



RECOMENDACIÓN DE LA IALA

E-109

CÁLCULO DEL ALCANCE DE UNA SEÑAL SONORA

Edición 1.0

Junio de 1998



Puertos del Estado





HISTORIAL DEL DOCUMENTO

Las revisiones realizadas a este documento de la IALA se anotarán en el siguiente cuadro antes de la puesta en circulación de un documento revisado.

Fecha	Página / Apartado revisado	Motivo de revisión
Junio de 1998	1ª edición	
Diciembre de 2005	Documento completo	Reformateado para reflejar la jerarquía de la documentación de la IALA

La revisión de la traducción de este documento ha sido realizada por el grupo de trabajo de Puertos del Estado en el que han participado:

*Luis Martínez (Autoridad Portuaria de Vigo);
Enrique Abati (Autoridad Portuaria de Marín);
Juan Manuel Vidal (Autoridad Portuaria de Gijón);
Carlos Calvo (Autoridad Portuaria de Santander);
Cristina García-Capelo (Autoridad Portuaria de Bilbao);
José Luis Núñez (Autoridad Portuaria de Pasajes);
Juan Antonio Torres (Autoridad Portuaria de Huelva);*

*Septimio Andrés (Autoridad Portuaria de Sevilla);
Germán Gamarro (Autoridad Portuaria de Algeciras);
Santiago Tortosa (Autoridad Portuaria de Ceuta);
Jaime Arenas (Autoridad Portuaria de Baleares);
Antonio Cebrián y Guillermo Segador (Autoridad Portuaria de Barcelona);
José Carlos Díez (Puertos del Estado).*

Coordinación de la edición en español y edición final:

José Carlos Díez (Puertos del Estado)

NOTA: Puertos del Estado no se responsabiliza de los errores de interpretación que puedan producirse por terceros en el uso del contenido de este documento, que corresponde a una traducción del documento original de la Asociación Internacional de Ayudas a la Navegación Marítima y Autoridades de Faros (IALA) denominado según aparece en la carátula.



EL CONSEJO DE LA IALA

RECONOCIENDO

- 1 La necesidad de proporcionar orientación en el cálculo de los diferentes alcances de las señales sonoras de forma más consistente;
- 2 Que dicha orientación se puede ofrecer proporcionando datos para la estimación del alcance de las señales sonoras en determinadas condiciones, definidas con respecto al estado meteorológico, el ruido a bordo y la probabilidad de percibir la señal;

TENIENDO EN CONSIDERACIÓN las propuestas del Comité de Ingeniería de la IALA;

ADOPTA el método de cálculo del alcance nominal y el alcance usual de una señal sonora, tal y como se establece en el Anexo de la presente Recomendación;

RECOMIENDA que los Miembros de la IALA y autoridades de Faros utilicen el método descrito en el Anexo;

REVOCA la Recomendación sobre el cálculo del alcance de una señal sonora de fecha de noviembre de 1968.



ANEXO

DE LA

Recomendación E-109 de la IALA

CÁLCULO DEL ALCANCE DE UNA SEÑAL SONORA



PRÓLOGO

El “alcance nominal” y “alcance usual” que se definen en esta Guía corresponden a diferentes condiciones relativas al ruido a bordo y la probabilidad de la percepción de la señal. Estas condiciones se han elegido para que sean lo más representativas posible de las que se dan en la realidad. Sin embargo, los usuarios deberán tener en cuenta que el “alcance real” puede diferir en gran medida del “alcance nominal” o del “alcance usual” que resulte del proceso de cálculo convencional utilizado.

En particular:

Se ha supuesto que la propagación del sonido se produce en condiciones meteorológicas relativamente tranquilas y como si no existiera ningún obstáculo. De hecho, se conoce que los vientos contrarios son desfavorables para la propagación del sonido y también que las turbulencias producidas por el viento pueden dificultar la audición.

- 3 El cálculo tiene en cuenta el ruido a bordo de los grandes buques obtenido a base de pruebas y datos estadísticos. Sin embargo, la cantidad de ruido varía considerablemente de un buque a otro y también de acuerdo con la posición del observador a bordo del barco y de las maniobras del mismo. Los buques pequeños a menudo son más ruidosos, especialmente si no se reduce su velocidad en la niebla. Además, los desarrollos técnicos podrían dar lugar, eventualmente, a mejorar o disminuir los niveles de ruido a bordo.
- 4 Se supone que las características de la señal sonora han sido determinadas en condiciones reales y en una determinada dirección, por lo que no se puede asignar el “alcance nominal” o el “alcance usual” a cualquier ayuda acústica sin que se hayan especificado las condiciones de instalación en tierra y las direcciones determinadas hasta el buque.



ÍNDICE DE CONTENIDOS DEL ANEXO

PRÓLOGO	5
SÍMBOLOS.....	8
1 INTRODUCCIÓN	10
2 FACTORES DE LOS QUE DEPENDE EL ALCANCE	10
2.1 Audibilidad a bordo de un buque	10
2.1.1 El criterio de audibilidad	11
2.1.2 Ruido a bordo del buque	12
2.2 Propagación del sonido	12
2.3 Emisión del sonido	15
3 DEFINICIÓN DEL ALCANCE NOMINAL Y DEL ALCANCE USUAL	15
3.1 Alcance nominal.....	16
3.2 Alcance usual	16
3.3 Emisor de señales de niebla	16
3.4 Conceptos del alcance nominal y del alcance usual	16
4 CÁLCULO DEL ALCANCE NOMINAL Y DEL ALCANCE USUAL	16
4.1 Sonido puro.....	17
4.2 Sonido complejo	17
4.3 Espectro sonoro	17
4.4 Amplitudes pequeñas u oscilantes	18
APÉNDICE 1 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UNA FUENTE SONORA ¡Error! Marcador no definido.	
1. Introducción.....	¡Error! Marcador no definido.
2. Disposición experimental	¡Error! Marcador no definido.
3. Sonometría y análisis	¡Error! Marcador no definido.
APÉNDICE 2 LOS DIFERENTES TIPOS DE SONIDO Y SUS PROPIEDADES ¡Error! Marcador no definido.	
1. Sonidos puros	¡Error! Marcador no definido.
2. Sonidos complejos	¡Error! Marcador no definido.
APÉNDICE 3 EJEMPLOS DEL CÁLCULO DEL ALCANCE NOMINAL Y DEL ALCANCE USUAL ¡Error! Marcador no definido.	
1. Caso de un sonido puro	¡Error! Marcador no definido.
2. Caso de un sonido complejo.....	¡Error! Marcador no definido.



ÍNDICE DE CONTENIDOS DEL ANEXO

Índice de tablas

Tabla 1	Ruido espectral en función de la frecuencia.....	12
Tabla 2	Atenuación del sonido, en decibelios por milla, debida a la absorción.....	14
Tabla 3	Absorción del sonido debida a la niebla	14
Tabla 4	Armónicos principales de un sonido periódico y complejo.....	24
Tabla 5	Armónicos en un grupo de sonidos	32

Índice de figuras

Figura 1	Escala de conversión para la determinación del nivel de presión sonora total de dos componentes espectrales.....	26
Figura 2	Ancho de banda Δ de los grupos de frecuencias en función de su frecuencia central, f	27
Figura 3	Diferencia de nivel de presión sonora S , en decibelios (ref. $20 \mu\text{Pa}$ o $20 \mu\text{N/m}^2$ o $2,10^{-4} \mu\text{bar}$), entre el ruido en el grupo de frecuencias de la frecuencia central f y el sonido puro apenas audible con un 50% de probabilidad	28
Figura 4	Reducción M del umbral, en decibelios, en función del número v de distintos grupos de frecuencias al mismo umbral.....	28
Figura 5	Curva convencional del nivel espectral medio N_B , en decibelios (ref $20 \mu\text{Pa}$ o $20 \mu\text{N/m}^2$ o $2,10^{-4} \mu\text{bar}$) por hercio, registrado en buques mercantes grandes, en función de la frecuencia f	29
Figura 6	Extraído de la Fig. 7. Caso de aplicación en que varios componentes espectrales entran en la determinación del alcance nominal.....	30
Figura 7	Gráfico para la determinación del nominal el alcance de las señales sonoras.....	31
Figura 8	Gráfico para la determinación del alcance usual de las señales sonoras.....	31

Índice de ecuaciones

Ecuación 1	Atenuación del sonido debida a la distancia.....	15
Ecuación 2	Distancia mínima de medición.....	20

SÍMBOLOS

f	Frecuencia, en hercios.
s	Diferencia entre el nivel de presión sonora de un ruido en un grupo de frecuencias y el nivel de presión sonora de un sonido puro, audible en el ruido con una probabilidad del 50%, siendo la frecuencia f del sonido puro la central del grupo de frecuencias.
M	Disminución del umbral de audición, en decibelios, cuando el umbral se alcanza simultáneamente en un número ν de grupos de frecuencias distintas.
Ns	Nivel espectral, en decibelios (ref. 20μ Pa o 20μ N/m ² o $2,10^{-4} \mu$ bar) por hercio, del ruido de enmascaramiento.
N _B	Nivel espectral, en decibelios (ref. 20μ Pa o 20μ N/m ² o $2,10^{-4} \mu$ bar) por hercio, del nivel de ruido alcanzado o superado en el 50% en buques grandes.
E	Desviación típica del nivel espectral del ruido en buques grandes.
Q	Atenuación debida a divergencia esférica, entre 1 metro y la distancia D, en decibelios.
A	Exceso de atenuación convencional entre 1 metro y la distancia D para la frecuencia f, en decibelios.
D	Distancia desde el emisor de la señal de niebla al buque.
β	Exceso de atenuación debido a la absorción a lo largo de 1 milla, en decibelios.
γ	Exceso de atenuación debido a la niebla a lo largo de 1 milla, en decibelios.
N _D	Nivel de presión sonora, en decibelios (ref. 20μ Pa o 20μ N/m ² o $2,10^{-4} \mu$ bar) de un sonido puro producido a un 1 metro por un emisor que, por el efecto de la atenuación debida sólo a la divergencia esférica, alcanza un nivel N ₀ a la distancia D.
Nr	Nivel de presión sonora, en decibelios (ref. 20μ Pa o 20μ N/m ² o $2,10^{-4} \mu$ bar), de un sonido puro de frecuencia f o del grupo de frecuencias con la frecuencia central f, causado por un emisor a la distancia de referencia de 1 metro en la dirección considerada.
Pn	Alcance nominal de un emisor de sonido, en millas náuticas.
Pu	Alcance usual de un emisor de sonido, en millas náuticas.
Δ	Ancho de banda, en hercios, de un grupo de frecuencias, cuya frecuencia central es f.
T	Ancho de banda, en hercios, de un tercio de octava, cuya frecuencia central es f.
ν	Número de los distintos grupos de frecuencias que conducen al mismo umbral de audición.
r	Distancia mínima de medición para un margen máximo de error de 0,5 decibelios.
d	La parte de mayor tamaño de la fuente emisora o del grupo de fuentes emisoras.
λ	Longitud de onda correspondiente a la frecuencia más alta que se registra en la medición.
α	Exceso de atenuación total a lo largo de una distancia de 1 milla, en decibelios.



- N_G Nivel de la presión sonora, en decibelios (ref. $20 \mu\text{Pa}$ o $20 \mu\text{N}/\text{m}^2$ o $2,10^{-4} \mu\text{bar}$), del ruido de enmascaramiento en un grupo de frecuencias de frecuencia central f .
- N_o Nivel de la presión sonora, en decibelios (ref. $20 \mu\text{Pa}$ o $20 \mu\text{N}/\text{m}^2$ o $2,10^{-4} \mu\text{bar}$), de un ruido puro, perceptible con una probabilidad determinada entre el ruido de enmascaramiento.
- D_o Distancia de referencia (elegida igual a 1 metro) en la cual el nivel de presión sonora es N_r .

1 INTRODUCCIÓN

Los tipos de emisores de señales de niebla utilizados por los servicios de faros son muy variados.

Para decidir cuales cumplen eficazmente los requisitos de funcionamiento y elegir los equipos más económicos, es importante realizar una evaluación de sus respectivas prestaciones.

El factor fundamental de un emisor de señales de niebla es su alcance, es decir, la mayor distancia a la que puede reconocerse la señal sonora que produce.

Los factores que determinan el alcance son numerosos y complejos y varían en el tiempo y el espacio.

La medición directa del alcance conduce a unos resultados muy dispares, dada la imposibilidad de reproducir con precisión todas las condiciones que influyen en su valor. Con frecuencia, es difícil su determinación y se requieren recursos considerables.

Para obtener una estimación comparativa del alcance de las señales sonoras, es necesario:

- Analizar los diferentes factores que afectan al alcance;
- Seleccionar para esos factores, las condiciones que sean tan representativas como sea posible y lo más parecidas a las que se producen en el ámbito marítimo real, y lo suficientemente aplicables como para permitir una sencilla determinación del alcance con la mínima distorsión.
- Establecer reglas que permitan el cálculo del alcance en las condiciones indicadas.

Por motivos prácticos, ha resultado útil elaborar un convenio doble y definir, por una parte, un “alcance nominal” y por otra, un “alcance usual”.

2 FACTORES DE LOS QUE DEPENDE EL ALCANCE

Pueden clasificarse en tres grupos que tienen que ver respectivamente con:

- La emisión del sonido;
- La propagación del sonido;
- La audibilidad a bordo de un buque.

Los propios grupos se ven influidos por la posición del oyente en relación con el emisor de señales de niebla y, especialmente, por la demora desde el buque al emisor.

Las condiciones para establecer los valores de audición y propagación no deben verse afectadas por las diferentes demoras. Sin embargo, debido a la gran directividad que presentan algunos equipos, con el factor emisión no se puede establecer lo mismo, por lo que será necesario especificar en cada caso las demoras en las que se han efectuado las mediciones de alcance.

2.1 AUDIBILIDAD A BORDO DE UN BUQUE

En primer lugar, se estudiará la audibilidad a bordo de un buque, ya que condiciona en gran medida la manera en que han de tenerse en cuenta los otros dos grupos de factores.

La acústica fisiológica nos indica que la percepción de una señal depende, principalmente, del nivel de ruido que prevalece en el punto de escucha.

Por lo tanto, es importante elegir un ruido del tipo que suele prevalecer a bordo del buque y ser capaz de establecer si se escuchará o no la señal con ese ruido.

2.1.1 EL CRITERIO DE AUDIBILIDAD

Para este último inconveniente la acústica fisiológica proporciona una solución (x)¹ que resulta adecuada y hace innecesario recurrir a los ensayos de audibilidad, que siempre son largos, costosos y requieren la utilización de laboratorios especializados, de los cuales hay pocos disponibles en el mundo.

El proceso se basa en un análisis espectral especial de “grupos de frecuencias”. Estos grupos de frecuencias representan bandas de frecuencias determinadas, con límites que varían en el espectro continuamente y con anchos de banda dependientes de la frecuencia central.

En la Figura 2, se representa la ley de variación del ancho de banda Δ de los grupos de frecuencias en función de su frecuencia central f . Este ancho de banda es prácticamente constante hasta los 100 Hz y varia poco hasta los 500 Hz; por encima, aumenta de forma más o menos proporcional a la frecuencia y luego se acerca al tercio de octava. Las determinaciones cuantitativas de la formación del umbral de audibilidad han demostrado que, sea cual sea el nivel, un sonido de frecuencia f por encima de los 2 kHz se encuentra en el umbral cuando su nivel de presión sonora está en torno a los 6 dB por debajo del ruido de enmascaramiento que cae dentro del grupo de frecuencias correspondiente. Por debajo de 2 kHz la diferencia (S) de los niveles es menor y en el caso de frecuencias muy bajas disminuye a 3 dB aproximadamente. En la Figura 3 se puede ver la variación de esta diferencia de nivel en función de la frecuencia.

Cuando el sonido es complejo y de espectro continuo, se observa una cierta reducción del umbral cuando la comparación de los niveles de presión sonora y del ruido en varios grupos de frecuencias distintas conduce al mismo umbral. Esta disminución, M, depende del número de grupos de frecuencias liminales en cuestión y su valor se indica en la curva de la Figura 4 (en la práctica, dicha disminución casi nunca supera los 2 o 3 dB).

Las reglas arriba mencionadas son aplicables a los sonidos de corta duración, siempre y cuando la duración supere claramente los 35 ms. En cuanto a sonidos cercanos a este valor o inferior, se observa que la audición en el umbral tiene la propiedad de integrarse con una constante de tiempo de 35 ms.

Los umbrales establecidos anteriormente se corresponden con una probabilidad de audición del 50%. Para alcanzar una probabilidad de audición del 90%, se ha observado que son necesarios niveles de presión sonora aproximadamente 3 dB superiores a los niveles anteriores.

La aplicación de este criterio de audibilidad da lugar a la definición del ruido de enmascaramiento, determinado por su nivel espectral N_s . Debido a la diversidad de métodos para la medición de los sonidos, sólo se pueden plantear indicaciones generales. Si su análisis espectral da como resultado componentes discretos relativamente espaciados, se debe establecer el nivel de presión acústica de dichos componentes. Si da como resultado un espectro continuo o con componentes discretos muy cercanos, será necesario un análisis por tercios de octava. En el caso de los sonidos oscilantes o muy breves, es aconsejable determinar los niveles de presión acústica teniendo en cuenta una integración temporal con una constante de tiempo de 35 ms.

¹ (x) Véase, en particular, H. Scholl "über ein objectives Verfahren zur Ermittlung von Hörschwellen und Mithörschwellen". Frequenz, vol. 17, N.º 4, abril de 1963, páginas 125 a 133

2.1.2 RUIDO A BORDO DEL BUQUE

El ruido a bordo depende del tipo de buque, de su posición, del funcionamiento de las distintas máquinas y equipos que producen ruido, incluidos los motores del buque, y también del viento y del estado del mar.

Para la elección de un ruido estándar, hay que llevar a cabo mediciones en diferentes países. En el puente de los buques grandes, la señal corre el riesgo de escucharse de forma muy amortiguada ya que esta parte del buque está bien aislada e insonorizada. Por lo tanto, se ha considerado más razonable establecer el alerón del puente como la posición de referencia. De hecho, el vigía en condiciones de niebla suele estar en el exterior para escuchar la señal sonora y a veces incluso se sitúa en la proa. Al elegir el alerón del puente, se toma un punto de audición realístico y no demasiado favorable, ya que se ha observado que ahí el ruido es mayor que en la proa, al menos cuando el buque está en marcha.

Los ruidos así medidos a bordo de los grandes buques mercantes de diferentes países son, por término medio, muy similares y poco afectados por el estado de marcha o parada de los motores principales. No se ha realizado un análisis específico del efecto de las condiciones meteorológicas en el ruido.

En general, los buques pequeños son más ruidosos que los grandes, pero es evidente, cuando se trata de estar a la escucha de una señal sonora con niebla, que es aconsejable reducir la velocidad y (para los que se encargan especialmente de la escucha) situarse en a un punto más favorable. Teniendo en cuenta estas precauciones, las condiciones de audición pueden, en general, considerarse al menos tan favorables como las de los buques mayores, por lo que, en la determinación del ruido convencional no se ha considerado conveniente establecer diferencias con los buques pequeños.

Finalmente se ha considerado aconsejable tomar como ruido convencional el que prevalece en el alerón del puente de los buques grandes moviéndose a una velocidad algo menor que la habitual por condiciones de niebla. Por lo tanto, el trazado de la curva se efectúa con los niveles espectrales medios registrados en dichas condiciones. En la Figura 5, en la que el logaritmo de la frecuencia forma la abscisa y en la que el nivel espectral NB, en decibelios (ref. $20 \mu\text{Pa}$ o $20 \mu\text{N/m}^2$ o $2,10^{-4} \mu\text{bar}$) por hercio, forma la ordenada, esta curva se compone de un contorno poligonal, cuyos vértices sucesivos son los siguientes:

Tabla 1 *Ruido espectral en función de la frecuencia*

25 hercios	80 decibelios
100 hercios	56 decibelios
2.000 hercios	21 decibelios
4.000 hercios	10 decibelios

Los valores para la desviación típica E de estos niveles espectrales medidos en diferentes buques se han tomado como 8 dB hasta los 125 Hz, 7 dB a los 250 Hz y 6 dB por encima de los 500 Hz.

2.2 PROPAGACIÓN DEL SONIDO

Se pretende que las señales de niebla se escuchen a distancias relativamente grandes con respecto al transmisor. El sonido que alcanza al oyente tiene características que se ven afectadas por numerosos parámetros, como:

- Distancia entre el emisor y el que escucha;

- Demora del emisor;
- Variación de la velocidad de propagación en el aire, debido a las diferencias de temperatura y de humedad;
- Atenuación del sonido durante la propagación, que a su vez depende de la temperatura, la humedad y a la cantidad de microgotas de la niebla;
- Viento, turbulencia de la atmósfera y su falta de homogeneidad, que desvían y dispersan las ondas sonoras degradando progresivamente la forma de onda (o espectro) de la señal;
- Obstáculos, especialmente la superficie del mar y los que hay en las inmediaciones del emisor y el que escucha, que reflejan o disipan la energía sonora, multiplican las trayectorias de propagación y causan interferencia.

Puede imaginarse la gran irregularidad en el tiempo y el espacio del sonido que llega al oyente, irregularidad que se incrementa mucho con la distancia.

A fin de evitar una complejidad excesiva en el cálculo del alcance, se deben simplificar de forma radical las condiciones reales de propagación. Se asume que el sonido se propaga en una atmósfera homogénea, libre de obstáculos y totalmente tranquila en ausencia de señal. Ya que la dimensión de la fuente sonora es muy reducida en relación con la distancia al oyente, la disminución del nivel sonoro puede calcularse como un resultado de la atenuación por divergencia esférica O , el exceso de atenuación A , proporcionales a la distancia D , y a lo relacionado con las pérdidas de energía inherentes al fenómeno del sonido. Una parte de dicha atenuación proporcional a la distancia, que es de importancia insignificante salvo a frecuencias muy altas, se debe a la acción combinada de la viscosidad, la conductividad térmica del aire y al fenómeno de la relajación de los estados de energía rotacional de las moléculas de aire, y el correspondiente coeficiente de atenuación puede tomarse como si fuera independiente de la humedad del aire. La segunda parte se debe al fenómeno de la relajación de los estados vibracionales de las moléculas de oxígeno en el aire, que depende mucho de la presencia de moléculas de agua y el coeficiente correspondiente, por lo tanto, variará con la humedad.

Como se requieren las señales sonoras en condiciones de niebla, es lógico considerar la cuestión de la humedad de saturación y no obviar el efecto de la atenuación por las gotas suspendidas en el aire, que es, sin embargo, un efecto de importancia secundaria.

En la gama de frecuencias de interés para la señalización marítima, la determinación del exceso de atenuación A se encuentra con serias dificultades experimentales. Al aire libre, es prácticamente imposible evitar los efectos perturbadores del mismo orden de magnitud que el efecto que se quiere medir. En el laboratorio, las distancias con las que se puede trabajar no permiten la obtención de atenuaciones de suficiente magnitud para realizar una medición precisa. Por lo tanto, sobre la base de consideraciones teóricas, hay que limitarse a las estimaciones por extrapolación de las mediciones realizadas con mayor frecuencia. Los resultados que se tienen en cuenta son los de Cyril M. Harris del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Columbia en Nueva York, publicados en su artículo "*Absorption of sound in air versus humidity and temperature*" (J.A.S.A., Vol. 40, N.º 1, Julio de 1966, páginas 148 a 159). Se han supuesto una temperatura del aire de 10°C y una humedad relativa del 90%. Se ha elegido este último valor a falta de curvas para una humedad relativa del 100% en los resultados de Harris. Las tendencias de las curvas de Harris demuestran que los valores de absorción para una humedad relativa del 100% son muy cercanos (siendo iguales todas las demás condiciones) a los del 90%, aunque algo menores.

Los valores de la atenuación β debida a la absorción, en decibelios por milla, figuran en la siguiente tabla:

Tabla 2 *Atenuación del sonido debida a la absorción, en decibelios por milla,*

Frecuencia f (en Hz)	Atenuación β (en dB/milla)
125	0,5
250	1,1
500	2,6
1000	6,5
2000	15,9
2500	22,4
3200	30,5
4000	42,5
5000	59,0

A la absorción del aire, debe añadirse la debida a la niebla. Se ha tenido en cuenta una niebla estándar, es decir, una niebla homogénea que contiene $0,1 \text{ g/cm}^3$ de agua condensada en gotas uniformes de un diámetro de 25 micras. Como los valores correspondientes de atenuación, se han adoptado los que figuran en el informe sobre el Proyecto de la Guardia Costera de los EE.UU. CGTD J 15 - 1/5 Phase II Final Report "Investigation of the transmission of sound through fog over water" de Bolt, Beranek y Newman Inc., que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3 *Absorción del sonido debida a la niebla*

Frecuencia f (en Hz)	Atenuación γ (en dB/milla)
100	0,97
400	1,38
640	1,46
1000	1,54
2000	1,64

No se ha tenido en cuenta la atenuación debida a la difusión. Se han reunido los resultados de los cálculos de interpolación en la tabla3.

Cuando se produce la propagación en condiciones sin viento, o a un ángulo de 90° del viento, los niveles de presión sonora observados están, por lo general, en concordancia razonable con los valores deducidos de los supuestos anteriores. Si se produce la propagación en dirección contraria al viento, entra en juego el fenómeno de la sombra acústica y los niveles de presión sonora observados a una misma distancia son mucho menores que los observados sin viento contrario, percibiéndose grandes variaciones según el momento. En este caso, el exceso de atenuación no es proporcional a la distancia. Como resultado de las pruebas realizadas con el supuesto anterior, se observa que el exceso de atenuación puede ser superior a los 30 decibelios. En cambio, en la dirección del viento, se observa una disminución del exceso de atenuación que puede llegar a alcanzar varios decibelios.

Debido a la falta de conocimiento preciso sobre la propagación a favor y en contra del viento, y también debido a su gran irregularidad, no ha sido posible tener en cuenta estos tipos de propagación a la hora de determinar el alcance nominal y el alcance usual.

2.3 EMISIÓN DEL SONIDO

- a) Las dimensiones de las fuentes sonoras son siempre pequeñas en relación con la distancia de escucha y, en general, lo siguen siendo en relación con las distancias a las que el exceso de atenuación proporcional a la distancia adquiere un valor significativo.
- b) Si tenemos en cuenta los supuestos relativos a la propagación del sonido para la determinación del alcance, en una zona lo suficientemente cercana para que no sea apreciable el exceso de atenuación, pero lo bastante alejada para que siga siendo reducida la dimensión del emisor en relación con la distancia, la propagación del sonido se produce solo teniendo en cuenta la divergencia esférica, y el nivel de presión N_D , en decibelios, disminuye de acuerdo con la Ecuación 1; es decir, 6 decibelios cada vez que se duplica la distancia, o 20 decibelios cada vez que se aumenta diez veces la distancia. En este caso, D es la distancia a la fuente sonora y D_0 la distancia de referencia a la cual el nivel de presión sonora es N_r .

$$N_D = N_r - 20 \log D/D_0$$

Ecuación 1 Atenuación del sonido debida a la distancia

Donde:

N_D es el nivel de presión sonora de un sonido puro generado a 1 metro por un emisor de sonido (dB)

N_r es el nivel de presión sonora de un sonido puro generada por el emisor de sonido a la distancia de la referencia de 1 metro en la dirección considerada

D es la distancia a la fuente sonora

D_0 es la distancia de referencia a la que el nivel de presión sonora es N_r

Por lo tanto, es suficiente conocer, para cada dirección de emisión de interés (p.ej. para prácticamente todas las direcciones de emisión en el plano horizontal), el espectro sonoro de la señal a la distancia de referencia para que las propiedades de la fuente sonora queden totalmente definidas.

Se ha elegido esta distancia de referencia para que sea igual a 1 metro.

Apéndice 1 proporciona detalles de los métodos utilizados para obtener el espectro sonoro a la distancia de referencia.

3 DEFINICIÓN DEL ALCANCE NOMINAL Y DEL ALCANCE USUAL

Los supuestos simplificados y los datos recogidos como se especifica en el apartado anterior permiten calcular a bordo el alcance de una señal sonora para varias probabilidades de audición con el ruido que corresponde o supera al de un determinado porcentaje de grandes buques mercantes.

3.1 ALCANCE NOMINAL

Para el alcance nominal P_n , se ha elegido, por convenio, una probabilidad de escucha del 90% en unas condiciones de ruido igual o superior al que se encuentra en el 84% de los buques mercantes grandes. Por lo tanto:

El alcance nominal es, por convenio, la distancia a la que, en condiciones de niebla, un vigía situado en el alerón del puente tiene una probabilidad del 90% de oír la señal cuando se encuentra sometido a un ruido, según lo define el Subcomité de Señales Sonoras de la IALA, que es igual o superior al que se encuentra en el 84% de los grandes buques mercantes, si la propagación entre el emisor de la señal de niebla y el receptor ocurriese en condiciones de calma y sin intervención de obstáculos.

3.2 ALCANCE USUAL

En cuanto al alcance usual P_u , se ha elegido, por convenio, una probabilidad de escucha del 50% en unas condiciones de ruido igual o superior al que se encuentra en el 50% de los buques mercantes grandes. Por lo tanto:

El alcance usual es, por convenio, la distancia a la que, en condiciones de niebla, un vigía situado en el alerón del puente tiene una probabilidad del 50% de oír la señal cuando se encuentra sometido a un ruido, según lo define el Subcomité de Señales Sonoras de la IALA, que es igual o superior al que se encuentra en el 50% de los grandes buques mercantes, si la propagación entre el emisor de la señal de niebla y el receptor ocurriese en condiciones de calma y sin intervención de obstáculos.

3.3 EMISOR DE SEÑALES DE NIEBLA

Es necesario especificar en cada ocasión para qué demora del emisor de señales de niebla se ha determinado el alcance nominal o usual.

Los valores del alcance usual, a los que se refiere la definición antes mencionada son, en general, del mismo orden de magnitud que los alcances que los métodos anteriores habían atribuido a los emisores de señal de niebla. Los alcances nominales son claramente menores que estos últimos.

Es posible que no coincida la clasificación de los emisores de señales de niebla en función del alcance usual con su clasificación en función del alcance nominal.

3.4 CONCEPTOS DEL ALCANCE NOMINAL Y DEL ALCANCE USUAL

La atención de los usuarios con los conceptos de alcance nominal y de alcance usual debe centrarse, especialmente, en el hecho de que el alcance real de una señal sonora puede diferir considerablemente con el alcance nominal o usual y en que, en algunos casos, puede caer a valores muy bajos, en particular debido a vientos fuertes o contrarios, o cuando el oyente se encuentre en un buque muy ruidoso.

4 CÁLCULO DEL ALCANCE NOMINAL Y DEL ALCANCE USUAL

Los supuestos y los datos relativos a la audibilidad y la propagación del sonido adoptados por convenio, permiten el cálculo del nivel de presión sonora N_r de un sonido puro a la distancia de referencia de un emisor de señales sonoras, cuyo alcance nominal o usual se conoce.

Los resultados de dichos cálculos permiten el trazado de los gráficos del alcance nominal P_n (Figura 7) o del alcance usual P_u (Figura 8) de un sonido puro de frecuencia f , cuyo nivel de presión sonora N_r se conoce a la distancia de referencia. Se adjuntan los cuadros relevantes de cálculo (0, II y III).

El uso de las gráficas de las Figuras 7 y 8 permite calcular en cada caso el alcance nominal o usual.

4.1 SONIDO PURO

En el caso de un sonido puro, los alcances nominal y usual se obtienen directamente en los gráficos.

4.2 SONIDO COMPLEJO

En el caso de un sonido complejo la utilización del gráfico es similar, pero el nivel sonoro en decibelios a tener en cuenta es el del grupo de frecuencias, cuya frecuencia central se toma en la abscisa.

4.3 ESPECTRO SONORO

Si el espectro es continuo o contiene numerosos líneas, la frecuencia se podrá elegir de cualquiera del espectro sonoro y, en todos los casos, habrá un grupo de frecuencias que le corresponda, así como un nivel de presión sonora y se podrá obtener el alcance nominal o usual mediante el gráfico apropiado. En un sonido complejo el alcance nominal o usual será el mayor de todos los posibles grupos de frecuencias, sujeto a la corrección indicada en la Figura 4. El grupo (o grupos) de frecuencias para el cual se consigue el alcance máximo se determina (o determinan) mediante aproximación.

Si el sonido tiene un espectro de líneas y si sólo hay una línea espectral en el grupo de frecuencias que le corresponde, el nivel de presión sonora en ese grupo de frecuencias será el de esa línea.

Si hay varias líneas en el grupo de frecuencias, el nivel de presión sonora se obtiene combinando las líneas (o sus resultantes) de dos en dos, de acuerdo con las reglas indicadas en la escala de conversión en la Figura 1.

Si el espectro es continuo, el nivel de presión sonora del grupo de frecuencias se puede deducir a partir del nivel del espectro, sumando: $10 \log \Delta$ (Δ = ancho del grupo de frecuencias), o a partir del nivel del tercio de octava, sumando: $10 \log \Delta - 10 \log T$ (T = ancho de banda del tercio de octava). Si el grupo de frecuencias se solapa con varios tercios de octavas, deberá dividirse en bandas parciales que se correspondan con ellas. Entonces, el nivel de presión sonora en estas bandas parciales se calculará como ya se ha indicado, y la combinación de dichos niveles se efectuará de acuerdo con el procedimiento indicado en la Figura 1.

Si se dan a la vez un espectro continuo y una línea espectral y si el análisis se ha realizado por separado, también pueden calcularse los niveles respectivos de presión sonora combinándolos mediante el método descrito en la Figura 1.

En el caso de señales sonoras ricas en armónicos, la solución más conveniente será medir los niveles de presión sonora de los grupos de frecuencias con la ayuda de filtros paso banda, ya sea normalizados (por ejemplo, filtros de tercera octava que coinciden con los grupos de frecuencias por encima de 500 Hz) o filtros de ancho de banda variable.

Si un número v de grupos de frecuencias, que no se solapan, tienen el mismo alcance, dentro de la tolerancia de la medición, es necesario realizar la corrección indicada en el gráfico de la Figura 4. Se determinará la corrección del alcance aumentando los niveles de presión sonora de los grupos de frecuencias con el número M de decibelios, como se muestra en el gráfico.



4.4 AMPLITUDES PEQUEÑAS U OSCILANTES

En el caso de sonidos cortos u oscilantes, se puede obtener la amplitud máxima mediante un aparato de medición con una constante de tiempo igual a 35 ms, precedido por un filtro paso banda correspondiente a ese grupo de frecuencias. A continuación, se procede como en el caso de un sonido complejo tras haber buscado, mediante aproximación, los grupos de frecuencias que dan lugar a los alcances máximos.

También se puede utilizar registro de la curva de presión sonora, tal y como se describe en el artículo anteriormente mencionado (véase la nota de pie en la página 11)

APÉNDICE 1 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UNA FUENTE SONORA

1. INTRODUCCIÓN

En primer lugar, es necesario instalar la fuente sonora en donde se puedan reproducir condiciones semejantes al “campo libre”; es decir, un medio homogéneo, libre de obstáculos, en ausencia de señal y completamente tranquilo.

A continuación, se deben encontrar los límites de distancia dentro de los cuales la ley de atenuación por divergencia esférica es efectiva. Finalmente, en esta región, se deben realizar las mediciones de sonido con respecto a todas las direcciones de interés. La aplicación de la fórmula $N_D = N_r - 20 \log D/D_0$ (véase la página 15) permitirá determinar el nivel de presión sonora a la distancia de referencia, que no tiene por qué encontrarse en la región donde es efectiva la ley de divergencia esférica.

2. DISPOSICIÓN EXPERIMENTAL

En la práctica, una solución idónea consiste en trabajar en una cámara anecoica, cuyas paredes están revestidas de material absorbente, y que simula una muy buena aproximación a un “campo libre”. Tiene la ventaja de anular las perturbaciones debidas al ruido ambiente del exterior y, sobre todo, no molesta al vecindario en el caso de señales potentes.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que el material adsorbente no es completamente eficaz a frecuencias muy bajas, por lo que las condiciones del “campo libre” sólo se conseguirán satisfactoriamente por encima de ciertas frecuencias, que suelen conocer los usuarios habituales de la cámara. Además, las condiciones del “campo libre” no prevalecen en las inmediaciones de las paredes, por lo que el espacio disponible en la cámara es sólo una fracción de su volumen total. Teniendo en cuenta estas limitaciones, sólo será posible la utilización de cámaras anecoicas si los aparatos de emisión de sonidos no son demasiado voluminosos en relación con el tamaño de la misma.

Si no se dispone de una cámara anecoica o si el emisor de sonido es demasiado grande para las cámaras disponibles, hay que trabajar al aire libre. Entonces, se está expuesto a las condiciones meteorológicas y es muy difícil encontrar una ubicación donde la población local no reaccione de manera enérgica contra las molestias causadas por las transmisiones repetidas de sonido. Asimismo, hay que evitar las perturbaciones causadas por la presencia de obstáculos, especialmente el reflejo del suelo. Por lo tanto, lo más conveniente quizá sea situar el aparato en una estructura en la torre del faro y realizar las mediciones bastante cerca del emisor de sonido y a una altura en que el efecto del reflejo del suelo sea insignificante en relación con el del trayecto directo.

También se podrá utilizar la azotea de un edificio alto, en cuyo caso el emisor de sonido debe instalarse en el borde de la azotea y el micrófono de medición sobre un soporte externo en una zona que se haya apreciado que está libre de reflejos significativos.

El éxito de las disposiciones experimentales adoptadas puede comprobarse verificando que, en la dirección elegida, existe una zona en la que se cumplen las condiciones de divergencia esférica; es decir, que el nivel de presión sonora varía de acuerdo con la ley mencionada anteriormente.

A modo de ejemplo, la distancia mínima de medición, r , para el margen máximo de error de 0,5 dB viene dada por la fórmula:

$$R > \pi/4 \times d^2/\lambda$$

Ecuación 2 **Distancia mínima de medición**

donde

d es la dimensión mayor de la parte emisora de la fuente sonora o del grupo de fuentes sonoras,
 λ es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia más alta que se produce en la medición.
(la distancia r no debe ser nunca inferior a $2d$).

Como es natural, hay que fijar un punto de origen desde el cual se establecen las direcciones y las distancias relativas a la fuente. La precisión en la posición de dicho punto no es muy crítica, ya que las mediciones han de realizarse a gran distancia en comparación con las dimensiones de la parte emisora del aparato. En la práctica, será suficiente elegir un punto en el centro aproximado de la zona de emisión. Por ejemplo, cuando se trata de una bocina, se toma el centro de la abertura. Teniendo en cuenta esta elección, se demuestra que, para una sola bocina, la región en la que se verifica la ley de divergencia esférica puede empezar muy cerca del aparato, ya que en el eje permanece bien verificada hasta una distancia del centro de la abertura de la bocina igual al doble del diámetro de esta abertura.

Si el equipo es demasiado voluminoso, o si es difícil separar la reflexión en el suelo del trayecto directo, o si se trata de uno ya instalado, puede ocurrir que experimentalmente no se encuentre ninguna región en la que la ley de la divergencia esférica pueda verificarse satisfactoriamente. Entonces, se tendrá que hacer una evaluación de los efectos del reflejo que, si no son demasiado significativos, se podrán deducir de las mediciones del terreno, de la ley de atenuación establecida experimentalmente o de mediciones en determinada parte del campo de sonido. A continuación, se podrán deducir las correcciones a efectuar para la evaluación de la parte relacionada con el propio trayecto directo y así determinar las propiedades de emisión de la fuente sonora en ausencia de obstáculos.

Puede darse el caso de que la construcción en la que se instala el aparato sea un deflector acústico, que altere de manera significativa las propiedades direccionales de la emisión. También puede suceder que el aparato de sonido haya sido suministrado con un deflector acústico para concentrar el sonido en determinadas direcciones o para reducir sustancialmente la emisión hacia determinadas zonas residenciales. En estos casos, sólo aquellas mediciones realizadas con el equipo así instalado pueden arrojar una evaluación objetiva del alcance nominal y usual, pero pueden resultar difíciles de realizar.

3. SONOMETRÍA Y ANÁLISIS

Como el criterio de audibilidad requiere un análisis del espectro sonoro, independiente de las fases de los componentes, se podrán aplicar los métodos clásicos del análisis del espectro sonoro.

El sonido siempre se detecta mediante micrófonos, los cuales transforman la presión acústica en tensión eléctrica.

Dicho micrófono debe tener una sensibilidad constante en el rango de frecuencias de interés y debe funcionar de manera lineal, sin saturación hasta los niveles más potentes del sonido que se vayan a medir. Por otra parte, a causa del elevado nivel de la intensidad de los sonidos producidos, no se requiere un alto grado de sensibilidad. Normalmente se utilizarán micrófonos de reducidas dimensiones que tengan poco efecto en el campo de sonido y, preferentemente omnidireccionales y no permitirán, por ejemplo, el aislamiento del trayecto directo del reflejado. Los micrófonos se deberán calibrar con

cuidado, pero una precaución adicional consistiría en aplicar un sonido estándar al micrófono antes de realizar la serie de mediciones, lo que permitiría la comprobación de todo el sistema de medición.

Si se trata de un sonido puro o uno complejo, pero periódico, o, en términos más generales, un sonido que sólo contiene componentes espectrales discretos, los analizadores modernos de ondas hacen posible separar los armónicos o parciales de un orden alto midiendo con precisión su frecuencia (aproximadamente de 1 Hz o de 0,1 Hz) y su nivel de presión sonora (la precisión podrá alcanzar un decibelio e incluso un décimo de decibelio).

Si el espectro es continuo o está compuesto de líneas espectrales muy cercanas, se deben utilizar filtros de tercio de octava o de ancho de banda variable.

Si el sonido está compuesto de sonidos impulsivos muy pronunciados con una presión instantánea muy alta en relación con la presión media, se debe extremar la precaución contra la saturación. Dicha saturación se revela cotejando las mediciones efectuadas con diferentes amplificaciones del mismo sonido.

Si el sonido fluctúa o es de corta duración, será necesario tomar la precaución de utilizar con los filtros paso banda (ya que, en dichos casos, no hay componentes claramente discretos en el análisis espectral) un aparato de medición con una constante de tiempo de 35 ms.

Si el sonido se va a medir en varias direcciones, éstas deben efectuarse en el plano horizontal de la posición de la instalación, las únicas de interés práctico en la aplicación al servicio marítimo.

Por lo tanto, debe trazarse un patrón de emisión horizontal. El mejor método (si el aparato no es ni demasiado pesado ni demasiado voluminoso) consiste en utilizar un trazador polar automático con mesa giratoria, con el micrófono estacionario. La grabación puede realizarse con cualquier equipo que deba analizarse, pero es fundamental que el sonido permanezca constante durante todo el periodo de rotación.

Si no se cumple esta condición, o si el aparato es demasiado pesado o voluminoso para fijarlo a la plataforma de la mesa giratoria, se deberá proceder punto por punto, con un ajuste manual de la rotación, mientras que el micrófono permanece inmóvil.

Si no se puede contemplar dicho ensayo, como en el caso de un aparato ya instalado, el micrófono deberá moverse con respecto al emisor de sonido.

APÉNDICE 2 DIFERENTES TIPOS DE SONIDO Y SUS PROPIEDADES

Los emisores de sonido utilizados por los servicios de faros han sido, y aún son, de muchos tipos diferentes. Los sonidos que producen tienen diversas formas de onda, cuyas propiedades respectivas deben apreciarse en función de sus aplicaciones específicas.

1. SONIDOS PUROS

Son los que tienen ondas de presión senoidales, que se corresponden a una sola línea del espectro. El tipo de aparato más utilizado para producir este sonido es el vibrador electromagnético. También puede generarse mediante altavoces alimentados adecuadamente, y existen determinadas sirenas que producen un sonido muy parecido a uno puro.

En el caso de los sonidos puros la energía de la señal se concentra en una sola frecuencia y, por lo tanto en un solo grupo de frecuencias.

Determinados tipos de emisores de sonido puro, como los altavoces, permiten una emisión de mayor potencia que los que mezclan sonidos de diferentes frecuencias, porque la relación de fase no se suele mantener entre las distintas frecuencias que componen el sonido.

Debido a la existencia de reflexiones con la superficie del mar y, posiblemente, de otros obstáculos (por ejemplo, las superestructuras de buques) en el caso de un sonido puro se produce un campo de interferencia entre el sonido directo y el reflejado. Como resultado, el que escucha percibe que la intensidad del sonido parece sufrir fuertes oscilaciones si cambia su posición, aunque sea sólo un poco. Si permanece en una posición fija percibirá variaciones en la intensidad del sonido más o menos rápidas en función de las condiciones atmosféricas. Como en los servicios de faros los elementos de la característica (“toques”) suelen ser bastante cortos, generalmente del orden de 1 o 2 segundos, la intensidad del sonido parece variar de forma considerable y de manera aleatoria de un toque de bocina a otro. El orden de magnitud de la variación de los niveles de sonido suele estar entre los 4 y 8 decibelios por kilómetro. Esta variabilidad hace más difícil el reconocimiento de la característica de la señal.

Un sonido puro puede resultar difícil de detectar si, por desafortunada coincidencia, el ruido de enmascaramiento tiene una energía especialmente alta en el grupo de frecuencias correspondiente.

2. SONIDOS COMPLEJOS

Para evitar estos inconvenientes, mejorar el comportamiento del campo de interferencias y sobre todo para proporcionar una identificación más fácil para el oyente, podemos emplear determinados sistemas, como la emisión de una frecuencia creciente, una frecuencia variable periódica o dos frecuencias distintas emitidas al mismo tiempo.

Debido a su diseño premeditado o a su construcción, muchos emisores de sonido de faros emiten estas señales sonoras complejas que, en diversos grados, son capaces de proporcionar las ventajas arriba mencionadas.

En general, las sirenas y diáfonos emiten sonidos periódicos con uno, dos o tres componentes armónicos predominantes, además de algunos secundarios.

De igual manera, las bocinas de diafragma de aire producen un sonido periódico, pero casi impulsivo, con un espectro de gran riqueza compuesto de numerosos armónicos. Los niveles de presión sonora de este tipo de sonidos disminuyen lentamente con la frecuencia.

En este tipo de sonidos periódicos, la coincidencia entre los componentes espectrales de la señal y las frecuencias dominantes del ruido es de muy baja probabilidad, por lo que se reduce la variación de la intensidad de la señal percibida de un toque a otro. En general, los armónicos de alta frecuencia no contribuyen a limitar el alcance, pero refuerzan la impresión subjetiva de intensidad distancias menores, por lo que las señales con este tipo de armónicos resultarán más efectivas a esas distancias. Por motivo del tamaño limitado de las bocinas, la directividad de dichos aparatos de sonido aumenta con el orden del armónico, de modo que parecen tener mayor directividad si la escucha se realiza a una menor distancia.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que sólo un número reducido de armónicos contribuye al alcance de la señal.

Por estos motivos, se pueden combinar varios sonidos puros (tres, por ejemplo) de frecuencias cercanas, en la misma señal, sumándose la energía de los componentes elementales en el mismo grupo de frecuencias, suavizándose el campo de interferencias y reduciendo las coincidencias de la banda de sonido con el ruido de enmascaramiento. Así, la señal adquiere una tonalidad característica que ayudará a un mejor reconocimiento.

Los grupos de bocinas de aire con diafragma, emitiendo varias frecuencias fundamentales, se han instalado y han demostrado su eficacia para los usuarios, ya que tienen muchas de las ventajas mencionadas anteriormente

Por último, puede añadirse que ciertos diáfonos producen al final del toque, un gruñido característico claramente diferente del resto de la señal en cuanto a su frecuencia y nivel de presión sonora. Dicho gruñido puede ser el factor determinante para el alcance y constituye un elemento característico en el reconocimiento del tipo de señal.

APÉNDICE 3 EJEMPLOS DEL CÁLCULO DEL ALCANCE NOMINAL Y DEL ALCANCE USUAL

1. CASO DE UN SONIDO PURO

Un vibrador electromagnético emite un sonido puro de una frecuencia de 300 Hz. El nivel de presión sonora a una distancia de 1 m, emitido en el eje de las bocinas, es $N_r = 140$ dB.

Se obtienen, directamente de los gráficos de las figuras 7 y 8, el alcance nominal y el alcance usual, respectivamente.

Los resultados son:

$$P_n = 1,3 \text{ millas náuticas}$$

$$P_u = 2,6 \text{ millas náuticas}$$

2. CASO DE UN SONIDO COMPLEJO

2.1. UN SOLO COMPONENTE ESPECTRAL

Determinación de P_n y P_u con un solo componente espectral.

Una bocina de diafragma de aire emite un sonido complejo y periódico, cuyos armónicos principales tienen valores de frecuencia y de presión sonora a 1 m se muestran en las primeras dos columnas de la siguiente tabla:

Tabla 4 *Armónicos principales de un sonido periódico y complejo*

f	N_r	P_n	P_u
252	142,0	1,3	2,7
504	140,4	1,7	2,9
756	137,1	1,5	2,4
1008	133,0	1,2	1,9

Estos armónicos están tan espaciados que sólo hay uno por grupo de frecuencias. El alcance nominal y el alcance usual P_u , correspondientes a los diferentes armónicos se han obtenido de los gráficos de las Figuras 7 y 8 y figuran en la tercera y cuarta columna de la Tabla 4.

El armónico con frecuencia de 504 Hz es el más importante en la determinación tanto del alcance nominal como el usual. No hay que tener en cuenta la corrección de la Figura 4.

Los resultados para este sonido complejo son:

$$P_n = 1,7 \text{ millas náuticas}$$

$$P_u = 2,9 \text{ millas náuticas}$$

2.2. VARIOS COMPONENTES ESPECTRALES

Determinación de P_n y P_u con varios componentes espectrales

Un emisor genera un sonido complejo de una frecuencia fundamental de 75 Hz, cuyo análisis de armónicos hasta el 21º se muestra en las primeras tres columnas de la Tabla 5, al final de este Apéndice.

En primer lugar se debe examinar si varios armónicos entran dentro del mismo grupo de frecuencias. De acuerdo con la Figura 2 encontramos que el ancho del grupo de frecuencias es aproximadamente 90 Hz a bajas frecuencias. Como la distancia entre armónicos es de 75 Hz, siempre hay al menos dos por cada grupo de frecuencias. A frecuencias más elevadas aumenta el ancho de banda de los grupos de frecuencias y superan los 150 Hz a aproximadamente 900 Hz, como se aprecia en la Figura 2. A partir de los 900 Hz, por lo que hay 3 armónicos en ese grupo de frecuencias. A 1.500 Hz el ancho es de aproximadamente 225 Hz, así que se tienen que combinar 4 armónicos. Por encima de 1.500 Hz no afectan al cálculo del alcance, por lo que esos no se han considerado.

La combinación en grupos de 2 o 3 armónicos se puede efectuar de dos maneras diferentes, que se muestran, en un caso, en las columnas 4 y 5, y en el otro, en las columnas 6 y 7 de la Tabla 5, bajo el encabezado “Primera serie” y “Segunda serie”, respectivamente.

En las columnas 4 y 6, se reflejan las frecuencias medias de los grupos de frecuencias y, en las columnas 5 y 7, los niveles de presión sonora total de los armónicos de cada grupo de frecuencias. Para la suma de los niveles, se ha utilizado la escala de conversión de la Figura 1.

Los pares de valores así obtenidos (frecuencia media y nivel total) se trazan en el gráfico figura al final de este Apéndice (extraído de la Figura 7). Los pares de la primera serie se representan por puntos, y los de la segunda por cruces. Si consideramos los puntos, se aprecia que el mismo alcance nominal de 1,6 millas náuticas se corresponde a cuatro frecuencias: 413, 563, 713 y 863 Hz. Se debe efectuar, por lo tanto, la corrección según la Figura 4. En dicha figura, se aprecia que para $\nu = 4$ grupos de frecuencias, el umbral de audición se reduce en $M = 2,8$ dB. A continuación, se suma este valor al nivel de la frecuencia media de los cuatro grupos de frecuencias, lo que produce un alcance nominal de 1,85 millas náuticas (punto rodeado por un círculo).

Si se aplica el mismo proceso a la segunda serie, se obtiene el mismo valor de 1,6 millas náuticas para las cinco frecuencias de 338, 488, 638, 788 y 975 Hz. En este caso, se aprecia en la Figura 3 que para $\nu = 5$, $M = 3,2$ dB. Si sumamos esta cantidad al nivel de 638 Hz, se obtiene el mismo valor práctico de 1,85 millas náuticas para el alcance nominal.

Este ejemplo demuestra que el método de agrupar los armónicos en grupos de frecuencias casi no ejerce ninguna influencia sobre el valor del alcance nominal calculado.

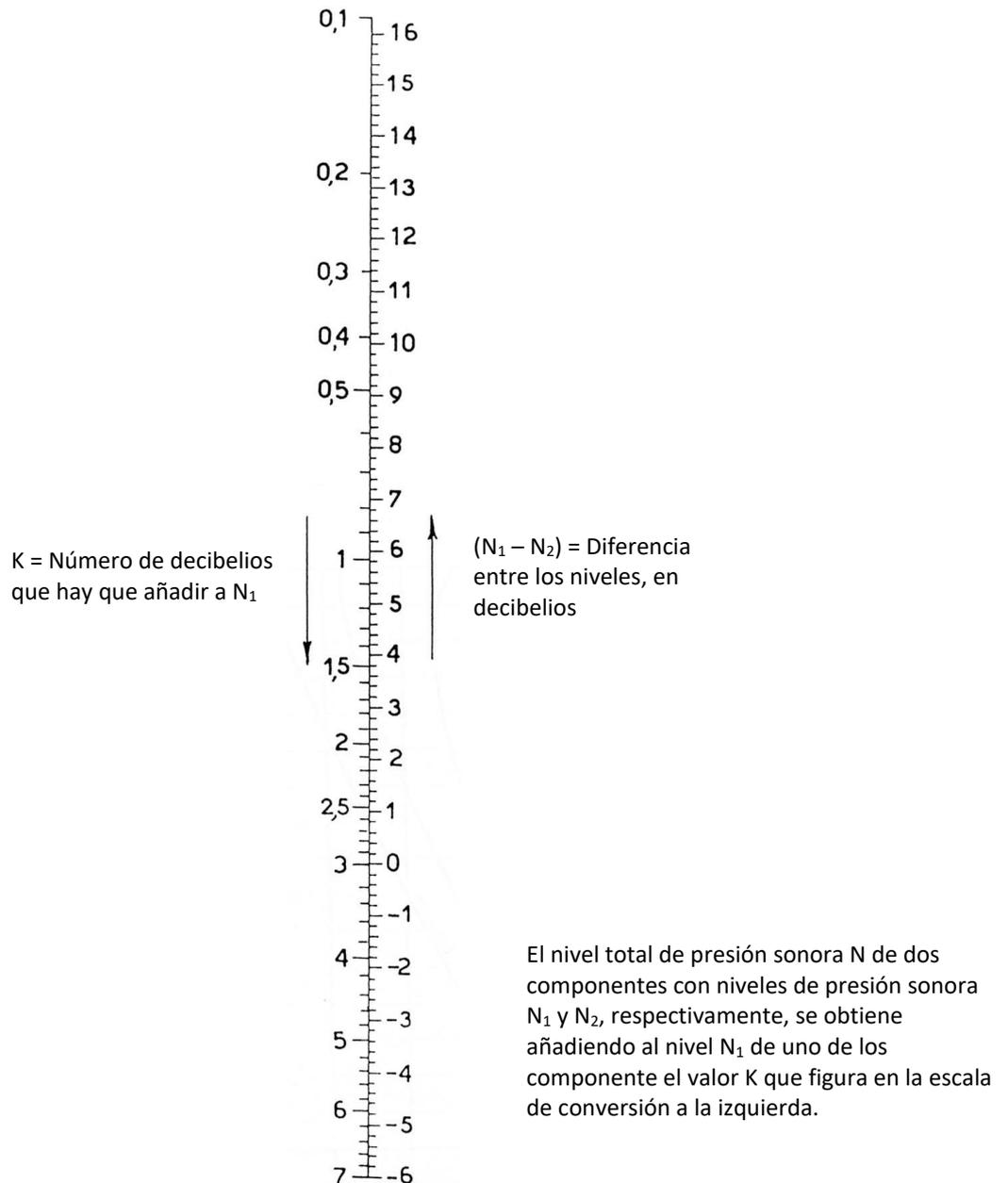


Figura 1 Escala de conversión para la determinación del nivel de presión sonora total de dos componentes espectrales

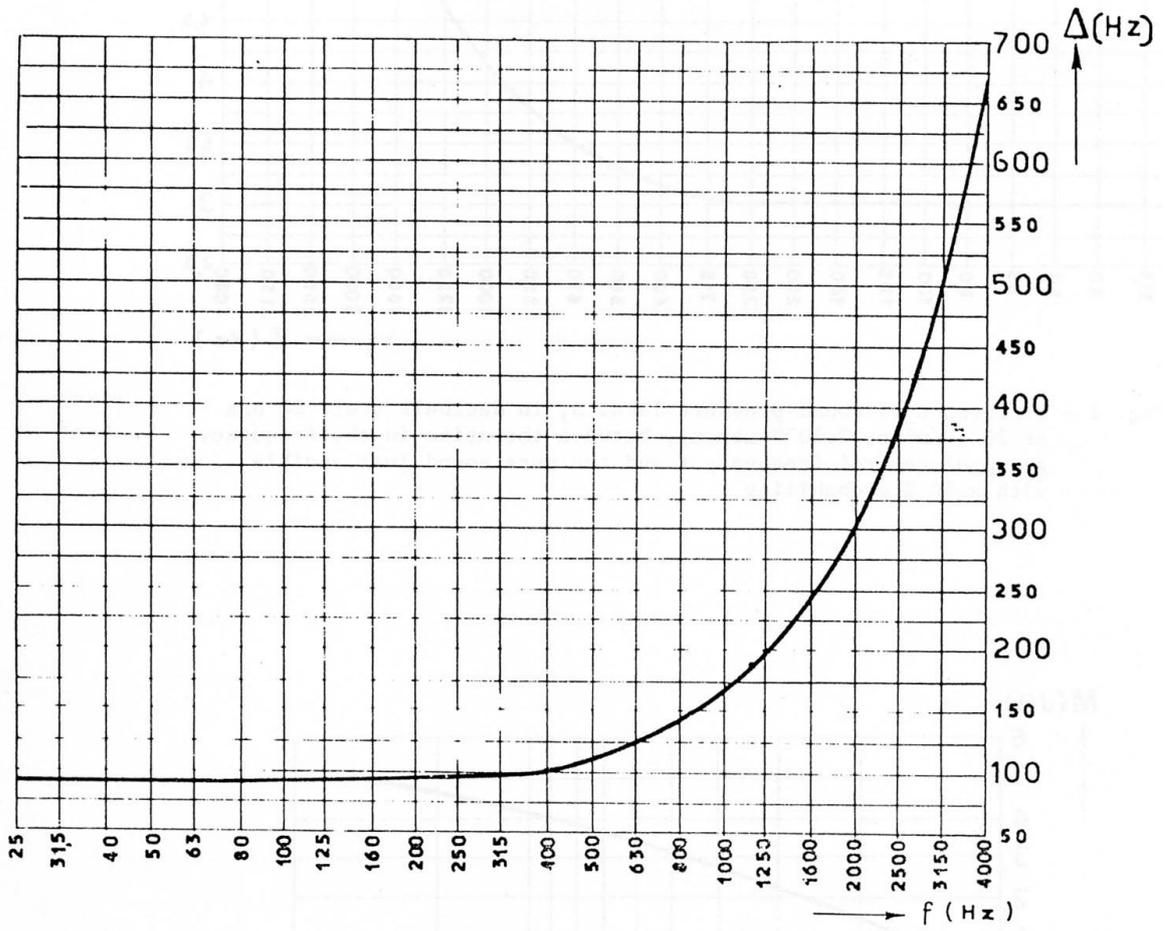


Figura 2 Ancho de banda Δ de los grupos de frecuencias en función de su frecuencia central, f

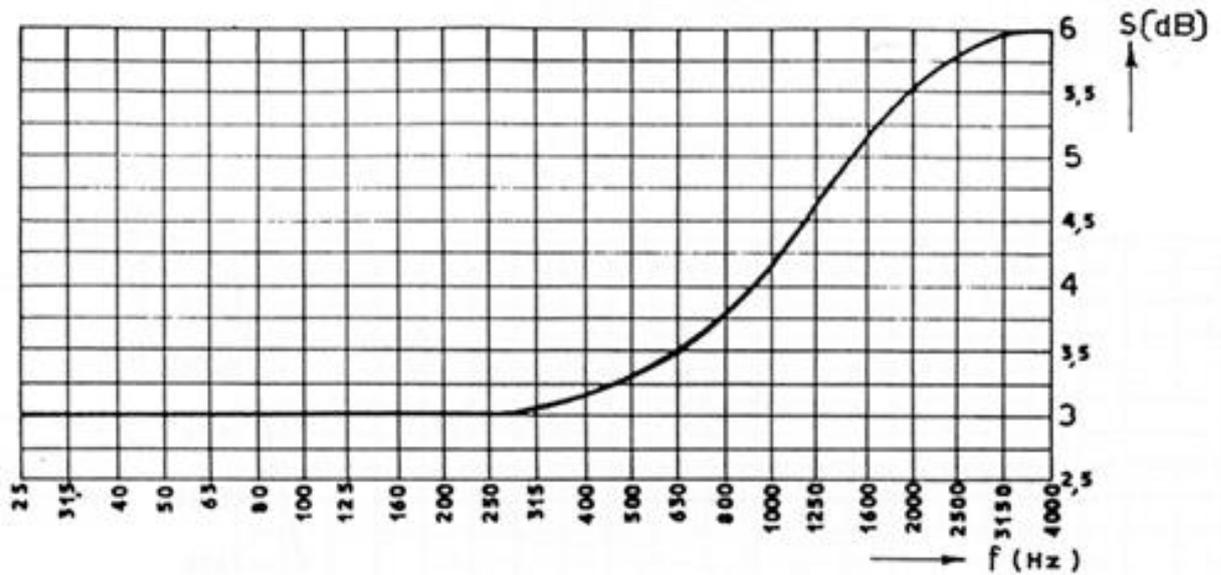


Figura 3 Diferencia de nivel de presión sonora S , en decibelios (ref. $20 \mu\text{Pa}$ o $20 \mu\text{N/m}^2$ o $2,10^{-4} \mu\text{bar}$), entre el ruido en el grupo de frecuencias de frecuencia central f y el sonido puro apenas audible, con un 50% de probabilidad

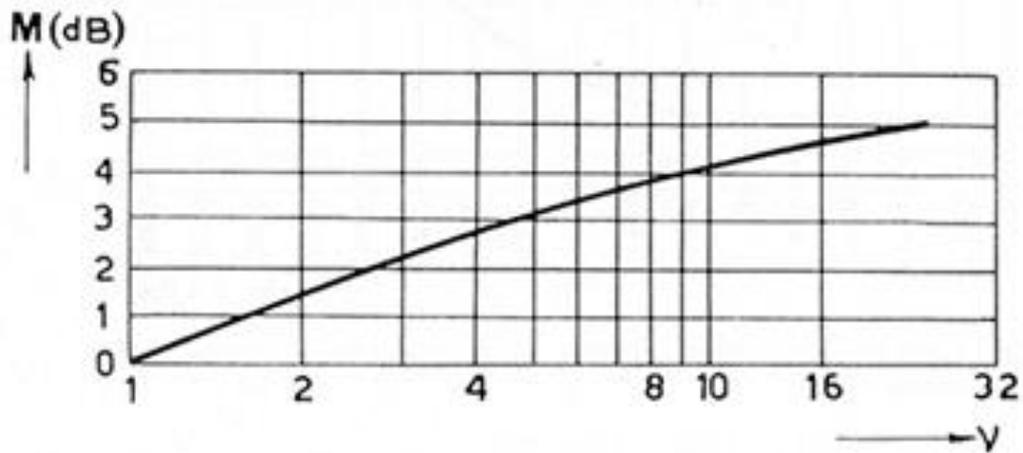


Figura 4 Reducción M del umbral, en decibelios, en función del número γ de distintos grupos de frecuencias al mismo umbral

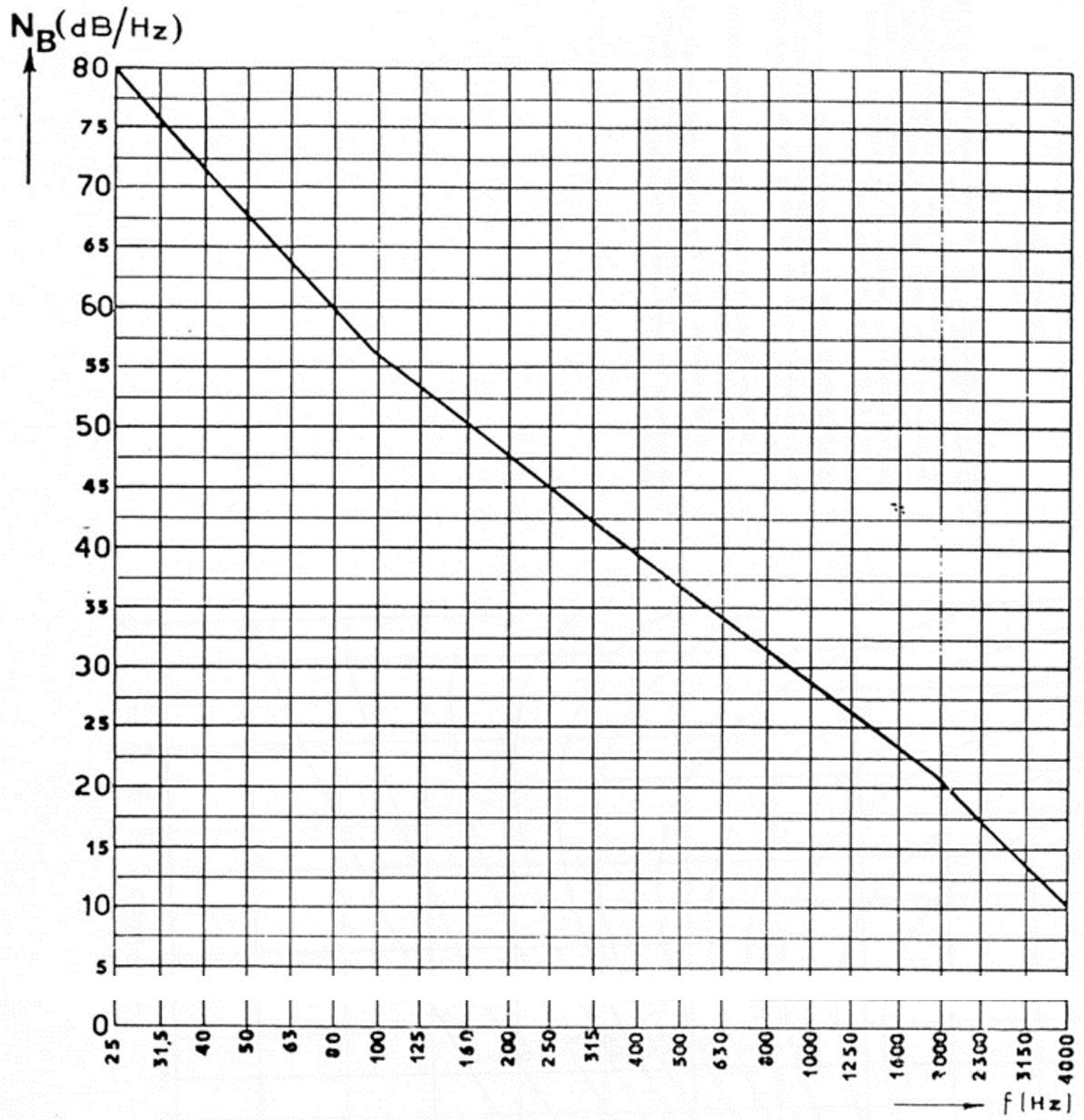


Figura 5 Curva del nivel espectral medio N_B , en decibelios (ref $20 \mu\text{Pa}$ o $20 \mu\text{N/m}^2$ o $2,10^{-4} \mu\text{bar}$) por hercio, registrado en buques mercantes grandes, en función de la frecuencia f

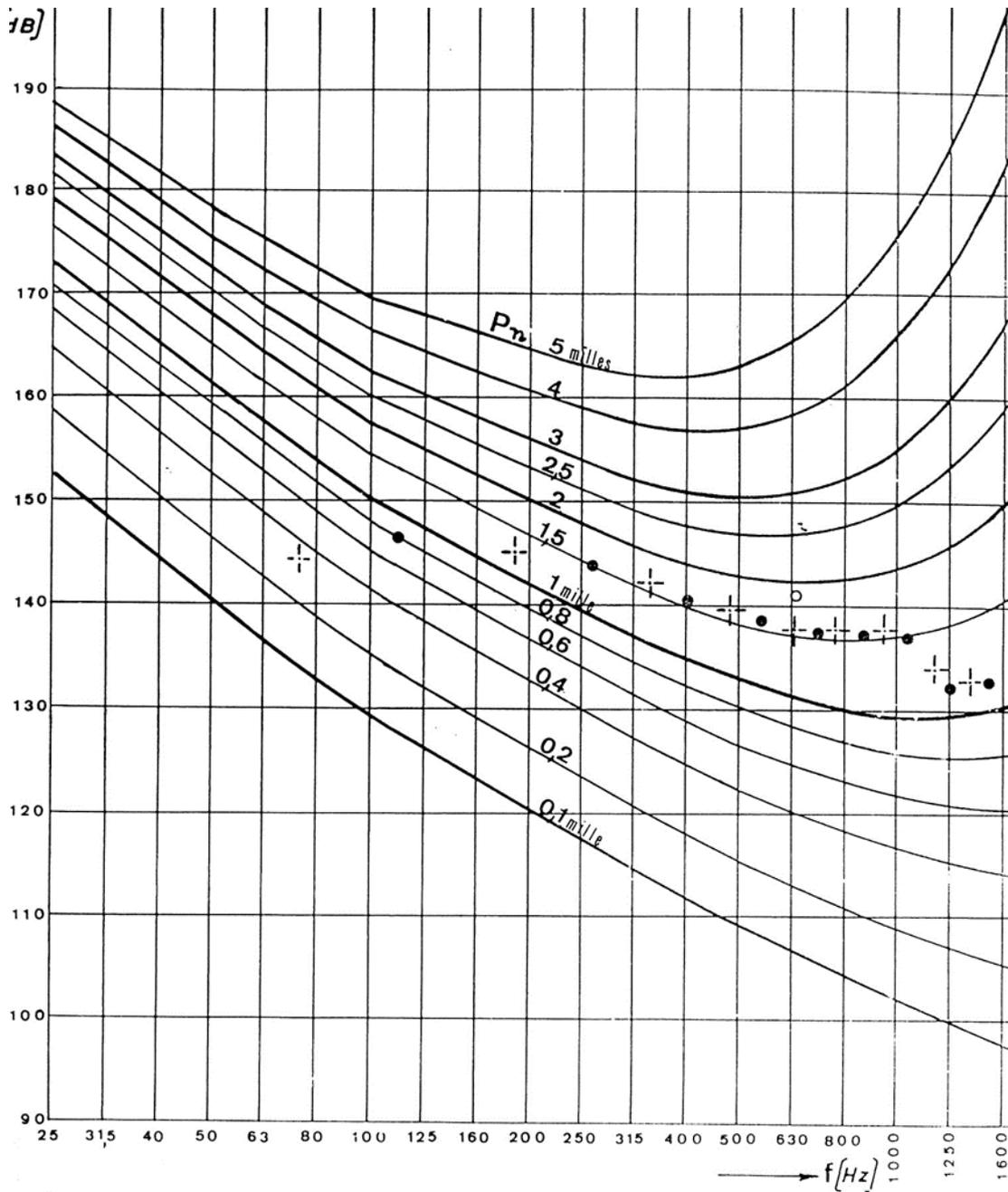


Figura 6 Extraído de la Fig. 7. Caso de aplicación en que varios componentes espectrales entran en la determinación del alcance nominal

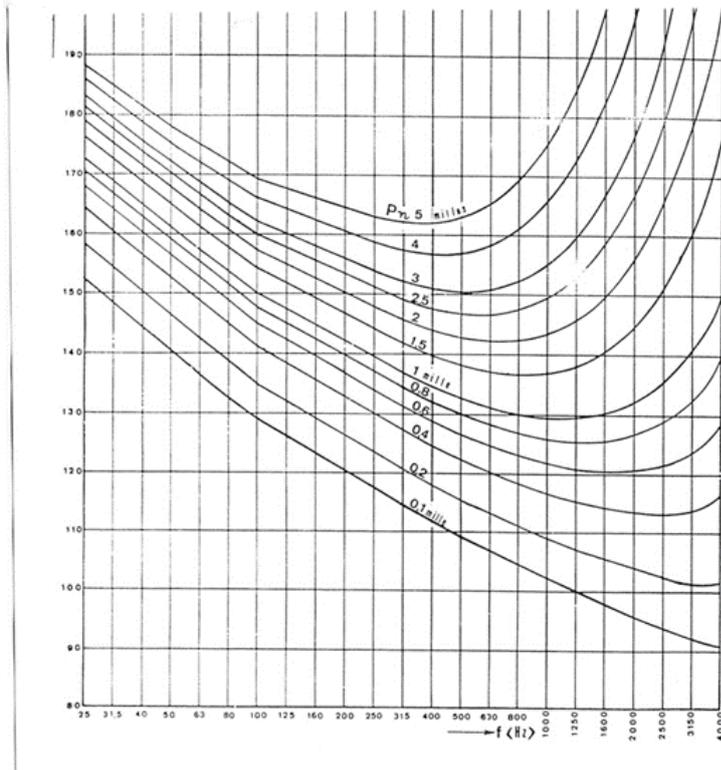


Figura 7 Gráfico para la determinación del alcance nominal de las señales sonoras

Caso de un sonido puro: El alcance nominal P_n , en millas náuticas, se lee en el conjunto de curvas en el punto de corte de la frecuencia del sonido puro (abscisa) y el nivel de presión sonora N_r (ordenada), en decibelios, (ref. $20 \mu\text{Pa}$ o $20 \mu\text{N/m}^2 \mu\text{bar}$) del sonido emitido por el emisor a la distancia de referencia de 1 metro en la dirección en cuestión.

Caso de un sonido complejo: Se encuentra por aproximación el grupo de frecuencias con la frecuencia central f , que proporcione el valor máximo del nivel de presión sonora N_r en el conjunto de curvas.

Si hay un solo grupo de frecuencias, el valor máximo así obtenido es el alcance nominal.

Si el valor máximo se obtiene de forma simultánea en v grupos de frecuencias distintas, se aplica el procedimiento arriba mencionado, pero se aumenta el nivel de presión sonora con el valor M deducido de la Figura 4.

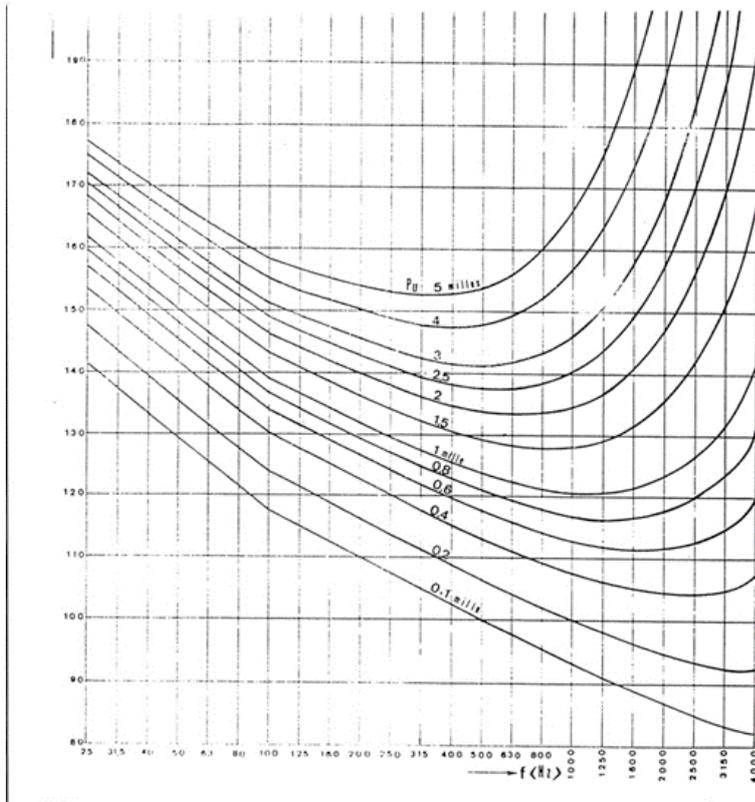


Figura 8 Gráfico para la determinación del alcance usual de las señales sonoras

Caso de un sonido puro: El alcance usual P_u , en millas náuticas, se lee en el conjunto de curvas en el punto de corte de la frecuencia del sonido puro (abscisa) y el de nivel de presión sonora N_r (ordenada), en decibelios, (ref. $20 \mu\text{Pa}$ o $20 \mu\text{N/m}^2 \mu\text{bar}$ o $2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar}$) del sonido emitido por el emisor a la distancia de referencia de 1 metro en la dirección en cuestión.

Caso de un sonido complejo: Se encuentra por aproximación al grupo de frecuencias, con la frecuencia central f , que proporcione el valor máximo del nivel de presión sonora N_r en el conjunto de curvas.

Si hay un solo grupo de frecuencias, el valor máximo así obtenido es el alcance usual.

Si el valor máximo se obtiene de forma simultánea en v grupos de frecuencias distintas, se aplica el procedimiento arriba mencionado, pero se aumenta el nivel de presión sonora con el valor M deducido de la Figura 4.



Tabla 5 Armónicos en un grupo de sonidos

1	2	3	4	5	6	7
Orden del armónico	Frecuencia (Hz)	Nivel a 1 m (dB)	1ª serie		2ª serie	
			Frecuencia media del grupo (Hz)	Nivel total en el grupo (dB)	Frecuencia media del grupo (Hz)	Nivel total en el grupo (dB)
1	75	144	113	146,1	75	144,0
2	150	142			188	145,0
3	225	142	263	143,8	338	142,0
4	300	139				
5	375	139	413	141,1	488	139,5
6	450	137				
7	525	136	563	138,5	638	138,0
8	600	135				
9	675	135	713	138,0	788	138,0
10	750	135				
11	825	135	863	137,5	975	138,2
12	900	134				
13	975	134	1050	137,3	1200	134,1
14	1050	132				
15	1125	131	1275	132,5	1425	133,0
16	1200	129				
17	1275	127	1500	133,5	1425	133,0
18	1350	127				
19	1425	127	1500	133,5	1425	133,0
20	1500	130				
21	1575	128	1500	133,5	1425	133,0