Mitigación del Ruido de Buques en Atraque

Resumen Técnico del Compendio Internacional NEPTUNES para Autoridades Portuarias

Documento Base: NEPTUNES Best Practice Guide v1.0 • Anexos I, II y III

Destinatario: División de Innovación y Sostenibilidad • APBA

Puertos Promotores: Róterdam, Ámsterdam, Hamburgo, Gotemburgo, Vancouver, etc.

Atención: D. Juan Antonio Herrera Salas

1. MARCO REGULATORIO Y LA PROBLEMÁTICA DEL FILTRO DBA

El consorcio NEPTUNES nace de una iniciativa conjunta de las principales autoridades portuarias europeas y mundiales para resolver el conflicto acústico en la interfaz puerto-ciudad. Identifica dos deficiencias estructurales:

- **Vacío Regulatorio en la OMI (IMO):** La única normativa vigente, el Código de Niveles de Ruido a Bordo (Resolución MSC.337(91)), atiende exclusivamente a la salud laboral de los tripulantes dentro del casco (límites en sala de máquinas y camarotes). No regula en absoluto la emisión sonora hacia el exterior ni hacia la ciudad.
- **La Falacia de la Ponderación A (dBA):** La directiva europea 2002/49/CE y las ordenanzas locales miden el ruido ambiental en dBA, una curva diseñada para simular el oído humano que **filtra agresivamente las frecuencias bajas**:

Banda (1/3 Octava)	Atenuación dBA	Efecto Práctico sobre la Medición Real
25 Hz – 31.5 Hz	**-44.7 a -39.4 dB**	La señal se reduce a una fracción ínfima; oculta la detonación principal de cilindros.
40 Hz – 50 Hz	**-34.6 a -30.2 dB**	Suprime el armónico de combustión y el zumbido de generadores auxiliares a 4 tiempos.
63 Hz – 100 Hz	**-26.2 a -19.1 dB**	Atenúa más del 99% de la potencia acústica de ventiladores y compresores reefer.
125 Hz – 160 Hz	**-16.1 a -13.4 dB**	Límite superior del rango de bajas frecuencias definido por NEPTUNES (LFN).

Consecuencia Metrológica: Un buque cuyos motores generan una presión sonora real de **80 dB lineales a 40 Hz** frente a una fachada residencial registra únicamente **45.4 dBA** en el sonómetro municipal. En una inspección oficial nocturna (límite típico: 50 dBA), el buque se declara falsamente conforme, pese a generar vibraciones torácicas, insomnio y fundadas quejas vecinales.

2. DINÁMICA ACÚSTICA EN INTERIORES Y PROPAGACIÓN (ANEXO III)

El Anexo III aporta la justificación física de por qué las quejas por ruido de buques se concentran en horario nocturno dentro de dormitorios cerrados:

- **Resonancia de Modos Propios (Ondas Estacionarias):** Las longitudes de onda del retumbo diésel ($\lambda = 340 / f \approx 2$ a 14 m) coinciden con las dimensiones de dormitorios residenciales (3 a 6 m). Al excitarse los modos propios axiales de la habitación, la presión sonora en esquinas y cabeceros de cama **supera en +6 a +15 dB el nivel medido en el exterior de la fachada**.
- **Colapso del Aislamiento en Acristalamientos Térmicos:** Las ventanas de doble vidrio simétrico estándar (4/12/4) sufren una resonancia masa-aire-masa crítica en el rango de **60 a 100 Hz**. En dicha banda, el aislamiento acústico se desploma a niveles de apenas 10–15 dB, convirtiéndose en diafragmas transmisores directos del zumbido del buque.
- **Propagación sobre Lámina de Agua:** El agua actúa como superficie acústicamente rígida (absorción de suelo nula). La inversión térmica nocturna sobre el mar curva los rayos sonoros hacia abajo (efecto *ducting*), propagando el ruido a distancias de 1 a 3 km con una atenuación de solo -3 dB por duplicación de distancia.

3. CLASIFICACIÓN DE BUQUES Y FUENTES PRIMARIAS DE EMISIÓN

Tipo de Buque	Potencia Puerto	Fuentes Acústicas Dominantes	Perfil Espectral
1. Portacontenedores	1.5 – 8 MW	Motores auxiliares, ventilación de máquinas y **bloques de contenedores reefer**.	Tono grave de escape (30–60 Hz) + zumbido reefer (80–125 Hz).
2. Cruceros	5 – 15 MW	Múltiples generadores auxiliares a alta carga continua, plantas HVAC/chillers, lavanderías.	Graves continuos (25–50 Hz) y potencia extrema (LwA > 105 dBA).
3. Petroleros / Quimiqueros	1 – 5 MW	Generador de gas inerte, calderas de vapor auxiliares y **bombas de descarga**.	Ruido mecánico continuo, soplado de quemadores y bombeo.
4. Ro-Ro y Ro-Pax	2 – 6 MW	**Ventilación forzada de bodegas (10–20 renovaciones/h)**, auxiliares y rampas.	Banda ancha soplante de alta velocidad + impactos metálicos en rampas.
5. Graneleros	0.5 – 2 MW	Generadores auxiliares diésel, maquinaria de escotillas y cintas de auto-descarga.	Pulsación grave de escape de motores diésel de media velocidad.
6. Carga General	0.3 – 1.2 MW	Pequeños grupos electrógenos y ventiladores de sala de máquinas.	Escape diésel continuo en dársenas locales.

Frecuencia de Encendido de Auxiliares de 4 Tiempos: `f_ign = (N / 60) × (Z / 2)` (donde N = RPM y Z = cilindros). Para un motor estándar de 6 cilindros a 720 RPM: **f_ign = 36 Hz**, coincidiendo con la banda de tercio de octava de 31.5 / 40 Hz.

4. PROTOCOLO UNIVERSAL DE MEDICIÓN EN MUELLE (ANEXO II - ISO 3746 V2.0)

El Anexo II normaliza la determinación del Nivel de Potencia Acústica (LwA) del buque desde tierra con instrumentación de Clase 1:

- **Altura del Micrófono:** Ubicado a **hm ≥ 6.0 metros sobre el cantil del muelle**. Esta cota es obligatoria para elevar la zona de propagación por encima del tráfico rodado y mitigar reflexiones de suelo.
- **3 Posiciones de Ensayo:** MP1 (frente a la chimenea/escape), MP2 (entre proa y centro del buque) y MP3 (alineado con la popa).
- **Distancia Tridimensional (dc):** Calculada desde la boca de escape de la chimenea (hc) hasta el micrófono (hm):

$$dc = \sqrt{(dh^2 + (hc - hm)^2)}$$

- **Sustracción de Ruido Residual de Fondo (ISO 1996-2):**
  - Si `L_meas - L_residual ≥ 10 dB` → Sin corrección.
  - Si `3.0 dB ≤ L_meas - L_residual < 10 dB` → Corrección logarítmica energética: `L_corr = 10 × log10(10^(L_meas/10) - 10^(L_residual/10))`
  - Si `L_meas - L_residual < 3.0 dB` → **Medición no válida** (el ruido de fondo invalida el ensayo).
- **Conversión de Presión a Potencia Sonora (LwA):**

$$LwA = L_{corr} + 20 \times \log10(dc) + 7.98\ dB$$

5. ALGORITMO OFICIAL DE PUNTUACIÓN ESI NOISE (0 A 100 PUNTOS)

Adoptado en el Environmental Ship Index (IAPH) para la bonificación de tasas portuarias:

$$Puntuación\ Total = \min(100, \max(0, 118 - LwA_{total}) + \max(0, 2 \times (108 - LwA_{LF})) + Puntos_{Reporte})$$

- **Doble Ponderación de Graves (2×):** Cada decibelio atenuado en el intervalo LFN (≤ 160 Hz) otorga el doble de puntos que en alta frecuencia, incentivando la reducción del zumbido que genera quejas.
- **Incentivo por Transparencia:** +20 puntos si el buque presenta un informe homologado bajo el protocolo NEPTUNES.
- **Bonificación de Tasas:** Puertos líderes (Róterdam, Ámsterdam, Hamburgo) aplican descuentos de hasta el **15% en tasas de estancia (GT)** a buques con calificación destacada.

6. CATÁLOGO DE LOS 15 LEAFLETS TÉCNICOS DE MITIGACIÓN (ANEXO I)

Nº	Título / Medida	Descripción Técnica	Atenuación	Coste / Actor
01	**Maquinaria**	Montajes elásticos en auxiliares, VFDs en ventiladores y bombas sumergidas.	1 a 30 dB	A a C • Armador
02	**Silenciadores**	Silenciadores reactivos sintonizados a f_ign combinados con apagachispas.	10 a 30 dB	B a C • Astillero
03	**OPS / Cold Ironing**	**Conexión eléctrica a tierra con apagado 100% de motores diésel.**	**12 a 20 dB (LFN)** (1–10 dBA global)	C++ • Puerto/Armador
04	**Megafonía**	Limitadores de volumen y sustitución por walkie-talkies en maniobra.	Intrusión súbita	A • Tripulación
05	**Propagación**	Distancia búfer y pantallas con pilas de contenedores vacíos (4–5 alturas).	6 dB / dupl. dist. 1–10 dB pantalla	A - B • Terminal
06	**Aislamiento Fachadas**	Doble acristalamiento asimétrico acústico (8/16/6+6) y aireadores con trampa.	15 a 30 dB (int.)	A a C • Municipio
07	**Gestión Expectativas**	Avisos previos a vecinos sobre llegadas singulares y medidas activas.	Aceptación social	A • Puerto/Ciudad
08	**Mutual Gains (MGA)**	Negociación estructurada de consensos en ampliaciones de infraestructuras.	Consenso legal	A • Puerto/Comunidad
09	**Planificación Urbana**	Edificios pantalla no sensibles y diseño de dormitorios en fachada silenciosa.	5–15 dB pantalla 15–20 dB layout	B a C • Urbanismo
10	**Concienciación**	Formación a estibadores y tripulación para evitar impactos nocturnos.	Perceptual	A • Estiba/Terminal
11	**Gestión Quejas (CRS)**	Registro georreferenciado con sellado temporal y correlación con buques.	Trazabilidad	A - B • Puerto
12	**Organización Atraques**	**Directividad de proa hacia la ciudad** y amarras hidráulicas ShoreTension.	**3 a 6 dB (alivio) Coste cero**	A • Capitanía/Prácticos
13	**Manipulación Carga**	Grúas eléctricas amortiguadas y topes de goma en rampas de carga rodada.	Impactos mecánicos	B a C • Terminal
14	**Hélices de Proa**	Limitación de potencia en thrusters nocturnos y apoyo con remolcadores.	10 a 20 dB en maniobra	A - B • Prácticos
15	**Factores No Acústicos**	Iluminación apantallada, pantallas vegetales de ocultación visual y RSC.	Alivio psicológico	B • Puerto/Ciudad

Escala de coste NEPTUNES: **A** < 10.000 € • **B** 10.000–100.000 € • **C** 100.000–1.000.000 € • **C++** > 1.000.000 €.

7. RECOMENDACIONES ESTRATÉGICAS PARA LA AUTORIDAD PORTUARIA

1. Medida Inmediata a Coste Cero (Leaflet 12): Exigir en las instrucciones de atraque que los buques amarren con la **proa orientada hacia los núcleos urbanos más próximos**. La superestructura del castillo de proa aporta una atenuación de entre **3 y 6 dB** respecto a las emisiones de chimenea y ventilación de popa, proporcionando un alivio perceptible inmediato sin requerir obras civiles.

2. Doble Retorno del Cold Ironing (Leaflet 3): La electrificación de muelles (OPS) debe defenderse ante Medio Ambiente no solo como descarbonización, sino como la solución definitiva contra el zumbido diésel nocturno, al **reducir de 12 a 20 dB en la banda de 25 a 65 Hz**.

3. Incorporación de Bajas Frecuencias en la Red de Medida: Ningún sonómetro en dBA permite auditar con rigor el ruido naval. Es indispensable monitorizar en dBC o en tercios de octava de baja frecuencia (25 a 160 Hz) para cruzar los picos con las escalas de los buques y justificar técnicamente las bonificaciones del ESI Noise Score.