos para la determinación de estas magnitudes. Esta norma no especifica límites para el ruido ambiental.

### **5.3.2 Estándar Internacional ISO 1996-2:1987**

Esta norma<sup>[18][20]</sup> describe los métodos para utilizar y describir el ruido ambiental, pertinente al uso de suelo en general.

Se considera el empleo de diferentes métodos de medición tales como integración continua, técnicas de muestreo y mediciones bajo condiciones meteorológicas seleccionadas. También pueden emplearse métodos de cálculo o investigaciones de modelos a escala.

Esta norma no especifica en detalle los métodos de cálculo. Sin embargo, si éstos son empleados para la obtención de datos pertinentes al uso de suelo, es importante que el ruido se describa en una forma tal, que sea compatible con los requisitos establecidos en esta norma.

El propósito de esta norma es proveer los métodos de recolección de datos para describir el ruido ambiental. Al emplear estos datos como base, las autoridades pueden establecer un sistema para seleccionar: el uso apropiado de suelo en función de los niveles de ruido existentes en el área especificada; o las fuentes de ruido existentes o planificadas, siendo estas aceptables respecto al uso de suelo existente o planificado.

Esta norma describe los métodos para la recolección de datos, los cuales suministran descriptores de ruido que permiten:

- a) la descripción del ruido ambiental en un área de suelo especificada, para que se efectúe de manera uniforme; y
- b) la compatibilidad de cualquier actividad existente o proyectada, para un uso de suelo dado, con el objeto de ser evaluada con respecto al ruido existente o proyectado.

Esta norma no especifica límites para el ruido ambiental.

#### 5.4. Modelos de Predicción Sonora

Los modelos de predicción sonora<sup>[4][13]</sup> (o métodos de cálculo, según otros autores) han llegado a ser una práctica cada vez más común, siendo una excelente alternativa tanto en la medición como en el planeamiento de la emisión e incidencia sonora en situaciones imaginarias y/o reales.

La medición del ruido ambiental, en caso de ser realizada en varias posiciones del receptor, puede ser costosa y demandar tiempo considerable, especialmente debido a las variaciones meteorológicas. El cálculo de la atenuación sonora desde la fuente al receptor, en combinación con las respectivas mediciones de emisión, normalmente es realizado en base a un algoritmo estandarizado, siendo un procedimiento común en muchos países, donde cada cual aplica los modelos aceptados en el ámbito nacional o bien por un determinado sector industrial.

Es preferible el método de cálculo, y puede ser el único método practicable, cuando en determinados casos se presenten las siguientes situaciones:

- los niveles sonoros a medir se encuentran enormemente influenciados por un ruido de fondo alto y fluctuante;
- existe la necesidad de predecir niveles futuros;
- es necesario realizar una comparación de distintos escenarios alternativos de desarrollo y reducción de ruido;
- se hace necesario confeccionar mapas de curvas de nivel de ruido;
- existe un acceso limitado a las posiciones de medición.

En el mundo existe un vasto número de modelos de predicción. Los más simples están restringidos a tratar la atenuación mediante la divergencia geométrica (esférica para fuentes puntuales, y cilíndrica para fuentes lineales) y a procesos de absorción atmosférica. Los modelos más sofisticados, que sólo corren en computadores de gran capacidad, tienen como objetivo predecir el nivel de ruido en cualquier combinación de terreno y situación meteorológica.

### 5.4.1 Los algoritmos

En la modelación de niveles sonoros, los fenómenos físicos son resumidos en algoritmos matemáticos destinados a ser aplicados en situaciones reales e imaginarias. Como los modelos no ofrecen una descripción completa del mundo real, éstos deben ser construidos con especial cuidado y posteriormente calibrados con mediciones.

Los modelos de predicción están divididos normalmente en dos partes: a) la fuente sonora, que describe el nivel de emisión (valor de referencia), y b) la propagación, que da cuenta de la atenuación producida por todos los mecanismos físicos entre la fuente y el receptor.

El nivel de presión sonora generado por una fuente de ruido sobre un punto receptor puede ser obtenido con la siguiente expresión:

$$L_p = L_w + D_c + C_b - A_{propagación} \quad \dots(5.15)$$

donde

$L_p$  es el nivel de presión sonora en un punto receptor, dB;

$L_w$  es el nivel de potencia sonora emitida por la fuente, dB (ref 1pW);

$D_c$  es la corrección por directividad de la fuente, dB;

$C_b$  es la corrección, en dB, si la fuente no siempre se encuentra activa. Ejemplo, reducción de 3 dB para fuentes activas sólo 12 horas al día;

$A_{propagación}$  es la atenuación sonora en el camino de propagación, dB.

Todos los cálculos pueden ser realizados en banda ancha, bandas de 1/1 o 1/3 octava, o menor. En general, los cálculos en bandas de frecuencia son más precisos y útiles al momento de realizar los análisis correspondientes en caso de requerirse cualquier medida de mitigación de ruidos.

#### **5.4.2 Métodos de cálculo**

En muchos países existen pautas para predecir el ruido industrial<sup>[1]</sup>. Estas directrices fueron usadas inicialmente con el fin de comprobar el cumplimiento con los valores límites en relación a los permisos operacionales de actividades industriales, ampliándose su uso en la actualidad en el trazado de mapas de ruido.

Las principales directrices usadas en la actualidad, destinadas a la predicción del ruido industrial, son las siguientes:

- HMRI 0 (Países Bajos 1981/1999) Guide for measuring and calculating industrial noise;
- ISO 9613 partes 1 y 2 (1996) Attenuation of sound during propagation outdoors;
- DAL o NORDFORSK Noise Model (Dinamarca 1982) Environmental noise from industrial plants. General Prediction Method;
- VDI 2714/2720 (1988) Outdoor sound propagation;
- CONCAWE (Conservation of Clear Air and Water in Europe) The Propagation of Noise from Petroleum and Petrochemical Complexes to Neighbouring Communities, report N° 4/81;
- NORD 2000 (2000) Comprehensive Outdoor Sound Propagation model;
- ÖAL 28 (Austria 1987) Schallabstrahlung und Schallausbreitung;
- ENM (Australia 1985) Environmental Noise Model.

Para los principales modelos de predicción de ruido de actividades industriales, además de la extensión geométrica presente entre la fuente y el receptor, existen factores de atenuación para la influencia de la absorción atmosférica,

efecto del suelo, reflexiones y barreras (Tabla 4), siendo válidos para condiciones meteorológicas que favorecen la propagación sonora.

**Tabla 4** – Términos de atenuación presentes en los principales modelos de predicción.

	Meteorología	Absorción del aire	Efectos del suelo	Reflexiones	Barreras	Vegetación	Apantallamiento industrial	Viviendas	Efectos meteorológicos	
HMRI	x	X	X	X	X	X	X	X	x	
ISO 9613 Parte 2	x	X	X	X	X	X	X	X	x	
DAL	x	X	X	X	X	X	X		x	terreno montañoso
VDI 2714/2720	x	X	X	X	X	X		X	x	DI chimeneas y edificios
CONCAWE	X	X	X		X		X		X	Terreno variable y montañoso
NORD 2000	X	X	X	X	X	X		X	X	
ÖAL 28		X	X	X	X	X	X		x	
ENM	x	X	X	x	X	x	X	x	X	
X : es tratado; x : es tratado medianamente; DI : índice de directividad.										

### 5.4.3 Validación

Al igual que sucede con las mediciones, también el cálculo debería ser calibrado<sup>[1]</sup>. Normalmente esto implica un tipo de mediciones en ciertas posiciones seleccionadas, donde los niveles obtenidos puedan compararse con los calculados. Sin embargo, a diferencia de las mediciones, la calibración de un modelo de predicción se realiza después del primer cálculo, ajustándose los resultados hasta llegar a una precisión óptima.

Se debe tener el especial cuidado en determinar que la actividad de la fuente durante la medición sea la misma que la calculada. El cálculo normalmente incluye correcciones de larga duración para las condiciones meteorológicas,

asegurando así la obtención de un nivel sonoro medio para el intervalo temporal bajo estudio.

No es posible validar con mediciones los casos donde se investiguen posibles escenarios futuros, debiéndose realizar un cuidadoso análisis de los resultados o compararlos con situaciones similares para asegurar una precisión óptima.

#### 5.4.4 Precisión y exactitud

La precisión de un cálculo en particular depende de varios factores, siendo los más importantes: la extensión geométrica del terreno, los niveles, la escala, los datos y la experiencia del usuario<sup>[1]</sup>. Se aseguran precisiones globales dentro de un margen de 3 dB siempre que los algoritmos sean usados correctamente en la variedad de escenarios para los que han sido diseñados.

**Tabla 5** – Exactitud estimada para cada modelo de predicción.

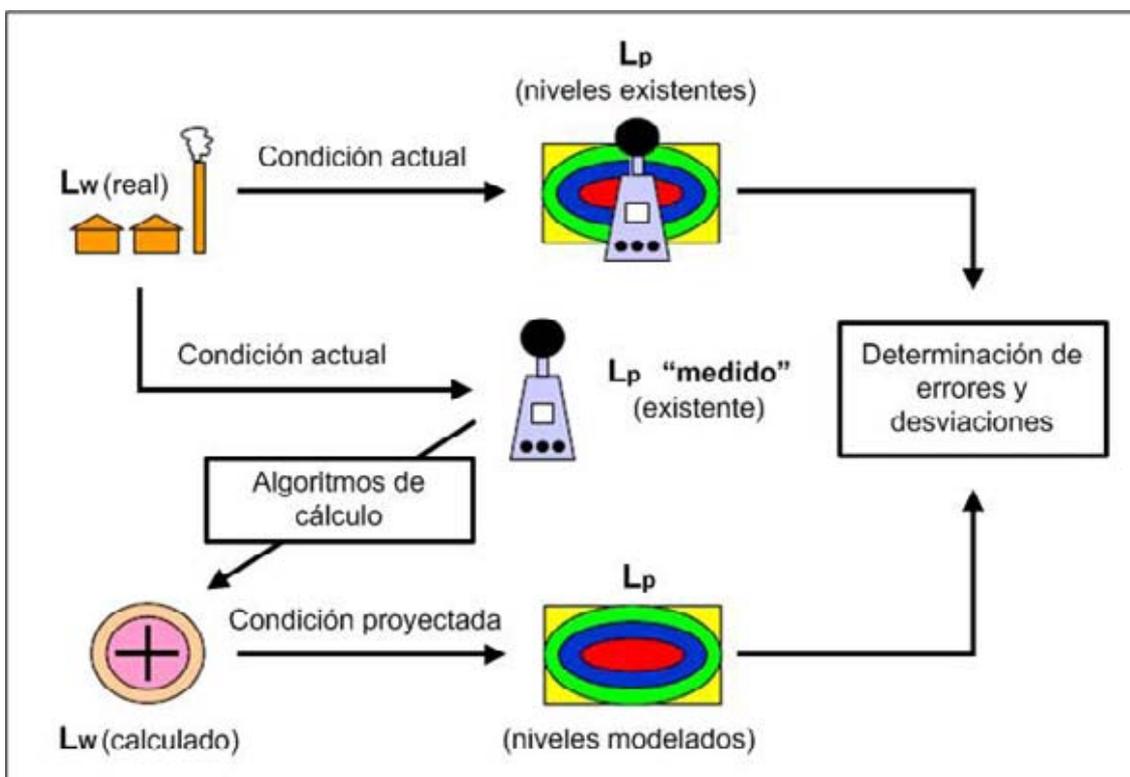
<b>Modelo</b>	<b>Exactitud</b>
HMRI	< 2 dB en la mayoría de los casos
ISO 9613 parte 1 y 2	1-3 dB para distancias < 100 m, 3 dB para distancias desde 100 m hasta 1000 m (sin barreras ni reflexiones)
DAL	1-3 dB para distancias < 500 m
VDI 2714/2720	1-3 dB para distancias < 1000 m (propagación en campo libre a favor del viento, sin la influencia de bosques ni viviendas)
CONCAWE	1 dB para distancias < 2000 m
NORD 2000	2 dB para distancias < 200 m
ÖAL 28	No especificado
ENM	No especificado

La exactitud de los procedimientos de medición varía con el grado de precisión asignado a la evaluación acústica descrita en los códigos de ensayo (mediciones de emisión sonora). La exactitud de las normas ISO, que depende

de la frecuencia y del método aplicado, se dan a conocer en el estándar ISO 3740-1980, variando entre los 5 dB para las frecuencias bajas en los métodos de la ingeniería, y 0,5 dB para las frecuencias medias en los métodos de precisión (en salas anecoicas).

La exactitud, en la mayoría de los modelos de predicción sonora, es considerada para condiciones meteorológicas a favor del viento, y puede llegar a alcanzar los 5 dB en distancias superiores a los 500 m.

La Figura 6 muestra gráficamente el método comúnmente utilizado para determinar los errores potenciales en los modelos de predicción en su etapa de validación y acreditación<sup>[8]</sup>. Básicamente, el método consiste en cuantificar la diferencia existente entre los niveles obtenidos a través de medición directa y los que son proyectados con los modelos de predicción en puntos receptores insertos en un ambiente acústico controlado.



**Figura 6:** Representación gráfica del método empleado en la determinación de errores y desviaciones de los modelos de predicción sonora.

### 5.4.5 Programas computacionales destinados a la modelación del ruido

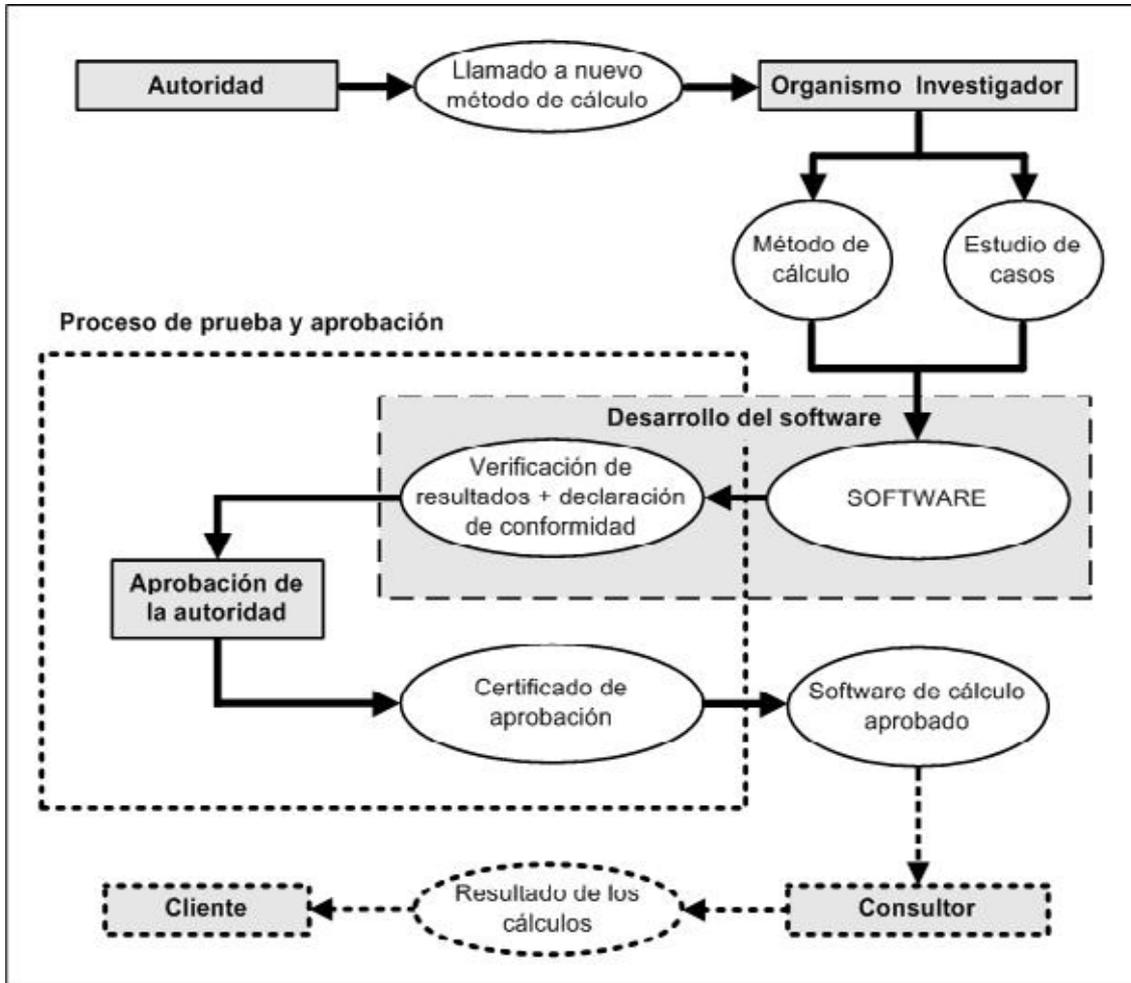
Un software de modelación de ruido es una herramienta de cálculo basado en un programa computacional destinado a proyectar y, a modo de complemento, visualizar gráficamente una situación o condición acústica en particular en base a algoritmos de cálculos pertenecientes a un modelo de predicción sonora acreditado y/o estandarizado internacionalmente, por una institución de carácter gubernamental o alguna organización en particular.

Esta herramienta de cálculo puede ser producida por diseñadores de software sobre una base comercial o con financiamiento otorgado por una autoridad que solicita el desarrollo de un nuevo modelo de predicción sonora<sup>[28]</sup>.

El desarrollo y certificación del software abarca los siguientes pasos que son ilustrados en la Figura 7:

- a) Iniciativa comercial de particulares o llamado de la autoridad para un método de cálculo.
- b) Estando en presencia de un nuevo método de cálculo, se desarrolla un sistema de estudio de casos, resultados certificados y tolerancias aceptadas.
- c) El consenso en los resultados del estudio de casos y de las tolerancias aceptadas se obtiene de un grupo de expertos.
- d) Las compañías desarrollan el software según el nuevo método mientras usan los casos de la prueba en el proceso.
- e) El fabricante, con los estudios de casos desarrollados, completa el formulario de la comparación de los resultados y la “Declaración de Conformidad” (Ej. ISO 9000, Estándar Europeo EN 45014).
- f) El fabricante presenta los informes a la autoridad certificadora incluyendo la documentación de los cálculos realizados.
- g) El fabricante declara que, a menos que esté especificado explícitamente en el formulario de comparación de los resultados, el software es aplicable a cualquier situación cubierta por el método del cálculo.

- h) Si las autoridades encuentran los resultados aceptables, el software es certificado, estando el fabricante en condiciones de etiquetar el producto.



**Figura 7:** Relaciones entre las partes en el proceso de desarrollo, prueba y aprobación del software de modelación.

A continuación se muestran los principales programas computacionales disponibles en el mercado destinados a la modelación del ruido<sup>[1]</sup>:

- SoundPLAN (German Braunstein + Berndt GmbH company)
- Bruel & Kjaer Predictor 7810 (DGMR Consulting engineers)
- Bruel & Kjaer LIMA 7812 (Stapelfeldt Ingenieurgesellschaft mbH)
- Cadna A (Scantek)
- IMMI (Wölfel Measurement Technique in Germany)
- MITHRA (CSTB)

- ENM (RTA Group Pty Ltd)
- SPM9613 (Power Acoustics, Inc)

## **5.5 Establecimiento de Límites Máximos Permisibles**

Una tarea importante de las autoridades es promulgar regulaciones sobre los derechos y deberes en la emisión de ruido ambiental<sup>[4][13]</sup>. Especialmente debe quedar en claro cuál es el grado de exposición que la población tiene que tolerar y cuándo las medidas de control de ruido tienen que ser aplicadas. Dichas regulaciones del nivel de ruido ambiental han sido promulgadas en muchos países.

Otro tipo de regulaciones, dirigidas a reducir el nivel sonoro en el ambiente, son los niveles de emisión de ruido de equipos nuevos de cierto tipo. Dichas regulaciones han sido difundidas ampliamente en muchos países europeos, siendo dirigidas principalmente a equipos de remoción de tierra, tales como excavadoras, bulldozers, palas mecánicas, entre otros.

### **5.5.1 Procedimientos para establecer límites**

Las normas internacionales describen cómo determinar el Nivel de Clasificación (o de Evaluación)  $L_r$ , pero no imponen límites legales. Los límites están regulados individualmente por el país o autoridad local. Las diferencias en el estilo de vida, el clima (actividades al aire libre, ventanas abiertas o cerradas) y el diseño de edificios hacen que la armonización internacional de los límites de ruido sea difícil.

La norma ISO 1996 es el estándar general para la descripción y medición del ruido ambiental. Esta norma puede ser el estándar base preferido para establecer los límites de ruido. Su objetivo principal es proveer a las autoridades el material para la descripción del ruido en la comunidad y en ambientes laborales. Basados en estos principios, los límites pueden especificarse, y de acuerdo con estos, desarrollar un sistema de gestión en

torno al ruido ambiental y posteriormente, lograr un control utilizando el método descrito en éstos estándares. Las partes 1, 2 y 3 de la norma ISO 1996 no especifican límites para el ruido ambiental, sin embargo, la parte 3 de éste estándar es la encargada de ofrecer una aplicación a los límites de ruido.

La norma ISO 1996-3:1987, Acústica – Descripción y medición del ruido ambiental – Parte 3: Aplicación a los límites de ruido, entrega las pautas para la especificación de los límites de ruido y describe los métodos para la obtención de los datos que permitan verificar qué situaciones específicas de ruido cumplen con los límites especificados<sup>[19]</sup>.

Los límites de ruido son especificados en términos del promedio de los niveles  $L_{Ar,T}$ , como se muestra en la ecuación (5.14), estableciéndose sobre las bases de consideraciones generales de compatibilidad con las actividades humanas y el uso de suelo. Dichos límites dependerán de muchos factores, tales como el instante del día, las actividades que se protegerán, el tipo de fuentes de ruido, factores climáticos, sociales y económicos.

La reglamentación sobre límites de ruido tiene que comprender un número de elementos básicos que definen singularmente las circunstancias bajo las cuales se puede verificar el cumplimiento con ella. Estos elementos pueden ser:

- a) Descriptor de ruido: El preferido es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado “A” ( $L_{Aeq,T}$ ), o el nivel de clasificación ( $L_{Ar,T}$ ) durante el o los intervalos temporales de referencia dados.
- b) Intervalos temporales pertinentes: Los intervalos de referencia deben ser elegidos considerando las actividades humanas típicas y las variaciones en la operación de la fuente de ruido. Para elegir el intervalo temporal de largo plazo se debe tomar en cuenta las variaciones en la emisión de la fuente y en la propagación sonora, pudiendo ir desde una semana hasta un año.

- c) Fuentes de ruido y sus condiciones de operación: Se deben especificar a qué fuentes se aplican los límites de ruido, junto con sus condiciones de operación.
- d) Ubicaciones: Dónde se tienen que verificar los límites de ruido.
- e) Condiciones meteorológicas: Los límites se deben basar en un valor promedio para todas las condiciones meteorológicas pertinentes o sólo para condiciones especificadas.
- f) Criterios para evaluar el cumplimiento con los límites: Es necesario considerar el promedio de una cantidad de mediciones y su distribución estadística. Las reglamentaciones deberían indicar cómo utilizar de forma eficiente esta información.

Las mediciones de verificación del cumplimiento se deben efectuar en las posiciones y elevaciones especificadas en las reglamentaciones sobre límites, así como los intervalos temporales y las condiciones meteorológicas correspondientes.

### **5.5.2 Regulaciones y límites de ruido en otros países**

En muchos países<sup>[4][13]</sup>, las regulaciones han sido promulgadas dependiendo de las fuentes de ruido. Las regulaciones tienen diferentes grados de obligatoriedad, que van desde recomendaciones hasta requisitos de mandato legal. Regulaciones legales completas sólo existen en pocos países, como es el caso de Holanda y Suiza. En Suiza ha sido introducido el siguiente sistema de valores de ruido ambiental con medidas graduales utilizando tres tipos de límites (ver Tabla 6 para el caso de evaluación del ruido industrial):

- a) Valores de planificación: Ellos describen los valores objetivos que no deben sobrepasarse al planificarse nuevas instalaciones en la industria (y en el transporte) así como de áreas urbanas.

b) Umbrales del impacto ambiental del ruido: Estos indican el límite de exposición al ruido en áreas habitadas que no debe excederse al construirse nuevas instalaciones o alteraciones considerables en las ya existentes. Al mismo tiempo, son los valores objetivos de medidas de mitigación. En las áreas donde el umbral es sobrepasado, son permitidas las áreas habitadas sólo cuando hayan sido lo suficientemente aisladas.

c) Valores de alarma: Demarcan las áreas donde las medidas de mitigación tienen que llevarse a cabo con prioridad, posiblemente se han tomado medidas de aislamiento en las áreas habitadas.

**Tabla 6** – Valores límites de exposición al ruido industrial perteneciente al Consejo Federal Suizo (Reglamento 814.41).

Zona	Planificación		Variaciones		Alarma	
	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
Recuperación	50	40	55	45	65	60
Residencial	55	45	60	50	70	65
Mixta	60	50	65	55	70	65
Industrial	65	55	70	60	75	70

Zonas similares a las de arriba mencionadas son utilizadas universalmente, y especifican los diferentes límites dependiendo del tipo y uso del suelo sometido a investigación.

En la mayoría de los países se usan los valores absolutos, comparándose el nivel de clasificación  $L_r$  con un límite fijo, tal como 50 dBA. Los límites relativos se usan, por ejemplo, en el Reino Unido, donde se compara el nivel de clasificación  $L_r$  con el ruido de fondo, medido como  $L_{AF90}$ .

En la Tabla 7 se muestran las regulaciones para el ruido industrial usados en algunos países. Los límites mostrados son valores asignados únicamente para áreas residenciales y están relacionados con niveles al aire libre.

Como se muestra en la Tabla 7, casi todos los países usan el nivel de clasificación  $L_r$  según lo establecido en la norma ISO 1996 cuando se trata de evaluar el ruido industrial. Sin embargo, en Japón se usa el  $L_{50}$ , mientras que en Bélgica se utiliza el  $L_{95}$ . Además, entre los distintos países existen diferencias considerables con respecto a los intervalos de tiempo de referencia y los factores de ajustes por impulso y tonalidad.

**Tabla 7** – Límites de ruido establecidos en diferentes países para las instalaciones industriales en áreas residenciales.

País	Descriptor de ruido	Horario diurno	Períodos de descanso	Horario nocturno
Austria	$L_r$	50 – 55	-----	40 – 45
Bélgica	$L_{95}$	45 – 50	40 – 45	35 – 40
Canadá	$L_r$	$L_{Aeq,1h}$ ruido del tráfico		
Dinamarca	$L_r$	45 – 50	40 – 45	35 – 40
Francia	$L_r$	50 – 55	45 – 50	40 – 45
Alemania	$L_r$	50 – 55	Ajuste 6 dB	35 – 40
Reino Unido	$L_r$	$L_{90} + 10$ dB	-----	$L_{90} + 10$ dB
Hong Kong	$L_r$	60 – 65	-----	50 – 55
Italia	$L_r$	50 – 55	-----	40 – 45
Japón	$L_{50}$	50 – 60	45 – 50	40 – 45
Corea	$L_r$	50 – 55	45 – 50	40
Holanda	$L_r$	50	45	40
Noruega	$L_r$	50	45	40
Suecia	$L_r$	50 – 55	45 – 50	40 – 45
Suiza	$L_r$	55	-----	45

La Tabla 8 muestra los niveles sonoros recomendados por la Environmental Protection Agency (EPA) para los diversos usos de suelo expuestos al ruido generado por la actividad industrial<sup>[10]</sup>.

**Tabla 8** – Niveles sonoros recomendados por la EPA para fuentes de ruido industrial.

Tipo de Receptor	Uso de Suelo del Área	Hora del Día	Nivel Sonoro $L_{Aeq,15\text{ min}}$ Recomendado, dBA	
			Aceptable	Máximo Recomendado
Residencial	Rural	Día	50	55
		Tarde	45	50
		Noche	40	45
	Suburbana	Día	55	60
		Tarde	45	50
		Noche	40	45
	Urbana	Día	60	65
		Tarde	50	55
		Noche	45	50
	Interfase Urbano/Industrial (situación real)	Día	65	70
		Tarde	55	60
		Noche	50	55
Salas de clases - interior	Todas	Periodo ruidoso 1 h (en uso)	35	40
Sala de Hospital - interior	Todas	Periodo ruidoso	35	40
	Todas	1 h (en uso)	50	55
Templos de culto - interior	Todas	Cuando está en uso	40	45
Áreas de reserva natural (Parques nacionales)	Todas	Cuando está en uso	50	55
Áreas activas de recreación	Todas	Cuando está en uso	55	60
Áreas comerciales	Todas	Cuando está en uso	65	70
Áreas industriales	Todas	Cuando está en uso	70	75

Los períodos temporales de referencia varían según el país. En algunos países, el día se encuentra dividido en dos intervalos temporales de referencia (día – noche), lo que permite separar las evaluaciones de exposición durante el período diurno y nocturno. Los valores correspondientes típicos difieren en 10 dB, presentándose en ciertos casos el uso de diferencias de 15 dB. Otros países prefieren utilizar tres intervalos temporales de referencia (día – períodos de descanso – noche); de ésta manera, los períodos de descanso pueden protegerse más efectivamente con valores que son 5 dB más bajos que los valores en período diurno.

El período temporal más ruidoso se utiliza en algunos países para penalizar el ruido intermitente. La duración de éste período puede estar entre los cinco minutos hasta una hora, dependiendo del país.

El factor de ajuste (corrección o penalización) por tono varía entre 0 dB (sin penalización) y 6 dB. Algunos países usan una única penalización de 5 dB mientras que otros utilizan dos o más valores. En la mayoría de los casos, la presencia de tonos se determina subjetivamente, pero los métodos objetivos están siendo cada vez más utilizados. Estos métodos están basados en el análisis en 1/3 de octava o la FFT (Transformada Rápida de Fourier).

La penalización máxima por impulsividad, usando los métodos objetivos y subjetivos, puede variar hasta en 7 dB dependiendo del país donde se aplique. Los métodos objetivos se basan en la diferencia entre un parámetro de medición con respuesta lenta y otro de respuesta más rápida (por ejemplo, entre los niveles de presión sonora con ponderación “A” medidos con respuesta temporal Fast o Impulse) o puede estar basado en el tipo de fuente, usando una lista que enumere fuentes de ruido (tales como golpes de martillo, explosiones, entre otras más).

**Tabla 9** – Penalizaciones por presencia de impulsos y tonos puros.

<b>País</b>	<b>Penalización por tono</b> $K_T$ , dB	<b>Penalización por impulso</b> $K_I$ , dB
Australia	2 ó 5	2 ó 5
Austria	3 ó 6	3 si $L_{AIMax} - L_{AFMax} < 2$ dB 5 si $L_{AIMax} - L_{AFMax} \geq 2$ dB
Bélgica	-----	$L_{AIMax} - L_{AFMax}$ si $\geq 4$ dB
Dinamarca	5	5
Francia	5	3, 5 ó 10 dependiendo de la duración y $L_{AFMax} - L_{Aeq}$
Alemania	3 ó 6	$L_{AFTeq} - L_{Aeq}$
Hong Kong	3 ó 6	3
Corea	-----	5
Holanda	5	5
Suiza	2, 4 ó 6	2, 4 ó 6
Reino Unido	5	5

Una comparación de valores en varios países demuestra que pueden encontrarse diferencias de hasta 15 dB. Sin embargo, debido a la obligatoriedad diferente de las regulaciones y a las diferencias mencionadas en detalle arriba, éste número debe ser interpretado con mucha cautela. Los requisitos del ruido proveniente de instalaciones industriales concuerdan correctamente con los valores de lineamiento de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para condiciones deseables o aceptables en muchos países (Tabla 10)<sup>[34]</sup>.

**Tabla 10** – Valores guía para el ruido urbano en ambientes específicos.

<b>Ambiente Específico</b>	<b>Efecto(s) crítico(s) sobre la salud</b>	<b>L<sub>Aeq</sub> [dB(A)]</b>	<b>Tiempo [horas]</b>	<b>L<sub>max fast</sub> [dB]</b>
Exteriores	Molestia grave en el día y al anochecer	55	16	-
	Molestia moderada en el día y al anochecer	50	16	-
Interior de la vivienda, dormitorios	Interferencia en la comunicación oral y molestia moderada en el día y al anochecer	35	16	
	Trastorno del sueño durante la noche	30	8	45
Fuera de los dormitorios	Trastorno del sueño, ventana abierta (valores en exteriores)	45	8	60
Salas de clase e interior de centros preescolares	Interferencia en la comunicación oral, disturbio en el análisis de información y comunicación del mensaje	35	Durante las clases	-
Dormitorios de centros preescolares, interiores	Trastorno del sueño	30	Durante el descanso	45
Escuelas, áreas exteriores de juego	Molestia (fuente externa)	55	Durante el juego	-
Hospitales, pabellones, interiores	Trastorno del sueño durante la noche	30	8	40
	Trastorno del sueño durante el día y al anochecer	30	16	-
Hospitales, salas de tratamiento, interiores	Interferencia en el descanso y la recuperación	#1		
Áreas industriales, comerciales y de tránsito, interiores y exteriores	Deficiencia auditiva	70	24	110
Ceremonias, festivales y eventos de entretenimiento	Deficiencia auditiva (patrones: < 5 veces/año)	100	4	110
Discursos públicos, interiores y exteriores	Deficiencia auditiva	85	1	110
Música y otros sonidos a través de audífonos o parlantes	Deficiencia auditiva (valor de campo libre)	85 #4	1	110
Sonidos de impulso de juguetes, fuegos artificiales y armas	Deficiencia auditiva (adultos)	-	-	140 #2
	Deficiencia auditiva (niños)	-	-	120 #2
Exteriores de parques de diversión y áreas de conservación	Interrupción de la tranquilidad	#3		

#1: Lo más bajo posible.

#2: Presión sonora máxima (no L<sub>AF</sub>, máx) medida a 100 mm del oído.

#3: Se debe preservar la tranquilidad de los parques y áreas de conservación y se debe mantener baja la relación entre el ruido intruso y el sonido natural de fondo.

#4: Con audífonos, adaptado a valores de campo libre.

## 5.6 Normativa Local Vigente

El marco legal que regula las emisiones de ruido generados por la industria viene dado por la norma de emisión de ruidos molestos generados por fuentes

fijas, Decreto Supremo N° 146/97 del MINSEGPRES. A continuación, se presenta el resumen de dicho cuerpo legal.

### 5.6.1 Decreto Supremo N° 146/97 del MINSEGPRES

#### Generalidades

La presente norma establece los niveles máximos permisibles de presión sonora corregidos y los criterios técnicos para evaluar y calificar la emisión de ruidos molestos generados por fuentes fijas hacia la comunidad, tales como las actividades industriales, recreacionales, artísticas u otras.

Su aplicación y fiscalización corresponde a los Servicios de Salud del país y al Servicio de Salud del Ambiente de la Región Metropolitana, sin perjuicio de las atribuciones específicas que correspondan a los demás organismos públicos con competencia en la materia.

#### Niveles máximos permisibles de presión sonora corregido

Los niveles de presión sonora corregidos que se obtienen de la emisión de una fuente fija emisora de ruido, medidos en el lugar donde se encuentra el receptor, no podrán exceder los valores que se fijan a continuación:

**Tabla 11** – Niveles máximos permisibles establecidos en el D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES.

<b>NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PRESIÓN SONORA CORREGIDOS (NPC) EN dB(A) LENTO</b>		
	De 7 a 21 Hrs.	De 21 a 7 Hrs.
Zona I	55	45
Zona II	60	50
Zona III	65	55
Zona IV	70	70
Área Rural	Ruido de Fondo más 10 dB(A)	

Donde, los niveles de presión sonora citados en el presente Decreto Supremo obedecen a las siguientes definiciones:

Nivel de Presión Sonora Corregido (NPC): Es aquel nivel resultante de las correcciones establecidas en la norma a partir del nivel de presión sonora continuo equivalente (NPSeq).

Nivel de Presión Sonora Continuo Equivalente (NPSeq, ó Leq): Es aquel nivel de presión sonora constante, expresado en decibeles con ponderación "A", que en el mismo intervalo de tiempo, contiene la misma energía total (o dosis) que el ruido medido.

Ruido de Fondo: Es aquel ruido que prevalece en ausencia del ruido generado por la fuente fija sujeta a evaluación.

Para la aplicación de esta norma, debe señalarse que se establecen cuatro zonas definidas de acuerdo a los Planes Reguladores existentes. Las zonas están definidas como:

Zona I: Aquella zona cuyos usos de suelo permitidos de acuerdo a los instrumentos de planificación territorial corresponden a: habitacional y equipamiento a escala vecinal.

Zona II: Aquella zona cuyos usos de suelo permitidos de acuerdo a los instrumentos de planificación territorial corresponden a los indicados para la Zona I, y además se permite equipamiento a escala comunal y/o regional.

Zona III: Aquella zona cuyos usos de suelo permitidos de acuerdo a los instrumentos de planificación territorial corresponden a los indicados para la Zona II, y además se permite industria inofensiva.

Zona IV: Aquella zona cuyos usos de suelo permitidos de acuerdo a los instrumentos de planificación territorial corresponden a industrial, con industria inofensiva y/o molesta.

En relación al equipamiento establecido, éstos se encuentran definidos en el Decreto Supremo N° 31/85 del Ministerio de Vivienda y Urbanismo sobre la Política Nacional de Desarrollo Urbano, en el cual se establece que: Se define como “equipamiento” a los terrenos y edificios urbanos destinados a complementar las funciones básicas de habitar, producir y circular.

### **Instrumento de medición**

Las mediciones deben efectuarse con un sonómetro integrador que cumpla con las exigencias señaladas para los tipos 0, 1 ó 2, establecidas en las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional, publicaciones N° 651 “Sonómetros”, primera edición de 1979; y N° 804 “Sonómetros Integradores-promediadores”, primera edición de 1985. Lo anterior puede acreditarse mediante certificado de fábrica del instrumento.

### **Procedimiento de medición**

Para los efectos de la presente norma, la obtención del nivel de presión sonora corregido se efectuará de acuerdo al siguiente procedimiento:

- a) Las mediciones deben efectuarse con un sonómetro integrador debidamente calibrado.
- b) Debe utilizarse el filtro de ponderación “A” y la respuesta “Lenta” del instrumento de medición.
- c) Los resultados de las mediciones se expresarán en dBA Lento y se evaluará la exposición al ruido según el concepto de nivel de presión sonora corregido (NPC).
- d) Las mediciones deben ser acompañadas del informe técnico.

## Condiciones de medición

Las mediciones para determinar el nivel de presión sonora corregido de los distintos tipos de ruido deben efectuarse en el lugar, momento y condición de mayor molestia, de acuerdo a las siguientes indicaciones:

### a) Mediciones externas:

Los puntos de medición deben ubicarse entre 1,2 y 1,5 metros sobre el suelo, y en caso de ser posible, a unos 3,5 metros o más de las paredes, construcciones u otras estructuras reflectantes.

Se deben efectuar como mínimo tres mediciones en puntos separados entre sí en aproximadamente 0,5 metros, y de ellas se obtendrá el promedio aritmético.

Deberán descartarse aquellas mediciones que incluyan ruido ocasional, siendo éste aquel generado por una fuente emisora distinta a aquella sujeta a evaluación, y que no es habitual en el ruido de fondo.

### b) Mediciones internas:

Las mediciones deben realizarse en las condiciones normales de uso de la habitación.

Los puntos de medición deben ubicarse entre 1,2 y 1,5 metros sobre el piso, y en caso de ser posible, a 1,0 metros o más de las paredes, y aproximadamente a 1,5 metros de las ventanas.

Deben efectuarse como mínimo tres mediciones en puntos separados entre sí en aproximadamente 0,5 metros, y de ellas se obtendrá el promedio aritmético.

Debe realizarse una corrección sobre los niveles de presión sonora medidos, ya sea por:

- ventana abierta, corrección de + 5 dBA
- ventana cerrada, corrección de + 10 dBA

Deben descartarse aquellas mediciones que incluyan ruidos ocasionales.

### **Tipo de ruido**

La técnica de evaluación dependerá del tipo de ruido del cual se trate, ya sea:

a) Ruido estable:

Es aquel ruido que presenta fluctuaciones de nivel de presión sonora, en un rango inferior o igual a 5 dBA Lento, observado en un periodo de tiempo igual a 1 minuto.

En el evento que el ruido estable mantenga su fluctuación en tono a un solo nivel de presión sonora durante la jornada diaria de funcionamiento de la fuente, debe realizarse una medición de NPSeq de 1 minuto para cada uno de los puntos de medición.

En el evento que el ruido estable no mantenga su fluctuación en torno a un nivel de presión sonora durante la jornada de funcionamiento de la fuente, es decir, es escalonado en el tiempo con una sucesión de distintos niveles de ruido estables, debe realizarse una medición de NPSeq de 1 minuto para cada uno de los puntos de medición. Dicha medición debe realizarse durante el momento en que el nivel de ruido de la fuente alcance su mayor valor.

b) Ruido fluctuante:

Es aquel ruido que presenta fluctuaciones de nivel de presión sonora, en un rango superior a 5 dBA Lento, observado en un periodo de tiempo igual a un minuto.

Para cada uno de los puntos de medición deben realizarse cinco mediciones de NPSeq de 1 minuto, y se calculará el promedio aritmético de los cinco valores de NPSeq obtenidos.

Debe calcularse la diferencia aritmética entre el mayor y menor de los cinco valores de NPSeq obtenidos, y esa diferencia se dividirá por 5.

El nivel para cada uno de los puntos de medición, estará dado por la suma aritmética de los dos valores obtenidos anteriormente.

c) Ruido imprevisto:

Es aquel ruido fluctuante que presenta variación de nivel de presión sonora superior a 5 dBA Lento en un intervalo no superior a 1 segundo.

Para cada uno de los puntos de medición deben realizarse tres mediciones, de 5 minutos cada una, a fin de obtener el NPSeq de 1 minuto y el NPSmáx disminuido en 5 dBA.

Para cada medición realizada, se elegirá el mayor valor entre el NPSeq, y el NPSmáx disminuido en 5 dBA.

El nivel para cada uno de los puntos de medición estará dado por el promedio aritmético de los tres valores resultantes de los cálculos mencionados anteriormente.

### **Correcciones de niveles de presión sonora por ruido de fondo**

Para la obtención del nivel de presión sonora del ruido de fondo, se medirá NPSeq en forma continua, hasta que se establezca la lectura, registrando el valor de NPSeq cada 5 minutos. Se entenderá por estabilizada la lectura, cuando la diferencia aritmética entre dos registros consecutivos sea menor o igual a 2 dBA. El nivel a considerar será el último de los niveles registrados. En ningún caso la medición deberá extenderse por más de 30 minutos.

El valor obtenido de la emisión de la fuente fija mediada, presentará correcciones a efectuar van desde 0 dBA, si la diferencia aritmética entre el nivel de presión obtenido de la emisión de la fuente fija y el nivel de presión sonora del ruido de fondo es igual o superior a 10 dBA, hasta -3 dBA, si ésta diferencia es igual a 3 dBA.

En el evento que la diferencia aritmética entre el nivel de presión sonora obtenido de la emisión de la fuente fija y el nivel de presión sonora del ruido de fondo sea inferior a 3 dBA, quedará establecido que la medición será considerada NULA, debiéndose en este caso medir bajo condiciones de menor ruido de fondo.

## **5.7 Solución a los Problemas de Ruido en la Industria**

La comprensión tradicional del término “problemas de ruido en la industria” está dirigida al ruido ocupacional, por ejemplo: ruido en el área de trabajo. Sin embargo, existe un entendimiento creciente de que el concepto en muchas situaciones también implica problemas de ruido ambiental, y que además, es de responsabilidad de la industria controlar dichas emisiones<sup>[13]</sup>.

### **5.7.1 Identificación de los problemas de ruido**

“¿Existe un problema de ruido en nuestro caso?” Aún si el ruido ocupacional es alto, no necesariamente existe un problema de ruido ambiental. El ruido ocupacional y el ruido ambiental deben considerarse por separado, debido a que los receptores involucrados son distintos. Existen dos formas de identificar un posible problema de ruido, llamados identificación pasiva y activa<sup>[13][15]</sup>:

a) Identificación pasiva: es la situación que se presenta cuando la industria evalúa su desempeño ambiental en base a la frecuencia de recepción de quejas por parte de la comunidad o a estudios estadísticos basados en encuestas sociales (o poblacionales, según otros autores). Cualquier denuncia

debe ser considerada como una representación de problemas reales de ruido. Sin embargo, si la industria va a tomar alguna acción para reducir sus emisiones sonoras en un caso en particular, debería depender del nivel de ruido y del carácter de éste. Se debe enfatizar que “ninguna queja” no significa “ninguna molestia”, muchas personas no efectúan denuncias aún si el ruido es una gran molestia para ellas. La normalización sobre técnicas de encuesta social empleadas en los estudios de molestias relacionadas con el ruido es escasa. La mayoría de estos estudios asumen implícitamente que la exposición comunitaria al ruido es estática y la condición de molestia está totalmente asumida, siendo estable en el momento de la entrevista.

b) Identificación activa: se aplica cuando la industria recolecta datos cuantitativos de ruido, ya sea por medición o cálculos, determinando los niveles de ruido y comparándolos con los criterios o límites establecidos. De esta manera, los problemas potenciales de ruido se detectan de acuerdo a criterios objetivos para una población “normal”. Se debe tener presente que la población está cambiando con el tiempo (y con esto el grado de sensibilidad), transformándose en una nueva variable a manejar, siendo difícil su cuantificación a causa de su variabilidad a lo largo del tiempo.

### **5.7.2 Métodos de cuantificación**

Tradicionalmente, el ruido ambiental es cuantificado a través de mediciones. Sin embargo, el nivel del ruido frecuentemente está fluctuando, en primer lugar debido a las condiciones operacionales variables de la industria y en segundo, a la meteorología presente en el medio de propagación. Por lo tanto, las mediciones pueden tomar tiempo si se desea que los resultados obtenidos sean confiables, ejemplo: poca incertidumbre en los datos recolectados.

Actualmente, en muchos países se han hecho muy comunes los cálculos de ruido, y los procedimientos para desarrollarlos son autorizados por las autoridades nacionales del medio ambiente. Debe tenerse en cuenta que la incerteza de los resultados obtenidos por los cálculos, en muchas situaciones prácticas, son del mismo orden de magnitud que las obtenidas a través de

mediciones, y pueden ser aún menores, comparadas con el grado de exactitud en situaciones de mediciones al azar y/o escasez de documentación.

Los resultados de la medición (o cálculo) deben ser comparados con los límites de regulación de ruidos para ruido industrial. A la falta de regulaciones para éste tipo de emisiones sonoras, los datos obtenidos pueden compararse con los límites establecidos en otros países.

La Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo<sup>[6]</sup> establece que los métodos de evaluación para los indicadores (o descriptores) de ruido pueden determinarse bien mediante cálculos o a través de mediciones (en el punto de evaluación).

En el caso del Ruido Industrial, para los Estados miembros que no cuentan con métodos nacionales de cálculo o para los que quieren cambiar a otro, el método recomendado es el siguiente:

ISO 9613-2:1996 Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation.

Para este método pueden obtenerse datos adecuados sobre emisión de ruido (datos de entrada) a través de mediciones realizadas según alguno de los siguientes métodos:

- ISO 8297:1994 Acoustics – Determination of sound power levels of multisource industrial plants for evaluation of sound pressure levels in the environment – Engineering method.
  
- EN ISO 3744:1995 Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane.

- EN ISO 3746:1995 Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane.

Si un Estado miembro no posee ningún método de medición o prefiere aplicar otro, es posible determinar uno nuevo sobre la base de la definición del indicador o descriptor de ruido y los principios de evaluación presentados en las normas ISO 1996-2:1987 e ISO 1996-1:1982.

### **5.7.3 Organización y planeamiento**

Como regla general, cualquier actividad industrial debería tener como objetivo planificar cuidadosamente la forma de evitar a las fuentes que generen ruidos excesivos. Es de especial importancia consultar al fabricante sobre las especificaciones de emisión sonora de máquinas e instalaciones nuevas. Sin embargo, en muchos casos es imposible evitar las fuentes de ruido excesivo. En dichos casos, se recomiendan los siguientes principios de planificación:

- Deberían esperarse reacciones substanciales cuando la situación del ruido en un área es modificada. Este es el caso especial de aquellas que fueron relativamente silenciosas, en donde los períodos de tiempo de tranquilidad se vuelven ruidosos a causa de actividades e instalaciones nuevas o alteradas.
- La concentración de fuentes de ruido, con respecto al área y/o tiempo, es una medida importante para reducir la perturbación en el ambiente.
- Concentración en el área: La reducción total del ruido, en muchas ocasiones, es más efectiva mediante un control en base al uso de pantallas o encierros, obteniéndose un costo con mayor eficiencia si las instalaciones ruidosas están agrupadas.
- Tiempo de concentración: La tranquilidad relativa de un área determinada puede no ser alterada si las instalaciones ruidosas están

operando simultáneamente, y durante un tiempo limitado, de día preferentemente.

- Las fuentes de ruido deben localizarse en áreas donde su propagación hasta las posiciones del receptor incluya efecto de pantalla por terrenos intermedios, construcciones u otros, que eviten en lo posible la propagación del sonido directo. Utilizar la distancia: a mayor distancia entre la fuente y el receptor, menor es el nivel de ruido.
- La información a los vecinos sobre las medidas planeadas para la reducción del ruido puede incrementar la aceptación de dichas acciones, reduciendo el malestar total en el ambiente. La información dará la sensación de que los problemas de ruido son tratados en forma seria.

#### **5.7.4 Reducción técnica del ruido**

La reducción sonora en la fuente es frecuentemente la medida más efectiva, y debe tener prioridad sobre las acciones de mitigación en la vía de propagación. Sin embargo, en muchas situaciones, es necesario combinar ambas medidas.

Para el control efectivo del ruido ambiental es fundamental el conocimiento en detalle de las fuentes de ruido potenciales y existentes, su nivel de emisión y los mecanismos que lo generan. La identificación detallada de los componentes que emiten ruido en la fuente es la base para determinar las medidas de mitigación a un costo eficaz.

Además, en el caso de diversas fuentes de ruido, debe ser cuantificada la importancia relativa de cada una sobre el nivel sonoro total en el ambiente. La reducción sonora debería comenzar con la fuente que proporciona al ambiente la mayor contribución de energía acústica. Se debe tomar en cuenta que, para lograr una efectiva reducción sonora total, en muchas situaciones es necesario llevar a cabo una reducción de ruido en más de una fuente.

### **5.7.5 Costo del control de ruido**

Como regla general en el costo de control del ruido podemos decir que<sup>[13]</sup>: “solucionar los problemas durante la etapa de planeamiento y como parte integral de máquinas e instalaciones/edificaciones nuevas, tiene un costo de aprovechamiento mayor que resolver los problemas mediante mejoras y técnicas de reducción del ruido en instalaciones ya existentes”. El costo puede variar substancialmente en función del lugar, influyendo en gran medida las técnicas de reducción aplicadas, la calidad del material utilizado, los principios de instalación, entre otros. A continuación se proporcionan estimaciones aproximadas de costos para situaciones comunes en la industria de procesos:

Plantas y edificaciones industriales:

- Plantas y edificaciones nuevas: 0-5% de la inversión total
- Plantas y edificaciones existentes: 5-10% de la inversión total

Instalaciones industriales, máquinas simples:

- Máquinas e instalaciones nuevas: 0-2% del total de la inversión
- Máquinas e instalaciones existentes: 2-4% del total de la inversión

## **6. DESCRIPCIÓN DE LA RED DE MONITOREO CONTINUO DE RUIDO**

### **6.1 Descripción de los Equipos de Medición**

Las mediciones son efectuadas con instalaciones fijas de monitoreo compuestas con sonómetros integradores que cumplen con las exigencias señaladas para los tipos 0, 1 ó 2, establecidas en las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission, IEC Standard), publicaciones N° 651 Sonómetros (Sound Level Meters), primera edición de 1985. Lo anterior puede acreditarse mediante certificado de fábrica del instrumento (Artículo 7 D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES).

Los instrumentos que componen la red de monitoreo continuo de ruido consisten en tres sonómetros analizadores a tiempo real marca Larson Davis, modelo 824, que cumplen con los siguientes estándares de calidad:

- ANSI S1.4 – 1985 Type 1
- IEC 60651 – 1979 Type 1
- IEC 60804 – 1985 Type 1
- IEC 60651 – 1993 Type 1
- IEC 60804 – 1993 Type 1
- IEC 60260 – 1994 Type 1

Además de esto, los sonómetros, al ser destinados a permanecer como estaciones fijas, vienen equipados con los siguientes elementos: preamplificador modelo 2100, micrófono modelo 2541, cable extensión de micrófono EXA010, cable de salida AC/DC CBL042 y cable serial de interfase CBL002.

Pueden ser usados otros instrumentos de medición para recolectar y analizar los datos, para esto deben cumplir con lo establecido en el artículo 7 del D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES. Tales instrumentos de uso opcional y/o complementarios pueden comprender:

- Grabador de cinta digital DAT.
- Grabación directa a disco duro.
- Mini Disc.
- Analizadores de frecuencia a tiempo real.
- Registradores gráficos de nivel.
- Analizadores de distribución estadística.
- Voltímetros.
- entre otros más.

## 6.2 Ubicación de los Puntos de Medición de la Red de Monitoreo

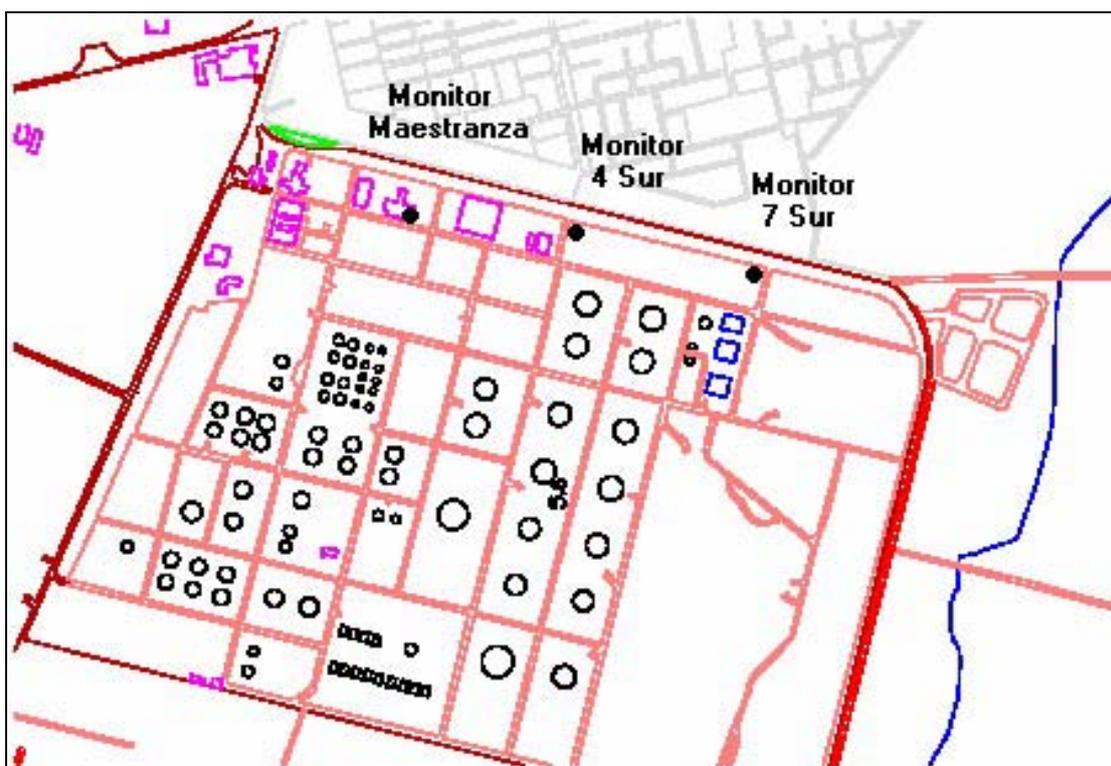
La ubicación de los puntos de medición fue designada por la empresa canadiense HFP Acoustical Consultants Inc., de acuerdo al modelo de predicción en los que basaron sus cálculos (CONCAWE) mediante el software de modelación acústica SoundPLAN<sup>®</sup>, quedando establecido que el monitor N° 1 se encuentra ubicado en el techo del Taller de Equipos Estáticos (Monitor Maestranza), el monitor N° 2 es ubicado en la intersección de las calles 4 Sur y 1 Oriente (Monitor 4 Sur) y el monitor N° 3, en la intersección de las calles 7 Sur y 1 Oriente (Monitor 7 Sur).



**Figura 8:** Monitor Maestranza, monitor 4 Sur y monitor 7 Sur.

El propósito de los monitores permanentes es proporcionar documentación sobre las reducciones de niveles sonoros alcanzados por los tratamientos adicionales de control de ruido y correlacionar las operaciones de la planta y la meteorología en el caso de presentarse reclamos por ruidos en la comunidad vecina.

Los puntos de medición se muestran en la Figura 9:



**Figura 9:** Ubicación de los puntos de medición.

Las posiciones de las estaciones fijas de monitoreo continuo de ruido son de acuerdo a lo establecido en el D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES, para la condición de medición en exteriores, con excepción a lo establecido para la altura con respecto al suelo, la cual es superior a lo establecido en el decreto, altura modificada con el fin de evitar el apantallamiento que presentan los obstáculos presentes entre el camino de propagación desde las plantas de proceso (fuentes) y los monitores de ruido (receptores).

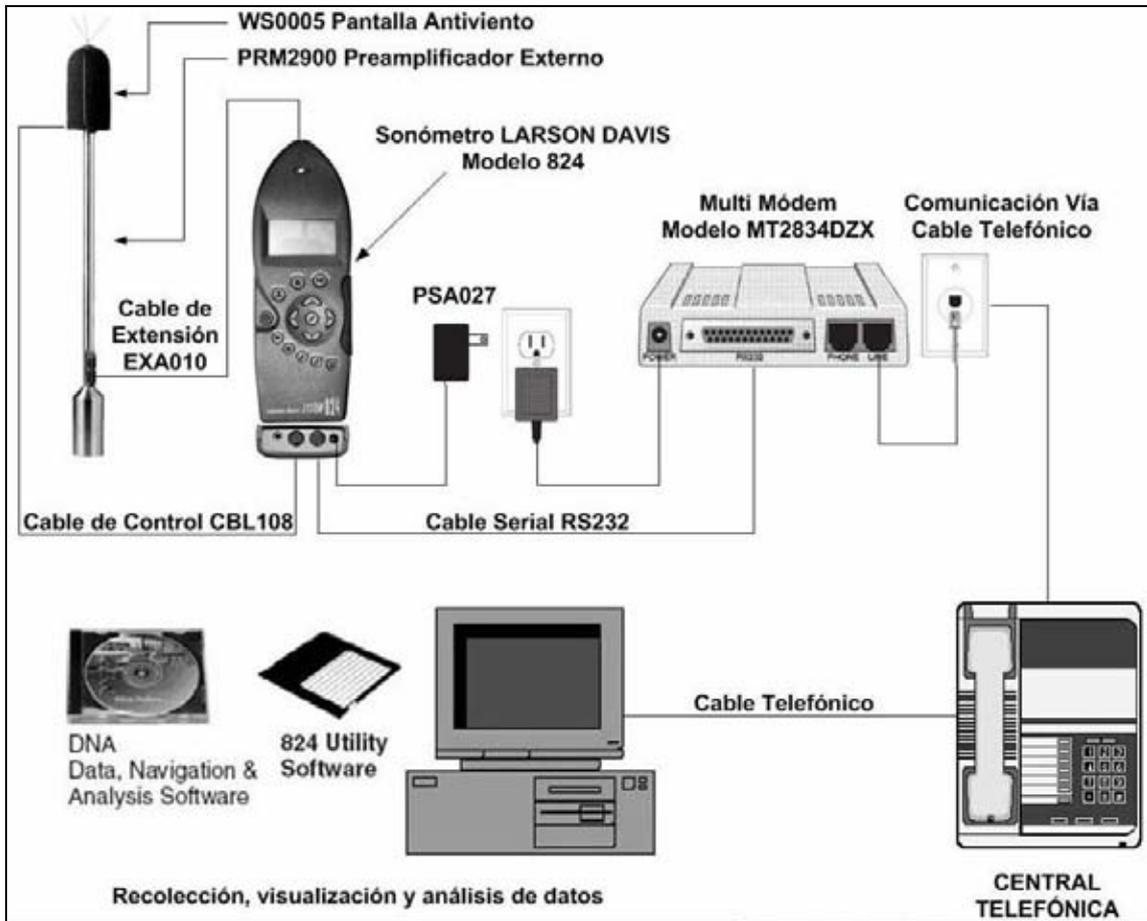
El diseño de las estaciones fijas, que servirían de montaje para los monitores de ruido, contemplaban originalmente la altura del micrófono en 1,2 m medidos desde el suelo, estando de acuerdo a lo establecido en el D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES y según lo recomendado en la norma oficial NCh 2502-1:2000 (ISO 1996-1:1982). Sin embargo, según recomendaciones del SST, la altura del micrófono se incrementó en 1,8 m más, con el fin de evitar el apantallamiento que se produciría en alturas inferiores, quedando establecida así la elevación del micrófono en 3,0 m medidos desde el suelo.

Para minimizar la influencia de las reflexiones, las posiciones de medición deben estar al menos a 3,5 m de cualquier fachada o estructura reflectante (distinta al suelo). Sin embargo, para evitar la influencia de la autopista adyacente a la refinería, los tres monitores están aislados contra el ruido del flujo vehicular mediante barreras acústicas a una distancia inferior a la establecida en el decreto, justificándose ésta instalación basándose en el diseño de las barreras en sí, en las cuales la superficie adyacente a los monitores son de propiedades absorbentes, esto es, no puede ser considerada como superficie reflectante.

### **6.3 Sistema de Comunicación de la Red de Monitoreo**

La comunicación de los sonómetros con la estación de monitoreo es por vía módem, desde el cual, la salida serial del sonómetro es conectada al equipo de comunicación, que consta de un multimodem marca MultiTech modelo MT2834DZX transmitiendo la información recolectada por los equipos a una velocidad de 9600 bps, ésta información es recibida por el computador de la caseta de monitoreo con que cuenta la empresa mediante el software Remote, de Larson Davis, responsable de mantener la comunicación entre las estaciones de monitoreo y la caseta. Los datos pueden ser visualizados y transportados utilizando el software 824 Utility, entregando los datos en formato de texto txt.

En la Figura 10 se presenta el esquema del sistema de comunicación. La vista en terreno de dicha instalación se muestra en la Figura 11.



**Figura 10:** Sistema de comunicación de la red de monitoreo continuo de ruido.



**Figura 11:** Instalación en terreno del sistema de comunicación.

## 6.4 Recolección y Análisis de los Datos

En un proyecto de monitoreo continuo de ruido el tiempo de observación es teóricamente infinito, por otra parte, los estudios de ruido efectuados en la empresa, los cuales, debido al proceso productivo de ésta, presentan una combinación de ruido fluctuante con ruido imprevisto, con una notoria influencia del primero durante los intervalos temporales de muestreo, quedando establecido en base a éstos antecedentes que la evaluación de las emisiones de ruidos molestos generados por la empresa hacia la comunidad será llevada a cabo considerando que las emisiones son del tipo fluctuante, definiéndose así las magnitudes básicas para ser empleadas en la descripción del ruido en ambientes comunitarios. Además, se describen los procedimientos para la determinación de éstas magnitudes.

Los datos acústicos que se recolectan son:

a)  $L_{Aeq,1min}$ : Nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado "A" integrado sobre un intervalo temporal igual a 1 minuto obtenido a partir del nivel de presión sonora instantáneo, con respuesta temporal lenta o slow y ponderación de frecuencia "A".

El descriptor de ruido nombrado anteriormente se obtiene directamente de los instrumentos de medición, los cuales están programados para calcular el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado "A", para dicho intervalo temporal, siendo éste el descriptor de ruido usado como unidad básica para los efectos de la aplicación del D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES.

b) El procedimiento para calcular los niveles de presión sonora continuo equivalente con ponderación "A" a partir del descriptor anterior, será de acuerdo a lo siguiente:

A partir del  $L_{Aeq,1min}$  recolectado por los instrumentos de medición, el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado "A" se calculará con la ecuación (6.1):

$$L_{Aeq,T} = 10 \text{Log} \left[ \left( \frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N 10^{0.1 L_{Aeq,1min}} \right] \quad \dots(6.1)$$

donde

N: número total de muestras (minutos de observación);

$L_{Aeq,1min}$ : nivel de presión sonora ponderado "A" integrado sobre un intervalo temporal igual a 1 minuto.

c) Los descriptores de ruido permitirán:

- Una descripción del ruido ambiental en un área de suelo especificada; y
- una evaluación de cualquier actividad generadora de ruidos molestos ya sea existente o proyectada, para el uso de suelo establecido en el plano regulador comunal de Talcahuano, homologado al D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES, el cual establece que las áreas de impacto acústico corresponden a zona II, esto es, aquella zona cuyos usos de suelo permitidos de acuerdo a los instrumentos de planificación territorial corresponden a habitacional y equipamiento a escala vecinal, comunal y/o regional; y zona IV, la cual contempla el uso de suelo para industria inofensiva y/o molesta (Artículo 3 D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES), para ser evaluada con respecto a las emisiones de ruido generadas por Enap Refinerías Bio Bio.

d) Ajustes y correcciones:

Las mediciones descritas anteriormente están diseñadas para dar una descripción física del ruido ambiental y están propensas a cualquier corrección o modificación con el fin de generar algún otro descriptor de ruido que caracterice de manera alternativa una condición y/o situación acústica en particular.

## **7. MODELO DE PREDICCIÓN DE NIVELES SONOROS EN LOS PUNTOS RECEPTORES DE MAYOR SENSIBILIDAD**

Debido a la ya tradicional problemática de la evaluación de fuentes fijas en presencia de altos niveles de ruido de fondo extremadamente variable (principalmente el tráfico vehicular) y a la imposibilidad de detener la fuente para evaluar la real contribución de la energía sonora aportada por los demás focos de emisión (distintos a los que son de interés diagnosticar), los problemas deben aproximarse a través del uso de métodos de cálculo adecuados o por investigaciones basadas en modelos a escala.

Para los efectos de la homologación de la red de monitoreo continuo de ruido, los niveles de presión sonora en los puntos receptores de mayor impacto acústico (PP12, PP14 y PP15) serán estimados a partir de los datos registrados en los tres monitores de ruido y la atenuación que sufre el sonido en su camino de propagación, la que será de acuerdo a lo establecido en el Estándar Internacional ISO 9613-2:1996 Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation, el cual ofrece un método general de predicción a partir de la atenuación que sufre el sonido durante su propagación (entregando los resultados de los niveles estimados en bandas de octava), y al término de atenuación sonora debida a los efectos meteorológicos perteneciente al modelo de predicción sonora CONCAWE, publicado en 1981 bajo el título “Propagación del ruido producido por complejos petroleros y petroquímicos hacia comunidades vecinas”.

Antes de dar una descripción del modelo planteado, se dará a conocer el alcance del Estándar Internacional ISO 9613-2:1996, el término de atenuación sonora perteneciente al modelo CONCAWE y posteriormente, el modelo de propagación desarrollado para ésta situación en particular.

## 7.1 Estándar Internacional ISO 9613-2:1996

Esta parte de ISO 9613 especifica un método para calcular la atenuación del sonido durante su propagación al aire libre<sup>[23]</sup>, con el objeto de predecir los niveles de ruido (y con esto el impacto acústico) a una distancia determinada de un conjunto de fuentes sonoras. El método predice el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado “A” (como es descrito en las partes 1 a 3 de ISO 1996) bajo condiciones meteorológicas favorables en el camino de propagación desde las fuentes de emisión sonora hasta el(los) receptor(es).

Las condiciones de propagación son a favor del viento, como es especificado en ISO 1996-2:1987 o, equivalentemente, propagación en condiciones de inversión térmica en las cercanías del suelo, como comúnmente ocurre en la noche.

El método también predice un nivel de presión sonora ponderado “A” promediado a largo plazo como se especifica en ISO 1996-1:1982 e ISO 1996-2:1987. El nivel de presión sonora ponderado “A” a largo plazo abarca niveles de una gran variedad de condiciones meteorológicas.

El método consiste específicamente en algoritmos en bandas de octava (con frecuencias centrales desde los 63 Hz y 8 kHz) para calcular la atenuación del sonido que es originado por una fuente sonora puntual o un arreglo de fuentes puntuales. La(s) fuente(s) puede(n) ser móvil(es) o estacionaria(s). Los términos proporcionados en los algoritmos se especifican para los siguientes aspectos físicos:

- divergencia geométrica;
- absorción atmosférica;
- efectos del suelo;
- reflexión desde superficies;
- apantallamiento y obstáculos.

Este método es aplicable a una gran variedad de fuentes de ruido y ambientes acústicos. Esto es aplicable, directa o indirectamente, a muchas situaciones relacionadas con tráfico en carreteras o ferroviario, fuentes de ruido industrial, actividades de construcción y un gran número de otras fuentes de ruido a nivel del suelo.

Para aplicar el método de ésta parte de ISO 9613, es necesario conocer los diversos parámetros con respecto a la geometría de la fuente y del ambiente, la superficie característica del suelo y la energía de la fuente en términos del nivel de potencia sonora en bandas de octava en las direcciones pertinentes a la propagación.

Las principales partes en la metodología de predicción se resumen a partir de la ecuación básica de propagación, la cual estima el nivel de presión sonora continuo equivalente en bandas de octava a favor del viento en la posición del receptor,  $L_{fT}(DW)$ , siendo representada con la ecuación (7.1):

$$L_{fT}(DW) = L_w + D_C - A \quad \dots(7.1)$$

donde

$L_w$  es el nivel de potencia sonora en bandas de octava, en decibeles, producida por una fuente sonora puntual, relativa a una potencia sonora de referencia de 1 picowatt (1pW);

$D_C$  es la corrección por directividad, en decibeles, la cual describe la extensión en la cual el nivel de presión sonora continuo equivalente de una fuente sonora puntual se desvía en una dirección específica del nivel de una fuente puntual omnidireccional que produce un nivel de potencia sonora  $L_w$ ;  $D_C$  es igual al índice de directividad  $D_I$  de una fuente sonora puntual más un índice  $D_\Omega$  que da cuenta de la propagación sonora dentro de un ángulo sólido menor que  $4\pi$

stereoradianes; para una fuente puntual omnidireccional que radia en campo libre,  $D_c = 0$  dB.

$A$  es la atenuación, en decibeles, que ocurre en la propagación desde la fuente sonora y el receptor.

El término de atenuación  $A$  presente en la ecuación (7.1) es dado por la ecuación (7.2):

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \quad \dots(7.2)$$

donde

$A_{div}$  es la atenuación debida a la divergencia geométrica;

$A_{atm}$  es la atenuación debida a la absorción atmosférica;

$A_{gr}$  es la atenuación debida a los efectos del suelo;

$A_{bar}$  es la atenuación debida a la presencia de barreras;

$A_{misc}$  es la atenuación debida a otros efectos misceláneos.

El nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado "A" será obtenido por la sumatoria de las contribuciones del promedio temporal cuadrático de las presiones sonoras calculadas de acuerdo con la ecuación (7.1) para cada fuente sonora y para cada banda de octava, como es especificado en la ecuación (7.3):

$$L_{AT}(DW) = 10 \text{Log} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{j=1}^8 10^{0.1[L_{pi}(ij)+A_f(j)]} \right] \right\} \text{ dB} \quad \dots(7.3)$$

donde

- $n$  es el número de contribuciones (fuentes y caminos);
- $j$  es el índice que indica las ocho frecuencias centrales de las bandas de octava estandarizadas, que van desde los 63 Hz hasta los 8 kHz;
- $A_f$  denota la ponderación "A" estándar.

El nivel de presión sonora ponderado "A" promediado a largo plazo  $L_{AT}(LT)$  será calculado de acuerdo con:

$$L_{AT}(LT) = L_{AT}(DW) - C_{met} \quad \dots(7.4)$$

donde  $C_{met}$  es una corrección meteorológica.

El cálculo y significado de los términos de las ecuaciones (7.1) a (7.4) son explicados a continuación.

### 7.1.1 Divergencia geométrica esférica

La divergencia geométrica esférica da cuenta de la expansión generada por una fuente sonora puntual bajo condiciones de propagación en campo libre, desarrollando así una atenuación, en decibeles, expresada como:

$$A_{div} = 20 \text{Log} \left( \frac{d}{d_0} \right) + 11 \text{ dB} \quad \dots(7.5)$$

donde;

- $d$  es la distancia entre la fuente y el receptor, en metros;
- $d_0$  es la distancia de referencia (= 1m).

### 7.1.2 Absorción atmosférica

La atenuación debida a la absorción atmosférica,  $A_{atm}$ , en decibeles, durante la propagación a través de una distancia  $d$ , en metros, es dada por la ecuación (7.5):

$$A_{atm} = \alpha d / 1000 \quad \dots(7.5)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación atmosférica para cada banda de octava (ver Tabla 12), en decibeles por kilómetro.

**Tabla 12** – Coeficiente de atenuación atmosférica,  $\alpha$ , para cada banda de octava.

Temperatura °C	Humedad Relativa %	Coeficiente de atenuación atmosférica $\alpha$ , dB/km							
		Frecuencia, Hz							
		63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
10	70	0.1	0.4	1.0	1.9	3.7	9.7	32.8	117
20	70	0.1	0.3	1.1	2.8	5.0	9.0	22.9	76.6
30	70	0.1	0.3	1.0	3.1	7.4	12.7	23.1	59.3
15	20	0.3	0.6	1.2	2.7	8.2	28.2	88.8	202
15	50	0.1	0.5	1.2	2.2	4.2	10.8	36.2	129
15	80	0.1	0.3	1.1	2.4	4.1	8.3	23.7	82.8

### 7.1.3 Efectos del suelo

La atenuación del suelo,  $A_{gr}$ , es principalmente el resultado del sonido reflejado por la superficie del terreno, interfiriendo con la propagación del sonido directo entre la fuente sonora y el receptor.

El cálculo del efecto del suelo se basa en datos empíricos, y es laborioso cuando éste se realiza en bandas de octava, es por eso, que ésta parte de

ISO 9613 establece un método de cálculo para los niveles de presión sonora ponderado “A” bajo las siguientes condiciones específicas:

- solo es de interés el nivel de presión sonora en la posición del receptor,
- la propagación del sonido ocurre sobre suelo poroso o suelo mixto el cual la mayoría es poroso,
- el sonido no es un tono puro,

Para cualquier geometría de la superficie, la atenuación del suelo puede ser calculada con la ecuación (7.7):

$$A_{gr} = 4,8 - (2h_m/d)[17 + (300/d)] \geq 0 \text{ dB} \quad \dots(7.7)$$

donde

$h_m$  es la altura media del camino de propagación sobre el suelo, en metros;

$d$  es la distancia entre la fuente y el receptor, en metros.

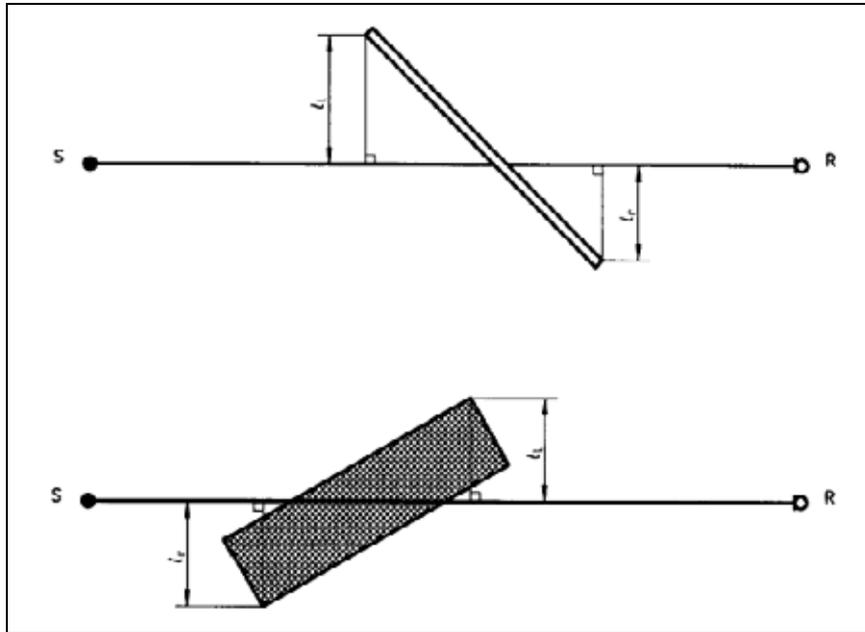
valores negativos de  $A_{gr}$  de la ecuación (7.7) deberán ser remplazados por cero.

#### 7.1.4 Apantallamiento

Un objeto será tomado en cuenta como un obstáculo que sirve como pantalla (frecuentemente llamada barrera) si cumple con los siguientes requisitos:

- su densidad superficial es al menos  $10 \text{ kg/m}^2$  ;
- el objeto tiene una superficie cerrada sin aberturas o grietas grandes (por ejemplo, las instalaciones de procesos de plantas químicas son ignoradas);

- la dimensión horizontal del objeto, normal a la línea fuente-receptor, es más grande que la longitud de onda acústica,  $\lambda$ , de la banda de octava de interés; en otras palabras  $l_l + l_r > \lambda$  (Figura 12).



**Figura 12:** Vista de dos obstáculos presentes entre la fuente (S) y el receptor (R).

Cualquier objeto que cumple con estos requisitos será reemplazado por una barrera. El borde de la parte superior de la barrera es una línea recta que puede ser oblicua.

Para los propósitos de ésta parte de ISO 9613, la atenuación por barrera será dada por la pérdida de inserción. Para propagación del sonido a favor del viento, los efectos de difracción (en decibeles) sobre el borde de la parte superior será calculado por:

$$A_{bar} = D_z - A_{gr} > 0 \quad \dots(7.8)$$

y para difracción alrededor del borde vertical por:

$$A_{bar} = D_z > 0 \quad \dots(7.9)$$

donde

$D_z$  es la atenuación por barrera para cada banda de octava [ver ecuación (7.10)];

$A_{bar}$  es la atenuación del suelo en ausencia de la barrera (es decir, con el obstáculo de pantalla removido).

Cuando  $A_{bar}$  es definida por la ecuación (7.8), y es sustituida en la ecuación (7.2) para encontrar la atenuación total  $A$ , los dos términos  $A_{gr}$  en la ecuación (7.2) se cancelarán. Luego, la atenuación por barrera  $D_z$  en la ecuación (7.8) incluirá los efectos del suelo en presencia de la barrera.

La atenuación por barrera  $D_z$ , en decibeles, será calculada para ese camino de propagación con la ecuación (7.10):

$$D_z = 10 \text{Log} [3 + (C_2/\lambda) C_3 z k_{met}] \text{ dB} \quad \dots(7.10)$$

donde

$C_2$  es igual a 20, e incluye los efectos de las reflexiones del suelo; si en casos especiales las reflexiones en el suelo son tomadas en cuenta separadamente por fuentes imaginarias,  $C_2 = 40$ ;

$C_3$  es igual a 1 para difracción única; o

$$C_3 = [1 + (5\lambda/e)^2] / [(1/3) + (5\lambda/e)^2] \quad \dots(7.11)$$

para doble difracción;

$\lambda$  es la longitud de onda de la frecuencia central de la banda de octava sujeta a análisis, en metros;

$z$  es la diferencia entre las longitudes del camino del sonido directo y difractado, calculado con las ecuaciones (7.12) y (7.13), en metros;

$k_{met}$  es el factor de corrección por efectos meteorológicos, dados por la ecuación (7.14);

$e$  es la distancia entre dos bordes en el caso de doble difracción.

Para difracción única, la diferencia de las longitudes de camino  $z$  será calculada por medio de la ecuación (7.12):

$$z = \left[ (d_{ss} + d_{sr})^2 + a^2 \right]^{1/2} - d \quad \dots(7.12)$$

donde

$d_{ss}$  es la distancia desde la fuente al (primer) borde de difracción, en metros;

$d_{sr}$  es la distancia desde el (segundo) borde de difracción hacia el receptor, en metros;

$a$  es la componente paralela al borde de la barrera entre la fuente y el receptor, en metros.

Si la línea de visión entre la fuente  $S$  y el receptor  $R$  pasa por sobre el borde superior de la barrera,  $z$  es dado con un signo negativo.

Para difracciones dobles, la diferencia de longitud de camino  $z$  será calculada por (ver Figura 13):

$$z = \left[ (d_{ss} + d_{sr} + e)^2 + a^2 \right]^{1/2} - d \quad \dots(7.13)$$

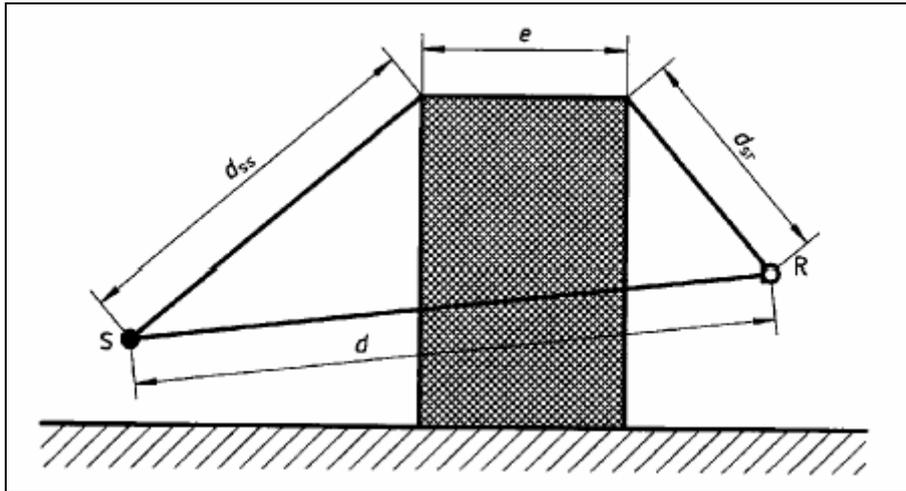
El factor de corrección de condiciones meteorológicas  $K_{met}$  en la ecuación (7.10) será calculado usando la ecuación (7.14):

$$K_{met} = \exp\left[-(1/2000)\sqrt{d_{ss}d_{sr}d/(2z)}\right] \quad \text{para } z > 0$$

...(7.14)

$$K_{met} = 1 \quad \text{para } z \leq 0$$

Para difracciones laterales alrededor de obstáculos, será asumido que  $K_{met} = 1$ .



**Figura 13:** Variables geométricas a considerar para calcular las diferencias entre los caminos de propagación en presencia de difracción doble.

La atenuación por barrera,  $D_z$ , en cualquier banda de octava, en el caso de una única difracción (es decir, una barrera delgada) no debería ser tomada mayor que 20 dB, y 25 dB en el caso de doble difracción (es decir, una barrera gruesa).

### 7.1.5 Reflexiones

Las reflexiones son consideradas en términos de fuentes imaginarias. Esas reflexiones son desde techos exteriores y superficies con algún grado de verticalidad, tal como la fachada de edificios, la cual puede incrementar el nivel de presión sonora en el receptor. Los efectos de reflexiones desde el suelo no son incluidos ya que esos entran en el cálculo de  $A_{gr}$ .

Las reflexiones desde un obstáculo serán calculadas sobre cada banda de octava, cuando exista la presencia de las siguientes condiciones:

- generación de una reflexión especular (Figura 14),
- coeficiente de reflexión sonora de la superficie del obstáculo con magnitud superior a 0,2;
- la superficie es considerablemente extensa, en relación a la longitud de onda,  $\lambda$ , expresada en metros, de la banda de octava de interés, bajo las consideraciones que obedecen a la ecuación (7.15):

$$1/\lambda = \left[ 2/(l_{\min} \cos \beta)^2 \right] \left[ d_{s,o} d_{s,r} / (d_{s,o} + d_{o,r}) \right] \quad \dots(7.15)$$

donde

$\lambda$  es la longitud de onda del sonido (en metros) de la frecuencia central

$f$  (en hertz) de la banda de octava de interés ( $\lambda = \frac{340 \text{ m/s}}{f}$ );

$d_{s,o}$  es la distancia entre la fuente y el punto de reflexión del obstáculo;

$d_{o,r}$  es la distancia entre el punto de reflexión en el obstáculo y el receptor;

$\beta$  es el ángulo de incidencia, en radianes;

$l_{\min}$  es la mínima dimensión (largo o alto) de la superficie reflectora.

Si cualquiera de esas condiciones no están presentes para las bandas de octava dadas, las reflexiones serán despreciadas.

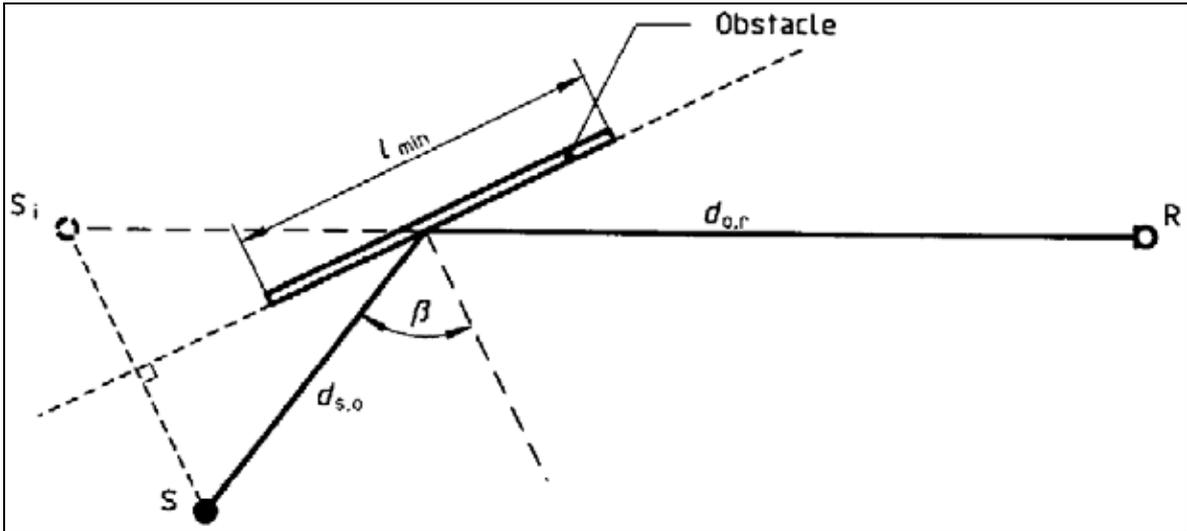
La fuente real y la fuente imaginaria son tratadas separadamente. El nivel de potencia sonora de la fuente imaginaria  $L_{w,im}$  será calculada desde:

$$L_{w,im} = L_w + 10 \text{Log}(\rho) + D_{lr} \quad \text{dB} \quad \dots(7.16)$$

donde

$\rho$  es el coeficiente de reflexión sonora para un ángulo de incidencia  $\beta$  sobre la superficie del obstáculo ( $\geq 0,2$ );

$D_{ir}$  es el índice de directividad de la fuente en la dirección imagen-receptor.

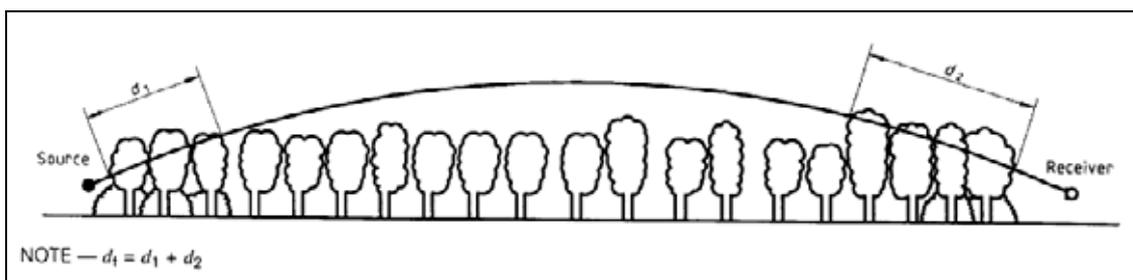


**Figura 14:** Generación de una reflexión especular desde un obstáculo.

Para fuentes sonoras imaginarias, los términos de atenuación de la ecuación (7.2), así como  $\rho$  y  $D_{ir}$ , en la ecuación (7.16), serán determinados de acuerdo al camino de propagación del sonido reflejado.

### 7.1.6 Follaje

El follaje de árboles y arbustos proveen sólo una pequeña cantidad de atenuación, pero solo si es lo suficientemente denso como para bloquear completamente la visión a lo largo del camino de propagación, es decir, cuando existe la imposibilidad de realizar contacto visual entre el receptor y la fuente (ver Figura 15).



**Figura 15:** Atenuación a través de follaje denso.

En la Tabla 13 se da a conocer el efecto de la atenuación producto de la presencia de follaje:

**Tabla 13** – Atenuación sonora debido a la propagación a una distancia “d” a través de un follaje denso.

Distancia de propagación, m	Frecuencia, Hz							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10 < d < 20	Atenuación, dB							
	0	0	1	1	1	1	2	3
20 < d < 200	Atenuación, dB/m							
	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.12

### 7.1.7 Sitios industriales

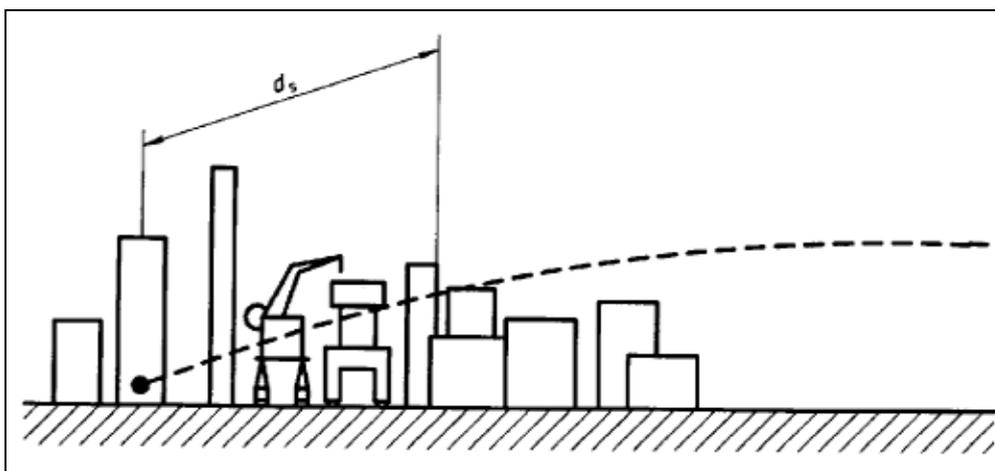
En sitios industriales, la atenuación puede ocurrir debido a que las instalaciones (y otros objetos) se encuentran dispersas pudiendo ser descritas como  $A_{site}$  a menos que se tome en cuenta  $A_{bar}$ .

Como el valor de  $A_{site}$  depende fundamentalmente del tipo de lugar, se recomienda que sea determinado por mediciones. Sin embargo, para estimar estas atenuaciones, serán usados los valores mostrados en la Tabla 14. La atenuación se incrementa linealmente con la longitud del camino de

propagación  $d_s$  a través de las instalaciones (Figura 16), presentando una atenuación máxima de 10 dB.

**Tabla 14** – Atenuación sonora debida a la propagación a través de plantas industriales.

Frecuencia, Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$A_{site}$ , dB/m	0	0.015	0.025	0.025	0.02	0.02	0.015	0.015



**Figura 16:** Atenuación sonora debida a la propagación a través de sitios industriales.

### 7.1.8 Exactitud y limitaciones del método

Las variaciones en la atenuación, presentes en la propagación del sonido entre una fuente fija y un grupo de receptores, se deben principalmente a las fluctuaciones de las condiciones meteorológicas a lo largo del camino de propagación.

Los errores, mostrados en la Tabla 15, estimados en los cálculos del nivel de presión sonora en bandas de octava a favor del viento, así como también, los niveles de presión sonora de tonos puros, bajo las mismas condiciones, pueden ser algo mayor que el error estimado para el nivel de presión sonora ponderado "A" generados por fuentes que emiten en banda ancha.

La Tabla 15 no proporciona una exactitud estimada para ésta parte de ISO 9613 cuando se presentan distancias  $d$  mayores a los 1000 metros.

**Tabla 15** – Exactitud estimada del modelo de predicción para ruido de banda ancha.

Altura, $h$	Distancia, $d$	
	$0 < d < 100$ m	$100 \text{ m} < d < 1000$ m
$0 < h < 5$ m	$\pm 3$ dB	$\pm 3$ dB
$5 \text{ m} < h < 30$ m	$\pm 1$ dB	$\pm 3$ dB

## 7.2 Atenuación Sonora debida a los Efectos Meteorológicos

Esta metodología<sup>[5]</sup> es el resultado de estudios que buscaban actualizar los algoritmos usados en el consorcio petrolero OCMA. El modelo permite estimar los niveles de presión sonora en bandas de octava (entre los 63 Hz y los 4 kHz) en cualquier punto del ambiente sonoro colindante a la fuente sonora. Este modelo es el único desarrollado explícitamente con la influencia de los efectos meteorológicos, tales como dirección y magnitud del viento, y la estabilidad atmosférica, basados en los estudios realizados por Piercy, Emblenton y Sutherland, los que usaron las mediciones realizadas por Parkin y Scholes.

De ésta manera, el término de atenuación sonora debida a los efectos meteorológicos ( $A_{Cmet}$ ) es calculado para cada banda de octava según la clasificación de las condiciones meteorológicas presentes en el camino de propagación de la onda sonora de acuerdo a la estabilidad establecida por Pasquill, obteniendo así seis categorías meteorológicas (categorías A – G), definiéndose con esto las ecuaciones para los términos de atenuación sonora para cada banda de octava y categoría meteorológica presente en el ambiente entre la(s) fuente(s) sonora(s) y el(los) punto(s) receptor(es).

La categoría A representa un fuerte gradiente de temperatura (disminución de la temperatura con la altura), mientras que la categoría G representa inversión de temperatura que puede ser encontrada en una tranquila noche estrellada. De esta manera, y de acuerdo a la radiación solar cuando es de día y la nubosidad en la noche, se establece la siguiente tabla:

**Tabla 16** – Clasificación de las condiciones meteorológicas de acuerdo a Pasquill y Turner.

<b>Clasificación de las condiciones meteorológicas de acuerdo a la estabilidad de Pasquill</b>								
<b>Velocidad del viento (m/s)</b>	<b>De día</b> (radiación solar, mW/cm <sup>2</sup> )				1hr antes de que se esconda el sol o 1hr después de que salga	<b>De noche</b> (de acuerdo a la nubosidad, octas)		
	> 60	30 – 60	< 30	0		0 – 3	4 – 7	8
≤ 1,5	A	A – B	B	C	D	F o G	F	D
2,0 – 2,5	A – B	B	C	C	D	F	E	D
3,0 – 4,5	B	C	C	C	D	E	D	D
5,0 – 6,0	C	C – D	D	D	D	D	D	D
> 6,0	D	D	D	D	D	D	D	D

Una vez definida la categoría de la condición climática en análisis, y de acuerdo a la magnitud del vector de viento (v) medido al nivel del suelo (componente en dirección fuente–receptor), se define la categoría meteorológica final (entre 1 y 6) de acuerdo a la siguiente tabla:

**Tabla 17** – Categorización de las condiciones meteorológicas según Pasquill.

<b>Categorización meteorológica</b>			
<b>Categoría meteorológica</b>	<b>Categorización de Pasquill</b>		
	A, B	C, D, E	F, G
1	$v < -3,0$	--	--
2	$-3,0 < v < -0,5$	$v < -3,0$	--
3	$-0,5 < v < +0,5$	$-3,0 < v < -0,5$	$v < -3,0$
4	$+0,5 < v < +3,0$	$-0,5 < v < +0,5$	$-3,0 < v < -0,5$
5	$v > +3,0$	$+0,5 < v < +3,0$	$-0,5 < v < +0,5$
6	--	$v > +3,0$	$+0,5 < v < +3,0$

Para la categoría 4, todas las correcciones por efectos meteorológicos son cero. Para las demás categorías se definen las siguientes ecuaciones:

**63 Hz:**

$$A_{Cmet,categoría1} = -38,9 + 26,4(Logd) - 2,84(Logd)^2 - 0,234(Logd)^3 \quad \dots(7.17)$$

$$A_{Cmet,categoría2} = 16,1 - 28,43(Logd) + 14,4(Logd)^2 - 2,1(Logd)^3 \quad \dots(7.18)$$

$$A_{Cmet,categoría3} = -4 + 2(Logd) \quad \dots(7.19)$$

$$A_{Cmet,categoría5} = 3.35 - 2.26(Logd) + 0.407(Logd)^2 - 0.0572(Logd)^3 \quad \dots(7.20)$$

$$A_{Cmet,categoría6} = 69.3 - 73.2(Logd) + 24.688(Logd)^2 - 2,7531(Logd)^3 \quad \dots(7.21)$$

**125 Hz:**

$$A_{Cmet,categoría1} = -137 + 142(Logd) - 46.8(Logd)^2 + 5.14(Logd)^3 \quad \dots(7.22)$$

$$A_{Cmet,categoría2} = -23.2 + 19.53(Logd) - 4.646(Logd)^2 - 0,3358(Logd)^3 \quad \dots(7.23)$$

$$A_{Cmet,categoría3} = -3 + 1.5(Logd) \quad \dots(7.24)$$

$$A_{Cmet,categoría5} = 6.8 - 3.4(Logd) \quad \dots(7.25)$$

$$A_{Cmet,categoría6} = 29.5 - 25.62(Logd) + 6.286(Logd)^2 - 0,4904(Logd)^3 \quad \dots(7.26)$$

**250 Hz:**

$$A_{Cmet,categoría1} = -104 + 100(Logd) - 30.3(Logd)^2 + 3.03(Logd)^3 \quad \dots(7.27)$$

$$A_{Cmet,categoría2} = -84.8 + 91.93(Logd) - 30.873(Logd)^2 + 3.4295(Logd)^3 \quad \dots(7.28)$$

$$A_{Cmet,categoría3} = -100.6 + 101.23(Logd) - 32.352(Logd)^2 + 3.4306(Logd)^3 \quad \dots(7.29)$$

$$A_{Cmet,categoría5} = 7.4 - 4.2(Logd) \quad \dots(7.30)$$

$$A_{Cmet,categoría6} = 31.7 - 23.81(Logd) + 4.055(Logd)^2 - 0.1043(Logd)^3 \quad \dots(7.31)$$

**500 Hz:**

$$A_{Cmet,categoría1} = -20.9 + 3.86(Logd) + 6.39(Logd)^2 - 1.43(Logd)^3 \quad \dots(7.32)$$

$$A_{Cmet,categoría2} = -133.7 + 142.63(Logd) - 47.851(Logd)^2 + 5.3118(Logd)^3 \quad \dots(7.33)$$

$$A_{Cmet,categoría3} = -96.8 + 102.98(Logd) - 34.868(Logd)^2 + 3.9016(Logd)^3 \quad \dots(7.34)$$

$$A_{Cmet,categoría5} = 7.4 - 4.2(Logd) \quad \dots(7.35)$$

$$A_{Cmet,categoría6} = 19.8 - 8.8(Logd) - 2.035(Logd)^2 + 0.6747(Logd)^3 \quad \dots(7.36)$$

**1000 Hz:**

$$A_{Cmet,categoría1} = -54.3 + 39(Logd) - 4.92(Logd)^2 - 0.239(Logd)^3 \quad \dots(7.37)$$

$$A_{Cmet,categoría2} = -148.2 + 164.99(Logd) - 56.287(Logd)^2 + 6.3422(Logd)^3 \quad \dots(7.38)$$

$$A_{Cmet,categoría3} = -150 + 160.95(Logd) - 54.786(Logd)^2 + 6.1604(Logd)^3 \quad \dots(7.39)$$

$$A_{Cmet,categoría5} = 104.6 - 108.03(Logd) + 35.295(Logd)^2 - 3.8227(Logd)^3 \quad \dots(7.40)$$

$$A_{Cmet,categoría6} = 123.4 - 127.6(Logd) + 42.017(Logd)^2 - 4.584(Logd)^3 \quad \dots(7.41)$$

**2000 Hz:**

$$A_{Cmet,categoría1} = -69.9 + 63.6(Logd) - 16.9(Logd)^2 + 1.43(Logd)^3 \quad \dots(7.42)$$

$$A_{Cmet,categoría2} = -143 + 142.18(Logd) - 44.509(Logd)^2 + 4.6195(Logd)^3 \quad \dots(7.43)$$

$$A_{Cmet,categoría3} = -116.3 + 120.85(Logd) - 39.944(Logd)^2 + 4.378(Logd)^3 \quad \dots(7.44)$$

$$A_{Cmet,categoría5} = 60.3 - 64.07(Logd) + 21.458(Logd)^2 - 2.3784(Logd)^3 \quad \dots(7.45)$$

$$A_{Cmet,categoría6} = 82.3 - 90.98(Logd) + 31.444(Logd)^2 - 3.584(Logd)^3 \quad \dots(7.46)$$

### 4000 Hz:

$$A_{Cmet,categoría1} = -126 + 128(Logd) - 40.4(Logd)^2 + 4.24(Logd)^3 \quad \dots(7.47)$$

$$A_{Cmet,categoría2} = -125.4 + 124.75(Logd) - 38.807(Logd)^2 + 4.017(Logd)^3 \quad \dots(7.48)$$

$$A_{Cmet,categoría3} = -127.5 + 135.12(Logd) - 45.709(Logd)^2 + 5.1113(Logd)^3 \quad \dots(7.49)$$

$$A_{Cmet,categoría5} = 28.7 - 20.1(Logd) + 2.68(Logd)^2 + 0.0957(Logd)^3 \quad \dots(7.50)$$

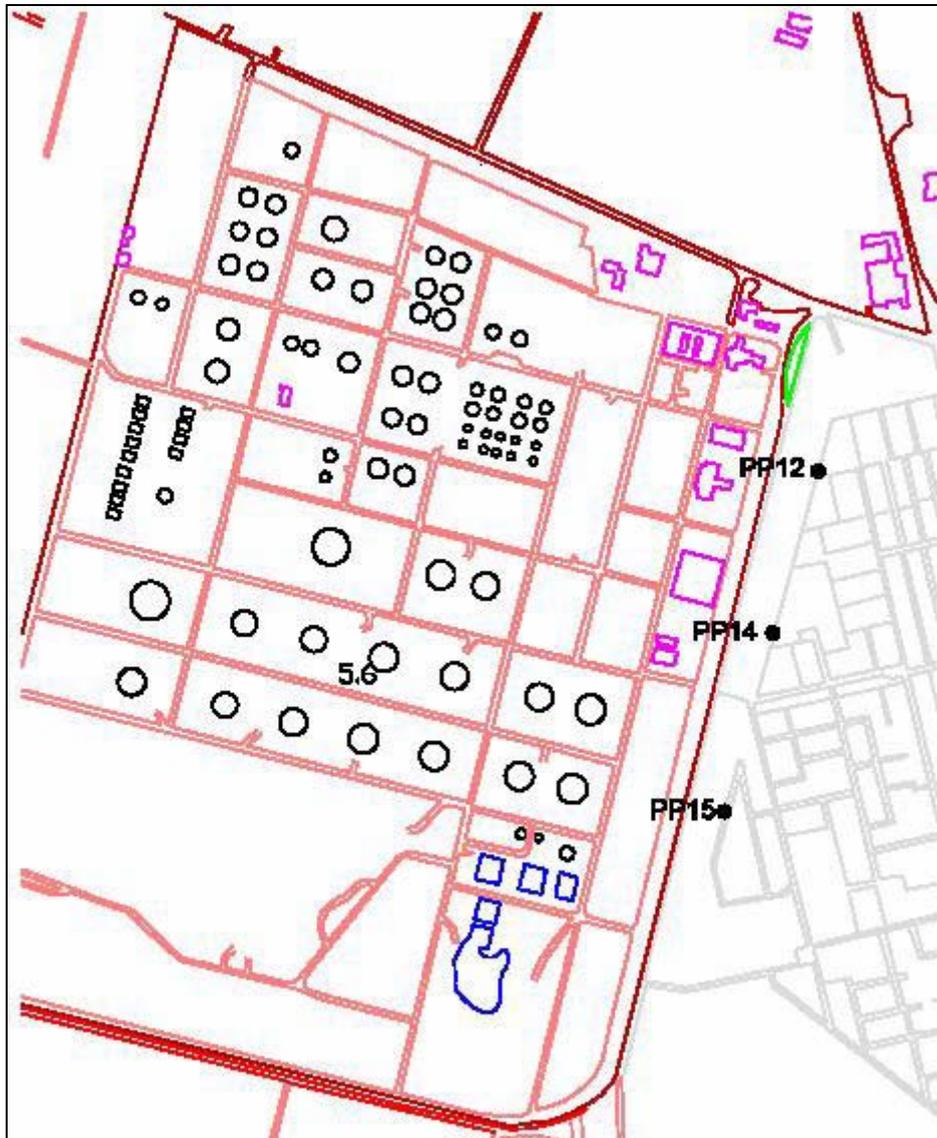
$$A_{Cmet,categoría6} = 66.4 - 60.77(Logd) + 16.409(Logd)^2 - 1.4457(Logd)^3 \quad \dots(7.51)$$

### 7.3 Modelo de Predicción de Niveles Sonoros

De acuerdo al método establecido en la norma ISO 9613-2:1996, y al aporte del término de atenuación sonora debida a los efectos meteorológicos extraído del modelo CONCAWE, se presenta a continuación el modelo de predicción de emisiones sonoras generadas por Enap Refinerías Bio Bio hacia los tres puntos de mayor impacto acústico (PP12, PP14 y PP15) a partir de los niveles de presión sonora entregados por los tres monitores de ruido ubicados en la periferia del recinto de la refinería.

El nivel de presión sonora generado por las  $N$  fuentes de ruido en los puntos de mayor impacto acústico (análisis válido considerando nueve fuentes sonoras), puede ser determinado a partir de los niveles sonoros registrados en forma simultánea por los tres monitores de ruido ubicados en la periferia de la refinería (Figura 9), y de las diferencias en las atenuaciones presentes en los caminos de propagación entre las fuentes sonoras a cada punto de impacto acústico y a cada monitor de ruido, estableciendo así la relación existente entre

los valores entregados por cada estación de monitoreo, y los niveles sonoros aportados por la refinería a su área de influencia (Figura 17).



**Figura 17:** Puntos de mayor impacto acústico sobre el área de influencia.

El análisis que se describe a continuación, entiéndase que es llevado a cabo para la  $j$ -ava banda de octava, donde el resultado final es producto de la contribución de la energía sonora aportada por cada banda de octava, expresando los valores obtenidos en niveles de presión sonora con ponderación "A".

El nivel de presión sonora para la  $j$ -ava banda de octava que es generado por la contribución de las  $N$  fuentes de ruido que impactan sobre el punto PP12 puede ser expresado como:

$$L_{jPP12} = 10\text{Log}\left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{jiPP12}}{10}}\right) \quad \dots(7.52)$$

siendo

$$L_{jiPP12} = L_{jWi} - 20\text{Log}(r_{iPP12}) - 11 - A_{jiPP12} \quad \dots(7.53)$$

donde

$L_{jiPP12}$  es el nivel de presión sonora que aporta la  $i$ -ésima fuente de ruido al punto PP12;

$L_{jWi}$  es el nivel de potencia sonora que emite la  $i$ -ésima fuente de ruido;

$r_{iPP12}$  es la distancia entre la  $i$ -ésima fuente de ruido y el punto PP12;

$A_{jiPP12}$  es la atenuación que sufre el sonido en el camino de propagación entre la  $i$ -ésima fuente de ruido y el punto PP12 sin considerar la atenuación por divergencia geométrica esférica.

De acuerdo a lo anterior, para los puntos PP14 y PP15, el nivel de presión sonora que es generado por la contribución de las  $N$  fuentes de ruido queda expresado como sigue:

$$L_{jPP14} = 10\text{Log}\left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{jiPP14}}{10}}\right); \quad L_{jiPP14} = L_{jWi} - 20\text{Log}(r_{iPP14}) - 11 - A_{jiPP14} \quad \dots(7.54)$$

$$L_{jPP15} = 10\text{Log}\left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{jiPP15}}{10}}\right); \quad L_{jiPP15} = L_{jWi} - 20\text{Log}(r_{iPP15}) - 11 - A_{jiPP15} \quad \dots(7.55)$$

Los niveles de presión sonora registrados por los monitores de ruido, producto de las emisiones generadas por las  $N$  fuentes, se expresan como:

$$L_{jM} = 10 \text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{jiM}}{10}} \right) \quad ; \quad L_{jiM} = L_{jWi} - 20 \text{Log}(r_{iM}) - 11 - A_{jiM} \quad \dots(7.56)$$

$$L_{j4S} = 10 \text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{ji4S}}{10}} \right) \quad ; \quad L_{ji4S} = L_{jWi} - 20 \text{Log}(r_{i4S}) - 11 - A_{ji4S} \quad \dots(7.57)$$

$$L_{j7S} = 10 \text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{ji7S}}{10}} \right) \quad ; \quad L_{ji7S} = L_{jWi} - 20 \text{Log}(r_{i7S}) - 11 - A_{ji7S} \quad \dots(7.58)$$

donde

- $L_{jM}$  es el nivel de presión sonora registrado en el monitor Maestranza;
- $L_{j4S}$  es el nivel de presión sonora registrado en el monitor 4 Sur;
- $L_{j7S}$  es el nivel de presión sonora registrado en el monitor 7 Sur;
- $L_{jiM}$  es el nivel de presión sonora que aporta la  $i$ -ésima fuente de ruido al monitor Maestranza;
- $L_{ji4S}$  es el nivel de presión sonora que aporta la  $i$ -ésima fuente de ruido al monitor 4 Sur;
- $L_{ji7S}$  es el nivel de presión sonora que aporta la  $i$ -ésima fuente de ruido al monitor 7 Sur;
- $r_{iM}$  es la distancia entre la  $i$ -ésima fuente de ruido y el monitor Maestranza;
- $r_{i4S}$  es la distancia entre la  $i$ -ésima fuente de ruido y el monitor 4 Sur;
- $r_{i7S}$  es la distancia entre la  $i$ -ésima fuente de ruido y el monitor 7 Sur;
- $A_{jiM}$  es la atenuación en el camino de propagación entre la  $i$ -ésima fuente de ruido y el monitor Maestranza sin considerar la atenuación por divergencia geométrica esférica;

$A_{ji4S}$  es la atenuación en el camino de propagación entre la  $i$ -ésima fuente de ruido y el monitor 4 Sur sin considerar la atenuación por divergencia geométrica esférica;

$A_{ji7S}$  es la atenuación en el camino de propagación entre la  $i$ -ésima fuente de ruido y el monitor 7 Sur sin considerar la atenuación por divergencia geométrica esférica.

Ahora se definen los “monitores imagen”, los cuales son las proyecciones de los monitores de ruido en la dirección de la  $i$ -ésima fuente sonora y el punto receptor de interés. Cabe destacar que la distancia entre la fuente de ruido y el monitor imagen es la misma que existe entre la fuente y el monitor de ruido original, esto es, se mantiene constante la distancia del monitor referencia, variando solamente la dirección de éste (orientación en dirección al punto receptor de interés). Los niveles de presión sonora en los monitores imagen son los siguientes:

$$L_{jiM}^* = L_{jWi} - 20\text{Log}(r_{iM}) - 11 - A_{jiM}^* \quad \dots(7.59)$$

$$L_{ji4S}^* = L_{jWi} - 20\text{Log}(r_{i4S}) - 11 - A_{ji4S}^* \quad \dots(7.60)$$

$$L_{ji7S}^* = L_{jWi} - 20\text{Log}(r_{i7S}) - 11 - A_{ji7S}^* \quad \dots(7.61)$$

donde

$L_{jiM}^*$  es el nivel de presión sonora que aporta la  $i$ -ésima fuente de ruido al monitor imagen Maestranza;

$L_{ji4S}^*$  es el nivel de presión sonora que aporta la  $i$ -ésima fuente de ruido al monitor imagen 4 Sur;

$L_{ji7S}^*$  es el nivel de presión sonora que aporta la  $i$ -ésima fuente de ruido al monitor imagen 7 Sur;

$A_{jiM}^*$  es la atenuación en el camino de propagación entre la  $i$ -ésima fuente de ruido y el monitor imagen Maestranza sin considerar la atenuación por divergencia geométrica esférica;

$A_{ji4S}^*$  es la atenuación en el camino de propagación entre la  $i$ -ésima fuente de ruido y el monitor imagen 4 Sur sin considerar la atenuación por divergencia geométrica esférica;

$A_{ji7S}^*$  es la atenuación en el camino de propagación entre la  $i$ -ésima fuente de ruido y el monitor imagen 7 Sur sin considerar la atenuación por divergencia geométrica esférica.

De ésta forma, los niveles en los monitores imagen, en función de los valores entregados por los monitores originales, se pueden expresar como:

$$L_{jiM}^* = L_{jiM} + A_{jiM} - A_{jiM}^* \quad \dots(7.62)$$

$$L_{ji4S}^* = L_{ji4S} + A_{ji4S} - A_{ji4S}^* \quad \dots(7.63)$$

$$L_{ji7S}^* = L_{ji7S} + A_{ji7S} - A_{ji7S}^* \quad \dots(7.64)$$

Considerando el punto PP12, el nivel de presión sonora aportado por la  $i$ -ésima fuente de ruido al punto receptor, en función del nivel de referencia entregado por el monitor de ruido original, lo podemos obtener combinando las siguientes relaciones:

$$L_{jiPP12} = L_{jWi} - 20\text{Log}(r_{iPP12}) - 11 - A_{jiPP12} \quad \dots(7.65)$$

$$L_{jiM}^* = L_{jWi} - 20\text{Log}(r_{iM}) - 11 - A_{jiM}^* \quad \dots(7.66)$$

$$L_{ji4S}^* = L_{jWi} - 20\text{Log}(r_{i4S}) - 11 - A_{ji4S}^* \quad \dots(7.67)$$

$$L_{ji7S}^* = L_{jWi} - 20\text{Log}(r_{i7S}) - 11 - A_{ji7S}^* \quad \dots(7.68)$$

llegando así a una triple igualdad, cada una dependiente del nivel de presión sonora estimado para cada monitor imagen:

$$L_{jiPP12} = \left\{ \begin{array}{l} L_{jiM}^* - 20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{iM}) + A_{jiM}^* - A_{jiPP12} \\ L_{ji4S}^* - 20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{i4S}) + A_{ji4S}^* - A_{jiPP12} \\ L_{ji7S}^* - 20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{i7S}) + A_{ji7S}^* - A_{jiPP12} \end{array} \right\} \quad \dots(7.69)$$

Utilizando la relación que existe entre los niveles de presión sonora estimados en los monitores imagen y los niveles registrados por los monitores originales, el nivel de presión sonora en el punto PP12 generado por la *i*-ésima fuente de ruido queda expresado como:

$$L_{jiPP12} = \left\{ \begin{array}{l} L_{jiM} - 20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{iM}) + A_{jiM} - A_{jiPP12} \\ L_{ji4S} - 20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{i4S}) + A_{ji4S} - A_{jiPP12} \\ L_{ji7S} - 20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{i7S}) + A_{ji7S} - A_{jiPP12} \end{array} \right\} \quad \dots(7.70)$$

Siguiendo el mismo análisis para los demás puntos de impacto, el nivel de presión sonora estimado para el punto PP14 y PP15 obedece a las siguientes expresiones:

$$L_{jiPP14} = \left\{ \begin{array}{l} L_{jiM} - 20\text{Log}(r_{iPP14}/r_{iM}) + A_{jiM} - A_{jiPP14} \\ L_{ji4S} - 20\text{Log}(r_{iPP14}/r_{i4S}) + A_{ji4S} - A_{jiPP14} \\ L_{ji7S} - 20\text{Log}(r_{iPP14}/r_{i7S}) + A_{ji7S} - A_{jiPP14} \end{array} \right\} \quad \dots(7.71)$$

$$L_{jiPP15} = \left\{ \begin{array}{l} L_{jiM} - 20\text{Log}(r_{iPP15}/r_{iM}) + A_{jiM} - A_{jiPP15} \\ L_{ji4S} - 20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{i4S}) + A_{ji4S} - A_{jiPP15} \\ L_{ji7S} - 20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{i7S}) + A_{ji7S} - A_{jiPP15} \end{array} \right\} \quad \dots(7.72)$$

Volviendo a la expresión original para el punto receptor PP12, dada por la contribución de las  $N$  fuentes de ruido:

$$L_{jPP12} = 10\text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{jiPP12}}{10}} \right) \quad ; \quad L_{jiPP12} = L_{jiWi} - 20\text{Log}(r_{iPP12}) - 11 - A_{jiPP12} \dots(7.73)$$

y a la dependencia obtenida a partir de los niveles de presión sonora registrados por los monitores de ruido, llegamos a la siguiente expresión:

$$L_{jPP12} = \left\{ \begin{array}{l} 10\text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{jiM} - 20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{iM}) + A_{jiM} - A_{jiPP12}}{10}} \right) \\ 10\text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{ji4S} - 20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{i4S}) + A_{ji4S} - A_{jiPP12}}{10}} \right) \\ 10\text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{ji7S} - 20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{i7S}) + A_{ji7S} - A_{jiPP12}}{10}} \right) \end{array} \right\} \quad \dots(7.74)$$

Análogamente a lo anterior, es posible obtener una estimación de los niveles de presión sonora presentes en los demás puntos de impacto, en función a los niveles registrados por los monitores de ruido, obteniendo así, para los puntos PP14 y PP15, las siguientes expresiones:

$$L_{jPP14} = \left\{ \begin{array}{l} 10\text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{jiM} - 20\text{Log}(r_{iPP14}/r_{iM}) + A_{jiM} - A_{jiPP14}}{10}} \right) \\ 10\text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{ji4S} - 20\text{Log}(r_{iPP14}/r_{i4S}) + A_{ji4S} - A_{jiPP14}}{10}} \right) \\ 10\text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{ji7S} - 20\text{Log}(r_{iPP14}/r_{i7S}) + A_{ji7S} - A_{jiPP14}}{10}} \right) \end{array} \right\} \dots(7.75)$$

$$L_{jPP15} = \left\{ \begin{array}{l} 10\text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{iM} - 20\text{Log}(r_{iPP15}/r_{iM}) + A_{iM} - A_{iPP15}}{10}} \right) \\ 10\text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{ji4S} - 20\text{Log}(r_{iPP15}/r_{i4S}) + A_{ji4S} - A_{iPP15}}{10}} \right) \\ 10\text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{ji7S} - 20\text{Log}(r_{iPP15}/r_{i7S}) + A_{ji7S} - A_{iPP15}}{10}} \right) \end{array} \right\} \dots(7.76)$$

Siguiendo con el análisis para el punto PP12, y utilizando únicamente la referencia entregada por el monitor Maestranza, obtendremos una expresión para los niveles de presión sonora en el punto receptor de interés, en función de los niveles registrados por el monitor de ruido. Para lograr lo anterior, continuaremos desarrollando la expresión hasta lograr una clara visualización de los descrito anteriormente:

$$L_{jPP12} = 10\text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{jiM} - 20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{iM}) + A_{jiM} - A_{jiPP12}}{10}} \right) \dots(7.77)$$

$$L_{jPP12} = 10\text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{-[20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{iM}) + A_{jiPP12} - A_{jiM}]}{10}} \cdot 10^{\frac{L_{jiM}}{10}} \right) \dots(7.78)$$

Con esto, se define un nuevo índice, el cual llamaremos “índice de diferencia de atenuación”, representando, en éste caso, a las diferencias de las atenuaciones presentes en los caminos de propagación entre cada fuente sonora al punto PP12 y al monitor Maestranza para la  $j$ -ava banda de octava de interés emitida por la  $i$ -ésima fuente sonora.

$$K_{jiM,PP12} = 10^{\frac{-[20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{iM})+A_{jiPP12}-A_{jiM}]}{10}} \quad \dots(7.79)$$

Para que éste nuevo término tenga validez, es necesario someterlo a una restricción, y para esto, debe obedecer la siguiente condición: la diferencia en las atenuaciones presentes en los caminos de propagación entre la  $i$ -ésima fuente sonora y el punto receptor que es de interés evaluar, y entre la  $i$ -ésima fuente sonora y el monitor de ruido que registra su aporte sonoro, es a lo menos igual a cero, es decir, en la situación más desfavorable, la atenuación hacia el monitor de ruido es igual a la atenuación al punto de impacto que se pretende evaluar, evitando de éste modo, la escasa influencia que presenta un monitor de ruido a una distancia relativamente extensa hacia la  $i$ -ésima fuente sonora (o equivalentemente, una atenuación mayor) que la que es presentada por el punto de impacto que es de interés evaluar.

Con esto, la restricción nombrada anteriormente, se resume con la siguiente expresión:

$$20\text{Log}(r_{iPP12}/r_{iM}) + A_{jiPP12} - A_{jiM} \geq 0 \quad \dots(7.80)$$

donde, valores negativos de la expresión anterior serán reemplazados directamente por el valor cero, obteniendo así un rango de variación para el índice de diferencia de atenuación, el cual fluctuará entre cero y uno (variación entre 0 y 1).

De ésta forma, el nivel de presión sonora queda expresado como:

$$L_{jPP12} = 10\text{Log} \left( \sum_{i=1}^N K_{jiM,PP12} \cdot 10^{\frac{L_{jiM}}{10}} \right) \cong 10\text{Log} \left( \bar{K}_{jM,PP12} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{jiM}}{10}} \right) \dots(7.81)$$

donde

$$\bar{K}_{jM,PP12} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N K_{jiM,PP12} \dots(7.82)$$

es la media aritmética de los índices de diferencia de atenuación obtenidos para cada fuente (y como fue planteado con anterioridad, para la banda de octava de interés), el cual representa la generalización de la zona que actúa como medio de propagación del frente de emisiones sonoras generadas por todas las fuentes consideradas en el análisis cuyo aporte sonoro es registrado por el monitor Maestranza y que impactan directamente en el punto PP12.

La aproximación puede clasificarse como aceptable, si el error estimado no es significativo, esto es, si se cumple con la siguiente restricción:

$$E = 10\text{Log} \left( 1 + \left| \frac{\bar{K}_{jM,PP12} - K_{jiM,PP12}}{\bar{K}_{jM,PP12}} \right| \right) \leq \varepsilon \quad [dB] \dots(7.83)$$

El valor del error  $\varepsilon$ , queda expresado como criterio para cuantificar la precisión de la aproximación, estableciendo así la exactitud del método de predicción. El criterio planteado se da a conocer a continuación:

$$\varepsilon = \left\{ \begin{array}{l} 5.0 \\ 2.0 \\ 1.0 \\ 0.5 \\ 0.2 \\ 0.1 \end{array} \right\} \quad [dB]$$

De ésta forma, el nivel en el punto PP12, en función a los niveles sonoros registrados por el monitor Maestranza, lo podemos expresar como:

$$L_{jPP12} \cong 10\text{Log} \left( \bar{K}_{jM,PP12} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{jM}}{10}} \right) = 10\text{Log} \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{jM}}{10}} \right) + 10\text{Log}(\bar{K}_{jM,PP12}) \dots (7.84)$$

$$L_{jPP12} \cong L_{jM} + 10\text{Log}(\bar{K}_{jM,PP12}) \dots (7.85)$$

Tal como lo realizado anteriormente, es posible llegar a una triple igualdad, realizando el análisis anterior para el resto de los monitores de ruido, obteniendo así la siguiente expresión:

$$L_{jPP12} \cong \left\{ \begin{array}{l} L_{jM} + 10\text{Log}(\bar{K}_{jM,PP12}) \\ L_{j4S} + 10\text{Log}(\bar{K}_{j4S,PP12}) \\ L_{j7S} + 10\text{Log}(\bar{K}_{j7S,PP12}) \end{array} \right\} \dots (7.86)$$

De ésta forma, para los restantes puntos de impacto, los niveles de presión sonora estimados a partir del análisis descrito anteriormente, quedan expresados como:

$$L_{jPP14} \cong \left\{ \begin{array}{l} L_{jM} + 10\text{Log}(\bar{K}_{jM,PP14}) \\ L_{j4S} + 10\text{Log}(\bar{K}_{j4S,PP14}) \\ L_{j7S} + 10\text{Log}(\bar{K}_{j7S,PP14}) \end{array} \right\} \dots (7.87)$$

$$L_{jPP15} \cong \left\{ \begin{array}{l} L_{jM} + 10\text{Log}(\bar{K}_{jM,PP15}) \\ L_{j4S} + 10\text{Log}(\bar{K}_{j4S,PP15}) \\ L_{j7S} + 10\text{Log}(\bar{K}_{j7S,PP15}) \end{array} \right\} \quad \dots(7.88)$$

A partir de ésta triple igualdad, para los niveles estimados en cada punto de impacto acústico (PP12, PP14 y PP15), es posible obtener una única relación a través del promedio (media aritmética) de los tres términos que contienen los niveles registrados en cada monitor de ruido, estando ya en presencia de una única equivalencia, generándose así, las siguientes ecuaciones:

$$L_{jPP12} \cong \bar{L}_j + 10 \sum_{n=1}^3 (1/3) \text{Log}(\bar{K}_{jn,PP12}) \quad \dots(7.89)$$

$$L_{jPP14} \cong \bar{L}_j + 10 \sum_{n=1}^3 (1/3) \text{Log}(\bar{K}_{jn,PP14}) \quad \dots(7.90)$$

$$L_{jPP15} \cong \bar{L}_j + 10 \sum_{n=1}^3 (1/3) \text{Log}(\bar{K}_{jn,PP15}) \quad \dots(7.91)$$

siendo  $\bar{L}_j$ , la media aritmética de los niveles registrados en forma simultánea, por los tres monitores de ruido, para la  $j$ -ava banda de octava.

Escrito de otra forma, simplificando aún más las tres expresiones anteriores:

$$L_{jPP12} \cong \bar{L}_j + 10 \text{Log} \left( \sqrt[3]{\prod_{n=1}^3 \bar{K}_{jn,PP12}} \right) \quad \dots(7.92)$$

$$L_{jPP14} \cong \bar{L}_j + 10 \text{Log} \left( \sqrt[3]{\prod_{n=1}^3 \bar{K}_{jn,PP14}} \right) \quad \dots(7.93)$$

$$L_{jPP15} \cong \bar{L}_j + 10 \text{Log} \left( \sqrt[3]{\prod_{n=1}^3 \bar{K}_{jn,PP15}} \right) \quad \dots(7.94)$$

Con esto, queda establecido que el nivel de presión sonora continuo equivalente, para la banda de octava de interés, estimado en un punto receptor perteneciente al área de influencia puede ser obtenido a partir de la media aritmética de los niveles sonoros registrados en los tres monitores de ruido mas diez veces el logaritmo en base diez de la media geométrica de los promedios de los índices de diferencia de atenuación obtenidos para cada monitor de ruido.

De acuerdo a la ecuación (7.3), el nivel de presión sonora con ponderación “A” será obtenido a partir de la sumatoria de las contribuciones del promedio temporal cuadrático de las presiones sonoras calculadas para cada banda de octava estimada en cada punto de impacto acústico perteneciente al área de influencia de la refinería, dando como resultado final, las siguientes expresiones:

$$L_{PP12} = 10 \text{Log} \sum_{j=1}^8 10^{\frac{L_{jPP12}}{10}} \cong 10 \text{Log} \sum_{j=1}^8 10^{\frac{\bar{L}_j + 10 \text{Log} \left( \sqrt[3]{\prod_{n=1}^3 \bar{K}_{jn,PP12}} \right)}{10}} \quad \dots(7.95)$$

$$L_{PP14} = 10 \text{Log} \sum_{j=1}^8 10^{\frac{L_{jPP14}}{10}} \cong 10 \text{Log} \sum_{j=1}^8 10^{\frac{\bar{L}_j + 10 \text{Log} \left( \sqrt[3]{\prod_{n=1}^3 \bar{K}_{jn,PP14}} \right)}{10}} \quad \dots(7.96)$$

$$L_{PP15} = 10 \text{Log} \sum_{j=1}^8 10^{\frac{L_{jPP15}}{10}} \cong 10 \text{Log} \sum_{j=1}^8 10^{\frac{\bar{L}_j + 10 \text{Log} \left( \sqrt[3]{\prod_{n=1}^3 \bar{K}_{jn,PP15}} \right)}{10}} \quad \dots(7.97)$$

Los niveles sonoros estimados para cada punto de impacto acústico, además de actuar como unidad básica de evaluación, están propensos a cualquier alteración o corrección con el fin de generar algún descriptor de ruido para caracterizar la situación y/o condición acústica ambiental en el área que es de

interés evaluar, como es el caso del descriptor de ruido, perteneciente al D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES, que actúa como herramienta para la evaluación del ruido fluctuante generado por fuentes fijas.

Cabe mencionar, que el presente modelo, al ser basado en la diferencia de las atenuaciones presentes en los distintos caminos de propagación, presenta un error en función de la distancia inferior al ofrecido por el modelo que es manipulado a través de su ecuación básica de propagación, debido principalmente a que los errores obtenidos son inferiores al presentado para la máxima distancia sujeta a evaluación, siendo del orden de magnitud igual a la diferencia aritmética entre los errores presentes entre cada fuente sonora hacia el monitor de ruido y el punto receptor que es de interés evaluar. A continuación se manipulará la ecuación básica de propagación para simplificar aun más lo expuesto anteriormente.

Los niveles de presión sonora generados por una fuente sonora que emite un nivel de potencia sonora  $L_w$  sobre dos puntos  $r_1$  y  $r_2$  ( $r_2 > r_1$ ) son de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$L_{p(r_1)} = L_w - A_1 + E(r_1) \quad \dots(7.98)$$

$$L_{p(r_2)} = L_w - A_2 + E(r_2) \quad \dots(7.99)$$

donde  $E(r_1)$  y  $E(r_2)$  son los errores, expresados en decibeles, propios del modelo de predicción al que pertenece la ecuación básica de propagación (ver Tabla 4), cumpliéndose que  $E(r_2) > E(r_1)$ . El nivel sonoro estimado en un punto situado a una distancia  $r_2$  de la fuente sonora, puede ser calculado a partir del valor obtenido por medición en el punto que se encuentra a una distancia  $r_1$  del foco emisor con la siguiente ecuación:

$$L_{p(r_2)} = L_{p(r_1)} - (A_2 - A_1) + [E(r_2) - E(r_1)] \quad \dots(7.100)$$

generando un error igual a:

$$E = E(r_2) - E(r_1) \leq E(r_2) \quad \dots(7.101)$$

pudiendo ser igual a cero si se cumplen las respectivas relaciones de distancias entre la fuente sonora y los puntos de evaluación, quedando de manifiesto la ventaja del presente modelo al minimizar las desviaciones propias del método que se manipula a través de su ecuación básica de propagación, siendo una excelente alternativa al momento de modelar en función de un nivel sonoro de referencia.

## 8. APLICACIÓN

Con los niveles sonoros estimados para cada punto de impacto acústico, los que corresponden al nivel de presión sonora continuo equivalente con ponderación “A” integrado sobre un intervalo temporal igual a un minuto, es posible generar el nivel de presión sonora corregido (NPC), siendo éste el descriptor de ruido responsable de la cuantificación y evaluación del ruido fluctuante generado por fuentes fijas establecido por el D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES.

El procedimiento de medición, que se da a conocer en el Artículo 8 de la norma anteriormente mencionada, establece una altura de medición entre 1,2 y 1,5 metros sobre el suelo (a través del modelo de predicción, se consideró la altura de 1,5 metros para la estimación de los niveles sonoros en los puntos de impacto), y una distancia no inferior a 3,5 metros de paredes, construcciones u otras estructuras reflectantes (en el modelo de predicción se consideró una distancia de aproximadamente 5 metros, medidos desde las paredes de los patios pertenecientes a la primera fila de casas). Se efectuarán como mínimo tres mediciones en puntos separados entre sí en aproximadamente 0,5 metros, y de ellas se obtendrá el promedio aritmético, indicación no aplicable por el método de predicción, debido a que las estimaciones se realizaron para una única posición en los puntos de impacto, replanteándose a continuación la técnica de evaluación.

La técnica de evaluación debe realizarse de acuerdo a lo establecido con anterioridad, quedando establecido que las emisiones de ruidos molestos generados por Enap Refinerías Bio Bio corresponden a ruido fluctuante, y de acuerdo con esto, la norma establece que para cada uno de los puntos de medición se realizarán cinco mediciones de  $L_{eq}$  de un minuto, calculándose el promedio (media aritmética) de los cinco valores obtenidos. Luego, al valor obtenido anteriormente, se le sumará aritméticamente la diferencia dividida por cinco entre el valor máximo y el valor mínimo registrado para ese intervalo de medición, repitiendo lo anterior para los restantes puntos de medición,

calculando el nivel de presión sonora corregido (NPC) a partir de la media aritmética entre los tres valores obtenidos para los puntos de medición.

Debido a que en el método de predicción las estimaciones de los niveles sonoros en los puntos de impacto fueron realizadas para una única posición, es necesario replantear la técnica de evaluación.

Para el intervalo temporal (15k+1,15k+15), el nivel de presión sonora corregido (NPC), para el punto de impacto PP será calculado según el siguiente procedimiento:

$$NPC_{15k+1}^{15k+5} = (1/5) \cdot \sum_{15k+1}^{15k+5} L_{PP,1min} + [MAX_{15k+1}^{15k+5}(L_{PP,1min}) - MIN_{15k+1}^{15k+5}(L_{PP,1min})] / 5 \dots (8.1)$$

$$NPC_{15k+6}^{15k+10} = (1/5) \cdot \sum_{15k+6}^{15k+10} L_{PP,1min} + [MAX_{15k+6}^{15k+10}(L_{PP,1min}) - MIN_{15k+6}^{15k+10}(L_{PP,1min})] / 5 \dots (8.2)$$

$$NPC_{15k+11}^{15k+15} = (1/5) \cdot \sum_{15k+11}^{15k+15} L_{PP,1min} + [MAX_{15k+11}^{15k+15}(L_{PP,1min}) - MIN_{15k+11}^{15k+15}(L_{PP,1min})] / 5 \dots (8.3)$$

donde, el nivel de presión sonora corregido (NPC), correspondiente a un tiempo de medición igual a 15 minutos, comprendido en el intervalo temporal (15k+1,15k+15), se obtendrá por medio de la media aritmética de los tres valores obtenidos anteriormente, obedeciendo a la siguiente expresión:

$$NPC_{15k+1}^{15k+15} = (1/3) \cdot [NPC_{15k+1}^{15k+5} + NPC_{15k+6}^{15k+10} + NPC_{15k+11}^{15k+15}] \dots (8.4)$$

El nivel de presión sonora corregido sucesor al obtenido anteriormente, será aquel, para el correspondiente tiempo de medición igual a 15 minutos, comprendido en el intervalo temporal (15k+6,15k+20), calculado con el procedimiento descrito anteriormente, obedeciendo a la siguiente expresión:

$$NPC_{15k+6}^{15k+20} = (1/3) \cdot [NPC_{15k+6}^{15k+10} + NPC_{15k+11}^{15k+15} + NPC_{15k+16}^{15k+20}] \dots (8.5)$$

Es así, como se obtienen a partir de una medición continua de 24 horas, 288 niveles de presión sonora corregidos para cada día de medición, registrándose para los intervalos temporales que se muestran a continuación:

(00:01–00:15) , (00:06–00:20) ,....., (23:41–23:55) , (23:46–00:00)

para los cuales, corresponden los siguientes niveles de presión sonora corregidos:

$NPC_{00:01}^{00:15}$  ,  $NPC_{00:06}^{00:20}$  , ..... ,  $NPC_{23:41}^{23:55}$  ,  $NPC_{23:46}^{00:00}$

Estos valores serán registrados en el informe diario que genera Enap Refinerías Bio Bio, con el objeto de evaluar las emisiones de ruido y verificar el cumplimiento con los límites máximos permisibles establecidos en la normativa.

## **9. RESULTADOS**

Como resultados, diferenciaremos los que son destinados a ser usados como datos físicos de entrada, los cuales actúan como unidades básicas en cualquier modelo de predicción sonora; y aquellos obtenidos a partir de los primeros, generando los factores de atenuación que influyen en los distintos caminos de propagación, el promedio de los índices de diferencia de atenuación y la cuantificación de los errores estimados en ésta modelación en particular. Con todo lo descrito anteriormente y en conjunto con una cuarta estación de monitoreo ubicada en el punto PP15, es posible validar los niveles sonoros proyectados y cuantificar el error del modelo de predicción planteado.

### **9.1 Datos de Entrada**

Para realizar la modelación bajo el método de predicción propuesto, los datos de entrada, para los tres puntos de mayor impacto acústico nombrados con anterioridad, fueron obtenidos directamente en las campañas de terreno, siendo de acuerdo a los métodos planteados para la recolección de datos destinados a la descripción del ruido ambiental pertinente al uso de suelo en general descritos en el Estándar Internacional ISO 1996-2:1987 Acústica – Descripción y Medición del Ruido Ambiental – Parte 2: Recolección de datos pertinentes al uso de suelo, los cuales corresponden a parámetros acústicos y no acústicos.

#### **9.1.1 Condiciones prevalecientes en el área de influencia**

A continuación se dan a conocer las condiciones que prevalecen en la zona de evaluación:

a) Condiciones meteorológicas:

La Tabla 18 resume los valores promediados anualmente de las condiciones meteorológicas presentes en la zona que actúa como medio de propagación

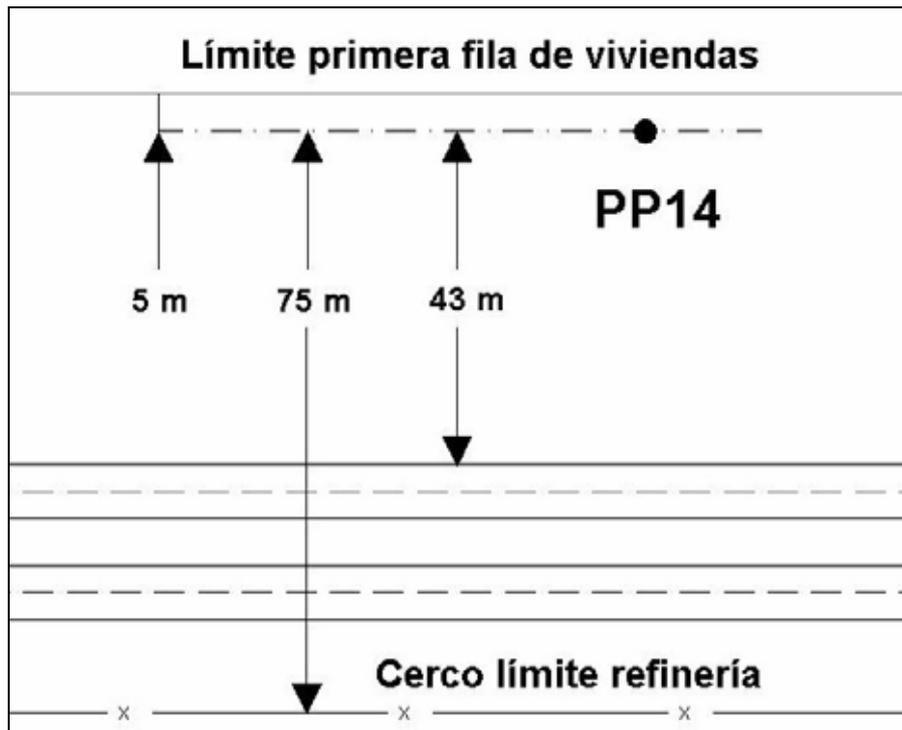
sonora entre la refinaría y su área de influencia, datos que ingresan en el modelo planteado.

**Tabla 18** – Promedio anual de las condiciones meteorológicas.

<b>Condición meteorológica</b>	<b>Temperatura ambiental (°C)</b>	<b>Humedad relativa (%)</b>	<b>Presión atmosférica (Pa)</b>	<b>Número de octas</b>
Altura de medición (m)	2.0	2.0	2.0	-----
Promedio	14.0	90.0	1011.4	3.66

b) Naturaleza y estado del terreno entre la fuente de ruido y los puntos de evaluación:

El terreno que existe entre la fuente emisora de ruido y los puntos receptores (ver Figura 17), corresponde a una superficie que se extiende desde los límites orientales de la refinaría hasta la pared de los patios de la primera fila de viviendas, estimándose una extensión de aproximadamente 80 m. La superficie del suelo puede clasificarse como suelo duro, con excepción de algunas zonas cercanas al punto PP14 (Figura 18) donde existen áreas cubiertas con hierba que crece de forma natural. No existe la presencia de obstáculos entre la refinaría y el receptor, sin embargo, la influencia de la vía de circulación que pasa junto a ésta, a partir de la composición de su flujo vehicular, contribuye en gran medida con la energía acústica presente en los puntos de evaluación, traduciéndose en la fuente sonora secundaria que ofrece los mayores niveles al ruido de fondo.



**Figura 18:** Detalle de la zona en torno al punto PP14.

c) Variabilidad en la emisión de las fuentes de ruido:

La actividad productiva de la refinería, en condiciones normales de funcionamiento, genera emisiones de ruido hacia la comunidad que son de carácter estable para un periodo de observación no mayor a 5 minutos, donde las variaciones de éstas en intervalos temporales superiores a los nombrados anteriormente corresponden precisamente a los cambios en los procesos productivos que se aplican en las distintas instalaciones de producción en conjunto con las condiciones meteorológicas presentes. Sin embargo, en los puntos de evaluación, las variaciones de los niveles sonoros son aportadas en la mayoría de los casos por el flujo vehicular que transita a través de la vía de circulación, llegando estas diferencias a superar los 5 dBA entre niveles sonoros observados en intervalos temporales inferiores a un minuto.

## d) Descripción de la vía de circulación:

La vía de circulación que separa a la refinaría de su área de influencia (Figura 18) corresponde a la ruta costanera cuyo rol principal es establecer la conexión entre las diferentes zonas urbanas intercomunales uniando a la Comuna de Concepción con el sector industrial de Avda. Gran Bretaña en la Comuna de Talcahuano, presentando una velocidad máxima de diseño de 70 km/h y dos calzadas pavimentadas de 7 m de ancho cada una.

Los porcentajes de la composición del flujo vehicular registrados en terreno durante los distintos periodos de evaluación se resumen a continuación:

**Tabla 19** – Valores promedio del flujo vehicular.

<b>Porcentaje Flujo vehicular (%)</b>		
<b>Vehículos livianos</b>	<b>Vehículos medianos</b>	<b>Vehículos pesados</b>
76.5	11.3	12.2

La clasificación de vehículos es realizada basándose en el número de ejes y de ruedas en lugar del peso, debido a que es un parámetro de fácil obtención en el proceso de cuantificación del flujo vehicular. Para tales efectos, la clasificación de vehículos es la siguiente:

- Vehículo liviano: vehículo motorizado de 2 ejes y 4 ruedas.
- Vehículo mediano: vehículo motorizado de carga de 2 ejes y 6 ruedas, o vehículo de pasajeros de 4 o más ruedas.
- Vehículo pesado: vehículo motorizado de carga de más de 2 ejes.

### 9.1.2 Datos cualitativos

La información que se muestra a continuación corresponde a la obtenida por medio de la observación directa de las condiciones acústicas presentes en los puntos de evaluación.

## a) Localización del origen del ruido:

Para los tres puntos de mayor impacto acústico, el ruido proviene principalmente desde el sector poniente, donde el mayor aporte al campo sonoro lo genera la vía de circulación por medio de su flujo vehicular, y la refinería a través de sus instalaciones de proceso.

## b) Identificación de las fuentes sonoras:

Sin perjuicio a lo descrito anteriormente, para cada punto de evaluación en particular, las fuentes sonoras pertenecientes a la refinería que dominan el campo sonoro y son parte del modelo de predicción planteado, se dan a conocer en la Tabla 20 junto con las distancias (expresadas en metros) hacia cada punto receptor evaluado:

**Tabla 20** – Principales fuentes sonoras pertenecientes a la refinería que inciden directamente en los puntos de evaluación.

Fuente Sonora	Punto de Impacto Acústico		
	PP12	PP14	PP15
Refinería	359.3	419.3	665.0
Suministros	248.7*	353.6	641.4
CCR	309.5	253.8	486.9
HDS	258.6	299.3	572.0
CHT	332.2	136.0*	344.3*
Etileno	490.8	361.1	456.1
Hidrocracking	546.0	525.1	677.5
Coker	1022.7	758.8	470.7
Ant Etileno	1163.3**	985.0**	849.0**
* Mínimo valor			
** Máximo valor			

## **9.2 Resultados Obtenidos**

Los resultados que se darán a conocer a continuación son los obtenidos a partir de la aplicación directa de los factores físicos nombrados anteriormente en los algoritmos descritos en el Estándar Internacional ISO 9613-2:1996, dando a conocer con esto las atenuaciones presentes en los distintos caminos de propagación entre cada fuente sonora hacia los monitores de ruido y punto de impacto acústico, los valores promedio de los índices de diferencia de atenuación, los errores estimados para ésta modelación en particular (sobre cada banda de octava) identificando fuente sonora y punto de predicción (monitores de ruido y puntos de impacto acústico).

### **9.2.1 Atenuaciones resultantes**

Las atenuaciones resultantes para los distintos caminos de propagación fueron obtenidas mediante modelación basada en los algoritmos descritos en el Estándar Internacional ISO 9613-2:1996, programando Macros con las respectivas ecuaciones en una planilla Excel, y manipulando el plot plan de la refinería en formato dxf a través del programa computacional destinado al Diseño Asistido por Ordenador AutoCAD® 2000, todo esto complementado con las diversas campañas de terreno. Los resultados de éstas atenuaciones se muestran en las siguientes tablas:

**Tabla 21** – Atenuaciones resultantes en los distintos caminos de propagación desde cada fuente sonora hacia el monitor Maestranza.

Fuente Sonora	Atenuaciones Resultantes, dB							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	60.5	61.5	62.2	62.5	62.5	63.2	65.5	75.5
Suministros	53.2	53.2	53.2	53.4	53.5	53.9	55.1	59.9
CCR	58.1	58.1	58.2	58.4	58.7	59.3	61.2	69.0
HDS	51.6	51.6	51.7	51.8	51.9	52.2	53.3	57.4
CHT	63.3	63.3	63.5	63.9	64.4	65.4	68.9	81.9
Etileno	65.7	67.6	69.1	69.6	69.6	70.8	74.7	92.0
Hidrocracking	66.7	69.1	70.9	71.4	71.3	72.7	76.9	96.3
Coker	75.1	75.3	75.9	77.2	78.9	82.4	94.9	143.4
Ant Etileno	74.1	74.4	75.1	76.5	78.3	82.1	95.7	148.6

**Tabla 22** – Atenuaciones resultantes en los distintos caminos de propagación desde cada fuente sonora hacia el monitor 4 Sur.

Fuente Sonora	Atenuaciones Resultantes, dB							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	68.8	70.5	71.8	72.5	72.8	74.5	80.0	103.6
Suministros	68.2	69.0	69.7	70.3	70.8	72.4	77.9	99.9
CCR	70.1	73.8	77.4	80.8	84.1	88.1	94.6	111.7
HDS	66.6	67.9	68.9	69.4	69.7	71.0	75.3	93.8
CHT	59.3	61.2	64.5	68.2	71.5	75.0	79.6	89.0
Etileno	64.3	64.4	64.6	65.0	65.5	66.6	70.4	85.1
Hidrocracking	69.5	70.4	71.3	72.0	72.6	74.5	80.8	106.5
Coker	71.2	71.4	71.8	72.6	73.7	76.0	84.2	115.9
Ant Etileno	72.3	72.5	73.1	74.3	75.8	79.0	90.5	134.8

**Tabla 23** – Atenuaciones resultantes en los distintos caminos de propagación desde cada fuente sonora hacia el monitor 7 Sur.

Fuente Sonora	Atenuaciones Resultantes, dB							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	74.1	74.3	74.9	76.1	77.6	80.8	92.1	136.0
Suministros	74.2	76.4	78.3	79.5	80.3	83.5	94.2	138.2
CCR	72.2	72.3	72.8	73.7	75.0	77.5	86.6	121.9
HDS	73.3	74.9	76.4	77.5	78.4	81.3	91.2	131.4
CHT	70.5	70.6	71.0	71.8	72.8	74.9	82.3	111.1
Etileno	70.9	71.0	71.4	72.2	73.3	75.5	83.3	113.8
Hidrocracking	73.7	74.7	75.9	77.0	78.1	81.1	91.6	133.4
Coker	64.0	64.1	64.4	65.1	66.0	67.8	72.6	87.9
Ant Etileno	70.9	71.0	71.6	72.6	73.9	76.8	86.8	125.7

**Tabla 24** – Atenuaciones resultantes en los distintos caminos de propagación desde cada fuente sonora hacia el punto PP12.

Fuente Sonora	Atenuaciones Resultantes, dB							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	66.9	67.9	68.7	69.2	69.6	71.0	75.6	94.6
Suministros	63.7	63.8	64.0	64.4	65.0	66.2	70.0	83.9
CCR	65.7	65.9	66.4	67.4	68.8	71.2	77.3	95.9
HDS	64.1	64.1	64.3	64.7	65.3	66.5	70.3	84.6
CHT	66.4	66.6	67.2	68.3	69.9	72.6	79.1	99.1
Etileno	69.6	71.0	72.1	72.8	73.3	75.2	81.5	107.4
Hidrocracking	70.6	73.0	74.9	75.7	75.9	78.0	84.7	113.6
Coker	76.1	76.3	77.0	78.4	80.3	84.2	98.2	152.3
Ant Etileno	75.8	76.0	76.9	78.5	80.6	85.1	100.9	162.5

**Tabla 25** – Atenuaciones resultantes en los distintos caminos de propagación desde cada fuente sonora hacia el punto PP14.

Fuente Sonora	Atenuaciones Resultantes, dB							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	68.3	69.0	69.8	70.4	71.0	72.8	78.6	101.3
Suministros	67.0	67.3	67.9	69.1	70.9	73.8	80.8	102.0
CCR	64.9	65.9	67.5	69.7	72.5	76.1	82.3	98.7
HDS	65.3	65.4	65.6	66.0	66.6	67.8	71.9	87.9
CHT	58.5	58.6	58.8	59.2	60.0	61.4	64.5	73.5
Etileno	67.0	68.1	69.0	69.5	69.8	71.2	75.8	94.9
Hidrocracking	70.2	71.6	72.8	73.5	74.1	76.1	82.8	110.6
Coker	73.4	73.5	74.1	75.1	76.5	79.4	89.8	129.9
Ant Etileno	74.1	74.3	75.0	76.3	78.2	81.9	95.3	147.5

**Tabla 26** – Atenuaciones resultantes en los distintos caminos de propagación desde cada fuente sonora hacia el punto PP15.

Fuente Sonora	Atenuaciones Resultantes, dB							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	72.3	73.5	74.8	75.7	76.5	79.1	87.8	122.9
Suministros	72.0	73.3	74.5	75.4	76.2	78.6	87.0	120.9
CCR	69.6	69.7	70.0	70.7	71.6	73.5	80.2	106.0
HDS	71.0	71.6	72.4	73.2	74.0	76.2	83.8	114.1
CHT	66.4	66.4	66.7	67.2	67.8	69.1	73.8	92.0
Etileno	69.0	69.1	69.4	70.1	70.9	72.6	78.8	103.0
Hidrocracking	72.4	74.4	76.1	77.1	77.7	80.3	88.9	124.8
Coker	69.3	69.4	69.7	70.4	71.2	73.0	79.4	104.4
Ant Etileno	72.5	72.7	73.3	74.5	76.0	79.3	90.8	135.7

### 9.2.2 Promedio de los índices de diferencia de atenuación

A partir de los parámetros geométricos que influyen en los índices de diferencia de atenuación para el caso de condiciones meteorológicas estáticas (sin considerar el término de atenuación  $A_{Cmet}$ ), es posible determinar el valor numérico de los valores promedio (media aritmética) de los índices de diferencia de atenuación, obteniendo así los siguientes valores:

**Tabla 27** – Valores promedio de los índices de diferencia de atenuación.

Constante	Frecuencia (Hz)							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\bar{K}_{M,PP12}$	0.37	0.37	0.36	0.34	0.31	0.26	0.16	0.03
$\bar{K}_{M,PP14}$	0.38	0.41	0.43	0.41	0.32	0.27	0.19	0.15
$\bar{K}_{M,PP15}$	0.20	0.24	0.26	0.25	0.22	0.19	0.11	0.03
$\bar{K}_{4S,PP12}$	0.40	0.34	0.30	0.29	0.29	0.26	0.16	0.04
$\bar{K}_{4S,PP14}$	0.74	0.70	0.66	0.64	0.62	0.54	0.42	0.27
$\bar{K}_{4S,PP15}$	0.46	0.45	0.44	0.44	0.44	0.43	0.33	0.14
$\bar{K}_{7S,PP12}$	0.19	0.19	0.18	0.15	0.13	0.09	0.02	0.00
$\bar{K}_{7S,PP14}$	0.30	0.29	0.28	0.26	0.23	0.19	0.08	0.00
$\bar{K}_{7S,PP15}$	0.49	0.49	0.49	0.47	0.46	0.43	0.30	0.06

### 9.2.3 Error estimado del modelo planteado

El error que se genera a partir de la aproximación realizada en la ecuación (7.9), que se obtuvo reemplazando los valores obtenidos para los índices de diferencia de atenuación por su respectiva media aritmética, puede ser cuantificado, y expresado en decibeles, mediante la ecuación (9.1):

$$E = 10\text{Log} \left( 1 + \left| \frac{\bar{K}_{j\text{Monitor},PP} - K_{ji\text{Monitor},PP}}{\bar{K}_{j\text{Monitor},PP}} \right| \right) \quad \dots(9.1)$$

Los errores estimados para los nueve valores promedio de los índices de diferencia de atenuación, correspondientes a cada fuente sonora en la banda de octava de interés, se muestran en las siguientes tablas:

**Tabla 28** – Error estimado en la aplicación de la constante  $\bar{K}_{jM,PP12}$ , expresado en decibeles.

Fuente Sonora	$E = 10\text{Log} \left\{ 1 + \left  \left( \bar{K}_{jM,PP12} - K_{jiM,PP12} \right) / \bar{K}_{jM,PP12} \right  \right\}$							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.4	1.9
Suministros	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.7
CCR	1.9	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.7	2.9
HDS	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.9
CHT	1.2	1.0	0.7	0.3	0.3	1.0	1.5	1.3
Etileno	0.4	1.0	1.4	1.5	1.4	1.5	1.2	0.1
Hidrocracking	0.5	0.4	0.3	0.4	0.5	0.5	0.2	1.3
Coker	3.3	3.3	3.3	3.5	3.7	4.0	4.8	6.6
Ant Etileno	2.7	2.6	2.6	2.7	2.8	2.9	2.8	1.6
<b>Emedia</b>	<b>1.8</b>	<b>1.9</b>	<b>1.9</b>	<b>1.9</b>	<b>1.9</b>	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>

**Tabla 29** – Error estimado en la aplicación de la constante  $\bar{K}_{jM,PP14}$ , expresado en decibeles.

Fuente Sonora	$E = 10Log \left\{ 1 + \left  \left( \bar{K}_{jM,PP14} - K_{jiM,PP14} \right) / \bar{K}_{jM,PP14} \right  \right\}$							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	1.9	2.0	2.0	2.1	1.9	2.0	2.4	3.0
Suministros	2.8	2.8	2.8	2.9	2.9	2.9	3.0	3.0
CCR	1.6	2.0	2.4	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0
HDS	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.9	3.0
CHT	4.2	3.8	3.7	3.6	2.2	0.8	1.0	5.0
Etileno	3.0	3.4	3.7	3.9	4.7	5.4	6.0	5.5
Hidrocracking	0.7	1.3	1.8	1.8	2.2	2.4	1.3	2.4
Coker	4.2	3.8	3.7	3.9	4.9	5.7	7.2	8.3
Ant Etileno	4.2	3.8	3.7	3.9	4.9	5.7	7.2	8.3
<b>Emedia</b>	<b>2.8</b>	<b>2.9</b>	<b>2.9</b>	<b>3.0</b>	<b>3.3</b>	<b>3.4</b>	<b>3.8</b>	<b>4.6</b>

**Tabla 30** – Error estimado en la aplicación de la constante  $\bar{K}_{jM,PP15}$ , expresado en decibeles.

Fuente Sonora	$E = 10Log \left\{ 1 + \left  \left( \bar{K}_{jM,PP15} - K_{jiM,PP15} \right) / \bar{K}_{jM,PP15} \right  \right\}$							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	2.2	2.4	2.5	2.6	2.6	2.7	2.9	3.0
Suministros	2.9	2.9	2.9	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
CCR	2.2	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.8	3.0
HDS	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	3.0	3.0	3.0
CHT	3.9	3.2	2.6	2.7	3.2	3.5	4.6	5.8
Etileno	3.7	4.8	5.5	5.5	5.3	5.4	5.3	5.0
Hidrocracking	1.3	0.9	0.5	0.3	0.2	0.4	1.6	2.9
Coker	7.0	6.3	5.8	6.0	6.6	7.2	9.5	15.9
Ant Etileno	7.0	6.3	5.8	6.0	6.6	7.2	9.5	15.9
<b>Emedia</b>	<b>3.7</b>	<b>3.6</b>	<b>3.4</b>	<b>3.5</b>	<b>3.7</b>	<b>3.9</b>	<b>4.7</b>	<b>6.4</b>

**Tabla 31** – Error estimado en la aplicación de la constante  $\bar{K}_{j4S,PP12}$ , expresado en decibeles.

Fuente Sonora	$E = 10Log \left\{ 1 + \left( \frac{\bar{K}_{j4S,PP12} - K_{ji4S,PP12}}{\bar{K}_{j4S,PP12}} \right)^2 \right\}$							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	4.0	4.7	5.2	5.4	5.3	5.9	8.0	13.7
Suministros	4.0	4.7	5.2	5.4	5.3	5.9	8.0	13.7
CCR	4.0	4.7	5.2	5.4	5.3	5.9	8.0	13.7
HDS	4.0	4.7	5.2	5.4	5.3	5.9	8.0	13.7
CHT	2.2	2.0	1.5	0.9	0.1	0.7	0.7	2.1
Etileno	1.0	1.3	1.5	1.6	1.6	1.6	1.8	2.7
Hidrocracking	2.9	2.1	1.6	1.6	2.0	2.3	4.0	6.5
Coker	0.7	0.2	0.0	0.4	1.0	1.5	2.4	3.0
Ant Etileno	0.5	1.2	1.4	1.1	0.5	0.1	1.6	2.9
<b>Emedia</b>	<b>2.6</b>	<b>2.8</b>	<b>3.0</b>	<b>3.0</b>	<b>2.9</b>	<b>3.3</b>	<b>4.7</b>	<b>8.0</b>

**Tabla 32** – Error estimado en la aplicación de la constante  $\bar{K}_{j4S,PP14}$ , expresado en decibeles.

Fuente Sonora	$E = 10Log \left\{ 1 + \left( \frac{\bar{K}_{j4S,PP14} - K_{ji4S,PP14}}{\bar{K}_{j4S,PP14}} \right)^2 \right\}$							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	1.3	1.6	1.8	2.0	2.1	2.7	3.8	5.7
Suministros	1.3	1.6	1.8	2.0	2.0	1.2	0.9	3.7
CCR	1.3	1.6	1.8	2.0	2.1	2.7	3.8	5.7
HDS	1.3	1.6	1.8	2.0	2.1	2.7	3.8	5.7
CHT	0.0	0.1	0.1	0.4	0.5	0.2	0.6	1.6
Etileno	1.0	1.4	1.6	1.6	1.5	1.3	1.2	2.1
Hidrocracking	0.6	0.4	0.3	0.4	0.6	1.1	1.8	1.6
Coker	0.7	0.5	0.4	0.5	0.6	0.6	1.3	2.7
Ant Etileno	0.4	0.2	0.1	0.1	0.3	0.2	0.9	2.5
<b>Emedia</b>	<b>0.9</b>	<b>1.0</b>	<b>1.1</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>	<b>2.0</b>	<b>3.5</b>

**Tabla 33** – Error estimado en la aplicación de la constante  $\bar{K}_{j4S,PP15}$ , expresado en decibeles.

Fuente Sonora	$E = 10Log \left\{ 1 + \left( \frac{\bar{K}_{j4S,PP15} - K_{j4S,PP15}}{\bar{K}_{j4S,PP15}} \right) \right\}$							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	0.1	0.4	0.6	0.4	0.2	0.8	1.7	2.8
Suministros	0.3	0.7	1.0	1.1	1.3	1.6	2.1	2.9
CCR	3.4	3.5	3.5	3.6	3.6	3.6	4.9	8.7
HDS	0.8	0.2	0.1	0.2	0.7	1.2	2.0	2.9
CHT	2.3	2.2	1.9	1.3	0.2	2.0	2.9	1.5
Etileno	1.0	0.9	1.0	1.1	1.3	1.5	1.9	2.7
Hidrocracking	0.5	0.5	1.0	1.1	1.1	1.5	1.8	2.8
Coker	3.4	3.5	3.5	3.6	3.6	3.6	4.9	8.7
Ant Etileno	3.3	3.3	3.4	3.4	3.4	3.4	4.5	7.8
<b>Emedia</b>	<b>1.7</b>	<b>1.7</b>	<b>1.8</b>	<b>1.7</b>	<b>1.7</b>	<b>2.1</b>	<b>3.0</b>	<b>4.5</b>

**Tabla 34** – Error estimado en la aplicación de la constante  $\bar{K}_{j7S,PP12}$ , expresado en decibeles.

Fuente Sonora	$E = 10Log \left\{ 1 + \left( \frac{\bar{K}_{j7S,PP12} - K_{j7S,PP12}}{\bar{K}_{j7S,PP12}} \right) \right\}$							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	7.1	7.2	7.6	8.2	9.0	10.7	16.9	39.8
Suministros	7.1	7.2	7.6	8.2	9.0	10.7	16.9	39.8
CCR	7.1	7.2	7.6	8.2	9.0	10.7	16.9	39.8
HDS	7.1	7.2	7.6	8.2	9.0	10.7	16.9	39.8
CHT	7.1	7.2	7.6	8.2	9.0	10.7	16.9	39.8
Etileno	7.1	7.2	6.9	7.6	9.0	10.7	16.9	39.8
Hidrocracking	7.1	7.2	7.6	8.2	9.0	10.7	16.9	39.8
Coker	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.4	2.7	3.0
Ant Etileno	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.4	2.7	3.0
<b>Emedia</b>	<b>6.1</b>	<b>6.1</b>	<b>6.3</b>	<b>6.8</b>	<b>7.5</b>	<b>8.9</b>	<b>13.7</b>	<b>31.6</b>

**Tabla 35** – Error estimado en la aplicación de la constante  $\bar{K}_{j7S,PP14}$ , expresado en decibeles.

Fuente Sonora	$E = 10Log \left\{ 1 + \left( \frac{\bar{K}_{j7S,PP14} - K_{j7S,PP14}}{\bar{K}_{j7S,PP14}} \right)^2 \right\}$							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	5.3	5.3	5.5	5.9	6.3	7.3	11.0	24.7
Suministros	5.3	5.3	5.5	5.9	6.3	7.3	11.0	24.7
CCR	5.3	5.3	5.5	5.9	6.3	7.3	11.0	24.7
HDS	5.3	5.3	5.5	5.9	6.3	7.3	11.0	24.7
CHT	5.3	5.3	5.5	5.9	6.3	7.3	11.0	24.7
Etileno	5.3	5.3	5.5	5.9	6.3	7.3	11.0	24.7
Hidrocracking	5.3	5.3	5.5	5.9	6.3	7.3	11.0	24.7
Coker	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.5	3.0
Ant Etileno	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.5	3.0
<b>Emedia</b>	<b>4.6</b>	<b>4.6</b>	<b>4.7</b>	<b>5.0</b>	<b>5.4</b>	<b>6.1</b>	<b>9.1</b>	<b>19.9</b>

**Tabla 36** – Error estimado en la aplicación de la constante  $\bar{K}_{j7S,PP15}$ , expresado en decibeles.

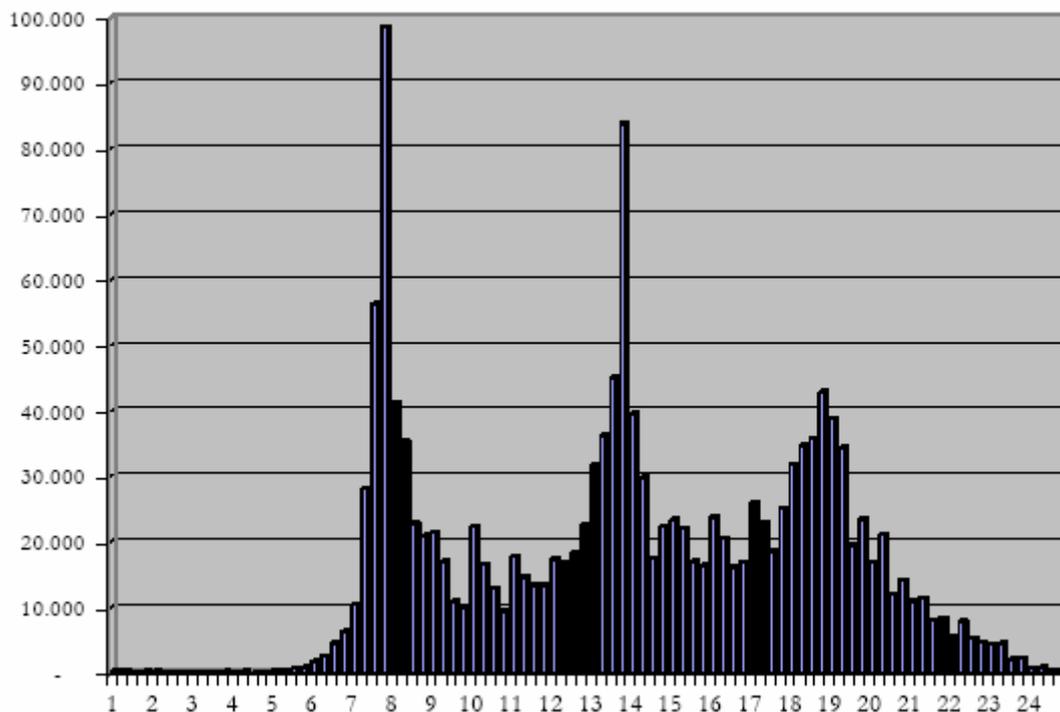
Fuente Sonora	$E = 10Log \left\{ 1 + \left( \frac{\bar{K}_{j7S,PP15} - K_{j7S,PP15}}{\bar{K}_{j7S,PP15}} \right)^2 \right\}$							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refinería	3.1	3.1	3.1	3.2	3.4	3.7	5.2	12.2
Suministros	3.1	3.1	3.1	3.2	3.4	3.7	5.2	12.2
CCR	3.1	3.1	3.1	3.2	3.4	3.7	5.2	12.2
HDS	3.1	3.1	3.1	3.2	3.4	3.7	5.2	12.2
CHT	3.1	3.1	3.1	3.2	3.4	3.7	5.2	12.2
Etileno	3.1	3.1	3.1	3.2	3.4	3.7	5.2	12.2
Hidrocracking	3.1	3.1	2.9	3.1	3.4	3.7	5.2	12.2
Coker	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3	1.1	1.2	2.1
Ant Etileno	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3	1.1	1.2	2.1
<b>Emedia</b>	<b>2.7</b>	<b>2.7</b>	<b>2.7</b>	<b>2.8</b>	<b>2.9</b>	<b>3.1</b>	<b>4.3</b>	<b>9.9</b>

### 9.2.4 Validación del modelo

La validación del modelo encargado de predecir el impacto acústico a través de las mediciones de emisión sonora realizada por la Red de Monitoreo Continuo de Ruido implica una medición en una posición seleccionada, con un cuarto monitor de ruido ubicado en el punto de impacto acústico PP15, obteniendo niveles sonoros ( $L_{Aeq,1min}$ ) que son comparados con los proyectados. Dicha comparación consiste en obtener la diferencia aritmética promedio para una semana laboral cualquiera sobre un intervalo temporal, cuyo requisito principal es pertenecer al instante del día (24 horas) donde los niveles medidos no son influenciados por el ruido de fondo (principalmente la vía de circulación) obteniendo, en gran medida, el ruido emitido por la refinería. El criterio para la identificación de dicho horario, junto con su extensión temporal, es determinado a partir del modelo de flujo vehicular calculado y aplicado a las redes viales del Gran Concepción.

La información de transporte ha sido obtenida a través de la encuesta de origen y destino del Gran Concepción del año 1999<sup>[30]</sup>, de mediciones de tránsito y de un catastro de infraestructura vial y transporte público. Esta información incluye áreas temáticas que se presentan en el siguiente orden: demanda de transporte (generación y atracción de viajes, distribución de viajes, partición modal, propósito de viaje), flujos de tránsito (distribución horaria), oferta de transporte público y oferta de infraestructura vial (caracterización de la red vial y jerarquización).

De la información de viajes de la encuesta a hogares se ha obtenido el histograma de desplazamientos totales (según hora media) en un día laboral normal, el que se muestra en al Figura 19. Los valores para horario nocturno (21:00 a 07:00 hrs) se muestran en la Tabla 37.



**Figura 19:** Distribución horaria (desplazamientos por cuarto de hora) para día laboral en el Gran Concepción.

**Tabla 37 –** Distribución de viajes proyectados para el Gran Concepción estimados para horario nocturno.

Hora	Viajes
21:00 a 21:59	38814
22:00 a 22:59	23284
23:00 a 23:59	13221
00:00 a 00:59	2277
01:00 a 01:59	1237
02:00 a 02:59	568
03:00 a 03:59	444
04:00 a 04:59	561
05:00 a 05:59	2502
06:00 a 06:59	15191

De lo anterior, queda establecido que el horario destinado a la comparación de los niveles medidos con los proyectados corresponde al periodo comprendido entre las 02:00 y las 04:59 hrs, por presentar los menores valores de viajes (lo que implica la disminución en los flujos vehiculares) traduciéndose así en el periodo del día (horario nocturno) donde la vía de circulación emite los niveles de ruido más bajos.

Definido el periodo de comparación, se procederá a exponer el método de validación y obtención de manera cuantitativa del error del presente modelo (para luego compararlo con el error propio de modelo de predicción manipulado a través de su ecuación básica de propagación), definiendo el procedimiento en la obtención de los cálculos, junto con las variables que describirán estadísticamente los valores obtenidos.

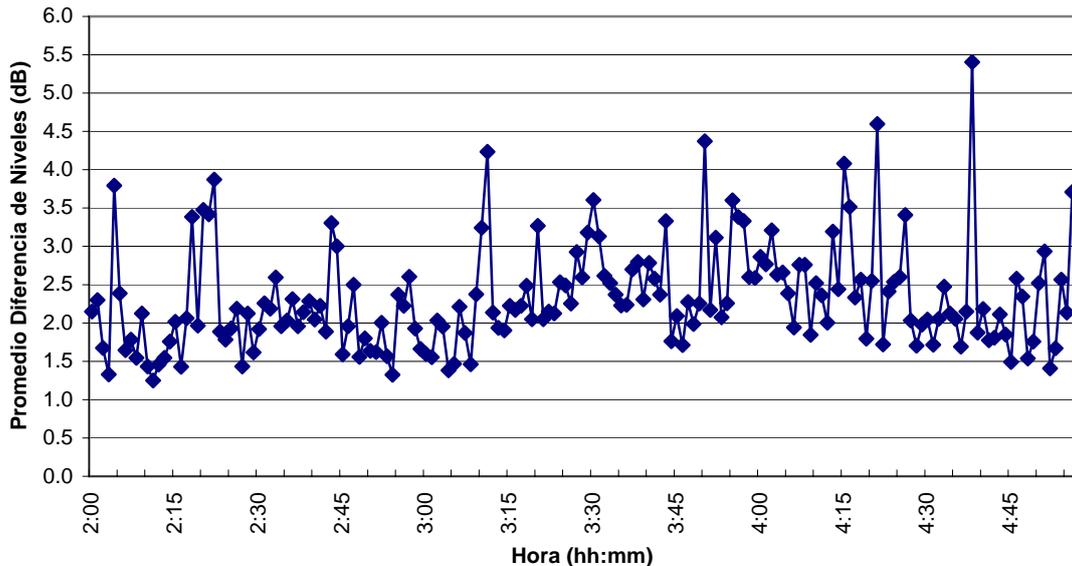
Para la semana laboral comprendida entre los días lunes 6 de Junio al viernes 10 de junio del 2005, se procedió, para esos cinco días, a restar aritméticamente los niveles sonoros para cada minuto, valores obtenidos desde el monitor de ruido ubicado en el punto PP15 y los modelados sobre dicho punto de impacto acústico, obteniendo con esto el promedio semanal (media aritmética) para cada minuto del intervalo temporal de comparación.

$$Error \ Semanal \ Minuto = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 [L_{Aeqi,1min,MEDIDO} - L_{Aeqi,1min,MODELADO}] \geq 0$$

Con esto, es posible obtener 179 valores correspondientes a cada minuto de comparación en el periodo comprendido entre las 02:00 y las 04:59 hrs. (Figura 20). A partir de estos valores, para dar una descripción objetiva y cuantitativa de los datos obtenidos, se calcularán:

- a) las medidas de tendencia central: media aritmética y moda;
- b) las medidas de dispersión: desviación estándar, rango, máximo y mínimo; y
- c) la medida de forma: coeficiente de asimetría.

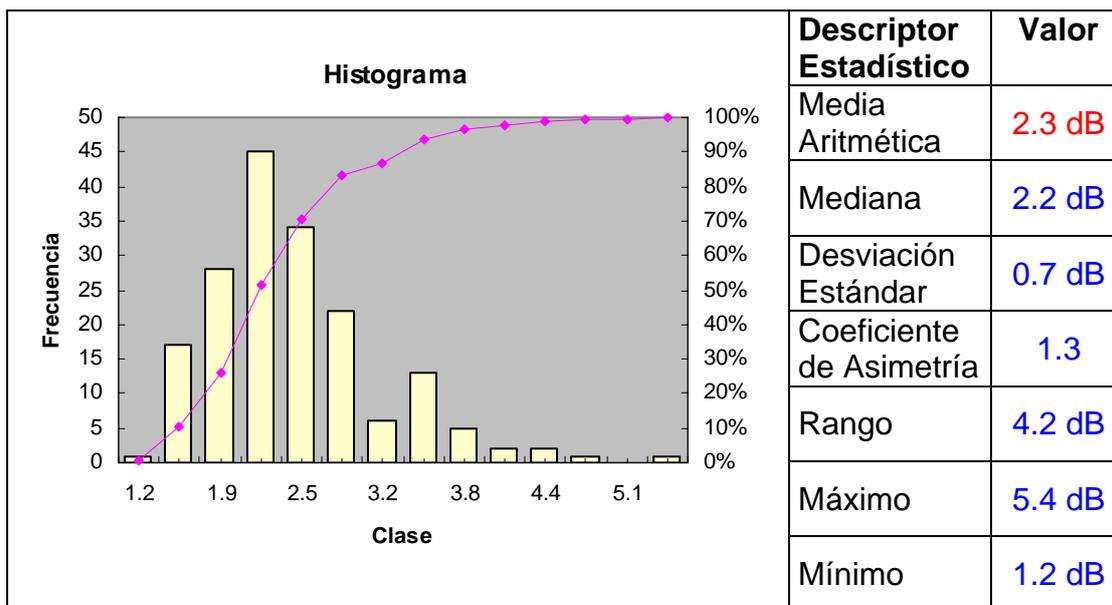
Cabe señalar, que la media aritmética es el indicador que nos dará el valor del error del modelo de predicción, mientras que de las medidas de dispersión obtendremos el grado de confiabilidad en el valor de tendencia central calculado y, el coeficiente de asimetría, el grado de la forma que presentan los datos en relación a una curva con distribución normal o gaussiana (el coeficiente de asimetría es igual a cero para una distribución normal).



**Figura 20:** Valores de los promedios de diferencias de niveles obtenidos para el intervalo temporal de comparación.

Es posible observar en la Figura 20 la tendencia de los valores obtenidos junto en grado de concentración de la gran mayoría. Existe una porción de datos no agrupados temporalmente que escapa a la tendencia central del grupo, lo que hace pensar en mediciones contaminadas con el ruido propio del vecindario, vehículos que transitan de forma aislada en la vía de circulación y/o emisiones sonoras a nivel local en torno al punto de medición.

Con el fin de visualizar de mejor forma el grado de dispersión de los valores obtenidos en torno a su medida de posición o tendencia central (media aritmética) se muestra el histograma de la colección de datos junto con la frecuencia acumulada para dichos valores (Figura 21).



**Figura 21:** Distribución de los promedios de diferencia de niveles en el intervalo temporal de comparación.

De la Figura 21 se puede observar la tabla que resume los descriptores estadísticos calculados y el histograma de la dispersión de esos datos.

La tabla de la Figura 21 nos muestra que el error obtenido para nuestro modelo de predicción corresponde al valor **2.3 dB**, siendo éste inferior al presentado en la Tabla 15, error o desviación que corresponde al método de cálculo perteneciente al Estándar Internacional ISO 9613-2:1996, modelo manipulado a través de su ecuación básica de propagación para obtener el aplicado en la Homologación de la Red de Monitoreo Continuo de Ruido.

Además, es posible observar que el histograma corresponde a la superposición de dos curvas de distribución normal, donde la primera (la más prominente y centrada en torno al valor 2.2 dB) corresponde a la distribución de los promedios de las diferencias de niveles sin la influencia de emisiones de ruidos ajenas a la refinería, mientras que la segunda (considerablemente más pequeña y centrada en torno al valor 3.5 dB) representa a los valores más dispersos observados en la Figura 20.

Los valores dispersos centrados en torno al valor 3.5 dB, debido a que generan una pequeña distribución normal, no están concentrados temporalmente (Figura 20) y sus valores son inferiores al 10% del total de los casos, haciendo pensar que se deben principalmente a movimientos de vehículos de forma aislada en la vía de circulación, aumentando los valores de los descriptores estadísticos calculados, incrementando así, el valor del error calculado para el modelo de predicción planteado.

Sin la presencia de estas desviaciones inesperadas, el grupo principal de valores se concentraría de mejor forma en torno a una curva de distribución normal, experimentando una convergencia en el valor del coeficiente de asimetría hacia el cero, ajustándose aún más la desviación estándar y el rango, dando como consecuencia una disminución en el valor de la mediana, centrándose la media aritmética en torno a ésta, haciendo menor y más representativo el valor obtenido para el error calculado (centrándose en el valor 2.1 dB si se eliminan esos datos con desviaciones inesperadas).

### **9.2.5 Seguimiento de las emisiones de ruido**

El seguimiento ambiental, por medio de la red de monitoreo continuo de ruido implementada, tiene por finalidad cuantificar el impacto acústico producido y asegurar que las emisiones sonoras evolucionan de acuerdo a lo establecido en el plan de manejo ambiental de Enap Refinerías Bio Bio, el cual cuenta con las siguientes fases para cumplir con sus propósitos y acreditar su desempeño:

a) Recopilación de los datos:

- La selección de los descriptores de ruido, y de las variables obtenidas a partir de éstos, son de acuerdo a lo estandarizado a nivel nacional e internacional.
- La determinación de los puntos de muestreo o áreas de recolección (ubicación de las estaciones fijas de monitoreo) se llevó a cabo en función

de la localización de las instalaciones de proceso, las actividades causantes del impacto acústico y las zonas más afectadas.

- La recolección de los datos tiene una frecuencia temporal acorde a la variable que se está controlando. Además, éste aspecto incluye su almacenamiento y posterior acceso.
- De acuerdo a lo establecido en el Estándar Internacional ISO 2204:1979, las mediciones son realizadas bajo el Método de Ingeniería, ofreciendo una precisión de grado 2 en la recolección de los datos.

b) Análisis de los datos:

- A partir de los datos registrados, se cuenta con un modelo de predicción sonora que estima los niveles de ruido en las zonas más afectadas por el impacto acústico.
- Es posible correlacionar los datos recolectados con las condiciones meteorológicas presentes y las actividades que generan el impacto acústico.
- En adición a lo anterior, es factible identificar la tendencia de dichos impactos, así como la tasa de cambio o de incremento cuando éstos ocurren.
- Con todo lo descrito anteriormente, es posible evaluar la eficacia de las medidas mitigadoras.

c) Generación de informes periódicos:

- Diariamente es generado un informe de emisiones a la atmósfera por parte de Enap Refinerías Bio Bio, dentro del cual se encuentra el reporte emitido

a partir de los datos recolectados diariamente desde los tres monitores de ruido.

- Se dan a conocer los niveles sonoros en un periodo de observación igual a 24 horas, identificando así el instante de tiempo en que aparecieron y permanecieron presentes los niveles del impacto acústico, junto con su tasa de cambio en dicho intervalo temporal.
- Al igual que en el punto anterior, se dan a conocer los niveles de presión sonora corregidos, descriptor de ruido utilizado por el D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES que actúa como herramienta para evaluar las emisiones de ruido fluctuante generadas por fuentes fijas, identificando así el instante de tiempo en que es superada la normativa nombrada anteriormente y el intervalo temporal en que estuvieron presentes dichas superaciones.
- A modo de complemento, se muestra el histograma de los datos registrados, junto con una serie de niveles percentiles, con el objeto de un posterior análisis de los valores presentes en el tiempo de observación y su variación en dicho intervalo temporal.

## 10. DISCUSIÓN

En el proyecto del seguimiento de las emisiones de ruido generados por Enap Refinerías Bio Bio a través de la Red de Monitoreo Continuo de Ruido, las instalaciones fijas están ubicadas estratégicamente en función de la localización de las instalaciones de proceso y las actividades causantes del impacto acústico generado, recolectando datos de calidad y fidedignos. Todo lo anterior está acompañado por un sistema de comunicación que asegura en gran medida el traspaso y flujo de información hacia y desde los monitores de ruido, existiendo la posibilidad de ser optimizado con otro protocolo más avanzado y estable (red inalámbrica, Ethernet, entre otros protocolos) aumentando la velocidad de transmisión de los datos y así optar a otras aplicaciones de la red de monitoreo implementada.

El modelo obtenido a partir del análisis de los métodos de predicción sonora estandarizados internacionalmente para evaluar la incidencia acústica generadas por fuentes de ruido industriales presenta las incertezas e imprecisiones propias de los modelos utilizados en éste análisis.

Uno de los principales obstáculos al momento de deducir el modelo planteado a partir de otro normado internacionalmente (ISO 9613-2:1996), es la falencia de éste al no contar con un término de atenuación debida a los efectos meteorológicos, otorgando únicamente la posibilidad de utilizar datos atmosféricos promediados a largo plazo, de ahí la necesidad de importar un término de atenuación debida a los efectos meteorológicos desde otro estándar internacional (CONCAWE), el cual ofrece la posibilidad de monitorear, en forma simultánea, los niveles sonoros a partir de la red de monitoreo continuo de ruido y las variables climáticas recolectadas desde la torre meteorológica perteneciente a Enap Refinerías Bio Bio, correlacionando así los resultados y estimar los niveles sonoros en el área de influencia aportados por las emisiones de ruido generadas por la refinería y las condiciones meteorológicas presentes que interfieren (o acentúan, según sea el caso) con la propagación sonora desde los focos de emisión a los receptores involucrados. Con esto, es posible obtener un modelo que sí es capaz de determinar para un instante de

tiempo en particular (previa consulta a los datos meteorológicos) las causas de las alzas o cambios de tendencias en los impactos acústicos generados en el área de influencia, discriminando entre las actividades de procesos y las variaciones de las condiciones meteorológicas presentes en el ambiente.

Con las características del presente modelo de predicción y la ventaja que éste presenta al correlacionar los niveles sonoros proyectados con las actividades de proceso y las condiciones climáticas sobre los puntos receptores sujetos a evaluación, es posible determinar el instante del día, junto con su determinación extensión temporal, "...el momento y condición de mayor molestia..." establecido en el Artículo N° 8 del D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES, traduciéndose en una excelente herramienta de evaluación, en comparación con modelos de predicción que utilizan condiciones meteorológicas estáticas, promediadas a largo plazo o el empleo de descriptores de ruido que caracterizan a periodos temporales más extensos.

Los errores (o desviaciones) que arroja éste modelo de predicción de emisiones sonoras, surgieron bajo la necesidad de realizar una aproximación en el proceso de análisis y manejo de los algoritmos presentados en el estándar utilizado, siendo éstos estimados a partir de la ecuación (7.1) y posteriormente cuantificados, mostrando dichas desviaciones que van desde la Tabla 28 hasta la Tabla 36.

El modelo fue validado comparando los niveles proyectados con datos reales medidos en uno de los puntos de evaluación (punto PP15), siendo el error obtenido de un orden de magnitud inferior a la precisión propia del Estándar Internacional ISO 9613-2:1996 (ver Tabla 15), obteniendo con esto una muy buena aproximación en los niveles sonoros estimados.

## 11. CONCLUSIONES

De acuerdo a los antecedentes científicos y técnicos presentados, es posible validar la red de monitoreo continuo de ruido perteneciente a Enap Refinerías Bio Bio, por medio de las mediciones de emisión sonora y la estimación de los niveles que impactan en el área de influencia, como una herramienta de evaluación de las emisiones de ruidos molestos generados por la refinería, homologada al D.S. N° 146/97 del MINSEGPRES.

En un contexto más general, el seguimiento del desempeño ambiental de una industria de procesos frecuentemente es vigilada por medio de una red de monitoreo interna y/o externa. Esta herramienta de evaluación puede ser ampliada con una red de monitoreo continuo de ruido, estando en presencia de una excelente alternativa al momento de cuantificar el impacto acústico que incide sobre el entorno natural y/o artificial. Los costos asociados a ésta iniciativa se ven reducidos en un corto plazo al disponer de un monitoreo continuo de las emisiones sonoras las 24 horas de los 365 días del año.

La aplicación de un programa de seguimiento de emisiones sonoras en una actividad industrial, por medio de la implementación de una red de monitoreo continuo de ruido homologada a la normativa local vigente, puede ser realizada con éxito tomando en consideración todos los aspectos científicos y técnicos expuestos en éste trabajo, tales como la ubicación relativa de la(s) estación(es) de monitoreo, el sistema de comunicación responsable de recolectar la información, los datos previamente definidos para su posterior análisis, el modelo de predicción sonora responsable de estimar el impacto acústico en el(los) punto(s) receptor(es) de mayor sensibilidad y la información a reportar en los plazos previamente establecidos, presentando una excelente opción a realizar al momento de presentarse la necesidad de autoevaluar el desempeño ambiental junto con facilitar la comunicación, el intercambio de información y, con esto, la fiscalización de los organismos públicos con competencia en la materia, contribuyendo a la gestión y evaluación del ruido ambiental.

## 12. AGRADECIMIENTOS

A mi madre Margarita, a mi hermano Robinson, por sentirlos siempre presentes en todas las etapas de mi vida universitaria mientras estuve lejos del hogar.

A mi familia, por el apoyo incondicional y las muestras de confianza que recibí en todo momento.

A mis compañeros de carrera, por esas largas noches de estudio y todo lo gentilmente compartido.

A los profesores del Instituto de Acústica, muchas gracias por la excelente formación académica, fue un verdadero honor recibir los conocimientos de tan distinguidos docentes.

A Hilda Negrón y Víctor Cumián, porque siempre dieron solución a todas mis inquietudes.

A los señores Ricardo Soto, René Schmidt y Fernando Díaz, por la sabiduría compartida y la entrega constante de conocimientos hacia éste alumno tesista, estoy seguro que gracias a ustedes seré un buen ingeniero. A la señora Rebeca Troncoso y al señor Julio Olate, por toda la ayuda recibida. Al señor Mario Lanzarini, por confiar en mi para éste proyecto.

Un agradecimiento especial a quienes por fin podré llamar “colegas”, los señores Alexis Suárez y Javier Hernández, distinguidos ingenieros acústicos de la Asociación Chilena de Seguridad y del Servicio de Salud Talcahuano respectivamente, éste trabajo también les pertenece, muchas gracias por los sabios consejos, las experiencias compartidas y las reuniones de trabajo siempre de gran calidad, un gran abrazo para ambos.

A todos ustedes muchas gracias.

### 13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AEA Technology Rail BV. (2004). Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment. State of the Art. IMAGINE Project N° 503549.
- [2] AMERICAN PETROLEUM INTITUTE (API). (1973). Guidelines on Noise. Medical Research Report EA7301.
- [3] BERANEK, L. L. y ISTVAN L. (1992). Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Application. John Wiley & Sons. Inc.
- [4] BRÜEL & KJAER BOOKLET. (2000). Ruido Ambiental. Brüel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S.
- [5] CONSERVATION OF CLEAR AIR AND WATER IN EUROPE (CONCAWE). (1981). The Propagation of Noise from Petroleum and Petrochemical Complexes to Neihbouring Communities. Report N° 4/81.
- [6] COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS. (2002). Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre Evaluación y Gestión del Ruido Ambiental. Diario Oficial de las Comunidades Europeas.
- [7] COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS. (1996). Política Futura Lucha Contra el Ruido – Libro Verde. Bruselas.
- [8] Department of Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA). (2003). Noise Mapping Industrial Sources. Technical Report No: AT 5414/2 Rev 1.
- [9] DIEHL, G. M. (1973). Machinery Acoustics. John Wiley & Sons. Inc.
- [10] Environment Protection Authority (EPA). (2000). NSW Industrial Noise Policy. Published by Environment Protection Authority.

[11] ESPINOZA, G. (2001). Fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental. Banco Interamericano de Desarrollo - BID.

[12] ESPINOZA, G. (2002). Gestión y Fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental. Banco Interamericano de Desarrollo - BID.

[13] FALCH, E. (1997). Guía Ambiental: Manejo de Problemas de Ruido en la Industria Minera. Por Encargo del Ministerio de Energía y Minas, Perú.

[14] GERGES, N. Y. S. (1998). Ruido, Fundamentos e Controle. Edeme Industria Gráfica e Comunicação S.A.

[15] HARRIS, CYRIL M. (1999). Manual de Medidas Acústicas y Control del Ruido. Editorial McGraw-Hill.

[16] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (1999). NCh 2491-1999 (ISO 2204:1982), Acústica – Guía para el uso de Normas sobre Medición del Ruido Aéreo y Evaluación de sus Efectos sobre las Personas (resumen). División de Normas del Instituto Nacional de Normalización, República de Chile.

[17] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (2000). NCh 2502/1-2000 (ISO 1996-1:1979), Acústica – Descripción y Medición del Ruido Ambiental – Parte 1: Magnitudes básicas y procedimientos (resumen). División de Normas del Instituto Nacional de Normalización, República de Chile.

[18] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (2000). NCh 2502/2-2000 (ISO 1996-2:1987), Acústica – Descripción y Medición del Ruido Ambiental – Parte 2: Recolección de datos pertinentes al uso de suelo (resumen). División de Normas del Instituto Nacional de Normalización, República de Chile.

[19] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (2000). NCh 2502/3-2000 (ISO 1996-3:1987), Acústica – Descripción y Medición del Ruido Ambiental –

Parte 3: Aplicación a límites de ruido (resumen). División de Normas del Instituto Nacional de Normalización, República de Chile.

[20] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (1987). International Standard ISO 1996-2:1987, Acoustics – Description and Measurement of Environmental Noise – Part 2: Acquisition of data pertinent to land use. Technical Committee ISO/TC 43, Acoustics.

[21] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (1994). International Standard ISO 8297:1994, Acoustics – Description of Sound Power Levels of Multisource Industrial Plants for Evaluation of Sound Pressure Levels in the Environment – Engineering Method. Technical Committee ISO/TC 43, Acoustics.

[22] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (1993). International Standard ISO 9613-1:1993, Acoustics – Attenuation of Sound During Propagation Outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. Technical Committee ISO/TC 43, Acoustics.

[23] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (1996). International Standard ISO 9613-2:1993, Acoustics – Attenuation of Sound During Propagation Outdoors – Part 2: General method of calculation. Technical Committee ISO/TC 43, Acoustics.

[24] LARSON DAVIS INC. (2000). DNA - User Manual. [www.larsondavis.com](http://www.larsondavis.com).

[25] LARSON DAVIS INC. (2003). System 824 - Reference Manual. [www.larsondavis.com](http://www.larsondavis.com).

[26] MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA (MINSEGPRES). (1997). Norma de Emisión de Ruidos Molestos Generados por Fuentes Fijas, Decreto Supremo N° 146 del 24 de Diciembre de 1997. Chile.

[27] NT ACOU 080. (1991). Industrial Plants: Noise Emission. Nordtest Method.

[28] NT ACOU 107. (2001). Acoustics: Framework for the Verification of Environmental Noise Calculation Software. Nordtest Method.

[29] REJANO, M. (2000). Ruido Industrial y Urbano. International Thomson Editores Spain Paraninfo S.A.

[30] SECRETARÍA INTERMINISTERIAL DE PLANIFICACIÓN DE TRANSPORTE (SECTRA). (2000). Estudio Análisis Red Vial Básica del Gran Concepción, II Etapa. Por encargo del Ministerio de Planificación y Cooperación (MIDEPLAN).

[31] SVT – ENGINEERING CONSULTANTS. (2003). Review of Environmental Noise Emissions from Alcoa Wagerup Refinery. Report N° AV/02/08/005.

[32] TONIN, R. & ASSOCIATES PTY LTD. (1984). Estimating Noise Levels from Petrochemical Plants, Mines and Industrial Complex. Acoustics Australia. Vol 13 N° 2, páginas 59-67.

[33] VIRO, BONELO, GAVINOWICH y RUFFA. (2002). Protocolo de Mediciones para Trazado de Mapas de Ruido Normalizados. Laboratorio de Acústica y Electroacústica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

[34] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). (1999). Guidelines for Community Noise. Edited by Birgitta Berglund, Tomas Lindvall, Dietrich H. Schwela.

[35] ZAROR, C. (2002). Introducción a la Ingeniería Ambiental para la Industria de Procesos. Editorial Universidad de Concepción.