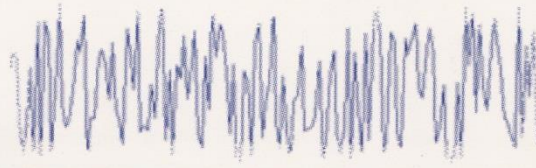


LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA



Eduardo Flores Castro
María de los Ángeles Castillo

Primera Edición

574

F663 Flores Castro, Eduardo

La contaminación acústica / Eduardo Flores Castro y María de Los Ángeles Castillo. – Panamá : Imprenta Articsa, 2012.

106p. ; 22 cm.

ISBN 978-9962-05-207-4

1. PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE

2. CONTAMINACIÓN ACÚSTICA I. Título.

Título: La Contaminación Acústica

Autores: Eduardo Flores Castro y María de los Ángeles Castillo

Inscripción ante la Dirección Nacional de Derecho de Autor:
Resolución . Exp. . Panamá, República de Panamá

Editado por Producciones Científicas S.A.

Impreso en los talleres de la Imprenta ARTICSA. Teléfono: 2250224.

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra a través de cualquier medio, sin autorización escrita de los autores.

DEDICATORIA

A nuestra hija
Ibia Nis
Con todo nuestro amor

AGRADECIMIENTO

Al Dr. José Emilio Moreno por la revisión del manuscrito.
Al Ing. Jaime Pashales por el apoyo brindado para hacer realidad este libro.
Al Dr. Gerardo Delgado-Barrio por la elaboración del prólogo de la obra.
A los profesores Luis Carrasquilla y Vielka Murillo por su asesoría en el componente botánico.
Al profesor José Ángel Garrido por la revisión ortográfica y sintaxis del libro.

PRÓLOGO

Es para mí un honor escribir el prólogo de la obra titulada: “La Contaminación Acústica”. En ella se evidencia el interés de los autores por diversos aspectos de la Física, por la Informática e incluso por la Filosofía Natural. Además, y esto se ve muy claramente a lo largo del libro, están muy interesados por el sistema educativo transmitir conocimientos.

Yo he leído el libro en una tarde primaveral de invierno madrileño, donde como sonido de fondo, de vez en cuando, escuchaba los ruidos, la contaminación acústica de los coches en la ciudad. Es un libro ameno, a pesar de ser un libro técnico y serio. Está bien escrito. Tiene más de sesenta ejemplos, para aclarar toda la teoría que en él se expone. El libro comienza hablando de la Acústica, una de las materias de la física que han sido peor tratadas en muchos planes educativos de diferentes países, a pesar de su enorme utilidad.

Después de una parte más general, se introducen los efectos del ruido en la salud y como se mide el ruido. Conceptos como el de potencia sonora o el de intensidad sonora se introducen de forma clara con muchos ejemplos para que se comprendan bien los nuevos conceptos. Se presenta después el tema de la propagación sonora, el tiempo de reverberación y la atenuación del sonido. Un tema muy importante es cómo se pueden atenuar los ruidos y como se adicionan los decibelios. Siguen después varios apartados de como se mide, el costo económico y el control y mitigación del ruido. Termina el libro con un análisis de casos reales que se han estudiado en la ciudad de Panamá.

Cada página encamina al lector hacia el objetivo deseado, que es que conozca la contaminación acústica y que pueda conocer cómo se puede mitigar su impacto en la salud. La obra va dirigido a estudiantes universitarios de distintas disciplinas: Física, Ingenieros, Arquitectura, pero también a todos los ciudadanos que se preocupen por su país y por su salud. Cada vez más los ciudadanos en todo el mundo tenemos que conocer los peligros y las soluciones técnicas que existen para poder llevar una vida realmente humana en una sociedad de complejidad creciente.

Desearía concluir que esta es una obra esencialmente práctica y muy útil por el tema tratado y la forma de hacerlo. Finalmente yo espero y deseo que el esfuerzo que han hecho sus autores en este libro motive a muchos otros especialistas a seguir poniendo a disposición de los lectores temas que nos preocupan a todos los ciudadanos.

Gerardo Delgado-Barrio

Director del Instituto de Física Fundamental del Consejo Superior
de Investigaciones Científicas, Madrid - España.
Expresidente de la Federación Iberoamericana de Sociedades de Física.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. EL OÍDO	2
3. EL SONIDO	3
4. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DEL SONIDO	6
5. AUDICIÓN	9
5.1. Curvas de Igual Sonoridad	10
5.2. Campo Audible	11
6. EFECTOS DEL RUIDO EN LA SALUD	13
6.1. El Ruido y la Comunicación	15
7. MEDICIÓN DEL RUIDO	16
7.1. Presión Sonora	16
7.2. Nivel de Presión Sonora	17
7.3. Potencia Sonora y Nivel de Potencia Sonora	20
7.4. Intensidad Sonora y Nivel de Intensidad Sonora	22
7.5. Relación entre el Nivel de Potencia Sonora y el Nivel de Intensidad Sonora	26
8. PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS	27
8.1. Reflexión	29
8.1.1. Tiempo de reverberación	30
8.2. Atenuación del Sonido	31
8.2.1. Atenuación con la distancia	31
8.2.2. Atenuación por la arbolad	43
8.2.3. Atenuación debido a efectos meteorológicos	44
8.2.4. Atenuación debido a una barrera	49
9. ADICIÓN DE DECIBELIOS	57
10. RUIDO DE FONDO	61
11. FORMAS DE MEDIR EL RUIDO	63
11.1. Nivel de Presión Sonora Equivalente	63
11.2. Nivel de Presión Sonora Equivalente Día-Noche	66
11.3. Nivel de Exposición a Ruidos Aislados	67

12. COSTO ECONÓMICO DEL RUIDO	70
12.1. Pérdida del Bienestar	70
12.2. Costo a la Salud	70
12.3. Costo por Discapacidad Auditiva	71
12.4. Depreciación de la Vivienda	71
12.5. Costo por Protección Contra el Ruido	71
13. EL SONÓMETRO	72
13.1. Precisión del Sonómetro	73
13.2. Ponderación	73
13.3. Dosímetros	74
14. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE LOS NIVELES SONOROS	74
15. CONTROL Y MITIGACIÓN DEL RUIDO	75
15.1. Gestión del Ruido	75
15.2. La Zonificación de Áreas con Impacto Sonoro	76
15.2.1. Zonas de riesgo	76
15.2.2. Medidas preventivas luego de la zonificación	77
15.3. Protección Auditiva	77
15.4. Plan de Sensibilización	78
15.5. Monitoreos	78
15.6. Saneamiento Acústico	79
15.7. Prevención y Control del Ruido en Maquinarias	79
15.8. Documentación	79
16. ANÁLISIS DE CASOS REALES	81
CASO 1: La Percepción del Ruido	81
CASO 2: Ruidos en la Ciudad	84
CASO 3: Ventiladores de Aire de una Casa de Máquina	90
CASO 4: Sistema de Acondicionador de Aire de un Hotel	92
CASO 5: Puerto en la Salida del Canal de Panamá	94
CASO 6: Termoeléctrica	96
CASO 7: Aeropuerto	99
CASO 8: Depuradora de Aguas Residuales	101
CASO 9: Construcción de una Vía Rápida	104
BIBLIOGRAFÍA	106

LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

1. INTRODUCCIÓN

La Acústica es la ciencia que estudia las propiedades de las vibraciones de un medio susceptible de generar sonidos, infrasonidos o ultrasonidos, y de propagarlos. Es decir, estudia las ondas materiales denominadas sonidos audibles y no audibles, su producción, transmisión y percepción.

Uno de los primeros estudios sobre acústica arquitectónica fue realizado por el ingeniero romano Marco Vitruvio en el siglo I a.C, en donde estableció recomendaciones acústicas para la construcción de teatros. En el estudio del sonido, un concepto fundamental es el de frecuencia, el cual fue introducido por el físico italiano Galileo Galilei (1564-1642). Los primeros tratados teóricos del sonido fueron desarrollados por el físico y matemático suizo Leonhard Euler (1707-1783) con su obra *Dissertatio Physica de Sono*; al igual que el físico británico John Rayleigh (1842-1919) con su obra *Theory of Sound*. Sin embargo, el físico estadounidense Wallace Sabine (1868 – 1919) fue quien desarrolló métodos para calcular la reverberación de una sala de acuerdo a los materiales absorbentes que contiene. Por sus aportes se le considera uno de los fundadores de la Acústica Arquitectónica moderna.

Ejemplo 1: ¿Los términos: onda material y onda mecánica, son equivalentes?

Efectivamente, onda material y onda mecánica se refieren a la onda que produce perturbación en las propiedades mecánicas del medio material por el que se propaga.

Ejemplo 2: ¿Las ondas que llegan a un receptor de radio, son estudiadas por la Acústica?

No, porque estas ondas son electromagnéticas y no ondas materiales. El sonido que se produce en la radio es producto de la transformación de las ondas electromagnéticas que inciden sobre él y posteriormente son convertidas en ondas mecánicas en las bocinas.

Ejemplo 3: ¿Dónde y en qué circunstancia tuvo lugar el surgimiento de la Acústica?

La acústica tuvo sus inicios en Grecia en el siglo VI a.C, y se origina por el interés en estudiar la naturaleza de la música.

2. EL OÍDO

El sistema auditivo nos permite escuchar los sonidos y mantener el equilibrio. El órgano de la audición es el oído y se puede dividir en tres partes (Figura 1).

- El oído externo está conformado por: el pabellón auditivo (oreja), las glándulas ceruminosas y el conducto auditivo externo.
- El oído medio está constituido por: el tímpano y tres huesecillos denominados martillo, yunque y estribo.
- El oído interno está compuesto por: los conductos semicirculares, el vestíbulo, cóclea (caracol) y el nervio auditivo.

El proceso de percepción del sonido inicia en el pabellón auditivo, que capta y reorienta las vibraciones sonoras hacia el oído medio. Las ondas entran al conducto auditivo, impactan el tímpano y lo ponen a vibrar. El tímpano es una fina membrana que separa el oído externo del oído medio. Las vibraciones del tímpano ponen en movimiento al martillo y este transmite la vibración al yunque y al estribo (este último es el hueso más pequeño del cuerpo humano). La función del oído medio es transformar las ondas sonoras en vibraciones. Las vibraciones del estribo pasan a la membrana oval en el oído interno que cierra la cóclea que está llena de líquido y a la que se le transmiten las vibraciones. Estas vibraciones estimulan las células ciliadas (en un milímetro caben 500 de ellas), que conducen los impulsos nerviosos a través del nervio auditivo a la corteza cerebral en donde se interpretan como sensación de sonido. En el oído interno las vibraciones mecánicas se transforman en señales nerviosas. Las células ciliares son muy delicadas y los ruidos fuertes las destruyen. Lamentablemente las células del oído interno, una vez destruidas, no vuelven a crecer.

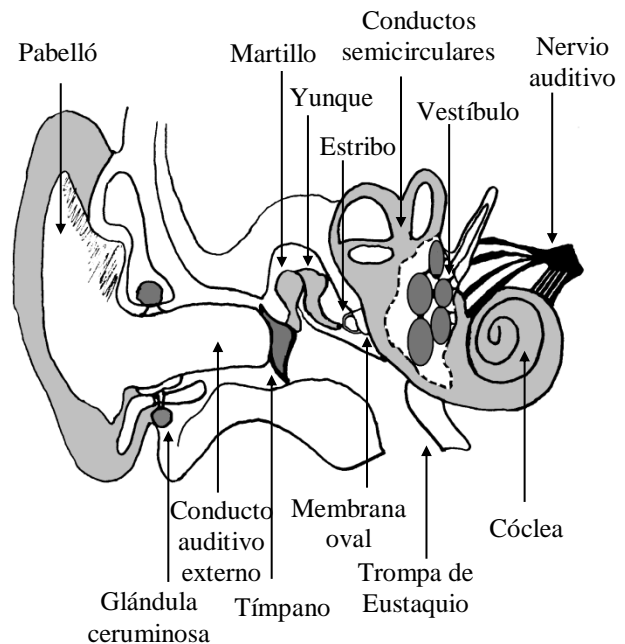


Fig. 1. El oído

Los conductos semicirculares, ubicados en el oído interno, ayudan a mantener el equilibrio. Están constituidos por tres pequeños tubos que contienen líquidos y que forman ángulos rectos uno respecto del otro. Cuando mueves la cabeza, el líquido del interior de los conductos se mueve y los cilios (similares a pequeños pelos) de cada tubo

se desplazan, convirtiendo el movimiento en mensajes nerviosos que llegan al cerebro. Gracias a esto, tu cerebro le indica a tu cuerpo cómo mantener el equilibrio.

La trompa de Eustaquio comunica al oído medio con la parte superior de la faringe y sirve para igualar la presión del oído medio con la presión ambiental. Normalmente se encuentra cerrada, pero cuando bostezamos se abre para proteger al oído de los cambios bruscos de presión. Por esta razón, se recomienda bostezar cuando se sienten molestias en los oídos debido al ascenso o descenso de una montaña.

Ejemplo 4: ¿Dónde se producen las señales eléctricas que el cerebro interpreta como sonidos?

Las señales eléctricas que llegan al cerebro y que se interpretan como sonido, se producen en la cóclea. En ella se encuentra el órgano de Corti, que está compuesto por las células sensoriales auditivas llamadas células ciliadas. Su función es transformar las vibraciones mecánicas de las ondas sonoras en señales nerviosas. Las células del órgano de Corti no tienen capacidad regeneradora; esto significa que, cuando se deterioran, se pierde capacidad auditiva irremediablemente.

Ejemplo 5: ¿Por qué a las personas se les “tapan” los oídos cuando un avión se eleva?

Esto sucede porque al elevarse el avión la presión disminuye y se produce una diferencia entre la presión en el interior del oído con respecto a la presión exterior.

Ejemplo 6: ¿Cuál es la parte de oído humano involucrada en la acción de “destaponarlo” cuando bostezamos?

Es la trompa de Eustaquio, ya que, cuando bostezamos, se abre y comunica al oído medio con la faringe, igualando las presiones.

3. EL SONIDO

Cuando hablamos, la expulsión de aire de nuestra boca produce una diferencia de presión que hace vibrar las moléculas del aire que nos rodea. Cuando esta diferencia de presión llega al oído de una persona, produce una sensación auditiva que denominamos sonido. Fisiológicamente, el sonido es el resultado de las vibraciones en el aire que son captadas por la oreja, entran al canal auditivo y, al llegar a la membrana denominada tímpano, son transportadas al oído interno en donde se transforman en señales eléctricas que nuestro

cerebro interpreta como “sonido”. Por lo tanto, podemos definir el sonido como ***una vibración mecánica, que se propaga en un medio (gas, líquido o sólido) y es capaz de ser percibida por el oído.***

Para que tengas una idea del orden de magnitud de las diferencias de presión que estimulan el sentido de la audición, considera que la presión atmosférica media es $101\,300\text{ N/m}^2$, un martillo neumático varía la presión respecto a la atmósfera en $6,32\text{ N/m}^2$, mientras que una conversación normal produce una diferencia de presión de sólo $0,020\text{ N/m}^2$. Estas pequeñas variaciones instantáneas de presión son las que nuestro oído interpreta como sonido.

Siempre que escuchas un sonido es porque hay un objeto material que vibra y produce la onda sonora. La rapidez de propagación de una onda (V) está relacionada con la longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) a través de la expresión:

$$V = \lambda f \tag{1}$$

Como la rapidez de propagación del sonido en el aire, a $27\text{ }^\circ\text{C}$, es 348 m/s y el oído humano es capaz de percibir frecuencias entre 20 Hz y $20\,000\text{ Hz}$, esto significa que podemos percibir longitudes de onda comprendidas entre $17,4\text{ m}$ y $0,0174\text{ m}$. Por ser el sonido una onda mecánica, su rapidez de propagación depende del medio en que se propague. En la Tabla 1 presentamos los valores de la rapidez del sonido en algunos medios.

El rango de frecuencia sonora audible varía con la adaptación de cada animal. Por ejemplo, los perros perciben frecuencias hasta de $50\,000\text{ Hz}$, mientras que los murciélagos pueden percibir frecuencias hasta de $120\,000\text{ Hz}$.

MEDIO	V (m/s)
Caucho	54
Aire	348
Agua	1 488
Madera	3 900
Cemento	4 000
Hierro	5 032
Aluminio	5 110

Tabla 1. Rapidez del sonido en diferentes medios.

La acústica es la ciencia que estudia las propiedades de las vibraciones de las partículas de un medio susceptible de engendrar sonidos, infrasonidos o ultrasonidos; de propagarlos y de hacerlos perceptibles. Tomando en cuenta los efectos sobre el ser humano, algunos sonidos son catalogados como ruido. El ruido se puede definir como ***el conjunto de fenómenos vibratorios aéreos percibidos por el sistema auditivo humano que provocan, en el receptor, rechazo, molestia, fatiga o lesión.*** El ruido también puede

ser considerado como el residuo energético que se produce por la ineficiencia de un sistema mecánico.

Los sonidos de baja intensidad también pueden ser considerados como ruido. A veces un sonido muy suave, como el goteo de un grifo, nos molesta al impedirnos dormir. Sin embargo, como es de esperar, los sonidos más fuertes son los más perjudiciales a la salud.

Ejemplo 7: ¿Cuál es la diferencia entre sonido y sonido humano audible?

El sonido es una onda mecánica que se propaga en un medio material, ya sea audible o no para el ser humano. El sonido humano audible está conformado por ondas elásticas que producen oscilaciones de la presión del aire, las cuales, al llegar al oído humano, son convertidas en ondas mecánicas y percibidas por el cerebro como sonido.

Ejemplo 8: Si la cuerda de una guitarra oscila a una frecuencia de 130 Hz, ¿cuál es la longitud de onda de la perturbación en la cuerda?

Despejando la longitud onda de la ecuación 1, se tiene que:

$$V = \lambda f$$
$$\lambda = \frac{V}{f} = \frac{200}{130} = 1,54 \text{ m}$$

Ejemplo 9: ¿El sonido de una música clásica y el ruido que produce un martilleo está conformado por distintas naturalezas?

No, ambos son vibraciones mecánicas que se propagan en el aire hasta llegar a nuestro oído.

Ejemplo 10: ¿Qué se requiere para que se produzca un sonido?

Para que se produzca un sonido se requiere que un objeto vibre hasta producir diferencias de presión en el aire que sean perceptibles por el oído.

Ejemplo 11: ¿Cuál es la rapidez de propagación del sonido en el vacío?

La rapidez de propagación del sonido en el vacío es nula. El sonido es una onda mecánica, por lo que necesita un medio material para propagarse. De aquí que el sonido no se puede propagar en el vacío.

Ejemplo 12: ¿Qué es la frecuencia fundamental de un espectro de frecuencia?

La frecuencia fundamental es la frecuencia más baja de la descomposición del espectro de frecuencia, de modo que las frecuencias dominantes son múltiplos de la frecuencia fundamental.

4. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DEL SONIDO

El **tono** o **altura** de un sonido es la cualidad que nos permite clasificarlo como grave o agudo. Esta propiedad está asociada a la frecuencia de la onda sonora. Un sonido grave (bajo o grueso) es de frecuencia pequeña; mientras que un sonido agudo (alto o fino) es de gran frecuencia.

Las notas musicales se caracterizan por su frecuencia (altura). Es decir, cuando oímos que un instrumento musical está emitiendo notas distintas, está emitiendo notas de diferentes frecuencias. En un instrumento musical, se definen como sonidos de altura grave los comprendidos entre 32 Hz y 256 Hz; los sonidos de altura media son los que abarcan entre 256 Hz y 2 048 Hz; mientras que los sonidos de altura aguda están entre 2 048 Hz y 4 096 Hz.

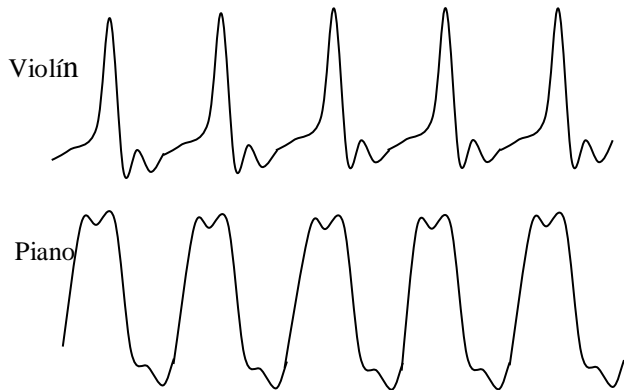


Fig. 4. Ondas de iguales frecuencias e intensidad.

Tomando en cuenta la altura de la voz de los cantantes de música clásica, pueden ser divididos en términos generales en: bajos (voz grave o masculina); tenores (voz menos grave o masculina) y sopranos (voz aguda o femenina).

El **timbre** está asociado a la diferencia que hace el oído cuando percibe un sonido de la misma frecuencia e intensidad, pero de causas distintas. Si puedes distinguir el Do de un violín del Do de un piano, se debe a que tu oído es capaz de notar la diferencia en la

forma de las dos ondas (ver Figura 4). En estos casos, decimos que estos instrumentos tienen distintos timbres. Gracias a esta capacidad diferenciadora del oído puedes distinguir qué persona te habla por teléfono antes que se anuncie.

Las **escalas musicales** se componen de siete sonidos o notas. En la Tabla 4 se presentan las frecuencias asociadas a cada nota musical de la primera octava. Además se muestra la relación que existe entre la frecuencia de cada nota y la frecuencia de la nota Do con que inicia esta octava.

Nota	Do ₁	Re ₁	Mi ₁	Fa ₁	Sol ₁	La ₁	Si ₁	Do ₂
f _{nota} (Hz)	65,25	73,41	81,56	87,00	97,88	108,75	122,34	130,50
f _{nota} /f _{Do,1}	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2

Tabla 4. Notas musicales de la primera octava.

Esta relación entre la frecuencia de la nota con respecto a la frecuencia del Do con que se inicia la octava se repite para todas las escalas de octavas. Por otro lado, la relación entre el Do de cada escala tiene una progresión potencial de base 2, dada por la siguiente ecuación:

$$f_{Do,n} = f_{Do,1} \cdot 2^{n-1} \quad (2)$$

En donde n es un número entero que toma los valores de 1, 2, 3, De esta expresión se puede encontrar que la frecuencia de los Do de las diferentes octavas son los presentados en la Tabla 5.

Nota	Do ₁	Do ₂	Do ₃	Do ₄	Do ₅	Do ₆	Do ₇	Do ₈
f _{Do,n} (Hz)	65,25	130,5	261	522	1 044	2 088	4 176	8 352
f _{Do,n} /f _{Do,1}	1	2	4	8	16	32	64	128

Tabla 5. Frecuencias asociadas a las diversas notas musicales Do.

El número de octavas que existe entre un sonido de frecuencia f y un sonido utilizado como frecuencia de referencia (f_R), se hace a través de la siguiente expresión:

$$N_{\text{octava}} = \log_2 \left(\frac{f}{f_R} \right)$$

Utilizando las propiedades de los logaritmos, la expresión anterior podemos escribirla en función de los logaritmos de base diez, de la siguiente forma:

$$N_{\text{octava}} = \frac{\log_{10} \left(\frac{f}{f_R} \right)}{\log_{10}(2)} \quad (3)$$

Ejemplo 13: La cantante peruana Yma Sumac (1922 - 2008) fue la primera cantante en la historia de la música en abarcar registros vocales desde Mi_2 hasta Mi_7 . Determina:

1. La frecuencia de la nota Do de la segunda octava.
2. La frecuencia de la nota Mi_2 .
3. La frecuencia de la nota Do de la séptima octava.
4. La frecuencia de la nota Mi_7 .
5. Cuantas octavas llegó a abarcar la voz de Yma Sumac.

1. La frecuencia de la nota Do de la segunda octava, la podemos obtener utilizando la ecuación 2 para $n = 2$, es decir:

$$f_{Do,2} = f_{Do,1} \cdot 2^{2-1} = (65,25)(2)^{2-1} = 130,5 \text{ Hz}$$

2. Como la relación entre la frecuencia de la nota y la frecuencia del Do de su octava se repite, se debe cumplir que:

$$\frac{f_{Mi,2}}{f_{Do,2}} = \frac{5}{4} \quad \Rightarrow \quad f_{Mi,2} = \left(\frac{5}{4}\right) \cdot f_{Do,2} = \left(\frac{5}{4}\right)(130,5) = 162,5 \text{ Hz}$$

3. Utilizando la ecuación 1 para $n = 7$, tenemos que la frecuencia de la nota Do de la séptima octava es igual a:

$$f_{Do,7} = f_{Do,1} \cdot 2^{7-1} = (65,25)(2)^{7-1} = 4 \ 176 \text{ Hz}$$

4. Como la relación entre las frecuencias de la nota Mi y la nota Do no va a cambiar, se tiene que:

$$\frac{f_{Mi,7}}{f_{Do,7}} = \frac{5}{4} \quad \Rightarrow \quad f_{Mi,7} = \left(\frac{5}{4}\right) \cdot f_{Do,7} = \left(\frac{5}{4}\right)(4 \ 176) = 5 \ 220 \text{ Hz}$$

5. Para determinar las octavas que llegó a abarcar la voz de Yma Sumac, utilizamos la ecuación 3. Se obtiene:

$$N_{\text{octava}} = \frac{\log_{10}\left(\frac{f}{f_R}\right)}{\log_{10}(2)} = \frac{\log_{10}\left(\frac{5 \ 220}{162,5}\right)}{\log_{10}(2)} = 5,0 \text{ octavas}$$

Para que tengas una idea de la magnitud de esta proeza, basta decir que la media de los cantantes de ópera de su época abarcaba 2,5 octavas.

Ejemplo 14: ¿Qué es la duración de un sonido?

La duración de un sonido es el intervalo temporal en el que se percibe un sonido sin discontinuidad. Esta es una cualidad adicional que se utiliza para describir un sonido musical.

Ejemplo 15: ¿La frecuencia fundamental de la voz masculina y femenina es la misma?

En términos generales la frecuencia fundamental del hombre está entre 50 Hz y 200 Hz, mientras en la mujer está entre los 150 Hz y 350 Hz.

5. AUDICIÓN

El campo de audición en el hombre está comprendido entre 20 Hz y 20 000 Hz. El campo de las frecuencias por debajo a 20 Hz lo constituyen los **infrasonidos**. El campo de frecuencias superior a 20 000 Hz es el de los **ultrasonidos**. Ambos son inaudibles para el hombre, pero audibles para ciertas especies de animales.

El umbral de audición, o el nivel de intensidad sonora que nuestro oído puede percibir, varía con la frecuencia (Figura 2, curva inferior). Es decir, que la respuesta del oído no es la misma en todas las frecuencias. En la zona de bajas frecuencias, nuestro sistema auditivo atenúa notablemente los niveles sonoros que le llegan. A la frecuencia de 1 000 Hz el umbral de audición es 0 dB, mientras que el límite de dolor es 120 dB (Figura 2, curva superior).

Es en el intervalo de frecuencia entre 500 Hz a 5 000 Hz cuando el oído es más sensible (umbral de audibilidad muy bajo) y presenta a la vez una zona de audibilidad (distancia entre el umbral audible y el umbral del dolor) máxima. Es en este rango de frecuencias se sitúa, en términos promedio, la voz humana.

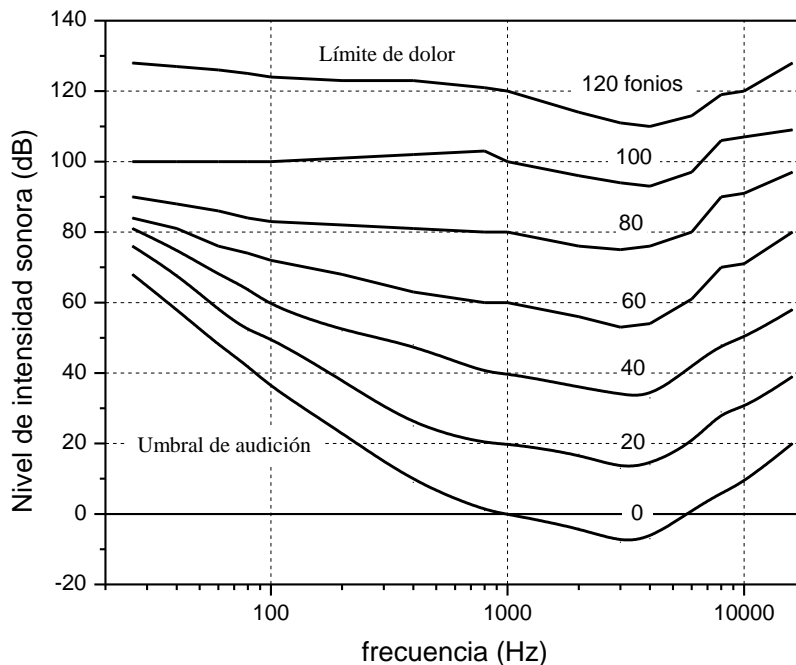


Fig. 2. Umbrales auditivos del oído humano.

La respuesta del oído no es la misma en todas las frecuencias. En la zona de bajas frecuencias nuestro sistema auditivo atenúa notablemente los niveles que le llegan. En términos generales, los sonidos no periódicos son los que nuestro cerebro percibe como más molestos.

Ejemplo 16: ¿Existe nivel sonoro negativo?

Si observamos la curva inferior de la Figura 2, podemos advertir que hay un rango de frecuencia que va aproximadamente entre los 1 000 Hz y 6 000 Hz, en que el nivel sonoro que capta el oído humano es negativo. Es decir, que está por debajo del nivel de referencia que se escogió para 0 dB.

5.1. Curvas de Igual Sonoridad

Las curvas de igual sonoridad (isofónicas) son curvas que fueron construidas empíricamente, utilizando diversos valores de intensidad sonora a 1 000 Hz. La curva de 0 fonios representa los valores de nivel de intensidad sonora que, a diferentes frecuencias, el oído humano percibe como “0 dB”. Esta curva representa el límite de precepción del oído humano.

La curva de 40 fonios representa los distintos valores de frecuencias y niveles de intensidad sonora que se perciben como 40 dB a 1 000 Hz. Esto significa que el oído humano percibe 40 dB a 1 000 Hz con igual nivel de intensidad sonora que las señales acústicas de: 48 dB a 400 Hz, 59 dB a 100 Hz y 33 dB a 4 000 Hz, ya que todos estos valores están sobre la curva de 40 fonios (Figura 2).

A medida que aumentan los fonios, las curvas se hacen más planas, lo que indica que nuestro oído se hace menos sensible a los cambios de frecuencia.

Ejemplo 17: Una Norma del Control de Ruido establece que, durante el día, el límite máximo permitido de la intensidad sonora, en el interior de una vivienda, es de 55 dB. Si en una residencia la intensidad sonora resulta ser de 53 dB con una frecuencia de 3 000 Hz, ¿se estaría violando la norma?

La coordenada 53 dB y 3 000 Hz está sobre la curva 60 fonios, lo que significa que esta señal acústica se percibe como el equivalente a 60 dB a 1 000 Hz. De aquí que sí podemos considerar que hay una violación a la norma.

5.2. Campo Audible

El espectro del campo audible se ha dividido en diez bandas de frecuencias. Estas bandas son consecutivas y ocupan un ancho de frecuencia del espectro denominado banda de octava. Cada banda se denomina por el valor de la frecuencia central. Estos valores están normalizados y tienen como característica que su frecuencia central es el doble de la anterior y la mitad de la precedente (Tabla 2). En términos generales, el ruido ambiental está comprendido entre 63 Hz y 4 000 Hz.

Banda de frecuencias (Hz)	Frecuencia central (Hz)	Octava
20 – 43	31,5	Primera
43 – 83	63	Segunda
83 – 167	125	Tercera
167 – 333	250	Cuarta
333 – 667	500	Quinta
667 – 1 333	1 000	Sexta
1 333 – 2 667	2 000	Séptima
2 667 – 5 333	4 000	Octava
5 333 – 10 667	8 000	Novena
10 667 – 21 333	16 000	Décima

Tabla 2. Banda de frecuencias y su frecuencia central asociada.

A los equipo de medición sonora (sonómetro) se les adapta un atenuador de nivel de sonido, semejante al que dispone nuestro sistema auditivo, que atenúa las bajas frecuencias. A este “filtro” o “curvas” se le denomina filtro “A”, y el nivel de presión sonora se mide y se expresa en dBA. Si el filtro “A” no se utiliza, la unidad de medida del nivel sonoro de todo el espectro de frecuencia será el decibelio lineal (dBL o dB). En la Tabla 3 se presentan los valores de ponderación “A” (atenuación) para el espectro de frecuencia.

F (Hz)	31,5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	10 000
A (dB)	-39,4	-26,1	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0	-1,1	-6,6

Tabla 3. Valores que son restados del nivel sonoro de acuerdo al filtro A.

Existen cinco tipos de filtros o escalas de ponderación. Sin embargo, en la práctica la escala de ponderación ampliamente empleada es la A, ya que presenta buena concordancia entre los valores medidos y las molestias que perciben las personas (Figura 3).

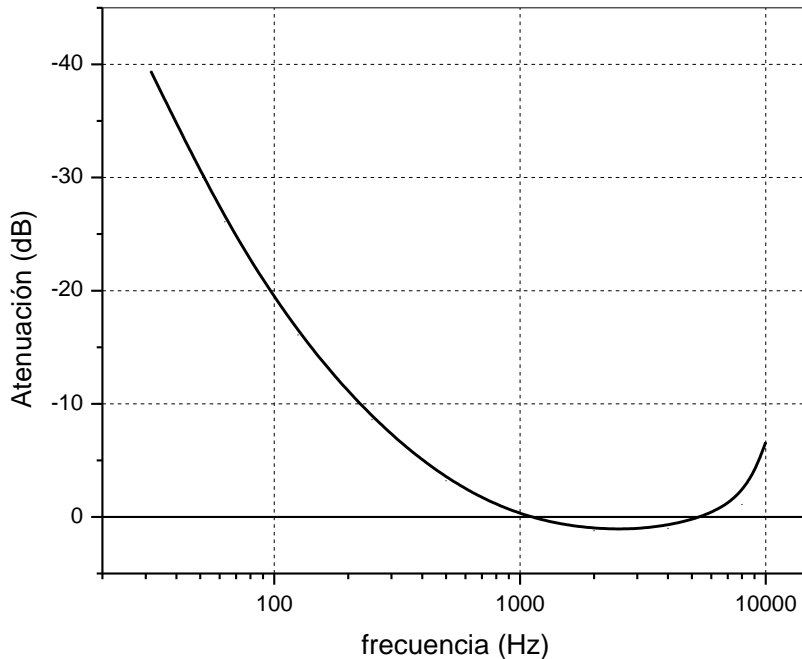


Fig. 3. Curva de atenuación que proporciona el filtro A.

Ejemplo 18: En un cierto lugar de una sala existe un nivel de intensidad sonora de 50 dBL, producto de una onda sonora de 400 Hz. ¿Qué nivel de intensidad sonora percibirá una persona si se coloca en ese mismo lugar?

Las personas perciben el sonido con una atenuación muy parecida al filtro A. Si interpolamos el valor de la atenuación en la Figura 3 para una frecuencia de 400 Hz, se obtiene que este valor es aproximadamente igual a -5 dB. Por consiguiente, el valor que percibe la persona será:

$$L_A = L + \text{atenuación}$$

$$L_A = 50 - 5 = 45 \text{ dBA}$$

Ejemplo 19: ¿Qué animal tiene el campo de audición más amplio?

La ballena dentada es el animal con el campo de audición más amplio. Puede detectar sonidos que van desde los 40 Hz hasta los 325 000 Hz.

Ejemplo 20: ¿Quién tiene el rango de audición más amplio: Los humanos, los perros o los gatos?

El rango de audición de los humanos está entre los 20 Hz y los 20 000 Hz. El de los perros está entre los 60 Hz y los 45 000 Hz. Mientras que el de los gatos está entre los 100 Hz y los 60 000 Hz.

6. EFECTOS DEL RUIDO EN LA SALUD

La exposición prolongada a ruidos de intensidad elevada origina una fatiga auditiva que es recuperable, pero si los ruidos exceden los 80 dBA y la exposición al ruido se prolonga durante meses, se origina una sordera denominada **neurosensorial** o de percepción, la cual, por destruir las células auditivas del oído interno, es irreversible.

Con la edad se origina una disminución de percepción auditiva que se denomina **presbiacusia**. Esta disminución se inicia entre los 25 años y es más acusada en los hombres que en las mujeres. El ruido incide sobre la salud, la comunicación y sobre el comportamiento. Los efectos que produce el ruido los podemos clasificar así:

- Efectos fisiológicos: hipertensión.
- Perturbación del sueño: los estudios experimentales muestran que el nivel sonoro deseable para proteger la estructura del sueño debe ser inferior a 35 dBA en el interior de los dormitorios.
- Efectos en el comportamiento: a partir de un nivel sonoro exterior de 68 dBA, el 28 % de los europeos introducen mejoras de aislamientos acústicos en su vivienda.
- Efectos en la comunicación: en zonas ruidosas con niveles sonoros mayores a 70 dBA, el 75 % de la población cierra las ventanas para poder entenderse.
- Efectos sobre la audición: a partir de exposiciones a niveles sonoros de 80 dBA, aparece la fatiga auditiva o aumento del umbral de percepción.
- Para niveles sonoros mayores a 85 dBA durante 8 horas diarias, aparece la sordera profesional.

La molestia por el ruido puede definirse como un sentimiento general de desagrado o contrariedad hacia una fuente sonora que se cree tiene efectos perjudiciales sobre la salud y bienestar de la persona. Resulta relativamente fácil establecer si una persona se siente molesta por el ruido, pero lo difícil es cuantificar el grado de molestia.

Para el ruido de tráfico durante el día, se ha observado que a partir de los 68 dBA la molestia crece considerablemente. Para ruidos interiores en las viviendas, durante la noche, procedentes de actividades nocturnas, los niveles molestos pueden ser tan bajos como 30 dBA.

El ruido puede producir:

- Problemas cardiacos.
- Predispone a la violencia.
- Estrés.
- Disminuye la concentración.
- En el caso de los niños, afecta el crecimiento e interfiere con el aprendizaje.
- A las mujeres embarazadas, un ambiente ruidoso puede ocasionar que el infante tenga posteriormente problemas de aprendizaje.
- Impotencia sexual.
- La Comunidad Económica Europea ha determinado que el ruido produce pérdidas de por lo menos 0,1 % del producto interno bruto de sus países.

Los ruidos muy agudos son más dañinos que los graves. Los ruidos muy cortos y muy fuertes, como los martillazos, impactos y explosiones, también son especialmente peligrosos. Los ruidos muy fuertes que se traducen en vibraciones mecánicas en sólidos, pueden dañar los edificios, provocando rajaduras. El ruido afecta también a los animales, alterando el equilibrio ecológico de los ecosistemas.

Ejemplo 21: ¿Cuáles son los efectos sociales del ruido?

El ruido produce efectos en la comunicación, por lo que las personas en ambiente ruidoso tienden cada vez más a evitar la comunicación, lo cual provoca el aislamiento social.

Ejemplo 22: ¿Qué es la pérdida auditiva neurosensorial?

La pérdida auditiva neurosensorial es el efecto debido al deterioro o pérdida de las células ciliares en la cóclea. Esta pérdida auditiva puede ser leve, moderada o profunda. Cuando la pérdida auditiva se da sólo para las altas frecuencia, significa que las células ciliares afectadas son las ubicadas en la base de la cóclea.

Ejemplo 23: ¿Existe un día mundial contra el ruido?

La Liga de Personas con Problemas Auditivos, sugieren en 1996, la creación del día mundial contra la contaminación acústica. Actualmente, el Día Mundial Contra el Ruido es el 27 de abril.

6.1. El Ruido y la Comunicación

Uno de los perjuicios del ruido es su interferencia con la comunicación oral. El nivel de presión sonora de una conversación normal está próximo a 60 dBA a 1,0 m de distancia. A medida que el ruido ambiente (ruido de fondo) se incrementa, la conversación se dificulta y se hace necesario que los interlocutores eleven el nivel sonoro de la voz. En términos generales, se puede señalar que para que la conversación sea fácilmente inteligible, el nivel de presión sonora de la voz debe estar al menos 15 dBA por arriba del nivel de presión sonora del ruido de fondo. En la Figura 5 presentamos la variación del ruido de fondo en que se inicia la interferencia en una conversación normal (L_{Pf}) en función de la distancia entre los interlocutores (d_{int}).

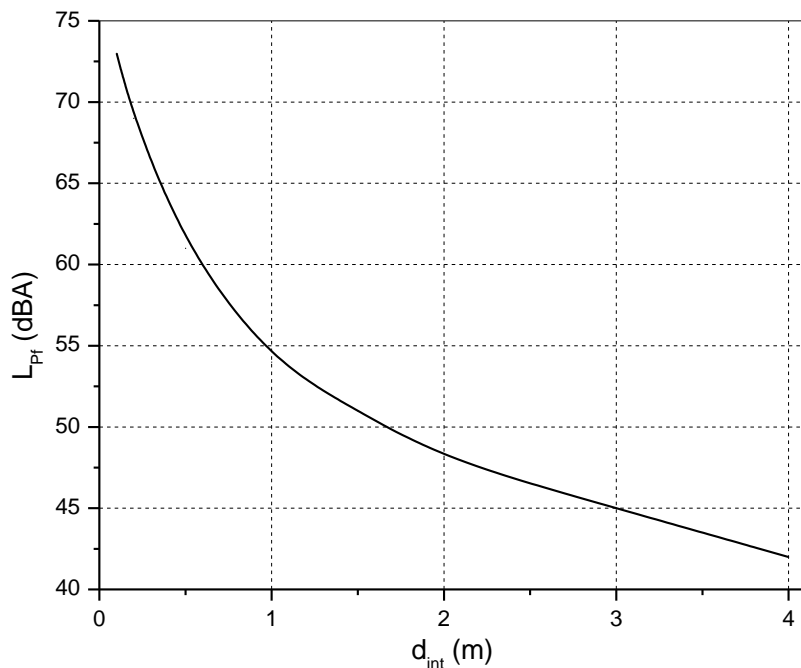


Fig. 5: Interferencia del ruido de fondo en la comunicación.

Ejemplo 24: Dos personas, que se encuentran a 2,0 m de distancia una de la otra, están conversando.

1. ¿Cuál debe ser el nivel de presión sonora del ruido de fondo máximo para que no tengan ninguna dificultad para entenderse?
2. ¿Cuál es el nivel de presión sonora con que estas personas deben conversar, si se encuentran en un lugar donde el ruido de fondo es de 55 dBA.

1. Interpolado en la gráfica de la Figura 5, se obtiene que si las personas se encuentran a 2,0 m de distancia una de la otra, el nivel de presión sonora del ruido de fondo no debe exceder los 48 dBA.

2. Para que una conversación sea fácilmente inteligible, la voz debe estar 15 dBA por arriba del fondo. Significa que, en nuestro caso, las personas tendrán que elevar la voz hasta un nivel de presión sonora de:

$$55 \text{ dBA} + 15 \text{ dbA} = 70 \text{ dBA}$$

Ejemplo 25: ¿A qué frecuencia ocurre la mayoría de las comunicaciones entre los elefantes?

La mayoría de las comunicaciones entre los elefantes ocurre en el rango de los infrasonidos, con frecuencias entre 15 Hz y 40 Hz.

7. MEDICIÓN DEL RUIDO

Desde el punto vista fisiológico, el sonido es el resultado de las variaciones de presión en el aire que inciden sobre el tímpano. El oído medio amplifica estas señales y el oído interno las transforma en señales eléctricas, que se interpretan en el cerebro como “sonido”.

La presión atmosférica media es de $101\,325 \text{ N/m}^2$ (760 mm de elevación en una columna de mercurio). Un martillo neumático varía la presión respecto a la atmósfera en $6,32 \text{ N/m}^2$, mientras que la conversación normal produce tan sólo una variación de $0,020 \text{ N/m}^2$. Estas pequeñas variaciones instantáneas de presión, producidas por el aire que expulsamos por la boca, son las que nuestro oído interpreta como sonido de la voz.

7.1. Presión Sonora

La presión sonora (presión acústica) se mide en Pascal ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$). El campo auditivo del ser humano está entre $0,000\,01 \text{ Pa}$ y 100 Pa . Esto implica un rango muy grande que abarca 7 órdenes de magnitud (10^7).

En un ambiente tranquilo en el campo, la presión sonora está alrededor de $0,000\,1 \text{ Pa}$; el paso de un camión produce una presión sonora de $0,45 \text{ Pa}$, mientras que el despegue de un avión a reactor genera $23,7 \text{ Pa}$. Debido a estas grandes variaciones en el orden de magnitud de la presión sonora, es más práctico utilizar escalas logarítmicas que simplifican el manejo de esta magnitud y que se adaptan bien a la manera como funciona nuestro oído.

El logaritmo de base diez de un número es el valor de la potencia con que se debe elevar el 10 para que dé como resultado dicho número (Tabla 6). Así, cuando una cantidad se incrementa 10 veces, su logaritmo aumenta en una unidad.

Valor	1	10	100	1 000	10 000	100 000
Potencia	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5
Logaritmo	0	1	2	3	4	5

Tabla 6. Relación entre la potencia y su logaritmo

7.2. Nivel de Presión Sonora

El nivel de presión sonora (L_p) es el logaritmo del cociente de la presión sonora (p) al cuadrado entre una presión de referencia (p_r) al cuadrado. Es decir, determina la intensidad del sonido que percibe una persona debido a una presión sonora instantánea p . La unidad de medición del nivel de presión sonora es el Bel (B), en honor al inventor escocés Alexander Graham Bell.

$$L_p = \log\left(\frac{p^2}{p_r^2}\right) \text{ B}$$

Por lo tanto, el nivel de presión sonora medido en decibelio (dB) será,

$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{p^2}{p_r^2}\right) \text{ dB}$$

$$\boxed{L_p = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_r}\right) \text{ dB}} \quad (4)$$

Donde $p_r = 2,0 \times 10^{-5}$ Pa es la presión de referencia y es la mínima presión que puede detectar el oído humano. De esta forma, no se tienen que usar decibelios negativos y se hace coincidir el umbral de audición en “0 dB”,

En la Tabla 7 se presentan diversos valores de presión sonora y el nivel de presión sonora que resulta al utilizar la ecuación 4.

Presión sonora (Pa)	L_p (dB)	Comentario
63,20	130	Más allá del dolor
20,00	120	Umbral del dolor
6,32	110	Martillo neumático a 1 m
2,00	100	Prensas de estampación
0,63	90	Orquesta sinfónica
0,20	80	Calle de mucho tráfico
0,063 2	70	Interior de un vehículo
0,020 0	60	Conversación a 1 m
0,006 3	50	Ruido de fondo de oficina
0,002 0	40	Sala de estar
0,000 63	30	Dormitorio
0,000 20	20	Estudio de grabación
0,000 063	10	Laboratorio de acústica
0,000 020	0	Umbral de audición

Tabla 7. Relación entre la presión sonora y el nivel de presión sonora.

Como la onda de presión se puede expresar a través de una función senoidal, la presión “p” que aparece en la ecuación 4 debe representar la presión cuadrática media (p_{rms}) de la onda. Para encontrar una expresión de este valor, considera una onda de presión p que se desplaza a lo largo del espacio (X) y el tiempo (t), dada por la expresión

$$p = p_0 \cdot \text{sen}2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{X}{\lambda}\right)$$

Donde: p_0 = la amplitud máxima de la onda de presión.

T = el periodo de la onda.

λ = la longitud de onda de la onda de presión.

El valor cuadrático medio (P_{rms}) es el valor medio ponderado en el tiempo que afectará a una superficie en la que incida la onda de presión. Para una función continua de periodo T, el valor cuadrático medio está definido como:

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 \cdot dt}$$

Si elevando al cuadrado ambos miembros,

$$p_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p^2 \cdot dt$$

Sustituyendo la ecuación de la presión en la expresión anterior,

$$p_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p_0^2 \text{sen}^2 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{X}{\lambda} \right) \cdot dt$$

$$p_{\text{rms}}^2 = \frac{p_0^2}{T} \int_0^T \text{sen}^2 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{X}{\lambda} \right) \cdot dt$$

Haciendo: $u = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{X}{\lambda} \right) \Rightarrow du = \frac{2\pi}{T} \cdot dt \Rightarrow dt = \frac{T}{2\pi} \cdot du$

Sustituimos estas nuevas variables en la expresión para p_{rms}^2 , tenemos:

$$p_{\text{rms}}^2 = \frac{p_0^2}{2\pi} \int_0^T \text{sen}^2 u \cdot du$$

Resolviendo esta integral: $p_{\text{rms}}^2 = \frac{p_0^2}{2\pi} \left[\frac{1}{2} u - \frac{1}{4} \text{sen} 2u \right]_0^T$

$$p_{\text{rms}}^2 = \frac{p_0^2}{T} \left[\frac{1}{2} \left\{ 2\pi \left(1 - \frac{X}{\lambda} \right) - 2\pi \left(-\frac{X}{\lambda} \right) \right\} - \frac{1}{4} \left\{ \text{sen} 2 \left(2\pi \left(1 - \frac{X}{\lambda} \right) \right) - \text{sen} 2 \left(2\pi \left(-\frac{X}{\lambda} \right) \right) \right\} \right]$$

$$p_{\text{rms}}^2 = \frac{p_0^2}{2\pi} [\pi - 0]$$

$$\boxed{p_{\text{rms}} = \frac{p_0}{\sqrt{2}}} \quad (5)$$

Esto significa que la media cuadrática de la función de presión es igual al valor máximo de la presión dividida por la raíz cuadrada de 2. De aquí que el nivel de presión sonora dado por la ecuación 4, se puede reescribir como:

$$\boxed{L_p = 20 \cdot \log \left(\frac{p_{\text{rms}}}{p_r} \right)} \quad (6)$$

El nivel de presión sonora, o nivel sonoro, expresa el nivel de sonido en un punto concreto a cierta distancia de la fuente y en un ambiente de determinadas características acústicas.

Siempre que se mide o se especifica un nivel de presión sonora debe indicarse la distancia a la fuente sonora y/o las características del entorno de medición, para que los datos tengan significado.

Ejemplo 26: Una onda sonora de presión tiene un valor cuadrático medio de 1,0 Pa. Determina el nivel de presión sonora de la onda.

Utilizando la ecuación 6, resulta:

$$L_p = 20 \cdot \log\left(\frac{p_{rms}}{p_r}\right)$$
$$L_p = 20 \cdot \log\left(\frac{1,0}{2,0 \times 10^{-5}}\right) = 94 \text{ dB}$$

Ejemplo 27: Al medir el nivel de presión sonora, a 5,0 m de distancia de una fuente, resultó igual a 45 dB. ¿Cuál fue el nivel de presión cuadrática media que detectó el sonómetro?

Despejando la presión cuadrática media (p_{rms}) de la ecuación 6, se tiene:

$$L_p = 20 \cdot \log\left(\frac{p_{rms}}{p_r}\right)$$
$$p_{rms} = p_r \cdot 10^{\left(\frac{L_p}{20}\right)}$$
$$p_{rms} = (2,0 \times 10^{-5}) \cdot 10^{\left(\frac{45}{20}\right)} = 0,003 \text{ 6 Pa}$$

Ejemplo 28: ¿Cuál es el nivel de presión sonora, medido a 1,0 m de distancia, que una persona puede alcanzar gritando?

El nivel de presión sonora a 1,0 metro de distancia que una persona puede alcanzar gritando, está alrededor de 85 dB.

7.3. Potencia Sonora y Nivel de Potencia Sonora

La potencia sonora (W) o también denominada potencia acústica, es la energía sonora que puede irradiar una determinada fuente sonora. La potencia sonora de una fuente se

mide en Watt (W), y es el parámetro que se mide en el laboratorio bajo condiciones específicas. El Nivel de Potencia Sonora (L_w) se calcula de la manera siguiente:

$$L_w = \log\left(\frac{W}{W_r}\right) \text{ B}$$

Donde: $W_r = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W}$ es la potencia de referencia.

Por las mismas razones argumentadas para la presión sonora (valores muy bajos y extensos), se utiliza la unidad de decibelios para medir el nivel de potencia sonora. Por lo tanto, el nivel de potencia sonora medido en decibelios (dB) será:

$$L_w = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{W_r}\right) \text{ dB} \quad (7)$$

La potencia sonora es un valor intrínseco de la fuente y no depende del recinto en donde se encuentre la fuente de sonido. La percepción que tiene el oído humano de la potencia sonora es lo que denominamos volumen.

En la Tabla 8 se presentan diversos valores de potencia sonora y el nivel de potencia sonora que resulta al utilizar la ecuación 7.

Potencia sonora, W (W)	L_w (dB)	Comentario
10 000	160	Avión turborreactor
1 000	150	
100	140	Aeroplano en vuelo
10	130	Orquesta de 75 músicos
1	120	Martillo neumático
0,1	110	Vehículo en autopista
0,01	100	Motor de 75 kW
0,001	90	Voz gritando
0,000 1	80	Aspiradora
0,000 01	70	Cantante (a 1 m)
0,000 001	60	Conversación normal
0,000 000 1	50	Calle tranquila
0,000 000 01	40	Voz cuchicheando

Tabla 8. Relación entre la potencia sonora y el nivel de potencia sonora.

Ejemplo 29: Una fuente sonora emite con una potencia sonora de $6,0 \times 10^{-3} \text{ W}$. Determina el nivel de potencia sonora de la fuente a 15 m de distancia.

El nivel de potencia acústica no depende de la distancia de la fuente, es una propiedad intrínseca de ella. Utilizando la ecuación 7, tenemos:

$$L_w = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{W_r}\right)$$

$$L_w = 10 \cdot \log\left(\frac{6,0 \times 10^{-3}}{1,0 \times 10^{-12}}\right) = 97 \text{ dB}$$

7.4. Intensidad Sonora y Nivel de Intensidad Sonora

La intensidad sonora es una propiedad que se relaciona con la energía que transporta la onda sonora. Fisiológicamente, la intensidad sonora para una persona es la magnitud sensorial llamada volumen del sonido. En términos generales, la intensidad de una onda (I) en un punto es la cantidad de energía que atraviesa perpendicularmente la superficie unitaria situada en dicho punto, por unidad de tiempo. Si una fuente puntual emite durante un tiempo “t” ondas con energía E, la intensidad de la onda a la distancia “r” es igual a:

$$I = \frac{E}{S \cdot t} = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (8)$$

Donde: I = Intensidad sonora de la onda (W/m^2).

W = la potencia que atraviesa la superficie ($W = E/t$).

S = la superficie perpendicular que es atravesada por la onda (para una onda esférica $S = 4\pi r^2$).

Por lo tanto, el cociente entre las intensidades de dos frentes de ondas situadas a distancias distintas (r_1 y r_2) de la fuente generadora, es igual a:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W/S_1}{W/S_2} = \frac{4\pi r_2^2}{4\pi r_1^2}$$

$$\boxed{\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}} \quad (9)$$

De esto se concluye que la intensidad de una onda disminuye a medida que la onda se propaga; o lo que es lo mismo, que la intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente emisora.

Ejemplo 30: Si la intensidad sonora de una fuente puntual a 5,0 m de distancia es $2,0 \times 10^{-6} W/m^2$. ¿Cuál será la intensidad sonora a 400 m de la fuente?

Despejando la intensidad sonora I_2 de la ecuación 9, se tiene:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

$$I_2 = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 I_1 = \left(\frac{5,0}{400}\right)^2 (2,0 \times 10^{-6}) = 3,1 \times 10^{-10} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

La intensidad de una onda también disminuye cuando atraviesa un medio material. Esta disminución depende de la intensidad incidente de la onda (I_0), del espesor del medio (ΔX) y de las características del medio. La constante que caracteriza al medio que hace disminuir la onda que lo atraviesa recibe el nombre de **coeficiente de absorción** (β), y la expresión que describe la forma como la intensidad de una onda decrece con el espesor del medio está dada por la siguiente función exponencial:

$$\boxed{I = I_0 \cdot \exp(-\beta \cdot \Delta X)} \quad (10)$$

Ejemplo 31: Si un material reduce la intensidad de la onda sonora que lo atraviesa en un quinto y su espesor es de 30,0 cm, ¿cuál es el coeficiente de absorción de este material?

Despejando el coeficiente de absorción de la ecuación 10, se tiene:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\beta \cdot \Delta X)$$

$$\beta = -\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\Delta X} = -\frac{\ln\left(\frac{1}{5}\right)}{0,300} = 5,36 \text{ m}^{-1}$$

El sonido más débil que puede detectar el oído de un ser humano tiene una intensidad sonora de $I_r = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ ($1,0 \times 10^{-16} \text{ W/cm}^2$); mientras que la intensidad sonora que puede experimentar una persona sin experimentar dolor es de $1,0 \text{ W/m}^2$ ($1,0 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$). Debido al amplio intervalo que puede percibir el oído (10^{12}), se ha definido una escala relativa logarítmica que da la intensidad sonora con relación a la intensidad mínima que podemos captar. Esta nueva variable recibe el nombre de **nivel de intensidad sonora** (L_I), su unidad es el Bel (B) y se define como:

$$L_I = \log\left(\frac{I}{I_r}\right) \text{ B}$$

Como los valores de los niveles de intensidad sonora resultan bajos para sonidos ambientales (entre 63 Hz y 4 000 Hz), se acostumbra a trabajar con un submúltiplo del

Bel que es el decibel (dB). De esta forma, el nivel de intensidad sonora en decibel se define como:

$$L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_r}\right) \text{ dB} \quad (11)$$

Mientras el oído humano es sensible a las variaciones de intensidad sonora, los sonómetros responden a las variaciones de presión.

Ejemplo 32: Una bocina emite ondas sonoras con potencia de 100 W. Determina si una persona, situada a 2,5 m de la bocina, siente dolor debido a la onda sonora.

Utilizando la ecuación 8, obtenemos:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{100}{4\pi(2,5 \times 10^2)^2} = 1,3 \times 10^{-4} \frac{W}{\text{cm}^2}$$

Esto significa que la persona sí siente dolor al situarse a 2,5 m de la bocina, ya que el límite superior que puede soportar el oído humano sin molestias es $1,00 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$.

Ejemplo 33: Si el nivel de intensidad sonora que incide sobre una pared de 15 m^2 es de 100 dB, ¿cuál es la fuerza que ejercen las ondas sonoras, perpendicular a la superficie de la pared?

Despejando la intensidad sonora de la ecuación 11,

$$L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_r}\right) \text{ dB}$$

$$I = I_r \cdot 10^{\left(\frac{L_I}{10}\right)} = (1,0 \times 10^{-12}) \cdot 10^{\frac{100}{10}} = 0,010 \frac{W}{\text{m}^2}$$

Utilizando la ecuación 8 y considerando que la potencia W es igual a la fuerza ejercida por la rapidez del sonido V , podemos escribir que:

$$I = \frac{W}{S} = \frac{F \cdot V}{S}$$

$$F = \frac{S \cdot I}{V} = \frac{(15)(0,010)}{347} = 4,3 \times 10^{-4} \text{ N}$$

Ejemplo 34: Sobre una superficie de $3,14 \text{ cm}^2$ de agua contenida en una probeta, incide una onda sonora de nivel de intensidad de 110 dB. Si la masa del agua es 1,00 g, determina el tiempo que se tarda para elevar la temperatura del agua $1,00 \text{ }^\circ\text{C}$.

Partiendo de la ecuación 11, se tiene que:

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_r} \right)$$

$$I = I_r \cdot 10^{\frac{L_I}{10}} = (1,0 \times 10^{-12}) \cdot \left(10^{\frac{110}{10}} \right) = 0,100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Despejando el tiempo de la ecuación 8, se obtiene que:

$$I = \frac{E}{S \cdot t}$$

$$t = \frac{E}{S \cdot I}$$

En vista de que el calor específico del agua es $4,187 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$ y que la masa del agua es 1,00 g, la energía necesaria para elevar la temperatura $1,00 ^\circ\text{C}$ es: $E = 4,187 \text{ J}$. Reemplazando este valor en la ecuación anterior, se tiene que el tiempo requerido es:

$$t = \frac{E}{S \cdot I} = \frac{4,187}{(3,14 \times 10^{-4})(0,100)} = 1,33 \times 10^5 \text{ s} = 1,54 \text{ días}$$

Ejemplo 35: ¿Cuál es el nivel de intensidad sonora de una onda acústica cuya intensidad es de $5,0 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$?

Utilizando la ecuación 11, tenemos que el nivel de intensidad sonora es:

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_r} \right) = 10 \log \left(\frac{5,0 \times 10^{-6}}{1,00 \times 10^{-12}} \right) = 67 \text{ dB}$$

Ejemplo 36: El nivel de intensidad sonora que se mide en una residencia es de 70 dB. Si después de colocar una pantalla acústica el nivel de intensidad sonora es de 60 dB, determina el factor de disminución porcentual de la intensidad sonora inicial ($f\%$).

Utilizando la ecuación 11, se tiene:

$$L_{I-70} = 10 \cdot \log \left(\frac{I_{70}}{I_r} \right) = 70 \text{ dBA} \quad , \quad L_{I-60} = 10 \cdot \log \left(\frac{I_{60}}{I_r} \right) = 60 \text{ dBA}$$

$$L_{I-60} - L_{I-70} = 60 - 70 = 10 \cdot \log \left(\frac{I_{60}}{I_r} \right) - 10 \cdot \log \left(\frac{I_{70}}{I_r} \right)$$

$$10 \cdot \log\left(\frac{I_{60}}{I_r}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{I_{70}}{I_r}\right) = -10$$

$$\log(I_{60}) - \log(I_r) - \log(I_{70}) + \log(I_r) = -1$$

$$\log\left(\frac{I_{60}}{I_{70}}\right) = -1$$

$$\left(\frac{I_{60}}{I_{70}}\right) = 10^{-1} = 0,1$$

Por consiguiente, el factor de disminución porcentual de la intensidad inicial es:

$$f_{\%} = [1,0 - 0,1] \cdot 100 = 90 \%$$

7.5. Relación entre el Nivel de Potencia Sonora y el Nivel de Intensidad Sonora

La intensidad sonora (I) en una dirección determinada y en punto específico es igual al flujo de energía por unidad área, siendo la unidad de área perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

Si la fuente sonora es puntual y equidireccional y emite con una potencia sonora W, irradiará en forma esférica: Si llamamos “S” la superficie de esta esfera y “r” a la distancia a la fuente, la intensidad sonora varía con el cuadrado de la distancia a través de la siguiente expresión:

$$I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad W/m^2$$

Por lo tanto el nivel de intensidad sonora es,

$$L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_r}\right)$$

Donde la intensidad sonora de referencia I_r es igual a $1,0 \text{ pW/m}^2$.

Sabiendo que la potencia sonora y la intensidad sonora están relacionadas a través de la siguiente expresión,

$$W = I \cdot S$$

Si dividimos ambos términos por I_r ,

$$\frac{W}{I_r} = \left(\frac{I}{I_r}\right) S$$

Aplicamos el logaritmo de base 10 a ambos términos,

$$\log\left(\frac{W}{I_r}\right) = \log\left(\frac{I}{I_r}\right) + \log(S)$$

Multiplicamos por 10, $10 \cdot \log\left(\frac{W}{I_r}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_r}\right) + 10 \cdot \log(S)$

Como para 1 m^2 , $W_r = I_r$, entonces,

$$10 \cdot \log\left(\frac{W}{W_r}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_r}\right) + 10 \cdot \log(S)$$

$$\boxed{L_w = L_I + 10 \cdot \log(S)} \quad (12)$$

Ejemplo 37: Determina la potencia sonora que irradia al exterior el hueco de un extractor de 40 cm de diámetro, situado en la pared de un edificio, si en las proximidades de extractor el nivel de intensidad sonora es de 90 dB.

Utilizando la ecuación 12, tenemos:

$$L_w = L_I + 10 \cdot \log(S)$$

$$L_w = 90 + 10 \cdot \log\left(\frac{\pi[0,40]^2}{4}\right) = 81 \text{ dB}$$

8. PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS

El sonido se propaga a una rapidez de 348 m/s y en el agua a unos 1 488 m/s. Cuando una onda sonora viaja a través de un gas, la rapidez de la onda que transporta la energía de la perturbación (en m/s), es igual a:

$$\boxed{V = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}} \quad (13)$$

Donde: γ = Coeficiente adiabático del gas (para el aire $\gamma = 1,400$).

$$R = \text{Constante de los gases} \left(8,315 = \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right).$$

T = Temperatura del gas (K).

M = Masa molecular del gas (para el aire $M = 2,888 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$).

Cuando una onda sonora viaja a través de un líquido, la rapidez de la onda que transporta la energía de la perturbación (en m/s), es igual a:

$$V = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (14)$$

Donde: K = Módulo de compresibilidad del líquido (para el agua $K = 2,21 \times 10^9 \text{ N/m}^2$).
 ρ = Densidad volumétrica del líquido (para el agua $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$).

Cuando el sonido viaja a través de un sólido, su rapidez de propagación (en m/s) es igual a:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (15)$$

Donde: E = Módulo de Young, también denominado Módulo Elástico (N/m^2).
 ρ = Densidad del sólido (kg/m^3).

La manera en que se propagan las ondas depende de la relación entre el tamaño de la fuente y la longitud de onda.

Se pueden tener ondas planas o direccionales cuando:

- La fuente es grande en relación a la longitud de onda.
- Estamos situados cerca de una fuente de gran tamaño.
- La fuente emite ondas con longitud de ondas pequeñas.
- La fuente emite ondas con frecuencias altas.

Se pueden tener ondas esféricas u omnidireccionales cuando:

- La fuente es pequeña en relación a la longitud de onda.
- Estamos situados lejos de una fuente de pequeño tamaño.
- La fuente emite ondas con longitud de ondas grandes.
- La fuente emite ondas con frecuencias bajas.

Ejemplo 38: Determina a qué temperatura fue calculada la rapidez de propagación del sonido de 348 m/s en el aire.

Despejado la temperatura de la ecuación 13, se tiene:

$$V = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

$$T = \frac{V^2 \cdot M}{\gamma \cdot R} = \frac{(348)^2 (2,888 \times 10^{-2})}{(1,400)(8,315)} = 300 \text{ K} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$$

8.1. Reflexión

Cuando una onda sonora llega a la superficie de separación de dos medios distintos, parte de ella puede regresar al mismo medio cambiando su dirección de propagación (onda reflejada) y parte de ella puede pasar al segundo medio (onda refractada). Analicemos el fenómeno de la reflexión.

Considera una onda plana que se desplaza con una rapidez V y choca contra una superficie plana (Figura 6). Como el medio es el mismo antes y después del cambio de dirección del desplazamiento, la rapidez de propagación va a ser la misma.

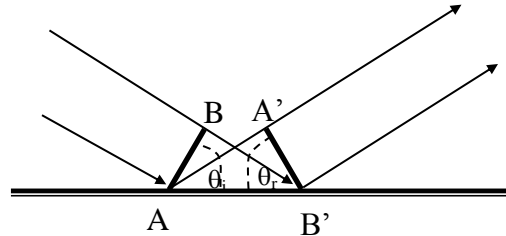


Fig. 6. Reflexión de onda plana.

Debido a que cuando el frente de la onda incidente está en la posición AB , el punto B continuará desplazándose hacia B' , mientras que el punto A se convierte en foco emisor y se ha desplazado hasta A' . La distancia recorrida BB' es igual a la distancia recorrida AA' .

En vista de que el triángulo ABB' es igual al triángulo $AA'B'$, y como $BB' = AA'$, se cumple que:

$$\frac{BB'}{AB'} = \frac{AA'}{AB'}$$

Por lo que,

$$\text{sen} \theta_i = \text{sen} \theta_r$$

$$\boxed{\theta_i = \theta_r} \tag{16}$$

Esto significa que el ángulo que forma el frente de la onda incidente con la superficie reflectora (θ_i) y el ángulo que forma el frente de la onda reflejada con la superficie reflectora (θ_r) son iguales. Además, los rayos incidentes, los reflejados y las normales a la superficie en los puntos de incidencia están en el mismo plano. Esto significa que, en las superficies grandes y planas, el sonido se refleja de forma que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

La Ley de Reflexión provoca que en las superficies cóncavas las ondas sonoras tiendan a concentrarse y en las superficies convexas las ondas tiendan a dispersarse. En recintos cerrados, el sonido que percibe una persona es producto del sonido directo recibido y de las ondas reflejadas en las paredes, techo, suelo y mobiliario. Dependiendo de la

absorción del sonido por las superficies del recinto, las reflexiones tendrán mayor o menor afectación sobre el sonido directo.

Cuando una onda sonora incide sobre un obstáculo pequeño en comparación con su longitud de onda, la onda se curva y rodea el obstáculo, es decir, se difracta. Si el obstáculo es grande con relación a la longitud de onda del sonido, éste se refleja sobre la superficie del objeto.

Ejemplo 39: Mencione tres fenómenos acústicos relacionados con la reflexión.

Tres fenómenos acústicos asociados a la reflexión son:

Las ondas estacionarias: Se producen cuando una onda se superpone a su onda reflejada en una misma dirección. Esto producirá que se tengan lugares en donde la amplitud del sonido aumente y en otros disminuya.

El eco: Se produce cuando las ondas reflejadas llegan al receptor después que la señal acústica original se ha extinguido.

La reverberación: Se produce cuando las ondas reflejadas llegan al receptor antes que la señal acústica original se haya extinguido.

8.1.1. Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación es el tiempo necesario para que el nivel de intensidad sonora se atenúe 60 dB por debajo del valor inicial del sonido. La medición se realiza emitiendo un sonido impulsivo y registrando la disminución del nivel sonoro con el tiempo. Este parámetro es importante si se desea que un recinto tenga buen nivel de inteligibilidad.

El tiempo de reverberación depende de la frecuencia del sonido, el volumen del recinto y los coeficientes de absorción de sus superficies. Si no se puede medir el tiempo de reverberación, se puede calcular utilizando la Fórmula de Sabine:

$$T_r = 0,161 \left(\frac{v}{\sum (\alpha_i S_i)} \right) \quad (17)$$

Donde: T_r = Tiempo de reverberación (s).

v = Volumen de la sala (m^3).

S = La superficie de las paredes y objetos presentes en el recinto (m^2).

α = coeficiente de absorción de cada material presente (es la fracción de la energía incidente que absorbe la superficie).

Para que la sonoridad de un recinto sea óptima, el tiempo de reverberación no debe ser ni tan corto ni tan prolongado, esto dependerá del uso que se le vaya a dar al recinto. Por

ejemplo, para una sala de conferencia el tiempo de reverberación debe estar entre 0,4 s y 1,0 s; mientras que para salas de orquestas de cámara o sinfónicas el tiempo de reverberación debe estar entre 1,0 s y 1,5 s.

Ejemplo 40: Considere un recinto de 5,0 m de ancho, 8,0 m de largo y 3,0 m de alto. Si el coeficiente de absorción de las paredes es 0,16, el del piso es de 0,11 y el del cielorraso es 0,50, ¿cuál es el tiempo de reverberación de la sala?

Aplicando la ecuación 17, resulta:

$$T_r = 0,161 \left(\frac{v}{\sum (\alpha_i S_i)} \right)$$

$$T_r = 0,161 \left(\frac{v}{\alpha_{\text{paredes}} S_{\text{paredes}} + \alpha_{\text{piso}} S_{\text{piso}} + \alpha_{\text{cielomaso}} S_{\text{cielomaso}}} \right)$$

$$T_r = 0,161 \left(\frac{(5,0)(8,0)(3,0)}{(0,16)(78) + (0,11)(40) + (0,50)(40)} \right) = 0,52 \text{ s}$$

8.2. Atenuación del Sonido

La atenuación del sonido es la pérdida o distribución de energía que sufren las ondas acústicas al propagarse en un medio. La atenuación de las ondas sonoras depende de la distancia y los obstáculos que existan de la fuente al receptor, de la forma de la fuente y de los parámetros meteorológicos.

8.2.1. Atenuación con la distancia

La intensidad sonora es el valor medio ponderado en el tiempo de la función flujo de potencia instantánea por unidad de área (i). Es decir:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i \cdot dt$$

Como la potencia instantánea por unidad de área se puede escribir en función de la energía cinética instantánea de la onda sonora (E), se tiene que:

$$i = \left(\frac{1}{S} \right) \left[\frac{dE}{dt} \right] = \left(\frac{1}{S} \right) \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} m \cdot v^2 \right] = \left(\frac{1}{S} \right) \frac{1}{2} \frac{d}{dt} [mv \cdot v] = \left(\frac{1}{S} \right) \frac{1}{2} \left[2 \frac{d}{dt} [mv] \right] \cdot v$$

En donde v es la rapidez instantánea de la onda y $\frac{d}{dt} [mv]$ es la fuerza instantánea (F) que se ejerce sobre la superficie S . De aquí que la ecuación anterior la podemos escribir como:

$$i = \left(\frac{1}{S}\right) F \cdot v = \left(\frac{F}{S}\right) \cdot v$$

Como $\left(\frac{F}{S}\right)$ es la presión instantánea (p) que ejerce la onda sonora, podemos escribir que la función flujo de potencia instantánea por unidad de área es igual al producto de la presión instantánea por la rapidez instantánea de la onda, es decir:

$$i = p \cdot v$$

Remplazando esta ecuación, en la de expresión de la intensidad sonora, tenemos:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T (p \cdot v) \cdot dt \quad (18)$$

Para el caso de una onda plana, o cuando la distancia de la fuente sonora puntual es grande, la amplitud de la onda viajera (Y) está dada por:

$$Y = Y_0 \cos(\omega t - kX) \quad (19)$$

Donde: Y_0 = la amplitud de la onda sonora.

k = el número de onda ($k = \omega/V$)

ω = la frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$)

De aquí que la rapidez instantánea de la onda será igual a:

$$v = \frac{dY}{dt} = -\omega Y_0 \sin(\omega t - kX) \quad (20)$$

En vista de que la presión de una onda se puede escribir como:

$$p = \rho \cdot V^2 \frac{dY}{dX} \quad (21)$$

Donde ρ es la densidad del medio y “ V ” es la rapidez de propagación de la onda en el medio. Si derivamos parcialmente la ecuación 19 con respecto a la posición, resulta:

$$\frac{\partial Y}{\partial X} = -Y_0 k \cdot \sin(\omega t - kX)$$

Sustituyendo en la ecuación 21, se tiene que:

$$\begin{aligned} p &= \rho \cdot V^2 [-Y_0 k \cdot \sin(\omega t - kX)] \\ p &= -\rho V \omega Y_0 \cdot \sin(\omega t - kX) \end{aligned} \quad (22)$$

Remplazando las ecuaciones 20 y 22 en la ecuación 18, tenemos que:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T [\rho V \omega Y_0 \sin(\omega t - kX)] \cdot [-\omega Y_0 \sin(\omega t - kX)] \cdot dt$$

$$I = \frac{\rho V \omega^2 Y_0^2}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t - kX) \cdot dt \quad (23)$$

Haciendo los siguientes cambios de variables:

$$u = (\omega t - kX) \quad \Rightarrow \quad du = \omega t \quad \Rightarrow \quad dt = \frac{du}{\omega}$$

Reemplazando en la ecuación 23 e integrando, tenemos:

$$I = \frac{\rho V \omega Y_0^2}{T} \int_0^T \sin^2 u \cdot du$$

$$I = \frac{\rho V \omega Y_0^2}{T} \left[\frac{1}{2} u - \frac{1}{4} \sin(2u) \right]_0^T$$

Como la integral de la función seno para un periodo completo es cero, resulta que:

$$I = \frac{\rho V \omega Y_0^2}{T} \left[\frac{1}{2} u \right]_0^T$$

Volviendo a la variable original:

$$I = \frac{\rho V \omega Y_0^2}{T} \left[\frac{1}{2} ((\omega T - kX) - (-kX)) \right] = \frac{\rho V \omega^2 T Y_0^2}{2T}$$

$$I = \rho V \omega^2 Y_0^2 \quad (24)$$

Recordando la expresión de la presión instantánea dada por la ecuación 22:

$$p = -\rho V \omega Y_0 \sin(\omega t - kX)$$

Como esta expresión debe poderse expresar de la forma:

$$p = p_0 \sin(\omega t - kX)$$

Por consiguiente, la amplitud p_0 (valor máximo) de la función onda de presión, es igual a:

$$p_0 = -\rho V \omega Y_0$$

Si elevamos al cuadrado ambos términos de la ecuación anterior, resulta que:

$$\rho V \omega^2 Y_0^2 = \frac{p_0^2}{2\rho V}$$

Remplazando esta expresión en la ecuación 24,

$$I = \frac{p_0^2}{2\rho V} \quad (25)$$

Despejando $\frac{p_0^2}{2}$ de la ecuación 5,

$$p_{\text{rms}} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} \quad \Rightarrow \quad \frac{p_0^2}{2} = p_{\text{rms}}^2$$

Reemplazando esta última expresión en la ecuación 25, tenemos finalmente que la intensidad sonora se puede expresar en función del valor cuadrático medio así:

$$\boxed{I = \frac{p_{\text{rms}}^2}{\rho V}} \quad (26)$$

Ejemplo 41: Una onda sonora de presión tiene un valor cuadrático medio de 1,0 Pa. Determina el nivel de presión sonora de la onda. Si la temperatura es de 27 °C, determina la intensidad sonora de la onda.

A partir de la ecuación 26, y sabiendo que a 27 °C la rapidez de propagación del sonido es 348 m/s y la densidad del aire es 1,20 kg/m³, resulta:

$$I = \frac{p_{\text{rms}}^2}{\rho V}$$
$$I = \frac{(1,0)^2}{(1,20)(348)} = 2,4 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

- **Fuente puntual que irradia en forma esférica**

Consideremos una fuente de sonido puntual que emite con una potencia W . A una distancia “ r ” de la fuente, la potencia sonora estará distribuida sobre la superficie de una esfera (S). Para determinar la dependencia del nivel de presión sonora (L_p) con el nivel de potencia sonora (L_w) y la distancia a la fuente (r), igualemos la ecuación 8 con la ecuación 26. De donde resulta:

$$\frac{W}{S} = \frac{p_{\text{rms}}^2}{\rho V}$$
$$p_{\text{rms}}^2 = \frac{\rho V W}{S}$$

Remplazando esta expresión en la ecuación 6, tenemos:

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

$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{p_{rms}^2}{p_r^2}\right)$$

$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{\rho V W}{S \cdot p_r^2}\right)$$

Dividiendo ambos términos a lo interno del logaritmo por la potencia de referencia W_r , se tiene:

$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{\frac{\rho V W}{W_r}}{\frac{S \cdot p_r^2}{W_r}}\right)$$

$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{W_r}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{S \cdot p_r^2}{\rho V W_r}\right)$$

Recordando la expresión para el nivel de potencia sonora dado por la ecuación 7, resulta:

$$L_p = L_w - 10 \cdot \log\left(\frac{S \cdot p_r^2}{\rho V W_r}\right) \quad (27)$$

En vista de que, para una fuente sonora puntual, la onda se propagará en forma esférica, la superficie en donde se distribuye la potencia sonora es: $S = 4\pi r^2$. De aquí que la expresión anterior se pueda escribir como:

$$L_p = L_w - 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi r^2 \cdot p_r^2}{\rho V W_r}\right)$$

$$L_p = L_w - 10 \cdot \log(r^2) - 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi p_r^2}{\rho V W_r}\right)$$

$$L_p = L_w - 20 \cdot \log(r) - 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi p_r^2}{\rho V W_r}\right)$$

Considerando las condiciones de temperatura de 27 °C y presión atmosférica de $1,013 \times 10^5$ Pa, la rapidez del sonido en el aire es de 348 m/s y la densidad del aire es de

1,20 kg/m³, y si sustituimos los valores de referencia para la presión sonora y la potencia sonora, la expresión anterior la podemos escribir como:

$$\boxed{L_p = L_w - 20 \cdot \log(r) - 10,8} \quad (28)$$

Esta es la expresión de la dependencia del nivel de presión sonora (L_p) con la distancia (r), para una fuente sonora puntual y omnidireccional de potencia sonora L_w que irradia sonido libremente en un espacio abierto (como un avión en vuelo).

Ejemplo 42: Se tiene un altavoz esférico (fuente puntual) suspendido por cables en el aire en un terreno abierto. Si el nivel de potencia sonora de la bocina es de 90 dB, ¿cuál es el nivel de presión sonora a 15 m de distancia de la bocina?

Utilizando la ecuación 28, resulta:

$$L_p = L_w - 20 \cdot \log(r) - 10,8$$

$$L_p = 90 - 20 \cdot \log(15) - 10,8 = 56 \text{ dB}$$

• **Fuente puntual que irradia en forma de semiesfera**

En caso de que la fuente sonora puntual se encuentre sobre el suelo (superficie reflectora), toda la energía se distribuye en una semiesfera, por lo que el valor de la superficie en donde se distribuye la energía sonora será igual a: $S = 4\pi r^2/2 = 2\pi r^2$. Remplazando este valor en la ecuación 27, resulta:

$$L_p = L_w - 10 \cdot \log\left(\frac{S \cdot p_r^2}{\rho V W_r}\right)$$

$$L_p = L_w - 10 \cdot \log\left(\frac{2\pi r^2 \cdot p_r^2}{\rho V W_r}\right)$$

$$L_p = L_w - 20 \cdot \log(r) - 10 \cdot \log\left(\frac{2\pi p_r^2}{\rho V W_r}\right)$$

Si utilizamos los valores de densidad del aire y de rapidez de propagación del sonido en el aire bajo las condiciones especificadas ($\rho = 1,20 \text{ kg/m}^3$ y $V = 348 \text{ m/s}$), y sustituimos los valores de referencia para la presión sonora y la potencia sonora, obtenemos que la variación del nivel de presión sonora para una fuente que emite en forma semiesférica está dada por la expresión:

$$\boxed{L_p = L_w - 20 \cdot \log(r) - 7,8} \quad (29)$$

Ejemplo 43: Un altavoz en forma de semiesfera se coloca sobre el suelo en un recinto abierto. Si el nivel de potencia sonora de la bocina es de 90 dB, ¿cuál es el nivel de presión sonora a 15 m de distancia de la bocina?

Haciendo uso de la ecuación 29, se tiene:

$$L_p = L_w - 20 \cdot \log(r) - 7,8$$

$$L_p = 90 - 20 \cdot \log(15) - 7,8 = 59 \text{ dB}$$

• **Fuente puntual en que no se conoce el nivel de potencia sonora**

Si no se dispone el valor del nivel potencia sonora de la fuente, pero se puede medir el nivel de presión sonora L_{p1} a la distancia r_1 de la fuente, es posible calcular el nivel de presión sonora L_{p2} a otra distancia cualquiera r_2 . Para deducir la expresión que nos permita hacer este cálculo, considere que se mide el nivel de presión sonora L_{p1} a una distancia r_1 de la fuente. Este valor está dado por la ecuación 28 o 29 dependiendo de si la fuente irradia como una esfera o como una semiesfera. Esto es:

$$L_{p1} = L_w - 20 \log(r_1) - Q \tag{30}$$

Donde Q es igual a 10,8 para el caso de que la fuente puntual esté en el aire, o 7,8 para cuando la fuente puntual esté sobre una superficie reflectora. Si ahora se realiza una segunda medición del nivel de presión sonora (L_{p2}) a una distancia r_2 de la fuente, podemos escribir que:

$$L_{p2} = L_w - 20 \log(r_2) - Q \tag{31}$$

Restando la ecuación 30 de la ecuación 31, resulta:

$$L_{p2} - L_{p1} = -20 \log(r_2) + 20 \log(r_1)$$

$$\boxed{L_{p2} = L_{p1} - 20 \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \tag{32}$$

En la Figura 7 (gráfica inferior) se presenta la variación del nivel de presión sonora (L_{p2}) medida a una distancia (r_2) de una fuente puntual, en el caso en que para la distancia $r_1 = 10$ m, el nivel de presión sonora es de 100 dB.

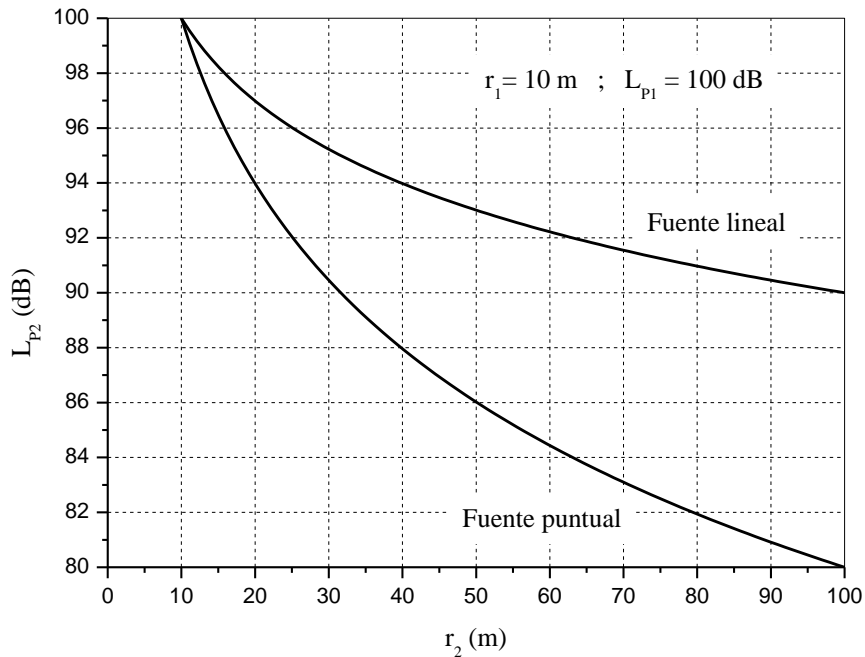


Fig. 7. Variación de nivel de presión sonora con la distancia.

Ejemplo 44: Si la distancia a una fuente sonora se duplica, ¿qué le sucede al nivel de presión sonora L_{p2} ?

El duplicar la distancia a la fuente implica que:

$$r_2 = 2r_1 \quad \Rightarrow \quad \Rightarrow \frac{r_2}{r_1} = 2$$

Sustituyendo este cociente en la ecuación 32, se tiene:

$$L_{p2} = L_{p1} - 20 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

$$L_{p2} = L_{p1} - 20 \log(2)$$

$$\boxed{L_{p2} = L_{p1} - 6} \quad (33)$$

Esto significa que cuando la distancia a la fuente puntual se duplica el nivel de presión sonora se atenúa en 6 dB.

Ejemplo 45: El nivel de presión sonora a 2,0 m de un compresor resulta ser 84 dBA. ¿Qué nivel de presión sonora se percibe a 50,0 m?

Utilizando la ecuación 32, se obtiene que:

$$L_{p_2} = L_{p_1} - 20 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

$$L_{p_2} = 84 - 20 \log \left(\frac{50,0}{2,0} \right) = 56 \text{ dBA}$$

Ejemplo 46: La Norma de Control del Ruido establece que, durante la noche, el nivel de presión sonora en las viviendas no debe exceder los 50 dBA. Si se desea instalar un compresor a 60,0 m de una vivienda, ¿qué nivel de presión sonora debe medirse a 3,0 m del compresor, sin que se viole la norma para la residencia en cuestión?

Haciendo uso de la ecuación 32, se tiene que:

$$L_{p_2} = L_{p_1} - 20 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

$$L_{p_1} = L_{p_2} + 20 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) = 50 + 20 \log \left(\frac{60,0}{3,0} \right) = 76 \text{ dBA}$$

- **Fuente lineal que irradia en forma cilíndrica**

Para el caso de una fuente sonora lineal que irradia en forma cilíndrica en todas las direcciones (v.g. cable de transmisión eléctrica que, producto del viento, emite ruido), toda la energía se distribuye en la superficie del cilindro, por lo que el valor de la superficie en donde se distribuye la energía sonora será igual a: $S = 2\pi rL$. Remplazando este valor en la ecuación 27, resulta:

$$L_p = L_w - 10 \cdot \log \left(\frac{S \cdot p_r^2}{\rho V W_r} \right)$$

$$L_p = L_w - 10 \cdot \log \left(\frac{2\pi rL \cdot p_r^2}{\rho V W_r} \right)$$

$$L_p = L_w - 10 \cdot \log(r) - 10 \cdot \log \left(\frac{2\pi p_r^2}{\rho V \left[\frac{W_r}{L} \right]} \right)$$

$$L_p = L_w - 10 \cdot \log(r) - 10 \cdot \log \left(\frac{2\pi p_r^2}{\rho V W_{rL}} \right)$$

Si utilizamos los valores de densidad del aire y de rapidez de propagación del sonido en el aire de $\rho = 1,20 \text{ kg/m}^3$ y $V = 348 \text{ m/s}$, y como el nivel de potencia sonora de referencia por unidad de longitud es $W_{rL} = W_r/L = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W/m}$, tenemos entonces:

$$\boxed{L_p = L_w - 10 \cdot \log(r) - 7,8} \quad (34)$$

Ejemplo 47: Supón que un cable de transmisión eléctrica, debido al viento que incide sobre él, genera un ruido de 65 dBA medido a 12 m de distancia. ¿Cuál es el nivel de potencia sonora del cable cuando vibra?

Al despejar el nivel de potencia sonora de la ecuación 34, resulta:

$$\begin{aligned} L_p &= L_w - 10 \cdot \log(r) - 7,8 \\ L_w &= L_p + 10 \cdot \log(r) + 7,8 \\ L_w &= 65 + 10 \cdot \log(12) + 7,8 = 84 \text{ dBA} \end{aligned}$$

• **Fuente lineal que irradia en forma de semicilindro**

En algunos casos, la fuente sonora puede ser considerada como lineal y que emite en forma de un semicilindro. Esto es lo que ocurre para el tráfico rodante y los ferrocarriles, en donde el suelo refleja las ondas sonoras y produce que toda la energía se distribuya en un semicilindro. De aquí que el valor de la superficie en donde se distribuye la energía sonora será igual a: $S = 2\pi rL/2 = \pi rL$. Remplazando este valor en la ecuación 27, resulta:

$$\begin{aligned} L_p &= L_w - 10 \cdot \log\left(\frac{S \cdot p_r^2}{\rho V W_r}\right) \\ L_p &= L_w - 10 \cdot \log\left(\frac{\pi r L \cdot p_r^2}{\rho V W_r}\right) \\ L_p &= L_w - 10 \cdot \log(r) - 10 \cdot \log\left(\frac{\pi p_r^2}{\rho V \left[\frac{W_r}{L}\right]}\right) \\ L_p &= L_w - 10 \cdot \log(r) - 10 \cdot \log\left(\frac{\pi p_r^2}{\rho V W_{rL}}\right) \end{aligned}$$

Como: $p_r = 2,0 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, $\rho = 1,20 \text{ kg/m}^3$, $V = 348 \text{ m/s}$ y $W_{rL} = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W/m}$, podemos escribir que el nivel de presión sonora con la distancia, para una fuente que emite en forma de semicilindro, es igual a:

$$\boxed{L_p = L_w - 10 \cdot \log(r) - 4,8} \quad (35)$$

Ejemplo 48: Si el nivel de potencia sonora producto del tráfico rodante en una avenida es de 95,0 dBA, ¿a qué distancia del centro de la avenida se reduce el nivel de presión sonora a 70,0 dBA?

Despejando el valor de r de la ecuación 35, obtenemos:

$$L_p = L_w - 10 \cdot \log(r) - 4,8$$

$$r = 10^{\left(\frac{L_w - L_p - 4,8}{10}\right)} = 10^{\left(\frac{95 - 70 - 4,8}{10}\right)} = 105 \text{ m}$$

• **Fuente lineal en que no se conoce el nivel de potencia sonora**

Cuando no se conoce el valor del nivel de potencia sonora de la fuente lineal, pero se puede medir el nivel de presión sonora L_{p1} a la distancia r_1 , es posible calcular el nivel de presión sonora L_{p2} a otra distancia cualquiera r_2 . Para deducir la expresión que nos permite hacer este cálculo, considera que se mide el nivel de presión sonora L_{p1} a una distancia r_1 de la fuente. Este valor está dado por la ecuación 34 o 36 dependiendo de si la fuente irradia como un cilindro o como un semicilindro. Es decir:

$$L_{p1} = L_w - 10 \log(r_1) - Q \tag{36}$$

Donde Q es igual a 7,8 para el caso en que la fuente lineal esté en el aire, o 4,8 para cuando la fuente lineal esté sobre una superficie reflectora. Si ahora se realiza una segunda medición del nivel de presión sonora (L_{p2}) a una distancia r_2 de la fuente, podemos escribir que:

$$L_{p2} = L_w - 10 \log(r_2) - Q \tag{37}$$

Al restar la ecuación 36 de la ecuación 37, resulta:

$$L_{p2} - L_{p1} = -10 \log(r_2) + 10 \log(r_1)$$

$$\boxed{L_{p2} = L_{p1} - 10 \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \tag{38}$$

En la Figura 7 (gráfica superior) se presenta la variación del nivel de presión sonora (L_{p2}) medida a una distancia (r_2) de una fuente lineal en el caso en que para la distancia $r_1 = 10$ m el nivel de presión sonora es de 100 dB. Se puede apreciar que el nivel de presión sonora para una fuente puntual disminuye mucho más rápido que para una fuente sonora lineal.

Ejemplo 49: Si una persona parada frente al paso de un ferrocarril percibe un nivel de presión sonora de 85 dBA, ¿qué nivel de presión sonora percibiría si duplica su distancia a la vía ferroviaria?

El duplicar la distancia a la fuente implica que:

$$r_2 = 2r_1 \quad \Rightarrow \quad \Rightarrow \frac{r_2}{r_1} = 2$$

Sustituyendo este cociente en la ecuación 38, se tiene:

$$\begin{aligned} L_{p2} &= L_{p1} - 10 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \\ L_{p2} &= L_{p1} - 10 \log(2) \\ \boxed{L_{p2} = L_{p1} - 3} & \qquad \qquad \qquad (39) \\ L_{p2} &= 85 - 3 = 82 \text{ dBA} \end{aligned}$$

Ejemplo 50: Determina la relación entre el nivel de intensidad sonora y el nivel de presión sonora.

Partiendo de la ecuación del nivel de intensidad sonora dada por la ecuación 11, tenemos que:

$$\begin{aligned} L_I &= 10 \cdot \log \left(\frac{I}{I_r} \right) \\ L_I &= 10 \cdot \log(I) - 10 \cdot \log(I_r) \end{aligned} \qquad (40)$$

Si utilizamos la ecuación 26 para expresar de intensidad sonora medida y la intensidad sonora de referencia,

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho V} \quad \text{y} \quad I_r = \frac{p_r}{\rho_r V_r}$$

Reemplazamos en la ecuación 40, tenemos:

$$\begin{aligned} L_I &= 10 \cdot \log \left(\frac{p_{rms}^2}{\rho V} \right) - 10 \cdot \log \left(\frac{p_r}{\rho_r V_r} \right) \\ L_I &= 10 \cdot \log(p_{rms}^2) - 10 \log(\rho V) - 10 \cdot \log(p_r) + 10 \log(\rho_r V_r) \\ L_I &= 10 \cdot \log \left(\frac{p_{rms}^2}{p_r^2} \right) + 10 \log \left(\frac{\rho_r V_r}{\rho V} \right) \\ L_I &= 20 \cdot \log \left(\frac{p_{rms}}{p_r} \right) + 10 \log \left(\frac{\rho_r V_r}{\rho V} \right) \end{aligned}$$

Como el primer término de la suma es el nivel de presión sonora dado por la ecuación 6, resulta que:

$$L_I = L_p + 10 \log \left(\frac{\rho_r V_r}{\rho V} \right) \quad (41)$$

Si las condiciones de temperatura y presión cuando se realiza la medida están próximas a las condiciones existentes cuando se midió el nivel de referencia para el oído humano (25 °C y $1,013 \times 10^5$ Pa), el segundo término de la suma de la ecuación 41 es próximo a cero, por lo que se puede escribir como:

$$\boxed{L_I = L_p} \quad (42)$$

Esto significa que, bajo las condiciones señaladas, el nivel de intensidad sonora es igual al nivel de presión sonora.

8.2.2. Atenuación por la arbolada

Los árboles mejoran las condiciones ambientales y aumentan la calidad de vida de la población. Entre sus funciones podemos destacar: la producción de oxígeno, la conformación de ecosistemas, la absorción de contaminantes, la regulación del clima y la mitigación del ruido.

La interposición de una barrera de árboles entre la fuente sonora y el receptor puede ayudar a atenuar el ruido, siempre que se tomen en cuenta los siguientes factores:

- Se recomienda plantar bosques de árboles heterogéneos con alturas de entre 10 m y 15 m y de hojas anchas y perennes.
- La distancia de separación entre los árboles que conforman la barrera acústica debe ser próxima a los 5 m.
- Se deben sembrar arbustos y hierba en la parte baja de los árboles para que la atenuación sea efectiva.
- La barrera arbórea debe ser de por lo menos 20 m de espesor y 20 m de longitud. Con esto se obtiene una atenuación próxima a los 3 dB.
- Es más eficiente si la barrera arbórea está cerca de la fuente de ruido y no próxima a la zona que se desea proteger.
- La atenuación del ruido es inversamente proporcional a la visibilidad del bosque.
- Los árboles plantados a lo largo de las calles reducen el tiempo de reverberación debido a la absorción en las hojas.

En la Tabla 8 presentamos algunos árboles que pueden ser utilizados como barrera contra el ruido:

Nombre científico	Nombre común
<i>Himatanthus articulatus</i>	Calacuchillos
<i>Cordia panamensis</i>	Muñeco
<i>Capparis odoratissima</i>	Carne de venado
<i>Cecropia longipes</i>	Guarumo
<i>Hedyosmum bonplandianum</i>	Limonillo
<i>Licania arborea</i>	Rascador
<i>Hirtella americana</i>	Garrapato
<i>Laguncularia racemosa</i>	Maliangolo
<i>Caesalpinia coriaria</i>	Agallito
<i>Swartzia simplex</i>	Naranjillo
<i>Taliparriti tiliaceum</i>	Majagua de playa
<i>Muntingia calabura</i>	Capulín
<i>Coccoloba</i>	Uvero macho
<i>Cosmibuena macrocarpa</i>	Falso copé
<i>Siparuna guianensis</i>	Pasmo

Tabla 9. Árboles recomendados como barrera arborea.

8.2.3. Atenuación debido a efectos meteorológicos

A grandes distancias (más de 100 m), intervienen en la propagación del sonido diversos factores atmosféricos que pueden atenuar el nivel sonoro de una onda. Entre estos factores podemos señalar los siguientes: la rapidez del viento, la temperatura ambiente, la humedad relativa y la frecuencia de la onda.

- **La rapidez del viento y la propagación de las ondas sonoras**

El sonido se percibe mejor cuando el viento sopla a favor de la propagación de la onda sonora que cuando sopla en contra. En vista de que la rapidez del viento aumenta con la altitud, las ondas acústicas que se propagan a cierta altura no presentan un frente de onda esférico, sino que cambia de forma. Como la dirección de propagación del sonido es siempre perpendicular a la superficie de la onda, las ondas que se propagan en sentido contrario al viento no podrán llegar a su destino ya que tienden a dispersarse hacia arriba, por lo que un observador en este sentido oír el sonido con menos intensidad (Figura 8).

El sonido que se propaga en el sentido del viento tiende a curvarse hacia abajo. Todos los sonidos emitidos en este sentido serán desviados hacia abajo y alcanzarán la superficie terrestre entre la fuente y el observador, produciendo una sensación de amplificación debido a la contribución de las reflexiones con el suelo. Por ello, el observador que se encuentra en el sentido del viento percibirá el sonido con mayor intensidad. Esto puede provocar un aumento de hasta de 5 dB con respecto a la situación normal.

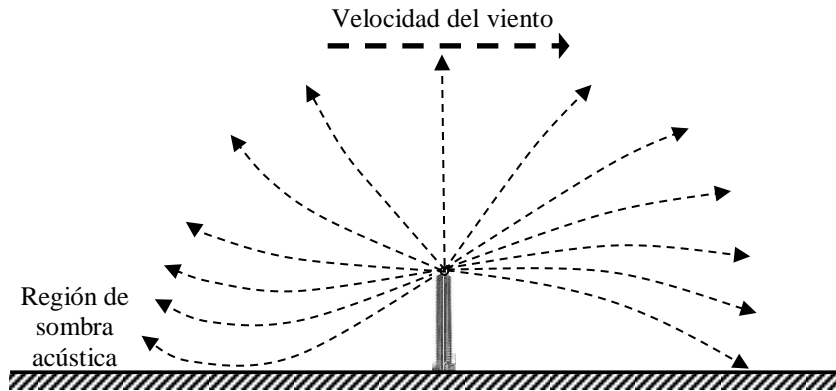


Fig. 8. Efecto del viento sobre el sonido.

- **La temperatura ambiente**

La temperatura ambiente influye sobre la densidad del aire y, por lo tanto, sobre la rapidez de propagación de las ondas sonoras y la atenuación del sonido por el aire. Generalmente, la temperatura del aire decrece con la altitud. En este caso y en ausencia de viento, las ondas sonoras se curvan hacia arriba, lo que provoca una región de sombra sonora alrededor de la fuente. Cuando la temperatura aumenta con la altitud, se dice que ha ocurrido una inversión térmica. En ausencia de viento e inversión térmica, los rayos se curvan hacia el suelo, cosa que elimina la zona de sombra.

Para un valor constante de frecuencia sonora y de humedad relativa, la atenuación del sonido disminuye a medida que aumenta la temperatura ambiente (Figura 9). Por ejemplo, para una onda con valor de frecuencia de 2 000 Hz y humedad relativa del ambiente de 90 %, la atenuación (A_T) medida en unidades de dB/100 m en función de la temperatura en °C está dada por la ecuación:

$$A_T = 0,189 \cdot \exp\left(-\frac{T}{17,0}\right) + 0,787 \quad (43)$$

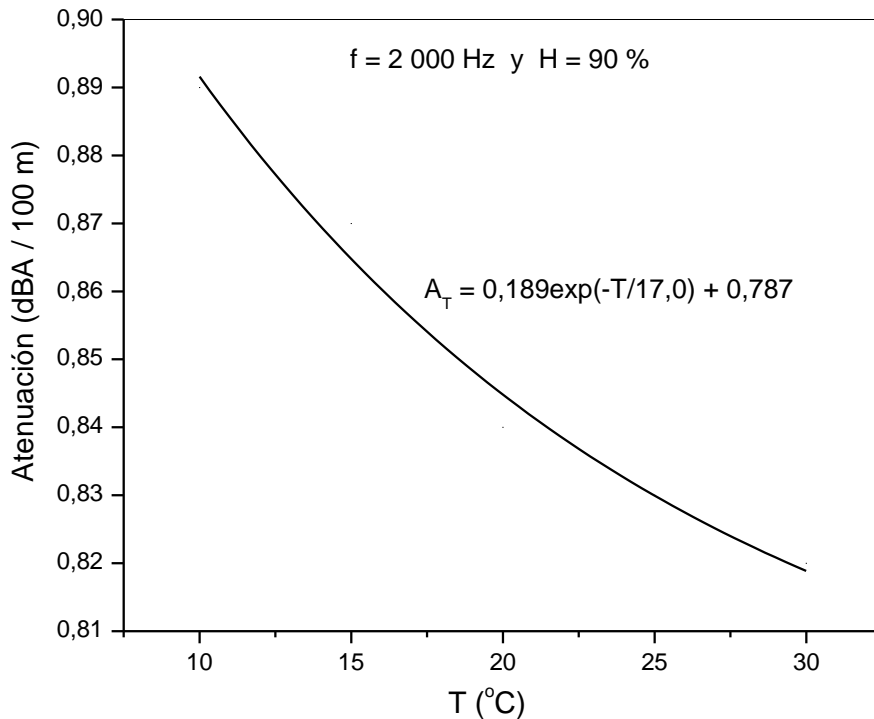


Fig. 9. Atenuación en función de la temperatura ambiente.

• **La humedad relativa ambiental**

La humedad relativa es una de las formas usuales de describir la concentración de vapor de agua en el aire. La humedad relativa se define como el cociente de la presión de vapor de agua del aire y la presión de saturación del aire, multiplicado por 100. De esta forma se compara (en porcentaje) la presión de vapor de aire bajo las condiciones atmosféricas en el momento de la medición con la presión que tendría si hubiese llegado a la saturación.

Al comprimir una onda sonora el aire, la energía de esta se transforma en aumento de la energía cinética de las moléculas que lo conforman. Para valores constantes de temperatura y frecuencia, y humedad por arriba del 20 %, la atenuación de la onda sonora disminuye al aumentar la humedad relativa (Figura 10). Por ejemplo, para una onda con valor de frecuencia de 2 000 Hz y temperatura ambiente de 30 °C, la atenuación (A_H), medida en unidades de dB/100 m, en función de la humedad relativa (H) está dada por la ecuación:

$$A_H = 0,893 \cdot \exp\left(-\frac{H}{50,3}\right) + 0,669 \quad (44)$$

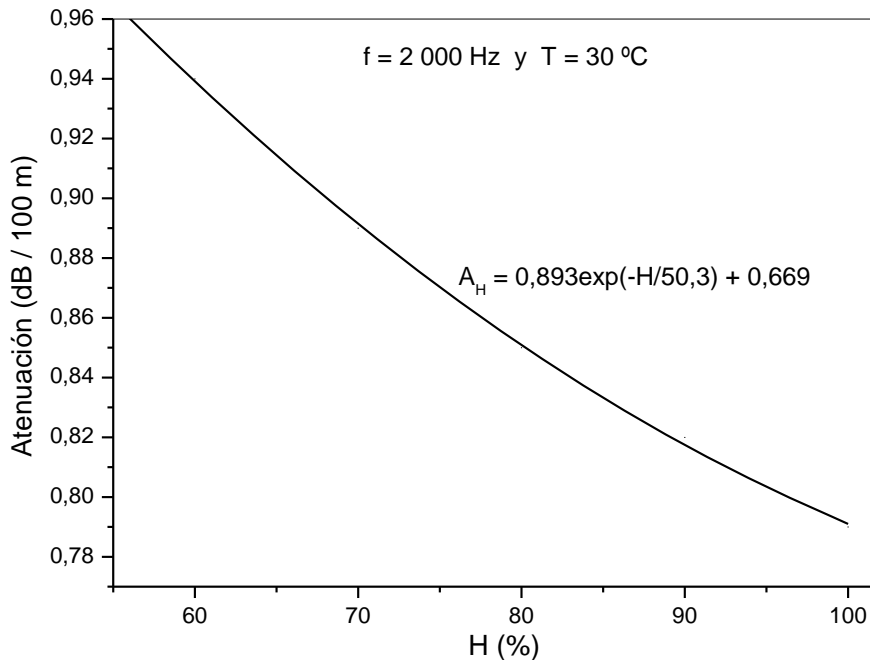


Fig. 10. Atenuación en función de la humedad relativa.

- **La frecuencia del sonido**

El atenuación del sonido en el aire es mayor para las frecuencias elevadas que para los sonidos de bajas frecuencias (Figura 11). Por esta razón las sirenas de los barcos emiten sonidos a bajas frecuencias, ya que de esta forma pueden llegar más lejos; y los monos aulladores emiten su grito a 200 Hz para que pueda ser escuchado a gran distancia en la selva. Por ejemplo, para una onda que se propaga en un medio con temperatura ambiente de 30 °C y humedad relativa de 90 %, la atenuación (A_f), medida en unidades de dB/100 m, en función de la frecuencia de la onda (f) medida en Hz, está dada por la ecuación:

$$A_f = 3,79 \times 10^{-8} \cdot f^2 + 0,689 \quad (45)$$

Es importante señalar que los valores de atenuación del sonido por absorción del aire se obtienen experimentalmente controlando las condiciones atmosféricas de temperatura ambiente y humedad relativa y realizando la experiencia a frecuencias determinadas.

En conclusión, a la atenuación del sonido debida a la distancia hay que adicionarle la atenuación producida por la absorción acústica del aire (A_A) para esta distancia, bajo las condiciones de temperatura ambiente, humedad relativa y la frecuencia de la onda. Por ejemplo, para una fuente puntual, la ecuación 32 se reescribiría así:

$$L_{P2} = L_{P1} - 20 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) - A_A \quad (46)$$

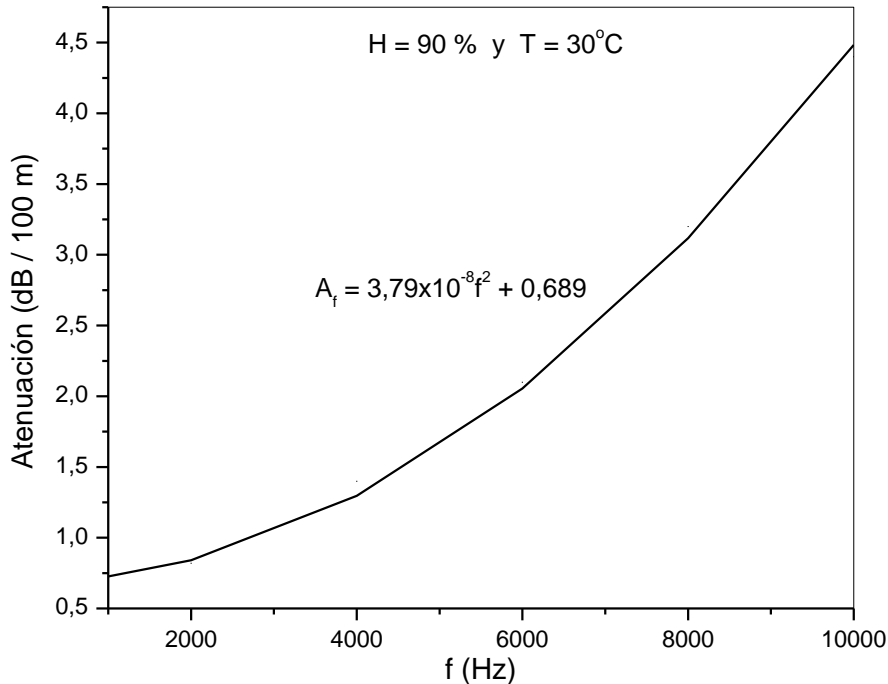


Fig. 11. Atenuación en función de la frecuencia de la onda.

Ejemplo 51: Un compresor genera un nivel de intensidad sonora de 70 dB a 10 m de distancia. Si la frecuencia del sonido del compresor es 2 000 Hz, la temperatura ambiente es de 30 C° y la humedad relativa ambiental es de 90 %, ¿cuál es el nivel de intensidad sonora que se percibe a 230 m de distancia del compresor?

La atenuación del aire A_A , se puede determinar a través de cualquiera de las tres ecuaciones presentadas en esta sección (43, 44 o 45), ya que ellas están deducidas para las condiciones atmosféricas y frecuencia especificadas en este ejemplo. Si utilizamos la ecuación de atenuación con la temperatura (Ecuación 43), resulta que:

$$A_T = 0,189 \cdot \exp \left(- \frac{T}{17,0} \right) + 0,787$$

$$A_T = 0,189 \cdot \exp \left(- \frac{30}{17,0} \right) + 0,787 = 0,82 \frac{\text{dB}}{100 \text{ m}}$$

Como la distancia entre r_1 y r_2 es de 220 m, la atenuación total debido al aire es:

$$A_A = (0,82 \text{ dB}) \cdot \left(\frac{220 \text{ m}}{100 \text{ m}} \right) = 1,8 \text{ dB}$$

Este resultado sería el mismo si se hubiese utilizado la ecuación 44 o la ecuación 45. Finalmente, el nivel de intensidad sonora a 230 m de la fuente está dado por la ecuación 46, esto es:

$$L_{P_2} = L_{P_1} - 20 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) - A_A$$

$$L_{P_2} = 70 - 20 \log \left(\frac{230}{10} \right) - 1,8 = 41 \text{ dB}$$

8.2.4. Atenuación debido a una barrera

En la lucha contra el ruido se pueden seguir varias estrategias, como la de reducir el ruido de la fuente (es la más recomendable); pero si esto no es posible, también podemos aumentar la distancia entre el receptor y la fuente sonora, aislar acústicamente el recinto que se desea proteger o construir barreras acústicas entre la fuente y el receptor.

• Atenuación por un muro

El profesor japonés Zyun-iti Maekawa ha estimado que un muro (Figura 12) rígido, delgado (la distancia de la fuente al muro es mucho mayor que el espesor del muro), con densidad superficial mayor a 10 kg/m^2 y longitud mucho mayor que su altura, interpuesto entre una fuente sonora y un receptor, produce una atenuación del nivel sonoro dada por la expresión:

$$A_M = 10 \log \left(3 + \frac{40(a + b - c)}{\lambda} \right) \quad (47)$$

Donde: A_M = la atenuación del nivel sonoro (dB).

a = la distancia de la fuente a la parte superior del muro (m).

b = la distancia del receptor a la parte superior del muro (m).

c = la distancia en línea recta de la fuente al receptor (m).

λ = la longitud de onda del sonido (m).

En algunas ocasiones es difícil medir las distancias a, b y c, y lo que se conoce es la altura a la que se encuentra la fuente sonora con respecto al suelo (H_F), la altura del muro (H_M), la altura del receptor (H_R), la distancia de la fuente sonora al muro (L_{FM}) y la distancia del receptor al muro (L_{RM}).

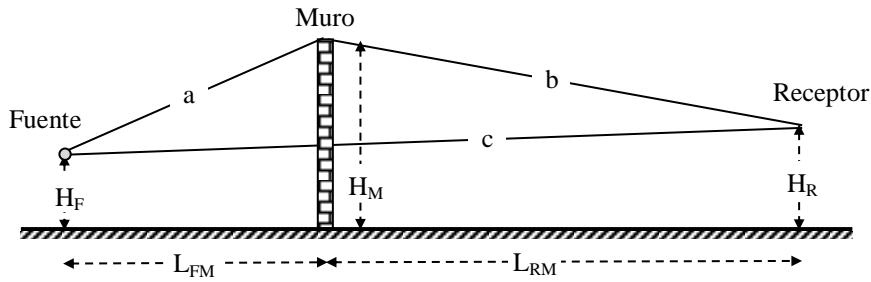


Fig. 12. Muro como barrera acústica.

Si hacemos un análisis geométrico de la Figura 12, se obtienen las siguientes relaciones en las variables del muro:

$$a = \sqrt{(H_M - H_F)^2 + L_{FM}^2} \quad (48)$$

$$b = \sqrt{(H_M - H_R)^2 + L_{RM}^2} \quad (49)$$

$$c = \sqrt{(H_R - H_F)^2 + (L_{FM} + L_{RM})^2} \quad (50)$$

Remplazando las ecuaciones 48, 49 y 50 en la expresión de la atenuación para un muro (ecuación 47), resulta:

$$A_M = 10 \log \left(3 + \left[\frac{40}{\lambda} \right] \left[\sqrt{(H_M - H_F)^2 + L_{FM}^2} + \sqrt{(H_M - H_R)^2 + L_{RM}^2} - \sqrt{(H_R - H_F)^2 + (L_{FM} + L_{RM})^2} \right] \right)$$

Ejemplo 52: La altura de la fuente sonora con respecto al suelo es $H_F = 1,0$ m, la altura del muro rígido es $H_M = 2,5$ m, la altura del receptor es $H_R = 1,5$ m, la distancia de la fuente sonora del muro es $L_{FM} = 10,0$ m y la distancia del receptor al muro es $L_{RM} = 20,0$ m. Si la fuente sonora emite a 2 000 Hz y si la temperatura ambiente es de 27 °C, determina:

1. La atenuación del muro.
2. La altura de la fuente a la que se consigue la mínima atenuación.
3. La altura del muro a la que se consigue la mínima atenuación.
4. La altura del receptor a la que se consigue la mínima atenuación.
5. La distancia de la fuente al muro a la que se consigue la máxima atenuación.
6. La distancia del receptor al muro a la que se consigue la máxima atenuación.

1. Como a la temperatura de 27 °C la rapidez del sonido es 348 m/s, y si despejamos la longitud de onda de la ecuación 1, tenemos:

$$V = \lambda \cdot f \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{V}{f} = \frac{348}{2\,000} = 0,174 \text{ m}$$

Utilizando la expresión de la atenuación para un muro, tenemos:

$$A_M = 10 \log \left(3 + \left[\frac{40}{\lambda} \left[\sqrt{(H_M - H_F)^2 + L_{FM}^2} + \sqrt{(H_M - H_R)^2 + L_{RM}^2} - \sqrt{(H_R - H_F)^2 + (L_{FM} + L_{RM})^2} \right] \right] \right)$$

$$A_M = 10 \log \left(3 + \left[\frac{40}{0,174} \left[\sqrt{(2,5 - 1,0)^2 + (10,0)^2} + \sqrt{(2,5 - 1,5)^2 + (20,0)^2} - \sqrt{(1,5 - 1,0)^2 + (10,0 + 20,0)^2} \right] \right] \right)$$

$$A_M = 15 \text{ dB}$$

2. Para determinar la altura de la fuente a la que se consigue la mínima atenuación, analicemos la gráfica A_M en función H_F , manteniendo las demás variables constantes (Figura 13).

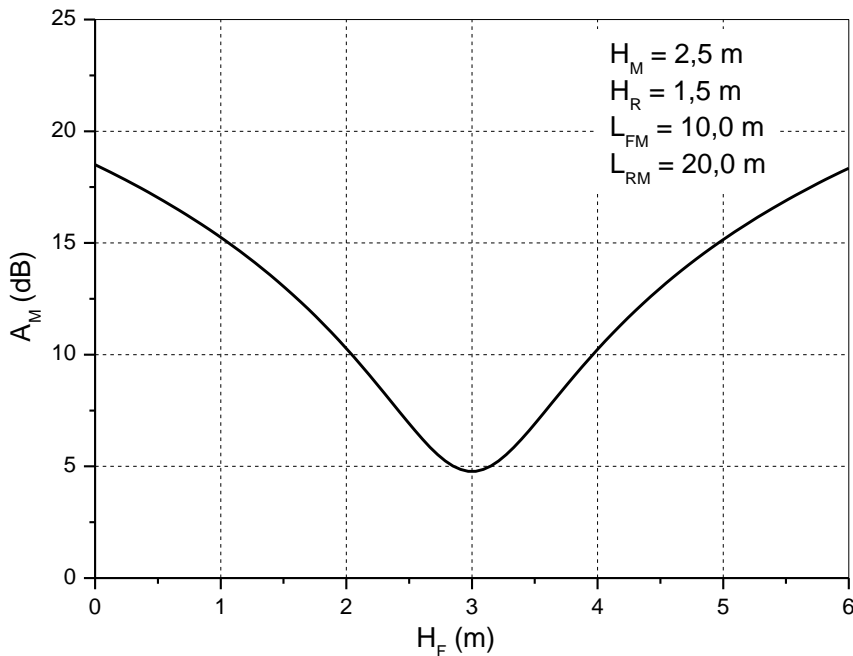


Fig. 13. Atenuación de un muro en función de la altura de la fuente.

Como se puede apreciar, la altura de la fuente a la que se consigue la mínima atenuación del muro es de 3,0 m. Esta es la altura a la que el receptor empieza a ver la fuente por arriba del muro.

2. Para determinar la altura del muro con mínima atenuación, analicemos la gráfica de atenuación del muro en función de su altura (Figura 14).

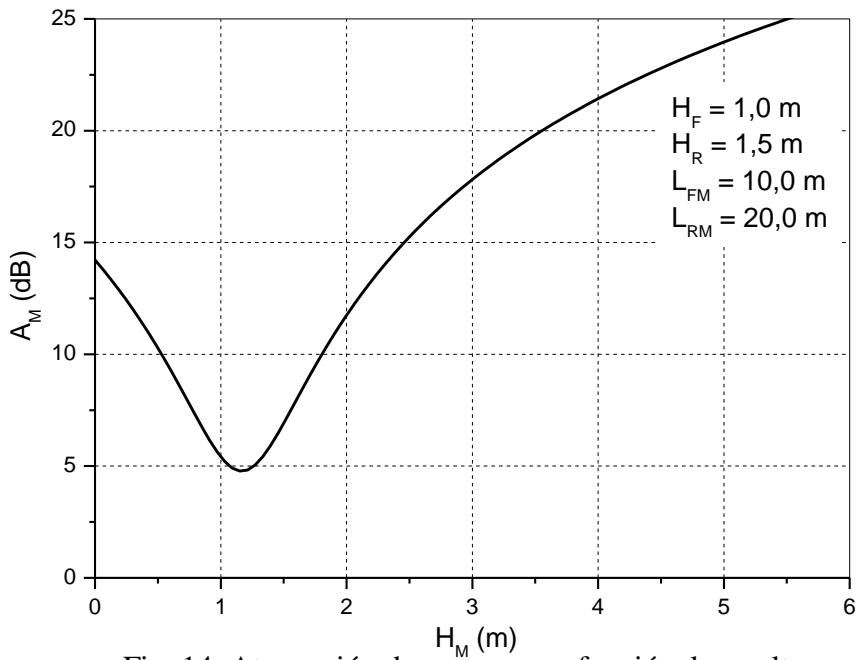


Fig. 14. Atenuación de un muro en función de su altura.

En la gráfica se observa que la altura del muro a la que se consigue la mínima atenuación es de 1,2 m. Esta es la altura a la que el receptor puede observar la fuente por arriba del muro.

4. Para determinar la altura del receptor a la que se consigue la mínima atenuación, analicemos la gráfica de atenuación del muro en función de la altura del receptor, manteniendo las demás variables constantes (Figura 15).

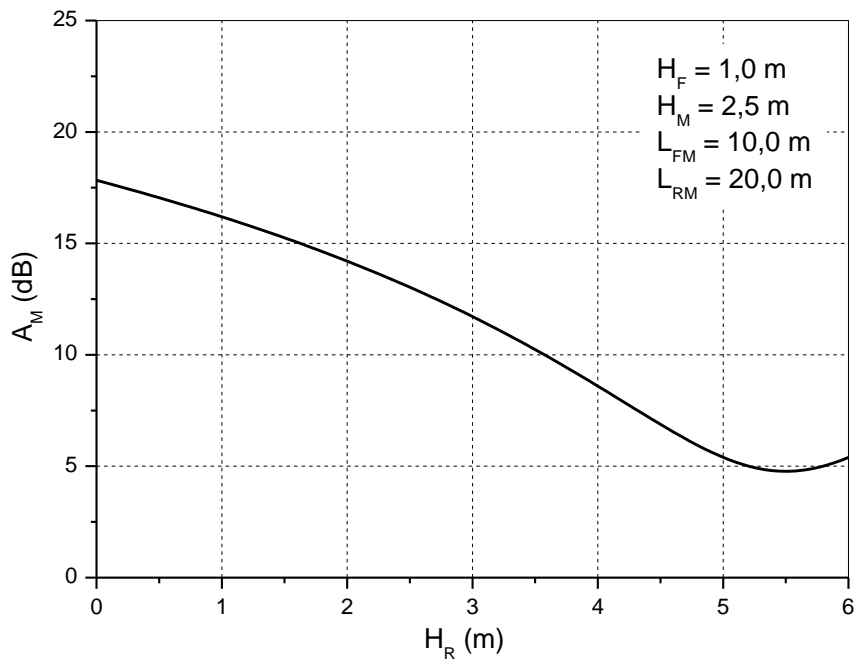


Fig. 15. Atenuación de un muro en función de la altura del receptor.

Esta gráfica muestra que la altura del receptor a la que se consigue la mínima atenuación es de 5,5 m. Esta es la altura a la que la fuente se hace visible por el receptor.

5. Para determinar la distancia de la fuente al muro a la que se consigue la máxima atenuación, analicemos la gráfica de atenuación del muro en función de la distancia de la fuente al muro, manteniendo las demás variables constantes (Figura 16).

La máxima atenuación sonora se consigue cuando la fuente está prácticamente pegada al muro, es decir, $L_{FM} = 0$.

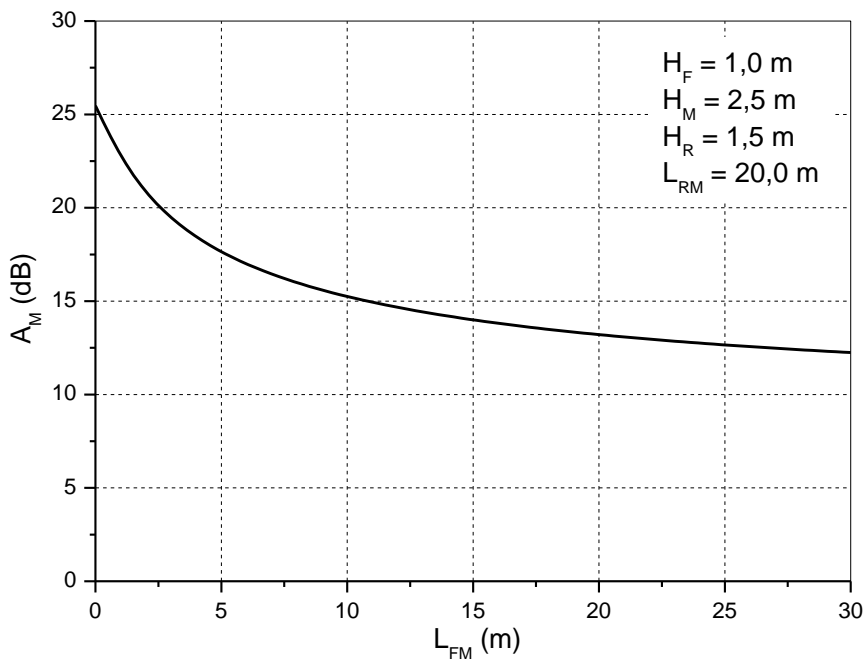


Fig. 16. Atenuación de un muro en función la distancia fuente-muro.

6. Para determinar la distancia del receptor a la fuente a la que se consigue la máxima atenuación, analicemos la gráfica de atenuación del muro en función de la distancia del receptor al muro, manteniendo las demás variables constantes (Figura 17).

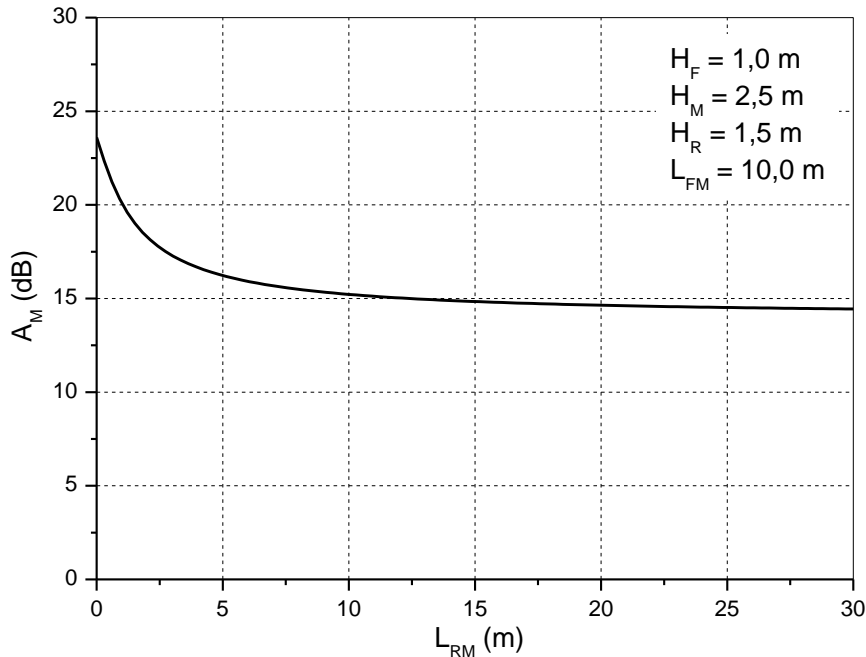


Fig. 17. Atenuación de un muro en función de la distancia receptor-muro.

Cuando el receptor está prácticamente pegado al muro, es donde se logra la máxima atenuación sonora, es decir, $L_{RM} = 0$.

• **Atenuación por una pared en recinto cerrado**

Cuando las ondas sonoras, con energía E_i chocan contra una pared, parte de la energía es reflejada al medio emisor por la pared (E_r), y otra parte de la energía es absorbida por la pared (E_a) de tal manera que: $E_i = E_r + E_a$. A su vez, la energía absorbida se divide en energía disipada por la pared (E_d) y energía transmitida al medio donde se encuentra el receptor (E_t), que al traducirse en vibración de la pared pone en movimiento el aire situado del otro lado, con lo que produce sonido. Por consiguiente, la energía absorbida se puede escribir como: $E_a = E_d + E_t$.

Las pérdidas de energía por transmisión indican la capacidad de una pared para no transmitir las ondas sonoras. El aislamiento acústico de un material aumenta cuando se incrementa su densidad, su dureza y/o su flexibilidad. El índice de reducción acústica de una pared simple (R) está regido por la ley de masas. Para paredes con densidad superficial $\sigma \leq 150$ kg/m², esta ley es igual a:

$$R = 16,6 \cdot \log(\sigma) + 2,0 \tag{51}$$

Para paredes con densidad superficial $\sigma > 150$ kg/m², la ley de masas resulta igual a:

$$\boxed{R = 36,5 \cdot \log(\sigma) - 41,5} \quad (52)$$

Donde: R = índice de reducción acústica (dBA).
 σ = la densidad superficial de la pared en (kg/m^2).

Ejemplo 53: ¿Qué es el índice de reducción acústica?

El índice de reducción acústica (R) es la diferencia entre el nivel de potencia sonora que incide sobre una pared de un recinto cerrado y el nivel de potencia sonora que la atraviesa. Es importante señalar que este índice R varía con la frecuencia de la onda sonora que atraviesa la pared.

Ejemplo 54: Dos apartamentos están separados por una pared con espesor $d = 12,0$ cm y densidad volumétrica $\rho = 1\,300$ kg/m^3 . Si en uno de ellos existe un nivel de intensidad sonora $L_{\text{ii}} = 80,0$ dBA, ¿cuál es el nivel de intensidad sonora transmitido al otro apartamento (L_{it})?

Si llamamos A al área de la pared, la densidad volumétrica está relacionada con la densidad superficial así:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{A \cdot d} = \frac{\sigma}{d}$$

Transformando el espesor de pared a metros, resulta que su densidad superficial es:

$$\sigma = \rho \cdot d = (1\,300)(0,120) = 156 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Como la densidad superficial de la pared es mayor a 150 kg/m^2 , el índice de reducción acústica de la pared, dado por la ecuación 52, es:

$$R = 36,5 \cdot \log(\sigma) - 41,5 = 36,5 \cdot \log(156) - 41,5 = 38,5 \text{ dBA}$$

Si partimos de la relación de R con los niveles de intensidad sonora, se tiene que:

$$R = L_{\text{ii}} - L_{\text{it}}$$

$$L_{\text{it}} = L_{\text{ii}} - R_A = 80,0 - 38,5 = 41,5 \text{ dBA}$$

Otra forma de determinar el índice de aislamiento acústico (R) de una pared, pero ahora bajo condiciones normalizadas, es la siguiente:

$$\boxed{R = L_{\text{ii}} - L_{\text{it}} + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{A}\right)} \quad (53)$$

Donde: L_{fi} = el nivel de intensidad sonora del recinto donde se encuentra la fuente sonora (dBA).

L_{ft} = el nivel de intensidad sonora del recinto receptor (dBA).

S = la superficie de la pared que separa los recintos (m^2).

A = la absorción del recinto receptor (m^2). $A = \alpha \cdot S$ (α es el coeficiente de absorción total de la pared).

Ejemplo 55: Dos habitaciones están separadas por una pared de $11,0 m^2$ de superficie. El nivel de intensidad sonora en la habitación emisora es $90,0$ dBA y el de la habitación receptora es de $60,0$ dBA. En la habitación emisora, la absorción de la pared es $A_i = 2,0 m^2$, mientras que en la habitación receptora la absorción de la pared es $A_t = 4,0 m^2$. Determina el aislamiento acústico de la pared.

Usando la ecuación 53, que relaciona el aislamiento con los niveles de intensidad sonora y el área de absorción, tenemos:

$$R = L_{fi} - L_{ft} + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{A}\right)$$

Donde A representa la absorción total de la pared, es decir: $A = A_i + A_t$. Por lo tanto, el aislamiento lo podemos escribir como:

$$R = L_{fi} - L_{ft} + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{A_i + A_t}\right)$$
$$R = 90,0 - 60,0 + 10 \cdot \log\left(\frac{11,0}{2,0 + 4,0}\right) = 32,6 \text{ dBA}$$

9. ADICIÓN DE DECIBELIOS

Una de las consecuencias de que los niveles sonoros sean funciones logarítmicas es que al sumarse o restarse no se puede hacer de forma algebraica. Por ejemplo, si deseamos sumar:

$$50 \text{ dB} + 50 \text{ dB} \neq 100 \text{ dB}$$

Si no: $50 \text{ dB (+)} 50 \text{ dB} = 53 \text{ dB}$

En el caso que deseemos restar: $70 \text{ dB} - 20 \text{ dB} \neq 50 \text{ dB}$

Si no: $70 \text{ dB (-)} 20 \text{ dB} = 70 \text{ dB}$

El signo de adición entre paréntesis significa que se trata de una suma o resta de cantidades logarítmicas. Para deducir la forma como se realiza la adición de los niveles

sonoros, supongamos que deseamos sumar dos fuentes que emiten con presión sonora p_1 y p_2 , por lo que sus niveles de presión sonora, L_{p1} y L_{p2} , están dados por:

$$L_{p1} = 10 \log \left(\frac{p_1^2}{p_r^2} \right) \quad , \quad L_{p2} = 10 \log \left(\frac{p_2^2}{p_r^2} \right) \quad (54)$$

Para sumar los efectos de las dos fuentes [$L_{p1} (+) L_{p2}$], en donde cada fuente emite ondas sonoras con presiones p_1 y p_2 , se debe proceder así,

$$L_{p1} (+) L_{p2} = 10 \log \left[\left(\frac{p_1^2}{p_r^2} \right) + \left(\frac{p_2^2}{p_r^2} \right) \right]$$

De las ecuaciones 54, se obtiene que:

$$\frac{p_1^2}{p_r^2} = 10^{\frac{L_{p1}}{10}} \quad , \quad \frac{p_2^2}{p_r^2} = 10^{\frac{L_{p2}}{10}}$$

Remplazando estas expresiones en la ecuación anterior se tiene que:

$$L_{p1} (+) L_{p2} = 10 \log \left[10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right]$$

En términos generales, la suma de n fuentes con valores L_{Xi} , donde puede ser el caso del nivel de presión sonora, potencia sonora, intensidad sonora, nivel sonoro equivalente o cualquier otro parámetro expresado en decibelios, el nivel sonoro resultante (L_{X-R}) está dado por:

$$L_{X-R} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^{i=n} 10^{\frac{L_{Xi}}{10}} \right] \quad (55)$$

Para realizar la suma o resta de niveles sonoros de forma aproximada, podemos utilizar la gráfica mostrada en la Figura 18. El eje de la abscisa (Diferencia de nivel) representa la resta entre los niveles sonoros ($L_{X-mayor} - L_{X-menor}$) y el eje de las ordenadas (a la izquierda para la suma y a la derecha para la resta), es la cantidad que se le debe añadir a $L_{X-mayor}$ (en el caso de que la operación sea suma) o restar a $L_{X-mayor}$ (en el caso de que la operación sea resta).

Cuando la diferencia entre los niveles sonoros que se vayan a restar es menor a 3 dB, no se debe efectuar la resta utilizando la gráfica de la Figura 18. En estos casos debe hacerse de forma analítica utilizando la ecuación 55.

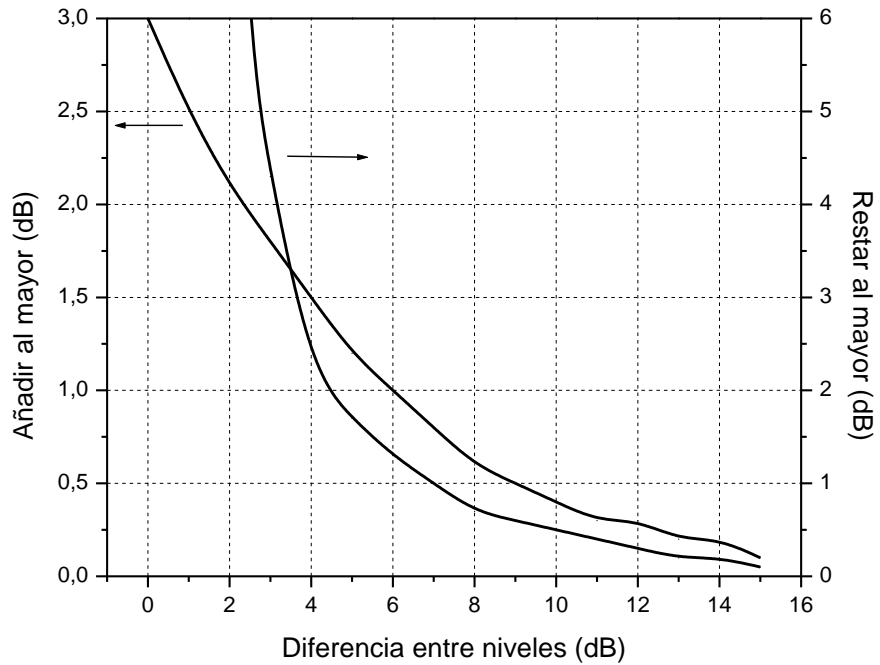


Fig. 18. Gráfica para sumar o restar niveles sonoros.

En caso de que se tengan n fuentes sonoras de igual nivel (L_X), la suma total de los niveles sonoros (L_{X-R}) será igual a:

$$L_{X-R} = 10 \log \left[10^{\frac{L_X}{10}} + 10^{\frac{L_X}{10}} + 10^{\frac{L_X}{10}} + \dots + n \right]$$

$$L_{X-R} = 10 \log \left[n 10^{\frac{L_X}{10}} \right]$$

$$L_{X-R} = 10 \log \left[10^{\frac{L_X}{10}} \right] + 10 \log [n]$$

Donde finalmente encontramos una expresión compacta que expresa la suma de fuentes con igual nivel sonoro. Esta es:

$$\boxed{L_{X-R} = L_X + 10 \log [n]} \quad (56)$$

Ejemplo 56: Un acondicionador de aire origina al exterior de una residencia un nivel de intensidad sonora de 49 dBA. Determina el nuevo nivel de intensidad sonora (L_{I-R}), si se le coloca al lado otro acondicionador de aire de igual característica.

Utilizando la ecuación 55, resulta:

$$L_{X-R} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^{i=n} 10^{\frac{L_{xi}}{10}} \right]$$
$$L_1 = 10 \log \left[10^{\frac{49}{10}} + 10^{\frac{49}{10}} \right] = 52 \text{ dBA}$$

Si hacemos esta suma a través de la gráfica mostrada en la Figura 18, observamos que como los niveles sonoros que se desean sumar tienen una diferencia de 0 dBA, se debe añadir al mayor 3 dBA (este caso son iguales ambos), con lo que resulta que: $L_{I-R} = 49 \text{ dBA} + 3 \text{ dBA} = 52 \text{ dBA}$.

Ejemplo 57: Considere tres bombas eléctricas de agua. Si a 5,0 m de distancia una genera un nivel de presión sonora de 70 dBA, la segunda produce 64 dBA y la tercera origina un nivel de presión sonora de 67 dBA, ¿cuál será el nivel sonoro total cuando las tres bombas estén en funcionamiento?

Haciendo uso de la ecuación 55, resulta:

$$L_{X-R} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^{i=n} 10^{\frac{L_{xi}}{10}} \right]$$
$$L_p = 10 \log \left[10^{\frac{70}{10}} + 10^{\frac{64}{10}} + 10^{\frac{67}{10}} \right] = 72 \text{ dBA}$$

Ahora veamos esta operación utilizando la gráfica de la Figura 18. Como la primera bomba (70 dBA) tiene una diferencia con la segunda (64 dBA) de 6 dBA, añadimos 1 dBA al nivel mayor, resultando 71 dBA. Estas dos bombas funcionando (71 dBA) tienen una diferencia con la tercera bomba (67 dBA) de 4 dBA; por lo que hay que adicionar 1,5 dBA a 71 dBA. Resulta que los tres compresores, en funcionamiento simultáneo, producen 72 dBA.

Ejemplo 58: Los dos compresores en funcionamiento generan un nivel de intensidad sonora, a 10 m de distancia, de 62,5 dBA. Si uno de estos compresores, que generaba un nivel intensidad sonora a 10 m de 60 dB, se apaga, ¿cuál será el nivel de intensidad sonora que se captará a 10 m de distancia?

Como la diferencia entre los niveles de intensidad sonora de los dos compresores es de 2,5 dBA, debemos hacer la resta de forma analítica. Esto es:

$$L_{X-R} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^{i=n} 10^{\frac{L_{xi}}{10}} \right]$$

$$L_I = 10 \log \left[10^{\frac{62,5}{10}} - 10^{\frac{60,0}{10}} \right] = 58,9 \text{ dBA}$$

Ejemplo 59: Se tienen 6 aerogeneradores con nivel de potencia sonora de 101 dB cada uno. ¿Cuál es el nivel de potencia sonora cuando están funcionando los 6 a la vez?

Utilizando la ecuación 56, resulta:

$$L_{X-R} = L_X + 10 \log[n]$$

$$L_w = 101 + 10 \log[6] = 109 \text{ dBA}$$

10. RUIDO DE FONDO

El ruido de fondo es todo sonido que se produce en forma simultánea cuando deseamos medir el nivel sonoro de una fuente. Cuando la diferencia entre el ruido de fondo y el nivel sonoro de la fuente de interés es igual o menor a 3 dBA, se recomienda realizar la medición del nivel sonoro para otro momento con menor ruido de fondo. Si el ruido de fondo está 10 dBA por debajo del nivel sonoro en estudio, el ruido de fondo tiene muy poca afectación en el resultado del nivel sonoro del sonido de interés. En los casos en que el ruido de fondo sea mayor a 3 dBA y menor o igual a 10 dBA del sonido de interés, se debe restar logarítmicamente el ruido de fondo del nivel sonoro medido.

Cuando el ruido de fondo no se puede medir directamente, se utiliza como ruido de fondo el percentil L90, que es el valor medido, del nivel sonoro, que ha sido superado el 90 % del tiempo de medición. Es decir que el L90 implica que la mayor parte del tiempo los niveles sonoros medidos están por encima de este valor.

En la Figura 19 se presenta un espectro sonoro medido en una calle. La línea horizontal punteada inferior, ilustra el percentil L90, que en este caso se tomó como ruido de fondo (73,4 dBA).

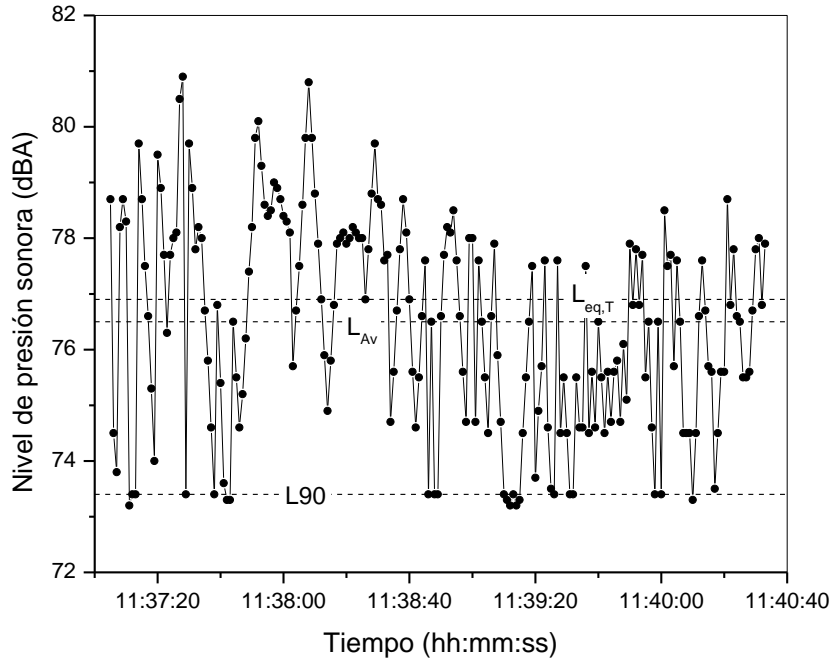


Fig. 19. Espectros de sonoro en donde se ilustra el L90, L_{Av} y $L_{eq,T}$.

Ejemplo 60: Los residentes de una vivienda contigua a un taller alegan que el funcionamiento de este produce que el ruido en el interior de la residencia durante el día exceda los 60 dBA, que es el máximo permitido. Para solucionar la disputa, se realiza una medición en el interior de la vivienda con el taller en pleno funcionamiento, con el resultado de que el nivel de presión sonora es de 67,0 dBA. Inmediatamente, se realiza otra medición con el taller en completo silencio, resultando que el nivel de presión sonora en el interior de la residencia es de 63,9 dBA.

1. ¿Cuál es el ruido de fondo que perciben los habitantes de la residencia?
2. ¿Cuál es nivel de intensidad sonora que genera el taller?

1. El ruido de fondo en el interior de la vivienda será el percibido con el taller en silencio, es decir, 63,9 dBA.

2. Para determinar el ruido que genera el taller, debemos restar el ruido de fondo del nivel de presión sonora captado con el taller en funcionamiento. Utilizando la ecuación 55, tenemos:

$$L_{X-R} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^{i=n} 10^{\frac{L_{Xi}}{10}} \right]$$

$$L_{I-Taller} = L_{I-Taller+fondo} (-) L_{I-fondo}$$

$$L_{I-\text{Taller}} = 10\log\left[10^{\frac{67,0}{10}} - 10^{\frac{63,9}{10}}\right] = 64,1 \text{ dBA}$$

Concluyéndose que el Taller produce un nivel de presión sonora por arriba de la norma en el interior de la vivienda. Además, el ruido de fondo ya existente en el lugar produce un nivel sonoro que excede lo permitido.

Ejemplo 61: El nivel de presión sonora en un lugar de la calle con el compresor de una industria en funcionamiento resultó igual a 80,4 dBA. Se apaga el compresor y el nivel de presión sonora en el mismo lugar, resulta igual a 77,4 dBA. ¿Qué podemos decir con relación a estos resultados?

Como la diferencia entre el ruido de fondo y el nivel de presión sonora con el compresor en funcionamiento es de 3 dBA, las medidas deben descartarse y hacerse en un momento del día en que la diferencia del nivel sea mayor a 3 dBA.

11. FORMAS DE MEDIR EL RUIDO

Como ya se ha señalado, existen diversas formas de medir y expresar los niveles sonoros, pero la mejor forma de indicar el nivel de presión sonora al que está expuesto una persona es el *nivel de presión sonora equivalente*, utilizando la ponderación A.

11.1. Nivel de Presión Sonora Equivalente

El nivel de presión sonora equivalente ($L_{eq,T}$), es el nivel de presión sonora constante, expresado en dBA, que en el mismo intervalo de tiempo, contiene la misma energía total que el ruido medido en el periodo estudiado. El $L_{eq,T}$ se utiliza para medir ruidos muy variables que se prolongan en el tiempo, como el ruido del tránsito y de las industrias. Matemáticamente, el nivel sonoro equivalente se puede expresar así:

$$L_{eq,T} = 10\log \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{p(t)}{p_r} \right]^2 dt = 10\log \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_p(t)}{10}} dt \quad (57)$$

Donde: $T = t_2 - t_1 =$ tiempo de medición.

Si durante un tiempo T se realizan n medidas discretas del nivel de presión sonora, y cada uno de ellos se midió durante un tiempo T_i (resultando en cada caso un nivel de presión sonora L_{Pi}), el nivel de presión sonora equivalente de todo el intervalo estará dado por:

$$L_{eq,T} = 10 \log \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{i=n} T_i \cdot 10^{\frac{L_{p_i}}{10}} = 10 \log \sum_{i=1}^{i=n} f_i \cdot 10^{\frac{L_{p_i}}{10}} \quad (58)$$

Donde: T_i = tiempo con el nivel L_i $\left(\sum_{i=1}^{i=n} T_i = T \right)$

f_i = fracción de tiempo a nivel L_i $\left(\sum_{i=1}^{i=n} f_i = \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{T_i}{T} \right) = 1 \right)$.

El nivel de presión sonora equivalente ($L_{eq,T}$) es siempre mayor o igual al nivel de presión sonora medio (L_{Av}) medido durante el mismo intervalo (ver Figura 20). El L_{Av} se aproxima al $L_{eq,T}$ mientras menos fluctuaciones existan en el nivel de presión.

Ejemplo 62: Una compresor, durante el 15 % del tiempo de funcionamiento, tiene un nivel de presión sonora de 78,0 dBA; durante el 60 % del tiempo tiene 85,1 dBA, y durante el 25 % de tiempo emite 80,3 dBA. Determina el nivel de presión sonora equivalente del compresor durante su ciclo de trabajo.

Partiendo de nuestra definición de nivel sonoro equivalente, dado por la ecuación 58, tenemos:

$$L_{eq,T} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^{i=n} f_i \cdot 10^{\frac{L_{p_i}}{10}} \right)$$

$$L_{eq,T} = 10 \log \left(0,15 \cdot 10^{\frac{78,0}{10}} + 0,60 \cdot 10^{\frac{85,1}{10}} + 0,2510^{\frac{80,3}{10}} \right) = 83,6 \text{ dBA}$$

Ejemplo 63: En un puesto de trabajo se mide, cada 6,0 minutos, el nivel de presión sonora media (L_{Av}) durante el transcurso de una hora (Tabla 9). Determina:

1. El nivel de presión sonora medio (L_{Av}) durante el tiempo total de medición.
2. El nivel de presión sonora equivalente durante la hora de medición ($L_{eq,1h}$).

ΔT (min)	0,0	6,0	12,0	18,0	24,0	30,0	36,0	42,0	48,0	54,0
	6,0	12,0	18,0	24,0	30,0	36,0	42,0	48,0	54,0	60,0
L_{Av} (dBA)	71,0	71,9	73,3	71,9	73,0	77,9	77,2	78,5	79,1	75,9

Tabla 9. Intervalo de medición y el valor L_{Av} resultante.

1. En vista que los tiempos y los intervalos entre mediciones son iguales, el nivel de presión sonora media se calcula así:

$$L_{Av} = \frac{\sum_{i=1}^{i=10} L_{A_{vi}}}{10} = \frac{71,0 + 71,9 + 73,3 + \dots + 79,1}{10} = \frac{749,7}{10} = 75,0 \text{ dBA}$$

En la Figura 20, se ilustran los resultados de mediciones por intervalo y el del nivel de presión sonora media y equivalente.

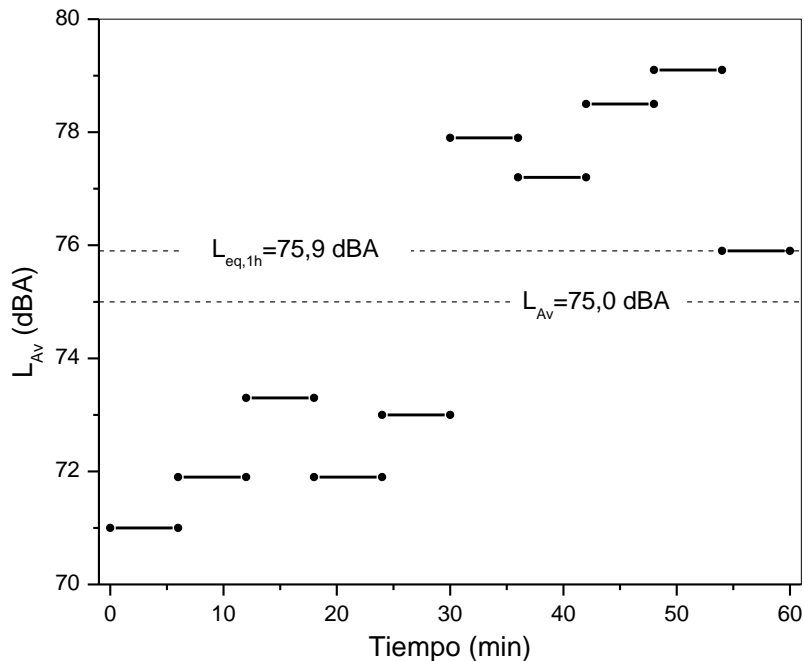


Fig. 20. Niveles de presión sonora medidos por intervalo.

2. Para facilitar la determinación del nivel de presión sonora equivalente, se construye la tabla mostrada a continuación.

T_i (min)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
f_i	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
L_{Av} (dBA)	71,0	71,9	73,3	71,9	73,0	77,9	77,2	78,5	79,1	75,9

Aplicando la ecuación 58, se tiene que el nivel de presión sonora equivalente durante la hora de medición es igual a:

$$L_{eq,T} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^{i=n} f_i \cdot 10^{\frac{L_{p_i}}{10}} \right]$$

$$L_{eq,1h} = 10 \log \left[0,10 \cdot 10^{\frac{71,0}{10}} + 0,10 \cdot 10^{\frac{71,9}{10}} + 0,10 \cdot 10^{\frac{73,3}{10}} + \dots + 0,10 \cdot 10^{\frac{75,9}{10}} \right]$$

$$L_{eq,1h} = 75,9 \text{ dBA}$$

Como puedes apreciar, el nivel de presión sonora equivalente es mayor al nivel de presión sonora media.

11.2. Nivel de Presión Sonora Equivalente Día-Noche

El nivel de presión sonora equivalente día-noche (Day-Night Level) se crea con la intención de penalizar los niveles sonoros nocturnos por considerarse que las molestias que producen son mayores. Por esta razón, al nivel de presión sonora equivalente durante la noche (22:00 horas hasta la 7:00 horas) se le incrementa 10 dBA. De aquí que el nivel de presión sonora equivalente día noche (L_{dn}) está definido como:

$$L_{dn} = 10 \log \left[\left(\frac{15}{24} \right) 10^{\left(\frac{L_{eq,d}}{10} \right)} + \left(\frac{9}{24} \right) 10^{\left(\frac{L_{eq,n}+10}{10} \right)} \right] \quad (59)$$

Ejemplo 64: En una factoría, el nivel de presión sonora equivalente medido durante el “día” (desde las 7:00 h hasta las 22:00 h) fue $L_{eq,d} = 71,5$ dBA, y el nivel de presión sonora equivalente medido durante la “noche” (desde las 22:00 h hasta las 7:00 h) fue $L_{eq,n} = 63,2$ dBA. Determina el nivel de presión sonora equivalente día-noche.

Partiendo de la ecuación 59, resulta que:

$$L_{dn} = 10 \log \left[\left(\frac{15}{24} \right) 10^{\left(\frac{L_{eq,d}}{10} \right)} + \left(\frac{9}{24} \right) 10^{\left(\frac{L_{eq,n}+10}{10} \right)} \right]$$

$$L_{dn} = 10 \log \left[\left(\frac{15}{24} \right) 10^{\left(\frac{71,5}{10} \right)} + \left(\frac{9}{24} \right) 10^{\left(\frac{63,2+10}{10} \right)} \right] = 72,2 \text{ dBA}$$

Ejemplo 65: Los niveles sonoros durante 24 horas en la parada de autobuses en las cercanías de un hospital son los mostrados en la Figura 21. Determina el nivel de presión sonora equivalente día-noche.

El nivel de presión sonora equivalente durante las 15 horas del “día” es 77,6 dBA, mientras que el nivel de presión sonora equivalente durante las 9 horas de la “noche” es 70,1 dBA; aplicando la ecuación 59, resulta:

$$L_{dn} = 10\log \left[\left(\frac{15}{24} \right) 10^{\left(\frac{L_{eq,d}}{10} \right)} + \left(\frac{9}{24} \right) 10^{\left(\frac{L_{eq,n}+10}{10} \right)} \right]$$

$$L_{dn} = 10\log \left[\left(\frac{15}{24} \right) 10^{\left(\frac{77,6}{10} \right)} + \left(\frac{9}{24} \right) 10^{\left(\frac{70,1+10}{10} \right)} \right] = 78,7 \text{ dBA}$$

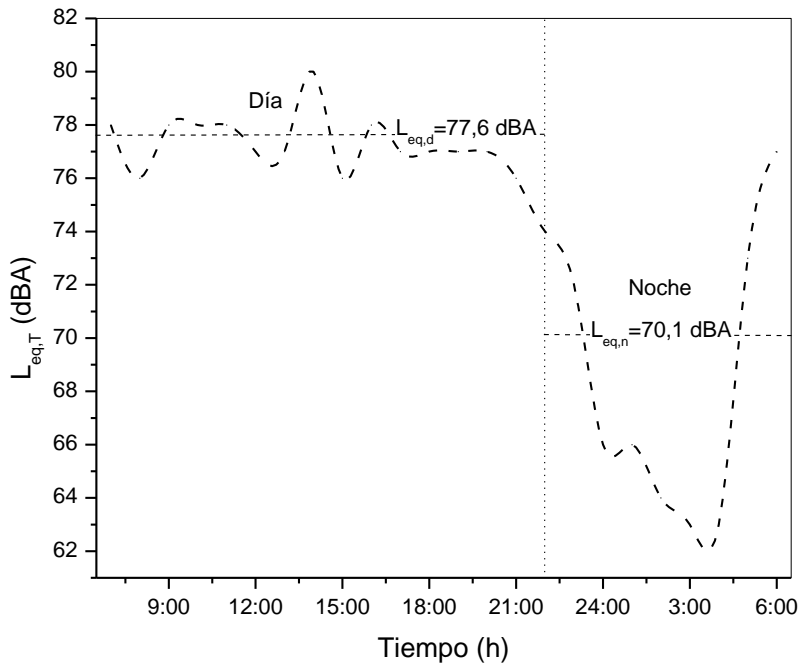


Fig. 21. Nivel de presión sonora día-noche del Ejemplo 39.

11.3. Nivel de Exposición a Ruidos Aislados

El nivel de exposición a ruidos aislados o L_{SEL} (*Sound Exposure Level*) se utiliza para la medición de ruidos aislados, como el paso de un avión. Está definido como el nivel sonoro expresado en dBA, que contiene la misma energía sonora constante durante 1,0 s que la emitida por la fuente. Es decir que la energía total del ruido es energéticamente equivalente a un sonido continuo de 1,0 s de duración.

$$L_{SEL} = 10\log \frac{1}{T_1} \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{p(t)}{p_r} \right]^2 dt = 10\log \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_p(t)}{10}} dt \quad (60)$$

Donde: $T_1 = 1,0$ s.

t_2-t_1 = tiempo total del suceso (s).

$L_p(t)$ = nivel de presión sonora en función del tiempo (dBA).

Si realizamos una medición de un suceso sonoro durante un tiempo total T (en s) ocurren n números de eventos, y si la intensidad media medida es \bar{I} (en W/m^2), la energía media por unidad de área (\bar{E}_s) se puede escribir como:

$$\bar{E}_s = \frac{\bar{E}}{S} = \bar{I} \cdot T$$

Si dividimos esta energía por unidad de área, por el número de eventos, obtenemos la energía media por unidad de área de cada evento (\bar{E}_{Sn}), decir:

$$\bar{E}_{Sn} = \frac{\bar{E}_s}{n} = \frac{\bar{I} \cdot T}{n} \quad (61)$$

Como la energía por unidad de área de referencia para 1,0 s y para 1 evento (E_{Sr}), es igual a:

$$E_{Sr} = \frac{I_r \cdot (1,0 \text{ s})}{1 \text{ evento}} = I_r \quad (62)$$

Dividiendo la ecuación 61 por la ecuación 62, se obtiene:

$$\frac{\bar{E}_{Sn}}{E_{Sr}} = \frac{\left(\frac{\bar{I} \cdot T}{n}\right)}{I_r} = \left(\frac{\bar{I}}{I_r}\right) \left(\frac{T}{n}\right)$$

Al aplicar el logaritmo de base diez a ambos términos y luego multiplicar por 10, resulta:

$$10 \log \left(\frac{\bar{E}_{Sn}}{E_{Sr}} \right) = 10 \log \left(\frac{\bar{I}}{I_r} \right) + 10 \log(T) - 10 \log(n) \quad (63)$$

Donde: $L_{SEL} = 10 \log \left(\frac{\bar{E}_{Sn}}{E_{Sr}} \right)$, es el nivel de exposición a ruidos aislados.

$L_{eq,T} = 10 \log \left(\frac{\bar{I}}{I_r} \right)$, es el nivel sonoro equivalente durante el tiempo T .

Por lo tanto, la ecuación 63 se puede escribir así:

$$\boxed{L_{SEL} = L_{eq,T} + 10 \log(T) - 10 \log(n)} \quad (64)$$

De la ecuación anterior se deduce que si los sucesos sonoros tienen la duración de 1,0 s, es decir, que T en segundos es igual al número de eventos n, el nivel sonoro equivalente será igual al nivel de exposición de ruidos aislados.0.

Si partimos de la ecuación 64, podemos encontrar otra forma de escribir la relación entre $L_{eq,T}$ y L_{SEL} . Esto es:

$$L_{eq,T} = L_{SEL} + 10\log(n) - 10\log(T)$$

$$\frac{L_{eq,T}}{10} = \frac{L_{SEL}}{10} + \log(n) - \log(T)$$

$$L_{eq,T} = 10\log\left(\frac{1}{T} n \cdot 10^{\frac{L_{SEL}}{10}}\right)$$

Esto supone que $10^{\frac{L_{SEL}}{10}}$ se ha sumado n veces, por lo que finalmente podemos escribir que:

$$L_{eq,T} = 10\log\left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^{i=n} 10^{\frac{L_{SELi}}{10}}\right) \quad (65)$$

Ejemplo 66: El nivel sonoro equivalente en 1,0 hora, medido en una calle por la que circularon 200 automóviles, fue de 64,2 dBA. Determina el nivel de exposición sonora aislado de un automóvil circulando por esta calle.

Utilizando la ecuación 64, tenemos:

$$L_{SEL} = L_{eq,T} + 10\log(T) - 10\log(n)$$

$$L_{SEL} = 64,2 + 10\log(3600) - 10\log(200)$$

$$L_{SEL} = 76,8 \text{ dBA}$$

Ejemplo 67: El nivel de exposición sonora aislado de un vehículo circulando por una avenida fue de 77,9 dBA, y si el nivel sonoro equivalente en la avenida, medido durante una hora, fue de 69,1 dBA; determina el número de vehículos que circularon por la avenida en la hora en que se realizó el estudio.

Despejando el número de sucesos aislados (n) de la ecuación 64, resulta:

$$L_{SEL} = L_{eq,T} + 10\log(T) - 10\log(n)$$

$$10\log(n) = L_{eq,T} - L_{SEL} + 10\log(T)$$

$$\log(n) = \frac{L_{eq,T} - L_{SEL} + 10\log(T)}{10}$$

$$n = 10^{\left[\frac{L_{eq,T} - L_{SEL} + 10 \log(T)}{10} \right]} \quad (66)$$

$$n = 10^{\left[\frac{69,1 - 77,9 + 10 \log(3 \cdot 600)}{10} \right]}$$

n = 475 vehículos

12. COSTO ECONÓMICO DEL RUIDO

El ruido ocasiona gastos económicos debido a: pérdida del bienestar de los residentes de zonas con altos niveles de presión sonora equivalentes; tratamientos médicos a personas que producto de él sufren trastornos auditivos; depreciación de viviendas afectadas por el ruido; remodelaciones que se incorporan a las viviendas para aislarlas acústicamente; disminución de la eficiencia de las personas para desarrollar un trabajo; ausencias laborales; pérdidas de ecosistemas; baja producción de animales de cría, etc. En este libro, el costo económico del ruido lo evaluaremos tomando en cuenta cinco componentes: pérdida del bienestar, costos a la salud, costo por discapacidad auditiva, depreciación de la vivienda y costo por protección contra el ruido.

12.1. Pérdida del Bienestar

Para evaluar el costo económico que causa el ruido a la pérdida del bienestar, se debe realizar una encuesta en donde se indague el monto que las personas están dispuestas a pagar por recuperar la tranquilidad perdida. En términos generales, en los países latinoamericanos, los habitantes de las viviendas que están expuestas a un nivel sonoro excesivo están dispuestos a pagar anualmente, para que se les reduzca el nivel de presión sonora equivalente a lo que establece la norma, la cifra de:

$$C_{DP} = 1,2 \times 10^{-3} \cdot (\text{PIB}_{\text{Cap}} \cdot \text{dBA}_{\text{EN}}) \quad (67)$$

Donde: C_{DP} = cantidad dispuesta a pagar anualmente por residencia por dBA en exceso USA \$).

PIB_{Cap} = Producto Interno Bruto per cápita del país (USA \$).

dBA_{EN} = el nivel sonoro por encima de la normativa legal establecida (dBA).

12.2. Costo a la Salud

El costo a la salud producido a la población por el exceso de ruido (C_{Sa}) está distribuido en: costos por atención médica (C_{AM}), costos por equipos especializados de audiometría (C_{EE}), costos por medicamentos (C_{Me}) y costos por hospitalizaciones (C_{Ho}). Es decir que los gastos en que deben incurrir tanto las personas afectadas por el ruido, como el Estado, se pueden expresar como:

$$C_{Sa} = C_{AM} + C_{EE} + C_{Me} + C_{Ho} \quad (68)$$

12.3. Costo por Discapacidad Auditiva

En términos generales estimamos que, en los países latinoamericanos, las pérdidas por discapacidad auditiva media por personas afectadas, están en el orden de \$ 1 000,00 por año. De aquí que el costo por país debido a la discapacidad auditiva, producto de las personas que la han adquirido por exposición al ruido, es igual a:

$$C_{DA} = 1000 \cdot (P_{DAA}) \quad (69)$$

Donde: C_{DA} = el costo anual por país debido a la discapacidad auditiva anual, producto de las personas que la han adquirido por exposición al ruido (en USA \$)

P_{DAA} = el número de personas con discapacidad auditiva adquirida por exposición al ruido.

12.4. Depreciación de la Vivienda

El índice medio de depreciación de las viviendas debido a la exposición a ruidos es de 1,0 % de su valor por dBA que exceda a la norma. De aquí que una vivienda que tiene valor V_V sin considerar el impacto sonoro y que está expuesta a un nivel sonoro por encima de la normativa legal de dBA_{EN} , tendrá una depreciación (C_{DV}) de:

$$C_{DV} = (0,01) \cdot (V_V \cdot dBA_{EN}) \quad (70)$$

12.5. Costo por Protección Contra el Ruido

Debido a los altos valores de los niveles de presión sonora equivalentes a los que están sometidos muchas viviendas, algunos de sus propietarios optan por minimizar el ruido en su interior, aislando acústicamente la residencia. El costo estimado adicional en materiales, en nuestros países latinoamericanos, si se desea construir una residencia con propiedades acústicas aislantes (2 puertas y 6 ventanas) es del orden de \$ 1 000,00 por vivienda.

Ejemplo 68: En un país latinoamericano con Producto Interno Bruto per cápita de \$ 13 000,00, se encuentra una vivienda de \$ 60 000,00 que está sometida, en su interior, a un nivel sonoro de 59,0 dBA. Si la norma en este país señala que los niveles sonoros no pueden exceder en el interior de la vivienda los 55,0 dBA, determina:

1. La cantidad anual que los residentes de esta vivienda están dispuestos a pagar para reducir el nivel sonoro a lo que establece la norma.

2. Si en este país existen 3 000 personas con discapacidad auditiva adquirida por exposición a niveles sonoros altos, ¿cuál es el costo por discapacidad auditiva de este país?

3. ¿Cuál es la depreciación de esta vivienda?

1. La cantidad anual que los residentes de esta vivienda están dispuestos a pagar para reducir el nivel de presión sonora a la norma establecida, está dada por la ecuación 67. Por consiguiente:

$$C_{DP} = 1,2 \times 10^{-3} \cdot (\text{PIB}_{\text{Cap}} \cdot \text{dBA}_{\text{EN}})$$

Como el PIB de este país es \$ 13 000,00 y la vivienda está a 4,0 dBA por arriba de lo establecido legalmente, se tiene que los residentes de esta vivienda están dispuestos a pagar anualmente, para llevar el nivel de presión sonora equivalente al valor legalmente aceptable, la cantidad de:

$$C_{DP} = (1,2 \times 10^{-3}) \cdot (13\,000,00)(4,0) = \$ 62,40$$

2. El costo por discapacidad auditiva de este país está dado por la ecuación 69. Esto es:

$$C_{DA} = 1000 \cdot (P_{\text{DAA}})$$

Como el número de personas con discapacidad auditiva adquirida por exposición a niveles sonoros inapropiados en este país es de 3 000, obtenemos que:

$$C_{DA} = 1000 \cdot (3\,000) = \$ 3\,000\,000,00$$

3. La depreciación de esta vivienda está dada por la ecuación 70. Es decir:

$$C_{DC} = (0,01) \cdot (V_v \cdot \text{dBA}_{\text{EN}})$$

$$C_{DC} = (0,01) \cdot (60\,000)(4,0) = \$ 2\,400,00$$

Ejemplo 69: ¿Cuál es el costo anual estimado debido al ruido en la Comunidad Económica Europea?

El costo anual mínimo estimado en la Comunidad Económica Europea debido al ruido es de \$ 20 000 millones.

13. EL SONÓMETRO

El sonómetro es el instrumento que se utiliza para medir el nivel de presión sonora. Los sonómetros están formados por:

- Un micrófono: convierte la presión sonora del aire en señales eléctricas. Existen micrófonos que tienen mayor sensibilidad si la onda incide frontalmente (0°), mientras que en otros la sensibilidad es máxima si las ondas sonoras inciden perpendicularmente (90°).

- Un preamplificador y un amplificador: el circuito preamplifica e inmediatamente amplifica la señal eléctrica que sale del micrófono para facilitar su caracterización.
- Circuitos de ponderación de frecuencia: en ellos las señales son ponderadas de la misma forma como lo haría el oído humano.
- Control de nivel: la señal es convertida en una señal continua proporcional al valor de su raíz cuadrática media.
- Integradores de tiempo: aquí se procesa la señal dependiendo de las fluctuaciones del sonido.
- Dispositivo de lectura: puede ser una pantalla digital o una interface conectada a un computador.

13.1. Precisión del Sonómetro

La precisión de un sonómetro está asociada con su incertidumbre estándar (u_s). Bajo este criterio, los sonómetros pueden clasificarse como:

- Tipo 0: sonómetros de laboratorio con: $u_s \leq 0,1$ dB
- Tipo 1: sonómetros de precisión con: $0,1 < u_s \leq 1,0$ dB
- Tipo 2: sonómetros de uso general con: $1,0 < u_s \leq 2,0$ dB
- Tipo 3: sonómetros de reconocimiento con: $2,0 < u_s \leq 4,0$ dB

13.2. Ponderación

La ponderación de frecuencias es la respuesta del sonómetro en función del rango de frecuencias de la onda que incide sobre el micrófono. Los cuatro tipos de ponderación más utilizados son:

- Ponderación A. Fue creada inicialmente para medir ruidos de intensidad baja. Es la más utilizada, ya que se asemeja a la respuesta del oído humano, por lo que es la que se recomienda para realizar las mediciones sonoras en leyes y reglamentos contra el ruido.
- Ponderación B. Fue creada para modelar la respuesta del oído humano a intensidades medias. Sin embargo, en la actualidad es muy poco empleada.
- Ponderación C. Se creó para modelar la respuesta del oído ante sonidos de gran intensidad.
- Ponderación D. Es utilizada para medir los niveles sonoros provocados por los aviones.
- Ponderación U. Se aplica para medir niveles de sonidos audibles en presencia de ultrasonidos.

La *ponderación temporal* es el tiempo de respuesta que el sonómetro utiliza para realizar una medida y la inmediatamente siguiente. Las ponderaciones en tiempo más utilizadas son:

- Ponderación S (*slow* o lenta). El instrumento responde lentamente ante los eventos sonoros. El tiempo de respuesta entre una medida y la siguiente es 1,0 s.
- Ponderación F (*fase* o rápida). El tiempo entre una medida y la siguiente es 0,125 s.
- Ponderación I (*impulse* o impulso). El tiempo entre una medida y la siguiente es 35 ms.
- Ponderación P (*peak* o pico). El tiempo entre una medida y la siguiente está entre 50 μ s y 100 μ s.

La selección de la ponderación temporal, dependerá del tipo de ruido que se vaya a estudiar. Si el ruido es de tipo:

- Continuo constante (sus fluctuaciones no exceden los 6 dBA) se puede utilizar la ponderación S o F.
- Continuo fluctuante (sus fluctuaciones son mayores a los 6 dBA) se puede utilizar la ponderación S, aunque sería preferible hacer las mediciones con la ponderación F.
- Intermitente (presenta fluctuaciones seguidas de interrupciones) se debe utilizar la ponderación F.
- Impulsivo (los niveles sonoros aumentan y decaen rápidamente) se debe utilizar la ponderación I o P.

13.3. Dosímetros

Los dosímetros son pequeños sonómetros de bajo peso y volumen, diseñados para ser llevados por una persona mientras realiza sus actividades diarias. Permiten determinar el porcentaje de la dosis sonora diaria máxima permitida a la que está sometida la persona y el nivel de presión sonora equivalente durante el tiempo que duró la medición.

14. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE LOS NIVELES SONOROS

Los puntos más importantes que se deben considerar al momento de realizar medidas del nivel sonoro son:

1. La humedad relativa no debe exceder 95 %.
2. La temperatura ambiental debe estar entre -10 °C y 50 °C.
3. No se debe medir cuando esté lloviendo, ya que la lluvia aporta ruido al ambiente.
4. La rapidez del viento no debe exceder los 5 m/s. Siempre que se realicen mediciones en el exterior se debe utilizar la “pantalla antiviento”, para evitar que el viento que incide sobre el micrófono genere ruidos que interfieran en los resultados.
5. Antes y después de iniciar cada proyecto de medición, se debe verificar la calibración del sonómetro utilizando el pistófono y ajustar el sonómetro, de ser necesario. Si la variación del nivel sonoro al terminar la medición es mayor de $\pm 0,5$ dB, se deben descartar las medidas.

6. Realizar las medidas programando el sonómetro en ponderación “A” y respuesta rápida o lenta de acuerdo a la necesidad. Los resultados deben darse utilizando el nivel de presión sonora equivalente (L_{eq}).
7. Colocar el sonómetro en un trípode a una altura de 1,5 m. Si la medición se va a realizar entre edificios mayores a los 8,0 m, el micrófono se debe colocar a 4,0 m de altura.
8. El sonómetro debe colocarse por lo menos a 2,0 m de las superficies reflectantes verticales, paredes, postes, árboles, arbustos, etc.
9. La persona que vaya a realizar la medida se debe colocar al menos a 1,5 m de la parte posterior del sonómetro.
10. El tiempo de medición dependerá del propósito de la medida, pero se recomienda que este no sea inferior a 3,0 min.
11. Para realizar un mapa de isolíneas sonoras se recomienda realizar por lo menos 9 medidas, distribuidas en el área de estudio.
12. Se debe anotar en el informe: la fecha y hora del estudio, las condiciones climáticas, el entorno del lugar en donde se realiza (urbano o rural), las fuentes de ruido más importantes (tráfico vehicular, industrias, actividades antrópicas, etc.), característica del ruido (continuo constante, continuo fluctuante, intermitente, impulsivo), el ruido de fondo medio y su incertidumbre.

15. CONTROL Y MITIGACIÓN DEL RUIDO

La gestión integral de la calidad ambiental establece protecciones sanitarias y un ambiente óptimo para el desarrollo de actividades industriales. Además, incrementa la calidad de vida de los ciudadanos y vela por un alto nivel de protección al ambiente.

15.1. Gestión del Ruido

El ruido es una de las consecuencias inherentes a la actividad productiva. Las políticas que se apliquen en un centro industrial tendrán los criterios de prevención, de control, saneamiento y reducción eficaz del ruido. El gestor de la calidad ambiental debe procurar:

- Reducir afectaciones auditivas y del sistema nervioso de los trabajadores de la empresa.
- Reducir costos por baja laboral y ausentismo.
- Disminuir sanciones por incumplimiento de reglamentaciones.
- Demostrar que en el análisis costo/beneficio, la prevención de problemas ocasionados por el ruido mejora la economía del sistema productivo.
- Mejorar la imagen corporativa, promocionando la mejora continua y un ambiente seguro de trabajo.
- Procurar y/o mantener la certificación ISO de gestión ambiental.

15.2. La Zonificación de Áreas con Impacto Sonoro

La zonificación de acuerdo a áreas de impacto sonoro permite establecer la relación entre el tipo de actividad, el ruido generado, ruido soportado y el nivel de presión sonora equivalente permitido. Es por ello que es preciso zonificar las áreas ruidosas para facilitar la gestión del ruido. La gestión integrada implica organizar áreas según la magnitud del nivel sonoro y determinar las medidas de control y mitigación del ruido.

15.2.1. Zonas de riesgo

La gestión del ruido como herramienta de la calidad ambiental permite planificar en tiempo y espacio. Se deben delimitar las zonas de acuerdo con su actividad y el nivel sonoro que los trabajadores reciben en ella, para así determinar, de acuerdo a la legislación, el tiempo que un trabajador puede permanecer en esta zona para que no se vea amenazada su salud.

Para realizar la zonificación de acuerdo al nivel sonoro, se puede realizar un mapa de la planta que muestre las isosuperficies sonoras y así revelar en qué áreas y secciones se deben aplicar las medidas correctivas. Es importante destacar que esta primera acción previene gastos por decisiones incorrectas, por ejemplo: protección auditiva inapropiada, silenciadores innecesarios, compra de equipos industriales inconvenientes, etc.

La zonificación es un instrumento de gestión que permite organizar sistemas documentarios, programas informáticos, modelos matemáticos de predicción y mejorar la comunicación con las autoridades fiscalizadoras. En la Figura 22 se muestra un ejemplo de un mapa de isosuperficies sonoras de una nave industrial y las actividades que en ella se realizan.

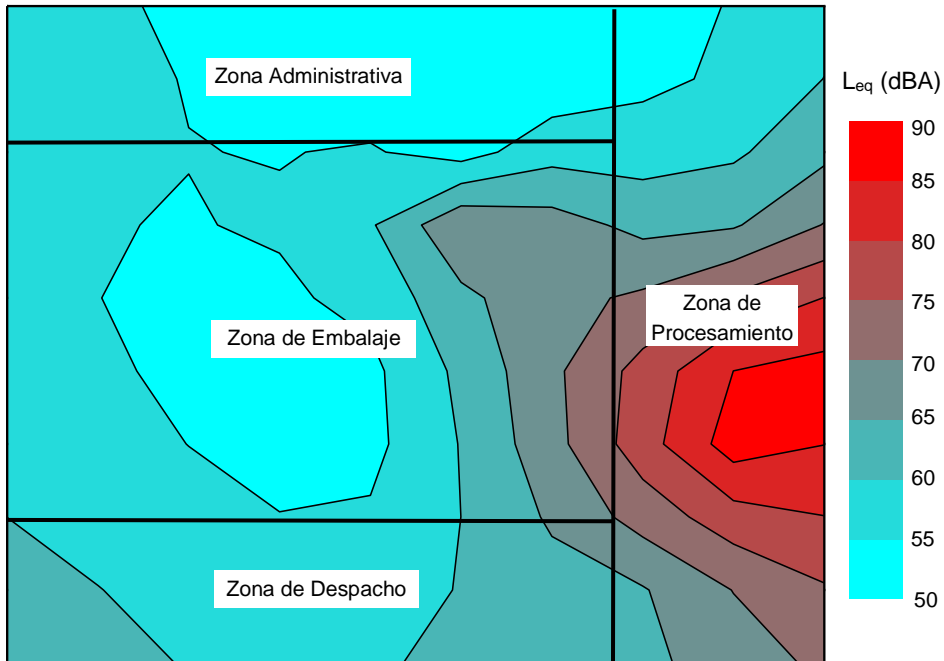


Fig. 22. Isosuperficies sonoras en una nave industrial.

15.2.2. Medidas preventivas luego de la zonificación

Las zonas sonoras deben estar señalizadas de acuerdo a su nivel de presión sonora. Se indicará cuáles son las áreas restrictivas debido al fuerte impacto sonoro y en cuales se hace obligatorio el uso de protectores auditivos. Las señalizaciones deben ser gráficas (directas, claras y evidentes) y de forma escrita. Las señalizaciones de uso obligatorio de protección auditiva incluyen a toda persona que ingrese a la zona de riesgo (operadores, mandos altos y medios, proveedores, visitantes e inspectores internos y externos).

15.3. Protección Auditiva

El uso de protectores auditivos debe ser la última medida para prevenir daños a la salud de un trabajador. La medida se debe implementar cuando la fuente emite ruido que no puede ser reducido a los límites permitidos y el trabajador debe exponerse. Se recomienda el uso de protectores auditivos para niveles de presión sonora equivalente, a partir de los 80 dBA.

La protección auditiva puede ser de dos tipos: tapones, que son colocados en el conducto auditivo externo; y cobertores u orejeras que cubren el pabellón auditivo y la zona que

rodea la oreja. Las características que deben poseer los protectores auditivos son: homologación internacional, atenuación sonora adecuada, comodidad, facilidad de colocación, durabilidad, bajo costo, higiene y ciclo verde.

La atenuación se define como la cantidad de sonido que el protector impide que llegue a los oídos, se expresa en dBA y varía en función de la frecuencia. Por lo general, un protector auditivo puede reducir el ruido entre 20 dBA y 40 dBA. En caso que el ruido supere los 105 dBA, se puede utilizar simultáneamente tapones y orejeras, lo que puede reducir de 30 dBA a 60 dBA el nivel de presión sonora equivalente.

Para determinar la atenuación sonora de un protector se utiliza el Rango de Reducción Sonora, caracterizado por las siglas NRR (*Noise Reduction Rating*). El NRR que es calculado por el fabricante indica un valor asociado a la reducción del ruido del protector auditivo. La ecuación que se utiliza para el cálculo del nivel efectivo de reducción (NER) es:

$$\text{NER} = L_{\text{eq}} + 7,0 \text{ dBA} - \text{NRR} \quad (71)$$

15.4. Plan de Sensibilización

El plan de sensibilización implica informar a todos los miembros de la empresa sobre los problemas del ruido, cómo prevenir sus molestias, sus efectos en el deterioro de la salud y en la productividad. Las campañas de sensibilización deben incluir mecanismos de auto evaluación para lograr determinar su efectividad. Se debe lograr que los trabajadores expuestos a altos niveles sonoros utilicen voluntariamente los protectores auditivos y tomen conciencia de que su uso es parte de la ecoseguridad y de la imagen corporativa de la empresa.

Los talleres de concienciación sobre los perjuicios del ruido han de ser continuos, dinámicos y participativos. Deben incluir la utilización correcta de los equipos de protección auditiva, los procedimientos para mantenimiento y limpieza. La alta gerencia de las empresas debe motivar campañas de sensibilización, controles médicos periódicos, incentivos y régimen de sanciones.

15.5. Monitoreos

La adecuada gestión del ruido implica un conveniente y permanente monitoreo de los sistemas de vigilancia y control del ruido. La Dirección de Seguridad e Higiene Laboral debe contar con inspectores internos que monitoreen el uso correcto de los protectores auditivos y demás normas de seguridad. Se deben elaborar o actualizar los mapas de ruido cada vez que se introduzcan cambios, modificaciones o instalación de nuevas actividades que alteren el estado del ruido.

15.6. Saneamiento Acústico

La alta gerencia mantendrá compromisos dirigidos al mejoramiento continuo. Esto implica adoptar tecnología de punta de cara a la comodidad en las condiciones laborales. Por ejemplo, se debe invertir en sistemas de acondicionadores del aire y ventiladores con sistemas silenciosos de funcionamiento. En las oficinas que son impactadas por el ruido, se deben colocar materiales absorbentes del ruido en paredes, vidrios, puertas, ventanas, pisos y techos.

Las ventanas con doble vidrio son una manera de mejorar el aislamiento acústico de un recinto; están formadas por dos vidrios sellados y separados por una cámara de aire. Otra forma de mejorar las condiciones acústicas de una habitación es la instalación de paredes con dos superficies (gypsum u otro material similar) y una cámara entre ellas de gomaespuma, algodón u otro material aislante; además, las paredes pueden ser forradas con telas gruesas o corcho. Una forma de aislar acústicamente un piso es a través de suelos flotantes; están formados por dos superficies de alta densidad con una lámina elastomérica intermedia. Los techos también pueden ser construidos de forma flotante, mediante planchas de gypsum o material afín, soportadas por una estructura suspendida con sostenes elásticos y rellenos con material aislante.

15.7. Prevención y Control del Ruido en Maquinarias

La medida preventiva de control de ruido se inicia por inspeccionar todas las máquinas que sean potenciales fuentes de ruidos molestos, para luego presentar las recomendaciones dirigidas a minimizar la emisión sonora. Además, se deben tomar medidas de control del ruido consistentes en evaluaciones periódicas de todas las máquinas con la finalidad de afinarlas, balancearlas y lubricarlas.

15.8. Documentación

Todas las medidas y actividades señaladas para el control y mitigación del ruido deben ser registradas y documentadas para el sistema de registro ambiental de la empresa. Se debe llevar un registro estadístico de la salud ocupacional de los trabajadores, su ausentismo, rendimiento y pruebas audiométricas. De igual manera, se debe mantener al día el mantenimiento preventivo de las maquinarias.

Ejemplo 70: En una factoría se determina que el nivel de presión sonora equivalente es de 89,0 dBA. Si se recomienda que los trabajadores que están expuestos a este nivel sonoro utilicen tapones expandibles con $NRR = 32$ dBA, ¿cuál será el nivel sonoro que percibirán los trabajadores cuando utilicen estos tapones?

Utilizando la ecuación 71, tenemos:

$$\text{NER} = L_{\text{eq}} + 7,0 \text{ dBA} - \text{NRR}$$

$$\text{NER} = 89,0 + 7,0 \text{ dBA} - 32 = 64 \text{ dBA}$$

16. ANÁLISIS DE CASOS REALES

A continuación se presenta un resumen de casos que hemos estudiado en la ciudad de Panamá (uso 17 en las coordenadas UTM). Sin embargo, pensamos que los factores con respecto a la contaminación acústica de esta ciudad presentan características similares a ciudades latinoamericanas con población de más de un millón de habitantes.

CASO 1: La Percepción del Ruido

Resulta relativamente fácil establecer si una persona se siente molesta por el ruido, pero lo difícil es cuantificar el grado de molestia. Este estudio consiste en la aplicación de una encuesta a 2 038 personas (50 % hombres y 50 % mujeres). Distribuidas así: Entre 15 años y 18 años de edad: 36 %, entre 18 años y 40 años de edad: 41 %, entre 41 años y 65 años de edad: 16 % y mayor a 65 años de edad: 7 %. La escolaridad de los encuestados fue: escuela primaria completa: 45 %, colegio secundario completo: 35 %, universidad completa: 20 %.

Pregunta 1: ¿Conoce el daño que causa el ruido a la salud? El 75 % de los encuestados contestaron afirmativamente, mientras que el 29 % señala no conocer el daño de este contaminante a la salud.

Las personas que no conocen los efectos del ruido a la salud están distribuidas así: El 35 % son personas entre 15 años y 18 años; el 29 % están entre 18 años y 40 años; el 21 % están entre 41 años y 65 años; y el 15 % son personas mayores a 65 años. El 46 % son personas con primaria completa, 33 % han cursado la secundaria completa; y 21 % son personas con universidad completa.

Pregunta 2: ¿Existen ruidos que le molesten? El 92 % de los encuestados señalan que sí. El 8 % menciona que no sienten molestias debido al ruido.

Las personas que no sienten molestias debido al ruido están distribuidas así: El 62 % son hombres. El 58 % son personas entre 15 años y 18 años, 19 % están entre 18 años y 40 años, el 15 % están entre 41 años y 65 años y el 8 % son personas mayores a 65 años. El 65 % son personas con primaria completa, el 25 % han cursado la secundaria completa y el 10 % son personas con universidad completa.

Pregunta 3: ¿Qué tipo de ruido es el que más le molesta?

El 33 % de las personas entrevistadas señala que el ruido que más les molesta es el causado por automóviles y camiones. El 16 % indica que es el generado por la TV y equipos de sonido de los vecinos. El 14 % indica que es el causado por reparación de las calles. El 12 % enfatiza que el ruido que más les molesta es el causado por las alarmas contra robos de automóviles, residencias, y comercios. El 9 % señala que es el causado por cantinas y bares. El 8 % indican que es el debido a construcciones de viviendas y edificios. El 7 % debido a vendedores ambulantes, y el 1 % de los encuestados indican otros ruidos (Figura 23).

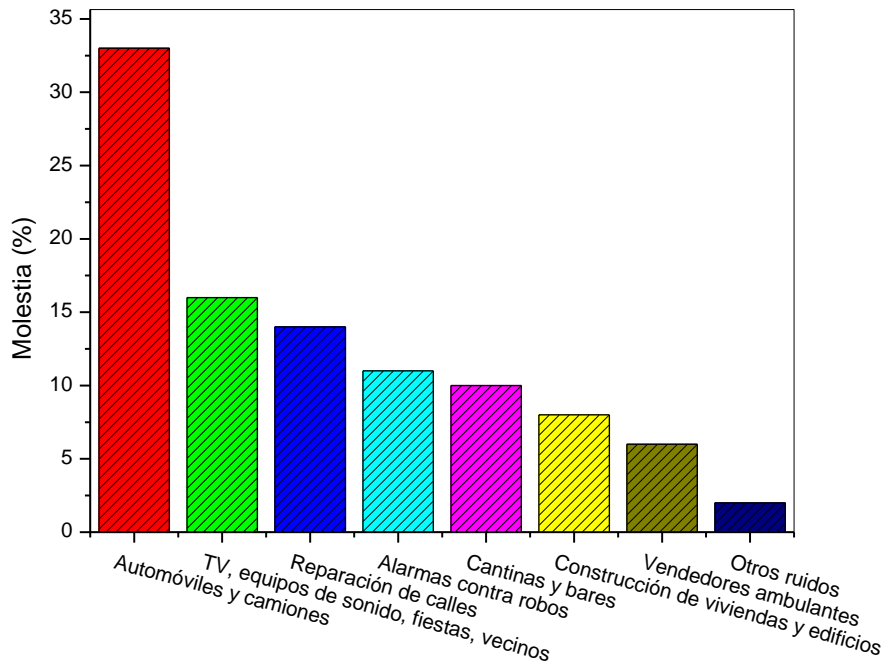


Fig. 23. Ruidos molestos para la población.

Pregunta 4: ¿Cuáles son las horas del día en que siente mayor molestia debido al ruido?

El 33 % siente mayor molestia entre las 12:00 m y las 6:00 p.m. El 29 % siente mayor molestia entre las 10:00 p.m. y las 6:00 a.m. El 20 % siente mayor molestia entre las 6:00 p.m. y las 10:00 p.m. El 18 % de las personas entrevistadas siente mayor molestia entre las 6:00 a.m. y las 12:00 m.

Pregunta 5: ¿Sabe dónde debe poner su queja si considera que un ruido es excesivo? El 79 % de los encuestados no sabe dónde poner la queja debido a un ruido excesivo.

Las personas que no saben dónde poner la queja por ruido excesivo se distribuyen así: el 51 % son hombres; el 27 % son personas entre 15 años y 18 años; el 27 % están entre 18 años y 40 años; el 23 % están entre 41 años y 65 años, y el 23 % son personas mayores de 65 años. El 35 % son personas con primaria completa; el 35 % han cursado la secundaria completa, y el 30 % son personas con universidad completa.

Pregunta 6: ¿Conoce algún amparo legal a que pueda recurrir al presentar su queja?

El 87 % de las personas encuestadas no conoce ningún amparo legal al que apelar cuando desea poner la queja por ruidos excesivos.

Las personas que desconocen los amparos legales están distribuidas así: El 51 % son hombres. El 26 % son personas entre 15 años y 18 años; el 26 % están entre 18 años y 40 años; el 25 % están entre 41 años y 65 años, y el 23 % son personas mayores de 65 años. 34 % son personas con primaria completa; el 34 % han cursado la secundaria completa, y el 32 % son personas con universidad completa.

Conclusiones

- La mayoría de los habitantes de la Ciudad de Panamá sí conocen los efectos del ruido sobre la salud. Las personas entre 15 años y 18 años y con formación hasta la primaria son los que menos conocen los efectos del ruido sobre la salud.
- La mayoría de los habitantes de la Ciudad de Panamá considera que sí existen ruidos que les molesten. Los jóvenes varones entre 15 años y 18 años, que han cursado hasta la primaria completa, son los que menos molestia sienten debido al ruido.
- Las personas mayores de 65 años, con estudios secundarios o universitarios, son los que más les molesta el tráfico vehicular.
- Los hombres entre los 15 años y 40 años con estudios secundarios completos son los que predominantemente sienten molestias entre las 12:00 m hasta las 6:00 p.m.
- Las personas con edades comprendidas entre los 15 años y 40 años, con formación primaria o secundaria, son mayoritariamente los que más desconocen dónde poner sus quejas en caso que un ruido les moleste.
- No hay diferencia significativa ni por sexo, ni por edad, ni por grado de escolaridad, entre las personas que no saben a qué amparo legal recurrir para poner su queja.

CASO 2: Ruidos en la Ciudad

En este trabajo se estudian los niveles sonoros en un sector del área urbana de la Ciudad de Panamá (5,0 km²), que concentra gran cantidad de centros hospitalarios, educativos,

habitacionales y religiosos. Se midieron los niveles sonoros en 100 puntos durante un año.

Los niveles sonoros se midieron utilizando un sonómetro portátil con filtro de atenuación A y respuesta lenta. Las medidas se realizaron en tres horarios del día: 6:00 a.m. – 7:00 a.m. (mañana), 12:00m – 1:00 p.m. (tarde) y de 10:00 p.m. – 11:00 p.m. (noche) en los 100 puntos seleccionados. El tiempo de medición fue de 3 minutos en cada ocasión, obteniéndose el nivel de presión sonora equivalente.

Resultados

En la Figura 24, se muestra la variación de los niveles de presión sonora equivalente medido en la parada de autobuses del Hospital del Seguro Social (660855 m Este, 993019 m Norte) el día 21 de junio del año del estudio. Se determinó que los niveles de presión sonora equivalente estaban por arriba de los 70 dBA, entre las 5:00 horas y las 23:00 horas. Mientras que sus niveles más bajos estaban entre las 24:00 horas y las 4:00 horas.

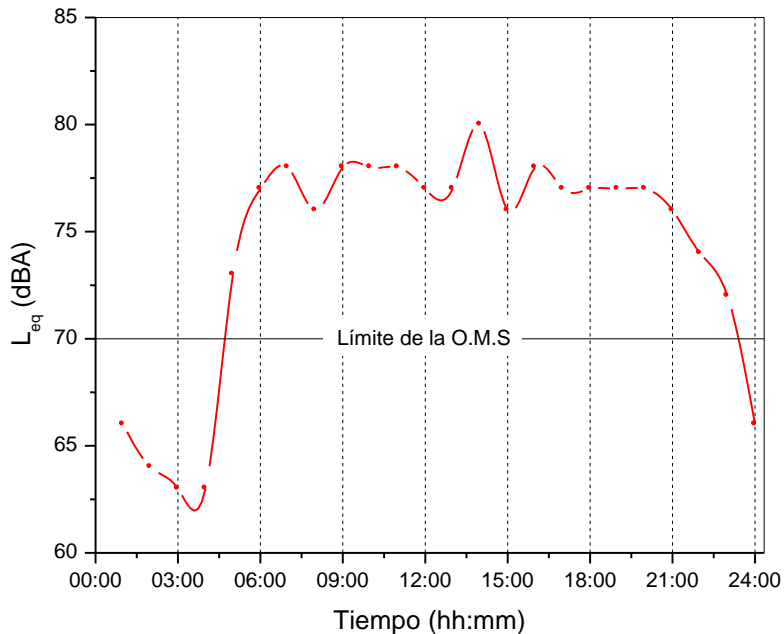


Fig. 24. Nivel sonoro en el HSS el 21 de junio.

En la Figura 25 se presenta la variación de los niveles de presión sonora equivalente, medidos en la parada del Hospital del Seguro Social (HSS), en la semana del 18 junio al 24 de junio. Las pruebas estadísticas realizadas revelan que sí hay diferencias significativas en el comportamiento de los niveles de presión sonora equivalente de la mañana, la tarde y la noche, durante los siete días de la semana.

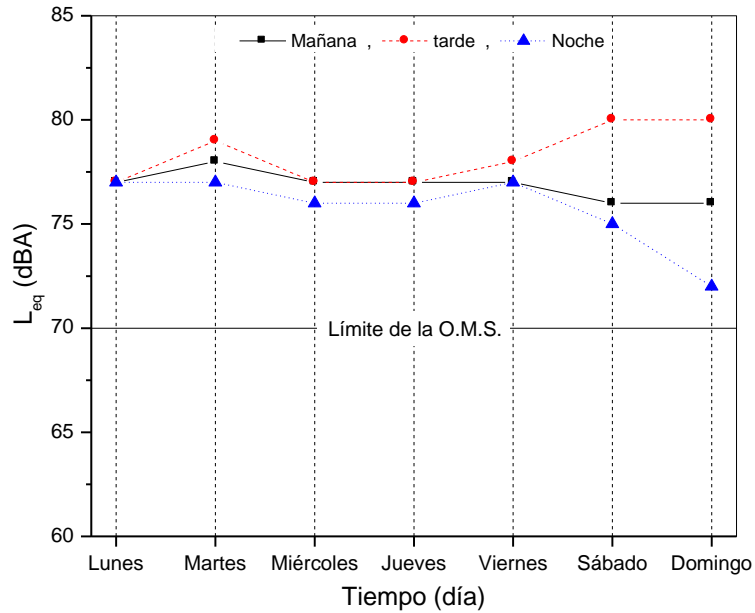


Fig. 25. Nivel sonoro en el HSS durante la semana del 18 al 24 de junio.

Las pruebas estadísticas ANOVA, realizadas a los resultados obtenidos durante el año de estudio, revelan que los niveles de presión sonora equivalente medidos durante la tarde son significativamente diferentes con respecto a los resultados de la noche (Figura 26).

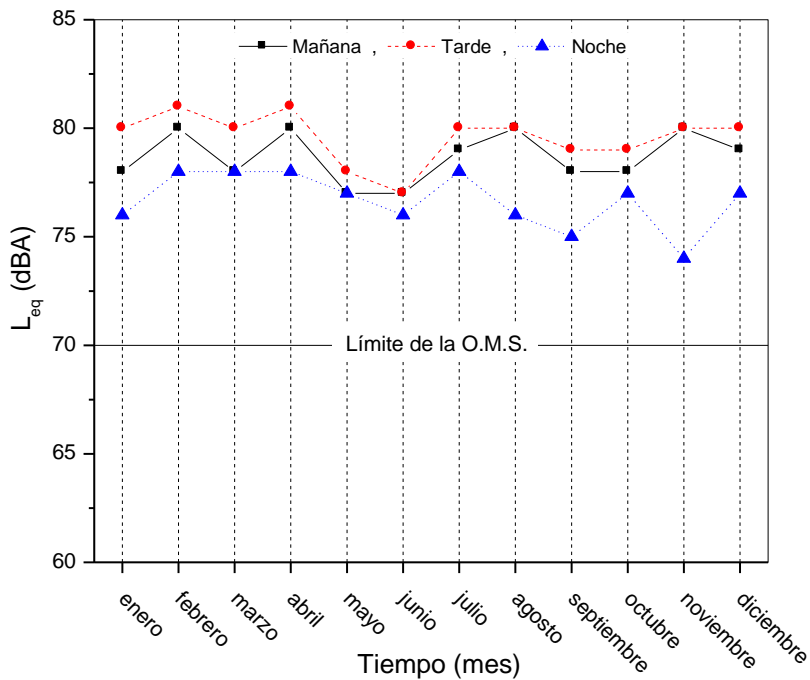


Fig. 26. Nivel sonoro en el HSS durante un año.

En las figuras 27, 28 y 29 se presentan los mapas de superficie de los niveles sonoros promedio en el área de estudio en la ciudad de Panamá. Se puede observar que el mapa de la tarde es el que presenta los niveles de presión sonora equivalente más altos, mientras que el de la noche presenta los niveles más bajos.

En la Figura 30 se muestra la imagen de satélite del área de estudio sobrepuesta con las isolíneas acústicas producto de ajuste mediante el método de interpolación de alta resolución utilizando el programa Surfer.

Conclusiones

- El nivel de presión sonora equivalente día-noche medido en la parada de autobuses del Hospital del Seguro Social, durante el día 21 de junio fue de 77,7 dBA.
- El nivel de presión sonora equivalente medio en la parada del Hospital del Seguro Social durante la semana del 18 de junio al 24 de junio fue de: 77,0 dBA.
- El nivel de presión sonora equivalente medio en la parada del Hospital del Seguro Social durante un año fue: 78,3 dBA.
- El área de estudio de la Ciudad de Panamá está expuesta: desde las 6:00 de la mañana hasta las 7:00 de la mañana a niveles de presión sonora equivalente de 71,0 dBA; desde las 12:00 m a la 1:00 p.m. a 72,4 dBA y desde las 10:00 p.m. a las 11:00 p.m. a 68,8 dBA.
- En términos generales, podemos señalar que los 5,0 km² estudiados en la Ciudad de Panamá están expuestos durante todo el año y las 24 horas del día a un nivel de presión sonora equivalente de 70,8 dBA \pm 0,3 dBA; valor que rebasa lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (O.M.S.) para el ruido urbano, que es de 70 dBA.
- La evolución de los niveles sonoros, el rango de las frecuencias en que ocurren y la correlación con los niveles de vibración que hemos realizado, señalan que la mayor fuente de ruido y molestia es el tránsito rodante.

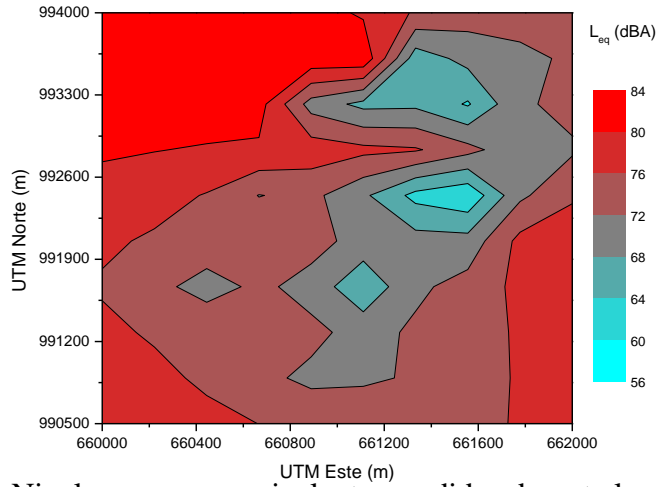


Fig. 27. Niveles sonoros equivalentes medidos durante la mañana.

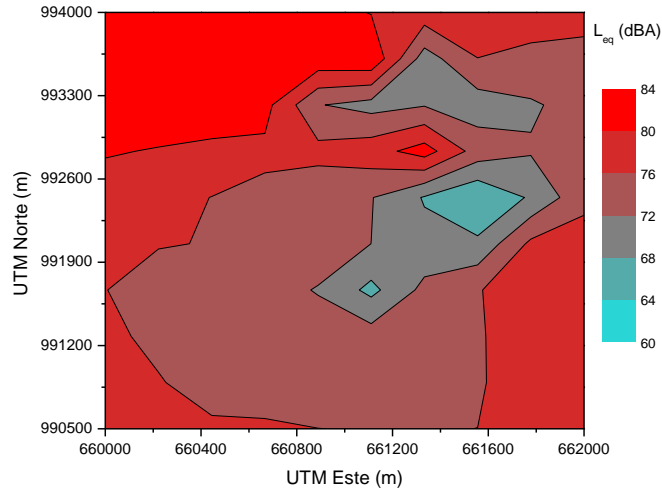


Fig. 28. Niveles sonoros equivalentes medidos durante la tarde.

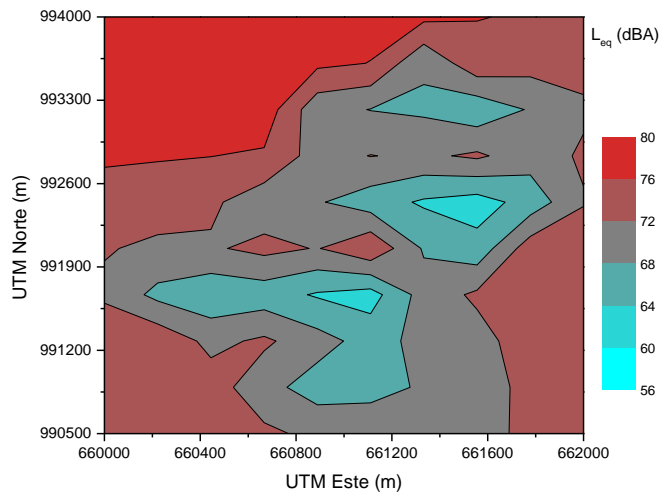


Fig. 29. Niveles sonoros equivalentes medidos durante la noche.



Fig. 30. Isolíneas acústicas sobre imagen de satélite del área de estudio.

CASO 3: Ventiladores de Aire de una Casa de Máquina

Una fuente importante de ruido son los equipos de ventilación. Para el caso de una hidroeléctrica, su objetivo es la de recircular el aire tomando aire del exterior e inyectándolo a la casa de máquina, situada a varias decenas de metros bajo tierra.

En el primer estudio se encontró que los niveles de presión sonora equivalente en la zona exterior, frente a los ventiladores, sobrepasaban los límites permisibles. Debido a esto, se recomienda la instalación de silenciadores que atenuasen el ruido y disminuyesen el impacto sonoro. Un año después, la empresa instala los silenciadores de los ventiladores y se realizan nuevamente las mediciones para medir la eficiencia de estos.

Resultados

En la Figura 31 se muestra el gráfico de isosuperficies sonoras (sin silenciadores en los ventiladores), en donde se aprecia que los niveles de presión sonora equivalente son altos. Allí, el ruido de fondo es $(59,9 \pm 1,6)$ dBA y el nivel sonoro medio en el área de estudio fue de $(73,2 \pm 1,9)$ dBA. En la Figura 32 se muestra la gráfica de isosuperficies, pero ahora con los silenciadores instalados en los ventiladores. Bajo esta nueva condición, el ruido de fondo se situó en $(49,1 \pm 1,2)$ dBA y el nivel de presión sonora equivalente en el área de estudio fue de $(57,8 \pm 1,3)$ dBA.

Conclusiones

- El sistema de silenciadores en los ventiladores de la casa de máquinas redujo significativamente el impacto sonoro, al mantener el nivel sonoro a 50 m de distancia de la fuente en 55 dBA.
- Gracias a los silenciadores, el nivel de presión sonora equivalente en las oficinas de la empresa próxima a los ventiladores se encuentra en 49 dBA, por lo que está dentro de los límites permitidos.
- La instalación de silenciadores a los ventiladores ha hecho disminuir el nivel sonoro medio en el área de estudio en: $(15,4 \pm 3,2)$ dBA.

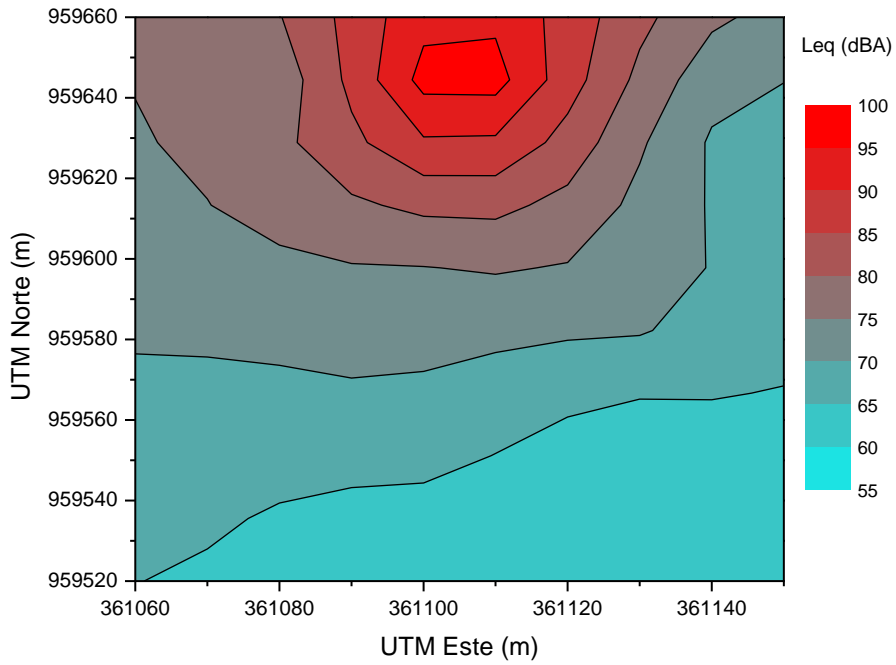


Fig. 31. Impacto sonoro de ventiladores sin silenciadores.

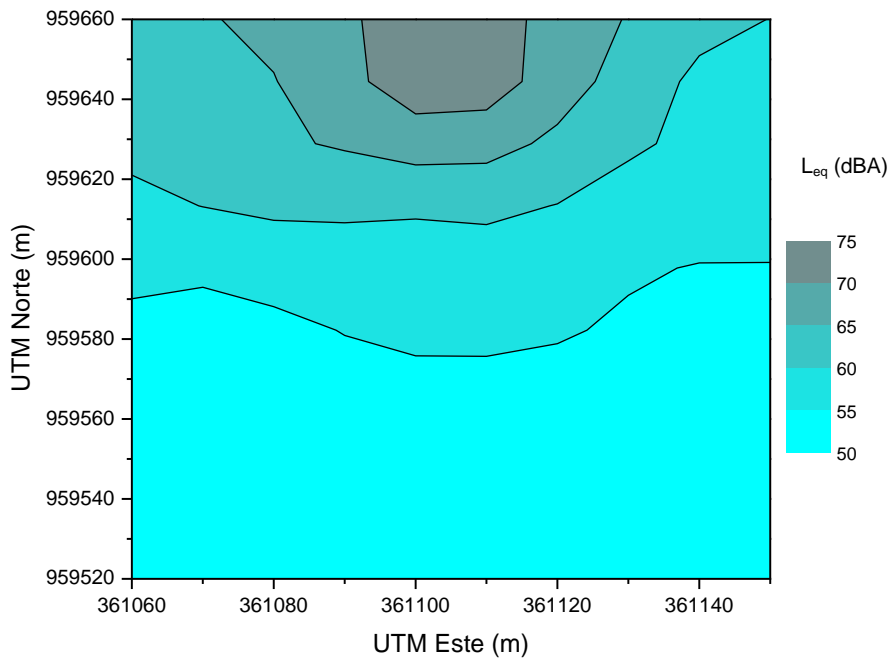


Fig. 32. Impacto sonoro de ventiladores con silenciadores.

CASO 4: Sistema de Acondicionador de Aire de un Hotel

Para determinar los niveles de presión sonora equivalente que produce el sistema de acondicionador de aire de un hotel durante la noche, se realizaron mediciones *in situ* en el área de mayor impacto auditivo, entre las 10:00 p.m. y las 11:00 p.m. Se realizaron medidas con el sistema de acondicionador de aire apagado y posteriormente se efectuaron las medidas con el sistema en funcionamiento. En vista de que los niveles de presión sonora equivalente resultaron estar por encima de la norma, se recomendó modernizar el sistema de acondicionador de aire del hotel por un sistema moderno que incluyera silenciadores. Cuatro meses después, el hotel instaló un nuevo sistema de acondicionador de aire, y se llevaron a cabo nuevamente las mediciones.

Resultados

El ruido de fondo durante la noche en esta área fue de $(54,7 \pm 1,0)$ dBA (ver Figura 33). En términos generales, podemos señalar que el sistema de acondicionador que poseía originalmente el hotel producía, en el área de estudio, $(73,1 \pm 1,9)$ dBA (ver Figura 34); mientras que el nuevo sistema de acondicionador de aire produce $(64,3 \pm 2,3)$ dBA (ver Figura 35).

Conclusión

- Considerando que las viviendas próximas al hotel se ubican en las coordenadas UTM (664600-664676) Este y (993897-993820) m Norte, esquina superior izquierda de los gráficos, podemos señalar que el nivel sonoro medio en esta zona, producto del nuevo sistema de acondicionador de aire, se redujo de $(68,6 \pm 1,6)$ dBA a $(55,5 \pm 0,7)$ dBA.
- El nuevo sistema de acondicionador de aire del hotel ha disminuido el nivel de presión sonora frente a las residencias, durante la noche, en $(13,1 \pm 2,3)$ dBA.

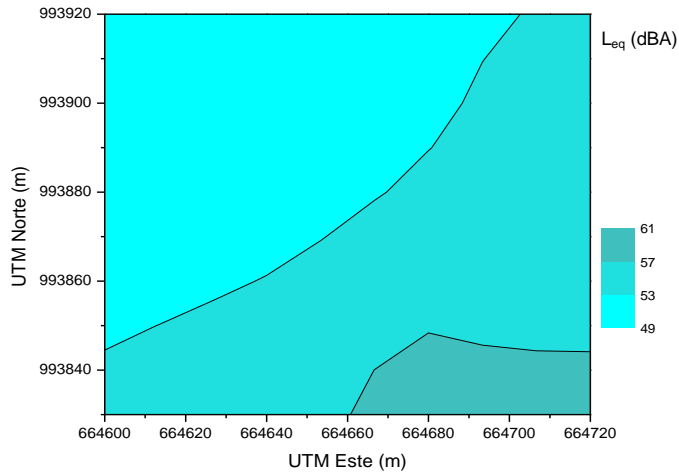


Fig. 33. Isosuperficies sonoras con el sistema de acondicionador de aire apagado.

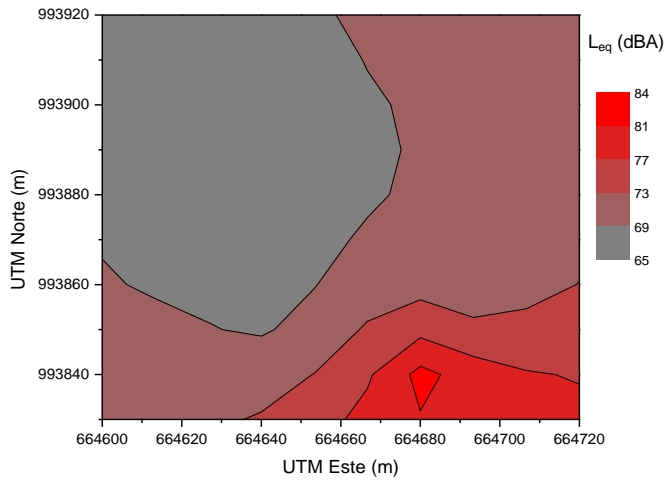


Fig. 34. Isosuperficies sonoras con el viejo sistema acondicionador en funcionamiento.

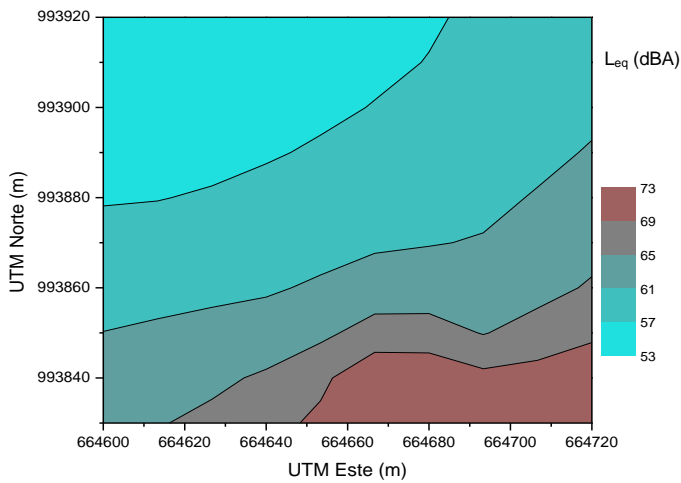


Fig. 35. Isosuperficies sonoras con el nuevo sistema acondicionador en funcionamiento.

CASO 5: Puerto en la Salida del Canal de Panamá

Este estudio tenía como objetivo el determinar el efecto sonoro causado por la actividad de trasvase y acomodo de contenedores de un futuro puerto ubicado en la costa del Pacífico del Canal de Panamá. Para esto se midieron los niveles de presión sonora equivalente durante el día y durante la noche en el área de impacto acústico del futuro puerto y posteriormente se simuló el ruido que generaría esta nueva actividad en la zona y se sumó al ruido ya existente.

La principal fuente de ruido en un puerto es la actividad de carga y descarga de contenedores, por lo que en esta simulación se utilizaron niveles de intensidad sonora similares a los que hay en puertos ya existentes en el área. La simulación matemáticamente se realizó suponiendo 30 fuentes puntuales emitiendo simultáneamente con nivel de presión sonora equivalente de 85 dBA. Las condiciones ambientales que se utilizaron para realizar la simulación representan el escenario más favorable para la propagación del sonido, este es: 90 % de humedad relativa y 30 °C de temperatura ambiente.

Hay que recordar que el impacto ambiental que sufre una zona específica se puede definir como la diferencia entre la situación ambiental futura de zona, después de la realización de la obra, y el estado ambiental de la zona si dicha obra no hubiese tenido lugar.

Resultados

El ruido de fondo durante el día fue de $(56,2 \pm 1,9)$ dBA y durante la noche fue de $(55,7 \pm 1,9)$ dBA. El nivel de presión sonora medio durante el día en el área de estudio fue $(67,2 \pm 2,7)$ dBA (ver Figura 36) y el nivel de presión sonora medio durante la noche fue $(64,0 \pm 2,4)$ dBA (ver Figura 37).

Conclusiones

- El nuevo puerto contribuirá a aumentar el nivel sonoro en el área de estudio a $(67,9 \pm 2,5)$ dBA durante el día (ver Figura 38); mientras en la noche el nivel sonoro medio tendrá un valor de acuerdo a la simulación de $(65,1 \pm 2,2)$ dBA (ver Figura 39). Como se puede apreciar, el nuevo puerto tendrá impacto sonoro en el área, sobre todo en horas de la noche.
- El punto de máximo nivel de presión sonora equivalente, tanto de día como de noche, es el que corresponde a la coordenada UTM: 658900 m Este y 989136 m Norte, ubicado en la vía de entrada al Puente de las Américas. En este punto, los niveles sonoros que están alrededor de los 80 dBA son generados fundamentalmente por el tráfico vehicular.

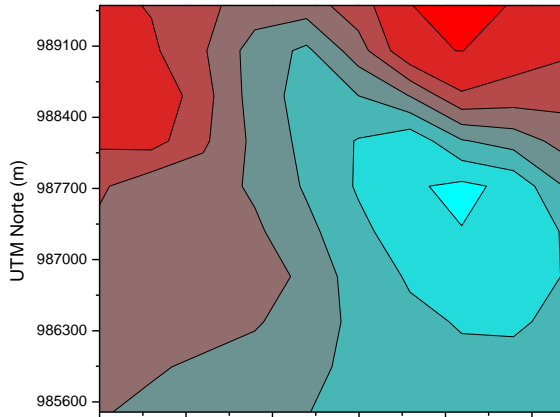


Fig. 36. Isosuperficies sonoras medidas durante el día en el área de impacto de futuro puerto.

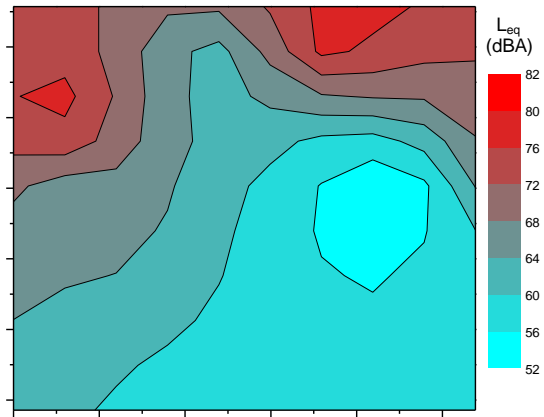


Fig. 37. Isosuperficies sonoras medidas durante la noche en el área de impacto de futuro puerto.

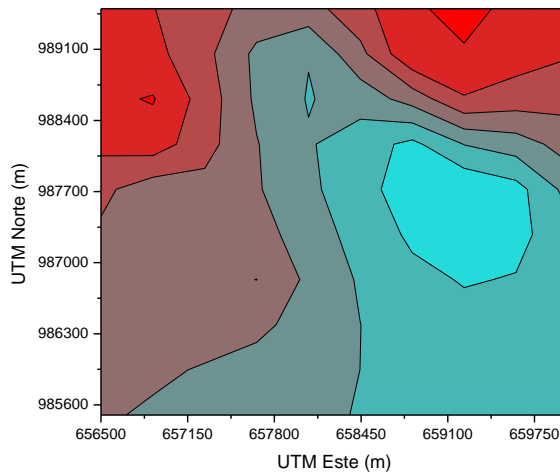


Fig. 38. Isosuperficies sonoras para el día, que incluyen la contribución simulada debido al futuro puerto.

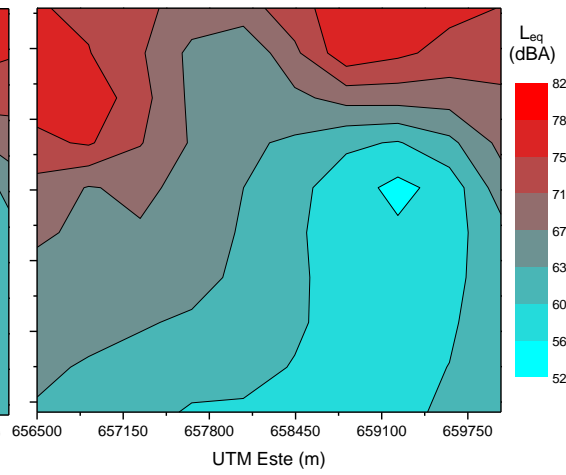


Fig. 39. Isosuperficies sonoras para la noche, que incluyen la contribución simulada debido al futuro puerto.

CASO 6: Termoeléctrica

En este estudio se determina el impacto sonoro que produciría la instalación de una planta de generación eléctrica que funcionará con *fuel oil* y constará de dos calderas de ciclo simple. El área en donde se piensa construir este nuevo emplazamiento está considerada como rural. Se realizaron mediciones del nivel de presión sonora equivalente en los alrededores de la futura termoeléctrica tanto de día como de noche. Posteriormente, se realizó la simulación considerando que el fabricante de esta planta señala que cuando la termoeléctrica esté en funcionamiento, las calderas generarán 85 dBA a cinco metros de distancia. Los parámetros ambientales que se utilizaron para la simulación son 90 % humedad relativa y 30 °C de temperatura ambiente.

Resultados

El ruido de fondo durante el día en el área de estudio fue $(67,9 \pm 4,4)$ dBA, mientras que el ruido de fondo durante la noche fue $(57,9 \pm 1,5)$ dBA. El nivel de presión sonora equivalente medio durante el día fue $(76,3 \pm 1,1)$ dBA (ver Figura 40) y el nivel sonoro medio durante la noche en el área de estudio fue $(68,4 \pm 1,4)$ dBA (ver Figura 41). El nivel sonoro medio durante el día incluyendo el impacto que generará la futura termoeléctrica es $(76,6 \pm 1,1)$ dBA (ver Figura 42), mientras que, durante la noche, el nivel sonoro medio en el área de estudio será de $(69,2 \pm 1,5)$ dBA (ver Figura 43).

Conclusiones

- Durante el día, el valor del máximo nivel sonoro corresponde a las coordenadas UTM: 625092 m Este y 1036380 m Norte, con valor de 83,6 dBA; mientras que, durante la noche, el punto de máximo nivel de presión sonora equivalente corresponde a las coordenadas UTM: 629224 m Este y 1036369 m Norte, con valor de 74,2 dBA.
- La modelación matemática del impacto sonoro predice que el punto de máximo nivel de presión sonora equivalente durante el día será de 83,7 dBA, ubicado en las coordenadas UTM: 625092 m Este y 1036380 m Norte. Lo que significa que el ruido que aportará la futura termoeléctrica aumentará el nivel sonoro en 0,1 dBA en este punto.
- La simulación durante la noche predice que el punto de máximo nivel sonoro en la noche es el que corresponde a las coordenadas UTM: 629177 m Este y 1036369 m Norte, con valor de 74,5 dBA. Este mismo punto durante la noche, en la actualidad, tiene un nivel sonoro de 73,4 dBA.
- La vivienda más próxima al nuevo emplazamiento está ubicada en las coordenadas UTM: 628614 m Este y 1035609 m Norte, con valor de nivel sonoro durante el día de 79,4 dBA y durante la noche de 64,9 dBA. En este mismo punto nuestro modelo de simulación de la futura planta predice que el nivel sonoro de esta vivienda no variará.

- Debido a los altos niveles de presión sonora equivalente ya existentes en la zona, el ruido generado por la futura planta de generación eléctrica no afecta significativamente los niveles de presión sonora del área.
- El cambio importante en los mapas de isosuperficies sonoras de día con respecto a la noche se debe a que en el lugar existen industrias que, durante el día, movilizan una cantidad importante de camiones.

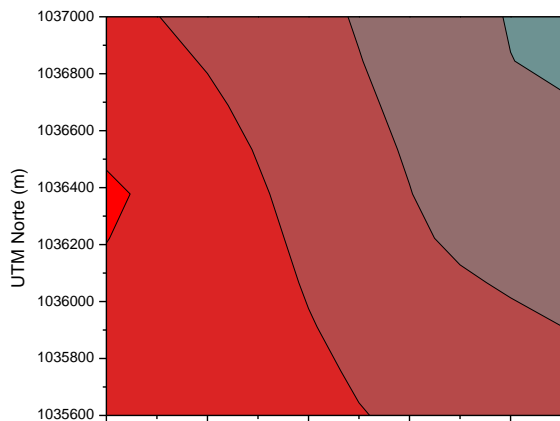


Fig. 40. Isoacoustic surfaces measured during the day in the area of impact of the future thermoelectric.

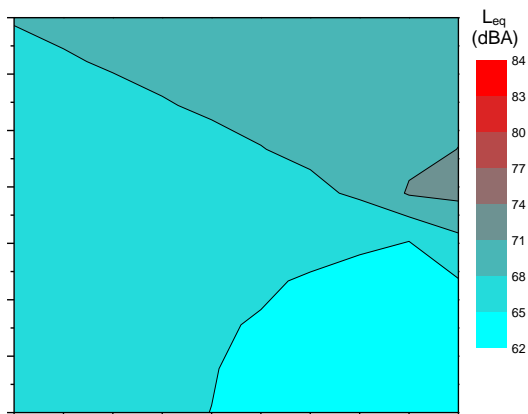


Fig. 41. Isoacoustic surfaces measured during the night in the area of impact of the future thermoelectric.

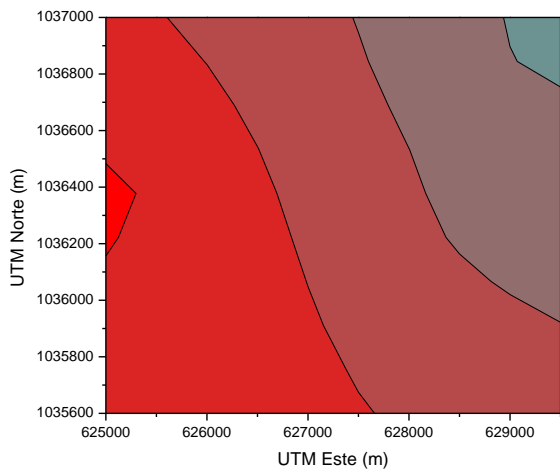


Fig. 42. Isoacoustic surfaces for the day, including the simulated contribution of the future thermoelectric.

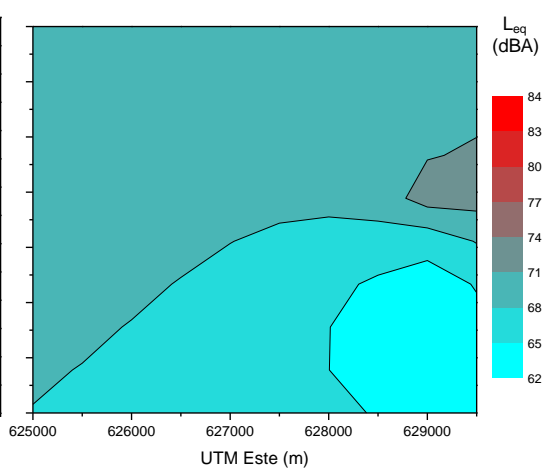


Fig. 43. Isoacoustic surfaces for the night, including the simulated contribution of the future thermoelectric.

CASO 7: Aeropuerto

En este caso se presenta el impacto ambiental sonoro que produce la construcción de un aeropuerto destinado para avionetas, en un área considerada como rural (las coordenadas UTM de los puntos extremos del aeropuerto son: 708030 m Este y 929130 m Norte con 708980 m Este y 930750 m Norte). La principal fuente de emisión sonora en un aeropuerto es el ruido de los aviones durante el despegue y aterrizaje.

La primera parte de estudio consistió en determinar el estado actual de los niveles de presión sonora equivalente en las zonas habitadas más próximas al futuro aeropuerto. Se realizaron mediciones en 25 puntos, en donde la vivienda más próxima está a 1,0 km del nuevo emplazamiento. La segunda parte fue el desarrollo de la simulación matemática que produce una avioneta en su despegue. Para esta simulación, se utilizó una fuente lineal de ruido a lo largo de todo el aeropuerto (1,5 km), con una intensidad sonora de 100 dBA a 1,0 m de la pista de aterrizaje, humedad relativa de 90 % y temperatura media ambiental de 30 °C.

Resultados

El ruido de fondo en el área de estudio fue de $(50,0 \pm 0,5)$ dBA. El valor medio del nivel de presión sonora equivalente en el área de estudio fue $(54,9 \pm 0,6)$ dBA (ver Figura 44). Cuando se construya el nuevo aeropuerto el valor medio del nivel sonoro será de $(57,5 \pm 0,7)$ dBA (ver Figura 45).

Conclusiones

- En la actualidad, el punto de máximo nivel de presión sonora equivalente es el que corresponde a las coordenadas 708792 m Este y 930438 m Norte, con valor de 63,9 dBA.
- El nuevo aeropuerto impactará acústicamente la zona a su alrededor, con altos niveles de presión sonora equivalente.
- De acuerdo a los resultados de la simulación, el punto con coordenadas 708792 m Este y 930438 m Norte, que es donde se ubica la vivienda más próxima al nuevo aeropuerto (1,0 km de distancia), verá incrementado su nivel sonoro, durante el despegue de un avión, de 63,9 dBA a 65,6 dBA.

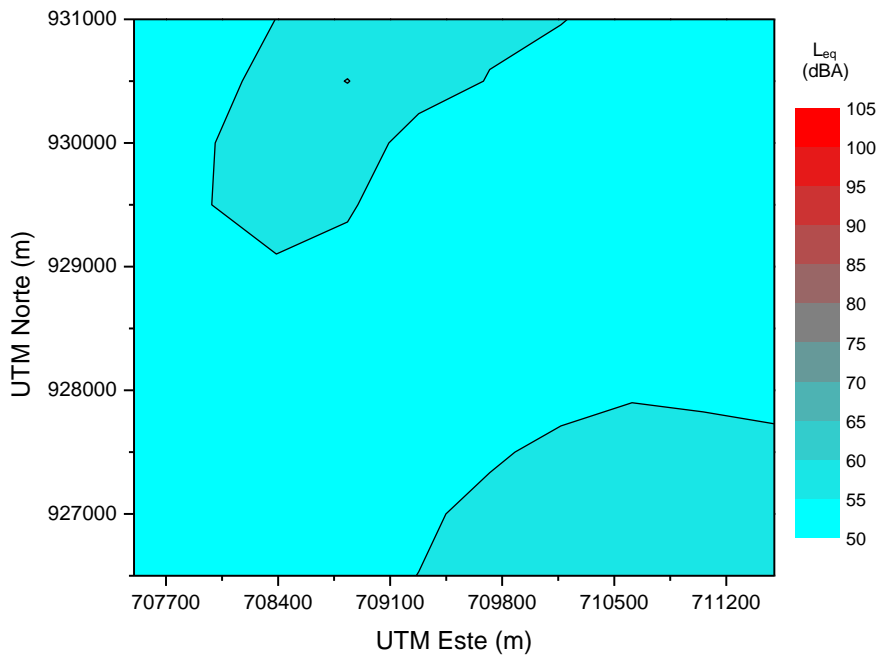


Fig. 44. Isosuperficies sonoras en la actualidad.

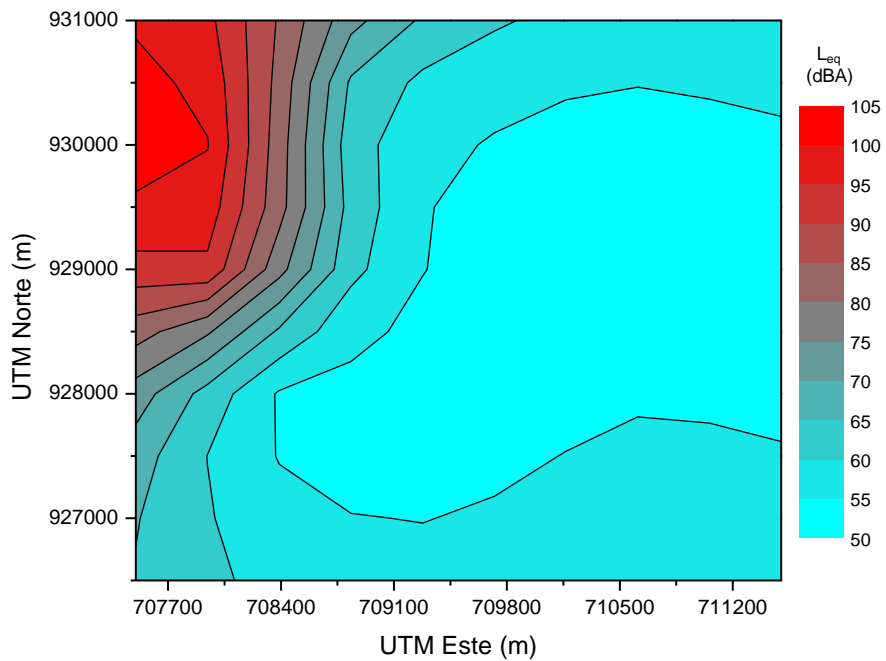


Fig. 45. Isosuperficies sonoras durante el despegue de un avión.

CASO 8: Depuradora de Aguas Residuales

En este trabajo se presenta un resumen del impacto ambiental, en su componente de ruido, para la instalación de la estación depuradora de aguas residuales. Esta planta estará ubicada en un ambiente rural y sus coordenadas UTM son: 670764 m Este y 996867 m Norte.

Se realizaron mediciones, durante el día y la noche, en los alrededores de la planta depuradora de agua. Además se realizó una simulación del ruido generado por la planta depuradora cuando esté en funcionamiento. De acuerdo con los diseñadores de la planta, las principales fuentes de ruido son los 8 sopladores que generan, cada uno, un nivel de presión sonora de 100 dBA a 1,0 m de distancia. Las paredes interiores del edificio en donde operen estos sopladores contarán con aislantes acústicos, de tal manera que el ruido detectado a 1,0 m de la pared exterior del edificio será de 80 dBA. La segunda fuente de ruido serán los dos motores de generación eléctrica a gas, que producirán un nivel de presión sonora de 110 dBA a 1,0 m de distancia. Las paredes exteriores en donde funcionarán estos generadores estarán cubiertas con aislantes acústicos, las cuales producirán a 1,0 m de la pared exterior del edificio que se detecte 80 dBA. De igual forma, el tubo de escape de los generadores contará con silenciadores que harán que el ruido en la salida de estos tubos sea de 80 dBA.

La simulación matemática se hizo utilizando los valores medios de 90,0 % de humedad relativa y 30,0 °C como temperatura ambiente.

Resultados

El valor del nivel de presión sonora equivalente del ruido de fondo en el área de estudio, durante el día, fue de $(55,1 \pm 1,7)$ dBA y durante la noche fue de $(48,0 \pm 1,2)$ dBA. El valor del nivel sonoro en toda el área analizada durante el día fue $(65,3 \pm 2,4)$ dBA (ver Figura 46) y durante la noche fue $(58,0 \pm 2,2)$ dBA (ver Figura 47). Tanto de día como de noche, el punto máximo del nivel sonoro fue el situado en las coordenadas UTM 672417 m Este y 999149 m Norte. Durante el día correspondió a 80,3 dBA, y durante la noche a 74,9 dBA.

El efecto de simulación produce que el nivel de presión sonora equivalente medio en el área de estudio se eleve durante el día a $(66,7 \pm 2,2)$ dBA (ver Figura 48) y durante la noche a $(60,2 \pm 2,0)$ dBA (ver Figura 49). El nuevo emplazamiento producirá que la vivienda más cercana a la planta depuradora (669715 m Este y 998558 m Norte) incremente su nivel sonoro durante el día de 53,2 dBA a 53,6 dBA, y durante la noche de 53,1 a 53,5 dBA.

Conclusiones

- Los puntos situados sobre la autopista próxima a la planta superan, previo a su construcción, los 70 dBA, tanto de día como de noche (668704 m Este y 998094 m Norte; 669089 m Este y 998222 m Norte; 671024 m Este y 998727 m Norte; 672417 m Este y 999149 m Norte).
- El nuevo emplazamiento no contribuirá a elevar, por arriba de los límites permitidos, el valor de nivel sonoro en ninguna residencia que se encuentre actualmente en la zona.
- Los factores que influyen para que la planta depuradora de agua no afecte acústicamente de forma significativa a las residencias que estén próximas a ella, son: la distancia (pues la más cercana estaría a 950 m de la planta) y el hecho de estar separadas de dicha instalación por un denso ecosistema de manglar.

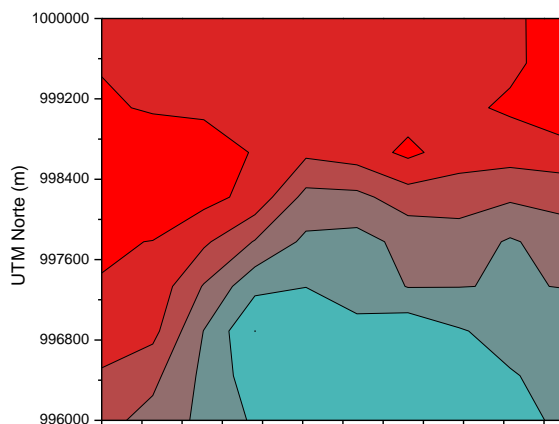


Fig. 46. Isosuperficies sonoras medidas durante el día en el área de impacto de la futura planta depuradora.

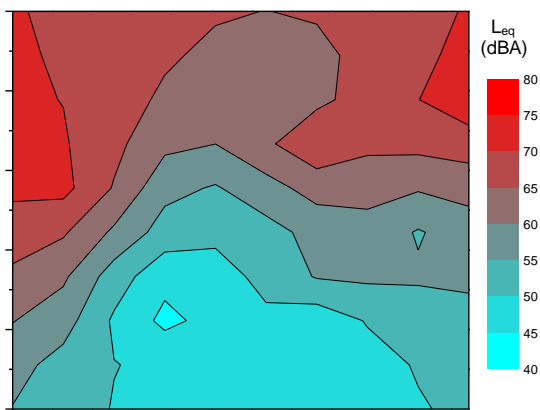


Fig. 47. Isosuperficies sonoras medidas durante la noche en el área de impacto de la futura planta depuradora.

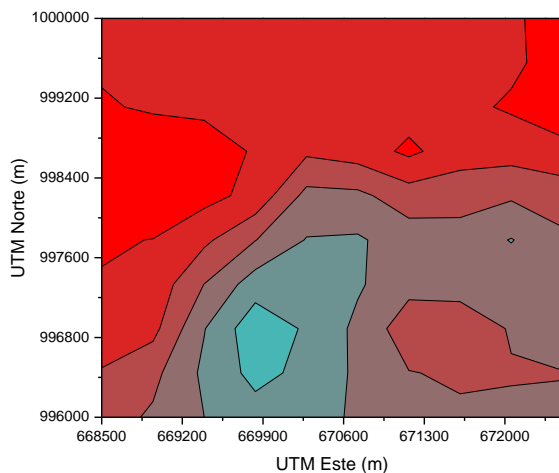


Fig. 48. Isosuperficies sonoras para el día, que incluyen la contribución simulada debido a la futura planta de tratamiento.

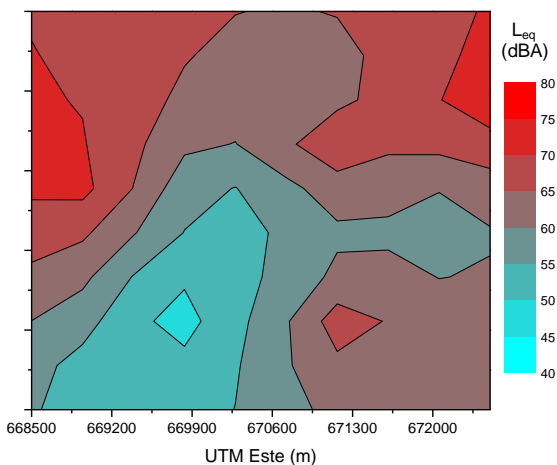


Fig. 49. Isosuperficies sonoras para la noche, que incluyen la contribución simulada debido a la futura planta de tratamiento.

CASO 9: Construcción de una Vía Rápida

Este trabajo tiene como objetivo hacer un estudio del impacto sonoro que tendrá el transformar una vía por la que circula un promedio de 1 000 vehículos por hora a una rapidez de 40 km/h, a una vía rápida por donde circularán alrededor de 3 000 vehículos por hora a una rapidez de 80 km/h. Para esto se realizó un estudio de los niveles de presión sonora equivalente actuales en las áreas aledañas a este proyecto. La simulación sonora de la nueva vía se hace considerando un área urbana, condiciones ambientales de 90 % de humedad relativa y 30 °C de temperatura ambiente y una fuente lineal de ruido por donde circulan 2 000 vehículos adicionales a 80 km/h.

Resultados

El nivel de presión sonora equivalente del ruido de fondo fue de $(62,6 \pm 1,2)$ dBA. El nivel sonoro medio, actual, en toda el área analizada fue de $(72,5 \pm 1,4)$ dBA (ver Figura 50). El lugar de mayor nivel de presión sonora equivalente fue el correspondiente a las coordenadas UTM: 660136 m Este y 990406 m Norte, con valor de 79,8 dBA. Después de la construcción de la vía rápida, el nivel sonoro medio en el área de estudio se situará en $(73,2 \pm 1,3)$ dBA (ver Figura 51).

Conclusiones

- Los tres puntos de medición situados sobre la futura vía rápida (650935 m Este y 989125 m Norte; 659950 m Este y 989248 m Norte; 660318 m Este y 989366 m Norte), incrementarán un nivel sonoro medio de $(71,6 \pm 1,5)$ dBA a $(73,0 \pm 1,1)$ dBA.
- Debido al alto nivel sonoro ya existente en la zona, la nueva vía rápida no aumenta significativamente los niveles de presión sonora equivalente en las zonas aledañas al proyecto.
- El punto de mayor nivel de presión sonora equivalente seguirá siendo el de coordenadas 660136 m Este y 990406 m Norte; y debido a la lejanía del lugar (aproximadamente 1,0 km) su valor se mantendrá de 79,8 dBA.

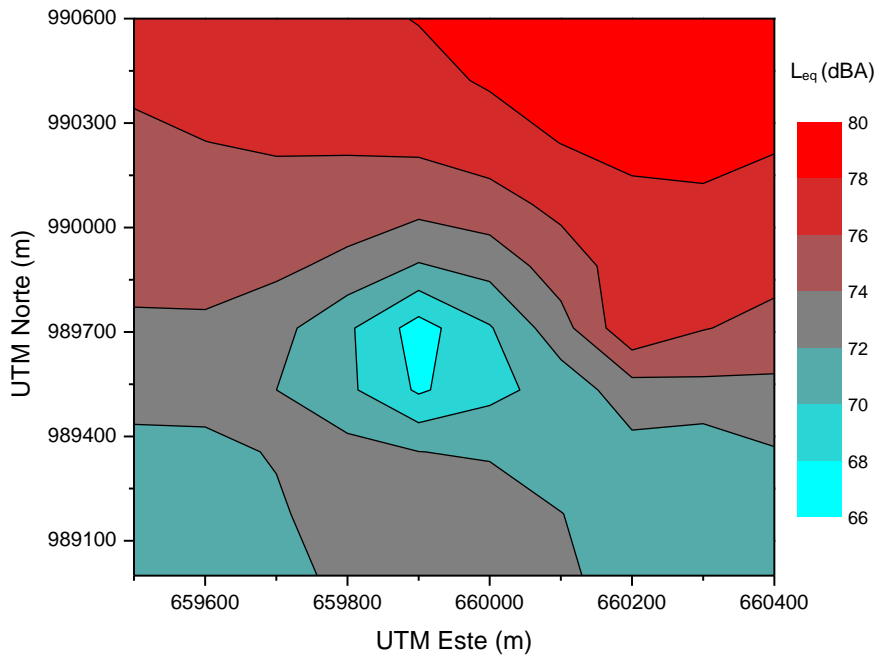


Fig. 50. Isosuperficies sonoras en la actualidad.

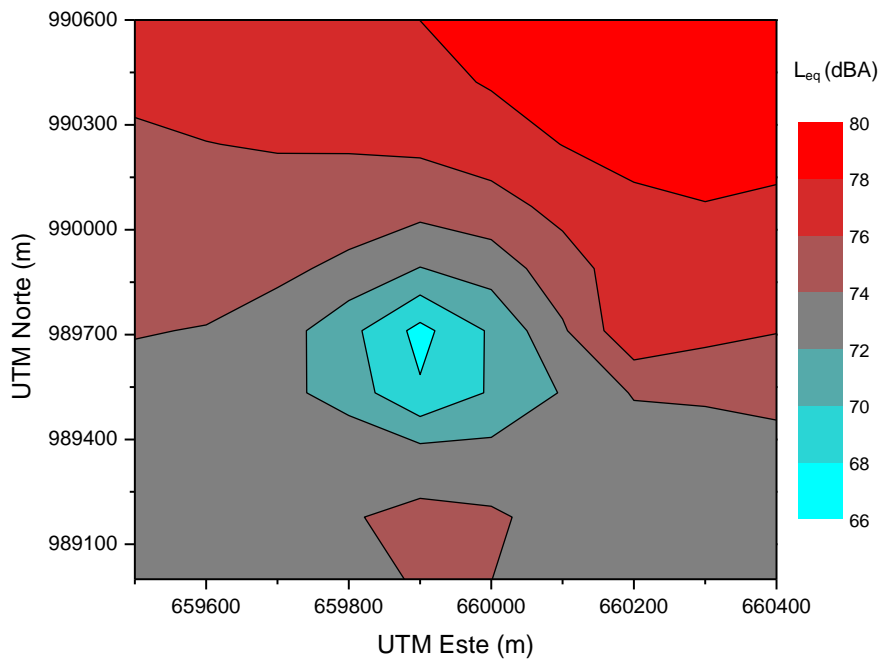


Fig. 51. Isosuperficies sonoras después de la construcción de la vía rápida.

BIBLIOGRAFÍA

1. Berglund, B., T. Lindvall & D. Schwela (2000). Guidelines for Community Noise. Organización Mundial de la Salud. E.U.A.
2. Boeker, E. & Van Grondelle Rienk (1996). Environmental Physics. John Wiley & Sons. England.
3. Bolívar Raya, J. P. (2000). Física Ambiental. Tomo I: Física de Radiaciones y Acústica Ambiental. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva. España.
4. Carrasquilla Luis (2006). Árboles y Arbustos de Panamá. Editora Novo art; S.A. Panamá.
5. Castillo, María de los Ángeles (1997). Propuesta de política de control de ruido ambiental para países de grado medio de desarrollo industrial: aplicación a Panamá. Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Catalunya. España.
6. Comisión Europea (1996). Política Futura de lucha Contra el Ruido. Libro Verde de la Comisión Europea, Publicaciones de la Unión Europea.
7. Flores, E. Moreno, J.E, Rosales, N. (2011). Ciencias Físicas o Filosofía de la Naturaleza. Producciones Científicas S.A. Panamá.
8. García Díez, E.L. (2000). Física Ambiental. Editorial Plaza Universitaria. España.
9. Harris, C.M. (1995). Manual de Medidas Acústicas y Control del Ruido. Editorial McGraw Hill. España.
10. Higini Arau (1999). ABC de la Acústica Arquitectónica. Ediciones CEAC S.A. España.
11. Kinsler, L. E, Frey, A. R, Coppens, A. B. y Sanders, J. V. (1999). Fundamentos de Acústica. Limusa. México.
12. López Sánchez, J.F. (2002). Física Ambiental. Editorial Cartagena. España.
13. Llinares, J, Llopis, A. y Sancho, J. Acústica Arquitectónica y Urbanística. Servicio de publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. España.
14. Querol, I.N. (1994). Manual De Mesurament i Avaluació del Sorroll. Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient, Barcelona.
15. Recuero, M. (2000). Ingeniería Acústica. Editorial Paraninfo. México.
16. Sociedad Española de Acústica (1990). El Ruido en la Ciudad, Gestión y Control. España.
17. Rejano De la Rosa, M. (2000). Ruido Industrial y Urbano. Paraninfo. España.
18. Villarreal, Y., Castillo, M. de los A, Muñoz, A, Toral, J, Flores, E. (2003). Nivel de Ruido en la Ciudad de Panamá. Tecnociencia, Vol. 5, Nº 2. Panamá.