ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

EL SONAR Y SU APLICACION A LA PESCA INDUSTRIAL EN EL MAR ECUATORIANO

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESPECIALIZACION ELECTRONICA

Presentado por:

JORGE FAJARDO BRITO

GUAYAQUIL - ECUADOR

1993

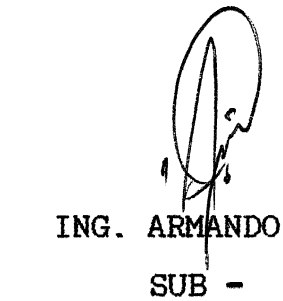
A G R A D E C I M I E N T O

A INDUSTRIAL ANABRA, especialmente al Ing. ANTONIO LABRA por las facilidadesprestadas; ala Srta, NANCY PAUCAR por su valiosa e inapreciable colaboración en la elaboración de este trabaja y al Ing. JAIME SANTORO DONOSO, Director de Tesis.

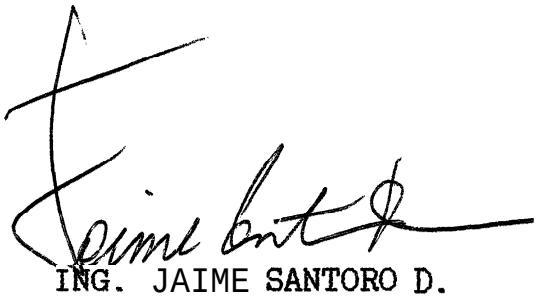
D E D I C A T O R I A

A MIS PADRES

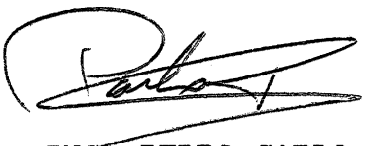
A MIS HERMANOS



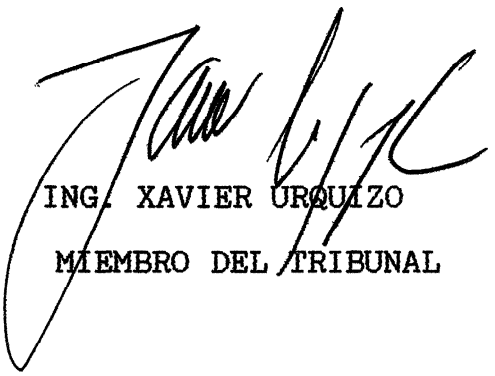
ING. ARMANDO ALTAMIRANO
SUB - DECANO
FACULTAD DE INGENIERIA
ELECTRICA



ING. JAIME SANTORO D.
DIRECTOR DE TESIS



ING. PEDRO CARLO P.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



ING. XAVIER URQUIZO
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamentos de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).

.....

JORGE FAJARDO BRITO

R E S U M E N

La Hidroacústica es una rama especializada de la ciencia y la tecnología, que a pesar de tener sus raíces en el pasado, ha visto un gran desarrollo en este siglo y particularmente a partir de la Segunda Guerra Mundial, que es cuando precisamente comienza su era moderna con estudios cuantitativos precisos. En los años posteriores se ha incrementado la literatura sobre el tema en cantidades apreciables, y sus usos prácticos se han expandido con la contínua exploración y explotación por parte del hombre de los recursos del mar.

En el primer capítulo se trata sobre la evolución y avances logrados, en forma general, sobre esta materia; posteriormente también se trata sobre el sonido como vehículo de transmisión y recepción, a manera de conocimiento preliminar y sobre las unidades con las que comúnmente se trata cuando nos adentramos en el estudio de esta materia.

En el segundo capítulo tratamos en forma más detallada, y conforme a la profundidad necesaria para el presente trabajo, las características del medio o ambiente en que centramos nuestro estudio, en relación con la propagación sonora en el mismo. Obviamente se tratan los problemas que presenta tanto para el diseño como para la predicción y operación efectivo de los diferentes sistemas de sonar.

Con el conocimiento anterior, el paso lógico nos lleva al tercer capítulo, el cual nos presenta las características y dificultades para detectar los objetivos que son de interés del sonar; naturalmente esto está muy ligado al desarrollo del conocimiento del medio y del avance tecnológico en el área electrónica, por lo que no se encuentra en objetivos particu-lares de detección, sino en las características y propiedades de los objetivos que se encuentran bajo el mar y se hace una referencia especial a los transductores hidroacústicos, pieza clave en el estudio de esta materia y también la mejor conoci-da en cuanto a sus parámetros por parte de los ingenieros involucrados en los diseños de estos equipos.

Finalmente realizamos en el cuarto capítulo un resumen de las aplicaciones comerciales en nuestro país, haciendo especial enfásis en aquellas relacionadas con el sector pesquero y en particular el sonar; por esta razón se hace un breve estudio de este objetivo en particular: los peces. También se señalan los problemas tanto técnicos, de implementación como operacionales de este equipo dependiendo del tipo de arte de pesca y de las limitaciones que presentan estos equipos en el mar, en particular en aguas ecuatorianas. De esta forma se desea que este trabajo sirva como base para estudios en este campo con proyección hacia otras aplicaciones y otros equipos.

I N D I C E G E N E R A L

Pág.

RESUMEN III

INDICE GENERAL V

INDICE DE FIGURAS XII

INDICE DE TABLAS XV

SIMBOLOGIA XVI

INTRODUCCION XIX

CAPITULO 1

INTRODUCCION AL ESTUDIO DE LA HIDROACUSTICA 21

1.1 Antecedentes y desarrollo 21

1.1.1 Primeros pasos y primera guerra mundial ... 21

1.1.2 Período de interguerra y segunda guerra mundial 28

1.1.3 Desarrollo de postguerra 33

1.2 Naturaleza del sonido 34

1.2.1 Antecedentes 34

1.2.2 El sonido como energía mecánica 37

1.2.3 Producción y recepción del sonido bajo el agua 40

1.2.4 La transmisión del sonido 45

1.2.5 El campo sonoro 50

1.2.6 Comparación entre la hidroacústica y la acústica en el aire 55

1.3 Unidades y standards de referencia 57

1.3.1 La unidad de referencia y el decibel 57

1.3.2 Sensitividad del hidrófono 61
1.3.3 Ancho de banda del hidrófono 67
1.3.4 Directividad del hidrófono 75
1.3.5 Ruido 78
1.3.6 Conversión de potencia mecánica o eléctrica en potencia acústica 82
1.3.7 Eficiencia de un proyector sonoro 84
1.3.8 Directividad del proyector 84

CAPITULO 2

ESTUDIO DEL MEDIO DE TRANSMISION 87
2.1 Características físicas del mar en relación a la transmisión del sonido 87
2.1.1 Salinidad 87
2.1.2 Temperatura 89
2.1.3 Densidad 91
2.1.4 Bioacústica marina 92
2.1.4.1 Interferencia marina-biológica con escucha pasiva 94
2.1.4.2 Interferencia marina-biológica con sonar en modo activo 96
2.1.5 Absorción del sonido en el agua de mar 98
2.1.6 El fenómeno acústico: velocidad del sonido en el mar 101
2.2 Propagación del sonido en el mar 104
2.2.1 Introducción 104
2.2.1.1 Definición de pérdidas de transmi-

sión 105
2.2.1.2 Fuentes de pérdida 106
2.2.2 Leyes de difusión 107
2.2.2.1 Difusión esférica 107
2.2.2.2 Difusión cilíndrica 110
2.2.3 Absorción del sonido en el mar 110
2.2.3.1 Difusión esférica y absorción 117
2.2.4 Velocidad del sonido en el mar 120
2.2.5 Estructura de la velocidad en el mar 126
2.2.6 Teoría de propagación y trazado de haces .. 128
2.2.7 La superficie del mar 141
2.2.8 El fondo del mar 144
2.2.9 Fluctuaciones del sonido transmitido 145
2.2.10 Canales de propagación en el mar 147
2.3 Información básica del ruido del mar: nivel del ruido del ambiente 149
2.3.1 Introducción 149
2.3.2 Fuentes del ruido del ambiente en el mar .. 150
2.3.3 Ruido ambiente en agua poco profunda 156
2.3.4 Fuentes intermitentes del ruido ambiente .. 158
2.3.5 Resumen 160
2.4 Dispersión en el mar: nivel de reverberación 161
2.4.1 Introducción 161
2.4.2 Tipos de reverberación 162
2.4.3 Burbujas de aire en el agua 163
2.4.4 Reverberación por volumen 165
2.4.5 Reverberación por la superficie del mar ... 170

2.4.6 Reverberación por el fondo del mar 171

2.4.7 Reverberación en agua poco profunda 172

2.4.8 Características de la reverberación 173

2.4.9 Predicción de la reverberación 175

CAPITULO 3

LOCALIZACION DE OBJETIVOS CON SISTEMA DE SONAR 178

3.1 Características de los sistemas de sonar 178

3.1.1 Introducción 178

3.1.2 Sistema de sonar 178

3.1.2.1 Sonares pasivos 178

3.1.2.2 Sonares activos de transmisión continua (CW) 179

3.1.2.3 Sonares activos de pulso 180

3.1.3 Transductores 181

3.1.4 Limitaciones en la potencia del sonar 183

3.1.4.1 El límite de cavitación 183

3.1.4.2 Efectos de interacción 188

3.1.5 Efectos no lineales en el sonar 190

3.2 Reflexión y dispersión de objetivos de sonar 191

3.2.1 Introducción 191

3.2.2 Solidez de objetivo de formas simples 194

3.2.3 Métodos de medición de solidez de objetivo 195

3.2.4 Solidez de objetivo de submarinos 199

3.2.5 Solidez de objetivo de naves de superficie 199

3.2.6 Solidez de objetivo de peces 200

3.2.7 Procesos de formación de ecos 201

3.2.8 Reducción de la solidez del objetivo 203
3.2.9 Características del eco 204
3.3 Ecuaciones del sonar 205
3.3.1 Introducción 205
3.3.2 Consideraciones básicas 207
3.3.3 Ecuaciones activas y pasivas 209
3.3.4 Nombres para varias combinaciones de parámetros 215
3.3.5 Formulación de las ecuaciones 217
3.3.6 Limitaciones 218
3.4 Detección de señales en ruido y reverberación: umbral de detección 219
3.4.1 Introducción 219
3.4.2 Definición de umbral de detección 220
3.4.3 El concepto umbral 222
3.4.4 Relación señal de entrada-ruido para detección 223
3.4.5 Modificaciones a las curvas ROC 226
3.4.6 Estimación del umbral de detección 226
3.4.7 Efecto de duración y ancho de banda 227
3.4.8 Detección auricular 230
3.5 Transductores hidroacústicos 231
3.5.1 Introducción 231
3.5.2 Cristales 232
3.5.2.1 Los efectos piezoeléctrico, electroestrictivo y piroeléctrico 234
3.5.2.2 Materiales piezoeléctricos útiles

para transductores 237
3.5.2.3 Factor de calidad de vibradores piezoeléctricos 238
3.5.2.4 Mosaico de transductores piezoeléctricos 239
3.5.3 Elementos magnetoestrictivos 244
3.5.3.1 Transductores magnetoestrictivos .. 248
3.5.4 Métodos de excitación de proyectores sonoros electroacústicos 252
3.5.5 Consideraciones mecánicas de diseño para proyectores sonoros electroacústicos 255

CAPITULO 4

APLICACIONES EN EL MAR ECUATORIANO 258
4.1 Antecedentes 258
4.1.1 Introducción 258
4.1.2 El sistema de sonar 259
4.1.3 Ondas acústicas y peces 264
4.1.4 Propiedades acústicas del pez 269
4.2 Formas de uso 276
4.2.1 Usos no militares del sonido bajo el agua . 276
4.2.2 Usos militares del sonido bajo el agua 277
4.2.3 Aplicaciones pesqueras (sumario) 280
4.2.3.1 Aplicaciones en acuacultura 280
4.2.3.2 Aplicaciones en investigaciones de comportamiento 281
4.3 Localización, detección y atracción del pescado .. 282

4.3.1 Localización 282
4.3.2 Detección 288
4.3.3 Atracción 291
4.3.4 Sumario 297
4.4 Condiciones generales para buenos resultados de funcionamiento 299
4.4.1 Características operativas y limitaciones . 299
4.4.2 Equipos y características 305
4.4.2.1 El ecosonda 305
4.4.2.2 El sonar 306
4.4.2.3 Otros equipos 307
4.4.3 Eco-sondaje y aspectos de la detección de los peces 308
4.4.4 Consideraciones sobre aspectos operativos de domosónicos y uso de equipos 311
4.4.4.1 Domosónico 311
4.4.4.2 Frecuencia de operación 320
4.4.4.3 Fuentes radiadoras de ruido 322
4.4.4.3.1 Ruido de maquinaria 322
4.4.4.3.2 Ruido de propela 325
4.4.4.3.3 Ruido hidrodinámico 326
4.4.4.4 Entrenamiento de operadores 327

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 331
APENDICES 333
BIBLIOGRAFIA 349

I N D I C E D E F I G U R A S

No. Pág.

1.1 Propagación de ondas sonoras en un medio desde un diafragma vibrante 41

1.2 Patrón del hidrófono en coordenadas rectangulares 64

1.3 Patrón del hidrófono en coordenadas polares 65

1.4 Patrón del hidrófono en coordenadas rectangulares usando la escala decibel 68

1.5 Patrón del hidrófono en coordenadas polares usando la escala decibel 69

1.6 Respuesta de frecuencia del hidrófono 70

1.7 Respuesta de frecuencia del hidrófono en decibelios 71

1.8 Trazo de sensitividad relativa de un hidrófono como función de la frecuencia 74

1.9 Representación de la curva de respuesta de frecuencia equivalente de un hidrófono 76

2.1 Absorción del sonido en el agua de mar 102

2.2 (a) Difusión en un medio sin fronteras 108

(b) Difusión en un medio entre dos planos paralelos 108

2.3 Valor de atenuación debido a la absorción en agua pura:

(a) 0.1 KHz a 100 KHz 118

(b) 10 KHz a 1000 KHz 119

2.4 Velocidad del sonido como función de la profundi-

E = Densidad del flujo de energía.

H = Distancia entre planos paralelos.

α_{AP} = Coeficiente de atenuación del agua pura.

δ_{AP} = Densidad del agua pura.

C_{AP} = Velocidad del sonido en agua pura.

W = Velocidad angular de las moléculas.

μ_{AP} = Coeficiente dinámico de la viscocidad por esfuerzo constante del agua fresca.

μ'_{AP} = Coeficiente dinámico de la viscocidad por volumen del agua fresca.

α_M = Coeficiente de atenuación del agua de mar.

f_{RM} = Frecuencia de relajación para Mg SO_4.

f_{RB} = Frecuencia de relajación para ácido bórico.

Pa = Presión manométrica de la columna de agua.

K, n_2 = Constantes empíricas para sedimento marino.

TS = Target strength.

EL = Nivel del eco.

SL = Nivel de fuente del proyector o del objetivo.

L = Longitud del pez.

DT = Umbral de detección.

RL = Nivel de reverberación.

NL = Nivel de ruido ambiente.

S_1 = Potencia de la señal en banda de recepción.

N_1 = Potencia del ruido en banda de 1 Hz.

T = Tiempo.

d_1 = Indice de detección de curvas ROC.

No = Potencia del ruido en banda de 1 Hz.

dad y temperatura 123

2.5 Refracción en un medio estratificado 133

2.6 Arcos de círculos en un medio en el cual la velocidad es una función lineal de profundidad 135

2.7 Pérdidas de transmisión calculadas del espaciaciamiento de haces en un diagrama de haces 138

3.1 Arreglo tipo mosaico de elementos vibradores 240

3.2 Transductores tipo mosaico

(a) Vibradores de cuarto de onda con placa trasera metálica 243

(b) Vibradores de media onda con absorbedor de presión trasero de caucho 243

3.3 Direcciones de magnetización de dominios de hierro y níquel 246

3.4 Corte de sección de un transductor magnetoestrictivo típico 250

4.1 Detección y localización de peces por:

(a) Ecosonda 261

(b) Sonar 261

4.2 Respuesta de un pez conforme su orientación con respecto a la fuente 266

4.3 Efecto de modulación del eco de un pez conforme su orientación 268

4.4 Dispersión acústica de un pez conforme Lytle y Maxwell (1982) 274

A P E N D I C E

1. Consola de operación de un sonar unidireccional se incluye circuitería electrónica 339
2. Tarjeta preamplificadora de las señales de un transductor de sonar unidireccional 340
3. Capuchón de un transductor hidroacústico de un sonar unidireccional 341
4. Transductor hidroacústico de un sonar unidireccional (los elementos del arreglo son cristales). 342
5. Aspecto de un transductor hidroacústico de sonar unidireccional, se aprecia el cableado y el sistema de búsqueda (scanning)..... 343
6. Sistema de control de inclinación (tilt) de transductor hidroacústico de sonar unidireccional 344
7. Presentación de un sonar omnidireccional 345
8. Presentación de un sonar omnidireccional 346
9. Pantalla y consola de control de un sonar multidireccional (o multihaz)..... 347
10. Presentaciones de distintos modos de operación de un sonar multidireccional para pesca de cerco ... 348

I N D I C E D E T A B L A S

No.		Pág.
1.1	Tabla de nivel de referencia	61
2.1	Comparación de métodos de solución de ecuación de onda plana	132
2.2	Características del ruido ambiente	161
3.1	Métodos de reducción de solidez del objetivo	204
3.2	Parámetros del sonar	216
3.3	Combinaciones de parámetros del sonar	217
4.1	Aplicaciones comerciales del sonido bajo el agua	278

S I M B O L O G I A

c = Velocidad de transmisión del sonido.

f = Frecuencia de transmisión del sonido.

λ = Longitud de onda en el medio.

t = Temperatura del agua.

s = Salinidad del agua.

d = Profundidad por debajo de la superficie.

p = Presión.

δ = Densidad del fluido.

μ = Velocidad de las partículas del fluido.

I = Intensidad sonora.

P = Potencia acústica.

r = Radio (de alcance).

A = Area.

N = Números de bels.

n = Números de decibeles.

v = Voltaje.

f_r = Frecuencia pico de sensitividad (resonancia).

f_b = Ancho de banda del hidrófono.

x = Frecuencia por unidad lineal.

D = Factor de directividad.

DI = Indice de directividad.

e = Eficiencia del proyector.

n_1 = Coeficiente de absorción del agua.

α = Coeficiente de absorción del agua de mar.

TL = Pérdidas de transmisión.

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
1958
GUAYAQUIL
BIBLIOTECA

Q = Factor de calidad.

L_1 = Inductancia del cristal.

R_R = Impedancia de carga.

R_M = Impdancia asociada con las pérdidas mecánicas en un vibrador de cristal.

l = Longitud del elemento.

Z_F = Impedancia relativa de la carne del pez.

C_F = Velocidad del sonido en la carne del pez.

Z_W = Impedancia relativa del agua.

C_W = Velocidad del sonido en agua de mar.

r = Factor de corrección para TS en peces.

TS_F = Target strength en peces.

TS_{CIL} = Target strength de un cilindro.

I N T R O D U C C I O N

Un método acústico para la detección de peces fue reportado por primera vez en la literatura científica en 1929, este trabajo fue publicado por Kimura en el informativo del Instituto Imperial de Pesquerías del Japón.

El uso de equipos hidroacústicos para una variedad de aplicaciones en el mar es una realidad y conforme se va conociendo mejor las propiedades y características del medio de propagación, que es el mar, y mejorando la tecnología, se van encontrando mejores posibilidades de aplicación y mejorando los equipos existentes, facilitando su uso y operación.

Nuestro país tiene un gran potencial, en cuanto a recursos del mar, por ello es importante conocer sus características; los equipos hidroacústicos nos ayudan para explorar y explotar, en forma racional, los mismos. Por ello es importante conocer esta materia, pero como en este caso en particular no existen trabajos previos, ha sido necesario enfocar en forma general, mas no detallada, los aspectos más relevantes de esta materia; esto es, su evolución a través de los años, unidades, aspectos y definiciones básicas de hidroacústica.

También nos iremos informando de muchos aspectos de la propagación del sonido en el mar; pues es el medio y sus

características, el principal limitante y obstáculo en una utilización y operación más sencilla de esta forma de propagación; comenzando por los aspectos más generales y conduciendo, en cada caso, este estudio a las condiciones particulares de nuestro mar territoral; esto nos permitirá conocer los parámetros en los cuales debemos fijarnos al iniciar una aplicación o aplicaciones varias.

Dado que nuestro principal interés constituye la detección de los peces, lo cual es el objetivo lógico de la flota pesquera nacional, conduciremos nuestro estudio a este punto luego de tratar las características más importantes. En este punto observaremos las características de los peces y por supuesto los problemas prácticos que ocurren muchas veces al solo suponer que la adquisición de equipos es la solución; veremos que si bien el poseer el equipo de más avanzado tecnología es de extraordinaria ayuda, no es el único factor, aunque si uno de los más importantes, en la conclusión exitosa de una faena de pesca.

C A P I T U L O 1

INTRODUCCION AL ESTUDIO DE LA HIDROACUSTICA.

1.1 ANTECEDENTES Y DESARROLLO.

1.1.1 Primeros pasos y primera guerra mundial.

Aunque la "edad moderna" del sonar puede decirse que corresponde al primer cuarto de siglo y comienzos de la Segunda Guerra mundial, el sonar tiene profundos orígenes en el pasado. Una de las más tempranas referencias del hecho que el sonido existe debajo del agua, así como en el aire, data de uno de los libros de notas de Leonardo da Vinci.

En 1940, dos años antes que Colón descubriera América, el escribió: "Si hace que su barco se detenga y coloca la cabeza de un largo tubo en el agua y el otro extremo en su oído, escuchará el movimiento de otras naves a gran distancia de donde está". Aunque este temprano ejemplo de un sistema pasivo de sonar tiene el envidiable mérito de la extrema simplicidad, no da ninguna indicación de la dirección y es indiferente al resultado de la gran desigualdad entre las propiedades acústicas del agua y del aire. Aún la idea de escuchar los sonidos bajo el agua con

ayuda de un tubo "lleno de aire" entre el mar y el oído del que escucha tuvo un amplio uso más tarde en la Primera Guerra mundial, cuando por la adición de un segundo tubo entre el otro oído y un punto en el mar separado del primer punto, se podía obtener una indicación de dirección y determinación del sentido del objetivo.

Sin embargo la primera medición cuantitativa del sonido bajo el agua ocurrió en 1827, cuando un físico suizo, Daniel Colladon, y un matemático francés, Charles Sturm, colaboraron para medir la velocidad del sonido en el lago Génova, en Suiza. Por la medición del intervalo de tiempo entre un flash de luz y el repicar de una campana bajo el agua, ellos determinaron la velocidad del sonido con un sorprendente grado de exactitud.

Posteriormente en el siglo diecinueve, un número de famosos físicos fueron asociados indirectamente por el tiempo con el sonido bajo el agua debido a su interés en el fenómeno de "transducción", la conversión de electricidad a sonido y viceversa. Jacques y Pierre Curie son acreditados usualmente con el descubrimiento en 1880 de la piezoelectricidad, la capacidad de ciertos cristales, cuando se someten a esfuerzos, de desarrollar una carga eléctrica a través de

ciertos pares de las caras del cristal. Otros físicos se habían ocupado superficialmente de esto antes. Se ha dicho que Charles Coulomb había especulado en la posibilidad de producir electricidad por presión, y Wilhelm Rontgen escribió un documento acerca de la carga eléctrica apareciendo en varias caras de cristales sometidos a esfuerzo. La contraparte de la piezoelectricidad como proceso de transducción es la magnetoestricción, donde un campo magnético produce un cambio en la forma de ciertas sustancias.

La manifestación temprana de la magnetoestricción fueron los sonidos musicales, los cuales fueron escuchados cuando, en 1840, la corriente en una bobina de alambre era cambiada o interrumpida cerca de los polos de un magneto de herradura. James Joule, en los años siguientes a 1840, llevó a cabo mediciones cuantitativas del cambio de longitud asociado con la magnetoestricción, y se le acredita generalmente el comienzo del descubrimiento del efecto.

Estos estudios, y algunos otros efectuados después de 1840 y 1850, fueron el fundamento para la invención del teléfono, la cual luego de una larga disputa de patente fue otorgado a A. G.

Bell en 1876. Otra invención del siglo XIX que fue el apoyo de los sistemas de sonar antes del advenimiento de los amplificadores electrónicos fueron los micrófonos de botón de carbón, un dispositivo que se convirtió en el primer, y probablemente todavía el más sensitivo, hidrófono para el sonido bajo el agua.

Cerca del inicio del siglo XX, dio comienzo a la primera aplicación práctica del sonido bajo el agua. Esta fue el timbre submarino, usado por las naves para navegación fuera de puerto. Midiendo los intervalos de tiempo entre el sonido de una campana y el sonido simultáneamente enviado de un soplo de sirena de niebla, una nave determinaría su distancia del fanal, luz para balizamiento de costas o barcos, donde ambos estuviesen instalados. Este sistema fue el impulso para la fundación de la Compañía de Señal Submarina (ahora parte de Raytheon Mfg. Co.), el primer manufacturador de equipos de sonar en los Estados Unidos. El método nunca tuvo un amplio uso y pronto fue reemplazado por métodos de navegación que consistía de radioreceptor, especialmente radiogoniometría.

Otro avance anterior a la Primera Guerra Mundial fueron los primeros proyectos para la detección

de objetos bajo el agua por ecoposicionamiento. En 1912, 5 días después de la colisión del "Titanic" con un iceberg, L. F. Richardson llenó una aplicación de patente en la oficina Británica de Patentes para ecoposicionamiento con la transmisión del sonido por el aire. Un mes después aplicó para una patente para el análogo bajo el agua. Estas ideas involucran las entonces nuevas características de un proyector direcional de ondas de sonido con frecuencia de Kilohertz y receptor de frecuencia selectivo no sintonizado con la frecuencia de transmisión para compensación debido al desfase doppler causado por el movimiento de la embarcación. Desafortunadamente, Richardson no hizo nada para implementar estas ideas. Mientras tanto, en los Estados Unidos, R. A. Fessenden había diseñado y construído una nueva clase de transductor con movimiento de alambre tanto para señalamiento submarino y ecoposicionamiento y fue posible, en 1914, detectar un iceberg a una distancia de 2 millas. Los osciladores de Fessenden operaban a frecuenias cercanas a 500 Hz y 1,000 Hz y se dicen fueron instalados en todos los submarinos estadounidenses de la Primera Guerra para pemitir señalar cualquier otro mientras se sumergía. Permanecieron en uso hasta hace poco como

poderosas fuentes sinusoidales del sonido con propósitos de investigación.

El comienzo de la Primera Guerra en 1914 fue el impulso para el desarrollo de un cierto número de aplicaciones militares del sonar. En Francia un joven ingeniero eléctrico ruso, Constantin Chilowsky, colaboraba con un distinguido físico, Paul Langevin, en experimentos con un condensador como proyector y un micrófono de botón de carbón colocado en el foco de un espejo cóncavo. A pesar de dispersión y averías causados por los altos voltajes necesarios para el proyector, en 1916 ellos pudieron obtener ecos del fondo y de una plancha de blindaje a una distancia de 200 metros. Posteriormente, en 1917, Langevin usó el efecto piezoeléctrico y usó un sanduche de cuarzo-acero para reemplazar el proyector de condensador. El también empleó uno de los recién desarrollados amplificadores de tubo al vacío, lo cual fue probablemente la primera aplicación de electrónica a un equipo de sonido bajo el agua. Por primera vez, en 1918, fueron recibidos ecos de un submarino, ocasionalmente a distancias tan grandes como 1,500 metros. Paralelamente investigaciones británicas con proyectores de cuarzo fueron dirigidas por un grupo bajo la orden de R.

W. Boyle. La palabra "asdic" fue acuñada en esta época para referirse a sus experimentos altamente secretos. Al fin de la Primera Guerra, sin embargo, el posicionamiento de ecos bajo el agua haría una contribución para ubicar la amenaza de las naves U de Alemania.

Mientras tanto, se hizo uso extensivo del tubo de aire de Leonardo para escucha pasiva, mejorado por el uso de 2 tubos y aprovechando la ventaja del sentido direccional biauricular de un observador humano. El dispositivo consistía de un par de arreglos en línea de 12 tubos de aire cada uno, montados a lo largo de la base de una nave en los lados de babor y estribor y gobernados por un compensador especial. Se logró una sorprendente precisión en la determinación de la dirección de un objetivo distante con exactitud de 1/2 grado. Otro desarrollo de esta época fue el "neutralmente boyante", arreglo flexible en línea de 12 hidrófonos llamado "eel" (anguila), el cual era fácilmente montado en cualquier nave y remolcado a popa lejos del ruido de la nave en la cual estaba montado. En conjunto, cerca de tres mil naves escolta fueron adecuadas con dispositivos de escucha en grupo de dos o tres y usando cruzamiento de direcciones, ellos obtenían

una "posición" de un submarino sospechoso.

1.1.2 Período de Interguerra y Segunda Guerra Mundial.

Los años de paz que siguieron vieron un desarrollo estable, pero extremadamente lento en la aplicación del sonido bajo el agua para necesidades prácticas. El sondeo de profundidad por parte de los barcos tuvo un rápido desarrollo, y en 1925, los "brazametros", palabra acuñada por la Submarine Signal Company para sus equipos, fueron comercializados tanto en Estados Unidos como en Gran Bretaña. La investigación de medios prácticos de posicionamiento de objetivos submarinos fue dirigido en los Estados Unidos por un puñado de hombres bajo las órdenes de H. C. Hayes en el Laboratorio de Investigación Naval. El problema de encontrar un proyector de sonido para posicionamiento de ecos fue resuelto con la concurrencia de los proyectores magnetoestrictivos para la generación de la cantidad de energía acústica requerida. Además, los cristales sintéticos de sal de Rochelle comenzaron a reemplazar al escaso cuarzo natural como el material básico para transductores piezoeléctricos. Durante el período de interguerra el sonar recibió un gran impulso práctico con los avances electrónicos, que hicieron posible un amplio dominio en

amplificación, procesamiento y presentación de la información del sonar a un observador.

Las frecuencias ultrasónicas, esto es, frecuencias más allá de la región de sensitividad del oído humano, llegaron a ser usadas tanto para escucha y posicionamiento de ecos, permitiendo un incremento de la direccionalidad a ser obtenida con proyectores e hidrófonos de modesto tamaño. Un número de pequeños, pero vitales, componentes de sistemas de sonar fueron adicionados durante este período, es notable el desarrollo británico del grabador de distancia (range recorder) para sonares de ecoposicionamiento proveyendo una "memoria" de eventos pasados y el aerodinámico domo para proteger el transductor en una nave en movimiento del ruidoso y turbulento flujo de agua provocado por el desplazamiento de la nave. En 1935, algunos sistemas de sonar muy bien adecuados se habían desarrollado, y en 1938, con la inminencia de la Segunda Guerra Mundial, la producción de sistemas de sonar comenzó en los Estados Unidos. Cuando comenzó la guerra, un gran número de naves estadounidenses estaban equipadas tanto para escucha bajo el agua y ecoposicionamiento. El sonar de ecoposicionamiento standard para naves de superficie era el

equipo QC. El operador buscaba en la dirección colocada manualmente dando vuelta un volante y escuchando los ecos por audífonos o parlantes. Si se obtenía un eco, su posición era notada por un flash de una luz rotante o por grabador de distancia. Los submarinos fueron equipados con sistemas de escucha JP, que consistía de un hidrófono de línea horizontal y rotable, un amplificador, un filtro pasabanda de selección y un par de audífonos. El costo de este equipo con respuestos era USD 5,000. Con estos primitivos sonares, la Batalla del Atlántico contra las naves U alemanas, en que se emplearon, fue ganada.

Pero desde el punto de vista científico, el logro más notable de los años de interguerra fue la obtención del entendimiento de los caprichos de la propagación del sonido en el mar. Los primeros equipos de ecoposicionamiento instalados al final de los veinte y durante los treinta fueron misteriosamente ineficaces en rendimiento. Buenos ecos se obtenían a veces en la mañana, pero ecos pobre o ninguno, eran obtenidos en la tarde. Cuando quedó en claro que no era problema de operadores y que los ecos eran realmente débiles en la tarde, se comenzó a buscar la causa

en las características de transmisión del medio, que era agua salada. Solamente con el uso de equipo especial de medición de temperatura se evidenció que suaves gradientes de temperatura, hasta la fecha insospechados, eran capaces de la refracción del sonido al abismo de las profundidades del mar y podrían hacer que el objetivo permaneciese en lo que se conoce como "zona de oscuridad". El efecto fue llamado por E. B. Stephenson el "efecto de la tarde". Como un medio para indicar los gradientes de temperatura en los primeros y pocos cientos de pies del mar, A. F. Spilhaus construyó el primer batitermógrafo en 1937; al comienzo de la Segunda Guerra Mundial, todo buque naval involucrado en trabajo antisubmarino fue equipado con el dipositivo. Durante este período también se obtuvo un claro entendimiento de la absorción del sonido en el mar, y fueron determinados valores muy exactos de coeficientes de absorción a frecuencias ultrasónicas de 20 KHz y 30 KHz, que eran de mucho interés.

A ambos lados del Atlántico, el período de la Segunda Guerra Mundial fue marcado por una gran actividad en el campo del sonido bajo el agua. En los Estados Unidos, un gran grupo de

científicos organizados por el Comité de Investigación para Defensa Nacional (NDRC) comenzó investigaciones de todas las fases en este campo. La mayoría de los actuales conceptos así como aplicaciones prácticas tuvieron sus orígenes en este período. El torpedo acústico guiado, la moderna mina acústica, y sonares de búsqueda fueron desarrollos navales. Métodos para una rápida calibración de proyectores e hidrófonos se comenzaron a usar, y la comprensión de muchos factores que afectan al rendimiento del sonar, ahora sumarizados en las ecuaciones del sonar, fueron los resultados. Factores tales como intensidad del objetivo, el ruido que se produce en distintas naves a diferentes velocidades y frecuencias, reverberación en el mar y la identificación del sonido bajo el agua por el oído humano fueron los primeros conocimientos, de forma cuantitativa, durante la Segunda Guerra Mundial.

Los alemanes merecen crédito de algunas ideas; una de ellas fue el desarrollo por Alberich, de una capa no reflectora para submarino, que era efectivo sobre un limitado rango de profundidad y frecuencia, además no podía permanecer esta capa unida al casco por un largo período en

condiciones de funcionamiento. Otra innovación fue el uso de arreglos de montaje rápido a bordo de naves de superficie, usados con algún éxito.

Según Batchelder, la palabra "sonar" fue acuñada posteriormente durante la guerra como contraparte de la entonces glamorosa palabra "radar", habiéndose definido esta palabra como una abreviatura para SOUND NAVIGATION AND RANGING.

1.1.3 Desarrollo de postguerra.

Los años siguientes a la Segunda Guerra Mundial han visto notables avances en la explotación del sonido bajo el agua, tanto para usos militares y no militares. Por la parte militar, los sonares activos han crecido en tamaño y potencia y operan a frecuencias algunas octavas más abajo que en la Segunda Guerra Mundial. Como resultado, los rangos de los sonares activos son hoy mayores de lo que fueron durante los agitados días de la guerra. De manera similar, los sonares pasivos se han dirigido hacia frecuencias menores con el fin de tomar ventaja de los componentes tonales en el espectro de ruido submarino de baja frecuencia.

Arreglos de sonares pasivos con muchos hidrófonos han sido colocados en el fondo del océano para

tomar ventaja del medio quieto y de las condiciones de buena propagación que existen a bajas frecuencias. Al mismo tiempo, sin embargo, los objetivos submarinos de sonares pasivos han llegado a estar más quietos, haciendo así más difícil la detección de los mismos que lo que alguna vez fueron. El desarrollo del procesamiento de señales en forma compleja, tanto en tiempo y espacio, y el advenimiento de las computadoras ha hecho posible disponer de mayor información a ser usada para una mejor función del sonar. Finalmente, la investigación en la propagación del sonido en el mar ha llevado a una explotación de los patrones de propagación no soñada en los primeros años; un ejemplo es el descubrimiento de zonas de convergencia en la propagación en mar profundo y su explotación, en años recientes, por equipos de sonar.

1.2 NATURALEZA DEL SONIDO.

1.2.1 Antecedentes.

De todas las formas de radiación conocidas por el hombre, la del sonido viajando a través del agua es la mejor conocida. En agua de mar túrbida y salina, tanto las ondas de luz como las de radio son atenuadas en grado mayor que esta forma de

energía mecánica conocida como sonido.

El sonido podría ser definido como la variación periódica de presión, desplazamiento de partículas, o velocidad de las partículas en un medio elástico.

Debido a su relativa facilidad de propagación, el sonido bajo el agua ha sido aplicado por el hombre en una variedad de propósitos en su propio beneficio y en la exploración del mar. Estos usos del sonido bajo el agua constituyen la ciencia de ingeniería del sonar, y los sistemas que lo emplean de una forma u otra son sistemas de sonar.

Los sistemas de sonar, equipos y dispositivos, se dicen que son activos cuando el sonido es intencionalmente generado por uno de los componentes del sistema llamado el proyector. Las ondas de sonido generadas por el proyector viajan a través del mar hacia el objetivo, y retornan como ecos del sonar a un hidrófono, el cual convierte el sonido en electricidad. La salida eléctrica del hidrófono es amplificada y procesada de varias maneras y finalmente aplicada a un dispositivo de control o pantalla acoplado para el propósito para el cual el equipo de sonar fue hecho. A los

sistemas activos de sonar se les llama echo-range (medidor de distancia de los ecos del objetivo).

Los sistemas de sonar pasivos o de escucha usan el sonido, usualmente inconsciente, radiado por el objetivo. Aquí sólo existe transmisión de una vía a través del mar y el sistema está centrado alrededor del hidrófono usado para escuchar los sonidos del objetivo. Aplicaciones de comunicación, telemetría y control emplean una forma híbrida de sistema de sonar usando un proyector e hidrófono a ambos extremos de la línea de comunicación acústica.

Con el desarrollo de las fuentes de sonido de alta frecuencia y dispositivos de detección de sonido, se hizo posible producir haces de sonido bajo el agua que podían ser dirigidos. Estas fuentes de sonido bajo el agua y dispositivos de detección son construídos generalmente con elementos consistentes de cristales piezoeléctricos o materiales magnetoestrictivos.

El sonido en el agua ha tenido una mayor aplicación en operaciones militares submarinas que otras como radio, radar o radiación de luz debido a que las ondas de sonido son transmitidas con menos dificultad a través del agua que las ondas

electromagnéticas.

1.2.2 El sonido como energía mecánica.

Los fenómenos físicos fueron definidos históricamente en términos de los sentidos humanos. Por ejemplo, la mecánica relacionada con el tacto y con desplazamientos que podrían ser producidos por la potencia muscular humana, la luz relacionada con la percepción del ojo humano, el sonido relacionado con la percepción del oído humano, y el calor relacionado con la percepción humana de la variación de temperatura. Aunque las causas de los varios estímulos nerviosos llegaron a ser mejor comprendidos, sin embargo, los fenómenos físicos fueron reclasificados en términos de su naturaleza física. En esta clasificación, el sonido es relacionado con el fenómeno de la vibración mecánica y con la energía radiada por una fuente vibrante, la cual es usualmente transmitida como una onda longitudinal. Excepto por la diferencia de frecuencia, no hay diferencia física entre la vibración dentro del rango de frecuencias dentro del cual el oído humano es sensible, esto es, desde 50 Hz hasta 15 KHz, es llamado la región sónica; y el rango de frecuencia sobre los 15 KHz es llamado la región ultrasónica.

Ya que la energía acústica resulta de la vibración mecánica que establecen movimientos de partículas y esfuerzos en un medio elástico, esta es una forma de energía mecánica. Los esfuerzos y movimientos producen alternadamente en el medio incrementos y decrementos durante cada ciclo de vibración. El movimiento de las partículas en el medio produce energía cinética y los esfuerzos proveen energía potencial. La suma de las energías potencial y cinética es la energía acústica en el medio. Si un diafragma sumergido en agua es obligado a vibrar ya sea por medios mecánicos o eléctricos, posee energía mecánica de traslación, y esta energía es comunicada al agua. Si cualquier otro diafragma es sumergido en el agua en la vecindad del diafragma vibrante, la energía acústica en el agua excitará vibraciones mecánicas en él. Estas vibraciones podrían ser detectadas por medios eléctricos para completar un flujo de energía mecánica desde el primer diafragma al segundo. El primer diafragma es llamada la fuente o proyector, y el segundo es llamado el detector o receptor.

Puesto que el oído humano y otros detectores físicos de sonido son sensitivos a muy pequeñas cantidades de energía, nosotros frecuentemente no

nos damos cuenta cuan pequeña son las cantidades de energía que son radiadas desde las fuentes de sonido con las cuales trabajamos. Por ejemplo, el oído humano puede percibir un sonido correspondiente a un flujo de energía de 10^{-16} Watts por cm^2 a través del aire en la región en que el oído es sensible.

Si un pequeño diafragma rodeado por una adecuada pantalla acústica es colocado en vibración armónica simple por medios externos, generará sonido. El agua en frente del diafragma será comprimido con el movimiento hacia adelante del diafragma, y la presión será disminuida con su retroceso. Debido a que el agua es un medio elástico, estos puntos de variación de presión no permanecerán estacionarios sino que se moverán hacia el exterior en todas las direcciones con una velocidad uniforme. En consecuencia, un dispositivo sensitivo a la presión colocado en el medio, al frente del diafragma, detectará variaciones alternadas en la presión ocurriendo en la misma proporción como se hacen las variaciones de presión producidas por el diafragma generador de sonido. Si las presiones instantáneas producidas por la fuente de sonido son dibujadas a lo largo del eje vertical con origen en la fuente; siendo

las presiones sobre la del ambiente mostradas sobre el eje horizontal y las presiones debajo de la del ambiente mostradas debajo del eje horizontal, la curva resultante de presión vs. distancia será una función seno o coseno con una disminución progresiva en amplitud, como se muestra en el gráfico 1.1.

1.2.3 Producción y recepción del sonido bajo el agua.

La mayoría de los proyectores de sonido bajo el agua son diseñados para convertir energía eléctrica en energía acústica en el medio de propagación. Esta conversión usualmente es realizada a través del uso del efecto piezoeléctrico o del magnetoestrictivo. Ciertos cristales, tales como el cuarzo de fosfato dihidrógeno de amonio (fosfato diácido de amonio) y sal de Rochelle, y la cerámica de titanato de bario exhiben el efecto piezoeléctrico. Una lámina gruesa de tales materiales se contraerá o expandirá en la dirección del campo eléctrico cuando se le aplica una diferencia de potencial eléctrico. Si, por otro lado, la lámina de material piezoeléctrico es sujeta a compresión o expansión mecánica, una diferencia de potencial aparecerá entre las dos caras de la misma.

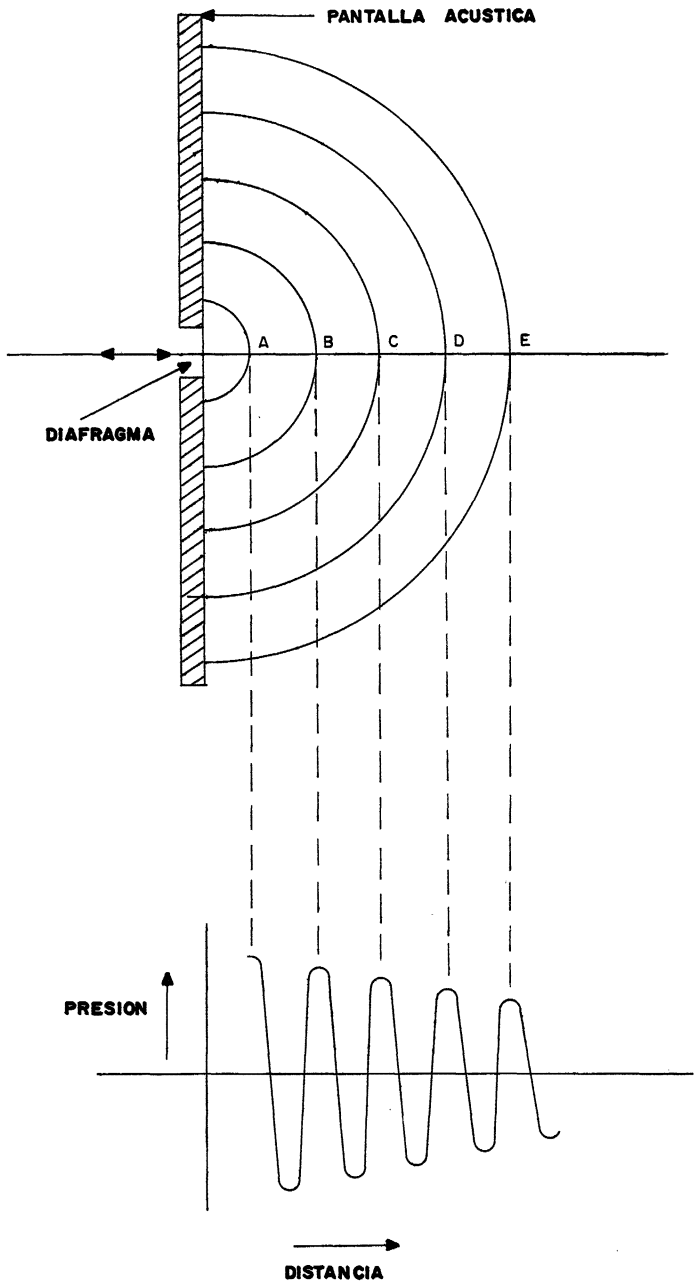


FIGURA 1.1 Propagación de ondas sonoras en un medio desde un diafragma vibrante.

Cuando un material piezoeléctrico es usado para la generación de sonido bajo el agua, el potencial eléctrico aplicado a la muestra de material es variada en forma periódica a la frecuencia de la señal de sonido deseada. Bajo esta condición, el material piezoeléctrico vibra mecánicamente a esta frecuencia; y esta vibración, cuando está propiamente acoplada al agua, produce sonido de la frecuencia deseada en el agua.

La variación de potencial generado a través del material piezoeléctrico cuando está sujeto a una fuerza mecánica variable puede ser acoplada a un amplificador como una señal eléctrica con las mismas características de frecuencia que aquella de la vibración mecánica que excitó el material.

Un material cerámico hecho de titanato de bario es un material piezoeléctrico de bastante uso. Esta cerámica se desempeña como piezoeléctrico por la permanente polarización, aplicándole un potencial electrostático de 40,000 a 60,000 voltios por pulgada por un período de algunos minutos.

Si ciertos materiales tales como el níquel y algunas de sus aleaciones son colocadas en un campo magnético, se contraerán o expandirán en

dirección del campo. A la inversa, si estos materiales están sujetos a fuerzas de contracción y expansión, se producirán cambios en el flujo magnético que excitará una fuerza electromotriz variable en una bobina de alambre colocada de tal modo que cruza las vueltas de alambre en la bobina. Los materiales que exhiben estas características son llamados magnetoestrictivos.

Cuando un material magnetoestrictivo es usado para producir sonido bajo el agua, la muestra del material es rodeada por una bobina de alambre que puede generar una densidad de flujo variable en el material según la corriente en la bobina es variada. En respuesta a una señal eléctrica de una frecuencia dada en la bobina, el material magnetoestrictivo vibra a esta frecuencia y, cuando están adecuadamente acoplados al agua, generan un sonido de la misma frecuencia en el agua. Los materiales magnetoestrictivos normalmente tienen características más deseables cuando son operados con un flujo magnético residual en el material.

Cada elemento de material piezoeléctrico usado como una fuente vibrante tiene una frecuencia natural de vibración mecánica. Esta frecuencia depende de las características físicas y de las

dimensiones del material. Tales elementos, si operan en resonancia, producen señales de tonos sin mezcla en una banda estrecha de frecuencias. Por este motivo, su efectividad como generadores de sonido es mayor que si son operados a frecuencias fuera de resonancia.

Los proyectores del sonido bajo el agua e hidrófonos son contruídos esencialmente de la misma clase de elementos. Un dispositivo puede ser construído ya sea de elementos piezoeléctricos o magnetoestrictivos. La manera en que los elementos son arreglados en el proyector o receptor está determinada por la aplicación. En algunas aplicaciones, es deseable para un proyector o receptor ser altamente efectivo a alguna frecuencia específica. Para tal aplicación, los elementos que son mecánicamente resonantes a la frecuencia deseada deberían ser los que se usen. En otras aplicaciones, se necesita trabajar con haces de sonido altamente direccionales, tales haces pueden ser realizados a través de un arreglo especializado de los elementos en el proyector o receptor. En general, si uno desea operar sobre una región muy ancha de frecuencias, los elementos usados no operarán a su frecuencia de resonancia.

Otros elementos diferentes a los magnetoestrictivos o piezoelétricos se pueden usar como proyectores de sonido. Por ejemplo, un simple pistón manejado mecánicamente por un motor eléctrico puede usarse para generación de muy bajas frecuencias en el agua, y un vibrador manejado por motor puede usarse para generar ruido de banda amplia en el agua. Para algunas aplicaciones especiales, las explosiones bajo el agua pueden usarse para generar pulsos de alto nivel de ruido.

1.2.4 La transmisión del sonido.

Los conceptos físicos básicos del problema de transmisión del sonido son enteramente simples, pero el problema de la transmisión del sonido en el océano es totalmente compleja debido a la gran variedad de propiedades físicas del agua.

De la figura 1.1 se observa que la energía sonora es transmitida inmediatamente desde la fuente hacia el medio. El avance de un único pulso de sonido a través del medio puede trazarse asumiendo que un gran número de detectores se colocan en el mismo, y registrando los tiempos de respuesta de los detectores. Si los puntos del medio, a los cuales los pulsos de sonido llegan en un

tiempo determinado son registrados, la superficie en la cual estos puntos se localizan es llamada frente sonoro. Si un segundo conjunto de tales puntos es registrado en un tiempo posterior, la superficie en la cual se localizan estos puntos es un segundo frente. Si el medio es homogéneo, esto es, si no contiene discontinuidades que afecten la transmisión del sonido, éste avanzará por una serie de frentes sonoros de tal manera que la dirección de transmisión en cualquier punto en el medio es perpendicular al frente sonoro y la distancia perpendicular entre dos frentes sonoros es proporcional al tiempo que le toma al sonido viajar de uno a otro. La dirección normal a los frentes sonoros es llamada la dirección de transmisión. En la figura 1.1, cualquiera de las superficies A, B, C, D, o E puede considerarse como un frente sonoro.

Las primeras experiencias con la transmisión del sonido en el mar indican que hay una variación considerable en la temperatura del agua de mar y que casi siempre hay una capa en la cual la temperatura varía notablemente con el incremento de la profundidad. Este gradiente de temperatura puede ocurrir en la superficie o podría permanecer debajo de una capa de temperatura constante.

La velocidad con la cual el sonido es transmitido en el agua varía con la temperatura; consecuentemente, las capas con temperatura variable causan variaciones de velocidad que distorsionan los frentes sonoros simétricos, tales como los presentados en la figura 1.1. Puesto que la dirección de transmisión es perpendicular a todos los puntos del frente sonoro, el patrón de transmisión del sonido se curvará en la dirección de las regiones de menor velocidad de transmisión.

La velocidad de la transmisión del sonido cambia alrededor del 1% para un cambio de temperatura de 5.5°C. Sin embargo, la inclinación resultante del patrón sonoro tiene un efecto apreciable sobre una distancia de algunos cientos de metros. Si la temperatura del agua disminuye con la profundidad a un promedio de 0.6°C por cada 10 metros comenzando desde la superficie, la mayor parte de la energía sonora originada en una fuente cercana a la superficie viajará a lo largo de patrones que son curvados hacia abajo y no alcanzará un detector poco profundo colocado a 900 metros de la fuente.

Puesto que el sonido es transmitido a través del medio como ondas longitudinales o compresionales, los frentes sonoros pueden ser llamados frentes

de onda y la dirección de transmisión en cualquier punto del medio puede llamarse dirección del rayo sonoro en ese punto. Consideraremos algunas relaciones que tienen que ver con la transmisión de una onda longitudinal a través del medio.

Como resultado de la transmisión del sonido, el medio es colocado en movimiento vibratorio de tal forma que cualquier punto en el medio está sujeto a variaciones en tiempo de presión, densidad, desplazamiento de las partículas y velocidad de las partículas. Si la onda es sinusoidal, la variación en la ampliación de cada una de estas cantidades es una función de tiempo seno o coseno. Sin embargo, en la práctica lo común es una combinación lineal de tales funciones. La frecuencia, f, del sonido, su longitud de onda en el medio, λ , y su velocidad de transmisión, c, a través del medio están relacionadas por la ecuación:

$$c = f\lambda \qquad 1.1$$

aunque para algunos medios c es función de f, para el agua ésta es independiente de la frecuencia. Para el agua de mar a 14°C, c es 1,500 m/seg; por tanto a 150 KHz la longitud de

onda es

$$\lambda = \frac{1{,}500 \text{ m/seg}}{150{,}000 \text{ 1/seg}}$$

$$\lambda = 0.01 \text{ m}$$

y a 1 KHz, la longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{1{,}500 \text{ m/seg}}{1{,}000 \text{ 1/seg}}$$

$$\lambda = 1.5 \text{ m}$$

La velocidad de la transmisión del sonido en agua varía con la temperatura, salinidad y presión. Una expresión empírica para la velocidad del sonido en agua fresca a cualquier temperatura es:

$$c = 1{,}410 + 4.21\ t - 0.037\ t^2 \qquad 1.2$$

y para el agua de mar a cualquier temperatura, salinidad y profundidad es:

$$c = 1{,}410 + 4.21\ t - 0.037\ t^2 + 1.5 + 0.00018\ d \qquad 1.3$$

En las expresiones 1.2 y 1.3 tenemos que:

c: velocidad de transmisión en m/seg

t: temperatura del agua en °C

s: salinidad en partes por mil

d: profundidad por debajo de la superficie en metros.

Como ejemplo, tomando los siguientes valores y aplicando la expresión 1.3:

t = 14°C s = 34.8 partes por mil d = 1.5 m

$c = 1{,}410+4.21(14)-0.037(14)^2+1.1(34.8)+0.00018(1.5)$

c = 1,500 m/seg.

Con respecto a la fórmula 1.3, más adelante se modificará esta fórmula para obtener una mayor exactitud en el resultado. Se la ha usado en esta parte a manera de introducción con el fin de indicar, con la ayuda de una relación matemática, los factores que afectan la velocidad del sonido en el agua.

1.2.5 El campo sonoro.

El sonido consiste de un movimiento regular de las moléculas de una sustancia elástica. Debido a que el material es elástico, un movimiento de las partículas del mismo, como el iniciado por un proyector sonoro, se comunica a las partículas adyacentes. Por tanto, una onda sonora se propaga desde la fuente a una velocidad igual a la velocidad del sonido. En un fluido, el movimiento de partículas es al frente y atrás, paralelo a la dirección de propagación; puesto que un fluido es compresible, este movimiento al frente y atrás causa cambios de presión. En una onda

sonora plana, la presión está relacionada con la velocidad de las partículas del fluido por:

$$p = \delta c \mu \qquad 1.4$$

Donde:

p: presión

δ: densidad del fluido

c: velocidad de propagación de la onda

μ: velocidad de las partículas del fluido.

La propagación de una onda sonora representa energía mecánica en la forma de energía cinética de las partículas en movimiento más energía potencial de los esfuerzos que se establecen en el medio elástico. Debido a que la onda se está propagando, una cierta cantidad de energía por segundo fluirá a través de una unidad de área orientada normal a la dirección de propagación. Esta cantidad de energía por segundo, potencia, atravesando una unidad de área es llamada la intensidad de la onda.

El sonido es debilitado conforme viaja a través del medio; en consecuencia, siempre hay alguna distancia, desde la fuente sonora, más allá de la cual el sonido producido no puede ser detectado.

Considerando una fuente puntual emitiendo sonido

igualmente en todas las direcciones. A una distancia, r, de la fuente, la intensidad sonora, I, que como se ha dicho corresponde a la potencia por unidad de área, P/A, será:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \qquad 1.5$$

Donde,

P: potencia acústica que emite la fuente

r: radio de la esfera por cuya área debe fluir la energía acústica.

De acuerdo a la ecuación 1.5, la intensidad sonora desde una fuente puntual varía inversamente con el cuadrado de la distancia a la misma. Este tipo de variación se refiere a una divergencia esférica, si se asume que no hay otros factores que afecten a la intensidad y causen su cambio. En la práctica, sabemos que otros factores influyen en la variación de la intensidad con la distancia. Como el sonido viaja por el agua, algo de energía es absorbida y convertida en calor y algo de ella también es disipada por el pescado, plancton, algas marinas y burbujas. Además, tanto la superficie como el fondo pueden afectar la intensidad del campo sonoro reflejando el sonido hacia la masa de agua. La contribución

de la superficie y el fondo podría tender a alcanzar una intensidad mayor a la que normalmente debería tener o podría tender a introducir interferencias destructivas en ciertas regiones debido a la diferencia en la longitud del patrón de los rayos que viajan a través de estas regiones. La inclinación de los rayos sonoros por las variaciones de temperatura puede tener grandes efectos en los valores de intensidad sonora en puntos remotos con respecto a la fuente.

Todos estos factores hacen que el problema de trabajar con el sonido bajo el agua, sea difícil. Sin embargo, se han hecho progresos considerables en la comprensión del comportamiento del sonido, cuando éste es transmitido a través del mar, y muchos de los progresos en el mejoramiento del equipo de sonido bajo el agua y sus usos tácticos se ha logrado por el mejor entendimiento de los factores que influyen en la intensidad del campo sonoro en puntos remotos con respecto a la fuente.

Cuando una fuente está emitiendo sonido en el agua, está transformando energía mecánica o eléctrica en energía acústica por la generación de una presión sonora que es superimpuesta en la presión estática del agua del ambiente. Entre la

potencia acústica, P, y la presión sonora, p, tenemos la siguiente relación:

$$P = \frac{p^2 A}{\delta c} \qquad 1.6$$

Donde:

P: potencia acústica

δ: densidad del fluido

c: velocidad de propagación de la onda

p: presión sonora

A: área a través de la cual debe fluir la energía acústica.

Aplicando la definición de la intensidad de una onda sonora a la relación 1.6, tendremos:

$$I = \frac{p^2}{\delta c} \qquad 1.7$$

En las expresiones 1.4, 1.6 y 1.7 tenemos el factor δc, el cual es conocido como la <u>resistencia acústica específica</u> del fluido. Bajo ciertas condiciones, este factor es complejo siendo llamado entonces la impedancia acústica específica del medio que contiene a la onda sonora. La expresión 1.4 se considera como la ley de Ohm para la acústica; entonces, la velocidad de las partículas del fluido, μ, puede ser vista como el

análogo acústico de la corriente eléctrica, y la presión, p, como el análogo del voltaje eléctrico.

1.2.6 Comparación entre la hidroacústica y la acústica en el aire.

La velocidad del sonido en el aire es diferente a la velocidad del sonido bajo el agua, puesto que la densidad del aire no es igual a la densidad del agua. Por tanto sus resistencias acústicas específicas son distintas, calculándolas tenemos:

$$(\delta c)_{aire} = (1.29\ Kg/m^3)\ (340\ m/seg)$$

$$(\delta c)_{aire} = 438.6\ Kg/m^2 seg.$$

$$(\delta c)_{agua} = (1{,}000\ Kg/m^3)\ (1{,}500\ m/seg)$$

$$(\delta c)_{agua} = 1{,}500 \times 10^3\ Kg/m^2 seg.$$

Con el fin de comprender bien las diferencias entre estos dos medios y con la ayuda de la relación 1.7 haremos ciertas comparaciones.

Relacionando las intensidades de los dos medios usando una misma presión sonora podemos encontrar que:

$$\frac{I_{aire}}{I_{agua}} = \frac{\frac{p^2}{(\delta c)_{aire}}}{\frac{p^2}{(\delta c)_{agua}}}$$

$$\frac{I_{aire}}{I_{agua}} = \frac{(\delta c)_{agua}}{(\delta c)_{aire}} = \frac{1,500 \times 10^3}{438.6}$$

$$\frac{I_{aire}}{I_{agua}} = 3,420$$

Por tanto, para obtener una misma presión sonora se necesita una intensidad en el aire 3,420 veces mayor que la necesaria para producirla en el agua. Los niveles de presión sonora en los dos medios correspondientes a una misma intensidad, pueden compararse así:

$$\frac{(\delta c)_{aire}\, I}{(\delta c)_{agua}\, I} = \frac{p^2_{aire}}{p^2_{agua}}$$

$$\frac{p^2_{aire}}{p^2_{agua}} = \frac{(\delta c)_{aire}}{(\delta c)_{agua}} = 3,420$$

$$\frac{p_{aire}}{p_{agua}} = 58.5$$

Por tanto, si tenemos que la intensidad acústica en el agua y en el aire son iguales, la presión sonora producida en el agua es aproximadamente 59

veces mayor que el valor correspondiente en el aire.

1.3 UNIDADES Y STANDARDS DE REFERENCIA.

1.3.1 La unidad de referencia y el decibel.

Para utilizar la escala del decibel, es necesario tener standards de referencia, ya que esta escala está basada en logaritmos de relaciones.

La unidad de intensidad en hidroacústica es la intensidad de una onda plana que tiene presión rms igual a 1 micropascal (abreviado 1μPa), que equivale a 10^{-5} dinas por centímetro cuadrado. Esta intensidad de referencia ha reemplazado a las dos unidades previas de uso común, referidas a 1 dina por centímetro cuadrado y 0.000204 dinas por centímetro cuadrado. La nueva referencia sirvió al propósito de reemplazar las dos referencias anteriores por una única y nueva. Además, valores en decibelios negativos raramente ocurren con la nueva referencia.

Una escala logarítmica es conveniente para tratar con grandes cambios en las variables, simplificando los procesos de cálculo. Por estas razones y además porque el organismo humano tiene una respuesta aproximadamente logarítmica a un

estímulo, las varias relaciones en acústica y electroacústica son comúnmente expresadas en la escala logarítmica.

El bel es la división fundamental de una escala logarítmica para expresar la relación o razón de dos cantidades de potencia. El número de bels para expresar tal relación es el logaritmo en base 10 de dicha relación. Si P es la potencia que está siendo considerada, Po es la potencia de referencia, y N es el número de bels que denotan la relación, entonces:

$$N = \log_{10} \left(\frac{P}{Po}\right) \quad [\text{bels}] \qquad 1.8$$

Por ejemplo, si P es 10 veces Po, entonces la relación P/Po será un bel. Por conveniencia, el decibel (db), que equivale a 1/10 de bel, se usa comúnmente; y la ecuación 1.8 queda:

$$n = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{Po}\right) \quad [\text{db}] \qquad 1.9$$

Para comparar, en un mismo punto, las presiones (p) resultante de dos cantidades de potencia, P y Po que están siendo irradiadas desde el mismo proyector de sonido bajo las mismas condiciones físicas, tenemos a partir de la ecuación 1.6:

$$P = \frac{p^2 A}{\delta c}$$

$$Po = \frac{p_o^2 A}{\delta c}$$

Por tanto, obteniendo la relación P/Po, tenemos:

$$\frac{P}{Po} = \left(\frac{p}{p_o}\right)^2 \qquad 1.10$$

Aplicando 1.10 en 1.9:

$$n = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{Po}\right)$$

$$n = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_o}\right)^2$$

$$n = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_o}\right) \quad [db] \qquad 1.11$$

En otras palabras, cuando la relación de presiones acústicas está expresada en decibeles, el valor es 20 veces el logaritmo de la relación. Cuando la escala de decibeles es usada para representar relaciones de cantidades tales como presión o potencia, decimos que una cantidad tiene un valor en decibeles relativo al valor de la otra.

Los valores de intensidad y presión sonora en el umbral de percepción para el oído humano a 1,000 ciclos por segundo ha sido establecido como la referencia en audioacústica. Esta intensidad es de 10^{-16} watts por cm^2, la cual corresponde a una presión sonora de 0.000204 dinas por cm^2. Cuando se trabaja con presiones sonoras en el aire, estas referencias son usadas universalmente.

El decibel ha sido, históricamente, de amplio uso para el cálculo de cantidades acústicas; debido a su facilidad de manejo. Si I_1 e I_2 son dos intensidades, el númro N que denota la relación I_1/I_2 es:

$$N = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad [db]$$

Lo cual quiere decir que I_1 e I_2 difieren en N decibelios.

El NIVEL de una onda sonora es el número de decibelios en el cual su intensidad difiere de la intensidad de la onda sonora de referencia. Para que quede claro la referencia usada, el NIVEL (LEVEL) o NIVEL DE FUENTE (SOURCE LEVEL), debería escribirse "N db referido a 1μPa".

Debemos enfatizar que el decibelio es una

comparación de intensidades o potencias, antes que directamente de presiones acústicas; a pesar del "N db referido a 1μPa" que aparece refiriéndose a presión. Se omite de esta expresión las palabras "... referido A LA INTENSIDAD DE UNA ONDA PLANA DE PRESION IGUAL A 1μPa". En forma similar, en ingeniería eléctrica, el decibelio, estrictamente hablando, se refiere a una relación de potencia en vez de una relación de voltaje o corriente.

Para observar y comparar los valores obtenidos con la nueva referencia de los obtenidos con las anteriores, tenemos la tabla 1.1, la cual llamaremos tabla de nivel de referencia:

TABLA 1.1

TABLA DE NIVEL DE REFERENCIA

dB re 1 dyn/cm^2	dB re 0.0002 dym/cm^2	dB re 1μPa	Presión rms onda plana dyn/cm^2
20	94	120	10
0	74	100	1
- 20	54	80	10^{-1}
- 40	34	60	10^{-2}
- 60	14	40	10^{-3}
- 80	- 6	20	10^{-4}
- 100	- 26	0	10^{-5}

1.3.2 Sensitividad del hidrófono.

Puesto que un hidrófono desarrolla una diferencia

de potencial entre sus terminales cuando una señal acústica es impresa en él, la sensitividad del hidrófono es normalmente expresada como el número de voltios generados en sus terminales por cada unidad de presión sonora. La mayoría de los hidrófonos no son igualmente sensitivo en todas las direcciones, hay usualmente un eje a lo largo del cual se obtiene una sensitividad máxima; este eje es referido comúnmente como el eje acústico del hidrófono. De acuerdo a las definiciones de terminología acústica aprobada por la Asociación de Standards Americanos, el eje principal de un hidrófono o proyector de sonido es una dirección de referencia para coordenadas angulares usada en la descripción de las características direccionales del hidrófono o proyector. Este es generalmente un eje de estructura simétrica a la dirección de respuesta máxima; si estos no coinciden, la dirección de referencia debería ser descrita explícitamente.

La sensitividad puede ser determinada como una función del ángulo medido desde el eje acústico en cualquier plano que lo contenga, y el gráfico de sensitividad como función del ángulo desde el eje acústico es llamado el patrón de directividad (patrón de respuesta direccional o patrón del

haz) del hidrófono en aquel plano. Si el patrón de directividad del hidrófono es graficado en todos los planos que contienen el eje acústico, el resultado será una descripción completa del patrón del hidrófono en el espacio.

El gráfico 1.2 está en coordenadas rectangulares, correspondiendo al patrón de directividad de un hidrófono en un plano. En este gráfico, voltios por μPa, sensitividad, están en las ordenadas; y los ángulos en grados desde el eje acústico son graficados como abcisa. Algunas veces, es más conveniente dibujar el patrón de un hidrófono en coordenadas polares. En tales gráficos, la sensitividad en voltios por μPa es dibujado como el radio a cada ángulo en el cual la sensitividad es determinada. La figura 1.3 es un gráfico en coordenadas polares de los datos usados para el gráfico 1.2. Los dos son usados en la práctica. La elección depende del uso que quiera dar a los datos la persona que los maneja. Para algunos propósitos es más fácil visualizar los patrones físicos cuando son gráficos en coordenadas polares.

Un hidrófono es un transductor para convertir potencia acústica a potencia eléctrica; y la potencia eléctrica generada en el hidrófono es

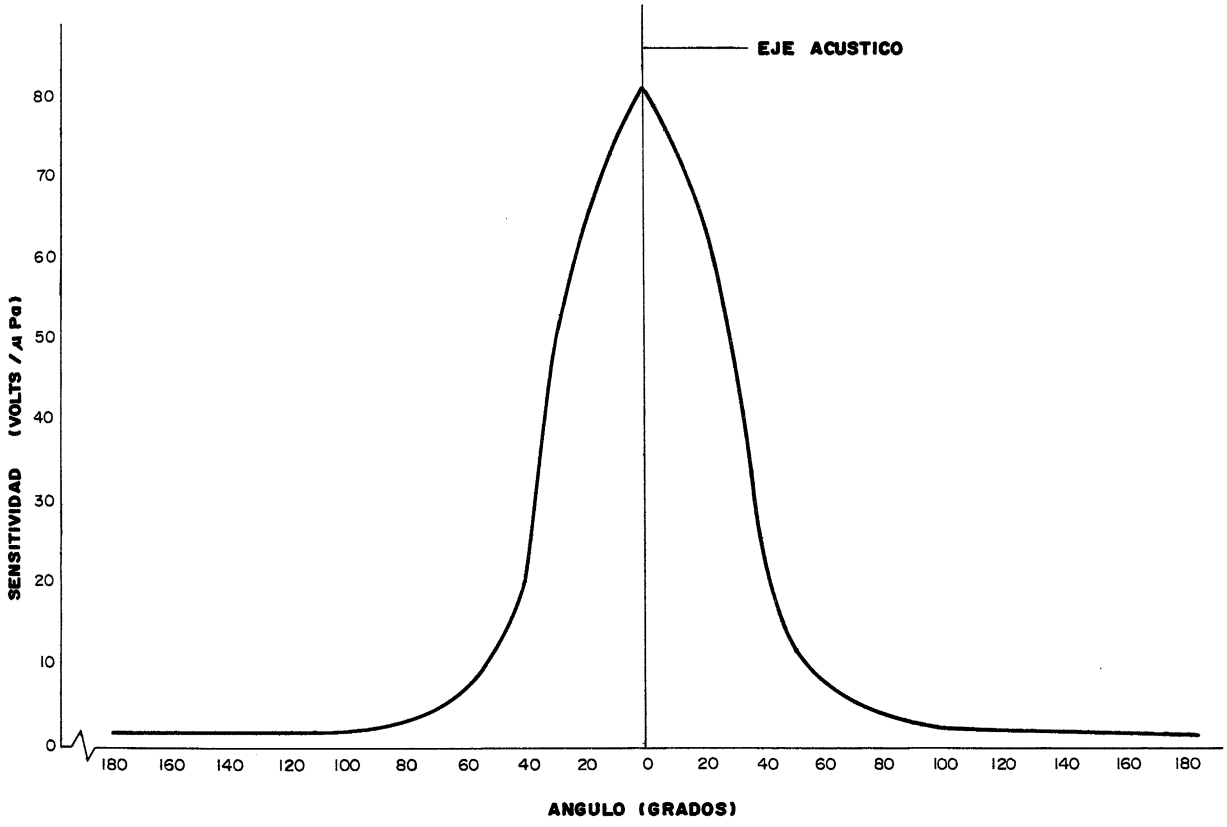


FIGURA 1.2 Patrón del hidrófono en coordenadas rectangulares.

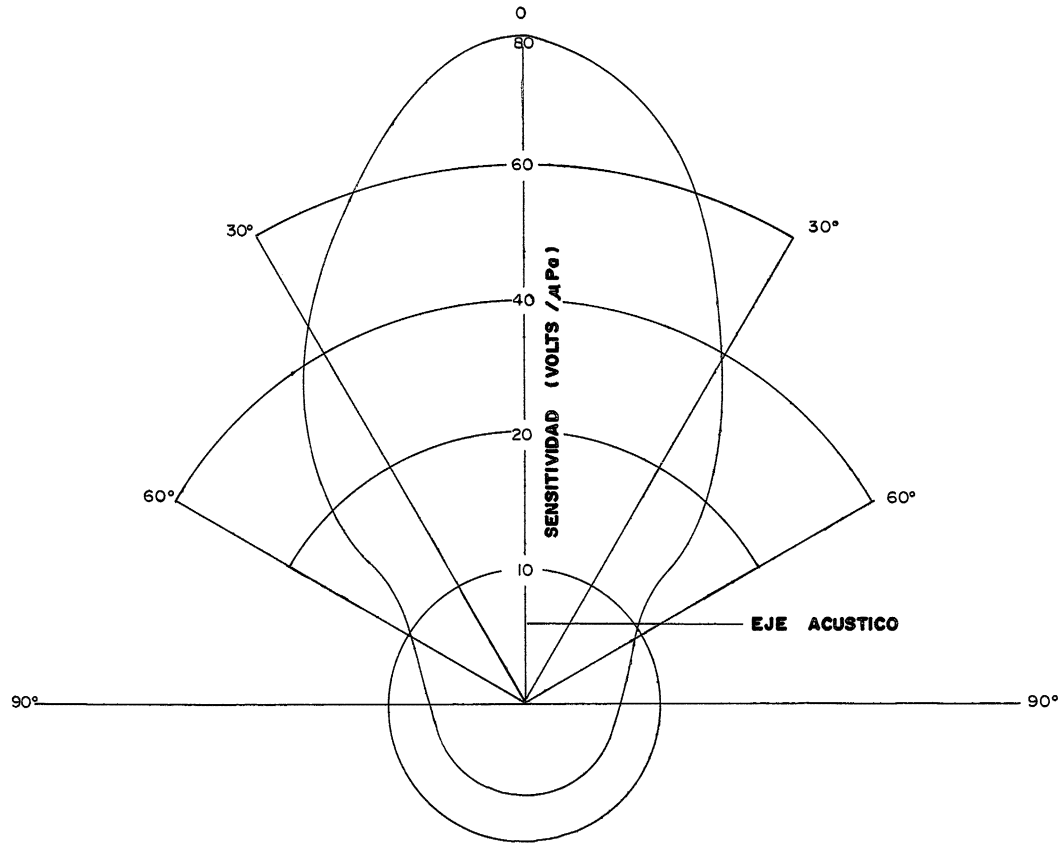


FIGURA 1.3 Patrón del hidrófono en coordenadas polares.

directamente proporcional a la cantidad de potencia acústica recibida, para un valor dado de frecuencia e impedancia acústica del medio. Ya que la potencia acústica es proporcional al cuadrado del voltaje generado, la presión sonora es directamente proporcional al voltaje. Consecuentemente, la escala de decibelios puede ser usada para expresar las relaciones de voltaje desarrolladas para cualquier relación de presión sonora dada, esto es:

$$20 \log_{10} \left(\frac{p_1}{p_2}\right) = 20 \log_{10} \left(\frac{v_1}{v_2}\right) \qquad 1.12$$

Es común expresar la sensitividad de un hidrófono en decibelios relativos a un voltio en los terminales del hidrófono cuando éste es expuesto a una expresión sonora de 1μPa, esto es, como dbv por μPa.

Para la graficación del patrón de un hidrófono en decibelios, generalmente se usa como voltaje de referencia, el valor del voltaje generado en el hidrófono cuando la señal es recibida en el eje acústico. En tales gráficos, el patrón del hidrófono es independiente de la intensidad del campo acústico en el cual es determinado, suministrando un campo constante a través del tiempo

es que se hacen las mediciones. La figura 1.4 y 1.5 son los gráficos, en decibelios, del patrón mostrado en los gráficos 1.2 y 1.3. El gráfico 1.4 está en coordenadas rectangulares y el gráfico 1.5 en coordenadas polares.

1.3.3 Ancho de banda del hidrófono.

En la práctica, la sensitividad de un hidrófono varía con la frecuencia de la señal acústica recibida. Esto es particularmente cierto cuando el hidrófono es operado en o cerca de la resonancia.

Si un hidrófono es colocado en un campo sonoro, su sensitividad puede ser determinada como una función de la frecuencia. La sensitividad del hidrófono puede ser graficada como ordenada y la frecuencia como abcisa. Este gráfico se muestra en la figura 1.6 y la figura 1.7 es el gráfico correspondiente que se obtiene expresando la sensitividad en dbv por μPa.

En el trabajo con hidrófonos, es conveniente considerarlos en términos de su ancho de banda efectivo. El ancho de banda efectivo de un sistema de transmisión específico es el ancho de banda de un sistema ideal que:

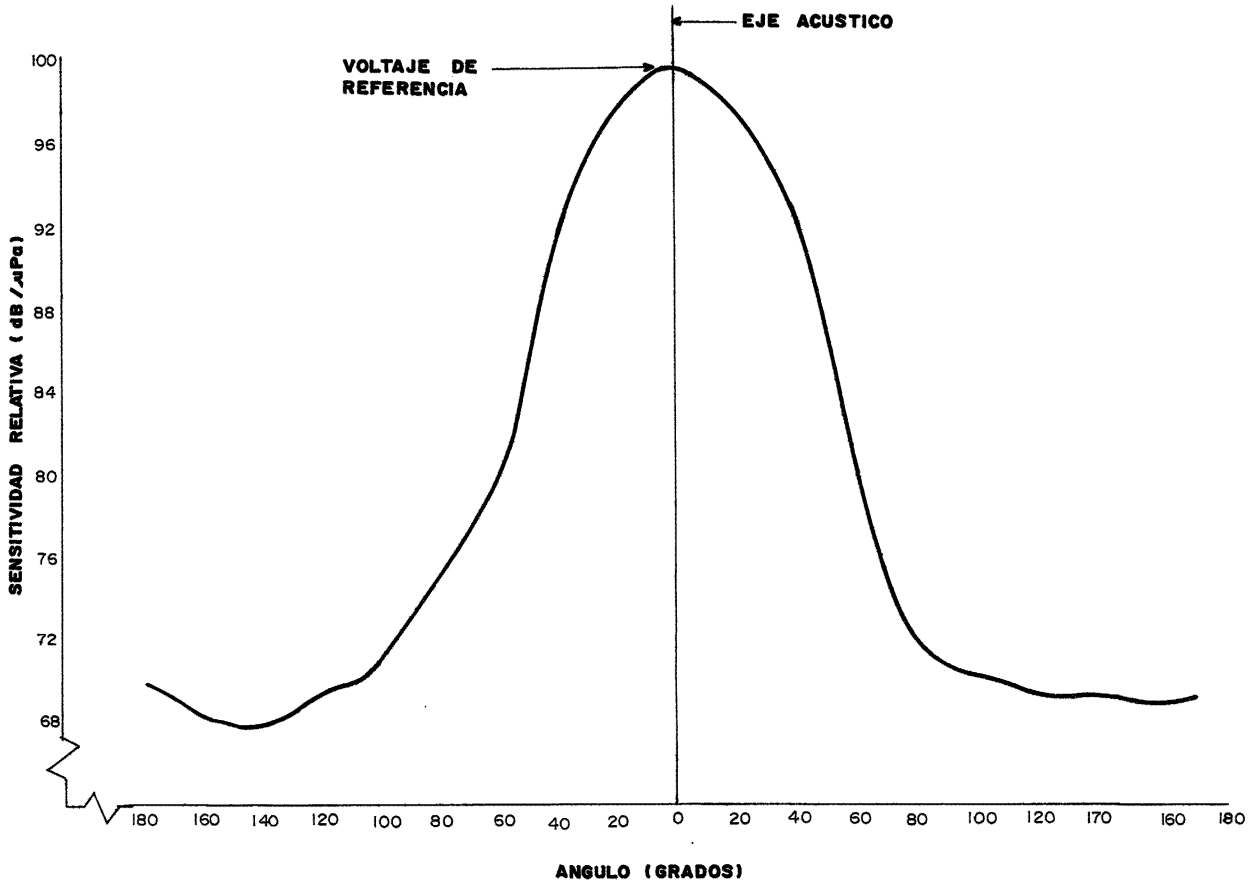


FIGURA 1.4 Patrón del hidrófono en coordenadas rectangulares usando la escala decibel.

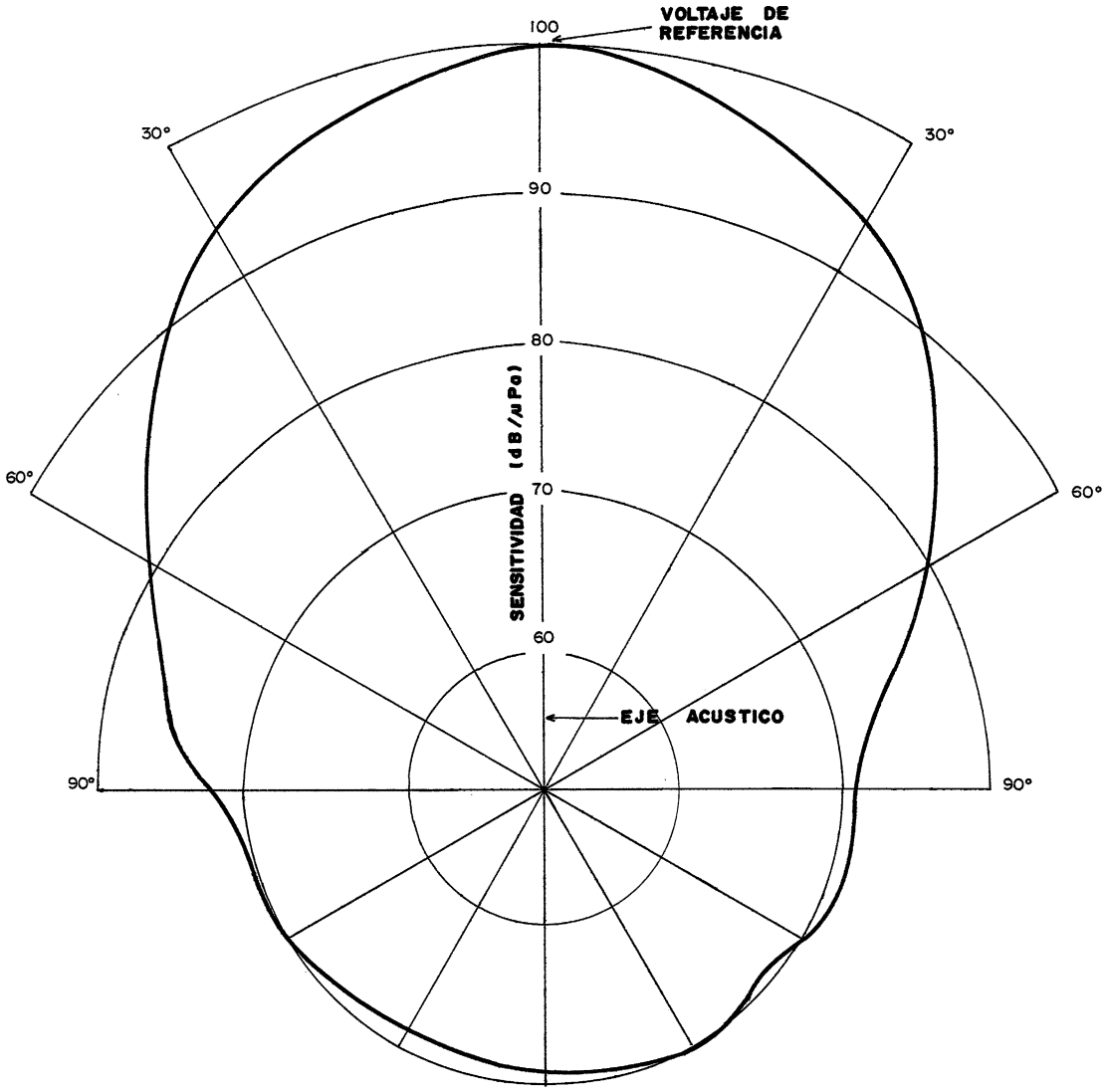


FIGURA 1.5 Patrón del hidrófono en coordenadas polares usando la escala decibel.

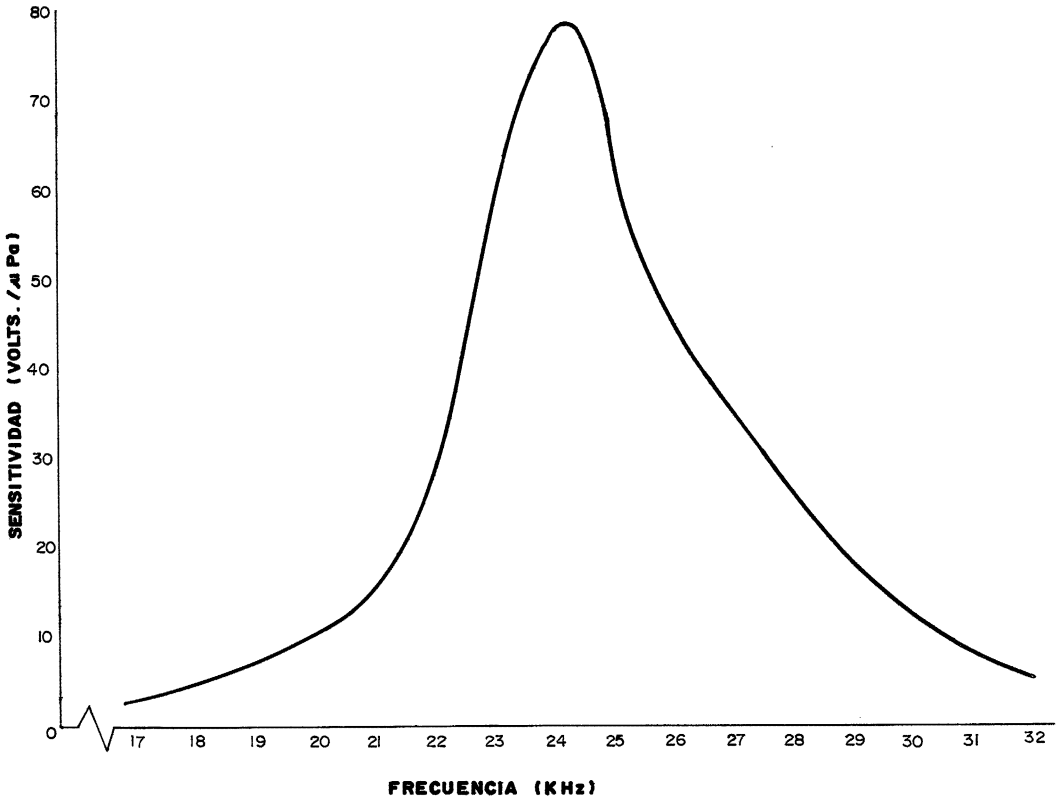


FIGURA 1.6 Respuesta de frecuencia del hidrófono.

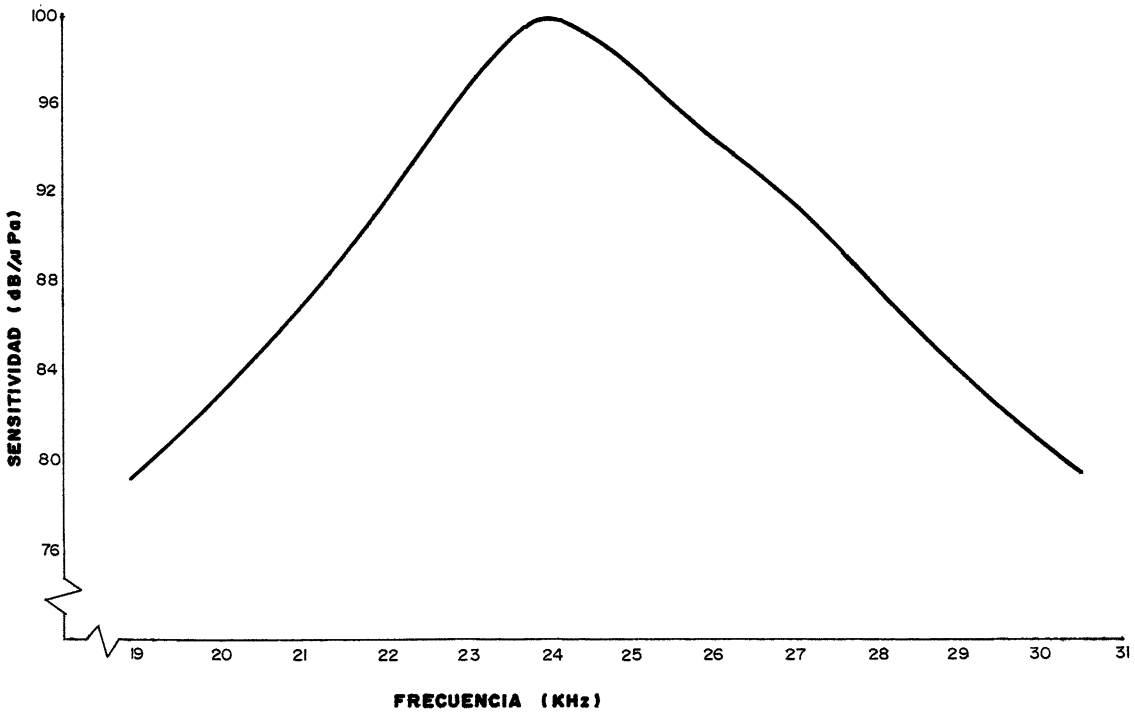


FIGURA 1.7 Respuesta de frecuencia del hidrófono en decibelios.

a) Tiene transmisión uniforme en su banda de paso igual a la transmisión máxima del sistema especificado.

b) Transmite la misma potencia que el sistema especificado cuando los dos sistemas están recibiendo señales de entrada iguales, cuya distribución de energía es uniforme en todas las frecuencias.

Para encontrar el ancho de banda efectivo, ebw por sus siglas en inglés, de un hidrófono cuya característica, sensitividad vs frecuencia se muestra en el gráfico 1.7, cuando está expuesto a un campo sonoro de distribución uniforme en todas las frecuencias, debe dibujarse este gráfico o característica para obtener potencia relativa como función de la frecuencia. Para hacerlo, la potencia obtenida a la frecuencia pico de sensitividad, fr, se le da el valor de uno y se usa por tanto la relación:

$$db = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \qquad 1.13$$

Y la potencia relativa a cualquier frecuencia distinta a fr es:

$$\frac{P_f}{P_o} = 10^{(db/10)} \qquad 1.14$$

Redibujando de esta manera el gráfico 1.7 obtenemos el gráfico 1.8, un gráfico de potencia relativa vs. frecuencia entre las frecuencias de 19 y 30 KHz, las cuales se han elegido debido a que la potencia relativa a estas frecuencias es 0.01 de la potencia a fr. Por tanto, las contribuciones de frecuencias fuera de 19 y 30 KHz son despreciables.

El ebw es obtenido entonces con suficiente exactitud calculando aproximadamente el área bajo la curva de la figura 1.8 entre las frecuencias mencionadas en el párrafo anterior y dividiendo esta área, que se ha calculado en unidades cuadradas, para la ordenada correspondiente a fr, medida en unidades lineales equivalente a fb KHz, donde:

$$f_b = bx \qquad 1.15$$

Siendo x la frecuenia en KHz por unidad lineal. Por tanto, el hidrófono es equivalente a uno con un ancho de banda f_b y una sensitividad uniforme igual a la sensitividad máxima sobre este ancho de banda y cero en todas las otras frecuencias. La curva de respuesta de frecuencia equivalente se muestra en el gráfico 1.9.

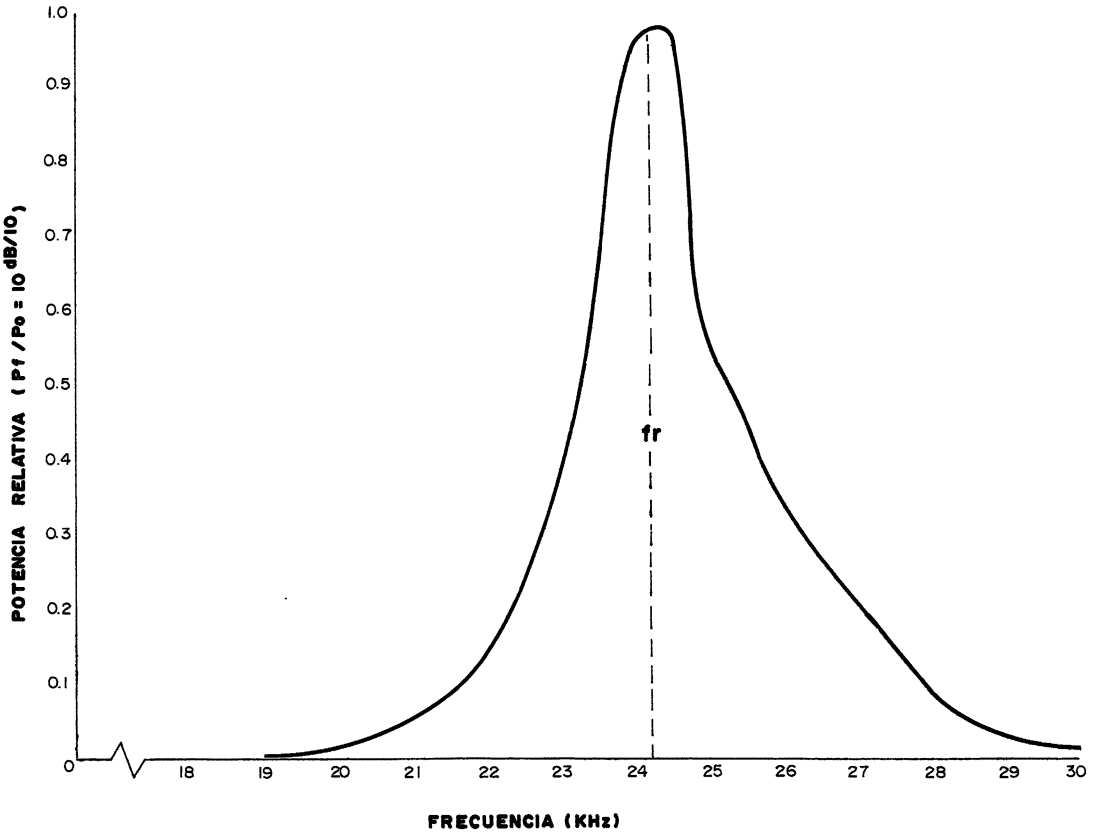


FIGURA 1.8 Trazo de sensitividad relativa de un hidrófono como función de la frecuencia.

1.3.4 Directividad del hidrófono.

Si un hidrófono es suspendido en un campo sonoro, cuya intensidad de señal incidente sobre el hidrófono desde todas las direcciones es la misma, la respuesta de energía del hidrófono será la suma de respuesta a la señal total o la integral de su respuesta de energía sobre toda la esfera alrededor del hidrófono.

El factor de directividad del hidrófono es una indicación de la cantidad, del total de la señal permitida en el hidrófono debido a su patrón de sensitividad, que se convierte en energía eléctrica. Para un mayor factor de directividad, hay más discriminación del hidrófono con respecto a señales que provienen de otras direcciones, distintas al eje acústico. Si $f(\phi)$ es la relación del voltaje de salida del hidrófono para una señal incidente a un ángulo ϕ con el eje acústico ($\phi = 0$), entonces el factor de directividad del hidrófono puede definirse como:

$$D = \frac{1}{\frac{1}{4\pi}\int_{o}^{\pi} f(\phi)\, d\Omega_{\phi}} \qquad 1.16$$

Donde $d\Omega_{\phi}$ es un elemento de ángulo sólido a un ángulo ϕ.

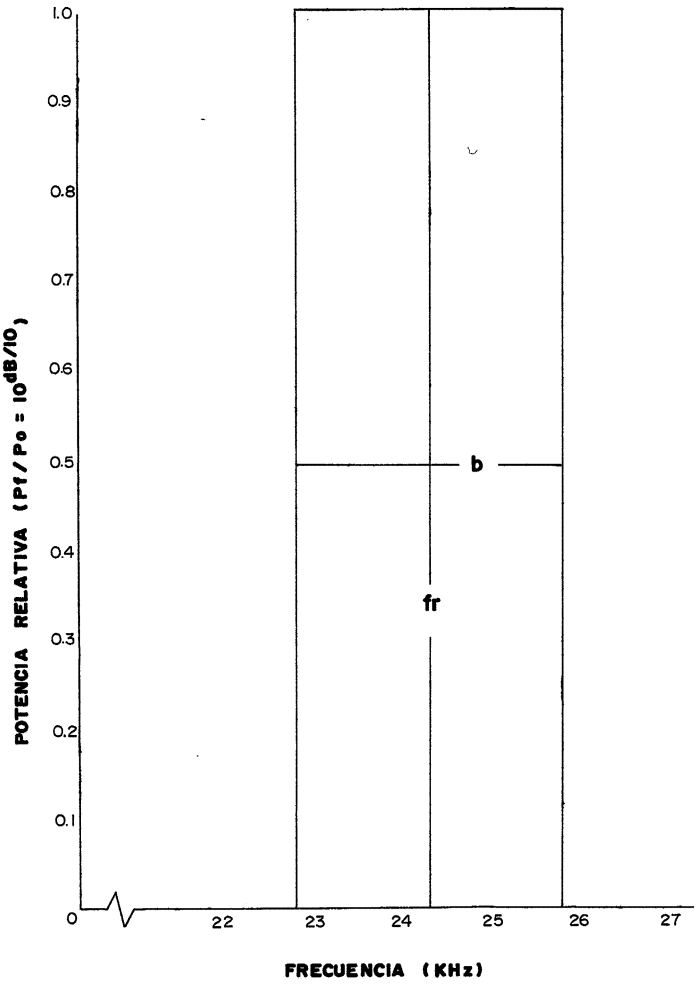


FIGURA 1.9 Representación de la curva de respuesta de frecuencia equivalente de un hidrófono.

La definición del factor de directividad de un hidrófono expresada matemáticamente en la ecuación 1.16 puede ser establecida como la relación del cuadrado de la fuerza electromotriz producida en respuesta a las ondas sonoras que llegan en una dirección paralela al eje principal con la media del cuadrado de la fuerza electromotriz que sería producida si ondas sonoras con fases aleatorias que tienen las mismas frecuencia y presión cuadrada media llegan al transductor simultáneamente desde todas las direcciones.

El índice de directividad, expresión del factor de directividad en decibelios, es igual a:

$$D.I. = 10 \log_{10} D \qquad 1.17$$

Para determinar el factor directividad, se debe realizar la integración indicada en la ecuación 1.16. Generalmente la función $f(\phi)$ no puede ser determinada. En este caso, la integración está acompañada por laboriosos métodos gráficos paso a paso a través del uso de patrones tales como los dados en el gráfico 1.3 medido en algunos planos.

Si un hidrófono es igualmente sensitivo en todas las direcciones, tendrá un factor de directividad igual a uno y el índice de directividad igual a

0 db. Todos los otros hidrófonos tendrán factores mayores que uno e índices de directividad con valores positivos.

1.3.5 Ruido.

Si dos o más frecuencias sinusoidales de energía acústica son radiadas simultáneamente, el sonido resultante es llamado un tono compuesto. Así un sonido puede ser expresado como un número finito de vibraciones sinusoidales.

Algunas fuentes emiten sonidos que no pueden ser expresados como un número finito de vibraciones sinusoidales. Tales sonidos son llamados ruidos. Los sonidos emitidos por naves y organismos marinos son ejemplos de ruidos. A menudo es posible representar un ruido como una suma infinita de vibraciones sinusoidales, las mismas son tales que sumadas alcanzan o representan al ruido dado.

Un ruido se considera aleatorio si sus amplitudes varían como función del tiempo, de acuerdo a una curva de distribución Gaussiana. Un ruido aleatorio, por tanto, no necesita tener un espectro de frecuencia uniforme.

En audioacústica, el término "ruido blanco" es

usada para describir un ruido con una distribución uniforme de energía como una función de la frecuencia en el rango de frecuencias audibles. En hidroacústica, el término se usa comúnmente para describir un ruido con una distribución uniforme de energía como una función de la frecuencia sobre un rango dado de frecuencia. Este rango de frecuencia puede, como no puede, incluir el rango audible de frecuencia. El ruido blanco no es necesariamente aleatorio.

Dependiendo de la naturaleza física de la fuente, un ruido puede ser aleatorio o blanco, puede contener algunas frecuencias discretas o puede tener una banda relativamente estrecha de frecuencias. En general, el ruido emitido por buques en la región ultrasónica se incrementa con la disminución de frecuencia de tal forma que la intensidad aumenta el doble por cada octava de disminución en frecuencia, o en decibelios, la intensidad se incrementa con la disminución de frecuencia a un promedio de 3 db por octava. En la región sónica, las naves tienen una variación aleatoria en la salida de ruido como función de la frecuencia, y la forma del gráfico de intensidad vs. frecuencia depende tanto de las características de la nave como de la velocidad de

usada para describir un ruido con una distribución uniforme de energía como una función de la frecuencia en el rango de frecuencias audibles. En hidroacústica, el término se usa comúnmente para describir un ruido con una distribución uniforme de energía como una función de la frecuencia sobre un rango dado de frecuencia. Este rango de frecuencia puede, como no puede, incluir el rango audible de frecuencia. El ruido blanco no es necesariamente aleatorio.

Dependiendo de la naturaleza física de la fuente, un ruido puede ser aleatorio o blanco, puede contener algunas frecuencias discretas o puede tener una banda relativamente estrecha de frecuencias. En general, el ruido emitido por buques en la región ultrasónica se incrementa con la disminución de frecuencia de tal forma que la intensidad aumenta el doble por cada octava de disminución en frecuencia, o en decibelios, la intensidad se incrementa con la disminución de frecuencia a un promedio de 3 db por octava. En la región sónica, las naves tienen una variación aleatoria en la salida de ruido como función de la frecuencia, y la forma del gráfico de intensidad vs. frecuencia depende tanto de las características de la nave como de la velocidad de

navegación a la cual se describe el ruido.

El ruido del ambiente es el ruido que existe en el medio debido a fuentes no controladas. los ruidos del ambiente bajo el agua pueden ser causados por perturbación de la superficie del océano por viento, lluvia o nieve; por organismos marinos; y por el tráfico de los buques. Bajo ciertas condiciones el ruido ambiente es de carácter no direccional; pero bajo otras condiciones, la intensidad del ruido del ambiente es mayor en la dirección de la superficie del agua.

Si un ruido es generado eléctricamente y la señal eléctrica es usada para manejar un proyector de sonido el rango de frecuencia puede ser limitado por la respuesta de frecuencia del proyector sonoro, los filtros en el sistema electrónico que manejan el proyector sonoro, o ambos. Tal campo de ruido es llamado campo de ruido de banda estrecha.

Ya que la potencia acústica transmitida por cualquier sistema es proporcional a un ancho de banda en frecuencia $\blacktriangle f$, la relación de potencia acústica P_1/P_2 en dos campos de ruido que difieren solamente en los anchos de banda $\blacktriangle f_1$ y $\blacktriangle f_2$ es:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\blacktriangle f_1}{\blacktriangle f_2} \qquad 1.18$$

Por tanto la relación de anchos de banda en un campo ruidoso puede ser expresado en la escala de decibelios como:

$$n = 10 \log_{10} \frac{\blacktriangle f_1}{\blacktriangle f_2} \qquad 1.19$$

En las mediciones de ruido en hidroacústica, el ancho de banda standard de referencia es de 1 ciclo por segundo (1 Hz). Los niveles de fuentes de ruido son cuantificados como la raíz cuadrada del nivel de presión sonora en un ancho de banda de 1 Hz a una distancia definida desde la fuente. La distancia usada es de 1 metro.

1.3.6 Conversión de potencia mecánica o eléctrica en potencia acústica.

Si un pistón es manejado eléctricamente o mecánicamente para ejecutar un movimiento armónico simple, esto genera un tren de ondas en el medio circundante. En cualquier punto en el medio, la presión variará con la frecuencia a la que el pistón está vibrando. Si el movimiento del pistón es tal que puede ser descrito por un número finito, o bien infinito, de vibraciones

sinusoidales, las variaciones de presión en un punto del medio pueden describirse por el mismo conjunto de funciones sinusoidales. El hecho que la presión esté variando en nuestro punto de observación del medio indica que la potencia acústica es transmitida a través del mismo. Esta potencia se origina en la cara del pistón y se propaga en el medio desde el pistón. En cada punto del medio, tenemos que la potencia P está dada por la relación 1.6:

$$P = \frac{p^2 A}{\delta c}$$

Si integramos esta potencia sobre una superficie completa alrededor de la superficie radiante, tendremos la potencia total emitida por el pistón. Esta potencia es radiada como resultado de la potencia eléctrica o mecánica usada para manejar el pistón. Un transductor es definido como un dispositivo actuado por la potencia de un sistema que alimenta a un segundo sistema. Por tanto, el pistón del ejemplo es un transductor acústico, ya que es manejado por una potencia eléctrica o mecánica y alimenta potencia acústica al medio, el cual, en este ejemplo es el segundo sistema.

1.3.7 Eficiencia de un proyector sonoro.

Es posible medir la potencia eléctrica o mecánica total necesaria para manejar el proyector sonoro y determinar la presión sonora generada como una función de la orientación alrededor del proyector. Con esta información, la potencia acústica total puede ser determinada por la integración de la ecuación 1.6 sobre una superficie alrededor del proyector sonoro. La eficiencia del proyector sonoro es entonces igual a:

$$e = \frac{\text{Potencia Acústica Total}}{\text{Potencia de Manejo Total}} \times 10 \qquad 1.20$$

Si un proyector sonoro es usado para alimentar o dar grandes cantidades de potencia acústica, entonces una característica de alta eficiencia sería requerida. Los transductores magnetoestrictivos y piezoeléctricos típicos tienen eficiencias que varían desde un 30% a un 70%.

1.3.8 Directividad del proyector.

Si un proyector sonoro es manejado con la suficiente potencia para producir una intensidad sonora contínua a lo largo del eje de intensidad sonora máxima ($\phi = 0$) y si $f(\phi)$ es la relación de intensidad sonora a cualquier ángulo ϕ, distinta

a aquella producida a $\phi = 0$, entonces el factor de directividad de un proyector sonoro puede definirse:

$$D = \frac{1}{\frac{1}{4\pi}\int_{o}^{4\pi} f(\phi)d\Omega\phi} \qquad 1.21$$

Donde $d\Omega\phi$ es un elemento de ángulo sólido a un ángulo ϕ.

El factor de directividad de un proyector sonoro expresado matemáticamente en la ecuación 1.21 puede ser definido como la relación de intensidad sonora radiada en un punto remoto del campo libre sobre el eje principal a la intensidad promedio del sonido transmitido a través de una esfera que pasa por el punto remoto, el centro de la cual es el transductor. Se debe establecer la frecuencia.

El punto de observación debe ser lo suficientemente remoto del transductor para que exista divergencia esférica. Esta definición puede extenderse para cubrir el caso de bandas de frecuencias finitas, debiendo especificarse su espectro.

El índice de directividad de un proyector sonoro es la expresión del factor de directividad en decibelios.

Para un transductor electroacústico, según el principio de reciprocidad, el factor de directividad de recepción sonora es el mismo que el de proyección sonora.

C A P I T U L O 2

ESTUDIO DEL MEDIO DE TRANSMISION.

2.1 CARACTERISTICAS FISICAS DEL MAR EN RELACION A LA TRANSMISION DEL SONIDO.

2.1.1 Salinidad.

La característica que distingue al agua de mar es su salinidad. El origen de las varias sales disueltas en el agua de mar tiene que ver con el volcanismo marino y la disolución de las rocas del piso del mar por la acción del agua de mar misma y de la tierra por acción de precipitaciones de agua, que lleva los minerales disueltos al mar. La salinidad puede definirse como la cantidad total de material sólido, en gramos, en 1 Kg de agua de mar cuando todos los carbonatos han sido convertidos a óxidos, los bromuros y yoduros reemplazados por cloruros, y todos los materiales orgánicos completamente oxidizados.

El contenido de sal, así definido, constituye una muy pequeña cantidad de material disuelto por Kg de agua de mar; está en un valor promedio aproximado de 35 ppm.

Es evidente que muchas de la propiedades del agua de mar dependen de la salinidad, en mayor o menor

medida; una de ellas es la velocidad del sonido bajo el agua. Esta propiedad es una de las más importantes variables del agua de mar, debido a que el sonido es la única forma de energía radiante conocida que es transmitida a gran distancia a través del agua. En el océano, la velocidad de transmisión sonora varía con la salinidad, la temperatura y la presión (profundidad); al aumentar la salinidad, la velocidad del sonido aumenta. La ecuación 1.3 indica esta variación.

El efecto de esta variación con la salinidad no es grande, y hay poca diferencia, relativamente hablando, con la misma en el mar; excepto en áreas donde fuentes de agua fresca llegan al mar. En estas áreas, el agua fresca y la de mar usualmente no se mezclan completamente; a menudo la salinidad varía tanto con la profundidad como con la distancia de la fuente. Se ha demostrado que la mayor parte del efecto de la salinidad es atribuible al ión magnesio, pero debido a la correspondencia fija de la concentración de ión magnesio con la clorinidad o salinidad, no se indican determinaciones amplias de ión magnesio.

Las variaciones de la velocidad sonora en el agua con la salinidad causan efectos de refracción,

que son más importantes que los valores absolutos de las diferencias de velocidad. El agua fresca tiende a fluir arriba del agua salada, la velocidad sonora será menor cerca a la superficie, y los rayos sonoros tenderán a refractar hacia la superficie.

2.1.2 Temperatura.

La temperatura del agua de mar en el océano varía entre los 30°C en la superficie, en las regiones tropicales, y los - 2°C en las aguas de superficie y de fondo en la región antártica. En el mar es difícil encontrar condiciones isotérmicas, por esta razón se producen variaciones en la velocidad del sonido lo que causa refracción, o flexión, de los rayos sonoros, lo que resulta en una no linealidad de transmisión.

Los gradientes de temperatura afectan la transmisión sonora en forma más importante que los valores absolutos de temperatura. En algunas áreas del océano, los cambios de temperatura ocurren a un promedio fijo sobre grandes rangos de profundidad. Si la temperatura se incrementa con la profundidad a un promedio fijo, la velocidad del sonido se incrementa a un promedio constante con la profundidad, y los rayos sonoros

son refractados hacia la superficie. Si, sin embargo, la temperatura disminuye con la profundidad, la velocidad del sonido disminuye con la profundidad, y los rayos sonoros son flexionados hacia abajo. Si la fuente de tal sonido está cercana a la superficie, hay un punto más allá del cual el sonido no es recibido desde la fuente; este punto es la "zona de oscuridad". La distancia desde la fuente a la zona de oscuridad está determinada por el promedio de cambio de temperatura con la profundidad, la profundidad de la fuente, y la profundidad a la cual se hace la observación.

También hay áreas en el mar donde, a cierta profundidad, la temperatura cambia rápidamente con la profundidad sobre un pequeño intervalo de la misma. Las áreas sobre y debajo de esta capa crítica pueden ser isotérmicas, o con un pequeño gradiente térmico comparado al exhibido en la capa crítica. A tal capa se la conoce como termoclina. Esta capa, además de producir preferentemente una aguda flexión de los rayos sonoros por efecto de refracción, puede servir como superficie de reflexión.

Debido a la importancia de las capas térmicas en la transmisión del sonido, han sido objeto de

considerable estudio. Para sus estudio se usa un instrumento llamado batitermógrafo. Este instrumento consiste esencialmente de una corredera de vidrio ahumado y una aguja que es activada horizontal por un elemento sensitivo a la temperatura. Cuando un batitermógrafo es sumergido en el océano, un gráfico de temperatura versus profundidad es automáticamente grabado en el vidrio ahumado. Entonces pueden determinarse valores, de temperatura como función de la profundidad, de la corredera por la lectura de puntos en el gráfico con la ayuda de una escala ópticamente superimpuesta. Una observación batitermográfica es hecha generalmente junto con mediciones acústicas tomadas en el mar para determinar la existencia de condiciones térmicas en el agua. La mayoría de submarinos son construidos con batitermógrafos incorporados, de tal forma que la tripulación puede hacer observaciones de las condiciones térmicas en cualquier momento.

2.1.3 Densidad.

En el capítulo anterior vimos como la relación entre la potencia acústica y la presión sonora y la relación entre la intensidad acústica y presión sonora son afectadas por la impedancia

acústica del medio. Como la impedancia acústica del medio depende de la densidad, entonces esas relaciones son afectadas por cambio en la misma.

La densisad del agua de mar está determinada por la salinidad, la temperatura y la presión. Disminuye cuando el agua es calentada, pero aumenta con el incremento del contenido de sales disueltas. La presión, la cual se debe principalmente al peso de agua sobre la referencia, aumenta 1 atmósfera con cada 10 metros de incremento en profundidad, de tal forma que es verdaderamente grande aún a profundidades moderadas. Consecuentemente, el agua está suficientemente comprimida de tal manera que el incremento resultante en densidad debe tomarse muy en cuenta si la densidad va a ser determinada a la exactitud necesaria para el trabajo oceanográfico que hoy se efectúa (alrededor de 1 parte en 10^5). La densidad del agua de mar es siempre ligeramente mayor que la unidad, por ello se acostumbra a expresar la densidad de una muestra de agua de mar especificando una salinidad S, temperatura T y presión P.

2.1.4 Bioacústica Marina.

Los organismos marinos juegan un rol importante

en la hidroacústica. Su importancia primaria es por el efecto que tienen en la transmisión del sonido, pero algunas veces sirven como fuentes de ruido bajo el agua.

El efecto más importante de los organismos marinos en la transmisión sonora es la formación de la capa de "dispersión profunda". Esta capa contiene una alta concentración de plancton, de los cuales los euphasiids son particularmente importantes, y posiblemente peces. Debido a las propiedades de reflexión de estos organismos, el sonido se refleja desde esta capa.

Como el tamaño de los organismos, en la capa, cambia; el efecto de la longitud de onda en la dispersión cambia, porque un cuerpo no es dispersador efectivo cuando su tamaño es pequeño en comparación con la longitud de onda del sonido radiado.

Se han observado aguas oscuras dispersadoras en el área del Canal Inglés. Se piensa que estos organismos son en su mayoría larvas de pescado que poseen vejiga de aire.

Un estudio del retorno de las intensidades sonoras de 24 KHz desde la capa de dispersión profunda indica que, aunque las pequeñas

dispersiones exceden bastante a las grandes, las grandes dispersiones producen más sonido de retorno.

La industria pesquera ha aplicado directamente el hecho que los organismos marinos pueden dispersar el sonido, por lo que se ha dedicado gran esfuerzo a la investigación en esta área. Estos efectos, sin embargo, llevan a dificultades en la aplicación del sonido bajo el agua para problemas de contiendas militares.

La boiacústica marina puede separarse en dos grandes categorías:

1) Intereferencia marino-biológica con escuha pasiva.

2) Iterferencia marino-biológica con sonar en modo activo.

2.1.4.1 Interferencia marina-biológica con escucha pasiva.

La causa más común de esta interferencia es la producción sonora por invertebrados marinos, pescado y mamíferos marinos. Probablemente los más amplios productores de sonido son los peces; ellos pueden interferir con la escucha pasiva de 3

formas:

1) Por la producción de suficiente ruido a la frecuencia de la señal cambiando radicalmente la relación señal/ruido.

2) Por la producción de suficientes sonidos similares a la señal creando una señal falsa.

3) Por la interposición de ellos mismos como atenuadores de la señal o reverberadores, debido a la composición de sus cuerpos.

Ciertos sonidos producidos por los peces son similares a aquellos producidos por las máquinas, propelas y otros dispositivos hechos por el hombre. Delfines, ballenas y focas pueden interferir con la escucha bajo el agua; estos productores de sonidos serán vistos en la interferencia con sonar activo; es suficiente establecer ahora que los mamíferos marinos, por virtud de su obliqua distribución y gran rango de migración, pueden causar problemas intermitentes de escucha de serias consecuencias para el sonar submarino. Los invertebrados marinos

también pueden degradar la señal de algunas formas.

La distorsión de la señal y la atenuación pueden resultar de una colección de invertebrados de cuerpo suave, tales como salpas y ortigas de mar, recolectadas en la vecindad y arriba del dispositivo de escucha pasiva. A veces ocurren en número suficiente para "blanquear" temporalmente el dispositivo; pero es más común que su presencia en número suficiente resulte en una marcada fluctuación de la fortaleza de la señal y su calidad.

2.1.4.2 Interferencia marina-biológica con sonar en modo activo.

Esta interferencia está cercana y comúnmente relacionada con problemas más serios que los de escucha pasiva. Además de la producción del sonido por la vida marina, el problema incluye interferencia acústica por suciedad de los domos transductores y puede involucrar reverberación y atenuación de partículas acústicamente opacas de libre flotación.

El sonar en modo activo puede distinguir

aquello que aparece como un objetivo identificado de significación operacional que posteriormente se comprueban que son animales marinos de libre movimiento que posee características objetoacústicas cercanamente relacionadas a aquellos objetivos operacionales. Tiburones, ballenas, delfines, atunes, macarelas y algunas pequeñas criaturas poseen cubiertas, cartílagos, vejigas natatorias, escamas, huesos u otras estructuras que no son acústicamente opacas y que están presentes en combinaciones que se presentan en la pantalla del sonar como objetivos acústicos algunas veces difíciles de distinguir de objetos móviles hechos por el hombre.

Plancton es un término usado para describir un sinnúmero de muy pequeños organismos marinos, tanto plantas y animales, los cuales flotan o nadan suavemente y permanecen suspendidas en el mar. Muchas de estas criaturas son de etapa inmadura o larvales de plantas y animales los cuales llegan a ser bastante grandes en sus formas adultas. En forma frecuente,

el sonar de búsqueda de alta frecuencia puede volverse inoperativo repentinamente para períodos variables de tiempo luego que han estado operando satisfactoriamente, algunos de estos blanqueos pueden ser ocasionados por densas agregaciones de formas planctónicas localizadas en el patrón del haz de sonido. Experimentos de laboratorio han demostrado que energía sónica de alta frecuencia pueden producir resonancia en organismos muy pequeños.

La migración diurna de animales marinos resulta en "capas de profunda dispersión", una o más capas reflejan mostrando falsos "fondos" en ecosondas y tienden a reflectar los haces del sonar. Por muchos años estas concentraciones representaron un fastidioso problema en operaciones con sonares activos. Aunque los refinamientos en equipos acústicos y en técnicas han logrado disminuir esta fuente de interferencia, es aún un problema importante para ciertos tipos de ecolocalización de rango largo.

2.1.5 Absorción del sonido en el agua de mar.

Ya que el sonido es irradiado desde una fuente, su intensidad decae en proporción al cuadrado de la distancia desde la fuente. Además de la reducción de intensidad con el rango, ocurre que algo de la energía acústica es convertida en calor, por el medio, durante la transmisión. Esta reducción en intensidad es llamada absorción.

La absorción del sonido en el agua de mar varía con la frecuencia; y a una frecuencia dada, una fracción constante **n** de la energía sonora es absorbida en cada metro del viaje sonoro.

Según la ecuación 1.5

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{F}{r^2}$$

donde:

$$F = \frac{P}{4\pi} \qquad 2.1$$

Por tanto, a una distancia diferencial **dr**, una cantidad de energía $4\pi n_1 F dr$ es absorbida por segundo y convertida a energía calorífica. La constante n_1 es llamada el coeficiente de absorción del agua. La disminución $4\pi dF$ de la energía sonora en esta distancia es igual a la

energía absorbida, o $4\pi n_1 F dr$, y, ya que es una pérdida de energía, tenemos la relación:

$$\frac{dF}{dr} = - n_1 F \qquad 2.2$$

Cuya solución es:

$$F = F_o e^{-n_1 r} \qquad 2.3$$

Sustituyendo la ecuación 2.3 en 1.5, tenemos:

$$I = F_o \frac{e^{-n_1 r}}{r^2}$$

que escrito en términos de decibelios es:

$$10 \log I = 10 \log F_o - 20 \log r - 10 n_1 r \log e \qquad 2.4$$

El último término de esta es igual a $- 4.34\ n_1 r$, donde $- 4.34\ n_1$ expresa la absorción de sonido en agua de mar para una frecuencia dada en decibelios por metro. Usualmente se expresa el coeficiente de absorción como α en dB/Km, donde $\alpha/1000 = 4.34\ n_1$.

Reescribiendo la relación 2.4, tenemos:

$$10 \log I = 10 \log F_o - 20 \log r - \alpha r$$

$$10 \log I = 10 \frac{F_o}{r^2} - \alpha r$$

$$10 \log I = 10 \log I_o - \alpha r$$

$$\alpha = \frac{10 \log I_o - 10 \log I}{r} \qquad 2.5$$

La figura 2.1 muestra α dibujado como función de la frecuencia.

2.1.6 El fenómeno acústico: velocidad del sonido en el mar.

Las ondas acústicas, al igual que otras, existen por la virtud de una respuesta de restablecimiento del medio a una alteración. La finita compresibilidad del agua de mar provee la fuerza restablecedora en este caso.

En el agua de mar de salinidad normal, la velocidad del sonido es principalmente una función de temperatura y presión; disminuye con la disminución de temperatura, pero se incrementa con el aumento de la presión. Así los perfiles de temperatura de este tipo se encuentran usualmente en el océano combinados con el gradiente de presión hidrostática que lleva a un perfil vertical de velocidad sonora con un mínimo pronunciado a alguna profundidad intermedia, usualmente cerca a los 1000 m.

Esta situación lleva a la existencia del llamado canal SOFAR cuyo eje permanece a la profundidad

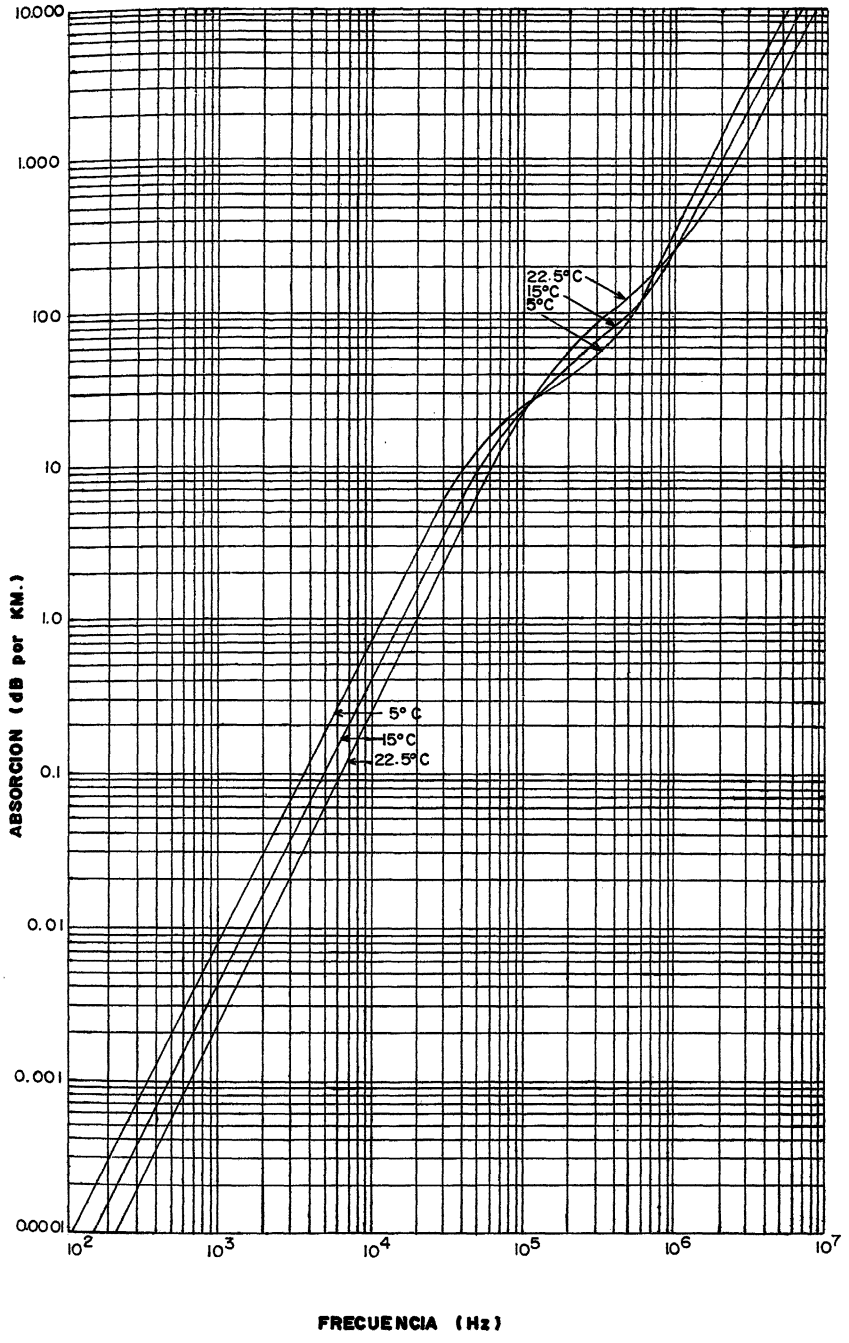


FIGURA 2.1 Absorción del sonido en el agua de mar.

de la velocidad mínima. Una explosión en o cerca de esta profundidad radia ondas sonoras en todas las direcciones, pero las ondas moviéndose obliquamente hacia profundidades de alta velocidad, hacia arriba o abajo, son refractadas de regreso a la profundidad de velocidad mínima con el resultado que muy poca energía acústica escapa del canal. La detonación de algunas libras de explosivo en el canal SOFAR genera una señal detectable a algunas miles de millas de distancia por un hidrófono colocado a la profundidad del canal. La onda "directa", que viaja recto a lo largo del eje del canal, llega después de cualquiera de las ondas refractadas, las cuales atraviesan patrones como un rumor que cobra intensidad y entonces se corta repentinamente.

La energía acústica radiada a una profundidad donde la velocidad del sonido es menor que en la superficie del agua será refractada hacia aguas más profundas y un oyente en la superficie a alguna distancia horizontal lejos de la fuente puede que no escuche absolutamente nada. Este hecho encuentra su aplicación cuando un submarino está tratando de escapar a la detección por equipos de escucha bajo el agua de una nave de superficie.

Burbujas, organismos marinos, irregularidades del fondo del mar y de su superficie, y variaciones en densidad resultan en turbulencia u ondas internas que dispersan toda la energía acústica. Cuando las ondas son reflejadas repetidamente desde el fondo o la superficie del mar, hay una dispersión considerable de energía fuera del patrón de reflexión múltiple. Las burbujas son dispersadores particularmente efectivos a frecuencias cercanas a su propia frecuencia de resonancia acústica.

2.2 PROPAGACION DEL SONIDO EN EL MAR.

2.2.1 Introducción.

El mar, junto con sus límites, forma un medio bastante complejo para la propagación sonora. Posee una estructura interna y una peculiar superficie inferior y superior, los cuales crean muchos efectos diversos sobre el sonido emitido desde un proyector sonoro. En su viaje a través del mar una señal hidroacústica llega a retrasarse, distorsionarse y debilitarse. Las pérdidas de transmisión expresan la magnitud de uno de los muchos fenómenos asociados con la propagación del sonido en el mar.

2.2.1.1 Definición de pérdidas de transmisión.

El parámetro del sonar PERDIDAS DE TRANSMISION describe, en forma cuantitativa, el debilitamiento del sonido entre un punto colocado a distancia en el mar. Más específicamente si I_o es la intensidad en el punto de referencia localizado a 1 metro del "centro acústico de la fuente" (10 log I_o es entonces el nivel de la fuente o source level) e I_1 es la intensidad a un punto distante, luego las pérdidas de transmisión entre la fuente y un punto distante es:

$$TL = 10 \log \frac{I_o}{I_1} \text{ dB} \qquad 2.6$$

Ya que I_o e I_1 son intensidades, un tiempo promedio está implícito en la definición. Para una fuente de onda contínua o casicontínua, este tiempo promedio es tomado sobre un intervalo lo suficientemente largo para incluir todos los efectos de fluctuación en la transmisión; para un pulso transiente corto el promedio de tiempo debe ser lo suficientemente largo para incluir el multipatrón de los

efectos de transmisión que causan distorsión de la señal recibida. Para pulsos cortos, un equivalente de pérdidas de transmisión con el de una fuente contínua está dado por la relación de la densidad del flujo de energía a 1 metro de la fuente, E_o, a la densidad del flujo de energía a un punto distante, E_1, esto es:

$$TL = 10 \log \frac{E_o}{E_1} \text{ dB} \qquad 2.7$$

2.2.1.2 Fuentes de pérdida.

Las pérdidas de transmisión pueden considerarse como la suma de pérdidas debido a la difusión y pérdidas debido a la atenuación.

Las PERDIDAS POR DIFUSION son el efecto geométrico que representa el regular debilitamiento de una señal de sonido enviada desde la fuente hacia el medio. Las PERDIDAS POR ATENUACION incluyen los efectos de absorción, dispersión y escape de los canales sonoros. Además de estas dos principales clases de pérdida, otras pérdidas, no identificables fácilmente, pueden ocurrir con la distancia o

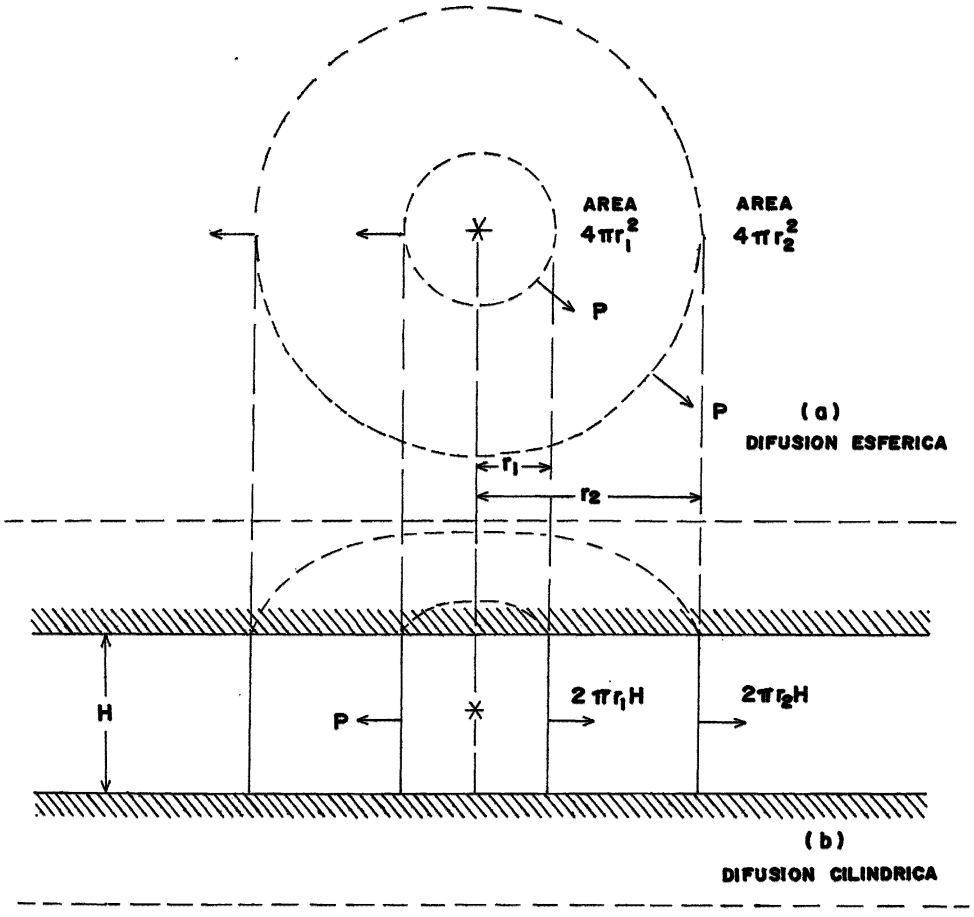
alcance; ejemplos de ellos son la ganancia de convergencia en los canales sonoros o su opuesto, las pérdidas de refracción en zonas de oscuridad.

Las pérdidas de transmisión, como un número único, resumen los efectos de una variedad de fenómenos de propagación en el mar, los cuales son muchos y diversos. Veremos los que más interesen a nuestro objetivo y aplicación sin complicarnos con aquellos que no ocurren en nuestras costas por razones de posición geográfica.

2.2.2 Leyes de difusión.

2.2.2.1 Difusión esférica.

Colocando una pequeña fuente sonora (figura 2.2.a) en un medio homogéneo, sin fronteras y sin pérdidas tenemos la condición más simple de propagación. Para esta condición, la potencia generada por la fuente es radiada igualmente en todas las direcciones de tal forma que está igualmente distribuida sobre la superficie de la esfera alrededor de la fuente. Ya que no hay pérdidas en el medio, la



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
1958
GUAYAQUIL
BIBLIOTECA

FIGURA 2.2 (a) Difusión en un medio sin fronteras.
(b) Difusión en un medio entre dos planos paralelos.

potencia, P, que atraviesa tales esferas debe ser la misma. Como la potencia es igual a la intensidad por el área, tenemos que:

$$P = 4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2 = ...$$

Haciendo a $r_1 = 1$ m (referencia), la pérdida de transmisión a la distancia r_2 es:

$$TL = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log \frac{4\pi r_2^2}{4\pi r_1^2}$$

$$TL = 10 \log r_2^2$$

$$TL = 20 \log r_2 \qquad 2.8$$

A esta clase de difusión se la llama inversa al cuadrado o esférica. Conforme a la ecuación 2.8 podemos deducir que, para esta clase de difusión, la intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia y la pérdida de transmisión se incrementa con el cuadrado de la distancia. Otra forma de describir a esta clase de difusión es decir que el producto del valor rms de la presión sonora y la distancia es un valor constante.

2.2.2.2 Difusión cilíndrica.

Cuando el medio tiene límites planos y paralelos en la parte superior e inferior, como en la figura 2.2.6, la difusión ya no es esférica porque el sonido no puede cruzar los planos que actúan como fronteras. Más allá de cierta distancia, la potencia radiada por la fuente está distribuida sobre una superficie cilíndrica, que tiene un radio igual a la distancia y una altura H igual a la distancia entre los planos paralelos. La potencia que atraviesa las superficies cilíndricas a las distancias r_1 y r_2 es:

$$P = 2\pi r_1 H I_1 = 2\pi r_2 H I_2 = ...$$

Tomando a r_1 como 1 m, tenemos que la pérdida de transmisión a la distancia r_2 es:

$$TL = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log \frac{2\pi r_2 H}{2\pi r_1 H}$$

$$TL = 10 \log r_2 \qquad 2.9$$

2.2.3 Absorción del sonido en el mar.

La absorción es una forma de pérdida que obedece

a una ley de variación con la distancia por la pérdida debida a la difusión. Esto involucra un proceso de conversión de energía acústica en calor por lo que representa una pérdida real de energía acústica en el medio en el cual se propaga. Cuando una onda viaja a través de un medio absorbente, una cierta fracción de su intensidad se pierde en cada pequeña unidad de distancia recorrida. Si la intensidad a cierta distancia es I, la pérdida de intensidad (dI) recorriendo una pequeña distancia adicional (dx) está dada por:

$$\frac{dI}{I} = - n_1 dx \qquad 2.10$$

Donde n_1 es una constante de proporcionalidad y el signo negativo (-) indica que es una disminución de intensidad. Realizando la integración entre los rangos r_2 y r_1 encontramos que la intensidad I_2 en el rango r_2 está relacionada a la intensidad I_1 en el rango r_1 por:

$$I_2 = I_1 \, e^{-n_1 (r_2 - r_1)} \qquad 2.11$$

Tomando 10 veces el logaritmo en base 10 de la expresión anterior, tenemos:

$$10 \log I_2 - 10 \log I_1 = -10 \, n_1 (r_2 - r_1) \log_{10} e$$

Haciendo $\alpha = 10\ n \log_{10} e$, tenemos:

$$10 \log I_2 - 10 \log I_1 = - \alpha (r_2 - r_1)$$

$$\alpha = \frac{10 \log I_1 - 10 \log I_2}{r_2 - r_1} \qquad 2.12$$

La cantidad α es el coeficiente de absorción y está expresado en decibelios por kilómetro (dB/Km). Esto quiere decir que por cada kilómetro recorrido, la intensidad es disminuida por la absorción en la cantidad α dB.

Las primeras mediciones del coeficiente de absorción del agua de mar fueron realizados durante los años 1931 a 1934 por Stephenseon usando pulsos sinusoidales transmitidos a través del mar entre una nave de superficie y un submarino sumergido. En los comienzos de la II Guerra Mundial, se hicieron mediciones en distintas áreas del océano en el rango de frecuencias de interés para el sonar. Durante los tiempos de guerra muchos datos adicionales se obtuvieron principalmente gracias a la División para Investigación de Guerra de la Universidad de California. Posteriormente Wilson y Leonard realizaron mediciones usando decaimiento del sonido en una esfera de vidrio con agua de mar agitada hasta vibrar en uno de sus modos

naturales; tiempo después, una cavidad rectangular fue usada a bajas frecuencias, tanto en laboratorio como en el mar.

Pronto estuvo claro que la absorción del sonido en el mar era inesperadamente más alta si la comparaban con la que ocurría en agua dulce (o pura) y podría atribuirse a difusión, refracción u otras anomalías debidas a la propagación en el ambiente natural. Para ejemplo podemos citar que, en el agua de mar la absorción a frecuencias entre 5 y 50 KHz se encontró que es 30 veces la de agua destilada. Esta absorción en exceso se atribuyó a una clase de reacción química que ocurre bajo la influencia de una onda sonora e involucra una de las sales menores disueltas en el mar.

En el agua de mar, la absorción del sonido es causada por 3 efectos.

Un efecto es el de la VISCOCIDAD POR ESFUERZO CORTANTE (SHEAR VISCOSITY), el cual es un efecto clásico investigado teóricamente hace mucho tiempo por Rayleigh. La segunda parte del efecto que estamos viendo es debido a la VISCOSIDAD POR VOLUMEN (VOLUME VISCOSITY), ésta produce absorción como resultado de un retardo de tiempo

requerido por las moléculas de agua para "fluir" bajo presión hacia celdas "huecas" en la estructura de cristal. Existe una relación, para el agua pura, que puede ayudarnos a visualizar y expresar este efecto; esta relación para agua pura y a nivel del mar es:

$$\alpha_{AP} = \frac{4.34}{\delta_{AP} C^3_{AP}} \left(\frac{4}{3} \mu_{AP} + \mu'_{AP}\right) w^2 \qquad 2.13$$

Donde:

α_{AP} : Coeficiente de absorción (atenuación) del agua pura.

δ_{AP} : Densidad agua pura $\approx$ 1000 Kg/m^3.

C_{AP} : Velocidad del sonido en agua pura $\approx$ 1500 m/seg.

w : rad/seg.

μ_{AP} : Coeficiente dinámico (o absoluto) de la viscocidad por esfuerzo cortante del agua fresca $\approx$ 1.2 x 10^{-3} N seg/m^2 a temperatura T = 14°C.

μ'_{AP}: Coeficiente dinámico (o absoluto) de la viscosidad por volumen del agua pura $\approx$ 3.3 x 10^{-3} N seg/m^2 a temperatura T = 14°C.

El segundo efecto es causado por el proceso de relajación iónica las moléculas de sulfato de magnesio ($MgSO_4$) contenidas en el agua de mar.

Este es un proceso de disociación-reasociación, que involucra un intervalo de tiempo llamado tiempo de relajación, durante el cual los iones de $MgSO_4$ en solución se disocian bajo la presión de una onda sonora. Aunque las cantidades de sulfato de magnesio representan solamente el 4.7% del peso de todas las sales disueltas en el agua de mar, se encontró que ésta sal en particular es el elemento absorbente dominante del agua de mar, siendo su presencia más influyente por debajo de la frecuencia de 100 KHz. Es de mencionar, que los dos efectos anotados, muestran en la práctica dependencia con la frecuencia, por lo que el coeficiente de absorción presenta entonces esa misma dependencia. Adicionalmente, en este punto se ha encontrado que existe una variación de la profundidad. En el rango de la presión hidrostática encontrada en el mar, causada por la profundidad, se tiene que genera una reducción del coeficiente de absorción. Sin embargo, durante experiencias hechas en el océano Pacífico midiendo el coeficiente de absorción a grandes profundidades se ha encontrado que esta reducción es mayor a la esperada.

El tercer efecto es muy notable a frecuencias por debajo de la frecuencia de 5 KHz. Una compilación

de datos obtenidos a frecuencias por debajo de 1 KHz mostraron que el coeficiente de atenuación es aproximadamente 10 veces mayor al esperado por el cálculo de los dos efectos mencionados anteriormente. Aún cuando la causa, no son totalmente claras; se atribuye este efecto a un proceso de relajación del ácido bórico, una sustancia que participa en el agua de mar por minutos.

Luego de haber revisado estos efectos se ha llegado a una expresión matemática que complementa a la relación 2.13, teniéndose que el coeficiente de absorción puede expresarse de la siguiente manera:

$$\alpha_M = \frac{1.71 \times 10^8 \left(\frac{4}{3}\mu_{AP} + \mu'_{AP}\right) f^2}{\delta_{AP} C^3_{AP}} + \left(\frac{SA' f_{RM} f^2}{f^2 + f^2_{RM}}\right)\left(1 - 1.23 \times 10^{-3} P_A\right) + \frac{A'' f_{RB} f^2}{f^2 + f^2_{RM}} \qquad 2.14$$

donde:

α_M : coeficiente de absorción (atenuación) del agua de mar

f_{RM}: frecuencia de relajación para $MgSO_4$ (depende de la temperatura)

f_{RB}: frecuencia de relajación para ácido bórico (depende de la temperatura)

A' : 2.03×10^{-5} dB/[(KHz)(ppm)(m)]

A'' : 1.2×10^{-4} dB/[(KHz)(m)]

S : salinidad (ppm) por peso

f : frecuencia (KHz)

Pa : presión manométrica debido a la columna de agua (atm)

La ecuación 2.14 nos permite trazar las gráficas de la figura 2.3. Para estas gráficas se ha considerado:

S = 35 ppm

T = 14°C a nivel del mar

f_{RM} = 111 KHz

f_{RB} = 1.23 KHz

Los efectos de relajación del sulfato de magnesio y el ácido bórico están dibujados en líneas punteadas. Las atenuaciones resultantes en agua pura y agua de mar (suma de las 3 componentes) son indicadas con línea contínua.

2.2.3.1 Difusión esférica y absorción.

Cuando se hacen mediciones de propagación en el mar, se encuentra que la difusión esférica junto con la absorción concuerdan, en forma razonable y muy aproximada, con los datos obtenidos bajo una gran variedad de condiciones. Es decir, dentro del usualmente amplio espectro de datos medidos, el asumir una difusión esférica con atenuación concuerda con las

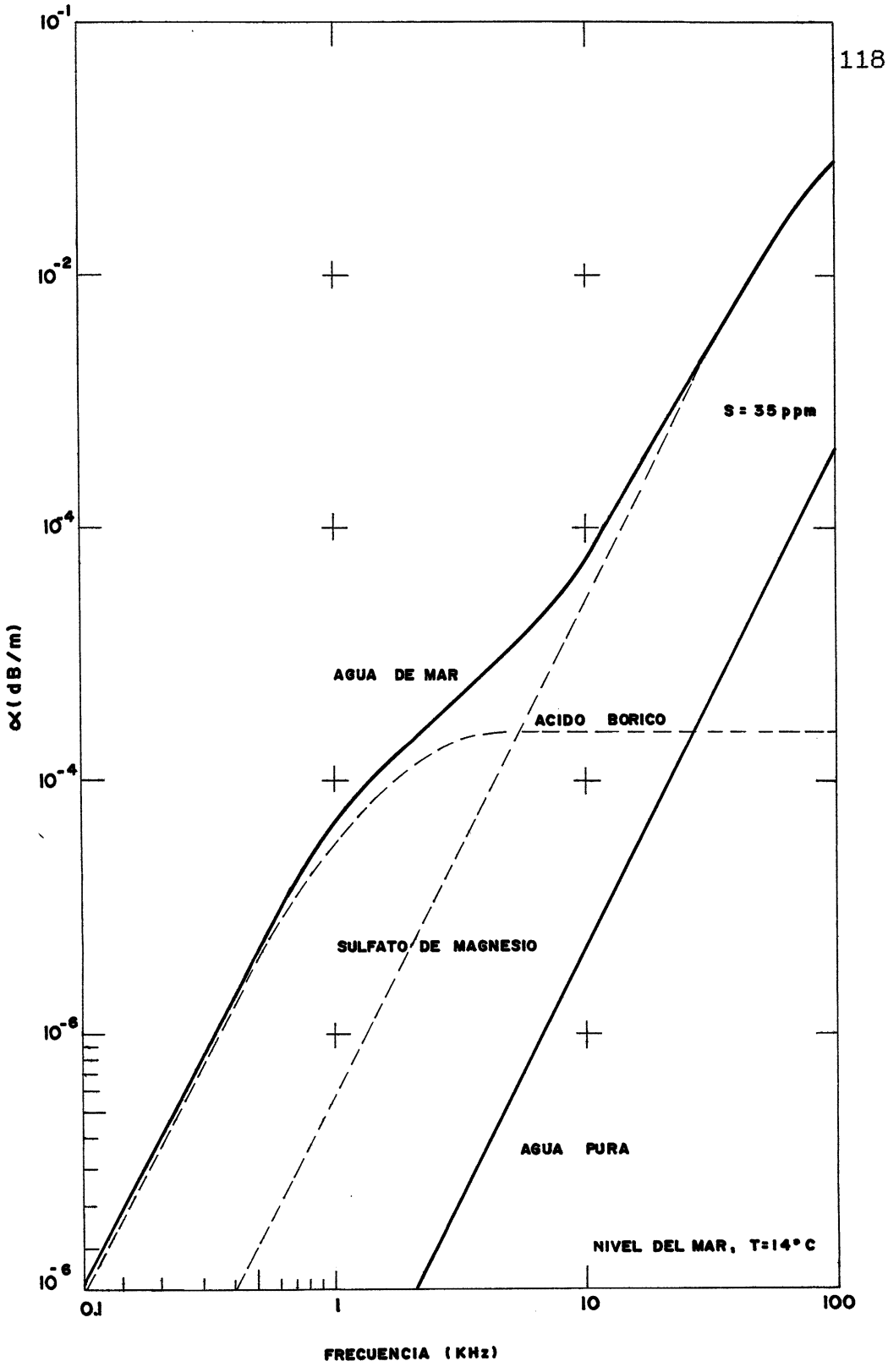


FIGURA 2.3 (a) Valor de atenuación debido a la absorción en agua pura: 0.1 KHz a 100 KHz

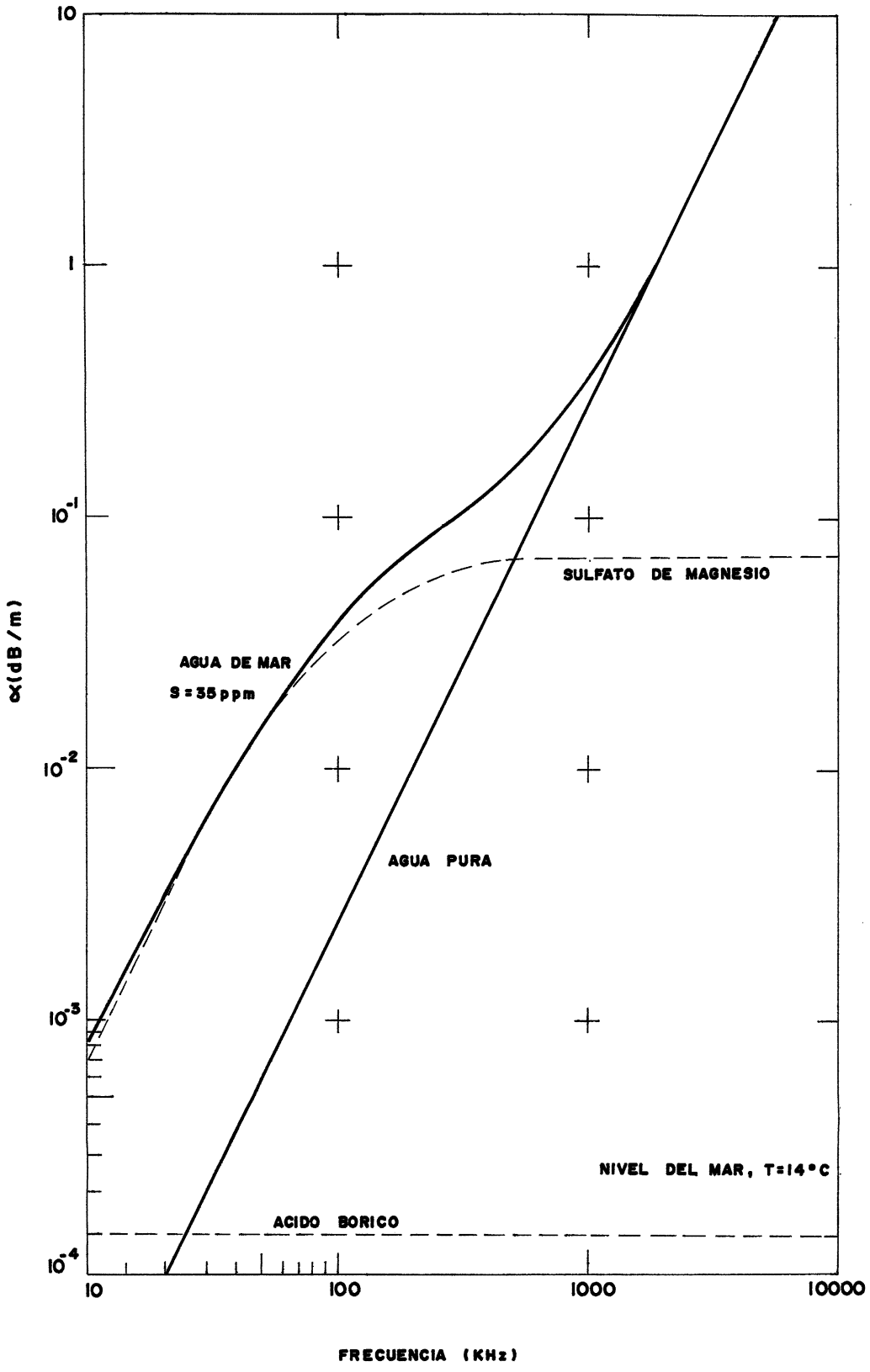


FIGURA 2.3 (b) Valor de atenuación debido a la absorción en agua pura: 10 KHz a 10000 KHz.

observaciones.

Cuando las condiciones específicas de propagación no son de interés y solamente una gruesa aproximación de las pérdidas de transmisión es requerida, entonces el método señalado anteriormente es una muy buena regla de trabajo, la cual puede ser expresada:

$$TL = 20 \log r + \alpha r \qquad 2.15$$

donde:

TL: pérdidas de transmisión [dB]

r : distancia [m]

α : coeficiente de absorción [dB/m]

2.2.4 Velocidad del sonido en el mar.

La velocidad del sonido en el mar es una variable oceanográfica que determina muchas de las peculiaridades de la transmisión del sonido en este medio. Varía con la profundidad, las estaciones del año, localización geográfica y hora en una posición fija.

Algunos investigadores han logrado, además de medir el intervalo de tiempo entre dos puntos en el agua, relacionar este parámetro con variables oceanográficas de fácil medición, tales como

temperatura, salinidad y profundidad. Una relación de este tipo puede establecerse en base a la teoría, usando ciertas propiedades básicas del agua tales como su volumen específico y la relación de calores específicos, o por mediciones de laboratorio de la velocidad el sonido sobre un cierto rango de temperaturas, salinidades y presiones. Según el método teórico se establecieron tablas de velocidad del sonido, sin embargo en base a métodos experimentales más modernos se establecieron mediciones directas de la velocidad del sonido con el uso de técnicas de laboratorio bajo condiciones cuidadosamente controladas.

Con ambos métodos se establecieron expresiones para la velocidad del sonido en términos de las tres cantidades básicas: temperatura, salinidad y presión.

La fórmula desarrollada por Wilson, en 1960, ha recibido una aceptación general como expresión empírica para la velocidad del sonido. Sin embargo, es una ecuación complicada que contiene muchos términos de alto orden y productos cruzados, por lo que es necesario el uso de un computador. Debido a esto, otro investigador llamado Lerry, propuso expresiones más simples que dan

resultado tan buenos como la de Wilson sobre un limitado rango de condiciones que existen en el mar, y que puede ser usada con la ayuda de una calculadora o incluso haciendo cálculos manuales. Esta fórmula simplificada, normalmente suficiente para trabajos prácticos, es:

$$C = 1492.9+3(t-10)-6x10^{-3}(t-10)^2-4x10^{-2}(t-18)^2+1.2(S-35)-10^{-2}(t-18)(S-35)+d/61 \quad 2.16$$

donde:

C: velocidad del sonido en metros por segundo (m/seg)

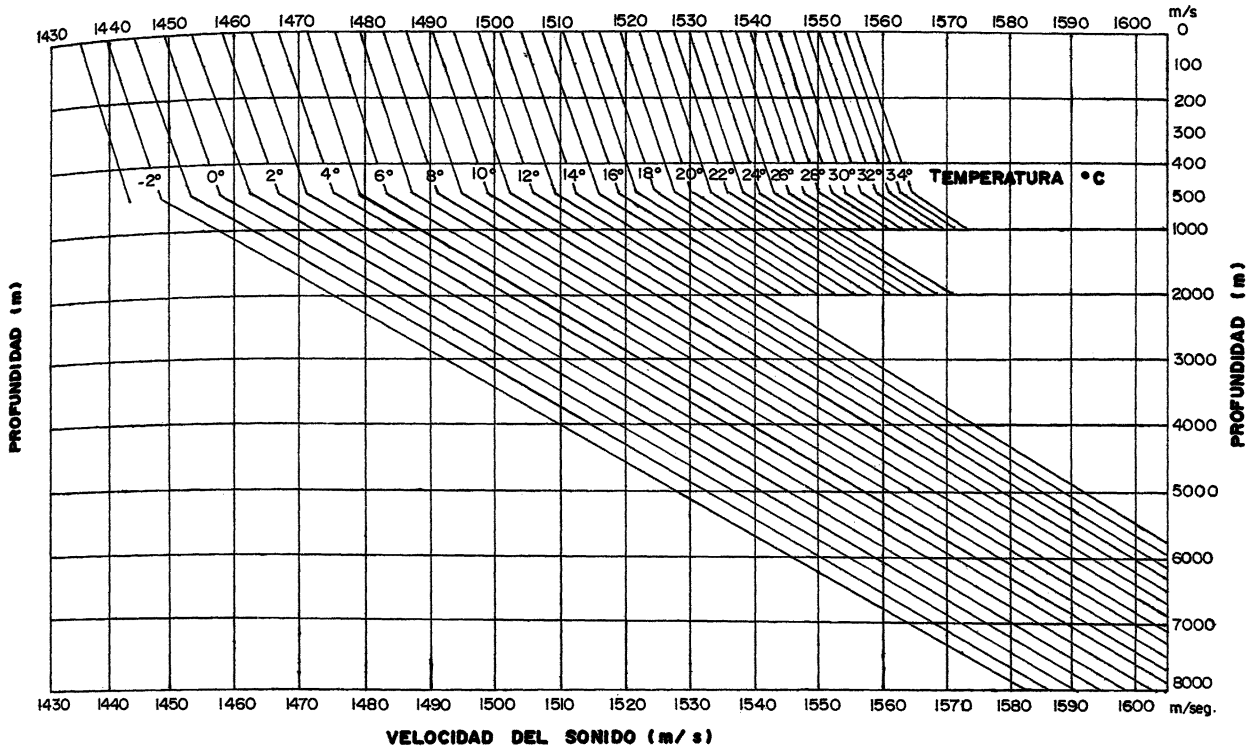
t: temperatura en grados centígrados (°C)

S: salinidad en partes por mil (ppm)

d: profundidad en metros (m)

Esta expresión se la considera exacta para t menores a 25°C y profundidades menores a 8000 metros, bajo estas condiciones su exactitud es de 0.1 m/seg. Como puede observarse de la fórmula 2.16, la velocidad del sonido en el mar se incrementa con la temperatura, salinidad y profundidad.

En mar abierto y profundo encontramos que la salinidad normalmente tiene un efecto muy pequeño sobre la velocidad. La gráfica de la figura 2.4 corresponde a valores de velocidad del sonido en función de la temperatura y profundidad con



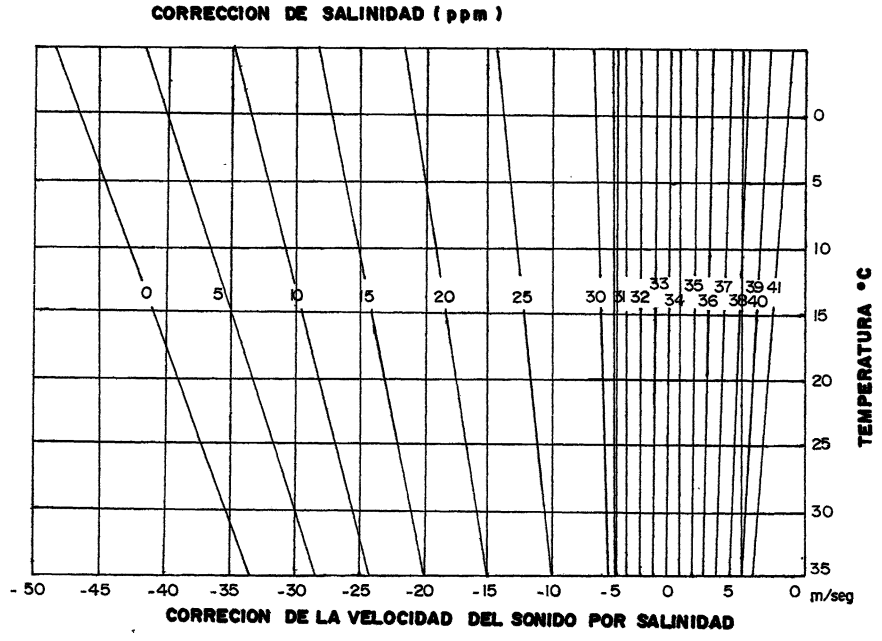


FIGURA 2.4 Velocidad del sonido como función de la profundidad y temperatura.

corrección para salinidades distintas a 35 ppm.

Existen dos dispositivos que son comúnmente usados para determinar la velocidad del sonido como función de la profundidad en el mar. Uno es el batitermógrafo, el cual mide la temperatura como función de la profundidad a la cual se va sumergiendo; el otro es el velocímetro, el cual mide directamente la velocidad del sonido en términos del tiempo que viaja el sonido en patrón constante prefijado.

El batitermógrafo deshechable (XBT) es un dispositivo para obtener la curva de temperatura sin tener que retornar la unidad de sensor. Consiste básicamente de un termistor como punta de prueba, el cual es expulsado desde la nave en movimiento y se sumerge a una velocidad constante y conocida después del lanzamiento. El termistor cambia su valor de resistencia conforme registra cambio de temperatura, obteniéndose una traza de resistencia, o temperatura, en función del tiempo, o profundidad, por medio de un grabador especial. Este sistema ha reemplazado, casi completamente, al antiguo batitermógrafo mecánico recuperable. Se ha desarrollado una variante del XBT para uso con aviones; este sistema incorpora un enlace vía radio similar a las sonoboyas. Esta versión para

aviones es conocida como el batitermógrafo aéreo AN/SSQ-36.

El velocímetro sonoro es un dispositivo acústico desarrollado originalmente por Greenspan y Tschiegg y fabricado por algunos manufacturadores. Este aparato mide el tiempo de viaje de pulsos cortos enviados desde un proyector a un receptor; su operación se basa en que el arribo de un pulso en el receptor dispara al pulso siguiente a ser enviado por el proyector; la frecuencia de repetición de los pulsos está determinada por la velocidad del sonido en el agua entre el proyector y el receptor.

Cuando la traza temperatura-profundidad del batitermógrafo es convertida a velocidad del sonido, se obtiene una traza velocidad-profundidad comparable a la del velocímetro. La similitud de las curvas velocidad-profundidad obtenidas con ambos equipos nos indica que la temperatura y profundidad son los factores dominantes de la velocidad del sonido bajo condiciones normales en mar abierto. Bajo ciertas condiciones, como en aguas muy costeras, los cambios en los valores de salinidad y materiales en suspensión, no sólo la temperatura, juegan una parte importante en la determinación del sonido bajo el agua.

2.2.5 Estructura de la velocidad en el mar.

Por "curva de velocidad" se entiende a la variación del sonido con la profundidad, o la función velocidad-profundidad. En el mar, la curva de velocidad se obtiene con la ayuda de los instrumentos descritos anteriormente o, por medio de observaciones oceanográficas de temperatura, salinidad y profundidad.

Una curva puede ser dividida en algunas capas, las cuales tienen diferentes características. Debajo de la superficie del mar está la "capa de superficie", en la cual la velocidad del sonido es susceptible a cambios diarios y locales de calentamiento, enfriamiento y acción del viento. La capa de superficie puede presentar una capa mezclada de agua isotérmica, la cual se forma por acción del viento. El sonido tiende a ser atrapado en esta capa mezclada. Bajo condiciones de calma y soleadas esta capa mezclada desaparece, y es reemplazada por una masa de agua en la que la temperatura disminuye con la profundidad. Debajo de la capa de superficie se encuentra la "termoclina estacional", la palabra "termoclina" denota una capa en la cual la temperatura cambia con la profundidad. La termoclina estacional está caracterizada por un gradiente, térmico o de

velocidad, negativo que varía según las estaciones del año. Cuando el agua de mar cercana a la superficie está caliente, la termoclina estacional es fuerte y bien definida; en cambio, cuando es fría, tiende a mezclarse y no es distinguible de la capa de superficie. Por debajo de la termoclina estacional está la "termoclina principal", esta capa es afectada ligeramente por cambios estacionales; en esta capa ocurre el mayor incremento de temperatura sobre las profundidades de agua fría. Debajo de la termoclina principal y extendiéndose hasta el fondo del mar esta la capa isotérmica de profundidad, la cual tiene una temperatura constante cercana a 4°C; en esta capa la velocidad del sonido se incrementa con la profundidad debido al efecto de la presión. Entre el gradiente negativo de velocidad de la termoclina principal y el gradiente positivo de la capa de profundidad, hay una velocidad mínima a la cual el sonido que viaja a grandes profundidades tiende a flexionarse por refracción. A grandes latitudes, la capa isotérmica de profundidad se extiende cerca a la superficie del mar.

La presencia y ancho de estas capas varían con la latitud, estación del año, hora del día y

condiciones metereológicas. Durante el transcurso del día tenemos que la superficie del agua de mar se calienta durante las horas del día con tiempo soleado y se enfría en la noche; estos cambios diurnos tienen un efecto profundo en la transmisión del sonido desde el sonar de una nave de superficie.

En aguas poco profundas de regiones costeras y en las plataformas continentales, la curva de velocidad tiende a ser irregular e impredecible, y es notoriamente influenciada por el calentamiento de la superficie o su enfriamiento, cambios de salinidad y corrientes de agua. La curva en aguas poco profundas es complicada debido a los cambios de salinidad causados por fuentes cercanas de agua dulce y contiene numerosos gradientes de capas de poca estabilidad temporal o espacial.

2.2.6 Teoría de propagación y trazado de haces.

La propagación del sonido en un medio elástico puede ser descrita matemáticamente por soluciones de la ecuación de la onda usando los límites de frontera apropiados y las condiciones del medio para un problema en particular. La ecuación de la onda es una ecuación de diferenciales

parciales relacionadas con la presión acústica p y las coordenadas x, y, z y el tiempo t; puede ser escrita como:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = C^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}\right) \qquad 2.17$$

donde:

c : velocidad del sonido (puede variar con las coordenadas)

p : presión acústica

x, y, z: coordenadas

t : tiempo

Hay dos aproximaciones teóricas a la solución de la ecuación de la onda. Una es la llamada "teoría del modo normal", en la cual la propagación es descrita en términos de sus funciones características llamadas modos normales, cada uno de los cuales es solución a la ecuación. Los modos normales son combinados en forma de suma para satisfacer las condiciones de frontera y las condiciones iniciales de interés. El resultado es una función matemática complicada la cual, aunque adecuada para cálculos con una computadora, necesita ciertos conocimientos en comparación con la teoría del haz, que es la distribución de la energía desde la fuente tanto en

espacio como en tiempo. Sin embargo, la teoría de modo normal es particularmente adecuada para la descripción de la propagación sonora en aguas poco profundas.

La otra forma de solución de la ecuación de la onda es "la teoría del haz", por lo que sus resultados y conclusiones son llamadas "acústica del haz". La esencia de esta teoría es:

a) El postulado del frente de ondas, conjuntamente con que la función de fase o tiempo de la solución es una constante, y,
b) La existencia de haces que describen en el espacio el sonido que proviene desde la fuente de donde es enviada.

Como su análogo en óptica, la acústica de haces tiene un considerable atractivo intuitivo y presenta un cuadro de la propagación en la forma de un "diagrama de haces". La teoría del haz tiene, sin embargo, ciertos incovenientes y no provee una buena solución bajo ciertas condiciones como:

a) El radio de curvatura de los haces, o,
b) Los cambios de amplitud en la presión que sean muy apreciables sobre la distancia de una longitud de onda.

Desde el punto de vista práctico, la teoría del haz está restringida a las frecuencias altas o longitudes de ondas cortas; es de poca utilidad para la predicción de la intensidad del sonido en zonas de poca profundidad o problemáticas.

A manera de resumen, tenemos la siguiente tabla de comparación entre estas dos formas teóricas de describir la propagación del sonido en el mar:

TABLA 2.1

COMPARACION DE METODOS DE SOLUCION DE ECUACION DE ONDA PLANA

TEORIA DE ONDA:	TEORIA DEL HAZ:
- Da una solución completamente formal.	- No maneja problemas de difracción, ej: sonido en zonas poco profundas.
- No maneja con facilidad condiciones reales de frontera.	- Haces son de fácil dibujo. La distribución sonora es visualizada fácilmente.
- Función fuente es fácilmente insertada.	- Es independiente de la fuente.
- Require un programa de computador, excepto en casos donde existe una respuesta analítica y presenta problemas de cálculo en casi todas las condiciones de frontera más simple.	- Haces pueden dibujarse a mano usando la ley de Snell. Sin embargo, un computador con un programa para trazado de haces es muy usado.
- Válido para todas las frecuencias, sobretodo práctica y útil para bajas frecuencias (pocos modos).	- Válida solamente a altas frecuencias si: a) radio de la curvatura del haz $> \lambda$ o b) velocidad el sonido no varía mucho en una λ, esto es $(V/V)/ Z \ll 1/\lambda$.

Uno de los resultados prácticos más importantes de la teoría del haz es la LEY DE SNELL, la cual describe la refracción de haces sonoros en un medio de velocidad variable. La ley de Snell establece que en un medio de velocidad constante, como se aprecia en la gráfica 2.5, los ángulos θ_1, θ_2, ... que un haz forma en las capas de frontera están relacionados a la velocidad del

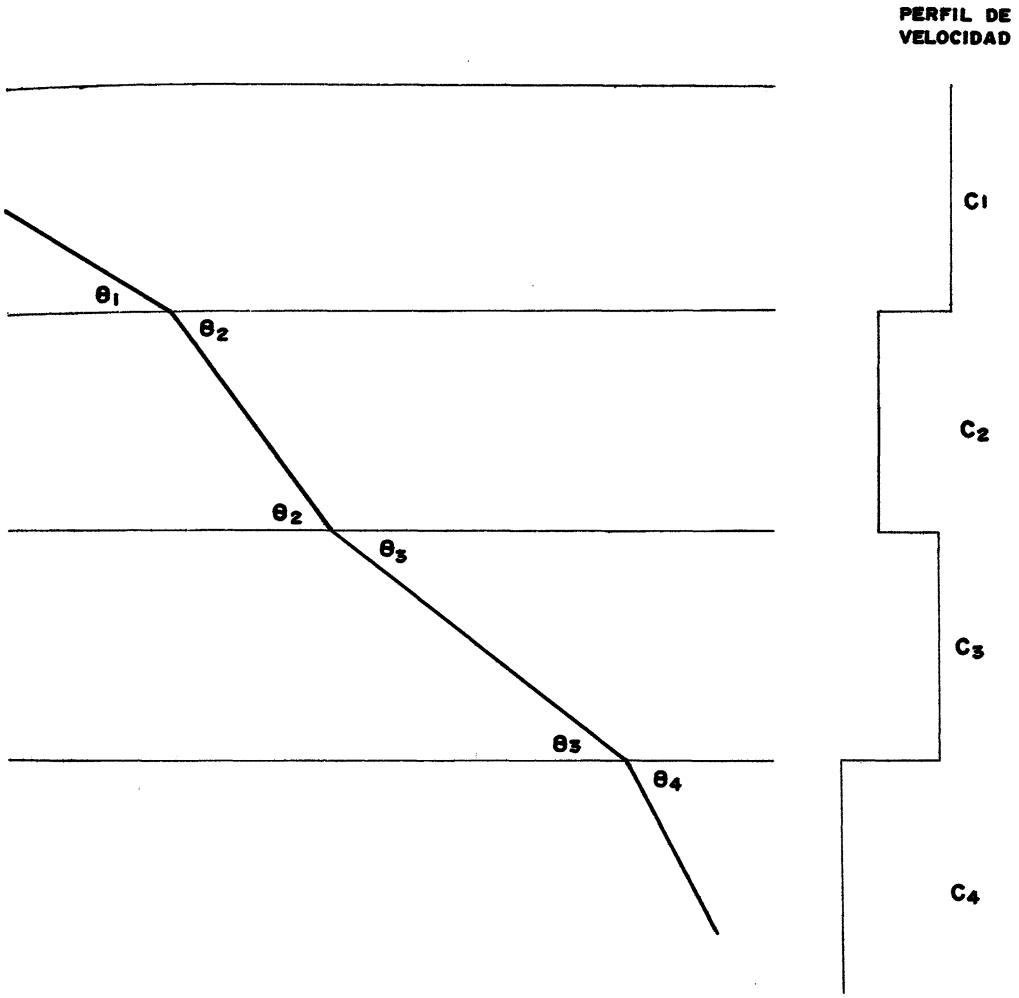


FIGURA 2.5 Refracción en un medio estratificado.

sonido C_1, C_2, ... de las capas por:

$$\frac{\text{Cos } \theta_1}{C_1} = \frac{\text{Cos } \theta_2}{C_2} = \frac{\text{Cos } \theta_3}{C_3} = ... = a \qquad 2.18$$

Donde a es una constante para cualquiera de los haces. En esta expresión la constante del haz es el recíproco de la velocidad del sonido en la capa en la cual el haz llega a ser horizontal, esto es, donde cos θ = 1. Esta expresión es la base del cálculo de haces usado por la mayoría de computadores analógicos y digitales, ya que permite a un haz en particular ser trazado siguiéndolo a través de distintas capas sucesivas en las cuales la curva de velocidad ha sido dividida. En un medio estatificado que tiene capas de velocidad constante, los haces consisten de una serie de segmentos de línea recta, juntados por efecto de la ley de Snell.

En un medio en el cual la velocidad del sonido cambia linealmente con la profundidad, los rayos sonoros pueden mostrarse como arcos de círculos, esto es, que tiene una curvatura de radio constante. En la gráfica 2.6.a, consideramos un arco de un círculo de radio R que conecta dos puntos P_1 y P_2, donde la velocidad del sonido es C_1 y C_2. Este círculo es horizontal a una profundidad

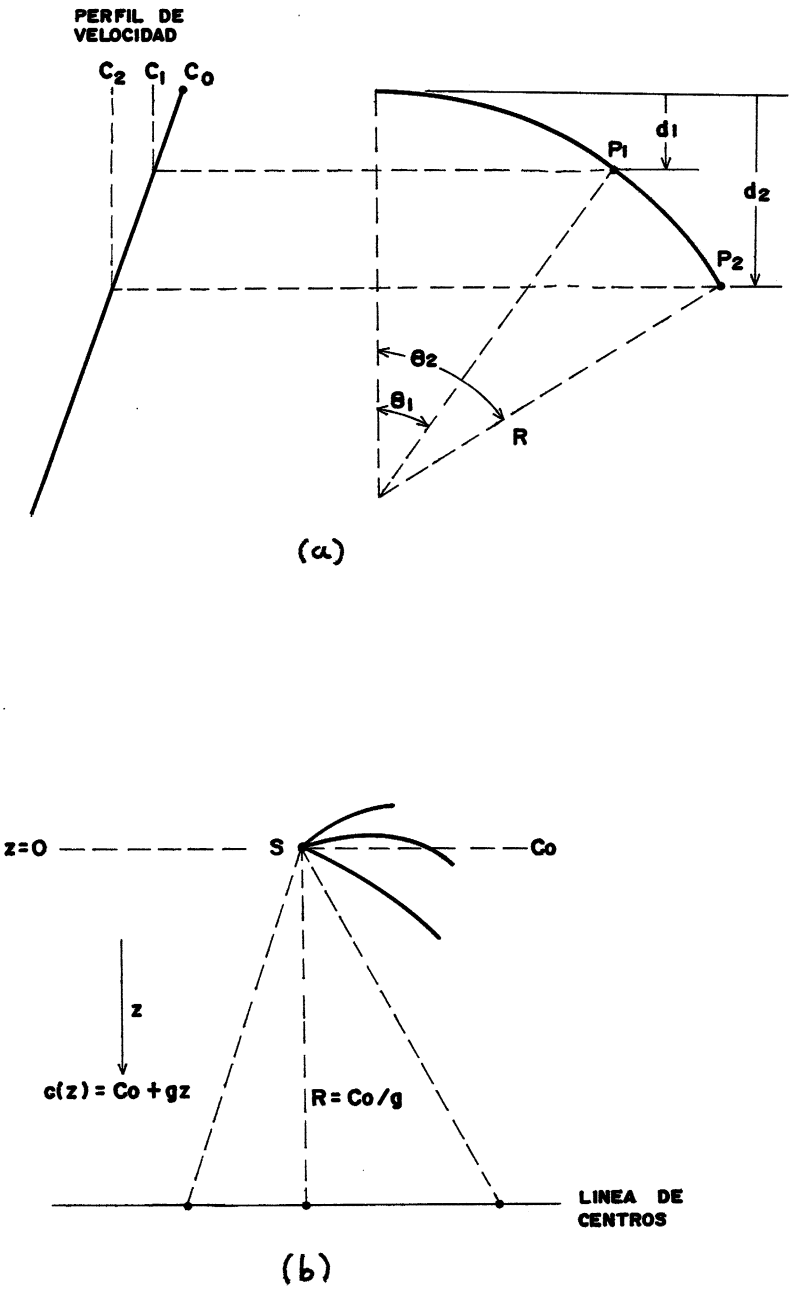


FIGURA 2.6 Arcos de círculos en un medio en el cual la velocidad es una función lineal de profundidad.

donde la velocidad es C_o. observando esta gráfica tenemos que:

$$d_2 - d_1 = R \cos \theta_1 - R \cos \theta_2 \qquad (a)$$

ya que el gradiente de velocidad es lineal,

$$C_1 = C_o + gd_1$$

$$C_2 = C_o + gd_2$$

y que:

$$d_2 - d_1 = \frac{C_2 - C_1}{g} \qquad (b)$$

El circuito entre P_1 y P_2 será un haz si la ley de Snell es satisfecha. Esto requiere que:

$$\cos \theta_1 = \frac{C_1}{C_o} \qquad (c)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{C_2}{C_o} \qquad (d)$$

Eliminando $d_2 - d_1$, $\cos \theta_1$ y $\cos \theta_2$ de las ecuaciones (a) a (d), encontramos que el círculo dibujado entre P_1 y P_2 será un haz si, y sólo si:

$$R = \frac{C_o}{g}$$

Ya que P_1 y P_2 fueron seleccionados arbitrariamente, se concluye que todos los rangos en el

medio serán arcos de círculos.

Como al observar en la figura 2.6.b, los centros de curvatura de los rayos que salen de la fuente S, en la que la velocidad es C_o, prmanecen en una línea horizontal a una distancia C_o/g sobre o debajo de la fuente, dependiendo de la dirección en la cual la velocidad disminuye con la distancia. En el mar, la distancia C_o/g normalmente es muy grande. Para agua isotérmica, tal como en la capa mezclada o en la capa isotérmica de profundidad, en la cual la velocidad se incrementa linealmente con la profundidad, la línea de centros permanece a una distancia sobre la fuente igual a:

$$R = \frac{C_o}{g} = \frac{1{,}524 \text{ m/s}}{0.017 \text{ s}^{-1}} = 89{,}647 \text{ m.}$$

$$R \approx 48.4 \text{ millas náuticas}$$

Las pérdidas de transmisión entre la fuente y cualquier punto en un diagrama de haces puede ser rápidamente encontrada en términos del espaciamiento vertical entre haces que son adyacentes a la fuente y pasa a través de la vecindad del punto distante. La gráfica 2.7 muestra un par de haces separados por un pequeño ángulo vertical θ que sale desde la fuente O a un ángulo θ_1 +

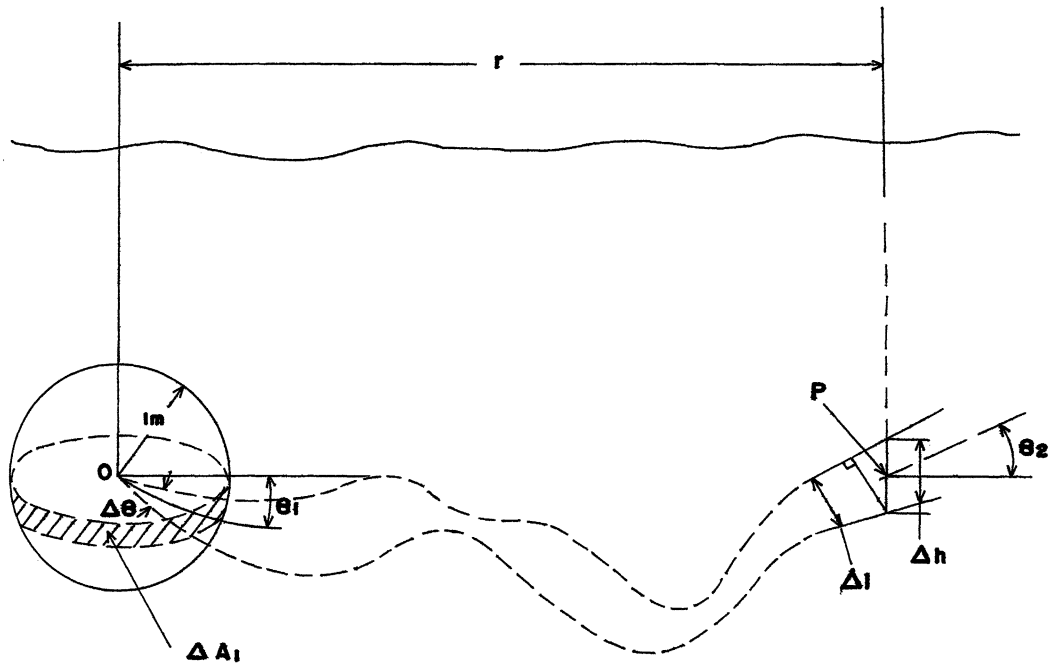


FIGURA 2.7 Pérdidas de transmisión calculadas del espaciamiento de haces en un diagrama de haces.

$\theta/2$ y $\theta_1 - \theta/2$ con la horizontal. Después de viajar a través del mar por cualquier par de patrones refractados, aunque complejos, como se muestra esquemáticamente por las curvas troceadas, éstas aparecen en la vencidad del punto de campo P, a un ángulo θ_2 con la horizontal, con una separación vertical h.

Dentro del ángulo θ, la fuente en O radia una cierta cantidad de potencia P; según una propiedad fundamental de la acústica de haces, esta misma cantidad de potencia debería aparecer dentro de estos mismos haces en el punto P. Esto equivale a decir que la energía o potencia no se "pierde" -ya sea por dispersión o difracción- del tubo formado por el par de haces. La intensidad a 1 m de la fuente en la dirección θ_1, es:

$$I_1 = \frac{P}{A_1}$$

Donde A_1 es el área en una esfera de 1 metro delimitada por un par de haces. En P la intensidad es:

$$I_2 = \frac{P}{A_2}$$

Donde A_2 es el área delimitada por un par de haces en la cercanía de P, tomada normal a los

haces. Por tanto las pérdidas de trasnmisión en P es:

$$TL = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log \frac{A_2}{A_1} \qquad (a)$$

Sabiendo:

$$A_1 = 2 \pi \cos \theta_1 \blacktriangle\theta \qquad (b)$$

$$A_2 = 2 \pi r \blacktriangle l = 2 \pi r \blacktriangle h \cos \theta_1 \qquad (c)$$

donde:

r = distancia horizontal desde OaP

$\blacktriangle l$ = distancia perpendicular entre los haces en P.

Tenemos que las pérdidas de transmisión son conforme (a), (b) y (c).

$$TL = 10 \log \frac{r \blacktriangle h}{\blacktriangle\theta} \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} \qquad (d)$$

Pero, según la ley de Snell en medio estratificado horizontalmente:

$$\frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} = \frac{C_2}{C_1} \qquad (e)$$

donde: C_2 = velocidad del sonido en P

C_1 = velocidad en 0

Según (d) y (e) tenemos:

$$TL = 10 \log \frac{r \blacktriangle h}{\blacktriangle \theta} \frac{C_2}{C_1} \qquad 2.19$$

Donde r, debe tomarse en metros; y $\blacktriangle\theta$ en radianes. Como información hacemos notar que en el mar, el término C_2/C_1 es muy cercano a 1, de tal forma que puede ser despreciado.

Para patrones de líneas contínuas, la expresión 2.19 puede reducirse a:

$$TL = 10 \log r^2 \qquad 2.20$$

La cual equivale a la distribución esférica.

La exactitud de este método para hallar TL de un diagrama de haces -considerando las limitaciones de la acústica de haces- depende de la densidad o número de haces trazados en el diagrama, esto es, del tamaño de los intervalos de los haces $\blacktriangle\theta$. El método, conforme con las generalidades de la acústica de haces, falla en la vecindad inmediata de puntos problemáticos, donde la teoría de onda es requerida para tener una estimación de la intensidad.

2.2.7 La superficie del mar.

La superficie del mar es reflectora y dispersadora del sonido y tiene un efecto profundo sobre la

propagación en la mayor parte de las aplicaciones del sonido bajo el agua donde la fuente o receptor permanece a poca profundidad.

Si la superficie del mar fuera perfectamente suave, formaría un reflector casi perfecto del sonido. La intensidad del sonido reflejada desde una tranquila superficie del mar sería cercanamente igual a cero dB.

Cuando el mar está agitado, y esto es lo más normal, las pérdidas de reflexión no son mucho mayores a cero. Un criterio para determinar la agitación o tranquilidad de una superficie está dada por el parámetro de Rayleigh, definido como $R = kH\text{sen}\theta$, donde k es el número de onda $2\pi/\lambda$, H es la "altura de onda" en valor rms (entre 2 picos), y θ es el ángulo de rozamiento. Cuando $R \ll 1$, la superficie es principalmente una reflectora y produce una reflexión coherente a un ángulo igual al ángulo de incidencia. Cuando $R \gg 1$, la superficie actua como un dispersor, enviando energía incoherente en todas las direcciones. Cuando ciertas asunciones teóricas son hechas, la amplitud del coeficiente de reflexión μ de una superficie irregular (definida como la relación de la amplitud reflejada o coherente del retorno con la amplitud incidente) puede ser dada

por la simple expresión $\mu = e^{-R}$.

Cuando la superficie está en movimiento, lo cual siempre es cierto en el mar, el movimiento vertical de las ondas que se superponen sobre sí mismas, es decir, la frecuencia del sonido incidente sobre sí misma. La superficie en movimiento produce lóbulos laterales superiores e inferiores en el espectro del sonido reflejado que son los duplicados del espectro del movimiento de superficie. Este efecto, aunque pequeño, tiene gran significado en comunicaciones hidroacústicas de banda estrecha.

Fluctuaciones grandes y rápidas en amplitud o intensidad son producidas por reflexión en al superficie del mar, tales fluctuaciones en amplitud pueden ser atribuidas a reflexiones de facetas de onda en la superficie del mar que presenta un cambio constante en tamaño en inclinación al sonido incidente y reflejado.

Cuando la superficie del mar no está muy agitada, crea un patrón de interferencia en el campo sonoro bajo el agua. Este patrón es causado por interferencias constructivas y destructivas entre el sonido directo y el reflejado por la superficie, y es llamado el espejo de Lloyd, o efecto de

intereferencia imagen. Aunque es de interés teórico, los patrones de este efecto no siempre se observan en el mar.

Cuando existe un gradiente negativo justo debajo de la superficie del mar, una sombra es producida por la superficie en el campo sonoro cercano a la fuente sonora. Una zona de oscuridad es aquella en la cual la intensidad de la fuente es muy baja.

2.2.8 El fondo del mar.

El fondo del mar es una frontera reflectora y dispersora, que tiene características similares a la superficie del mar. Sin embargo, sus efectos son más complicados debido a su diversidad y variadas capas de composición. Un ejemplo de este comportamiento similar es el hecho que el fondo del mar origina una sombra, o produce zonas de oscuridad en las masas de agua sobre las profundidades del mar. Hay dos razones por la que la reflexión del sonido desde el fondo del mar es mucho más compleja que la de la superficie del mar. Primero, el fondo es más variable en sus propiedades acústicas debido a que varía en composición desde la roca dura al lodo suave. Segundo, dependiendo de las capas, por la densi-

dad y velocidad del sonido que cambia gradual o abruptamente con la profundidad. Por estas razones, las pérdidas de reflexión del fondo marino es menos fácil de predecir que la de la superficie del mar.

Todos los materiales del fondo tienen ciertas características absortivas, se han hecho muchas mediciones de la atenuación sonora en varios sedimentos, de aquí se ha obtenido un coeficiente de atenuación de ondas compresionales en sedimentos marinos que está relacionada a la frecuencia por

$$\alpha = Kf^n \qquad 2.21$$

donde:

α : coeficiente de atenuación [dB/m]

f : frecuencia [KHz]

K, n: constante empíricas.

En las mediciones se ha encontrado que n es esencialmente unitaria para mediciones con arenas, arcillas, limos y similares; K depende de la porosidad de los materiales.

2.2.9 Fluctuaciones del sonido transmitido.

Cuando el ruido desde un punto distante en el mar es observado, unas de sus características más

obvias es que fluctua, o cambia en el tiempo. Se observan cambios rápidos y a veces violentas de amplitud y fase, especialmente con señales sinusoidales o de banda estrecha.

Las fluctuaciones de amplitud causan detecciones erráticas de objetivos de sonar, estos son detectados cuando la señal es fuerte y perdidos cuando es débil. Por lo errático, fue motivo de estudio el comportamiento de los ecos del sonar. Por regla general, puede decirse que las fluctuaciones son causadas por inhomogeneidades móviles en el mar. El movimiento puede ser de la plataforma del sonar y su objetivo, o puede estar asociado con el mar mismo, como el movimiento de las olas. Podemos discutir las fluctuaciones bajo ciertas categorías, dependiendo de las circunstancias y de las propiedades y causas de las fluctuación.

El movimiento de un sonar y su plataforma es una causa obvia de fluctuación. Este movimiento causa en el haz direccional del sonar un comportamiento errático en el espacio en relación al objetivo y los resultados en cambios de amplitud de la señal del objetivo. Debido a ésto, se ha demostrado la necesidad de una estabilización mecánica o electrónica de los sonares activos en

las naves de superficie.

El mar no es uniforme, pues contiene inhomogeneidades de temperartura (índice de refracción) que están en un estado de movimiento turbulento. Esta microestructura de temperatura tiene un tamaño termal y espacial. Debido a esta característica y luego de ciertas experiencias se ha demostrado que para la transmisión a altas frecuencias se tienen alcances cortos.

En un ambiente multipatrón, donde la transmisión ocurre por diversos patrones de transmisión, el movimiento en el rango de la fuente o del receptor, o de ambos, actua cambiando el patrón de interferencia del multipatrón y produce fluctuaciones en la señal recibida. Se estima que ésta es la causa de picos y caídas que van en períodos desde 1 minuto a una hora y que han sido observados en la transmisión de señales de baja frecuencia; por lo que luego de ciertas experiencias se ha demostrado que para transmisión a bajas frecuencias se tienen largos alcance.

2.2.10 Canales de propagación en el mar.

El sonido siempre viaja a largas distancias en el mar en la forma de ductos de propagación. Cuando el sonido viaja en un ducto, o canal sonoro, es

para prevenir de la distribución en todas las direcciones y permanece confinado entre las fronteras del canal sonoro. Un cierto número de clases de ductos de común aparición en el mar son: el canal sonoro de la capa mezclada, el canal sonoro de profundidad y canal sonoro de agua poco profunda.

Siempre hay más de un patrón de propagación entre una fuente y un receptor en el mar. Rara vez un solo patrón será el dominante y las pérdidas de transmisión correspondiente serán mínimas comparadas con otros posibles patrones. Pero bajo algunas condiciones, la propagación multipatrón ocurre y más de un patrón acústico de pérdidas comparables se presentan entre los dos puntos, dependiendo de la profundidad tanto de la fuente como del receptor y de las condiciones acústicas del mar y sus fronteras.

Debido a la compleja naturaleza de la propagación del sonido en el mar, la selección de un valor de pérdida de transmisión, razonable, para uso en problemas prácticos es un problema crítico. Obviamente, de todos los parámetros del sonar, el de las pérdidas de transmisión presenta la mayor dificultad en cuando a establecerla cuantitativamente, ya que la relación de un valor numérico

debe resultar de una clara compresión de las característica de transmisión del medio. Además otras características, como la distorsión, fluctuación y coherencia de las señales transmitidas a través del mar, son a veces de importancia comparable a las mismas pérdidas de transmisión. En resumen, los antojos de la propagación sonora en el mar son tales que a pesar de que hay grandes estudios, aún presentan problemas formidables, de interés para las aplicaciones del sonar como para la investigación científica.

2.3 INFORMACION BASICA DEL RUIDO DEL MAR: NIVEL DE RUIDO DEL AMBIENTE.

2.3.1 Introducción.

En forma sencilla, el ruido del ambiente puede decirse que es el ruido del mar mismo. Esta es la parte del ruido básico total observado con un hidrófono no-direccional que no es debido al hidrófono, el cual se conoce como "ruido propio". En el contexto presente, el ruido ambiente es el que rodea al hidrófono en todas las direcciones, aunque en forma desigual y de manera no isotrópica. El nivel de ruido del ambiente, como parámetro del sonar, es la intensidad, en db, medida en el ambiente básico con un hidrófono no-

direccional y referido a la intensidad de una onda plana que tiene un valor rms de presión de 1μPa. Aunque es medido en diferentes bandas de frecuencia, los niveles de ambiente son siempre reducidos a una banda de frecuencia de 1Hz y son llamados niveles del espectro del ruido del ambiente.

El ambiente básico del mar a veces presenta problemas de difícil medición. Para una medición válida del ruido del ambiente, todas las fuentes posibles de ruido propio deben ser eliminadas, o por lo menos reducida a una contribución insignificante del nivel del ruido total. Las fuentes de ruido propio, tales como rasgueo de cables, golpe de las olas contra el cable del hidrófono, transmisión del zumbido de 60 Hz y algunas veces ciertos animales marinos rozando el hidrófono. Además hay fuentes de ruido distante identificables, como barcos, que no contribuyen al ruido básico. Así, el ruido ambiente es el ruido básico residual en ausencia de fuentes individuales identificables, que pueden ser considerado como el ambiente de ruido natural del hidrófono.

2.3.2 Fuentes del ruido del ambiente en el mar.

Los estudios del ruido ambiente hechos en años

recientes, han mejorado y ampliado nuestro conocimiento acerca de las características y fuentes del ruido del ambiente del mar. Las mediciones se han hecho sobre un amplio rango de frecuencias, mostrando diferentes características a distintas frecuencias, con diferente pendiente espectral y comportamiento diferente en condiciones variables, como velocidad del viento, en distintas partes del espectro. Como consecuencia se deduce que el ruido proviene de varias fuentes. En cualquier región del espectro, uno o más de estas parecen ser dominantes sobre las otras; en esta parte presentaremos las principales fuentes de ruido, como se las presenta actualmente y serán brevemente descritas.

La mayoría de los hidrófonos son sensitivos a la presión ambiente, sea de origen acústico o no. Las **corrientes y olas** causan cambios en la presión hidroestática de relativamente gran amplitud en la parte de baja frecuencia del espectro. Las corrientes, por ejemplo, crean componentes de línea o tonos. Afortunadamente, la magnitud de estos cambios de presión permanece fuera y por debajo de las frecuencias de interés en el sonido bajo el agua y están restringidas a regiones estrechas del espectro.

Un efecto interesante de las corrientes resulta del hecho que las corrientes de marea producen cambios en la temperatura del agua. Ya que los transductores piezoeléctricos son también piroeléctricos, producen un cambio en el voltaje cuando cambia la temperatura, las corrientes de marea puedem causar vibraciones de flujo inducidas al transductor y su soporte. Por estas razones y otras, la respuesta de un transductor a las corrientes cambiantes es compleja y díficil de predecir.

Las olas de superficie son también fuente de cambios de presión hidrostática. Sin embargo, tienen una amplitud de presión que cae rápidamente con el incremento de la profundidad y con disminución de la logitud de onda de las olas de superficie. En aguas poco profundas, la profundidad puede no ser lo suficiente para eliminar completamente los efectos de la presión.

Debido a que la tierra está en un estado constante de actividad sísmica, es probablemente una causa importante del ruido de baja frecuencia en el mar. Debemos recordar que una fuerte y contínua forma sísmica son los microsismos; además fuentes sísmicas intermitentes como terremotos y erupciones volcánicas distantes son sin duda

transientes contribuyentes al medio en baja frecuencia en la profundidad del mar.

El rol de la turbulencia océanica como fuente de ruido ha sido considerado en la forma de corrientes de agua aleatorias e irregulares de pequeña o gran escala, capaz de crear ruido básico en algunas formas. Primero, tales corrientes pueden agitar el hidrófono y su montaje y producir así una forma de ruido propio, antes que parte del ruido ambiente del mar. Segundo, los cambios de presión asociados con la turbulencia pueden ser radiados a distancia, y aparecer como parte del medio en lugares distantes de la turbulencia misma, aunque este ruido radiado no tiene gran importancia debido a su origen y su atenuación por la distancia. El tercero, el más importante, efecto acústico de la turbulencia en los cambios turbulentos de presión creados dentro de la región turbulenta. La magnitud de tales presiones si pueden estimarse. Como conclusión podemos deducir que, aunque no hay evidencia experimental, la turbulencia de las corrientes de profundidad es causa de ruido de baja frecuencia.

Varias evidencias sugieren que el tráfico distante de naves es una fuente principal de ruidos alrededor de los 100 Hz. Primero, porque el

ruido ambiente llega al hidrófono preferencialmente en forma horizontal a frecuencias cercanas a 100 Hz y son independientes del viento y el clima. Finalmente, las mediciones del ruido ambiente en áreas con gran actividad de nave son mayores y menos dependiente del viento a frecuencias entre 50 y 500 Hz que aquellas tomadas en áreas con escasez de barcos.

A mayores frecuencias, el ruido ambiente es gobernado por el estado de la superficie del mar, esto es las olas de superficie. Durante la Segunda Guerra Mundial se hicieron muchas observaciones del ruido ambiente en aguas de mediana profundidad, entre frecuencias de 500 Hz y 25 KHz, indicando una conexión directa entre el estado del mar o la fuerza del viento y el nivel de ruido ambiente. Basado en estas observaciones, fue obtenido el espectro de Knudsen, teniendo al estado del mar o fuerza del viento como parámetro. Datos posteriores indicaron una mejor correlación del ruido con la velocidad del viento que con el estado del mar, probablemente debido a la dificultad de estimación del último. El nivel del ruido se ha mostrado correlacionado con la velocidad local del viento en mediciones con hidrófono. Aunque es claro que la superficie del

mar debe generar la mayor porción del ruido de ambiente en este rango de frecuencia, el proceso por el cual ocurre esto es todavía incierto.

Algunos procesos se han dado como explicación. Sin embargo, el más obvio de estos son los "rompimiento de palomillas", el cual produce un ruido cuando ocurre un rompimiento. Sin embargo, este proceso no es la única fuente. Otra fuente posible de ruido es el flujo de ruido producido por el viento que sopla fuerte sobre la superficie del mar. Así ocurren presiones turbulentas que son transmitidas al agua y aparecen como ruido en el sensor debajo de la superficie.

Otra posibilidad es la cavitación, o el colapso de burbujas de aire formadas por acción de olas turbulentas de aguas de superficie casi saturadas de aire. Tales burbujas aumentan por la difusión rectificada y, que luego de alcanzar un tamaño crítico, se colapsan repentinamente y generan un pulso corto de sonido. Este proceso ha sido examinado teóricamente y experimentalmente.

Todavía otra posibilidad de proceso del ruido producido es la acción de generación de olas, por el viento sobre la superficie del mar. Ya que el viento es siempre turbulento en la superficie del

mar. Debido a que el viento siempre es turbulento cercano a la superficie del mar, genera ondas de diferentes longitudes de onda que viajan a lo largo de la superficie con una velocidad que depende de la longitud de onda.

En 1952 se mostró que el ruido térmico de las moléculas del mar marcan un límite en la sensibilidad del hidrófono a altas frecuencias. Este ruido es el mismo que el ruido de Nyquest desarrollado por la resistencia de radiación del hidrófono en el agua. El nivel de espectro de esta clase de acústica básica en hidrófonos bajo el agua alcanza, con la frecuencia, a un valor de 6 dB/octava y establece un umbral en la presión mínima observable en el mar.

BIBLIOTE

2.3.3 Ruido ambiente en agua poco profunda.

En contraste con los relativamente bien definidos niveles del ruido ambiente en aguas de profundidad media, los niveles del ambiente en aguas costeras y en bahías y puertos son objeto de grandes variaciones. En estos sitios, las fuentes de ruido de agua poco profunda son altamente variables, tanto en tiempo como en lugar.

A una frecuencia dada en agua poco profunda el ruido básico es una mezcla de tres diferentes

tipos de ruido:

a) Ruido industrial y de barcos,

b) Ruido del viento,

c) Ruido biológico

En un tiempo y lugar en particular, la "mezcla" de estas fuentes determinará el nivel del ruido, y, porque la mezcla es variable con el tiempo, los niveles de ruido existente presentarán una considerable variabilidad en tiempo y lugar. Como consecuencia, sólo una estimación gruesa puede darse de estos niveles.

Bahías y puertos: además de las fuentes que contribuyen al ruido en agua profunda, hay otras fuentes de ruido en estos sitios. En estos lugares los ruidos hechos por el hombre debido a la actividad industrial, los producidos por la vida marina y la turbulencia de las corrientes de marea crean un ambiente ruidoso.

Aguas costeras: en aguas costeras, como las plataformas continentales, la velocidad del viento aparece de nuevo para determinar el nivel del ruido sobre un amplio rango de frecuencia. Los niveles de ruido son referidos a condiciones "quietas", esto es, sin ruidos de naves ni ruidos biológicos. Los niveles medidos aparentemente

dependen solamente de la velocidad del viento, y son independientes de la profundidad del hidrófono, profundidad del agua y otras características del lugar. A bajas frecuencias y a bajas velocidades del viento, aguas de poca profundidad pueden ser apreciablemente más quietas que agua de profundidad. Esto es debido al efecto de apantallamiento de condiciones de propagación pobre en ruidos originados a grandes distancias. Por otro lado, cuando existen ruidos de naves o hechos por el hombre, o cuando organismos biológicos contribuyen al ruido básico, el agua poca profunda es un medio ruidoso y excesivamente variable para la mayoría de operaciones del sonar.

2.3.4 Fuentes intermitentes de ruido ambiente.

Por fuentes intermitentes de ruido se entiende aquellas que no persisten sobre períodos de horas o días, sino que son transientes. Aunque algunas formas de ruido biológico no pueden ser llamadas intermitentes en ciertos lugares sino que son más bien partes características y estables del ambiente básico, estos ruidos son incluídos en esta categoría de ruidos intermitentes por conveniencia. Entre estas fuentes intermitentes tenemos:

Sonidos biológicos: los sonidos producidos por organismos biológicos en el mar son muchos y variados, y han sido bastante estudiados. Aunque estos sonidos son diversos, se han establecido tres grupos de animales marinos que producen sonido: cierta clase de crustáceos, cierto tipo de peces verdaderos y los mamíferos marinos (ballenas, delfines). Los crustáceos producen un ruido de espectro amplio que va desde los 500 Hz a 20 KHz; los peces lo producen por la contracción de los músculos relacionados con la vejiga natatoria; los mamíferos crean ruido expulsando aire a través de la laringe.

Lluvia: la precipitación lluviosa incrementa los niveles de ruido del ambiente, dependiendo de la cantidad de lluvia que caiga y el área donde ésta se produzca.

Pulsos de veinte ciclos: algunos peculiares sonidos transientes son escuchados con hidrófonos de baja frecuencia, y han recibido el nombre de pulsos de 20 ciclos debido a que consisten de trenes de pulsos de 20 Hz de casi 1 segundo de duración y que permenecen por algunos minutos. Se creen que son producidos por algún tipo de ballena al desplazarse, aunque su mecanismo de producción sonora de tan gran intensidad acústica

y baja frecuencia es incierto.

Explosiones: el incremento de explosivos para exploración sísmica fuera de la costa y por razones de investigación causan sonidos explosivos distantes. Constituye otro ejemplo de como la actividad humana afecta al medio marino.

2.3.5 Resumen.

Las características del espectro del ruido ambiente en el mar indican la existencia de diferentes causas del ruido en distintas porciones del espectro. Incluye: corrientes, olas y actividad sísmica en la parte de baja frecuencia, tráfico naviero distante y agitada superficie del mar a frecuencias moderadas y movimiento termomolecular a muy alta frecuencia, esto en aguas de mediana profundidad e incluso pueden determinarse con cierto grado de estimación, en contraste al ruido producido en bahías y puertos y localizaciones costeras que son casi impredecibles. Las fuentes intermitentes incluyen: sonidos biológicos, lluvias y el misterioso tren de pulsos de 20 ciclos. De las varias fuentes no intermitentes de ruido en el mar, el tráfico de naves y el viento dominan la mayor parte del espectro, por lo que resumimos sus características en la

siguiente tabla:

TABLA 2.2

CARACTERISTICAS DEL RUIDO AMBIENTE

RUIDO DE TRAFICO DE NAVES	RUIDO DEL VIENTO
- Originado en tráfico distantes de naves	- Originado localmente en la superficie del mar
- Dominante a bajas frecuencias en agua profunda	- Dominante a alta frecuencia
- Viaja en patrones reflejados y refractados	- Viaja en patrones directos
- No depende de la velocidad del viento	- Sí depende de la velocidad del viento
- Llega con ángulos bajos de aproximación	- Llega con altos ángulos de aproximación
- En aguas poco profundas no reviste gran importancia, excepto si el tráfico es cercano.	- En aguas poco profundas, domina el espectro cuando no hay tráfico cercano y en ausencia del ruido biológico.

2.4 DISPERSION EN EL MAR: NIVEL DE REVERBERACION.

2.4.1 Introducción.

El mar contiene, en sí mismo y en sus fronteras, inhomogeneidades de distintas clases, variando en tamaño pues van desde finas partículas de polvo hasta manchas de peces y picos y montañas en el mar. Esta inhomogeneidades forman discontinuidades en las propiedades físicas del medio y por tanto interceptan y reradian una porción de la energía acústica incidente sobre ellos. Esta

reradiación de sonido es llamada dispersión, y la suma total de las contribuciones dispersivas de todos los dispersores es llamada reverberación. Es escuchada como una larga, con decaimiento suave, ráfaga de tonos temblorosos que siguen al ping de transmisión de un sistema de sonar activo, y es particularmente molesto en sistemas de alta potencia y/o baja directividad. Una nueva parte necesaria de los procesos de diseño de nuevos sonares activos consiste en hacer una estimación del nivel de reverberación a ser encontrado bajo las condiciones en las cuales el sistema será usado. Aquí veremos algunas características y fuentes de la reverberación observada en el mar.

2.4.2 Tipo de reverberación.

La reverberación, producida por los dispersores en el mar, son básicamente de tres diferentes clases. Un tipo de dispersor ocurre en el volumen, o cuerpo, del mar produciendo reverberación por volumen. Ejemplos de dispersores que producen reverberación por volumen son la vida marina y la materia inanimada distribuida en el mar y la estructura no homogénea del mar mismo. La reverberación por la superficie del mar es producida por dispersores localizados en o cerca de la

superficie del mar, y la reverberación por el fondo originada por dispersores en o cerca del fondo. Las dos últimas forman una reverberación que puede, desde el punto de vista analítico, ser consideradas juntas como reverberación de superficie, ya que una distribución bidimensional de dispersores es considerada.

2.4.3 Burbujas de aire en el agua.

Las burbujas de aire, o más generalmente burbujas de gas, aparecen de varias formas en el mar. Ellas ocurren inmediatamente debajo de la superficie del mar, donde se producen por el rompimiento de las olas y son ocasionadas por turbulencia. También aparecen dentro de ciertos organismos biológicos como por ejemplo, las vejigas natatorias de los peces. También son generadas por las estelas de los barcos. Burbujas de aire libres en el mar son muy pequeñas, ya que las grandes tienden a subir rápidamente a la superficie; están presentes en el mar en muy poca cantidad. Sin embargo, debido a que el aire tiene diferentes densidad y compresibilidad que el agua de mar, el contenido de aire suspendido en el agua de mar tiene un efecto profundo en el sonido bajo el agua.

Cuando una onda sonora golpea una burbuja de aire, la burbuja comparte la compresión y enrarecimiento de la onda sonora incidente. Esta respuesta de la burbuja a la excitación de la onda sonora incidente depende de la frecuencia de la onda sonora y el tamaño de la burbuja. A ciertas frecuencias, una respuesta resonante sucede cuando las propiedades inerciales del sistema llegan a acoplarse a la compresibilidad del sistema. En resonancia, una oscilación máxima se desarrolla según el tamaño de la burbuja y una cantidad de energía máxima es extraída de la onda sonora incidente. Una porción de esta energía es dispersada en todas las direcciones por la pulsación de burbujas, y el sobrante es convertido en calor. Por lo que la burbuja oscilante puede ser vista como un interceptor de una porción de la onda sonora incidente caracterizada por la extinción de la sección de cruce de la burbuja y la reradiación como sonido dispersado en todas las direcciones, así como la conversión en calor. Estos procesos dependen de la frecuencia de oscilación, el tamaño de la burbuja, y las propiedades físicas y termodinámicas de los dos medios involucrados.

2.4.4 Reverberación por volumen.

Cuando los primeros estudios analíticos fueron hechos sobre la reverberación, estos se hicieron bajo ciertas condiciones, observando que la reverberación en los sonares provenía de los cuerpos del mar. Las condiciones involucran refracción en aguas profundas cuando el haz sonoro de un sonar apuntando horizontalmente fue flexionado hacia abajo. También se observó que los dispersores de volumen, independiente de cuales sean, no estaban uniformemente distribuidos con la profundidad, pero tendían a concentrarse en la llamada capa difusa o capa ECR en honor a sus descubridores. El nombre actual de esta capa es la capa de dispersión de profundidad, conocida como DSL por sus siglas en inglés, que se conoce es más compleja de lo que se dedujo en los estudios iniciales.

Los dispersores responsables de la dispersión por volumen parece ser indudablemente de naturaleza biológica, es decir que son parte de la vida marina existente en el mar. Fuentes no biológicas tales como polvo y partículas de arena, microestructura térmica, y turbulencia ya sea natural o hecha por el hombre, tales como estelas de barcos, se ha probado por análisis que son

usualmente contribuyentes insignificantes a la potencia de dispersión observada en el mar.

Aunque la fuente de dispersión por volumen en el mar se ha establecido definitivamente como biológico, los organismos responsables son de diferentes clases. Usando pulsos sonoros cortos, jaulas de arrastre, y fotografía bajo el agua se han hecho varios estudios de los organismos comúnmente responsables de la dispersión por volumen en la DSL. Eufásidos parecidos al camarón, calamar y copépodos han sido señalados y el pescado, particularmente su vejiga natatoria, son la fuente más común del comportamiento acústico selectivo por frecuencia de la capa a bajas frecuencias. Indudablemente, la capa es un agregado complejo de diferentes organismos biológicos, y por tanto posee una potencia de dispersión variable con la frecuencia, localización, estación y aún la hora del día.

A frecuencias mayores de 20 KHz, los dispersores responsables en la DSL son comúnmente zooplancton, o pequeños animales marinos que se alimentan del fitoplancton y son alimento a su vez de pequeños peces pelágicos. A bajas frecuencias, de 2 KHz a 10 KHz, los dispersores dominantes son los varios tipos de pescado que poseen vejiga

natatoria, que es como un saco lleno de aire usado por los peces para mantener y ajustar su boyantez. Cuantificar una burbuja interna que resuena a cierta frecuencia depende del tamaño y profundidad del pez. La resonancia de la vejiga natatoria es por mucho menor que una burbuja de aire porque no es de forma esférica y está rodeada por la piel del pescado. Cuando son suficientemente numerosos, los peces pequeños sin vejiga natatoria pueden contribuir a la dispersión por volumen; pero las clases de peces que la poseen aparecen como responsables por la dispersión en la extremo bajo del rango espectral.

La variación de la potencia de dispersión por volumen con la profundidad se ha estudiado usando sonares de profundidad apuntando verticalmente hacia abajo para medir el retorno como función del tiempo (y por tanto profundidad) antes de recibir el retorno de fondo. Los resultados de estas mediciones muestran una total disminución de la potencia de dispersión con la profundidad, conforme la distribución de los organismos biológicos. La DSL misma generalmente muestra una migración diurna en profundidad, siendo a mayor profundidad en el día que en la noche y con cambios rápidos durante el amanecer y la caída

del sol. Esta migración diurna en profundidad se extiende a veces a algunos cientos de metros y tiende a ser sólo lo suficiente para conservar la intensidad la iluminación constante a la profundidad de la capa.

A frecuencias que exceden de 20 KHz, la variación con la frecuencia es ligera. Aunque no hay muchos estudios de la dispersión por volumen con la frecuencia en este rango, las que se han hecho no muestran claramente una dependencia con la frecuencia en el rango de frecuencias altas. Este comportamiento no descrito es consistente con la observación que la dispersión originada por una variedad de organismos de distintos tamaños y densidades, muchos de las mismas dimensiones con la longitud de onda y todos deformables y libres de moverse en el campo sonoro.

Para frecuencias debajo de los 20 KHz, se han encontrado capas de dispersión con diferentes frecuencias de resonancia. La mayoría de estas capas muestran una migración vertical diurna acompañada por un cambio en la frecuencia. La profundidad, intensidad y frecuencias de resonancia varían apreciablemente de localidad a localidad.

Ya que la DSL es una fuente dominante de reverberación por volumen en sonares de haz amplio o que se inclinan, sus características acústicas serán de interés para los ingenieros de sonar. Pueden resumirse así:

a) La DSL tiene una características regular acústica y biológica en los océanos del mundo. La potencia de dispersión por volumen medida en varias regiones del océano, reflejan cambios en el contenido biológico en distintas áreas.

b) La DSL tiende a subir al amanecer y descender al atardecer permaneciendo a profundidad constante en horas día y de la noche.

c) La profundidad de la DSL está entre los 180 y 900 metros en latitudes medias durante el día y es poco profunda durante la noche.

d) La DSL es una capa estratificada y contiene estratos de distinta frecuencia de resonancia a diferentes profundidades, no todos participan de la migración diurna.

e) Las capas de dispersores ocurren en agua profunda también. La más notable son las manchas de peces alimentándose a una particular profundidad.

Un objetivo frecuentemente encontrado en el mar, sobre todo cuando hay otras naves haciendo maniobras, es la estela que deja detrás un barco o submarino. Debido a que la estela es una extensión, antes que un objetivo discreto, su eco tiene ciertas características de reverberación, aun cuando se presenten como objetivos no bien definidos.

La estela de una nave es una longitud de agua turbulenta burbujeante creada por la propela de la nave. Se extiende a una distancia no definida de la popa y gradualmente se disipa tan pronto la burbujas ascienden a la superficie o se disuelven.

2.4.5 Reverberacion por la superficie del mar.

Debido a su fortaleza y la posibilida de la presencia de burbujas de aire atrapadas justo debajo de la superficie, la cual es un profundo dispersor de sonido. Esta dispersión es la responsable de la reverberación recibida horizontalmente por los sonares cuando están en esta posición y cuando el haz sonoro no es transportado hacia la profundidad, haciendo un símil con el radar se asemeja en muchas formas a la "inteferencia por el mar". La potencia de esta reverberación varía

con el ángulo, frecuencia y la fortaleza de la superficie, según la velocidad del viento sobre ella.

2.4.6 Reverberación por el fondo del mar.

Como la superficie del mar, el fondo es un reflector efectivo y dispersor sonoro y actúa para redistribuir en el océano una porción del sonido incidente. La dispersión ocurre en forma tridimensional, como es el medio en el cual ocurre.

Se ha observado que la reverberación del fondo marino es mayor de fondos rocosos que de fondos lodosos. El sedimento del fondo es solamente un indicador de dispersión acústica. También debemos notar que tanto para baja frecuencia como para alta frecuencia indicaría una ligera dependencia de la dispersión por el fondo del mar con la frecuencia, su retorno de hecho se incrementa con la frecuencia.

Aunque el tamaño de las partículas para fondos sedimentados, sirven como primer medio para clasificación de fondos en términos de retorno acústico; la dureza del fondo del mar parece ser la característica dominante del retorno por dispersión. Por lo tanto, el tipo de fondo es sólo un indicador de su dureza. Sin embargo, el

fondo del mar es parcialmente transparente al sonido, esto es que parte del sonido es transmitido a la tierra situada debajo. A bajas frecuencias esto puede ser importante pero a altas frecuencias es solo una pequeña justificación de otros procesos que involucran discontinuidades irregulares de las propiedades acústicas que tiene el fondo mismo con el fin de poder explicar las principales características del retorno de señal.

2.4.7 Reverberación en agua poco profunda.

En agua poco profunda, los efectos de retorno de fondo y superficie se mezclan en el tiempo y ocurren luego de la emisión del pulso de transmisión, posteriormente la reverberación va disminuyendo. Cuando ocurre la refracción, la dispersión del fondo domina el nivel reverberante pudiendo ser fuertemente predicho su nivel de reverberación. Cuando ocurre la refracción, como en aguas isotérmicas, la reverberación de superficie es más importante que la de fondo y en este caso el nivel de reverberación depende más del estado del mar y la velocidad del viento. Bajo estas circunstancias, extrañamente se ha encontrado, que cuando ocurren ecos de retorno, la relación eco a reverberación tiende a ser

sensiblemente independiente del alcance, esto es que el nivel del eco cae con el alcance al mismo promedio que el de reverberación.

La reverberación en agua poco profunda tiende a ser fuertemente coherente; esto ocurre con patrones de ángulo elevado, a lo largo de los cuales el retorno llega cuando el alcance es corto, son eliminados en propagaciones de mayor alcance en agua poco profunda, llegando a ser prácticamente coherentes en el tiempo. Esto nos hace concluir que la directividad vertical se obtiene con arreglos de pequeña ganancia sobre la reverberación en aguas poco profundas. Por otro lado, en la horizontal, la reverberación es débilmente coherente siendo los arreglos horizontales efectivos supresores de reverberación en agua poco profunda y también a grandes profundidades.

En aguas poco profundas donde los peces prevalecen, se produce reverberación por volumen. Los dispersores biológicos ocasionan un incremento en la atenuación de la transmisión del sonido.

2.4.8 Características de la reverberación.

Con un sonar de pulsos sinusoidales, la reverberación que sigue al pulso emitido se escucha como un tono que decae en forma irregular, temblorosa

y lenta. Dentro de este suave decaimiento aparecen puntos de incremento de reverberación sin que el sonido emitido haya sido interceptado por la superficie o el fondo; aquí veremos otras características de la reverberación distinta a la intensidad:

Distribución de amplitud: debido a que el retorno de dispersión originado por un gran número de dispersores, tenemos que la reverberación fluctúa en su amplitud de la misma forma que los dispersores varían en distancia y tiempo.

Coherencia: por coherencia se entiende la autocorrelación cruzada de las propiedades de la reverberación. La reverberación observada con un sonar de pulsos se conoce que contiene una envolvente con espacios de aproximadamente la misma duración que el pulso emitido. Esta característica de "gotas" (espacios) de la reverberación se ha apreciado en muchas experiencias.

Distribución de frecuencia: las observaciones muestran que la reverberación que sigue a un pulso sinusoidal del sonar no permanece, en general, totalmente dentro de la frecuencia del pulso, ya que ambos están desplazados en

frecuencia y se distribuyen dentro de una banda de frecuencia. El desfase centrado en la frecuencia de transmisión es el desfase doppler, que es causado por la velocidad de la plataforma sobre la cual está montado el sonar, junto con cualquier velocidad uniforme de la reverberación producida por los dispersores mimos. La otra característica de la reverberación, dentro de la distribución de frecuencia, es debido a algunas causas; una es la duración del pulso del sonar, otra por el movimiento de la nave se recibe reverberaciones con distintos desfases de diferentes direcciones y el otro es por el movimiento mismo de los dispersores, siendo este último el más desconocido del cuadro de características oceanográficas del mar. También se debe mencionar aquí como causa adicional de la distribución doppler de la reverberación las corrientes de marea. Tanto la frecuencia media de transmisión y la distribución de frecuencia de la reverberación son de interés directo para el diseño de filtros con el fin de suprimir la reverberación.

2.4.9 Predicción de la reverberación.

Sobre la predicción de la reverberación a ser esperada en un sonar de ecoposicionamiento en

particular, se debe visualizar que clase de reverberación esta más presente a diferentes tiempos después de la emisión del pulso de sonar y de donde proviene. Con este propósito se usa un diagrama de haces, con el fin de indicar no solo las posibles fuentes de reverberación sino también los ángulos de rozamiento a los que se encuentra el haz sonoro con la superficie y el fondo.

En situaciones simples, como alcances cortos donde una sola forma de reverberación se encuentra, el cálculo de reverberación es directo. Una vez escogida la forma apropiada para la ecuación del nivel de reverberación, según la clase de reverberación; el ancho de haz equivalente, según el transductor usado; y el valor de la potencia de reverberación; se calcula a diferentes tiempos y rangos, obteniéndose distintos valores. Se deben tener muy en cuenta las asunciones hechas para la obtención de las fórmulas en cada parámetro, y si es necesario éstas deben ser modificadas para acomodarlas a las condiciones peculiares del problema.

A largos alcances, un cálculo de reverberación es dificultoso por el incremento del número de patrones y fuentes de reverberación. En estos

casos, la contribución de cada fuente debe ser evaluada en forma separada y combinada para dar el nivel de reverberación instantáneo en el momento considerado. A largos alcances en aguas poco profundas se requiere de técnicas especiales de cálculo.

C A P I T U L O 3

LOCALIZACION DE OBJETIVOS CON SISTEMA DE SONAR

3.1 CARACTERISTICAS DE LOS SISTEMAS DE SONAR.

3.1.1 Introducción.

Escudriñar el océano más allá de los rangos visuales requiere el uso de sistemas de sonar. La pregunta es ¿qué clase de sonar hará el trabajo?. Las alternativas son diseñar equipo especial o usar equipo existente en diferentes modos de operación. Para cualquiera de estas alternativas deben compararse las especificaciones de rendimiento del sistema con los requerimientos de la aplicación. Esto conlleva primero determinar el nivel de señal requerido, resolución, alcance y cantidad de información. Estos datos son traducidos en frecuencia de señal, nivel de fuente (en relación al nivel del ruido), ancho del haz, longitud del pulso de transmisión y especificaciones de la pantalla del sistema.

3.1.2 Sistemas de sonar.

3.1.2.1 Sonares pasivos.

El "objeto" hace su propio ruido, y el

sonar pasivo es simplemente un hidrófono que determina la presencia y características acústicas del objeto que produce el ruido. Un receptor direccional puede determinar la dirección de la fuente. Las señales de algunos receptores o dos partes de un receptor pueden ser combinados para determinar la localización del productor de ruido. Ejemplos de objetos ruidosos son submarinos, terremotos, peces.

3.1.2.2 Sonares activos de transmisión continua (CW).

El sistema activo transmite un haz de sonido como una linterna. Si alguna cosa está en el haz, algo del sonido es retornado. El sonido retornado es recibido por un hidrófono o por el mismo "transductor", el cual ha sido conmutado a receptor. Este sistema podría ser más útil para la detección de objetos en movimiento. El movimiento del objeto causa una frecuencia Doppler de desfase de la señal dispersada en relación a la frecuencia transmitida. Un analizador del espectro, un contador de frecuencia y aun la presentación auditiva pueden

permitir la detección de la presencia de un objeto en movimiento en el campo sonoro.

Si la nave fuente está en movimiento, el sonido dispersado por el fondo o por cuerpos fijos en movimiento en el agua muestra un desfase Doppler en el receptor. Hay equipos de navegación Doppler que usan el desfase de frecuencia o sonido retornado del fondo para medir la velocidad de la nave.

3.1.2.3 Sonares activos de pulso.

Los sonares de pulso emiten un corto estallido de energía sonora y escuchan el eco de retorno. La señal es mostrada usualmente como una función del tiempo de viaje y su dirección. La sonda de profundidad común es un ejemplo de esta clase de instrumento. A un nivel más sofisticado, nosotros podemos incluir tipos de transmisión codificadas y modulación de frecuencia debido a que la señal del procesador muestra una pantalla representando tiempo de viaje y distancia, tanto como dure el pulso de transmi-

sión. Ya que la salida del receptor acoplado es un pulso corto, nosotros consideramos que el sistema tiene las mismas características operacionales que el sonar de pulso.

Todos los sistemas dependen de los transductores para cambiar las señales sonoras en el agua en señales eléctricas, o viceversa.

3.1.2 Transductores.

Hoy en día los transductores más comunes son bloques de materiales piezoeléctricos que se expanden, contraen o cambian de forma cuando se les aplican voltajes eléctricos y viceversa. Desde 1950, los materiales cerámicos como el titanato de bario, zirconato de plomo, y más mezclas exóticas han sido usadas debido a su alta salida, fortaleza mecánica y habilidad para ser configurado. Un disco de transductor cerámico comúnmente tiene un fino electrodo conductor de cada lado. La aplicación de voltaje a través de los electrodos causa que el grosor disminuya o aumente, cuando el elemento está en el agua, estas expansiones y contracciones causan las ondas sonoras. Los transductores electromecánicos

funcionan en forma recíproca, esto es que una presión alternada en el elemento crea un voltaje alternado a través de los electrodos.

Un sistema de sonar de exploración usa transductores muy direccionales. En transmisión, el haz puede ser dirigido hacia una dirección dada; en recepción, recibe en forma predominante de la dirección deseada. Sin embargo el uso más importante de la direccionalidad es separar las señales de retorno de los objetos espaciados en forma muy cercana. Los transductores direccionales también reducen el ruido proveniente de otras direcciones. La discusión es fácil si nosotros hablamos solamente acerca de la transmisión y recordamos que las respuestas direccionales de los transductores son los mismos para su uso como fuente y como receptor.

La construcción más común de transductor es un arreglo de pequeños elementos transductores, si cada elemento es manejado con la misma señal, la cara del arreglo puede moverse como un pistón y la radiación principal es perpendicular al plano que contiene los transductores; pueden insertarse retrasos de tiempo en cada línea de transductor asegura que la radiación principal está en la dirección elegida. Generalmente la parte

posterior del arreglo es apantallado para eliminar la radiación en la parte posterior. Si no se lo apantalla, la radiación frontal y posterior ocurren y la interferencia de los dos alteran el rendimiento.

Los medios físicos de transducción no necesitan el efecto piezoeléctrico, pues también los fenómenos magnetoestrictivos, electrodinámicos y termoacústicos son empleados.

3.1.4 Limitaciones en la potencia del sonar.

3.1.4.1 El límite de cavitación.

Como la tecnología permite la generación de intensidades sonoras mayores, los impulsos de presión finalmente alcanzan valores tan grandes que el medio rompe o "cavita" en fase de enrarecimiento. Cerca al nivel del mar; burbujas pequeñas, más o menos del tamaño de 1 micrón, están siempre presentes en el océano. Para fuentes sonoras cercanas a la superficie del mar, este núcleo de cavitación permite que la ruptura ocurra a oscilaciones de presión del orden de 1 atm, dependiendo de la frecuencia, duración y promedio de repetición del pulso sonoro.

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
1958
GUAYAQUIL
BIBLIOTECA

Hay muchos fenómenos físicos asociados con una burbuja cavitante; cuando las burbujas oscilan violentamente tan cerca de una superficie sólida, los esfuerzos asociados con las ondas de shock emitidas y los flujos acústicos ocasionan una rápida erosión del metal más duro o plástico. Las altas presiones y temperaturas durante el transiente del colapso de una burbuja causa la luminiscencia de las burbujas de gas. Las reacciones químicas pueden iniciar o incrementar su actividad, y células vivas y macromoleculares son rotas por cavitación. Lo más importante para el usuario de acústica en el océano, es que las oscilaciones de cavitación cercanas a fuentes sonoras producen distorsiones en las armónicas y flujos del sonido desde el transductor, mientras radian ruido altamente audible.

Aun con niveles relativamente bajos de intensidad acústica, la forma de la onda de salida de un transductor es afectada por las burbujas del ambiente que son particularmente comunes cerca de la superficie. Cuando la amplitud de

presión sonora CW se incrementa, las burbujas del ambiente comienzan a oscilar en forma nolineal y una segunda armónica de la frecuencia aplicada es generada. A nivel del mar la amplitud de la segunda armónica es menor al 1% de la fundamental.

Cuando el pico de la amplitud de presión es algo mayor que 1 atm, el valor de la presión absoluta para una fuente sonora a nivel del mar será menor a cero durante la parte enrarecida del ciclo. Esta presión negativa, o tensión, es el iniciador de un incremento del nivel de distorsión y la presencia de ruido de banda ancha, en caso de la frecuencia CW está debajo de los 10 KHz. Cualquier intento de incrementar la amplitud de la presión sonora más allá de la presión ambiente causará una distorsión total y la generación de una nube de burbujas tan grande que el campo cercano de la salida radiada del transductor disminuirá con el incremento del voltaje aplicado.

La descripción anterior para baja frecuencia y fuentes CW a nivel del mar identifica los efectos externos de

cavitación antes que los detalles dinámicos del fenómeno. Las mediciones de laboratorio han identificado dos tipos de cavitación transiente, que tienen lugar en regiones de muy grandes amplitudes de presión sonora: la cavitación gaseosa y la vaporosa. La cavitación gaseosa es reconocida por flujos de burbujas relativamente estables y sisiantes que se disparan de regiones de presión sonora de alta alternatividad; aquí se asume que las cantidades relativas de gas y vapor de agua en las burbujas es constante. La cavitación vaporosa está caracterizada por la violenta intermitencia de burbujas individuales que se colapsan, las cuales radian ondas de shock y ruido de banda ancha; se cree que el vapor de agua pasa a través de las paredes de la burbuja del líquido durante la fase de contracción de un ciclo del movimiento de la burbuja.

Los núcleos para cavitación son burbujas diminutas y estables que se asumen están atrapadas en grietas de partículas sólidas. Bajo la influencia de una curva acústica alternante, si el cambio de

presión es lo suficientemente grande, las burbujas crecen durante la pulsación por un proceso llamado "difusión rectificada". Durante un ciclo de esta acción, más gas se difunde hacia el interior desde el medio líquido a la burbuja que es comprimida. Esto es debido a que el área superficial de la burbuja en la fase expandida del ciclo es mayor que el área durante la fase contraída causando que el gas completo se introduzca en un ciclo completo. El crecimiento de pequeñas burbujas debido a la difusión rectificada tiene lugar en un campo sonoro hasta que alcanzan un radio crítico. Si el cambio de presión sonora es constante en este punto (umbral de Blake), la burbuja se expandirá hasta explotar.

En resumen, cuando el límite de cavitación es excedido, un cierto número de efectos delatorios comienzan a aparecer, tales como la erosión de la superficie del proyector, pérdida del poder acústico por la absorción y dispersión producida por la cavitación de una nube de burbujas, deterioro del patrón del haz

proyector y una reducción en la impedancia acústica dentro de la cual debe operar el proyector. En todos los efectos nombrados, el umbral de cavitación representa el principio de un deterioro gradual del rendimiento del proyector.

3.1.4.2 Efectos de interacción.

Un efecto de campo cercano, en muchas formas similar al que acabamos de describir, ocurre en grandes arreglos de elementos resonantes del proyector colocados casi juntos. Cuando un arreglo de este tipo es excitado eléctricamente, se encuentra que la velocidad del movimiento de cada elemento no es uniforme, sino que varía de elemento a elemento del arreglo en forma compleja. Este comportamiento errático es causado por interacciones entre un elemento y otro. Por ejemplo, de dos elementos de un arreglo, uno podría actuar como un amortizador de la salida acústica del otro. Esto es, que absorbe, antes que radiar, el sonido y posiblemente puede producir su destrucción. Los efectos de interacción, a menos que se hayan compensado en su diseño, reducen la

potencia de salida del arreglo del proyector, y deteriora el patrón del haz. Estos efectos son importantes de considerar para arreglos que van a radiar grandes cantidades de potencia acústica.

Desde un punto de vista teórico, los efectos de interacción pueden ser considerados en términos de la impedancia mutua de radiación de un par de fuentes sonoras. La impedancia mutua de radiación puede reducirse separando los elementos del arreglo, aunque a un gran costo en reducción de eficiencia acústica, potencia acústica y un deterioro del patrón de haz. Otra forma de reducir la impedancia mencionado entre los elementos es la inserción de una reactancia en serie o en paralelo con cada elemento, un tratamiento efectivo solamente con una frecuencia. Un tercer método es hacer los elementos del arreglo lo suficientemente grandes de tal forma que su impedancia de autoradiación aplaste a la impedancia mutua de radiación entre los elementos, un "remedio" costoso por algunos aspectos de ingeniería.

Finalmente y más elegantemente, pueden usarse amplificadores individuales para manejar cada elemento del arreglo en la justa amplitud y fase, logrando una velocidad de movimiento uniforme en fase; un excelente método para hacerlo puede ser colocar un acelerómetro en la cara radiante de cada elemento para retroalimentar los amplificadores.

3.1.5 Efectos no lineales en el sonar.

El agua, con o sin contaminantes tales como las burbujas de aire, es indudablemente un medio no lineal. Esto es, que el cambio en densidad causado por un cambio de presión de una onda sonora en el agua no es linealmente proporcional al cambio en la presión. Más generalmente, en cualquier sistema no lineal, tal como un mezclador en electrónica, las distintas frecuencias con respecto a la frecuencia de entrada suceden en la salida. Para ondas acústicas sinusoidales, una variedad de frecuencias adicionales se generan en el agua. Esto incluye las frecuencias armónicas y subarmónicas cuando una onda sinusoidal única es generada y la suma y diferencia de frecuencias cuando dos sinusoidales de frecuencias diferentes se propagan juntas a través del medio. Estas

frecuencias extrañas ocurren, desde el punto de vista práctico, solamente a grandes amplitudes de la onda primaria; el término con que se conoce a esta parte es "acústica de amplitudes finitas", cuyo contenido es de poco interés para el ingeniero de sonar.

3.2 REFLEXION Y DISPERSION DE OBJETIVOS DE SONAR.

3.2.1 Introducción.

Este tema es conocido con el nombre de catacústica y es definida como la parte de la acústica que trata de los sonidos reflejados o ecos.

En sonares activos el parámetro "solidez del objetivo", al que nos referiremos como "target strength", se refiere al eco de retorno por un objetivo bajo el agua. Tales objetivos pueden ser objetos de interés militar, como submarinos y minas, o pueden ser manchas de peces que son buscadas con los sonares para aplicaciones pesqueras. Excluídas de la categoría de "objetivos" están las inhomogeneidades del mar y de extensión indefinida, como las capas de dispersión y el fondo y la superficie del mar, el cual debido a su tamaño indefinido, retorna el sonido en la forma de reverberación en lugar de como ecos.

En el contexto de las ecuaciones del sonar, el target strength es definido como 10 veces el logaritmo de base 10 de las relación de la intensidad del sonido retornado por el objetivo, a una distancia de 1 metro desde su "centro acústico" en alguna dirección, a la intensidad incidente desde una fuente distante. En símbolos es:

$$TS = 10 \log \left. \frac{I_R}{I_I} \right|_{r=1} \qquad 3.1$$

donde:

I_R = intensidad de retorno a 1 metro

I_I = intensidad incidente

A manera de conocimiento general, debemos anotar lo siguiente, sobre los tipos de sonares: los sonares "monoestáticos" son los que tienen el mismo, o muy cercanos, fuente y receptor; los sonares "biestáticos" son los que tienen su fuente alejada del receptor, en este caso el target strength es función de la dirección incidente y la dirección del receptor, relativa a algún eje de simetría del objetivo. Debido a que la mayoría de los sonares son "monoestáticos", restringiremos la mayor parte de nuestras observaciones a la reflexión de retorno y dispersión de retorno en sonares de este tipo.

Mención especial debe hacerse del uso de la distancia de 1 metro como referencia para el cálculo del target strength. Esta referencia arbitraria causa a veces que muchos objetos bajo el agua tengan un valor positivo de target strength. Estos valores positivos no deberían ser interpretados como que está regresando más sonido desde el objetivo que el que incide sobre él; sino que debería ser interpretado como una consecuencia de la distancia arbitraria de referencia.

El significado del target strength puede mostrarse calculando el de una esfera, grande comparada a la longitud de onda, asumiendo que la esfera es un reflector isotrópico, esto es, que distribuye su eco igualmente en todas las direcciones. Dejemos que una esfera grande, perfecta y rígida sea incidida por una onda plana sonora de intensidad I_i. Si la esfera es de radio a, la potencia interceptada por ella de la onda incidente será $\pi a^2 I_i$. Bajo la asunción que la esfera refleja esta potencia uniformemente en todas las direcciones, la intensidad de la onda reflejada a una distancia r metros de la esfera será la relación de esta potencia al área de la esfera de radio r:

$$I_R = \frac{\pi a^2 I_i}{4\pi r^2} = I_i \frac{a^2}{4r^2}$$

Donde I_R es la intensidad de la reflexión a la distancia r. Tomando r como 1 metro, la relación de la intensidad reflejada I_R a la intensidad incidente es:

$$\left.\frac{I_R}{I_I}\right|_{r=1} = \frac{a^2}{4}$$

y el target strength de esfera será

$$TS_{esfera} = 10 \log \frac{a^2}{4} \qquad 3.2$$

De esta expresión es evidente que una esfera ideal de radio dos metros (a = 2) tiene un target strength de cero decibelios. En la práctica, las esferas son buenos objetivos de referencia para el sonar, debido a que su target strength son relativamente independientes de la orientación.

3.2.2 Solidez del objetivo de formas simples.

El target strength de un número de formas geométricas se ha encontrado en forma teórica, en la mayoría de los casos para aplicaciones de radar. Las expresiones encontradas están idealizadas y deben ser vistas como gruesas aproximaciones para objetivos de construcción interna compleja, en las cuales se supone la ocurrencia de una cierta penetración y dispersión. Además la movilidad y

no rigidez de los objetivos de sonar causan que tengan target strength distintos a los que tendrían si estuvieran fijos y rígidos como la teoría lo requiere. Todavía estas expresiones, de vez en cuando, son útiles para la predicción de target strength de objetos nuevos y poco usuales para los que ningún dato medido hay disponible y en los que se cree que puede tener una buena aproximación conforme a una forma geométrica ideal.

Objetivos más complejos pueden ser modelados al partirlos en partes elementales y reemplazando cada parte por varias formas simples. Por ejemplo un submarino puede modelarse como una serie de cilindros, cuñas, placas, etc., cada una correspondiente a algún componente de la estructura del casco. Para sonares de pulso largo, el target strength puede encontrarse adicionando las contribuciones de varias formas simples en las cuales el objetivo ha sido dividido.

3.2.3 Métodos de medición de solidez del objetivo.

Los métodos obvios y directos para medir el target strength de objetos bajo el agua es colocar un hidrófono a una distancia de 1 metro del objeto y medir la relación de la intensidad

reflejada, o dispersada, con la intensidad incidente. Este método es impráctivo por una serie de razones. Para muchos objetos, es difícil, sino imposible, localizar y colocar un hidrófono a la distancia de 1 metro; aun cuando puede hacerse, será difícil separar el sonido reflejado del sonido incidente a tan corta distancia. Además, los resultados podrían invalidarse, en muchos casos, para usos con alcances largos, ya que el target strength de objetos como cilindros y submarinos es distinto en alcances cortos que en largos.

Un método más práctico es el uso de un objetivo de referencia de un target strength conocido, colocado a la misma distancia que el desconocido, y comparar los niveles de los ecos del objetivo de referencia y el objetivo a ser medido. Este método directo de comparación es particularmente adecuado a mediciones de pequeños objetos en alcances cortos. Para objetos grandes, como submarinos a grandes alcances, los requerimientos de operación y tamaño de la esfera de referencia pueden hacer, al método, impráctico. En cualquier caso, la construcción y dimensiones del objetivo de referencia debería ser cuidadosamente controlado, asegurándose que su target strength

se aproxima al de la forma ideal.

La mayoría de mediciones de target strength han sido hechas por lo que podríamos llamar el método convencional, en el cual las mediciones de la intensidad pico o promedio de la envolvente del eco irregular son hechas a un alcance largo y luego reducidas a lo que mediría a la distancia de 1 metro. Esta reducción requiere, en efecto, un conocimiento de las pérdidas de transmisión apropiadas al tiempo y lugar donde los ecos son medidos, junto con el nivel de fuente de la fuente sonora que produce los ecos. El método emplea la ecuación del sonar activo escrito en la forma:

$$EL = SL - 2TL + TS \qquad 3.3$$

Donde EL es el nivel del eco. La ecuación es resuelta para el término desconocido, TS. Este método convencional tiene la desventaja de requerir un conocimiento exacto de las pérdidas de transmisión, lo cual requiere un conocimiento aunque sea simple de las condiciones de propagación, o una serie de mediciones de campo hechas con este propósito. Mucho de la diversidad en los datos existentes de target strength son sin duda atribuibles a asunciones erróneas de pérdidas de transmisión y al uso indiscriminado de

niveles pico y promedio del eco. Sin embargo, el método es básicamente simple y directo y no requiere equipo especial o instrumentos especiales.

Un método que no requiere conocimientos de las pérdidas de transmisión, pero necesita de instrumentación especial, fue usada por Urick y Pieper. Un hidrófono de medición y un transponder localizado a 1 metro de donde está instalado el submarino. En la nave donde se toman las mediciones, una nave de superficie, se encuentra un hidrófono suspendido cerca de la fuente sonora produceindo los ecos a ser medidos. Los niveles relativos de ecos y pulsos del transponder son grabados a bordo de la nave de superficie; los niveles relativos del pulso que llega y el pulso del transponder son grabados a bordo del submarino, así el target strength del submarino es simplemente la diferencia en nivel entre la diferencia de los dos niveles grabados en las embarcaciones. El transponder sirve, en efecto, para "calibrar" el patrón de transmisión bajo el agua entre las dos embarcaciones. Ninguna calibración absoluta de los transductores usados es necesaria, y la distancia que separa las dos naves no necesita ser conocida.

3.2.4 Solidez del objetivo de submarinos.

El target strength de submarinos, entre todos los objetivos submarinos, ha recibido mucha atención históricamente y son relativamente bien conocidos los trabajos hechos durante la Segunda Guerra Mundial. Es de notar que la determinación del target strength de submarinos es el más trabajoso por su variabilidad. No solamente los ecos individuales varían grandemente de eco a eco en un submarino en particular, sino que además los valores promedios de submarino a submarino, varían ampliamente.

El tratamiento para el cálculo del target strength de submarinos varía con el aspecto, la frecuencia, duración del pulso de transmisión, profundidad y rango. En la mayor parte de los análisis se considera a los submarinos como naves propulsadas por máquinas a diesel.

3.2.5 Solidez del objetivo de naves de superficie.

Debido a que las naves de superficie no son objetivos importantes para los sonares activos, hay pocos datos disponibles sobre su valor de traget strength. A pesar de esta poca información sobre el tema, los pocos datos muestran que hay variación por el aspecto (forma de la nave) y el

alcance.

3.2.6 Solidez del objetivo de peces.

Los peces son los objetivos de los sonares para búsqueda. Sus target strength son de interés para el diseño óptimo de estos equipos e, idealmente, podría ser usado para la clasificación acústica de peces; es decir, para la estimación del número, tipo y tamaño del pez en las áreas del mar donde se emplee con este fin.

Muchos datos sobre target strength de peces de distintas especies se han reportado, tanto en el aspecto dorsal como en el lateral. Los ecos de peces vivos, anestesiados para conservarlos sin movimiento, se han medido en tanques de pruebas, y las mediciones se han llevado a cabo en la forma convencional. Ocho frecuencias en el rango de 12 a 200 KHz se han usado; los especímenes miden en longitud entre 1.9 a 8.8 pies. Los resultados han mostrado una fuerte dependencia con el tamaño del pez y se nota una pequeña dependencia con la frecuencia o longitud de onda. Combinando con viejos reportes, se ha encontrado que las mediciones, desde el aspecto dorsal, cumple con la siguiente ecuación empírica:

$$TS = 19.1 \log L - 0.9 \log f - 62 \qquad 3.4$$

donde:

L: longitud del pez en centímetros

El rango de validez es $0.7 < L/\lambda < 90$; en este rango un pez individual tiene un target strength diferente en promedio a 5 dB del dado por la ecuación. Los investigadores concluyen que, por lo menos en el rango de frecuencia anotado, la vejiga natatoria del pez es la mayor causa del retorno de retrodispersión.

3.2.7 Procesos de formación de ecos.

Objetos submarinos complejos retornan el sonido a la fuente luego de algunos procesos. Estos procesos sucederán, por general, para un objeto complejo como el submarino, pero solamente uno o dos serán dominantes bajo condiciones particulares de frecuencia y ángulo del aspecto. Tenemos:

Reflexión especular: es la más simple y mejor comprendida de la formación de ecos. Se ilustra como el retorno de sonido de grandes esferas o superficies conexas. En este proceso, el objetivo permenece estacionario y sin movimiento dentro del campo sonoro y por tanto genera una onda reflejada teniendo una velocidad de partícula suficiente, en teoría de ondas, para cancelar

aquella de la onda incidente sobre la superficie del objeto. Alternativamente, la superficie reflectora puede ser suave en lugar de dura o estacionaria, de tal forma que envía una reflexión en la cual las presiones de las ondas se cancelarán. Una reflexión especular tiene una forma de onda que es duplicado de la forma de onda incidente y puede ser perfectamente correlacionada con ella.

Dispersión por irregularidades de superficie: las irregularidades, como protuberancias, esquinas y filos, que tienen un pequeño radio de curvatura comparado con la longitud de onda, retornan el sonido por dispersión antes que por reflexión. La mayoría de objetos reales poseen muchas de tales irregularidades en su superficie, y el retorno dispersado está compuesto de contribuciones de un gran número de tales centros de dispersión.

Penetración de sonido dentro del objetivo: los objetivos bajo el agua es muy raro que permanezcan rígidos bajo el impacto de una onda sonora incidente, sino mas bien se mueven o deforman de manera compleja. Esta reacción puede pensarse como la penetración del sonido en el objetivo y una deformación compleja del objetivo para la excitación de la onda sonora.

Efectos de resonancia: ciertas frecuencias incidentes pueden corresponder a varias frecuencias de resonancia del objetivo bajo el agua. Tales frecuencias excitarán diferentes modos de oscilación o vibración del objeto, dando en principio un valor mejorado de target strength. Una resonancia totalmente diferente es la resonancia flexible de las placas de que un objeto, como un submarino, está compuesto.

3.2.8 Reducción del solidez del objetivo.

Algunas veces se desea hacerle algo al objetivo, como mayores cambios estructurales y de composición, con el propósito de reducir su target strength. Esta clase de camuflaje acústico puede lograrse por una variedad de formas. A continuación, colocamos estos métodos en la siguiente tabla:

TABLA 3.1

METODOS DE REDUCCION DE TARGET STRENGTH

- Gran longitud de onda: reducción de volumen para bajas frecuencias.

- Pequeñas longitud de onda para altas frecuencias:

  Cambio de la forma del objeto
  Revestimiento de sordera
  Absorventes viscosos
  Revestimiento de transición gradual
  Revestimiento de cancelación
  Capa de cuarto de onda
  Cancelación activa

3.2.9 Características del eco

Los ecos que provienen de distintos objetos bajo el agua difieren del pulso incidente en un número de formas distintas a la intensidad, como se describe por el parámetro target strength. El objeto reflejante imparte sus propias características al eco que interactúa con la onda sonora incidente para producir un eco que es, en general, diferente en la forma de onda y otras características del pulso incidente. Estas diferencias son útiles al ingeniero de sonar en dos formas: pueden ser empleadas como una ayuda en detección, como en filtrado con filtros de banda estrecha para mejorar un eco confundido con reverberación; y pueden ser utilizados para ayudar en la clasificación de objetivos, como por

ejemplo un submarino de una mancha de peces. Algunas características distintas de los ecos son:

- Desplazamiento Doppler: los ecos que vienen de un objetivo en movimiento están desplazados en frecuencia por el efecto doppler.

- Duración extendida: los ecos son alargados en extensión del tamaño del objeto.

- Envolvente irregular: la envolvente del eco es irregular, especialmente donde la reflexión especular no es importante. Estas irregularidades llegan de las interferencias acústicas entre los dispersores y el objetivo.

- Efectos de modulación: los objetivos que tienen una propela (hélice) pueden modular en amplitud el eco; pues produce una variación cíclica en la sección de cruce de la dispersión del objetivo. Otra posible forma de modulación puede tenerse de la interacción entre el eco de una nave en movimiento y el eco de su estela.

3.3 ECUACIONES DEL SONAR.

3.3.1 Introducción.

Los muchos efectos y fenómenos peculiares al

sonido bajo el agua producen una variedad de efectos cuantitativos en el diseño y operación de equipo de sonar. Estos diversos efectos pueden ser agrupados conveniente y lógicamente en forma cuantitativa en un pequeño número de unidades llamado los parámetros del sonar, los cuales están relacionados por las ecuaciones del sonar. Estas ecuaciones son las relaciones de trabajo que juntan los efectos del medio, el objeto y el equipo; ellas están entre las herramientas de diseño y predicción disponibles al ingeniero para aplicaciones del sonido bajo el agua.

Las ecuaciones del sonar fueron formuladas en principio durante la Segunda Guerra Mundial para:

a) Como base lógica para cálculos del rango máximo de los equipos de sonar. En años recientes han visto incrementar su uso en el diseño óptimo de sonares para nuevas aplicaciones.

b) Pensar en unidades lineales en lugar de unidades logarítmicas con pequeñas cambios en las definiciones de los parámetros.

Las ecuaciones del sonar son esencialmente simples y sirven para dos importantes funciones prácticas. Una es la predicción de rendimiento de los equipos de sonar de diseño conocido o

existente. En esta aplicación las características de diseño del sonar son conocidas o asumidas, y lo que se desea es estimar el rendimiento en algunos términos significativos como la probabilidad de detección o velocidad de exploración. Esto se logra con las ecuaciones del sonar por la predicción del rango a través del parámetro pérdidas de transmisión, el cual es convertido en términos de rango (alcance) con la ayuda de alguna asunción referente a las características de propagación del medio.

La otra aplicación general de las ecuaciones es en diseño de sonares, donde un rango preestablecido es requerido para la operación del equipo a ser diseñado. En este caso la ecuación es resuelta para un parámetro de particular dificultad de medir en la práctica. Un ejemplo puede ser la directividad requerida para alguna aplicación en particular.

3.3.2 Consideraciones básicas.

Las ecuaciones son encontradas sobre una igualdad básica entre las porciones deseadas y no deseadas de la señal recibida en el instante cuando alguna función del sonar es realizada. Esta función puede ser de detección de un objetivo bajo el

agua. Estas funciones envuelven la recepción de energía acústica en el receptor, se puede decir que una porción será deseada y es llamada "señal". El resto del campo acústico es no deseado y puede llamarse "fondo". En sonar el "fondo" es ya sea ruido, o reverberación. El objetivo del ingeniero de diseño es encontrar medios para incrementar la respuesta total del sistema de sonar a la señal y para disminuir la respuesta del sistema al "fondo", en otras palabras, incrementar la relación señal-ruido de fondo.

Para cada posible aplicación del sonar hay una cierta relación señal-ruido de fondo que dependerá de las funciones a ser realizadas y del nivel de rendimiento que es deseado en términos de porcentajes de sucesos y "falsas alarmas", tal como una aparente detección de un objetivo cuando ningún objetivo está presente. Si la señal se imagina que se incrementa lentamente en un constante ruido de fondo, el propósito deseado será logrado cuando el nivel de señal iguala al nivel de ruido de fondo, el cual solo lo enmascara. Es decir, cuando el propósito del sonar es apenas logrado:

Nivel de señal = nivel de enmascaramiento del ruido de fondo

El término "enmascaramiento" implica que no todo el ruido de fondo interfiere con la señal, sino solamente una porción de él, usualmente la porción que permenece en la banda de frecuencia de la señal. La palabra "enmascaramiento" es prestada de la teoría de audición.

Debemos notar que la igualdad sólo establece que existirá en solo un instante de tiempo cuando un objetivo se aproxima a un receptor de sonar. En rangos cortos, su nivel de señal excederá al nivel de enmascaramiento del ruido de fondo; en rangos largos, ocurre lo contrario. Pero el instante de igualdad es el momento de gran interés para el diseñador, por ello es que es el instante en el cual enfocará su atención el cálculo del sonar.

3.3.3 Las ecuaciones activas y pasivas.

El próximo paso es expandir la igualdad básica en términos de los parámetros del sonar determinado por el equipo, el medio y el objetivo. Denotaremos estos parámetros por símbolos de dos letras. Estos parámetros son niveles en unidades de decibelios relativos a la intensidad de referencia

standard de 1 μPa de una onda plana. Estos son los siguientes:

- Parámetros determinados por el equipo:

  Nivel de fuente del proyector : SL

  Nivel de ruido propio : NL

  Indice de directividad de recepción: DI

  Umbral de detección : DT



BIBLIOTECA

- Parámetros determinados por el medio:

  Pérdidas de transmisión: TL

  Nivel de reverberación : RL

  Nivel de ruido ambiente: NL

- Parámetros determinados por el objetivo:

  Target strength : TS

  Nivel de fuente de objetivo: SL

Dos pares de los parámetros están dados por el mismo símbolo debido a que ellos son esencialmente idénticos. Debemos mencionar que este conjunto de parámetros no es único. Otros podrían ser empleados, ser más fundamentales o diferir por una constante. Por ejemplo, la velocidad del sonido podría ser adoptada como parámetro y el TS podría ser reemplazado por el parámetro "sección de cruce de retrodispersión" expresada en decibelios, como se hace en el radar. Los parámetros elegidos son por tanto arbitrarios; los empleados

aquí son los convencionalmente usados en el sonido bajo el agua. Además debemos anotar que pueden expandirse en términos de cantidades fundamentales como frecuencia, velocidad de la nave y dirección, este último aspecto será de importancia dominante en las descripciones de los parámetros más adelante. Las unidades de los parámetros son decibelios y son adicionados en la formación de las ecuaciones del sonar.

El siginificado de estas cantidades puede ilustrarse a través de simples consideraciones para un sonar activo. Una fuente sonora actua también como un receptor (transductor), en este caso, y produce de alguna forma un nivel de fuente SL a una distancia (1 metro) sobre un eje. Cuando el sonido radiado llega al objetivo (si el eje de fuente sonora apunta hacia el objetivo), su nivel se reducirá debido a las pérdidas de transmisión, y tenemos entonces SL-TL. En reflexión o dispersión del objetivo de target strength TS, la reflejada o retrodispersada, su nivel, será SL-TL+TS a una distancia de 1 metro desde el centro acústico del objetivo en la dirección de regreso hacia la fuente. En el viaje de retorno hacia la fuente, este nivel es nuevamente atenuado por las pérdidas de transmisión y se convierte en SL -

2TL + TS. Este es el nivel de eco en el transductor. Volviendo al rudio de fondo y asumiéndolo que es un ruido isotrópico antes que reverberación, encontramos que el nivel de ruido de fondo es simplemente NL. Este nivel es reducido por el índice de directividad del transductor al actuar como receptor o hidrófono, de tal forma que en los terminales deltransductor la potencia relativa de ruido es NL - DI. Ya que el eje del transductor está apuntando en la dirección de donde viene el eco, la potencia relativa de eco no es afectada por la directividad del transductor. En los terminales, por tanto, la relación eco o ruido es:

$$SL - 2TL + TS - (NL - DI)$$

Asumamos que la función de este sonar es llamada como de detección, esto es, que su propósito principal es dar una indicación de alguna especie en su pantalla. Cuando la relación señal de entrada a ruido está sobre un cierto umbral de detección llena ciertos criterios de probabilidad, se hará una decisión por parte de un observador humano si un objetivo está presente; cuando la relación señal de entrada a ruido es menor que el umbral de detección, entonces el objetivo está ausente. Cuando el objetivo está siendo apenas

detectado, la relación señal a ruido iguala al umbral de detección y tenemos:

$$SL - 2TL + TS - (NL - DI) = DT$$

Aquí tenemos que la ecuación del sonar activo como una igualdad en términos del umbral de detección. En términos de la igualdad básica descrita arriba, podemos igualmente considerar que solamente aquella parte de la potencia de ruido que permanece sobre el umbral de detección enmascara el eco, y podríamos tener entonces:

$$SL - 2TL + TS = NL - DI + DT$$

Lo cual es un arreglo más conveniente de los parámetros, ya que el nivel de eco ocurre en el lado izquierdo y el nivel de ruido de fondo enmascarado ocurre en la derecha.

Esta es la ecuación del sonar activo para el caso monoestático, que es lo que nos ocupa. En algunos sonares modernos, no es posible distinguir entre DI y DT, y es más apropiado referirse a DI-DT como el incremento en la relación señal a ruido de fondo producido por el sistema completo de recepción (transductor, electrónica, pantalla y observador).

Se requiere una modificación cuando el ruido de fondo es reverberación en lugar de ruido. En este caso, el parámetro DI, definido en términos de un ambiente isotrópico, es inapropiado, puesto que como reverberación no se tiene ningún medio isotrópico. Para una reverberación ambiente nosotros reemplazaremos los términos NL - DI por un nivel de reverberación del equivalente de onda plana, RL, visto en los términales del hidrófono. La ecuación del sonar activo se convierte:

$$SL - 2TL + TS = RL + DT$$

En el caso del sonar pasivo, el propio objetivo es el que produce la señal a ser detectada, entonces el parámetro nivel de fuente se refiere ahora al nivel del ruido radiado por el objetivo a una distancia de 1 metro. Además, el parámetro target strength, en este caso, no es relevante. Con estos cambios, la ecuación del sonar pasivo es:

$$SL - TL = NL - DI + DT$$

En la tabla 3.2 tenemos una lista de los parámetros, localización de referencia, y definiciones cortas en forma de relaciones.

3.3.4 Nombres para varias combinaciones de parámetros.

En la práctica es conveniente tener nombres separados para distintas combinaciones de los términos en las ecuaciones. Existen métodos para medir algunos de ellos. Estas combinaciones son las que indica la tabla 3.3.

De estos parámetros, la figura de mérito es el de mayor uso. Debido a que combina varios parámetros del equipo y del objetivo que establecen una medida significativa del rendimiento del sonar.

Estos parámetros y las ecuaciones del sonar no son nada más que el establecimiento de una igualdad entre la porción deseada del campo acústico llamada la señal, ya sea eco o ruido del objetivo, y una porción no deseada, llamada ruido de fondo o reverberación. Esta igualdad en general, se tendrá solamente a un alcance, a otras distancias, uno u otro parámetro será mayor y la igualdad ya no existirá.

TABLA 3.2

PARAMETROS DEL SONAR

SIMBOLO PARAMETRO	LOCALIZACION DE REFERENCIA	DEFINICION
Nivel de fuente SL	1 m de la fuente sobre su eje acústico	$10 \log \frac{\text{intensidad de fuente}}{\text{intensidad de referencia}}$
Pérdidas de transmisión TL	1 m de la fuente y del objetivo o receptor	$10 \log \frac{\text{intensidad de señal a 1 m}}{\text{intensidad de señal en objetivo o receptor}}$
Target strength TS	1 m del centro acústico del objetivo	$10 \log \frac{\text{intensidad del eco a 1 m del objetivo}}{\text{intensidad incidente}}$
Nivel de ruido NL	En el hidrófono	$10 \log \frac{\text{intensidad de ruido}}{\text{intensidad de referencia}}$
Indice de directividad del receptor DI	En los terminales del hidrófono	$10 \log \frac{\text{potencia de ruido generado por un hidrófono equivalente no direccional}}{\text{potencia de ruido generado por el hidrófono en uso}}$
Nivel de reverberación RL	En los terminales del hidrófono	$10 \log \frac{\text{potencia de reverberación en los terminales del hidrófono}}{\text{potencia generada por la intensidad de la señal de referencia}}$
Umbral de detección DT	En los terminales del hidrófono	$10 \log \frac{\text{potencia de la señal justo para realizar una cierta función}}{\text{potencia del ruido en los terminales del hidrófono}}$

TABLA 3.3

COMBINACIONES DE PARAMETROS DEL SONAR

NOMBRE	PARAMETRO	OBSERVACIONES
NIVEL DE ECO	SL-2TL+TS	La intensidad del eco medida en el hidrófono.
NIVEL DE ENMASCARAMIENTO DE RUIDO	NL-2TL+TS	Otro nombre es nivel mínimo de eco detectable.
NIVEL DE ENMASCARAMIENTO DE REVERBERACION	RL+DT	
EXCESO DE ECO	SL-2TL+TS-(NL-DI+DT)	Justo cuando ocurre la detección, bajo las condiciones de probabilidad en términos de DT, cuando el exceso de eco es cero
FIGURA DE RENDIMIENTO	SL-(NL-DI)	Diferencia entre el nivel de fuente y el nivel de ruido medido en el hidrófono.
FIGURA DE MERITO	SL-(NL-DI+DT)	Máximo permitible en pérdida de transmisión de sonares pasivos, o el máximo permitible en pérdida de transmisión en sonar activo con TS = 0 dB.

3.3.5 Formulación de las ecuaciones.

Una formulación condensada de las ecuaciones es la siguiente:

a) Sonares activos (monoestáticos):

- Ruido de fondo:

$$SL - 2TL + TS = NL - DI + DT \qquad 3.5$$

- Ambiente de reverberación:

$$SL - 2TL + TS = RL + DT \qquad 3.6$$

b) Sonares pasivos:

$$SL - TL = NL - DI + DT \qquad 3.7$$

3.3.6 Limitaciones de las ecuaciones del sonar.

Las ecuaciones del sonar escritas en términos de intensidades no están siempre completas para algunos tipos de sonar. Por ejemplo, para sonares de pulso corto se requiere la adición de otro término, la duración del eco; otra es las pérdidas de correlación, que ocurre cuando el sonar correlaciona el eco recibido con una réplica grabada.

Una limitación de otra clase es producida por la naturaleza del medio en el cual opera el sonar. El mar es un medio en movimiento que contiene inhomogeneidades de varias clases, junto con fronteras irregulares, una de las cuales está en movimiento. La propagación multipatrón es la regla; como resultado, muchos de los parámetros del sonar fluctúan irregularmente con el tiempo, mientras otros cambios debido a variaciones desconocidas en los equipos y la plataforma sobre la cual está montada. Debido a estas fluctuaciones, una "solución" de las ecuaciones del sonar no es más que una buena adivinanza en tiempo promedio de lo que se espera en un problema básicamente

sofisticado.

Cálculos precisos, a décimas de decibelios, son fútiles; un alcance predicho de sonar es una cantidad promedio sobre la que se observa valores de rango posibles. Esperamos que nuestro conocimiento del sonido bajo el agua, y sus fluctuaciones, mejore la exactitud de las predicciones de las ecuaciones del sonar.

3.4 DETECCION DE SEÑALES EN RUIDO Y REVERBERACION: UMBRAL DE DETECCION.

3.4.1 Introducción.

Las señales de sonar, ya sean ecos de sonares activos o los sonidos de objetivos de sonares pasivos, deben ser vistos siempre en medio de un ruido de fondo o reverberación. Antes que cualquier otra función del sistema sea realizada, el sistema de sonar debería primero detectar la presencia de la señal en este ambiente; esto es, el sistema debe determinar, o ayudar a un observador humano a determinar, en todo caso que la señal ocurre dentro de algún intervalo de tiempo. Con un observador humano, el proceso de detección es el preámbulo de una decisión por parte del observador usando ciertos criterios, o si según su juicio, la señal realmente ocurrió, o no,

durante el intervalo de observación.

La relación señal-ruido es llamada umbral de detección y se refiere a la entrada de los terminales de la combinación receptor-pantalla-observador. Este es el término en las ecuaciones del sonar que satisface la igualdad en la ecuación cuando la señal es apenas detectada. Las palabras "umbral de detección" implican dos de los más importantes aspectos involucradas en la obtención de una señal del ambiente en el cual se encuentra: la función de detección misma y la existencia de un umbral en algún lugar cerca de la salida del sistema de recepción.

3.4.2 Definición de umbral de detección.

Los componentes de un sistema de sonar que se encuentran entre el transductor y la decisión de "objetivo presente o ausente" son: receptor, pantalla visual o dispositivo aural y el observador humano, quien basado en la información de pantalla toma la decisión requerida. Con estos antecedentes, el umbral de detección es definido como la relación, en dB, de la potencia de la señal en el ancho de banda del receptor con la potencia del ruido, en una banda de 1 Hz (esta convención para DT nos permite obtener una expresión tanto

para señales sinusoidales o de banda ancha, y también refleja la costumbre de expresar los niveles de ruido como niveles de espectro, es decir en bandas de ancho 1 Hz), medida en los terminales del receptor; este umbral es requerido para la detección en algún nivel preasignado de corrección de la decisión de detección. Si S_1 es la potencia de la señal en el ancho de banda del receptor, y N_1 es la potencia del ruido en una banda de 1 Hz, entonces:

$$DT = 10 \log \frac{S_1}{N_1} \qquad 3.8$$

Cuando una señal se encuentra de hecho presente en los terminales de entrada del receptor, las decisiones de presente o ausente son posibles. Cuando una señal está de hecho ausente, las mismas dos decisiones pueden hacerse. Así podemos formar un conjunto de 4 posibidades que pueden ocurrir; de este conjunto tenemos dos decisiones correctas y dos incorrectas. La probabilidad de que si una señal está presente, la decisión correcta, "señal presente", se haga es llamada la probabilidad de detección, p(D). La probabilidad de que si una señal está ausente, la decisión incorrecta, "señal presente", se haga se conoce como probabilidad de falsa alarma, p(FA). El

umbral de detección depende de estas dos probabilidades independientes.

Una alternativa, aunque poco satisfactoria, manera de describir el rendimiento de un sistema de procesamiento es por medio del término ganancia de procesamiento. La ganancia de procesamiento de un receptor está definida como la diferencia entre la relación señal-ruido en decibelios a la salida, cuando ambos están referidos a, o, medidos en el ancho de banda del receptor. Aunque este término es útil para la comparación de receptores, la ganancia de procesamiento describe el rendimiento de solamente una parte de la entrada de la cadena de decisión y tiene un valor limitado como concepto de trabajo para todo el sistema de detección.

3.4.3 El concepto de umbral.

El proceso de decisión requiere de la determinación de un umbral tal, que cuando éste es excedido, la decisión "objetivo presente" se hará. Si el umbral es colocado muy alto, solamente objetivos fuertes serán detectados. Si es colocado muy bajo, muchas "falsas alarmas" serán escuchadas. Con un valor alto de umbral, tanto la probabilidad de detección de objetivo y la probabilidad de

falsa alarma son bajas; con un umbral bajo, ambas probabilidades son altas. Si esto lo llevamos a la práctica, entonces tendremos una curva de probabilidad de detección y una curva de probabilidad de falsa alarma que son trazadas según se varía el valor de umbral. Esta curva es una de una familia de curvas llamada característica de operación del receptor, o curvas ROC por sus siglas en inglés. Estas curvas son estrictamente determinadas por las funciones probabilidad-densidad de la señal y ruido en los terminales de salida del receptor, donde la fijación del umbral es hecha.

3.4.4 Relación señal de entrada-ruido para detección.

En trabajos pioneros se mostró la relación de las curvas ROC con la relación señalruido en la entrada del receptor. Así se mostró que el receptor óptimo, definido como uno que satisface cierto criterio óptimo, es uno que calcula y presenta en su salida, la relación de probabilidad para cada entrada del receptor. Esta es la relación de la probabilidad que una amplitud dada de entrada representa señal más ruido (señal presente) con la probabilidad que ésta represente sólo ruido (señal ausente). Para un número de casos que involucran distintos grados de conoci-

miento acerca de la señal en un ambiente de ruido gaussiano, los investigadores Peterson y Birdsall calcularon las curvas ROC y relacionaron el índice de detección d_1 con la relación señal de entrada-ruido para un receptor óptimo. Dos casos extremos de estas experiencias fueron llamados caso I y caso II. El caso I se aplica para una señal conocida con exactitud, esto es, una de aquella forma de onda que como función del tiempo es conocida completamente. Para el caso I se encontró que:

$$d_1 = \frac{2E}{No} \qquad 3.9$$

donde:

d_1 = Indice de detección de curvas ROC

E = Energía de señal de entrada en la banda del receptor

No = Potencia de ruido en banda de 1 Hz

Si S_1 es la potencia de señal y T es su duración, luego $E = S_1T$, y

$$d_1 = 2T\frac{S_1}{No} \qquad 3.10$$

Donde S_1/No es la relación de la señal de

entrada-ruido referida a una banda de ruido de 1 Hz. Para este caso el umbral de detección es:

$$DT = 10 \log \frac{S_1}{No} = 10 \log \frac{d_1}{2T} \qquad 3.11$$

El caso II es aquel en que la señal es completamente desconocida en un ambiente de ruido gaussiano. Bajo las condiciones de pequeñas relaciones señal-ruido ($S_1/N \ll 1$) y tamaños grandes de muestra (gran producto ancho de banda-tiempo). Peterson y Birdsall encontraron que las mismas curvas ROC se aplican para el caso II, pero d_1 es tomado como:

$$d_1 = wT \left(\frac{S_1}{N}\right)^2 \qquad 3.12$$

Donde:

w = ancho de banda

S_1 = Potencia de la señal en el ancho de banda w

N = Potencia de ruido en el ancho de banda w

Resolviendo para S_1/N y convirtiendo a una banda de ruido de 1 Hz, obtenemos:

$$\frac{S_1}{No} = \frac{S_1 w}{N} = \left(\frac{d_1 w}{T}\right)^{1/2}$$

y el umbral de detección es:

$$DT = 10 \log \frac{S_1}{No} = 5 \log \frac{d_{1w}}{T} \qquad 3.13$$

3.4.5 Modificaciones a las curvas ROC.

Las curvas convencionales ROC se aplican para ciertas condiciones idealizadas y limitantes de señal y ruido. Estas condiciones incluyen una señal estable en ruido gaussiano estacionario, productos grandes de ancho de banda-tiempo, y el requerimiento que solamente una señal a la vez es detectada.

Cuando estas condiciones no se mantienen, se necesitan modificaciones a las curvas ROC convencionales. La forma en que las curvas son modificadas por los efectos mencionados no es materia del presente estudio y su correspondiente aplicación por lo que no vamos a profundizar en este tema.

3.4.6 Estimación del umbral de detección.

En la estimación del umbral de detección para un sonar en particular, primero es necesario decidir sobre una probabilidad de detección aceptable y una probabilidad de falsa alarma aceptable para el sistema bajo las condiciones en las cuales será usado.

Estas dos probabilidades están determinadas por los valores de dos respuestas correctas posibles y los costos de dos respuestas incorrectas. La teoría de decisión nos da un método para encontrar la relación de probabilidades y por tanto el umbral óptimo para los valores y costos involucrados en el proceso de decisión. Este proceso de optimización no va a ser tratado en el presente estudio. En los problemas actuales de diseño de sonar, estas cantidades son dificiles de estimar, y varían notablemente con las tácticas, estrategias y factores ambientales. A veces, p(D) y p(FA) son seleccionados por la combinación de experiencia e intuición y clara comprensión del uso del sistema de sonar que se está diseñando.

3.4.7 Efecto de duración y ancho de banda.

En el diseño de receptores y pantallas, el objetivo es lograr el mínimo umbral de detección consistentes con los requerimientos del sistema, entre los cuales están la probabilidad de detección y la probabilidad de falsa alarma compatibles con el uso práctico del sonar que se diseña. Las expresiones para DT dadas anteriormente muestran que, para un DT mínimo, es aconsejable usar la duración de señal más larga permitida por las

consideraciones del sistema. Para sonares activos, esto siginifica la longitud de pulso más largo; y para sonares pasivos significa la observación más larga en tiempo, posible, antes que se haga la decisión de detección. En sonares activos, la longitud de pulso máxima permitida está determinada usualmente por la aparición de la reverberación como ruido de fondo que enmascara el eco, por tanto ningún incremento en la relación eco-reverberación está dado por el incremento de la longitud de pulso. El uso de pulsos largos sin una correspondiente acumulación progresiva del ambiente coherente de reverberación es logrado en los sonares usando ruido seudo-aleatorio para transmisión y correlacionadores recortados y comprimidos en tiempo para recepción; tales sonares son útiles contra ambientes reverberantes u objetivos de bajo desfase doppler. En los sonares pasivos, tiempos de largas observaciones están limitados por la memoria del sistema de procesamiento y la pantalla, por el cambio de objetivos sonoros sobre un largo período de tiempo, y por la necesidad de lograr una decisión inmediata de detección.

Concerniente al ancho de banda, se observa que el umbral de detección para señales completamente

conocidas es independiente del ancho de banda (caso I). Para el caso II, se puede ver que el DT mínimo es obtenido cuando el ancho de banda mínimo posible es usado, dado que la potencia de la señal en el ancho de banda del receptor permanece constante.

El umbral de detección, definido como una relación de potencia o intensidades, no es enteramente apropiada como una medida del rendimiento de todos los tipos de procesadores. Esta es algunas veces incompleta, ya que ignora propiedades de señal y ruidos distintas a la potencia sobre un período de tiempo. Un ejemplo es la degradación del rendimiento de los sonares de correlación causada por patrones de propagación múltiple en el mar. Tales patrones múltiples tienden a destruir la correlación entre la señal recibida y la señal transmitida, aun cuando pueden salir sin alteración, o incluso mejorada, la intensidad de la señal. En general, el umbral de detección debería definirse en términos del sistema de procesamiento particular empleado, así como las apropiadas propiedades de la señal y ruido ambiente.

3.4.8 Detección auricular.

Históricamente el oído ha sido el dispositivo de detección usado en el sonar en los primeros tiempos. Antes del uso de amplificadores y la perfección de las pantallas visuales, el oído de un observador humano proveía el único medio de detección de señales de sonar. En años recientes, hay la tendencia de reemplazar el oído humano por otros dispositivos de detección que tienen un mayor tiempo de integración así como mayor memoria que provee un registro de eventos pasados. Todavía el oído, como un detector y analizador de señales tonales en ambientes ruidosos, es un dispositivo compacto y eficiente que todavía tiene un lugar en los sonares modernos. Sorprendentemente, su rendimiento como un detector de señales sinusoidales se aproxima a la de un detector óptimo. Además, tiene otras características notablemente complejas, que están todavía bajo intensivo estudio.

En la literatura sobre el tema, la relación señal-ruido para detección auricular, es llamada frecuentemente reconocimiento diferencial.

3.5 TRANSDUCTORES HIDROACUSTICOS.

3.5.1 Introducción.

En esta parte nos concentraremos en los transductores usados para la producción y recepción en líquidos. Incluyen:

a) Transductores ultrasónicos usados en trabajos experimentales para la investigación de propagación de ondas acústicas de alta frecuencia en líquidos y también en la medición de propiedades elásticas de los sólidos.

b) Transductores ultrasónicos usados en la industria como potentes microagitadores de líquidos para propósitos tales como desgasificación, emulsionamiento y coagulación.

c) Transductores de sonar usados en operaciones navales para la producción y recepción de sonidos bajo el agua con el fin de detectar la presencia de objetos sumergidos, comunicación entre submarinos sumergidos, determinación de la profundidad del suelo marino, detección de bancos de peces, etc.

Debido a la alta característica específica de la impedancia acústica de los líquidos al compararla

con el aire, los elementos vibrantes de los transductores diseñados para uso en líquidos deben ser capaces de producir grandes fuerzas con pequeños desplazamientos con el fin de acoplar la impedancia del líquido en forma eficiente. El tipo de elemento más usado para estos transductores depende del efecto piezoeléctrico para su acción. Los vibradores piezoeléctricos comúnmente usados incluyen algunos construídos de cristales de cuarzo, de sal Rochelle, y fosfato dihidrógeno de amonio (ADP), y también de aleación de materiales cerámicos tales como titanato de bario y dieléctricos similares que poseen notables propiedades ferroeléctricas. Los elementos vibrantes de un segundo grupo de transductores utilizan el fuerte efecto magnetoestrictivo del níquel y ciertas de sus aleaciones. La acción de un tercer tipo de transductores depende de la fuerza de atracción variable entre un electromagneto, en el cual hay una bobina por la que fluye una corriente alterna, y una placa metálica rígida que está en contacto con el líquido.

3.5.2 Cristales.

Los materiales cristalinos son caracterizados por la perioricidad en su arreglo interatómico. Esta perioricidad existe en tres direcciones indepen-

dientes, pero la distancia entre configuraciones atómicas similares puede variar en las distintas direcciones. Debido a la estructura regular de los materiales cristalinos, algunas de sus propiedades físicas son independientes de la dirección debido a su organización estructural aleatoria. Un cristal ideal está compuesto de celdas unitarias idénticas, cada uno situada en forma similar con respecto a sus vecinos, para formar el enrejado del cristal. Los filos de las celdas son paralelos al conjunto de ejes conocido como ejes cristalográficos.

Para cualquier cristal dado, hay direcciones en las que los planos pueden dibujarse como que están pobladas con puntos correspondientes de celdas unitarias regularmente arregladas en filas y columnas. La comparación de cristales de la misma especie muestra que los ángulos entre las caras correspondientes son constantes, independientemente de que tanto los cristales varían en tamaño y en desarrollo relativo de las caras. De acuerdo al principio de Neumann, cuando la simetría característica de la forma exterior de un cristal es conocida, la simetría de sus propiedades físicas se puede predecir.

Las caras de los cristales están especificadas en

términos de sus interceptores sobre tres o cuatro ejes cristalográficos. En cada sistema, las direcciones son elegidas para simplificar, lo más posible, las especifiaciones de las caras.

Si un eje cristalográfico es único, es comúnmente designado como el eje c. Si el cristal muestra un efecto piroeléctrico o piezoeléctrico en la dirección del eje c, el lado positivo del eje c está definido como el lado en el cual una carga positiva aparece cuando el cristal es calentado o estrechado en la dirección del eje c.

3.5.2.1 Los efectos piezoeléctricos, electroestrictivo y piroeléctrico.

La aparición de cargas eléctricas de polaridad opuesta que son producidas sobre los extremos de un cristal de turmalina calentado fue establecida en 1756 por Aepinus, y en 1824 Brewster introdujo el término pyroelectricidad para designar este fenómeno. Lord Kelvin postuló un estado de polarización permanente para cristales pyroeléctricos y propuso la hipótesis de que el efecto pyroeléctrico es simplemente el coeficiente de temperatura de esta polariza-

ción. Investigaciones posteriores de este fenómeno tienden a confirmar la hipótesis de Lord Kelvin.

Como resultado de los estudios de la relación entre el fenómeno pyroeléctrico y la simetría del cristal hechos por Pierre Curie, Coulomb sugirió que la electricidad podría ser producida por la presión. En 1880, los hermanos Curie demostraron que ciertos cristales, cuando se comprimen en direcciones particulares, desarrollan cargas positivas y negativas sobre ciertas porciones de sus superficies, las cargas son directamente proporcionales a la presión. Los Curie originalmente creyeron que aquí había correspondencia uno a uno entre los efectos eléctricos causados por temperatura y por deformación mecánica. Sin embargo, Hankel determinó que los Curie habían descubierto un nuevo efecto y propuso el nombre de piezoelectricidad para el mismo.

El efecto piezoeléctrico directo es la polarización eléctrica producida por el esfuerzo mecánico en cristales pertene-

cientes a ciertas clases. La polarización inducida de esta manera es proporcional al esfuerzo y cambia sus señales con él.

El efecto piezoeléctrico de conversión es el esfuerzo mecánico producido por la polarización eléctrica en cristales de cierto tipo. El esfuerzo es proporcional a la polarización eléctrica y cambia sus señales con él. Los hermanos Curie mostraron que el coeficiente piezoeléctrico del cuarzo era el mismo tanto para el efecto directo como para el de conversión.

Cuando un dieléctrico es sometido a un campo eléctrico, sufre una deformación. Esta deformación, comúnmente llamada electroestrición es independiente de la dirección del campo y es proporcional al cuadrado de la inducción. Por tanto, no cambia su señal (signo) con la inducción eléctrica.

El efecto electroestrictivo se distingue del efecto piezoeléctrico de 2 maneras: es común a todos los materiales y usual-

mente es mucho más pequeño que el efecto piezoeléctrico. De hecho, es tan pequeño, que oridinariamente puede ser ignorado, aún cuando siempre está presente al manifestarse el efecto piezoeléctrico. Una excepción notable sucede con el cerámico titanato de bario, el cual tiene un efecto electroestrictivo grande en comparación con el efecto piezoeléctrico.

3.5.2.2 Materiales piezoeléctricos útiles para transductores.

El cuarzo (hexagonal) y la sal de Rochelle (monoclínico) han sido usados en muchas aplicaciones para transductores acústicos bajo el agua en el pasado. Recientemente el ADP (tetragonal fosfato dihidrógeno de amonio) y el sulfato de litio (monoclínico) han estado desplazando al cuarzo, por ser item crítico, y a la sal de Rochelle, porque sus cristales no toleran temperaturas tán altas como aquellas a las que el equipo es expuesto durante su transportación y almacenamiento.

Actualmente hay facilidades para la

obtención de cristales ADP a partir de soluciones, consecuentemente este material no es un item crítico.

Los cristales turmalinos (hexagonal) son empleados a veces en transductores para ser usados como standars de sensitividad, debido a que son relativamente insensibles a cambios en la temperatura.

En años recientes, el cerámico titanato de bario ha llegado a usarse ampliamente. Aunque en este material se usa el efecto electroestrictivo, el mismo es operado en una condición de polarización.

En contraste con los cristales, el material cerámico puede moldearse de cualquier forma deseada, pero tiene una alta dependencia, con la temperatura, de la constante piezoeléctrica. Algunas mejoras de estas características se han logrado con el uso de aditivos en la cerámica.

3.5.2.3 Factor de calidad de vibradores piezoeléctricos.

Por analogía con la definición similar

del factor de calidad o Q de un inductor, definimos el Q de un vibrador piezoeléctrico, como:

$$Q = \frac{W_1 L_1}{R_R + R_M} \qquad 3.14$$

Donde:

W_1: frecuencia resonante fundamental de vibración longitudinal del cristal

L_1: inductancia del cristal

R_R: impedancia de carga (puramente resistiva)

R_M: impedancia asociada con las pérdidas mecánicas en un vibrador de cristal.

3.5.2.4 Mosaico de transdutores piezoeléctricos.

Un método común de ensamblaje en mosaico de los vibradores piezoeléctricos, para transductores de sonares tipo "search-ligth" se muestra en la figura 3.1.

Los elementos del mosaico están pegados a una placa metálica posterior la cual los sostiene firmemente y los mantiene alineados. Esta placa es una parte integrante del sistema vibrante. Sus dimensiones y el tipo de material

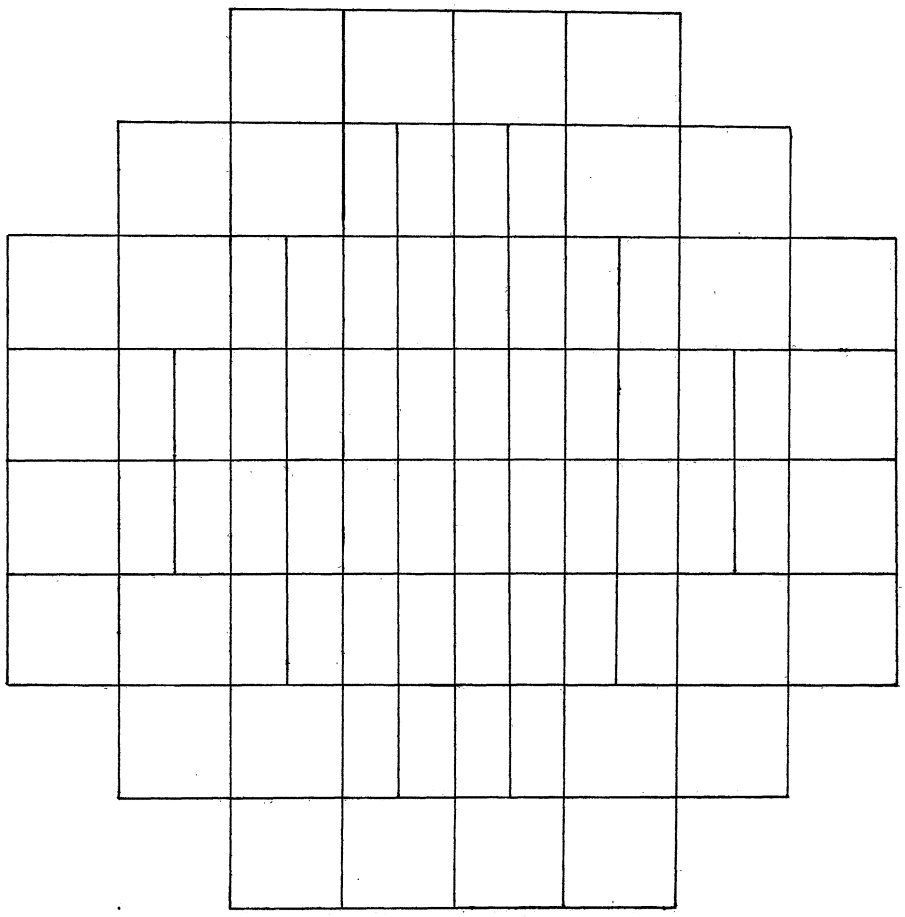


FIGURA 3.1 Arreglo tipo mosaico de elementos vibradores.

influirán sobre la frecuencia de resonancia, el factor de calidad mecánico y la impedancia eléctrica de entrada del transductor. Sin embargo, cuando su grosor se aproxima a un cuarto de la longitud de onda, estará para todos los propósitos prácticos, firmemente agarrado a los vibradores y prevendrá cualquier movimiento longitudinal de ellos en el sitio donde se encuentran pegados a la placa. Normalmente, el mosaico de vibradores individuales son manejados eléctricamente en paralelo y consecuentemente, la admitancia de entrada de N de tales vibradores es N veces la de un solo vibrador. Debido a su solubilidad en el agua, los cristales de ADP y sal Rochelle deben operar en aceite, de uso eléctrico, en el cual el aire y el vapor de agua han sido removidos. La cara activa del transductor y el aceite que lo rodea están libres del agua del medio por medio de una ventana sonora transparente hecha de un caucho "rhoc" cuya impedancia característica está acoplada con la del agua.
De vez en cuando, los transductores son construidos de forma que los vibradores

en la parte más saliente del mosaico son más anchos que aquellos que están en la región central. Cuando se aplica el mismo voltaje a todos los vibradores del transductor, aquellos de la región exterior manejarán una menor amplitud. Se dice que ese transductor está "oscurecido" y producirá un patrón de haz que tiene lóbulos inferiores menores que aquel que es excitado o manejado uniformemente sobre toda su superficie. Es posible construir un transductor tipo mosaico con vibradores de la mitad de la longitud de onda, tal como se muestra en la figura 3.2b.

Aquí se observa que ambos extremos de cada vibrador están relativamente libres para vibrar. Sin embargo, solamente el extremo en contacto con el aceite radia sonido. El factor de calidad mecánico Q, de estos vibradores es el doble del de los vibradores de un cuarto de onda. Además, el ancho de banda de un transductor del tipo mosaico o sandwich puede controlarse a través del grosor de la placa.

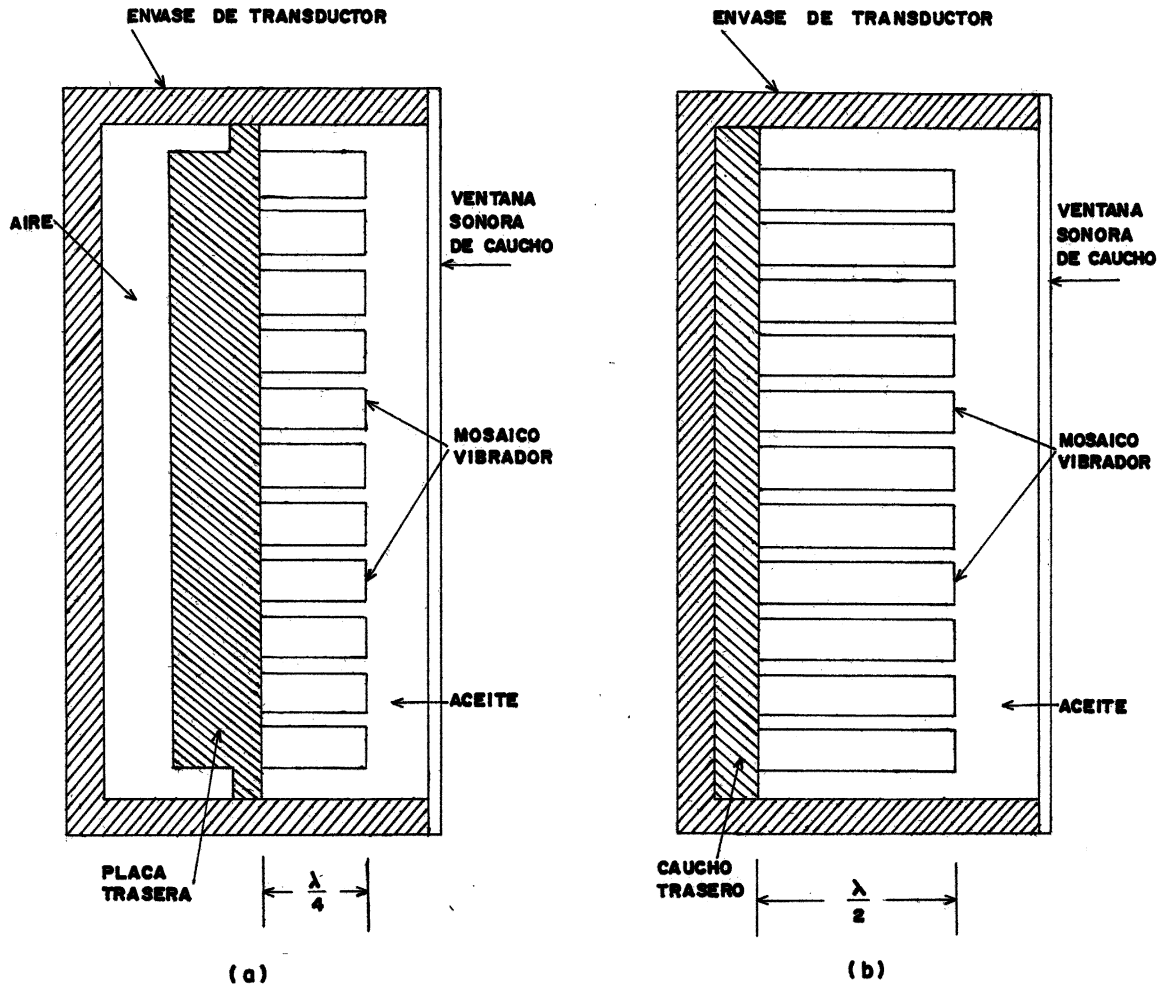


FIGURA 3.2 Transductores tipo mosaico

(a) Vibradores de cuarto de onda con placa trasera metálica.

(b) Vibradores de media onda con absorbedor de presión trasero de caucho.

3.5.3 Elementos magnetoestrictivos.

El término magnetoestricción describe tanto el cambio en dimensiones de un material ferromagnético, cuando es colocada en un campo magnético, como el cambio en magnetización que ocurre cuando las dimensiones del material son cambiadas por una fuerza externa. El fenómeno de magnetoestricción se presenta no sólo en metales ferromagnéticos (como hierro, níquel y cobalto) sino también en muchas aleaciones de estos tres metales y otras aleaciones que contienen otros metales.

El fenómeno magnetoestrictivos se manifiesta en los siguientes cuatro efectos:

a) El efecto JOULE es el cambio en longitud de un material ferromagnético paralelo al eje del flujo magnético que ocurre cuando el flujo es cambiado. En la mayoría de las aplicaciones del efecto JOULE, es el cambio en longitud el que se utiliza, aunque está acompañado por cambios dimensionales transversales y en volumen.

b) El efecto Villari es el cambio en la magnetización de un material en la presencia de un campo magnético, el cual es causado por la

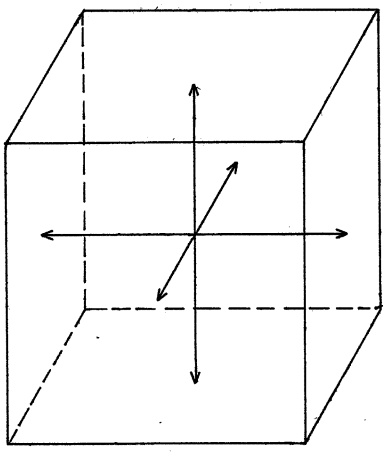
aplicación de un esfuerzo externo.

c) El efecto WERTHEIM es el desarrollo de un voltaje transiente entre los extremos de un alambre, en un campo magnético longitudinal, según como el alambre es enrollado.

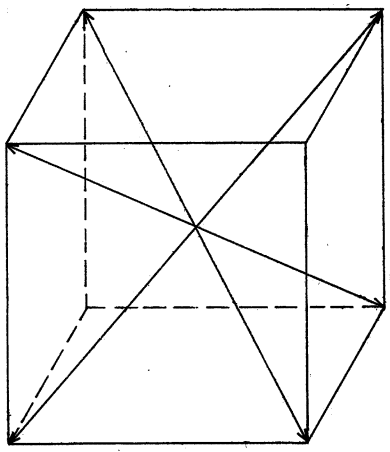
d) El efecto Wiedemann es la torsión producida en un alambre en un campo magnético longitudinal cuando una corriente fluye a través del alambre.

En materiales ferromagnéticos, los campos magnéticos de los átomos son paralelos entre sí dentro de pequeños volúmenes, los cuales son llamados dominios, cada dominio es siempre magnetizado a saturación, pero el campo magnético en un dominio dentro de un cristal cúbico puede tomar una de seis direcciones. Las posibles direcciones de magnetización para hierro y níquel se muestran en la figura 3.3.

Si no está presente ningún campo magnético externo, los dominios en el cristal estarán orientados de forma que el campo magnético neto del cristal es cero. Sin embargo, los ejes de los cristales en materiales policristalinos son usualmente orientados en forma aleatoria.



HIERRO



NIQUEL

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
1958
GUAYAQUIL
BIBLIOTECA

FIGURA 3.3 Direcciones de magnetización de dominios de hierro y níquel.

Si se aplica un campo magnético débil a una muestra de material ferromagnético, algunos de los dominios serán favorecidos con la orientación, creciendo ligeramente a expensas de los otros. Conforme se incrementa el campo, estos dominios crecen hasta que cada cristal se convierte en un único gran dominio a lo largo de la posible dirección de magnetización que en la mayoría coincide en forma cercana con la dirección del campo, y este cambio es la manifestación del efecto magnetoestrictivo.

Alguno de los materiales magnetoestrictivos aumentan su longitud en presencia de un campo magnético longitudinal, pero otros disminuyen en longitud.

La magnetización alternante de una muestra de material magnetroestrictivo producida por una corriente alterna sinusoidal que fluye en una bobina causa que la muestra vibre a una frecuencia que es el doble de la corriente alterna, ya que los cambios de longitud de la muestra en la misma dirección no dependen de la dirección del campo magnético. Para evitar vibraciones al doble de la frecuencia de la corriente alterna, la muestra debe estar magnéticamente polarizada con un flujo magnético mayor que el valor pico

del flujo producido en la muestra por la corriente alterna. Esta polarización puede ser producida por un magneto externo permanente, inducción residual en el material o corriente directa en una bobina alrededor de la muestra. La frecuencia resonante de un material magnetoestrictivo es:

$$f_R = \frac{c}{2l} \qquad 3.15$$

Donde:

c: velocidad del sonido en el material

l: longitud del elemento

3.5.3.1 Transductores magnetroestrictivos.

Para lograr eficiencia, los transductores magnetroestrictivos de sonar son operados usualmente en o cerca de frecuencia de resonancia de los elementos que los excitan. Esto es requerido, ya que el factor calidad, o Q asociado con las características del ancho de banda de sus curvas de repuesta de transmisión, usualmente excede a 50. Un tipo común de transductores emplea las vibraciones longitudinales de tubos o laminaciones pegadas a una placa que está en contacto con el agua. Para

una más eficiente transferencia de energía desde los elementos de transducción hacia el agua es esencial que la última presente la impedancia acústica óptima al movimiento del excitador. Un diseño "tubo y placa", como se muestra en la figura 3.4, provee un método para lograr el acoplamiento. Aquí los elementos de manejo son tubos de níquel, cada uno tiene una longitud igual a un cuarto de la longitud de onda (en el níquel) del sonido a ser radiado. Cientos de estos tubos se emplean en un solo transductor, un extremo de cada tubo se deja libre, y el otro está colocado en un lado de una placa de acero circular de dimensiones tales que la frecuencia de resonancia de todo el sistema es cercana a la de los tubos. Cada tubo está rodeado por su propia bobina de manejo, y todas las bobinas son manejadas en fase por la corriente que viene de un amplificador de potencia. Los campos de polarización son suministrados ya sea por una componente DC de la corriente de manejo o más comúnmente por magneto permanentes montados dentro del ensamble a prueba del agua que

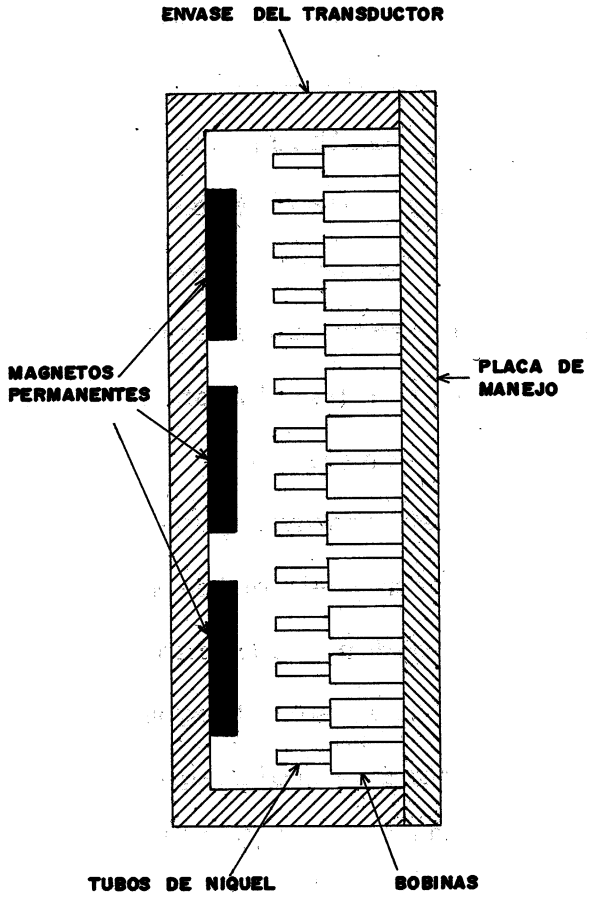


FIGURA 3.4 Corte de sección de un transductor magnetoestrictivo típico.

contiene a los tubos. Las fuerzas alternantes ejercidas sobre la placa por la reacción a los esfuerzos en los elementos excitados son transmitidos por la placa al agua adyacente. En otros diseños, piezas laminadas son usadas como elementos a excitarse en lugar de tubos, pues se evitan las piezas sólidas debido a sus altas pérdidas por corriente eddy. Los transductores que usan piezas laminadas como elementos vibradores son también diseñados para que el extremo libre de cada vibrador haga contacto directo con el agua adyacente a través de un fino recubrimiento de caucho que lo rodea. Un mosaico de estas piezas laminadas puede montarse sobre unas estructuras de soporte de tal manera que se producen superficies radiantes de forma plana, cilíndrica o esférica.

Las ventajas primarias de los transductores magnetroestrictivos, sobre los transductores piezoeléctrivos de dimensiones similares, son su mayor robustez y capacidad de manejo de mayores potencias. También tienen un factor de calidad Q más

alto y una curva de resonancia correspondiente angulosa, lo cual es ventajoso en la reducción de lo efectos disturbantes del ruido de fondo del ambiente, y también restringe su rango de frecuencia de operación eficiente a un ancho de banda relativamente estrecho. Una desventaja del transductor del tipo magnetroestrictivo es la necesidad de asegurar la presencia de una polarización permanente de magnitud apropiada con el fin de tener condiciones de operación óptimas.

3.5.4 Métodos de excitación de proyectores sonoros electroacústicos.

Los proyectores sonoros electroacústicos pueden ser usados para generar ya sea señales acústicas omnidireccionales o direccionales. La intensidad sonora desarrollada en un rango específico a lo largo del eje acústico de un transductor es una función de la potencia eléctrica de entrada al transductor y la eficiencia y directividad del transductor. Ya que el costo y peso del equipo eléctrico requerido para excitar un transductor se incrementa rápidamente con el incremento de los requerimientos de potencia, usualmente se necesita un esfuerzo para trabajar con proyecto-

res sonoros que tienen una directividad máxima consistente con los requerimientos del campo sonoro. Si, por ejemplo, la irradiación de un cono de ángulo sólido limitado es todo lo que se necesita, un proyector sonoro con un patrón óptimo de directividad se usa para minimizar la cantidad de potencia requerida para generar el campo deseado.

La directividad del transductor usado en una aplicación particular puede ser limitada ya sea por los requerimientos del problema o por el "estado del arte" en el diseño del transductor. Por ejemplo, en algunas aplicaciones, se podría generar un campo sonoro en el cual la intensidad es uniforme en todos los puntos equidistantes del transductor en un plano horizontal que lo contiene. Para aplicaciones de este tipo, un transductor cerámico tipo anillo o magnetoestrictivo podría usarse; y el ancho del patrón en el plano vertical, y por tanto la directividad, puede ser controlado variando la longitud del anillo. En aplicaciones donde la señal máxima va a transmitirse en una dirección dada, un transductor con patrón cónico sería necesario. Con tal transductor, el nivel de presión sonora en un rango dado para una entrada dada de potencia eléctrica al

transductor es directamente proporcional a la raíz cuadrada del factor directividad.

Los transductores pueden ser excitados contínua o discontínuamente con tonos puros o ruidos. El nivel de potencia máximo al cual un transductor particular puede excitarse está limitado ya sea por el transductor o por la cavitación inducida en el medio. La limitación del nivel de potencia de los elementos de un transductor cerámico o de cristal puede determinarse por el voltaje al cual el rompimiento eléctrico de los elementos ocurre, y de los elementos magnetroestrictivos puede determinarse por la despolarización de los magnetos polarizantes en los elementos del transductor. Para excitación contínua de un transductor localizado cerca de la superficie del agua, la cavitación es a veces el factor que limita la potencia acústica que es generada.

Sin embargo, si la potencia acústica es generada en pulsos cortos, el comienzo de la cavitación es retrasado, y la limitación del nivel de potencia es más apropiada que sea determinada por las características limitantes de los elementos del transductor.

El método más simple de excitación de un trans-

ductor electroacústica con pulsos es ocasionar que un condensador descargue a través de él. El transductor actúa como un filtro y causa que la señal radiada contenga una banda de frecuencia centrada en la frecuencia de resonancia del transductor. La longitud del pulso generado depende del factor de calidad, Q, del transductor y la naturaleza del circuito compuesto del condensador de almacenamiento, el transductor y el cableado; el ancho de banda del espectro acústico radiado depende del Q del transductor.

3.5.5 Consideraciones mecánicas de diseño para proyectores sonoros electroacústicos.

En el diseño de un proyector sonoro electroacústico, los requerimientos del patrón de transmisión determinan el arreglo geométrico y dureza relativa de los elementos; el problema particular de transmisión usualmente determina si se usa elementos cerámicos, de cristal o magnetoestrictivos.

Si el proyector sonoro se lo produce para usos prácticos en trasnmisiones bajo el agua, debe montarse de tal forma que los elementos acústicos estén protegidos de la exposición directa al agua. Si, además, el transductor va a ser usado

a grandes profundidades, éste debe diseñarse para prevenir cualquier alteración apreciable de sus características acústicas debido a la presión externa a la cual está sujeto.

De los tres tipos, los elementos magnetoestrictivos son, en general, los más fuertes. Además son muy estables sobre largos períodos de tiempo, aunque sus características electroacústicas varían en algo con la temperatura. Ya que la impedancia de los elementos de un transductor magnetoestrictivo es generalmente baja, ellos pueden usarse con fuentes de alta potencia acústica sin el requerimiento de excesivos voltajes de excitación.

Los elementos de titanato de bario, los cuales tienen una impedancia intermedia, tienen una ventaja de ser moldeables en cualquier forma conveniente. Sin embargo, no son tan estables como otros elementos, ya que sus características varían en forma relativamente amplia con los cambios de temperatura y tienden a cambiar con el tiempo.

Algunos elementos de cristal, particularmente cristales de Sal Rochelle, pueden ser destruidos cuando se almacenan a altas temperaturas. Ya que

los elementos de cristal son caracterizados por una alta impedancia, se necesitan voltajes de excitación altos si se va a radiar una potencia acústica alta; este hecho puede traer dificultades en algunas aplicaciones debido a requerimientos de aislamiento.

En la mayor parte de las aplicaciones, sin embargo, es factible construir el proyector sonoro ya sea de cristal, cerámico o material magnetoestrictivo; la elección se hace en base de cual material se adapta mejor al problema particular de diseño mecánico que se trate. Ya que los proyectores sonoros no son usualmente usados como standards, la estabilidad no es tan importante como en los hidrófonos; por lo tanto los elementos magnetoestrictivos y de titanato de bario son más usados que los elementos de cristal.

C A P I T U L O 4

APLICACIONES EN EL MAR ECUATORIANO

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
1958
GUAYAQUIL
BIBLIOTECA

4.1 ANTECEDENTES.

4.1.1 Introducción.

Predicciones y propuestas para el desarrollo futuro y uso de la acústica pesquera deben estar relacionados a las necesidades de los gerentes pesqueros. La comprensión de los factores que influyen en el agrupamiento y homogeneidad en las poblaciones de peces depende en gran grado del éxito en la descripción del mismo proceso en cantidades menores. La habilidad para examinar y estudiar el zooplancton in-situ en escalas pequeñas ha sido severamente restringida por las limitaciones inherentes de las técnicas de muestreo tradicionales (redes y bombas).

La variabilidad en el tamaño de los cardúmenes de peces tiene un impacto importante en la cantidad de alimentación que el hombre toma del mar. Las fuerzas que controlan el tamaño y distribución de una pesquería son numerosas y diversas, van desde cambios climáticos a eventos localizados y de corta duración como la intensidad local de capturas o la contaminación de un habitat crítico. El

impacto de la actividad del hombre sobre las pesquerías ha hecho imperativo los esfuerzos contínuos y extensivos para manejar estos recursos en forma adecuada. Este manejo efectivo requiere acumulación de datos en el transcurso del tiempo y tanto el tamaño del recurso como su respuesta a los cambios naturales en su medio ambiente por un lado y los cambios producidos por el hombre por otro lado.

En el pasado, el uso relativamente limitado del espectro de frecuencia, ha limitado la aplicación de la acústica pesquera. Sin embargo, con el fin de mejorar aplicaciones y precisión de los datos investigados reduciendo los errores de medición debido al comportamiento del pescado y comprendiendo mejor las distribuciones espaciales e inhomogeneidades de otros grupos agregados de peces, es necesario extender la utilización de ambos extremos del espectro de frecuencia; y esto es lo que se ha estado buscando en las aplicaciones comerciales recientes al ir logrando cierto tipo de especialización siguiendo este concepto.

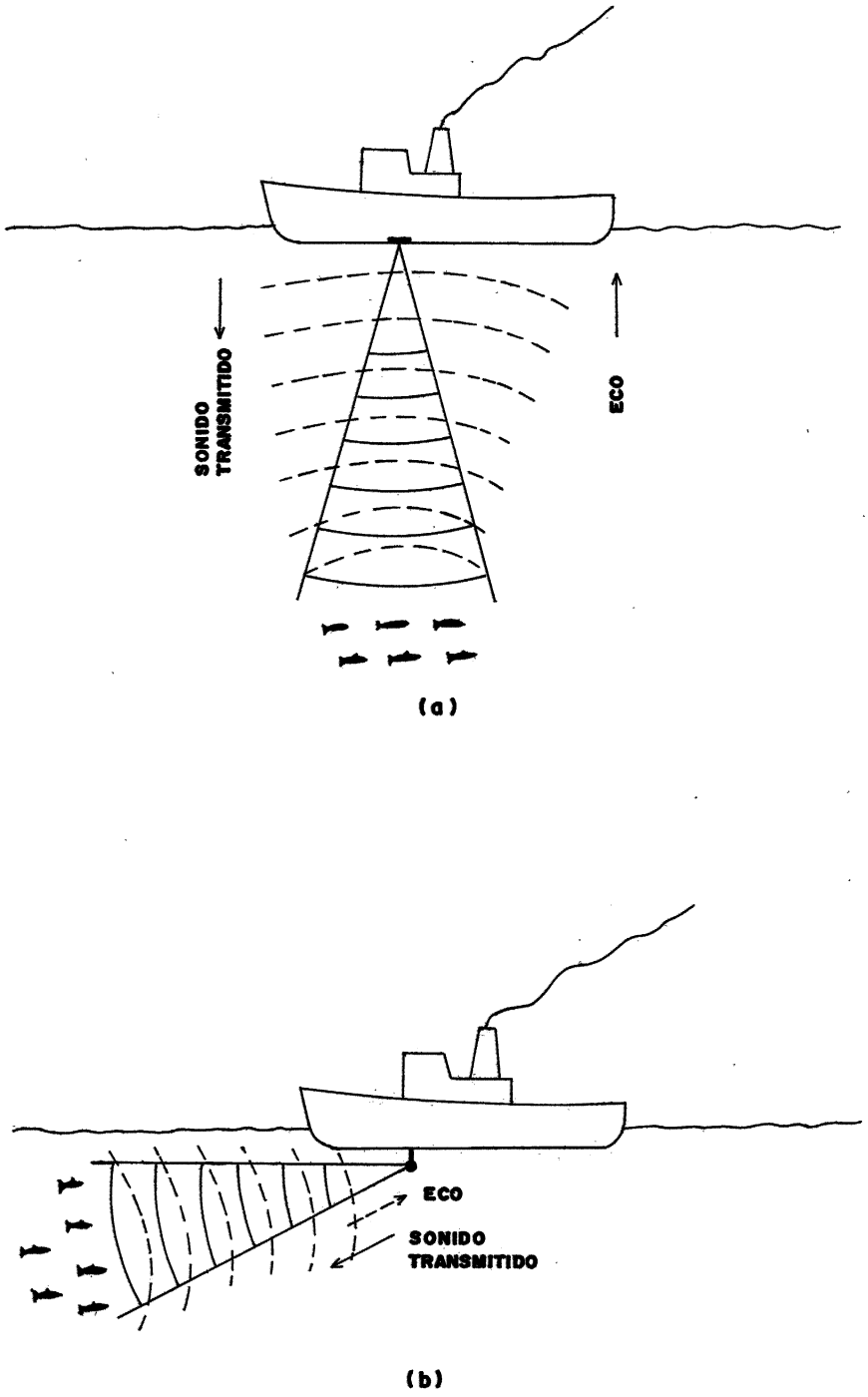
4.1.2 El sistema de sonar.

Hablando en forma general, un sistema de sonar es un aparato usado para obtener información sobre

los objetos bajo el agua y eventos por la transmisión de ondas sonoras y la observación de los ecos de retorno. Las ondas sonoras producidas por los ecosondas y sonares usados para detección de peces y estimación de biomasa son de la misma naturaleza que aquellas producidas por instrumentos musicales, vehículos en movimiento, órganos humanos del habla, etc. Sin embargo, el oído humano tiene un rango restringido de percepción sonora, limitado aproximadamente a frecuencias entre 16 Hz y 20 KHz. Los sistemas de sonar usados en trabajos de pesquería produce ultrasonidos, esto es sonidos con una frecuencia usualmente entre 20 KHz y 500 KHz, los cuales no son detectables por el oído humano.

Un aparato usado para la detección e investigación de objetivos bajo el agua por medio de sonidos transmitidos y ecos retornados es llamado un sistema activo de sonar o simplemente un sistema de sonar. Los usuarios del sistema de sonar son los navegantes, pescadores e investigadores marinos, quienes han adoptado los términos siguientes:

a) Un sistema que transmite verticalmente es llamado un ecosonda (figura 4.1.a).
b) Un sistema que transmite horizontalmente es



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
1958
GUAYAQUIL
BIBLIOTECA

FIGURA 4.1 Detección y localización de peces por:

(a) Ecosonda

(b) Sonar.

llamado un sonar (figura 4.1.b).

El funcionamiento de ambas clases de aparatos es el mismo. Por lo que cuando se discute la teoría básica de acústica y el funcionamiento del equipo acústico en general, usamos el término "sistema de sonar"; y cuando se discute el uso práctico de un equipo en particular se usan los nombres de conocimiento común y comercial: ecosonda, sonar, etc.

El funcionamiento de los sistemas de sonar usados en trabajo pesquero es bastante simple. El sonido es generado en pulsos discretos, y después de cada pulso el sistema espera un cierto período para recibir ecos de cualquier objetivo bajo el agua. Un pulso se genera cuando un timer (usualmente parte del dispositivo de pantalla) activa un transmisor eléctrico por un período fijo de tiempo según el alcance. La oscilación eléctrica del transmisor es convertida mecánicamente en oscilaciones de presión, es decir ondas sonoras, en el agua en la cara vibrante del transductor, el cual continúa generando sonido hasta que el timer apaga el transmisor. El resultado es un pulso sonoro de una cierta duración viajando a través del agua lejos de la cara del transductor. Cualquier objeto en el

patrón de este pulso retornará un eco al transductor, el cual en el modo de espera realiza lo contrario a su función en el período de transmisión, esto es, convierte las oscilaciones de presión en su cara en oscilaciones eléctricas que llegan a un receptor, son amplificadas y luego convertidas en algún signo visible sobre el dispositivo de pantalla, que puede ser en papel o imagen de video.

Algunos términos técnicos son comúnmente usados en la descripción de las características operativas de sistemas de sonar. La frecuencia (o frecuencia de operación) es la frecuencia de oscilación del transductor en el modo de transmisión, y consecuentemente también de las ondas sonoras generadas en el agua. La tasa de repetición de pulso es el número de pulsos (o transmisiones) enviados por unidad de tiempo, el cual puede ser de 10 a 100 por minuto dependiendo de la profundidad o distancia a ser cubierta. La duración del pulso es el intervalo de tiempo durante el cual el transductor vibra en la generación de cada pulso, típicamente cerca de un milisegundo.

El procesamiento de ecos retornados por un objetivo requiere la traducción de la onda sonora reflejada que alcanza la cara del transductor, en

una forma adecuada para poder obtener información del objetivo. Por ejemplo, una información importante a ser obtenida del sondaje del eco es la presencia o ausencia de objetivos. La presencia de un objetivo da un alto pico de voltaje en los terminales del transductor y luego en el receptor, comparado con el bajo voltaje del ruido ambiente, produciendo una marca en la pantalla. Es esencial que los usuarios comprendan los principios básicos de operación del sistema con el fin de hacer uso eficiente del sistema y buenas interpretaciones de los resultados y obtener información útil de los cardúmenes de pesca, en aplicaciones comerciales, y datos exactos sobre abundancia de especies o cálculo de biomasa, en aplicaciones científicas de estimación de recursos y explotación racional.

4.1.3 Ondas acústicas y peces.

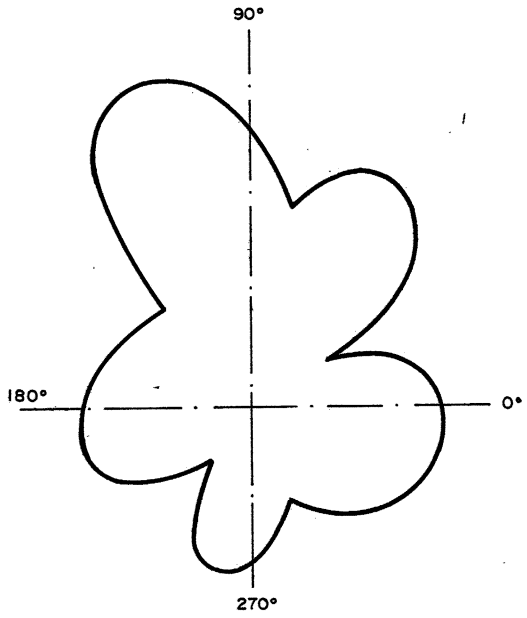
Cuando una onda acústica golpea un pez, una proporción de la energía es reflejada y es llamada el eco. Los factores de los que esta cantidad depende no son totalmente claros, pero en esta sección consideraremos algo de la teoría básica.

Cuando una onda plana encuentra una superficie de

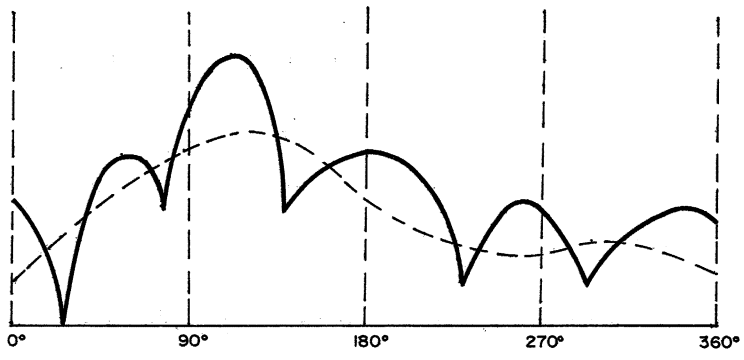
dos medios diferentes, el agua y el cuerpo del pez, ésta puede ser reflejada parcialmente. Si el pez tiene dimensiones del mismo orden que la longitud de la onda acústica, la intensidad reflejada en una dirección particular depende de la relación de impedancia del agua y el pez, también de la forma y orientación del pez.

Para comenzar asumamos que el pez permanece con su misma forma mientras sus interacciones con las ondas acústicas ocurren. Así podemos fijarnos en el patrón direccional cuando la orientación del pez cambia con el tiempo. Si un eje de referencia arbitraria pasa a través de un pez, cuya orientación comienza a variar y la amplitud del eco es medida como función de la dirección de su eje, el resultado puede ser graficado como un diagrama polar. Un trazo hipotético, y a manera de ejemplo, se muestra en la gráfica 4.2.a; este gráfico está hecho en un plano solamente, el diagrama completo es tridimensional. La gráfica 4.2.b nos muestra el mismo resultado que antes pero trazado sobre una escala lineal angular.

Si el pez rotase establemente en el plano de la gráfica 4.2, la amplitud del eco fluctuaría y el efecto sería modular la onda de eco. Modular significa "imprimir información sobre" tal como



GRAFICA POLAR
(a)



GRAFICA LINEAL
(b)

FIGURA 4.2 Respuesta de un pez conforme su orientación con respecto a la fuente.

lo observamos en la gráfica 4.3, donde las fluctuaciones de la amplitud de onda acústica de alta frecuencia son debidas a la información acerca del número y tamaño relativo de las protuberancias, o lóbulos del patrón direccional.

Una propiedad fundamental de estos patrones es la cercanía de los lóbulos y por tanto la tasa a la cual los sucesivos máximos y mínimos del eco ocurren mientras rota el pez, esto es la frecuencia angular de los lóbulos.

La presencia de un pez en el "campo acústico" (las ondas acústicas que lo rodean) tiene el efecto de cambiar el campo alrededor de la superficie del pescado adicionando lo que se conoce como campo de perturbación (perturbación significa grandes disturbios), esto es que este campo de perturbación llega de fuentes virtuales de energía acústica dentro del cuerpo del pez. En otras palabras, el pez parece generar un sistema de ondas radiantes por la extracción de un flujo de energía de las ondas incidentes y reradiándolas en todas las direcciones. Alrededor de la superficie del pez, el campo de perturbación tiene un aspecto ondulante, el cual acopla las ondas del campo incidente de tal forma que hay un número finito de longitudes de onda que

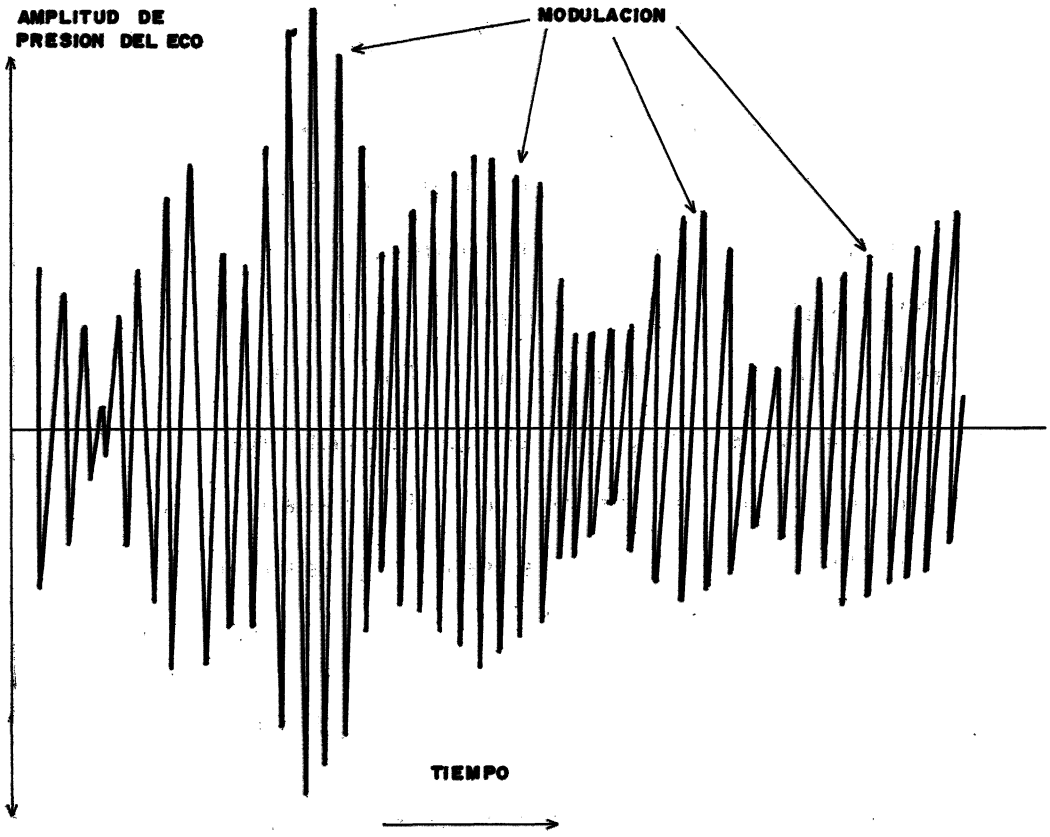


FIGURA 4.3 Efecto de modulación del eco de un pez conforme su orientación.

ocurren en relación a la longitud de un pez. El número de lóbulos en el patrón direccional depende del tamaño del pez en longitudes de onda, por ejemplo un pez de 40 cm tiene a 38 KHz un tamaño de 10 longitudes de onda pero a 120 KHz tiene 32 longitudes de onda. El tamaño de los lóbulos, en una escala relativa de amplitud, está determinada por el tamaño del pez.

Aunque hay una amplitud máxima posible del eco proveniente de cualquier pez, el tamaño recibido depende del ángulo del lóbulo, o lóbulos del patrón direccional apuntando en la dirección del eje acústico del transductor. Debemos notar que la forma cambia con el tiempo y el comportamiento, al nadar, de los peces; esto lo notamos en las marcas que vemos en los dispositivos de pantalla.

4.1.4 Propiedades acústicas del pez.

Hay algunos aspectos prácticos de las características de los peces que afectan los ecos de los mismos, estos aspectos están relacionados con el tamaño del pez, morfología, fisiología y orientación; así mismo la frecuencia de la onda incidente tiene un efecto sobre el nivel de retorno de los ecos y el tamaño del pez o cardumen visto

desde un dispositivo de presentación de los mismos.

Los peces no son de forma esférica, ni rígida por lo que no dispersan uniformemente, la forma más cercana a la que muchos de ellos se aproximan como forma uniforme es el cilindro y es interesante considerar esta forma como modelo simple. El "target strength" de un cilindro acústico pequeño de longitud L, en metros, es:

$$TS_{CIL} = 10 \log \frac{aL^2}{2\lambda} \qquad 4.1$$

Donde:

a: radio del cilindro (metros)

L: longitud del cilindro (metros)

λ: longitud de onda de la frecuencia de transmisión (metros).

La ecuación 4.1 nos muestra que el TS de un cilindro pequeño es directamente proporcional al cuadrado de la longitud e inversamente a la longitud de onda de la transmisión. La relación de la longitud con la longitud de onda acústica, L/λ, es importante debido a que determina los efectos de "interferencia" de onda a lo largo de la superficie del cilindro y esto afecta el

número de "lóbulos" que aparecen en el patrón de respuesta. Un cilindro más largo o una longitud de onda más pequeña, aumentarán el efecto de interferencia, lo cual resulta en más máximos y mínimos de energía acústica, y por ende una respuesta direccional con más picos, o lóbulos. La ecuación 4.1 debe corregirse si el cilindro permanece perpendicular a las ondas acústicas.

Los peces son compuestos principalmente de carne y huesos, los cuales tienen una resistencia acústica (impedancia) bastante similar a la del agua, de tal forma que la cantidad de energía reflejada de estas sustancias es pequeña. Si aplicamos la fórmula 4.1 para un cilindro de aire, para el pez, es necesario usar un factor para corregir la diferencia en la resistencia acústica de los materiales. Es evidente que el pez tendría un TS más bajo que un cilindro de aire del mismo tamaño. El factor (r^2) corrige para un cilindro de carne de pez en lugar de aire, se deriva de la impedancia relativa (Z) del agua de mar y la carne de pez.

$$Z_F = \delta_F C_F \qquad 4.2$$

Donde:

δ_F = densidad de la carne de pez (Kg/m^3)

C_F = velocidad del sonido en la carne de pez (m/seg).

$$Z_w = \delta_w C_w \qquad 4.3$$

Donde:

δ_w = densidad del agua de mar (Kg/m^3)

C_w = velocidad del sonido en agua de mar (m/seg).

El factor es:

$$r^2 = [(Z_F - Z_w) / (Z_F + Z_w)]^2 \qquad 4.4$$

Por lo que el TS de un cilindro de carne de pescado, TS_F, es:

$$TS_F = 10 \log \frac{aL^2}{2} r^2 \qquad 4.5$$

Generalmente los diagramas polares de los peces son distintos de los obtenidos de los cilindros, debido a que la energía es más ampliamente distribuida en los peces. Esto se atribuye a las estructuras internas e impedancias y sus distribuciones relativas dentro del cuerpo, esto es la vejiga natatoria en relación a la espina dorsal y la curvatura de la superficie exterior del cuerpo.

Se considera que la dispersión acústica de un pez cae dentro de alguna de las regiones que se ven

en la gráfica 4.4, la cual fue obtenida por Lytle y Maxwell (1982). A cualquier frecuencia en particular no todas las partes del pez pueden estar en la misma región. Analizando cada región tenemos lo siguiente:

a) Dispersión Rayleigh, cuando el pez es pequeño comparado con λ ($L \ll \lambda$). En este caso σ (sección transversal de dispersión) es aproximadamente igual al cuadrado de volumen y λ^{-4}.

b) Región de resonancia, donde la vejiga natatoria empieza a vibrar en armonía con la frecuencia de la onda acústica. Consecuentemente absorbe y reradia más potencia que la predicha por la aproximación de Rayleigh. En principio este efecto puede ser usado para clasificación del pescado por tamaño.

c) Región intermedia o de transición, donde r es aproximadamente igual a L^2 y es bastante independiente de λ; la dimensión dorsiventral es similar a λ.

d) Geometría, donde la longitud del pescado cumple conque $L \gg \lambda$. La mitad de la potencia dispersada es reflejada en varias direcciones desde las superficies curvadas de las partes dispersivas dominantes. La otra mitad es

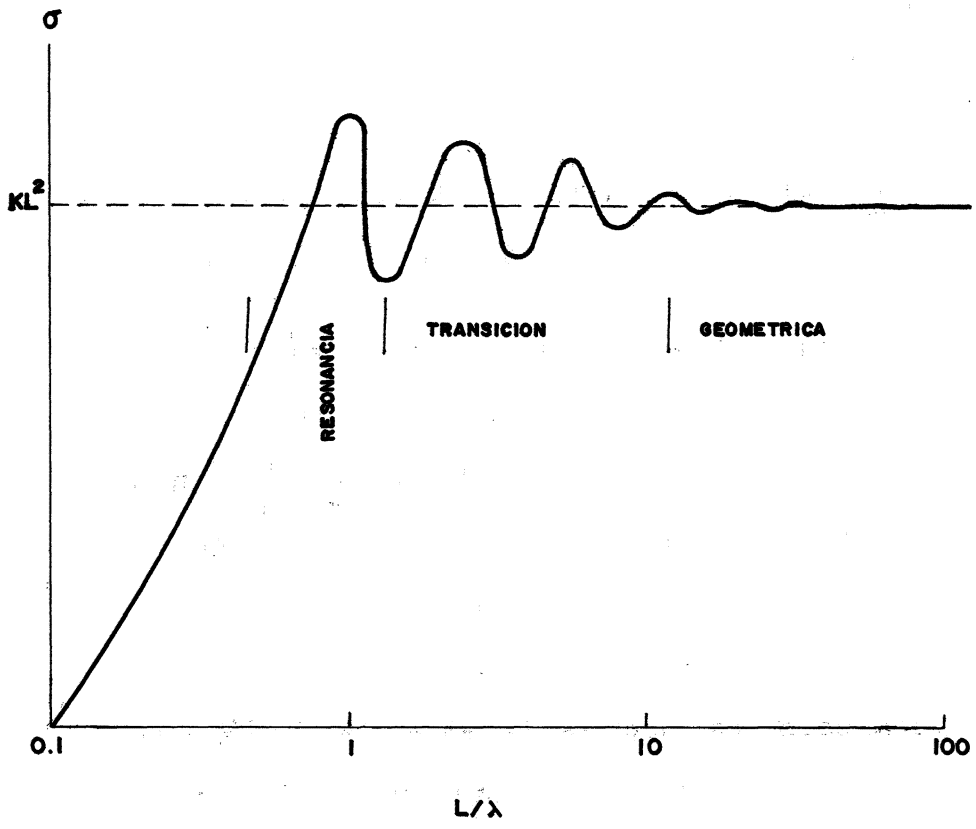


FIGURA 4.4 Dispersión acústica de un pez conforme Lytle y Maxwell (1982).

confinada a una región angular estrecha en la dirección de la onda incidente, interfiriendo con ella debajo del pez.

Aunque en peces de mar el volumen de la vejiga natatoria es solamente 5% del volumen total del pez (7% en peces de agua dulce), el hecho es que ésta se encuentra gasificada, y con una impedancia marcadamente distinta a la carne del pez, lo que la hace un reflector acústico de importancia. La evidencia parece mostrar que a veces, cerca del 90% del eco de los peces es debido exclusivamente a la vejiga natatoria.

Las vejigas natatorias llenas de gas son usadas por los peces para ajustar su flotabilidad cuando migran hacia arriba o hacia abajo de la columna de agua. Ellas pueden tolerar incrementos súbitos de presión de hasta 400%, pero disminuciones de solo 50%, por lo que pueden bucear con más facilidad al sumergirse que al ascender. El estado de la vejiga natatoria en un tiempo dado depende de la duración del último movimiento vertical significativo y la velocidad a la cual se realiza. Esto indica que la vejiga natatoria puede causar cambios de TS con el tiempo.

Para resumir, el tamaño del eco de un pez depende

de la interacción exacta del pez con las ondas acústicas que lo golpean. Los factores importantes son:

a) Dimensiones de la forma y ángulo de la vejiga natatoria.
b) Dimensiones de la forma y ángulo del cuerpo.
c) Impedancias acústicas de la vejiga natatoria y el cuerpo.
d) Longitud de onda de la vibración acústica.

4.2 FORMAS DE USO.

4.2.1 Usos no militares del sonido bajo el agua.

Un golpeante desarrollo del período de postguerra y que aun sigue avanzando, es la expansión de las aplicaciones del sonido bajo el agua con propósitos pacíficos. Originalmente fue empleado para sondaje de profundidad, ahora está también siendo usado para una gran variedad de propósitos, tal como lo mostraremos en una tabla resumen. Los equipos de sonar para la mayoría de estas aplicaciones están disponibles comercialmente, y alguna variedad de modelos pueden obtenerse de distintos manufacturadores. Por supuesto, ha comenzado a ocurrir el agolpamiento del espectro, por lo que se ha dado alguna atención a la standarización de frecuencias, pero sin ninguna regulación en el

asunto de parte de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), con el fin de evitar problemas de interferencia en aguas costeras atestadas. Se puede esperar que en el futuro más y más equipos de sonar de varias clases acompañarán la expansión del hombre en la explotación de los recursos del mar.

Como mencionamos anteriormente, colocaremos las aplicaciones comerciales del sonido bajo el agua, a manera de resumen en la tabla 4.1.

4.2.2 Usos militares del sonido bajo el agua.

El espectro útil del sonido bajo el agua para aplicaciones militares cubre 5 o 6 décadas de frecuencia. Comenzando en la ultra baja frecuencia, uno encuentra la mina de presión, un dispositivo que actúa por la reducción en la presión causado por el movimiento de una nave en su vecindad; también tenemos las minas acústicas que actúan cuando sensan la radiación acústica de una nave en un cierto valor para asegurar su cercanía. Como contraparte tenemos el barreminas, que genera un barrido sonoro alto para hacer explotar las minas acústicas. La radiación acústica de barcos y submarinos es detectada por el uso de sistemas pasivos, que consiste en un arreglo de hidrófonos.

TABLA 4.1

APLICACIONES COMERCIALES DEL SONIDO BAJO EL AGUA

FUNCION	DESCRIPCION
1.- Sondaje de profundidad	
a.- Sondas de profundidad convencionales	Envía pulsos cortos hacia abajo y mide el tiempo de retorno del eco de fondo.
b.- Perfiles de subfondo	Usa frecuencias bajas y fuentes de impulso de alta potencia para penetración del fondo.
c.- Sonares de exploración lateral (side-scan)	Sonares para vistas laterales con aplicación para el mapeo del fondo marino a ángulos rectos al curso de la nave.
2.- Navegación doppler	Usa un par de transductores apuntando oblicuamente hacia abajo para obtener velocidad con respecto al fondo por el desfase DOPPLER de los retornos de fondo.
3.- Búsqueda de peces	Sonares activos de exploración para ubicación y selección de cardúmenes de peces.
4.- Ayudas pesqueras	Para contaje, identificación de peces y especies; también para estimación y evaluación de recursos pesqueros.
5.- Ayudas para buceo	Pequeños equipos de sonar para localización de objetos bajo el agua por parte de buzos. Estos equipos son portátiles.
6.- Señalamiento de posición	
a.- Balizas	Transmite una señal sonora en forma contínua.
b.- Transponders	Transmite sólo cuando es interrogado.
7.- Comunicación y telemetría	Uso de haz sonoro en lugar de cables para la transmisión de información.
8.- Control	Mecanismos de alivio activados por sonido, como dispositivos de control de flujo para derrames de petróleo bajo el agua.
9.- Usos misceláneos	Medidores de flujo acústico y sensores de altura de olas.

Como ejemplo de sonar de ecoposicionamiento está el sonar para naves de superficie A/N-SQS-26, el cual envía pulsos largos y de alta potencia en direcciones seleccionables tanto vertical como horizontalmente, y emplea modernas técnicas de procesamiento de señal para la presentación del retorno al observador. El sistema es sumamente complejo pero con gran versatilidad en cuanto a modos de operación. Otro sonar para naves de superficie es el sonar de arrastre A/N-SQS-35, en este sonar el transductor está localizado en un cuerpo hidrodinámico en forma de pez y es arrastrado a una cierta profundidad de la nave de superficie.

También tenemos los torpedos dirigidos, los cuales usan alta frecuencia debido al tamaño del transductor y un haz direccional adecuado para reducir el ruido. Existen los sistemas de sonar cazaminas y los localizadores de pequeños objetos que operan a altas frecuencias y transductores altamente direccionales y corta duración de pulso para poder hacer la detección.

Un número de equipos de sonar de propósito especial, entre los que se pueden mencionar: el teléfono bajo el agua, que es un dispositivo de comunicación entre una nave de superficie y un subma-

rino o entre submarinos; otro esfuerzo es la sonoboya que son pequeños equipos de sonar lanzados desde un avión para escuchas bajo el agua y activación de cargas explosivas.

4.2.3 Aplicaciones pesqueras (sumario).

4.2.3.1 Aplicaciones en acuacultura.

El crecimiento de la industria de peces o especies en piscinas ha motivado aplicaciones de acústica pesquera:

Estudios: Determinación del número de biomasa de peces encerrados. Si se trata de grandes extensiones se puede establecer un estudio normal y convencional.

Tamaño: El tamaño individual de peces encerrados es un asunto de constante interés para quien dirige una piscícola y esto puede lograrse por métodos acústicos. Hay dos métodos por resonancia o por procesamiento de imagen, esto exige un transductor adecuado.

Monitoreo de comportamiento: los granjeros tiene un interés patente sobre la salud de los peces. La acústica ayuda a los investigadores al monitoreo en sitio

a través de señales telemétricas. Hay también interés en monitorear con el ángulo de inclinación como un indicador de actividad, especialmente en conexión con la alimentación.

4.2.3.2 Aplicaciones en investigaciones de comportamiento.

Investigaciones del comportamiento satisfacen muchos intereses, desde el aparente exclusivo interés biológico hasta la prospección y aplicaciones en acuacultura, como por ejemplo:

Movimiento de peces: costumbres diurnas de migración vertical que se han visto de los ecogramas. La instrumentación de especímenes de peces con señalamientos acústicos para determinar tanto este mecanismo como las rutas de migración.

Orientación: mediciones de la orientación de los peces es muy importante para las aplicaciones de prospección.

Reacciones de prevención: reacciones de los peces al paso de los barcos de estudio y redes de arrastre se han cuantifi-

cado con el uso de transductores externos y por los sensores de la red y del barco.

Respuestas al estímulo: las respuestas a los estímulos se han cuantificado por el monitoreo de los peces en grandes jaulas, divididas en series de celdas abiertas, cada una con su propio transductor.

4.3 LOCALIZACION, DETECCION Y ATRACCION DEL PESCADO.

4.3.1 Localización.

Hay varios factores que determinan la presencia o no de cardúmenes de peces y por tanto de zonas de pesca; nuestro objetivo no es analizarlas en forma detallada o cuantificar su influencia, sino más bien señalarlas y concluir la forma en que afectan a las pesquerías; esto nos hará notar las limitaciones de nuestros equipos, las cuales no dependen de una mejor o más novedosa tecnología, sino mas bien del conocimiento de las condiciones y la estructura de nuestro mar.

Se ha establecido una muy cercana relación, y con gran grado de exactitud, de la influencia de la distribución cuantitativa de ciertos animales, que sirven de alimento a los peces, y son llamados plancton. Los estudios demuestran que

la distribución cuantitativa del plancton no sólo es importante para indicar la distribución actual de los cardúmenes, sino que además un análisis de la distribución del plancton, animales maduros y en formación, algunas veces hacen posible indicar movimientos futuros de los peces. Esto es tan cierto que el plancton prácticamente establece reglas en el comportamiento de los cardúmenes, esto ocurre en casi todas las pesquerías. Para la pesca de cerco, los cardúmenes deben subir muy cerca de la superficie y deberían formar grupos compactos. Donde hay poco plancton, los cardúmenes llegan a la superficie y se distribuyen, por lo que la pesca es pobre aun cuando hayan peces presentes. Donde las concentraciones de plancton son altas y agrupadas, los cardúmenes llegan a la superficie y se agrupan en cantidades interesantes. Usando los sonares, los pescadores pueden colocar sus redes de cerco sin tener que esperar que el pescado esté prácticamente en la superficie.

Otros estudios también han mostrado que es importante conocer las distribuciones de temperatura en las zonas de pesca, para que el conocimiento de la relación entre la temperatura y la distribución de los peces sea mejorado. Cada área debe

ser tratada en forma separada y debe ponerse atención a las observaciones hidrográficas. En la mayoría de los casos, las mediciones de temperatura hechas por los patrones de pesca son de gran valor; pero no pueden, como es lógico, reemplazar las prospecciones que deben hacer los buques de investigación. Los estudios han establecido algunos hechos generales que se pueden resumir de la siguiente manera:

a) Las reservas de peces de interés comercial son intimidades de los sistemas ecológicos, en los cuales se interrelacionan condiciones físicas y químicas de gran complejidad y que fluctuan de año a año. Estos sistemas ejercen una influencia decisiva en la reproducción, crecimiento y mortalidad de los organismos, y ningún estudio racional del recurso pesquero puede realizarse sin una investigación exhaustiva de las condiciones físico-químicas.

b) Entre los distintos factores de los sistemas ecológicos, como la temperatura del agua del mar, salinidad, profundidad, presión, corrientes, contenido de nutrientes, oxígeno, intensidad de la luz, presión osmótica, concentración de ión-hidrógeno, comida, etc.; la comida y la temperatura son los más sobresalientes.

La comida, sin embargo, consiste de otros animales, los cuales están sujetos a similares influencias físico-químicas en general y de la temperatura en particular, o de plantas marinas que dependen por completo de ciertos elementos disueltos en el agua de mar, y de cierta intensidad de luz y temperatura. Por lo tanto la temperatura puede usarse como el indicador más práctico de condiciones ecológicas en situaciones normales.

c) En muchos casos el agrupamiento de huevos de peces tiene un alto grado de dependencia de la temperatura del agua que los rodea.

Durante su crecimiento y cambios desde el estado larval al estado maduro, los peces continúan siendo influenciados por la temperatura en forma directa.

Durante la época del desove, muchas especies de peces tienen que encontrar exactamente la temperatura correcta del agua en la cual depositar sus huevos.

d) Además de los hechos generales mencionados anteriormente, el rango especial de temperatura, el cual algunas especies comerciales prefieren, es conocido. Esto es especialmente

cierto para las condiciones de desove y parcialmente cierto para otros períodos de sus vidas.

Esta relación existente entre la concentración de ciertos peces de interés comercial y la temperatura del agua pueden utilizarse, y se utilizan, en la práctica pesquera. Ya que las mediciones de temperatura son fáciles, éstas deberían facilitar la localización de los cardúmenes. Pero de todas formas uno no puede esperar conclusiones completamente correctas por métodos termométricos, pues la temperatura es solamente un factor de los que influyen en la concentración de los cardúmenes.

Los métodos termométricos para localizar el pescado se han aplicado desde hace mucho tiempo con éxito variable. La predicción del tamaño del recurso basado sobre analogías en los datos de temperatura puede llamarse estrategia pesquera. Aquí tratamos con el aspecto de la hidrografía pesquera en la forma de información táctica para los pescadores en relación con especiales expectativas de pesca basada en la temperatura del agua. Para tal información táctica debemos tener en cuenta:

a) La distribución de temperatura debería ser conocida.

b) Las diferencias en temperatura deben alcanzar algunos grados centígrados.

c) La correlación entre la temperatura y la concentración del pescado debe ser conocida.

La información de los dos primeros puntos puede obtenerse solamente con la ayuda de observaciones directas de temperatura. En cuanto al tercer punto, como es obvio, se restringe a las áreas de interés comercial. Una aplicación generalizada de los métodos termométricos para la localización de peces no debe esperarse, pero su uso en ciertas regiones seleccionadas y para ciertas especies han demostrado, en varias pesquerías, ser una línea que trae algunos éxitos.

Se debe prestar particular atención al momento en que los datos concernientes al pescado se transfieran a mapas pesqueros y esta información sea dada a los pescadores; este aspecto es crítico pues se debe asegurar que los pescadores reciban información actualizada. Mientras que teóricamente puede ser simple tratar con peces de fácil localización, el problema es más complicado cuando se trata con peces pelágicos, los cuales

tienden a moverse sobre vastas áreas, con variaciones en los patrones migratorios de estación a estación y de año a año. Sería útil si, con los mapas, se diera información práctica a los patrones de pesca sobre la localización de peces. Podríamos, por ejemplo, decirles acerca de la relación de los cardúmenes de sardina con contenidos minerales del agua que son bastantes variables. Estimamos que este tipo de información debería estar disponible para usos prácticos.

4.3.2 Detección.

En relación con la detección de cardúmenes de peces, la mayoría de los progresos importantes se han relacionado con el sondeo acústico y el ecoposicionamiento.

Debemos mencionar otro método llamado de exploración aérea, cuyo valor principal consiste en la posibilidad de prospectar grandes áreas en corto tiempo. Por otro lado este método presenta la limitación de sólo observar cardúmenes de peces nadando en o por lo menos muy cerca a la superficie y a condiciones favorables de clima. Pero, a pesar de estas limitaciones, ciertas pesquerías pueden obtener una gran ventaja a través de su uso. Para implementarlo es necesario avionetas

y equipos de comunicación para informar las observaciones a la flota pesquera, haciendo que evite zonas pobres en pesca y enviándola a zonas más rendidoras.

El gran valor de la hidroacústica para ciertas pesquerías, es el poder identificar el fondo adecuado para la pesca de arrastre de fondo. También está su importancia en aguas poco profundas, ya que asegura una buena navegación; pues aparte de darnos la profundidad nos brinda información de la forma del fondo, en este punto debemos señalar las distintas experiencias sobre como la representación de tales características del fondo han sido mejoradas por la elección de frecuencias altas y variadas y una estrechez del haz sonoro. El conocimiento del fondo y sus condiciones no es solamente importante para hallar un medio adecuado para los aparejos de pesca de fondo y su consecuente protección, sino que también es muy útil como indicador de la clase de peces a ser atrapados.

La posibilidad de detectar peces acústicamente fue probada por medio de ecosondas normales diseñados para navegación y mediciones de profundidad solamente. Por supuesto estos equipos no son óptimos para el propósito de

detectar pesca y gracias a los esfuerzos de muchos ingenieros de distintas partes del mundo, se han logrado progresos técnicos notables para esta aplicación.

Los peces son reflectores menos efectivos que el fondo del mar. Con el fin de obtener un adecuado rango de trabajo, la sensibilidad del equipo ha sido incrementada. Como primer paso en este aspecto, la amplificación de recepción fue incrementada sobre el nivel del ruido disturbador. Además se obtuvo buen éxito en disminuir este ruido, propio de la embarcación, instalando en forma óptima los transductores en el casco de las naves; primero se lograron las mejoras para pesca pelágica y luego se aumentaron los alcances y resolución para otras aplicaciones pesqueras, la mejora siguiente fue, por ende, el incremento de la potencia de transmisión. Otra posibilidad que se logró para obtener mejoras fue el angostamiento del haz sonoro, aunque esto acarrea ciertos problemas debido a los movimientos de la nave en mar embravecido; por esto se investigaron métodos y se hicieron mediciones para estabilizar los transductores. Además de lograr mejorar el conocimiento de la presencia y profundidad del pescado, posteriormente se requirió, y logró,

obtener información tan deseada como el tamaño y forma de los cardúmenes de pesca y de las especies.

La razón por lo que la detección de peces ha tomado tanta importancia es debido a que la flota pesquera es cada vez mayor y las naves son más costosas tanto en su construcción como en su operación.

4.3.3 Atracción.

La atracción de los peces constituye el establecimiento de una conexión entre el hombre y los peces a través de señales o estímulos con la intención de producir una respuesta de los peces.

La extensión y las características de la respuesta será una función de las propiedades cuantitativas y cualitativas de los estímulos usados, de las condiciones del ambiente y de las condiciones específicas de los peces.

El estímulo puede ser luminoso (visual), sonoro, mecánico o químico. La respuesta de los peces a los estímulos eléctricos no puede tratarse, pues conlleva aplicaciones no aceptadas por obvias razones. Los factores externos del medio que rodea al pez pueden causar cambios cuantitativos

o cualitativos de los estímulos durante su curso, desde su origen a los órganos sensitivos de los peces. Hechos específicos de las especies deben considerarse, como la anatomía y fisiología de lor órganos sensibles, el nivel de reacción, el tipo de reacción y su grado de intensidad, varían de acuerdo al estado fisiológico del pescado y su adaptación a las condiciones ecológicas del medio y/o el mismo estímulo. Además el efecto de la reacción del grupo debe estudiarse.

La adaptación de los varios métodos de atracción y equipos a los varios tipos de pesquerías se hace de acuerdo al tipo de aparejo de pesca y sus características particulares, que pueden influir en el comportamiento del pescado.

En la prática comercial la atracción de los peces se basa ya sea en factores empíricos o por la aplicación de un método estrictamente científico. Cuando medimos en términos de tiempos y logros, los resultados obtenidos en base a estos aspectos son muy diferentes. Los estímulos físicos y químicos para atrapar o dirigir al pescado han sido usados en manera más o menos empírica a través de los años.

La evolución de la pesca con luz a través de los

siglos es particularmente demostrativa. Las fuentes de luz fueron obtenidas al principio de antorchas, luego fue petróleo y acetileno; y más recientemente, lámparas eléctricas y a gas. El hecho de que las lámparas eléctricas pueden sumergirse siendo así más rendidoras para la pesca y por tanto más eficientes, ha permitido su uso en regiones donde el estado del mar y la turbidez de las aguas habían sido factores limitantes.

Esta evolución ha sido muy lenta y está lejos de haberse perfeccionado. Hay varios sistemas de luces que aun coexisten en distintas partes del mundo, lo que se explica por la falta de bases técnicas y científicas, escasez de información y el aislamiento geográfico de ciertas comunidades pesqueras.

Se han hecho experimentos con haces de luz dirigidos que han originado un nuevo método de pesca, no aplicado en nuestro país, por el cual el pez es atraído y guiado hacia una red fija por el sucesivo encendido de una serie de lámparas asociadas. Estudios posteriores de la significancia del sentido visual para el comportamiento y ecología de peces ayudan y ayudarán en la tecnología de las artes de pesca, particularmente

en relación a la reacción de los peces a las redes, anzuelos, etc. y subsecuentemente en el problema de selección del aparejo. Las redes preferiblemente no deben ser claramente visibles. Datos útiles para la interpretación de la distribución batimétrica de los peces, y consecuentemente para el diseño de aparejos y la planeación de operaciones pesqueras, pueden ser obtenidos por la investigación de la anatomía del sistema óptico (eje óptico y ángulo de visión), las condiciones ideales de iluminación y el ritmo de fototaxis, los cuales están cercanamente conectados con la ecología de las especies bajo observación.

Otro tipo de estímulo que se está investigando es el uso de estímulos audibles para atraer al pescado, por lo que es posible que un día el ruido artificial o sonidos grabados de animales marinos puedan usarse como señales de atracción con el consecuente desarrollo de algún particular método de pesca.

Un mejor conocimiento del comportamiento y la reacción de los peces a los varios tipos de estímulos, así como de los procesos que constituyen la base de los movimientos directos (sean de atracción o repulsión) incrementarán la eficien-

cia de las operaciones pesqueras, ya sea mejorando las posibilidades de atrape con los aparejos existentes o desarrollando nuevos métodos.

La concentración de los peces alrededor de una lámpara es generalmente atribuida a la fototaxia positiva, pero el mecanismo involucrado aún no es de comprensión clara. La teoría de que la concentración es debido a la exploración de una luz preferida de cierta intensidad es desaprobada por el comportamiento de los peces mismos. En definitiva, el funcionamiento del sistema puede mantenerse en condiciones de iluminación ambiental normal, la cual no es completamente cubierta por fuentes de luz artificial.

Esta teoría está basada parcialmente en la observación de los animales en la vecindad de las trampas de luces, parcialmente en observaciones similares bajo condiciones de iluminación experimental en el laboratorio, y parcialmente en el análisis de los mecanismos de foto orientación normal.

Los movimientos normales en la búsqueda de una intensidad de luz preferida son causadas por intensidades mayores o menores. Estos movimientos son guíados por diferencias normales entre

las intensidades de iluminación de las superficies fotosensitivas de los dos ojos y de diferentes partes de la superficie fotosensitiva de cada ojo.

Los valores normales de todos los estímulos son controlados por la distribución de luz normal en el ambiente. Esta distribución está determinada por:

a) la naturaleza de las fuentes de luz (el sol o la luna)
b) la capacidad de dispersión del medio (la atmósfera y el agua)
c) la capacidad reflectora del ambiente.

La aplicación de la técnica de luz llevará resultados óptimos solamente cuando algunas condiciones se reúnen. Por ejemplo, los animales a ser atrapados deben ser activos en la noche cuando las intensidades de luz natural son lo suficientemente bajas para permitir las condiciones de iluminación requeridas alrededor de la lámpara (no la luna). Para el pescado, el agua debe ser lo suficientemente clara reducir la absorción de los rayos de luz y reducir la dispersión que contrarestaría la producción de las condiciones de luz requerida. Además, la profundidad del

agua deber ser la suficiente para eliminar la reflexión del fondo. Estas son algunas de las condiciones bajo las cuales los peces, como la sardina, son atrapadas con la ayuda de lámparas aquí y en muchas partes del mundo.

4.3.4 Sumario.

La estrategia general pesquera cubre amplios aspectos relacionados con como encontrar más pescado para comida de nuestra creciente población y como mejorar la producción de quienes producen la comida; lo cual significa una mayor examinación del problema. Hay tres fases que se consideran: localizar los peces, detectar los peces y atraer los peces; etas fases se sobrelapan entre sí.

La detección es un asunto de comunicación entre los peces y el hombre, y un sistema de comunicación consiste de un transmisor que produce señales a un receptor. La fuente de la señal es el pez y la señal puede ser un sonido o un movimiento hecho por el mismo pez. El canal de la señal es usualmente algo característico del agua misma, su conductividad sonora, ondas de presión o luz. El receptor puede ser el ojo humano o el oído o, más generalmente, un instrumento para amplificar

la señal.

La atracción cubre los efectos de repulsión y de estimulación. Mientras el transmisor en este sistema de comunicación puede ser la voz humana, una luz o un oscilador ultrasónico, el canal es de nuevo provisto por el agua y sus propiedades y el receptor es uno o más de los órganos de sentido del pescado. Para la detección y la atracción las propiedades relevantes del agua actúan como canal de la señal: capacidad de conducir calor o electricidad, propagar ondas mecánicas o electromagnéticas. Los instrumentos usados pueden ser los mismos en ambos casos.

La localización y detección difieren solamente en que para la localización, podemos encontrar peces indirectamente por la detección de otros paráme-tros que no son los peces; como la temperatura el tipo de fondo, el plancton.

En resumen, para la mejora general de los aspec-tos señalados y particularmente el futuro de los métodos de localización de peces: primero, debe-mos conocer sobre la distribución general del pescado, aunque nos seguimos sorprendiendo por el rápido desarrollo de nuevas pesquerías. Segundo, conocer más acerca de los factores que determinan

la presencia de peces dentro de una área particular. Se necesita, en definitiva, mayor investigación; la literatura científica que aún se encuentra dispersa necesita ser recogida y mostrada como unidad; y sobre todo debemos reconocer que hay mucha experiencia en las cabezas de los patrones de pesca y de los pescadores, que necesita ser extraída y examinada por observaciones exactas y experimentos.

4.4 CONDICIONES GENERALES PARA BUENOS RESULTADOS DE FUNCIONAMIENTO.

4.4.1 Características operativas y limitaciones.

Los sofisticados sonares actuales pueden localizar una gran cantidad de objetos bajo el agua, incluyendo casi todas y cada una de las especies de peces y el ambiente en que habitan. Al sonar se le ha llamado "radar submarino" por su capacidad para mostrar arrecifes, bajos, canales, contornos del fondo y naufragios. Los sonares actuales son pequeños, de buena apariencia, livianos, de mejor diseño, facilidad de operación y mayor eficiencia. También son más sofisticados, desde el punto de vista técnico, porque incorporan al microprocesador y al diseño digital, haciendo que el sonar sea más fácil de

instalar, operar e interpretar. La mayoría de estos desarrollos han tenido lugar en las últimas dos décadas, concurrentes con el avance de la electrónica en otras industrias.

Los avances en circuitería de estado sólido al final de la década de los 60 adicionados a los sistemas de sonar, ayudaron en el proceso de creación de un nuevo mercado mundial de impacientes pescadores comerciales. Al comienzo de los ochenta, con el advenimiento del color, se incrementó su uso y se diversificó en cuanto a sus aplicaciones.

La pantalla de colores alteró radicalmente la forma de presentación y por ende la interpretación de los ecos sonoros recibidos. La resolución ha llegado a definir de tal forma que se puede distinguir a un pez.

Hay diferentes tipos de sonares, incluyendo grandes equipos de haces múltiples, que barren grandes áreas en pocos barridos; este tipo de equipos son usados básicamente en aplicaciones militares, rescate, investigación, petróleo y muy grandes operaciones pesqueras de alta mar; sin mencionar obviamente los grandes precios de estas unidades. Los sonares conocidos como de exploración, son

los más familiares y de uso común en nuestra industria marítima. Este tipo de equipos trabajan, como ya se ha señalado, por la transmisión y recepción de ondas sonoras. Hay cuatro componentes básicos en los sistemas en actual uso en nuestro país: el transductor, o domosónico, el cual transmite y recibe, este domosónico está instalado en una caja marina; un elevador, para subir y bajar el transductor; un panel de control, o consola de operación; y una unidad de presentación o pantalla, la cual es un monitor de video o una pantalla CRT básica, hay modelos en los que este dispositivo forma un solo conjunto con la consola de operación.

Para activar el sonar, primero se pone a funcionar el sistema de izado (o elevador), el cual hace descender al transductor hacia el agua. El transductor puede trabajar enviando y recibiendo señales hacia adelante, atrás, babor o estribor, en otras palabras, 360° alrededor del barco. El transductor puede también ser inclinado a cualquier ángulo desde + 4 grados (con respecto a la horizontal de la superficie del mar) hasta - 90° (perpendicular debajo del barco). Estos rangos de inclinación pueden variar de modelo a modelo y dependiendo de la complejidad del arreglo del

transductor. El haz sonoro, por tanto, transmite desde el transductor a cualquier sección del agua que elija el operador; esto último depende del conocimiento no sólo del equipo por parte del operador, sino también de la experiencia y conocimiento del patrón pesquero acerca de las condiciones de la zona de pesca y el comportamiento de la especie o especies de interés comercial. Es importante señalar que los distintos sonares poseen diferentes anchos de haz, la regla general es que la estrechez del haz da una mejor resolución del objetivo; un haz más ancho significa una mayor cubierta aunque, como es obvio, con una menor resolución.

Una vez que un objeto es golpeado por el haz, retorna el eco sonoro resultante de vuelta al transductor siendo luego convertido en una señal electrónica. La señal, una vez procesada, es mostrada en pantalla de manera tal que pueda ser fácilmente interpretada; esta facilidad de interpretación se ha visto facilitada enormemente por los sonares a color. Dependiendo de los modelos y rangos de color, distintos objetivos aparecen con distintas tonalidades. Uno de los aspectos más interesantes es que la vejiga natatoria de un pez que refleja los haces sonoros y el color de

la imagen generada está en relación directa con el porte de la vejiga.

Los objetos inanimados son representados por el color de acuerdo a sus propias densidades. Los objetos duros, como rocas o arrecifes, son vistos en el rango rojo; mientras que los objetos débiles, como un banco de lodo, se los verá en el rango azul. El tamaño y la forma que se ve en pantalla está determinada por el tamaño y la forma del objetivo. El barrido del haz es, lo que en definitiva, distingue a los sonares de los ecosondas. Una sonda opera bajo el mismo principio del sonar pero su transductor está fijo, sólo puede proyectar un haz sonoro en la dirección en la que haya sido instalado, normalmente vertical y debajo del barco; el transductor del sonar rota en todas las direcciones, permitiendo que el haz sonoro explore lejos y alrededor del barco; por lo que un sonar permite ver área bajo el agua antes que nos acerquemos a ella; así en el caso de peces permite a la embarcación enrumbar hacia ellos, o en casos de obstáculos evitarlos.

Sin embargo, el uso del sonar no es un camino tan sencillo, en primer lugar provee una ayuda, aunque excelente, tan sólo parcial como auxiliar de pesca. Aún se desarrollan investigaciones para

mejorar la eficiencia pero las limitaciones de la detección horizontal son en su mayoría debido a las leyes físicas que gobiernan la propagación del sonido en el agua y, como tales, no pueden ser alteradas.

Por ejemplo, es generalmente conocido, que un haz sonoro transmitido horizontalmente a través del agua tiende a flexionarse, hacia arriba o hacia abajo, dependiendo del cambio de temperatura del agua con la profundidad. Esto puede tener el efecto de limitar el rango máximo de detección de cardúmenes de media agua y puede significar algunas veces que los ecos de objeto cercanos a superficie pueden ser retornados de grandes distancias, o si estamos en aguas profundas quizá solo tengamos un alcance relativamente corto. Una de las más serias limitaciones del sonar, en cuanto a su rendimiento, se debe a las reflexiones del fondo. En aguas poco profundas y de hasta 10 o 15 metros, estos ecos de fondo pueden constituirse en un gran problema.

Es claro entonces que el sonar puede ser de relativamente poca ayuda cuando cardúmenes grandes se encuentran dentro de costa y existe un gran número de botes al mismo tiempo; por otro lado, presenta una gran ventaja en áreas de exploración

fuera de costa, pues estas circunstancias presentan unas condiciones favorables de operación para el sonar: agua profunda, pocas embarcaciones en la vecindad, etc.

4.4.2 Equipos y características.

4.4.2.1 El ecosonda.

El ecosonda ha sido el equipo, para la detección de peces, más ampliamente usado, pero en años recientes su importancia ha ido disminuyendo por la aparición del sonar, el cual ha ido cobrando importancia rápidamente y en especial como equipo standard en las embarcaciones grandes. Ya hemos hablado de su esquema de operación; las partes que lo componen son: consola con pantalla, a papel o de video; y el transductor fijado al casco de la embarcación, tomando en cuenta, en su instalación, ciertas condiciones hidrodinámicas tanto para la caja marina como para su ubicación en el casco.

La eficiencia total de un ecosonda depende del transductor y por ende de su instalación. La señal del transductor es

transmitida en cortos barridos, con largos espacios de escucha entre pulsos de transmisión.

4.4.2.2 El sonar.

La principal diferencia física entre un ecosonda y un sonar está en el transductor. El del sonar se encuentra dentro de un envase hidrodinámico, el cual es retráctil para ser ocultado en el casco. El propósito de bajar el transductor por debajo del casco es eliminar, lo más posible, el ruido y la aireación producida por el casco y su desplazamiento.

Otra diferencia de este equipo con la sonda estriba en la presentación en pantalla y en los controles de operación. El equipo puede ser maniobrado manualmente y posee programas para abertura automática de áreas durante la etapa de búsqueda y para ser aplicados durante la etapa llamada "la cala". La mayoría de los sonares en aplicación o uso en la pesquería de nuestro país usa la frecuencia de 60 KHz. Sólo como información general, debemos notar que la frecuencia de trans-

misión puede ser de 30 KHz, 60 KHz, 70 KHz, 200 KHz, etc. Esto realmente depende de la aplicación que se desee darle y tiene relación con el costo del equipo también.

4.4.2.3 Otros equipos.

Como es de suponer y conforme hemos observado según el punto 4.2.1, existen otros equipos que utilizan el principio hidroacústico y sirven para aplicaciones diversas. En nuestro país principalmente tenemos: correderas Doppler, para medir la velocidad de desplazamiento de los barcos; ecosondas de uso científico, para prospecciones pesqueras y manejo de recursos, se distinguen por lo especial del diseño de los transductores así como,la compleja tecnología de procesamiento de señal que utilizan para este efecto.

Las consideraciones para su instalación se pueden decir que son las mismas que para los equipos de mayor uso; pero ha de destacarse que para el caso de ecosondas científicas, las mismas deben considerar-

se en la forma más exacta posible.

4.4.3 Ecosondaje y aspectos de la detección de los peces.

Para la detección de peces, un haz sonoro estrecho y limpio, sin lóbulos laterales, es deseable y los osciladores que se adaptan a ello se están produciendo. Los pescadores usan los equipos también para saber que tipo de fondo tienen presente, todo ello hace que no exista un sólo gran diseño de máquina para todos los propósitos.

La detección de peces ya sea en cardúmenes o en forma individual a profundidades de hasta cerca de 150 metros, es posible con cualquier equipo moderno y eficiente. En peces de fondo se presenta un problema en el uso de anchos de haz apreciables. Solamente una fracción del haz sonoro es empleado usualmente para la detección de esta clase de peces, esta fracción disminuye conforme el pez está más cerca al fondo marino. Un haz estrecho dará una mejor discriminación y detalle de la forma del cardúmen, pues el haz ancho hace disminuir la relación de la señal-ruido y por tanto reduce la eficiencia del equipo.

La mayoría de los ecosondas modernos son adecua-

dos para la detección de peces pelágicos. El requerimiento más inmediato es una mayor discriminación entre tipos de peces y tipos de mancha. Es posible que la comparación de ecos con dos o más frecuencias sea útil en este caso, aquí también la reducción del ancho del haz puede ser útil, porque el haz estrecho da una mayor posibilidad para identificación individual de peces y por tanto entrega información precisa acerca de los detalles de la forma del cardúmen.

El haz estrecho se logra incrementando las dimensiones del transductor o incrementando la frecuencia. Sin embargo, y particularmente en el caso de barcos pequeños, se espera un movimiento considerable. Esto presenta problemas de aireación, las burbujas de aire llegan al transductor y afecta su rendimiento, a veces a tal grado que hace que el sonar parezca útil solamente para usos en aguas tranquilas; el movimiento por tanto, neutraliza el beneficio de un haz sonoro estrecho.

Por ello es que se desea que el transductor sea estabilizado para conservar el haz sonoro en la dirección de interés. Existen tres posibilidades obvias:

a) Colgar el transductor en soportes cardánicos en forma similar al compás. Esto necesita un envase suficientemente grande, y con diafragma de un material con buenas cualidades de transmisión sonora.

b) Mantener la posición del transductor por servomotores controlados por un péndulo moderado. Técnicamente es posible hacerlo aunque es bien laborioso su diseño y fabricación.

c) Colocar el transductor en un envase hidrodinámico, el cual es arrastrado a una velocidad adecuada. Este método puede eliminar o reducir la aereación, y proveer un haz estable. No es adecuado para uso durante operaciones pesqueras.

También la determinación del tipo de fondo en el cual se va a efectuar la faena de pesca es importante en la aplicación de ciertos artes de pesca y a veces es útil como indicador de la clase de peces a ser atrapados.

4.4.4 Consideraciones sobre aspectos operativos de domosónicos y uso de equipos.

4.4.4.1 Domosónico.

El domosónico montado en el casco de la nave, transmite pulsos sonoros cortos hacia el agua y recibe señales de eco de los peces, suelo marino, etc. Para detección de peces y detección del fondo del mar se usa el mismo transductor para transmisión y recepción.

Hay aplicaciones pesqueras y de investigación pesquera que demanda que los ecos de los peces puedan distinguirse en forma individual, esto último es muy usado en mediciones de target strength en el sitio; debemos anotar que esta característica es más común encontrarla en los transductores especializados de ecosondas y no tanto en los domosónicos de aplicaciones comerciales.

Un haz ancho es la mejor elección para:

- Detección de peces ampliamente dispersos. Un haz ancho cubre un gran volumen en las capas superiores de agua. Esto

como la reacción entre la energía de salida y la energía de entrada. Los transductores modernos se hacen de elementos cerámicos piezoeléctricos que tienen eficiencias entre el 40% y 80%.

Un domosónico radia energía sonora en un haz, cuyo ancho óptimo depende de la aplicación del equipo. Un haz estrecho es la mejor elección para:

- Detección de gran alcance. Un haz estrecho concentra la energía sonora transmitida y durante la recepción un haz estrecho es menos sensitivo al ruido que un haz ancho (si el ruido es isotrópico); por lo que un haz estrecho da una relación señal-ruido más alta.

- Mayor rendimiento con alta potencia del transmisor. La capacidad de manejo de potencia de un transductor se incrementa con el tamaño del transductor, y un haz estrecho significa un transductor más grande.

- Mejor determinación del fondo.

Los transductores usados en aplicaciones

comerciales, y por ende los que se aplican en nuestras pesquerías, son de dos tipos básicos. Los equipos viejos o modelos anteriores tienen elementos magnetoestrictivos; los equipos más modernos utilizan normalmente elementos cerámicos o piezoeléctricos. El transductor cerámico tiene un número de ventajas sobre el magnetroestrictivo:

a) Es más eficiente y en la práctica es más sensitivo, pues produce ecos de objetivos pequeños que se encuentran a distancia.

b) Es capaz de generar sonidos de alta frecuencia porque puede vibrar a velocidades más rápidas. El magnetoestrictivo al ser un objeto pesado no puede vibrar rápidamente y no puede ser usado para producir ondas sonoras de más de 70 KHz.

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA

c) Un transductor cerámico puede construirse de muchos elementos individuales y se puede hacer que todos vibren al mismo tiempo, y luego apagar algunos de ellos; así tenemos varia-

ciones en el tipo de haz sonoro. Esta variación en la forma del haz tiene ventajas operacionales dependiendo de la aplicación.

d) El transductor cerámico es generalmente más barato de producir.

Aun así el transductor cerámico presenta algunas desventajas, siendo las principales: es más susceptible a daños que los magnetoestrictivos. Debido a que los cerámicos son sellados contra la penetración del agua, cualquier daño de consideración puede causar fugas en el sellado, lo cual requiere como solución el reemplazo del transductor. El magnetoestrictivo es más tolerante a este respecto. Además es posible que el elemento cerámico se dañe si el equipo es accidentalmente encendido cuando el transductor está fuera del agua, la falta del efecto amortiguante del agua podría quebrar los elementos.

El funcionamiento eficiente del domosónico es vital para el rendimiento del sistema. Algunos factores que afectan, en

las aplicaciones comerciales, el rendimiento del domo son:

a) Posicionamiento del transductor en el casco. La importancia del correcto posicionamiento del transductor es la minimización del ruido e interferencias a la señal por aireación o burbujas en el agua. El trasnductor, cuando está en el modo de escucha del eco de retorno, también recoge otros sonidos en el agua, los cuales aparecen como marcas en la pantalla. Estos ecos aleatorios se conocen como ruido y siempre se presentarán en varios niveles, dependiendo de la situación. El ruido llega de muchas fuentes, las cuales trataremos posteriormente. sólo para explicación mencionaremos:
   - Ruidos autoprovocados: propela, máquina, flujo de agua alrededor del casco.
   - Ruido externo: olas que chocan, ruido provocado por peces y mamíferos marinos, movimiento del sedimento en el lecho marino.

   La minimización de ruido es importante

ya que el ruido excesivo enmascarará efectivamente los ecos de los peces, produciendo una presentación oscura y confusa, que es difícil de interpretar.

La propela y la máquina producen la mayoría del ruido, particularmente una propela de altas revoluciones es cavitante, pues produce una cantidad de burbujas que provienen de la superficie de la hélice; o de los filos de las hélice si están dañadas. Para minimizar el ruido de la propela, el transductor debe montarse adelante, entre la proa y la mitad de la embarcación. En muchas embarcaciones pesqueras se diseña el espacio para los tranductores lejos de las máquinas, sin embargo por el tamaño de las mismas, en la práctica esta separación no es tal por lo que la solución apunta a los montajes de la máquina, y consiste en que éstos deben ser flexibles para reducir el problema. El sentido común indica que el transductor también debe estar separado de los

generadores auxiliares o bombas, pues estos equipos también producen ruido.

El montaje del domosónico o transductor muy adelante minimiza el ruido de la propela, pero puede presentar otros problemas. Hay una cantidad excesiva de turbulencia generada en el agua por el desplazamiento de la nave y el golpeo de las olas causan la aparición de numerosas burbujas de aire en el agua y cerca del transductor. Esta aireación interferirá con la transmisión sonora tanto en transmisión como en recepción ya que se reciben reflexiones de las burbujas. El efecto de la aireación excesiva se ve cuando el gobernar hacia proa usualmente el equipo se "blanquea", en su presentación, completamente.

Una guía a seguir, por tanto, será el montar el domosónico en una posición longitudinal entre la mitad del barco y el primer tercio de la longitud de la estela producida a proa. Hay algunos fabricantes que indican su preferencia de montaje del transductor en

un sitio en particular dependiendo de las características de la propela. La teoría es que la propela que gira en favor de las manecillas del reloj generará más ruido y turbulencia en el lado de babor (izquierda), por la interacción entre las hélices y el casco, el montaje del transductor en el lado de estribor lo apantalla del ruido y viceversa. La eficiencia de esto depende un poco del diseño de la popa, de los espacios entre los filos de la propela y el casco, etc. Lo más indicado en la práctica es basarse en experiencias anteriores con formas de casco similares para decidir el lado de montaje.

También debe tenerse en cuenta, como se mencionó anteriormente, la forma hidrodinámica de las cajas marinas de instalación de los domosónicos o transductores en el casco de la embarcación; el objetivo siempre es minimizar la formación de burbujas en la velocidad del domosónico.

b) Como se mencionó en el párrafo ante-

rior, la forma en que el transductor es montado en el casco. Un casco con cierta inclinación es más eficiente en librarse de las burbujas que en un casco plano en el fondo. Conforme a la práctica se ha tenido que cuando la inclinación es menor a 13°, en el sitio donde está ubicado el transductor, los problemas con burbujas de aire no son comunes. La caja marina debe tener forma hidrodinámica y los filos deben ser redondeados. La orientación de la caja marina debe seguir el flujo de agua, por lo que al instalarse en la parte delantera de la nave, su frente debe apuntar unos pocos grados hacia la proa. La cara horizontal de la caja marina debe tener una inclinación de 2 a 3 grados para asegurar un flujo laminar de agua.

c) La limpieza de los transductores es esencial para mantener su eficiencia operativa. Cualquier acumulación de alga marina, cosas pegajosas u otro tipo de crecimiento marino disminuirá su eficiencia y debe removerse. El

retiro cuidadoso de ellos siempre debe tomarse en cuenta para no dañar el transductor, y no debe aplicar ningún tipo de pintura a la cara exterior del transductor.

d) Otros problemas a considerar son: el trazado y tipo de cable, para evitar interferencias de otros equipos, además debe ser bien asegurado para evitar su movimiento; también puede haber interferencia de otros transductores hidroacústicos de la nave, sobre todo si son de la misma frecuencia o múltiples de ella que originan armónicas.

4.4.4.2 Frecuencia de operación.

El oído humano puede detectar ondas sonoras con frecuencias en el rango de 25 Hz a 16 KHz. La mayoría de los peces no lo realizan tan bien, su escucha es mejor usualmente a bajas frecuencias, entre 100 Hz a 500 Hz, y en el mejor de los casos no va más alla de 1 KHz. Por lo que los sonidos más altos son inaudibles para la mayoría de los peces, mientras que los

generados por las embarcaciones, sus máquinas y aparejos de pesca pueden ser escuchados por los peces a largas distancias, por ser de baja frecuencia y en el rango audible de ellos.

El sonar promedio opera a frecuencias más lejanas que aquellas que puede captar el oído humano y el pez. Las más usadas van desde los 20 KHz hasta 200 KHz y se pueden clasificar en 3 grandes categorías:

a) Baja frecuencia : 20 KHz a 50 KHz
b) Media frecuencia: 50 Khz a 100 KHz
c) Alta frecuencia : 100 KHz a 200 KHz.

La mayoría de los sonares fueron originalmente de muy baja frecuencia, ya que eran diseñados para exploración de gran alcance en aguas profundas; sin embargo, los cambios en los patrones de los peces han resultado en la introducción en los últimos años de sonares pequeños y de alta frecuencia que mejoran la discriminación de los objetivos en aguas poco profundas y con alcances limitados. Los sonidos de alta frecuencia marcan mejor los pequeños objetivos.

En nuestro país la mayoría de las embarcaciones cerqueras usan la frecuencia de 60 KHz para los sonares, sin embargo esta observación cambia cuando se trata de los cerqueros con aplicaciones al atún, que suelen utilizar sonares de mayor potencia y menor frecuencias a veces. En cuanto a las ecosondas, normalmente se usa la frecuencia de 50 KHz, salvo en aplicaciones muy particulares, aunque actualmente se ha ido incrementando el uso de esta frecuencia en combinación con la de 200 KHz, debido principalmente a la nueva tecnología.

4.4.4.3 Fuentes radiadoras de ruido.

4.4.4.3.1 Ruido de maquinaria.

El ruido de la maquinaria es originado como vibración mecánica de las muchas y diversas partes en movimiento de una nave. Esta vibración es conducida al mar a través del casco. La vibración se puede originar de las siguientes formas:

a) Rotación de partes desbalan-

puede ser una ventaja para embarcaciones pesqueras explotando peces de aguas poco profundas en bajas densidades. El haz ancho detecta más peces.

- Operación en condiciones severas de bamboleo y cabeceo de la nave. Un haz ancho es menos sensible al bamboleo y cabeceo que un haz estrecho. Muchos transductores tienen un haz ancho en el plano transversal y algo estrecho en el plano longitudinal, debido a que los ángulos de bamboleo son mayores que los de cabeceo.

- Un sistema de bajo costo. Un domosónico de haz ancho es más pequeño y barato que un transductor de haz estrecho.

Cuando el transductor convierte energía eléctrica en acústica (o viceversa), parte de la energía es perdida debido a:

- Pérdidas mecánicas internas.
- Pérdidas dieléctricas en la cerámica piezoeléctrica.

Las pérdidas se convierten en calor. La eficiencia del transductor es definida

ceadas, como ejes no alineados o armaduras de motores.

b) Discontinuidades repetitivas, como los dientes de algún engranaje, armadura floja, hélices de turbinas.

c) Partes reciprocantes, como las explosiones en cilindros de máquinas reciprocantes.

d) Cavitación y turbulencia en el flujo del fluido de bombas, tuberías, válvulas y condensadores de descarga.

e) Fricción mecánica, como en rodamientos y acoples.

Cada pieza de maquinaria produce fuerzas vibracionales periódicas con la frecuencia fundamental indicada y por tanto genera una serie de componentes de línea en esta frecuencia y sus armónicas. Sin embargo, a

una distancia en el mar, el sonido producido no depende sólo de su magnitud sino también de como se transmiten al casco y por ende al mar.

4.4.4.3.2 Ruido de propela.

Aun cuando la propela es parte de la maquinaria de propulsión de la embarcación, el ruido que genera tiene distintos orígenes y un distinto espectro de frecuencia que el ruido de maquinaria; pues este último es generado dentro de la nave y llega al agua luego de varios procesos de transmisión a través del casco; el ruido de propela es generado fuera de la embarcación y del casco.

La principal fuente de ruido de la propela es el ruido de cavitación inducido por las hélices rotantes. Cuando una hélice rota, crea regiones de presión baja o negativa en los filos de

las superficies de las propelas; si estas presiones negativas se incrementan lo suficiente, tiene lugar la ruptura física del agua y el aparecimiento de cavidades en forma de burbujas pequeñas. Estas burbujas de cavitación se colapsan en un corto tiempo, por distintas razones, y entonces emiten un pulso sonoro; como son algunos se produce un ruido de alta frecuencia en relación al espectro del ruido de la nave. Esta acción se conoce como cavitación de la propela. Conforme se incrementa la velocidad de la nave, entonces la cavitación comienza a radiar un ruido de alta frecuencia que en un punto dado se incrementa repentinamente. La velocidad que ocurre en este punto se conoce como la velocidad crítica de la nave.

4.4.4.3.3 Ruido hidrodinámico.

El ruido hidrodinámico se origina en el flujo fluctuante e irregular del fluido que pasa por la nave en movimiento.

Bajo circunstancias normales, el ruido hidrodinámico es solamente un contribuyente menor al ruido radiado y es prácticamente enmascarado por el ruido de maquinaria y propela. Todo esto se encuentra muy relacionado con el diseño de los buques.

4.4.4.4 Entrenamiento de operadores.

Hay una tendencia natural, cuando se mercadea un nuevo equipo, por parte del manufacturador a subestimar las dificultades de operación; pues no desea dar la impresión que el usuario deba tener gran habilidad y experiencia si el patrón pesquero desea obtener resultados útiles y, por supuesto, sugerir esto sería exagerar el problema en forma considerable.

Aun así, no es bueno negar que hay más dificultades involucradas en el éxito de

ecoposicionamiento de peces que en el ecosondaje de fondo. Es por tanto de incumbencia del fabricante suministrar no sólo el equipo, sino también guiar y ayudar en el entrenamiento en su uso. Esto es también de su interés. El capitán que sale a faena con un sonar, por primera vez, si está entrenado conocerá que esperar y que no, y como usar el equipo. Por supuesto, el irá aprendiendo de su experiencia y con otros miembros de su tripulación será más hábil, y eficiente en su operación, con el tiempo. Las instrucciones escritas están lejos de servir como ayuda, aun cuando sean útiles, si no son leídas, aprendidas y dirigidas; pero realmente es mucho esperar que el pescador haga todo esto sin ayuda previa.

La materia es técnica y aun cuando no todo se explique en lenguaje técnico, éste es inevitable al tratar de explicar ciertas cosas y por supuesto hay que saber explicarlo al lector que no tiene entrenamiento previo en acústica, electrónica y materias afines. Una alterna-

tiva es ir con la gente al mar y darles instrucción de primera mano con cardúmenes de peces, aunque es difícil de llevar a la práctica, es costoso y demanda tiempo.

Algo más especializado, por supuesto, es la simulación de la realidad en tierra por medio de aparatos de entrenamiento especialmente diseñados. La habilidad operativa involucrada en este caso difiere considerablemente de las habilidades reales en verdaderas faenas de pesca, por lo que no significa que un simulador de tierra sea totalmente necesario, ni sea la única respuesta para la detección horizontal de peces.

La forma en que las instrucciones y consejos son dados deben depender del problema o aplicación particular, pero el hecho importante es que el usuario las obtenga; en caso contrario, tanto el fabricante como el usuario sufrirán largamente por malas interpretaciones.

Hasta la reciente evolución de la pesca, ésta ha sido esencialmente local, en

respuesta a condiciones locales. Como resultado de la introducción de modernas ayudas, como la detección de ecos, la industria ha ido removiendo el ambiente y tradiciones de los puertos pesqueros, llevándolos a jugar un papel importante en esta evolución. Como juegan una parte efectiva entonces debe haber una real comprensión por los ingenieros de los problemas de los pescadores y viceversa, y así, establecer buenas líneas de comunicación, tan esenciales en ambas direcciones.

C O N C L U S I O N E S Y R E C O M E N D A C I O N E S

- En nuestro país existen instituciones que hacen investigaciones del mar, tanto de sus características y comportamiento como de los recursos que posee; esto nos señala que existe material e información acerca del tema. Sin embargo hemos de señalar que si bien la información disponible es satisfactoria, sería recomendable que se incluyan en futuras investigaciones temas relacionados con aspectos más prácticos que relacionen el conocimiento científico con las necesidades de la industria en cuanto a implementación de equipos electrónicos de detección y de los factores que limitan su operación y funcionamiento.

- Aunque ya se ha señalado en el presente trabajo que es necesario el entrenamiento de operadores en estos equipos electrónicos de detección cada vez más sofisticados, es indispensable hacer notar que en la actualidad nuestro país no cuenta con una institución que disponga de recursos materiales para lograr este objetivo, lo que lleva a que la práctica diaria sea la que determine la pericia de nuestros capitanes y su grado de perfeccionamiento profesional.

- También hemos de señalar que el recurso humano, en cuanto a soporte técnico, debe ser preparado en mejor forma ya que es, actualmente, escaso en cuanto a número y conocimiento; siendo por tanto, también en este punto, la

práctica diaria la que forma a las personas que puedan satisfacer las necesidades de la industria pesquera ecuatoriana.

- Es indudable que el incremento del campo de aplicaciones hará que los equipos que adquiera nuestro país sean cada vez más sofisticados pues, la mejor y más racional explotación de los distintos recursos y la eficiencia requerida así lo exigierán. Todo esto llevará a que se planteen y pongan en práctica soluciones para mejorar el conocimiento de los operadores y su pericia práctica, además motivará la demanda del recurso humano técnico preparado y capacitado en hidroacústica. Las personas responsables de la planificación a futuro deben tener en cuenta a este campo para que las respuestas a la industria, cuando ésta requiera la solución al problema, sea la más adecuada.

- El presente trabajo pretende servir como base a futuras investigaciones o trabajos con relación a otras aplicaciones que utilizan la transmisión del sonido bajo el agua como principio de operación.

A P E N D I C E I

SONARES DIRECCIONALES, OMNIDIRECCIONALES Y MULTI HAZ

1.1 SONARES DIRECCIONALES.

Los sonares direccionales son conocidos también como sonares tipo "searchligth". Sus características operativas y funcionales, así como la forma de presentación de los ecos recibidos en el dispositivo de pantalla, vienen dados por el diseño del transductor.

El equipo básico de sonar, ya descrito en el presente trabajo, en el caso de los sonares omnidireccionales es el mismo; sin embargo, es el domosónico, transductor o proyector el que lo caracteriza debido a que el haz sonoro que produce es posible compararlo con el haz de una linterna de luz. Este haz sonoro es movido alrededor de su eje, conforme elección del operador, hasta cubrir un cierto sector llamado el sector de búsqueda o exploración.

Conforme el haz sonoro continúa avanzando va cubriendo un área transversal, con respecto a su dirección de propagación, cada vez mayor. La mayor concentración de potencia o energía sonora se encuentra en el centro del haz sonoro; esta energía, como ya hemos señalado en este trabajo, disminuye conforme se aleja del centro

del haz y según se va alejando de la fuente de emisión o proyector.

Debido a que se necesita la mayor cantidad de potencia posible para poder detectar objetivos pequeños, ya sean de peces individuales o peces dispersores de la energía sonoro, éstos deben estar en el centro del haz para poder ser observado en la pantalla; y ésta constituye la razón por la cual el correcto ángulo de inclinación debe ser escogido. Para poder tomar las decisiones correctas en este punto se requiere el conocimiento y la experiencia de los patrones de pesca; pues el sonar no atrae a los peces al barco, el punto más fuerte en la parte de aplicaciones de estos equipos es como ayuda en la detección de bancos de peces bajo condiciones tan extremas, como aquella en que no hay otra forma de detectarlos sino es con ayuda de un equipo que puede explorar zonas en la que los pescadores se encuentran ciegos. En este punto, si combinamos la tecnología y bondades del sonar con la experiencia de los operadores, es decir los capitanes de pesca, obtendremos una ventaja competitiva en cuanto a la eficacia de las capturas y la efectividad del arte de pesca usado.

Con el fin de obtener una mejor idea de como está constituido un sistema de sonar direccional, tenemos fotos de los componentes del mismo.

Debemos mencionar que este tipo de sonar es el predominante, al momento, en la flota ecuatoriana en cuanto a la cantidad de equipos existentes. Son entérminos generales sonares de frecuencia media (transmiten en 60 KHz), para operación con alcances medios (500 metros) dependiendo de las condiciones del mar. Existen básicamente 2 tipos de proyectores o transductores en uso: el uno es del tipo piezoeléctrico usando cristales y el otro es también del tipo piezoeléctrico pero usando materiales cerámicos. El tipo más antiguo de sonar usa un domosónico no estabilizado, lo cual lo compensa con un haz sonoro más ancho; con los incovenientes en cuanto a resolución y alcance efectivo que esto significa. El otro tipo de sonar más moderno usa domosónico estabilizado, ya sea por sistema cardánico o por sistema electrónico, dependiendo del manufacturador.

1.2 SONARES OMINIDIRECCIONALES Y MULTI HAZ.

Las principales diferencias tanto funcionales como operativas, de los sonares omnidireccionales y de multihaces con los sonares direccionales vienen determinadas principalmente por el diseño de la unidad de transducción o domosónico. Para visualizar en forma rápida y sencilla lo podemos imaginar al transductor como un conjunto o arreglo de algunos transductores más pequeños que lanzan energía sonora en forma simultánea;

la resolución obviamente depende de la abertura del haz de cada uno de los transductores que componen el arreglo.

A manera de resumen, podemos decir: que los sonares direccionales concentran la energía sonora en un haz único, lo cual permite tener una detección de largo alcance, pero con un área de búsqueda o exploración limitada y lenta; los sonares omnidireccionales envían y distribuyen a través del arreglo de transductores, toda la energía sonora alrededor del barco, esto conlleva a la obtención de alcances cortos porque la potencia se esparce en todas las direcciones, además en estos sonares se tiene un rango de inclinación (tilt) vertical limitado por razones de diseño; los sonares multihaces, en cambio, combinan la característica de los sonares direccionales y los omnidireccionales, porque permite la elección de áreas de búsqueda con una cobertura de zonas grandes y en forma rápida, el mecanismo de inclinación no se encuentra limitado, mejora en la detección de largo alcance y presenta pocos problemas de interferencia.

En esta parte se ha decidido tratar juntos a estos dos tipos de sonares, omnidireccionales y multihaces, debido a que en su diseño y operación son básicamente similares, salvo la diferencia anotada en el diseño del transductor, la cual es por obvias razones muy

significativa.

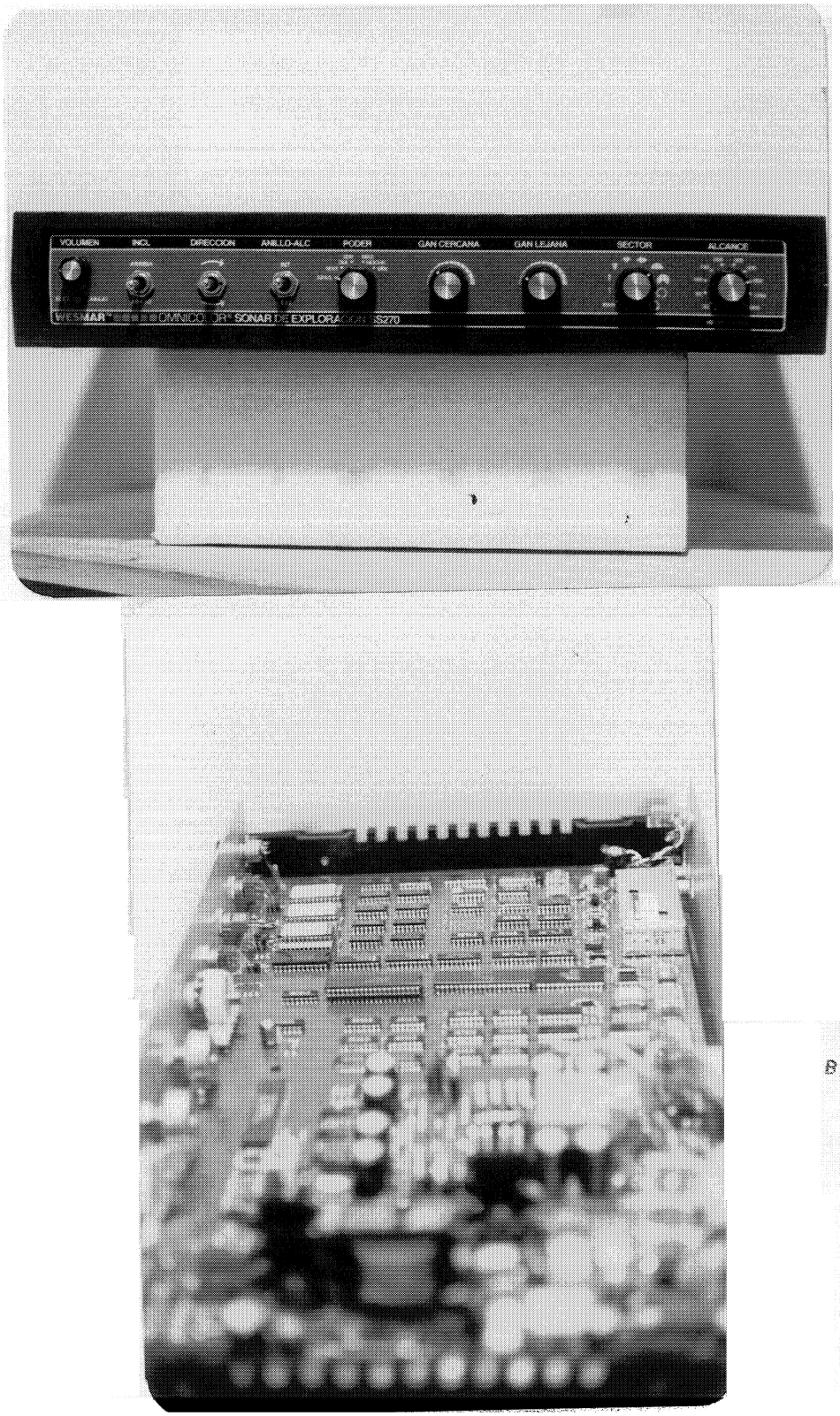
La diferencia del diseño en el transductor permite que los sonares multihaces tengan un rango efectivo, no teó-rico, mayor que los sonares omnidireccionales, asumiendo las mismas condiciones operativas (potencia, frecuencia, tipo de transductor, especificaciones electrónicas, relación señal/ruido, instalación, etc.) y funcionales (experiencia y conocimiento de los equipos por parte del usuario).

De estos dos tipos de sonares, la flota ecuatoriana y concretamente la atunera, tienen sonares omnidireccionales y no existe ningún sonar multihaz en ningún barco pesquero ecuatoriano, ésto se explica debido a que cronológicamente primero aparecieron los sonares omnidireccionales y al uso o función que tiene para la pesca del atún.

Tanto los sonares omnidireccionales como los multihaces incorporan en su diseño, los últimos avances en procesamiento digital, en presentación de la imagen y sobre todo en comunicación con otros equipos de a bordo, lo cual le permite diversos modos de presentación como: presentación en tiempo real, trazos de los aparejos de pesca, estimación de rumbo y velocidad de los objetivos bajo el agua, etc.

Para tener una idea de los equipos que estamos tratando

hemos incluido gráficos de configuración de los mismos y de presentación tomados de catálogos de algunos manufacturadores.



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
1958
GUAYAQUIL
BIBLIOTECA

FIGURA 1. Consola de operación de un sonar unidireccional se incluye circuitería electrónica.

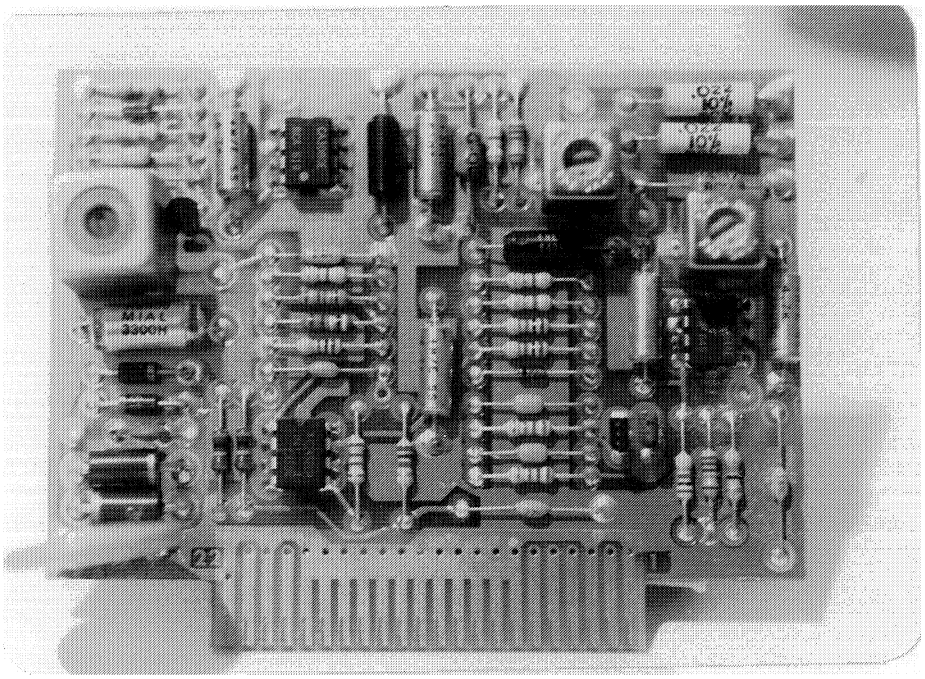
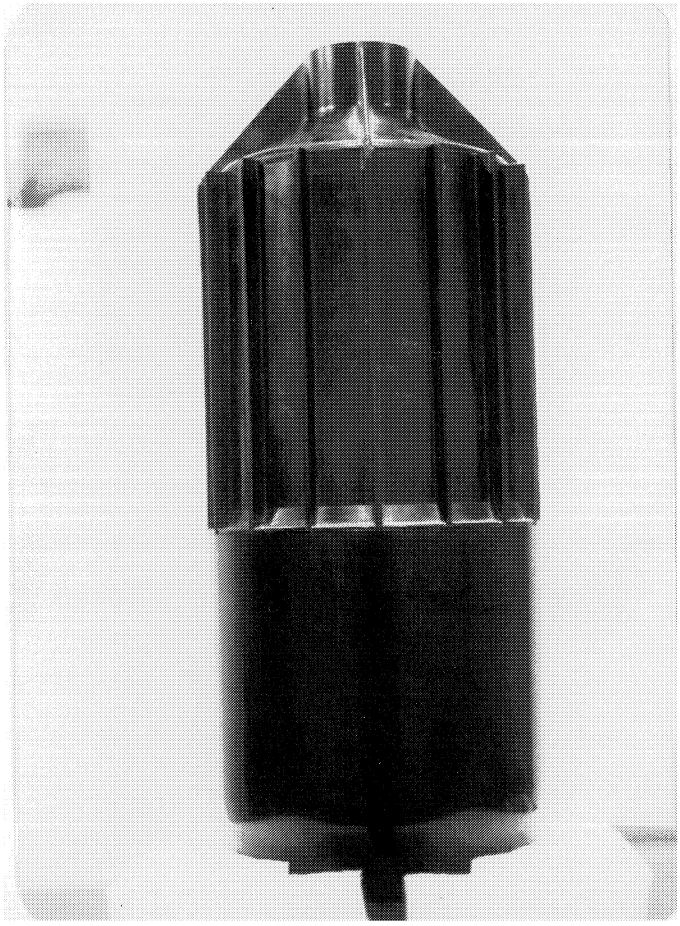


FIGURA 2. Tarjeta preamplificadora de las señales de un transductor de sonar unidireccional.



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
GUAYAQUIL
1958
BIBLIOTECA

FIGURA 3. Capuchón de un transductor hidroacústico de un sonar unidireccional.

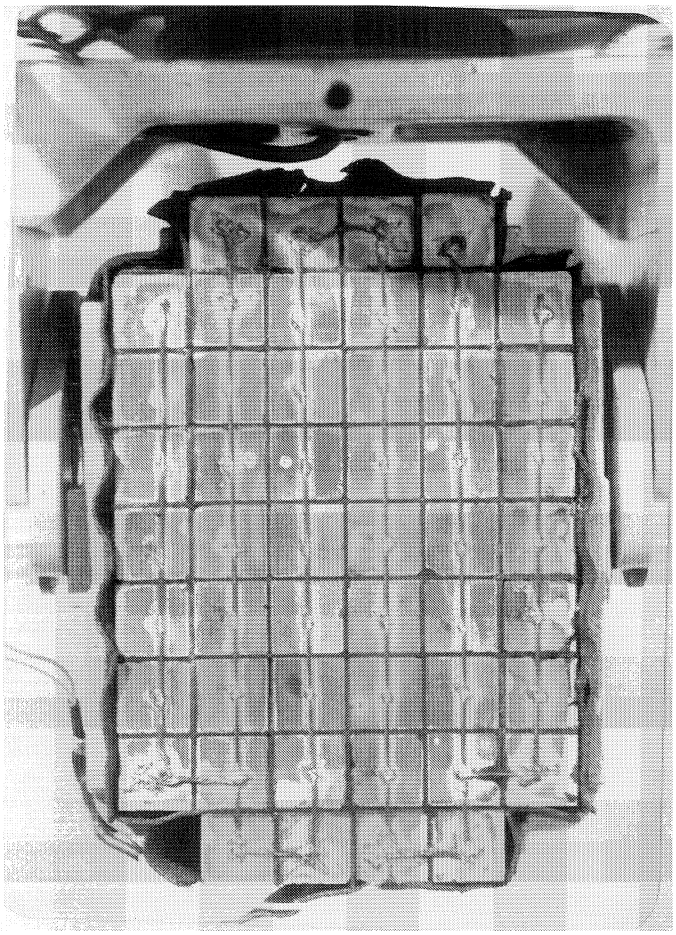


FIGURA 4. Transductor hidroacústico de un sonar unidireccional (los elementos del arreglo son cristales).

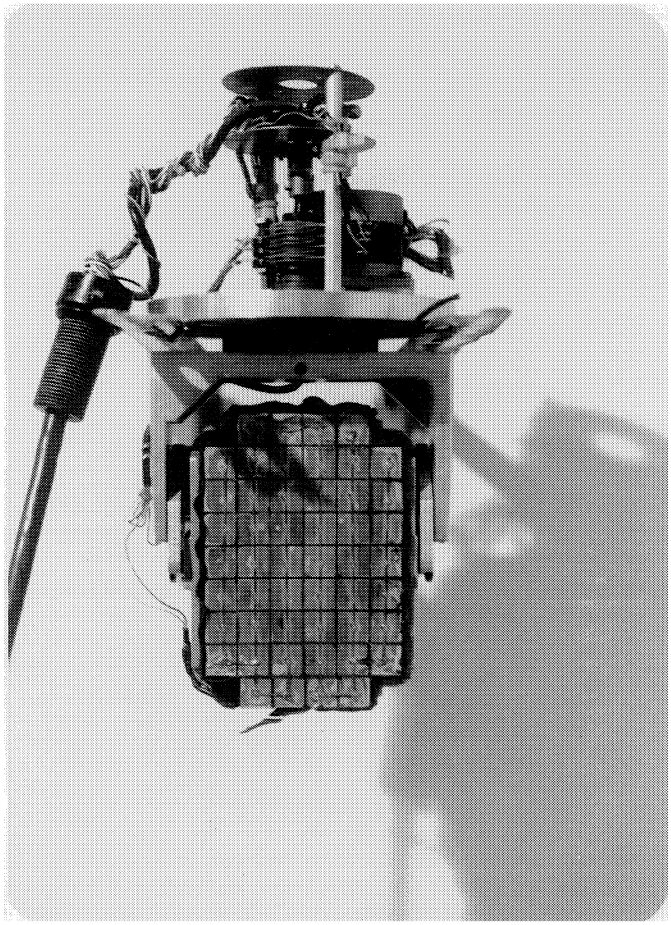


FIGURA 5. Aspecto de un transductor hidroacústico de sonar unidireccional, se aprecia el cableado y el sistema de busqueda (scanning).

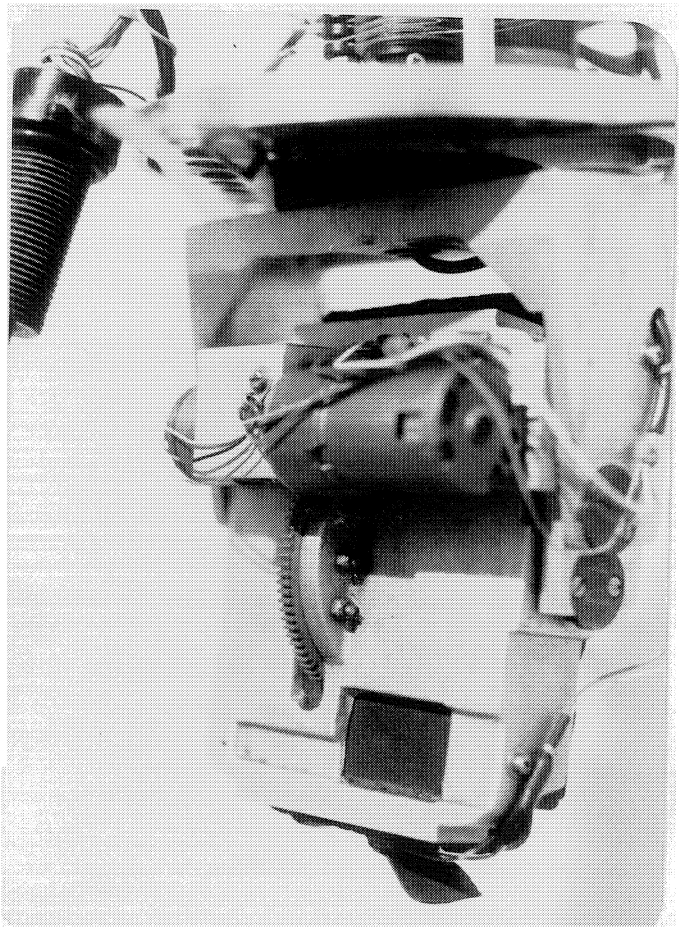


FIGURA 6. Sistema de control de inclinación (tilt) de transductor hidroacústico de sonar unidireccional.

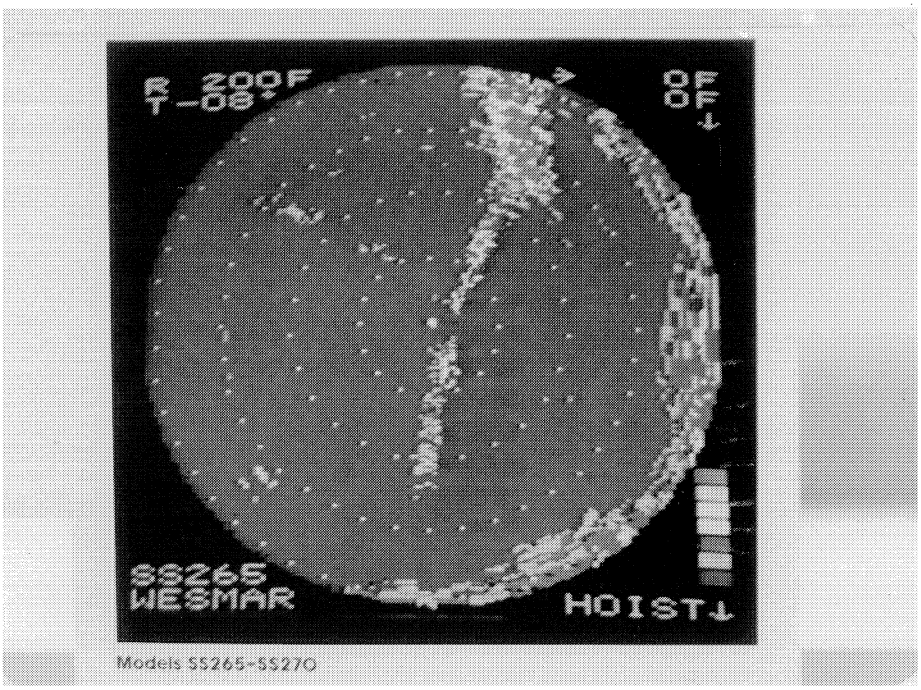


FIGURA 7. Presentación de pantalla de un sonar unidireccional.

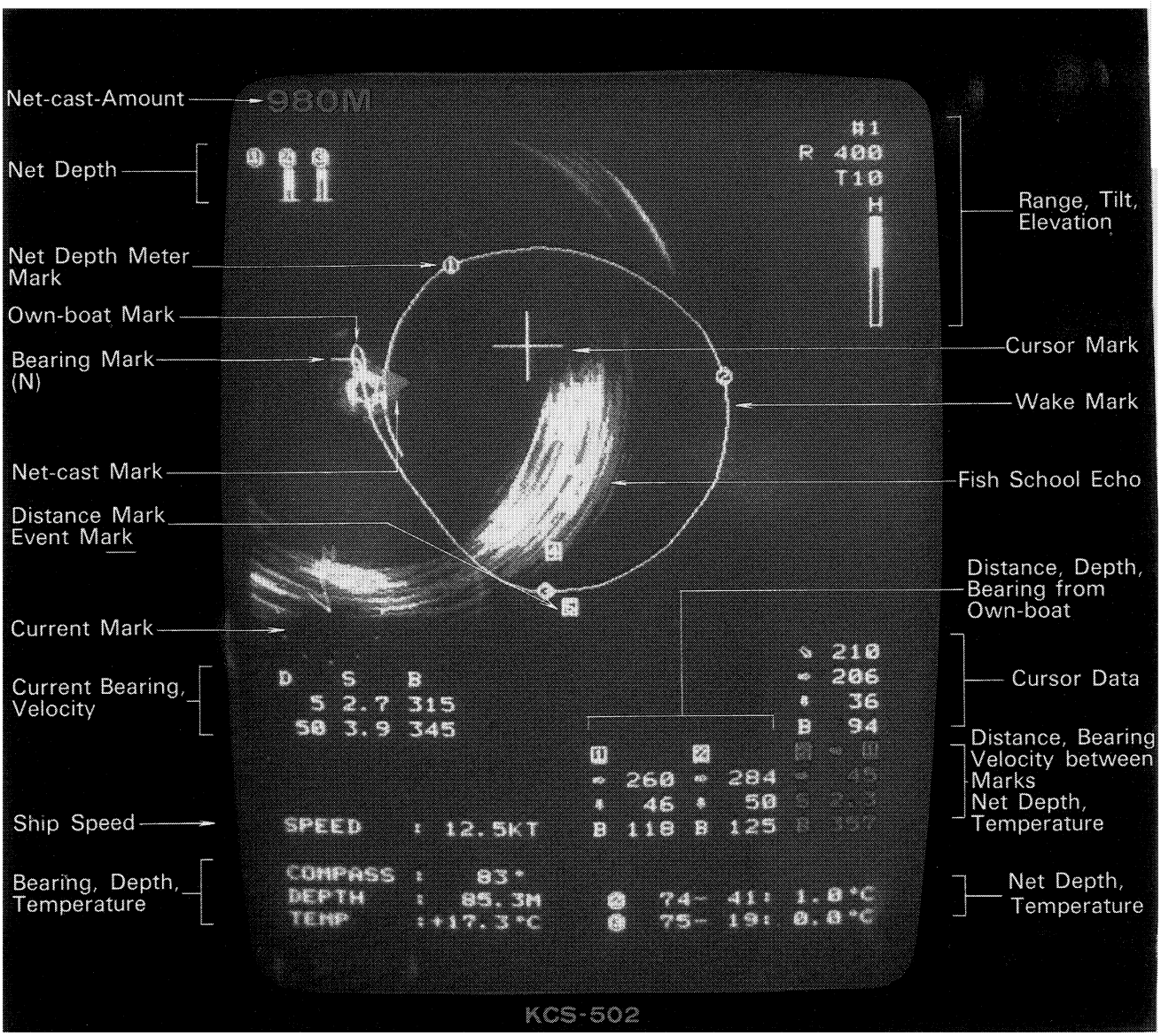
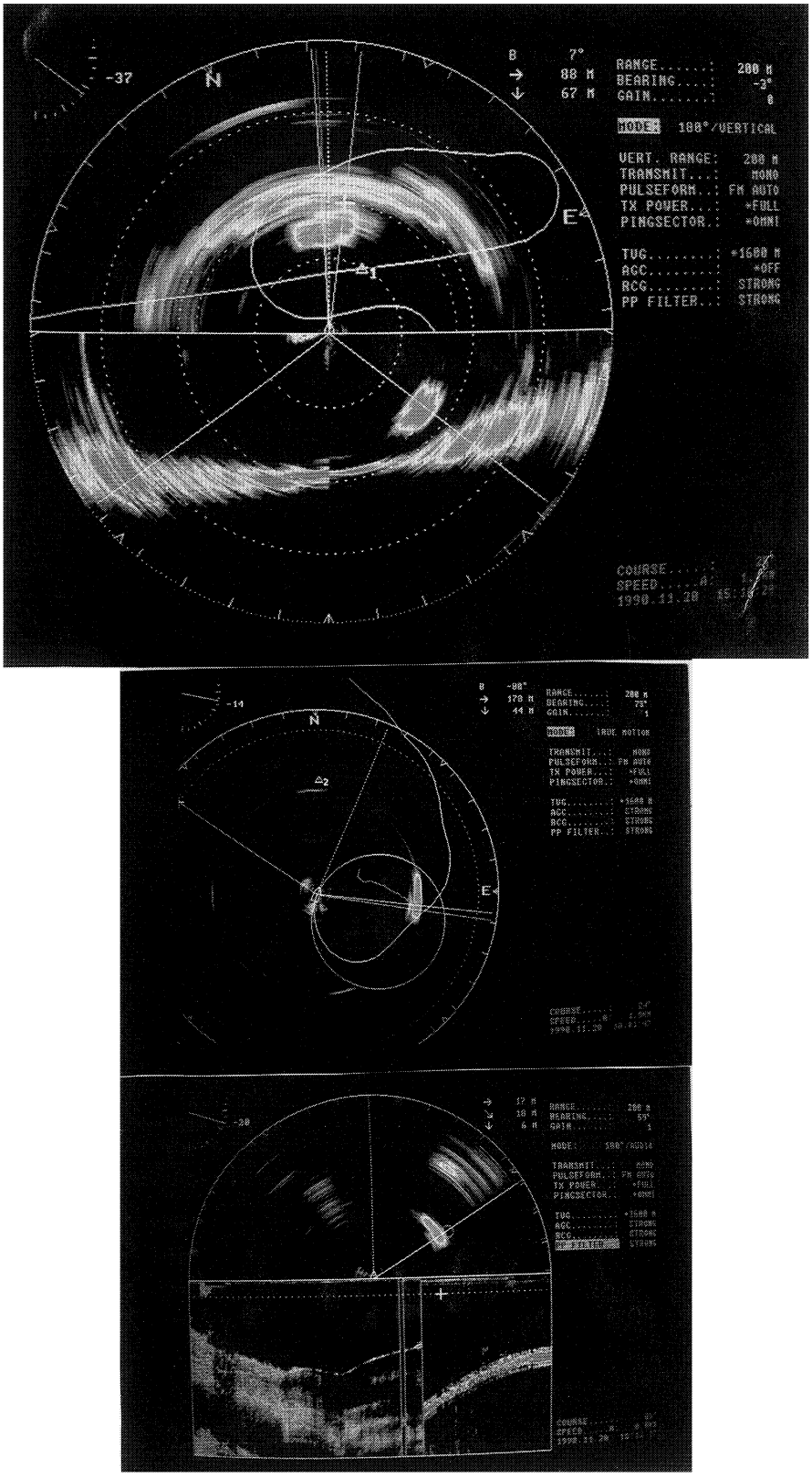


FIGURA 8. Presentación de un sonar omnidireccional.



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
1958
GUAYAQUIL
BIBLIOTECA

FIGURA 9. Pantalla y consola de control de un sonar multidireccional (o multihaz).



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
GUAYAQUIL
1958
BIBLIOTECA

FIGURA 10. Presentaciones de distintos modos de operación de un sonar multidireccional para pesca de cerco.

B I B L I O G R A F I A

1. Vernon Albers - The Pennsylvania State University, "Uderwater Acosutics Handbook", (The Pennsylvania State University).

2. C. Bercy - B. Bordeau, "Effects of underwater noise radiated by tuna fishing boats on fish behavior" (International Symposium on Fisheries Acoustics, Junio 1987).

3. Helge Bodholt - Simrad Subsea, "Modern echo sounder transducers" (Simrad Symposium on underwater acoustic instrumentation, Junio 1986, Revisión Noviembre 1989).

4. J. Burczynski, "Introduction to the use of sonar systems for estimating fish biomass" (FAO, 1982).

5. Clay and Medwin, "Acoustical Oceanography: Principles and applications" (John Wiley and Sons, 1977).

6. Johannesson and Mitson, "Fisheries Acoustic. A practical manual for aquatic biomass estimation" (FAO, 1983).

7. Kinsler - Frey, "Fundamentals of Acoustics".

8. R. B. Mitson and D. V. Holliday, "Future fisheries acoustic" (International Symposium on fisheries acoustics, Junio 1987).

9. Myer, Holm and McAllister, "Handbook of ocean and

underwater engineering".

10. Proceedings of the institute of acoustics, "Progress in fisheries acoustics" (Lowestoft: underwater acoustic group conference held at maff fisheries laboratory, Marzo 1989).

11. Sea fish industry authority, "Course Handbook: Acoustic fish detection".

12. Universidad de California: Varios autores, "Ocean engineering".

13. Robert J. Urick, "Principles of underwater sound" (McGraw-Hill, 2da. edición, 1975).

14. Williams, Higginson and Rohrbough, "Sea and air: the naval environment".

15. World fishing gear, Volumen I (FAO).

16. World fishing gear, Volumen II (FAO).