

**UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE**

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Acústica

# **Caracterización acústica de señales generadas por estructuras y organismos vivos en jaulas salmoneras**

## **5. ANTECEDENTES TEORICOS**

Tesis presentada para optar al grado de Licenciado en Acústica y al Título Profesional de Ingeniero Acústico.

Profesor Patrocinante: Sr. Bernardo Zapata Navarro - Instituto de Fomento Pesquero.

**Guillermo Alejandro Montoya Trujillo**

**Valdivia Chile 2003**



# Contenido

Profesores Informantes . .

Agradecimientos .

1. RESUMEN .

2. SUMMARY . .

3. INTRODUCCION .

4. OBJETIVOS . .

5. ANTECEDENTES TEORICOS . 1

    5.1. Acústica Submarina . . 1

    5.2. Granjas de Cultivo de Salmones . 19

    5.3. Monitor Hidroacústico de Alimento de Salmónidos . . 26

6. MATERIALES Y METODOLOGIA DE TRABAJO .

7. RESULTADOS . .

8. DISCUSION .

9. CONCLUSIONES . .

10. REFERENCIAS .

ANEXOS .



## 5. ANTECEDENTES TEORICOS

### 5.1. Acústica Submarina

#### 5.1.1. Velocidad del Sonido.

La *velocidad del sonido*  $c$ , es una función de la temperatura y presión (ó profundidad), en el caso de agua pura. Al referirse a agua de mar, se debe considerar una nueva variable, la salinidad. Hasta ahora, no se han encontrado otras propiedades físicas que afecten de manera considerable a la velocidad del sonido en el mar, a excepción de contaminantes, tales como burbujas de aire y organismos biológicos. Muchos han sido los intentos de establecer una expresión para  $c$  en el mar bajo estos tres parámetros físicos, pues lograr obtener una expresión precisa para  $c$ , es un trabajo extremadamente complicado, debido a las grandes variaciones, principalmente de temperatura, que ocurren en algunas capas del mar.

Dado que no existe una expresión única para la velocidad del sonido en el mar, existe si un conjunto de las más usadas, tal es el caso de las expresiones que Urick (1983) presenta para la velocidad del sonido en el mar, estas son aplicables bajo límites definidos para los tres parámetros físicos que las componen:

Expresión	Límites	Autor
$c = 1492,9 + 3(T-10) - 6 \cdot 10^{-3}(T-10)^2 - 4 \cdot 10^{-5}(T-18)^2 + 1,2(S-35) \cdot 10^{-3}(T-18)(S-35) + D/61$	$-2 \leq T \leq 24,3^\circ$ $30 \leq S \leq 42$ $0 \leq D \leq 1000$	C. C. Leroy, 1969
$c = 1449,2 + 4,6T - 5,5 \cdot 10^{-3} T^2 + 2,9 \cdot 10^{-4} T^3 + (1,34 \cdot 10^{-3} T)(S - 35) + 1,6 \cdot 10^{-5} D$	$0 \leq T \leq 35^\circ$ $0 \leq S \leq 45$ $0 \leq D \leq 1000$	H. Medwin, 1975
$c = 1448,96 + 4,591T - 5,304 \cdot 10^{-3} T^2 + 2,347 \cdot 10^{-4} T^3 + 1,340(S-35) - 1,630 \cdot 10^{-2} D + 1,675 \cdot 10^{-3} D^2 - 1,025 \cdot 10^{-2} T(S-35) - 7,139 \cdot 10^{-13} TD^3$	$0 \leq T \leq 30^\circ$ $30 \leq S \leq 40$ $0 \leq D \leq 8000$	K. V. Mackenzie, 1981
$D =$ Profundidad, en [m], $S =$ Salinidad, en partes por mil [ppt], $T =$ temperatura, en [°C].		

**TABLA 5.1.1.1.** Expresiones para la velocidad del sonido, en  $\square m/s\square$ , en términos de Temperatura, Salinidad y Profundidad.

Para efectos de cálculo, frecuentemente se ocupa una velocidad nominal de 1500  $\square m/s\square$ .

### 5.1.2. Presión e Intensidad Sonora.

El sonido es un movimiento regular (compresiones y expansiones) de moléculas de un medio elástico, lo cual genera una onda sonora. Un medio, se conoce como elástico, cuando es capaz de propagar el movimiento de un grupo de sus partículas a las inmediatamente adyacentes y así sucesivamente.

Una onda de sonido, porta energía mecánica dentro de ella, en forma de energía cinética (partículas que se encuentran en movimiento) y energía potencial (partículas que están en reposo dentro del medio elástico). Esta energía se cuantiza bajo el nombre de *intensidad sonora I*, la cual, se define como la cantidad de energía por segundo que atraviesa un área unitaria orientada en forma normal a la dirección de propagación de la onda sonora.

En una onda plana, la intensidad instantánea se relaciona con la presión instantánea de la siguiente forma:

donde la constante  $\square c$  se conoce como la *impedancia característica del medio*,  $Z_{AC}$ . Que corresponde a la resistencia que opone el medio a la propagación de una onda sonora. Urlick (1983) presenta valores para  $Z_{AC}$  „ estos son:

Medio	$Z_{ac}$
Agua de mar	$15 \cdot 10^3 \left[ \frac{g}{cm^2 \cdot s} \right]$
Aire	$42 \left[ \frac{g}{cm^2 \cdot s} \right]$

**TABLA 5.1.2.1. Valores para la resistencia acústica específica.**

Debido a que en ondas sonoras, las magnitudes tales como la presión, intensidad, potencia, pueden variar considerablemente de valor (por ejemplo, la intensidad acústica presenta variaciones del orden de  $10^{12}$ ), se hace útil trabajar con niveles más que con las magnitudes directamente. El nivel es esencialmente una relación logarítmica, de la magnitud a la cual se refiere, y el hecho de que sea logarítmica trae como consecuencia una disminución de escala (por ejemplo, para la intensidad, una variación de  $10^{12}$  sólo corresponderá a una variación en la escala de nivel de intensidad acústica de 120 dB).

De esta forma, se define *nivel de presión acústica* como:

$$NP = 20 \log \frac{P_2}{P_1} \quad [dB] \quad (5.1.2.2)$$

donde  $p_1$  y  $p_2$  son dos presiones acústicas, a menudo  $p_1$  corresponde a una presión acústica de referencia de 1  $[\mu Pa]$  para el agua y  $2 \cdot 10^{-5}$   $[Pa]$  para el aire.

De la misma manera el nivel de *intensidad acústica* se define por:

$$NI = 10 \log \frac{I_2}{I_1} \quad [dB] \quad (5.1.2.3)$$

donde  $I_1$  y  $I_2$  son dos intensidades acústicas, a menudo  $I_1$  corresponde a la intensidad acústica de referencia de  $6.7 \times 10^{-19}$   $W/m^2$  para el agua y  $10^{-10}$   $W/m^2$  para el aire.

### 5.1.3. Pérdidas de Transmisión.

La *pérdida de transmisión de sonido*, es la suma de las pérdidas de propagación y absorción. La *pérdida por propagación*, es un efecto geométrico que representa el debilitamiento de la señal acústica cuando esta recorre una determinada distancia. La pérdida de transmisión, **TL**, debido a propagación se expresa como:

$$TL = 20 \log r \quad [dB] \quad (5.1.3.1)$$

La *absorción*,  $\alpha$ , según Urick (1983), es causada por tres agentes: viscosidad de corte (shear viscosity), viscosidad de volumen y relajación química. Los dos primeros agentes se relacionan con las propiedades físicas del agua, la absorción causada por la relajación química se debe a la presencia de  $MgSO_4$  (sulfato de magnesio) en el agua. Una expresión de absorción, para frecuencias superiores a 25 [kHz] es:

$$\alpha = \frac{ASf^2}{(f_t^2 - f^2)} + \frac{Bf^2}{f_t} \quad [\text{dB/m}] \quad (5.1.3.2)$$

donde:

S	= salinidad en ppm (partes por mil).
f	= frecuencia en kHz.
$f_t$	= frecuencia de relajación en kHz.
T	= temperatura en Celsius.
A	= $1,70 \cdot 10^{-5}$
B	= $2,45 \cdot 10^{-5}$

La ecuación para la frecuencia de relajación es:

$$f_t = 2,19 \cdot 10^{\left( \frac{1520}{T-273} \right)} \quad [\text{kHz}] \quad (5.1.3.3)$$

Así, la expresión final para la *pérdida de transmisión* es:

$$TL = 20 \log r + \alpha r \quad [\text{dB}] \quad (5.1.3.4)$$

#### 5.1.4. Ecuaciones del Sonar.

Una parte importante, de la aplicación acústica submarina, es la detección de algún tipo de señal acústica en presencia de ruido, lo cual conduce a la ecuación del sonar. El término sonar proviene de la abreviación de "SOund Navigation And Range" que sería "navegación y distancias por sonido", por lo que las *ecuaciones del sonar* son las relaciones necesarias entre emisor-medio-receptor que garantizan la detectabilidad de un objeto.

Existen dos formas de detectar objetos (ó blancos) submarinos. Una pasiva y otra de forma activa. La primera es un sistema de recepción acústica que permite escuchar sonidos emitidos por objetos sumergidos, lo cual se conoce como *sonar pasivo*. La segunda es un sistema de emisión-recepción acústica que basa su funcionamiento en la detección de un eco que devuelve un objeto a ser insonificado por un tren de pulsos sonoros emitidos desde un transmisor, lo que se conoce como *sonar activo*. El propósito de ambas formas es detectar objetos sumergidos y obtener información sobre la posición, distancia y movimiento.

#### 5.1.4.1. Ecuación del Sonar Pasivo.

Para comprender mejor la ecuación del sonar pasivo, primero debemos entender algunas relaciones. El sonido recibido desde un blanco se conoce como *nivel de eco*, **EL**, y se define como:

$$EL = SL - TL \quad (5.1.4.1.1)$$

donde **TL** es la pérdida de transmisión generada en el camino desde el blanco hacia el receptor y **SL** es el *nivel de fuente*, nivel con que el blanco emite sonido. Pero el ambiente sonoro submarino no se diferencia mucho del que percibimos en tierra, pues existen una gran infinidad de sonidos que compiten con la señal de interés, lo que se considerará como *ruido*. Este es el caso de las olas que rompen, lluvia, sonidos de mamíferos, los ruidos de los barcos, ó simplemente el ruido hidrodinámico generado por el movimiento de la plataforma (estructura que soporta al transductor en la medición) en el agua. Para poder detectar una señal acústica submarina, en presencia de ruido, el **EL** debe ser igual ó superior al umbral de detección y el nivel de ruido detectado, o sea:

$$EL \geq DNL + DT \quad (5.1.4.1.2)$$

donde:

DNL	= nivel de ruido detectado.
DT	= umbral de detección.

Kinsler (1995) establece que para un receptor (transductor) direccional, el *nivel de ruido detectado* es:

$$DNL = NL - DI \quad (5.1.4.1.3)$$

donde el *nivel de ruido*, **NL**, corresponde al ruido generado por las distintas fuentes presentes y **DI** es índice de directividad del receptor. Combinando las ecuaciones (5.1.4.1.1), (5.1.4.1.2) y (5.1.4.1.3), se obtiene la ecuación del sonar pasivo (Kinsler, 1995):

$$SL - TL \geq NL - DI + DT \quad (5.1.4.1.4)$$

#### 5.1.4.2. Ecuación del Sonar Activo.

Un sistema de sonar activo actual también puede funcionar como sonar pasivo, bajo ciertas limitaciones, debidas principalmente al transductor, que afectan al rango de frecuencias que se puede recibir.

En un sonar activo, la señal acústica es originada por un transmisor (fuente) con un

determinado nivel de fuente,  $SL'$ , la señal acústica viaja hacia el blanco, en el trayecto hacia el blanco, va perdiendo energía debido a la pérdida por transmisión,  $TL$ . Al encontrar el blanco, una fracción de la señal acústica incidente que llamaremos nivel de blanco,  $TS$ , es reflejada hacia la fuente. En este trayecto sufre una segunda pérdida por transmisión,  $TL'$ . Si la fuente y el receptor mantienen la misma posición, tendríamos que  $TL = TL'$ . Luego el nivel de eco (Kinsler, 1995), para un sonar activo es:

$$EL = SL' - 2TL + TS \quad (5.1.4.2.1)$$

En el caso de un sistema activo, el nivel de ruido detectado es determinado por el ruido ambiente ó el ruido propio. Combinando las ecuaciones (5.1.4.1.2), (5.1.4.1.3) y (5.1.4.2.1), se obtiene la expresión para el sonar activo (Kinsler, 1995):

$$SL - 2TL + TS \geq NL - DI + DT \quad (5.1.4.2.2)$$

### 5.1.5. Nivel de Blanco.

El *nivel de blanco*, la *fuerza de blanco* ó *target strength*,  $TS$ , es un término de la ecuación del sonar, que describe el tamaño acústico de un pez u otro blanco que se desee. Corresponde a una medida logarítmica de una porción de energía incidente que es reirradiada por el blanco hacia la fuente. Se define como la razón entre la intensidad reflejada  $I_r$  por el blanco (a 1 m. de este) y la intensidad incidente  $I_i$  emitida por el transductor:

$$TS = 10 \log \frac{I_r}{I_i} \quad (5.1.5.1)$$

El  $TS$  es considerado como la medida acústica clave en la evaluación de recursos pesqueros. Esto se debe a que el método más comúnmente usado para estimar abundancia de peces, que se conoce como eco-integración, requiere de mediciones de  $TS$ . El  $TS$ , en  $\square dB \square$ , es considerado análogo a la *sección transversal acústica del blanco* (acoustic cross section)  $\sigma$ , en  $\square m^2 \square$ , ó a  $\sigma_{bs}$  *sección transversal acústica de reirradiación* adimensional. La  $\sigma_{bs}$  es una cantidad adimensional debido a que se define como la razón entre  $\sigma$  y la superficie de una esfera de radio 1m:

$$\sigma_{bs} = \frac{\sigma}{4\pi} = \frac{I_r}{I_i} \quad (5.1.5.2)$$

Por lo que el  $TS$  puede ser expresado también como:

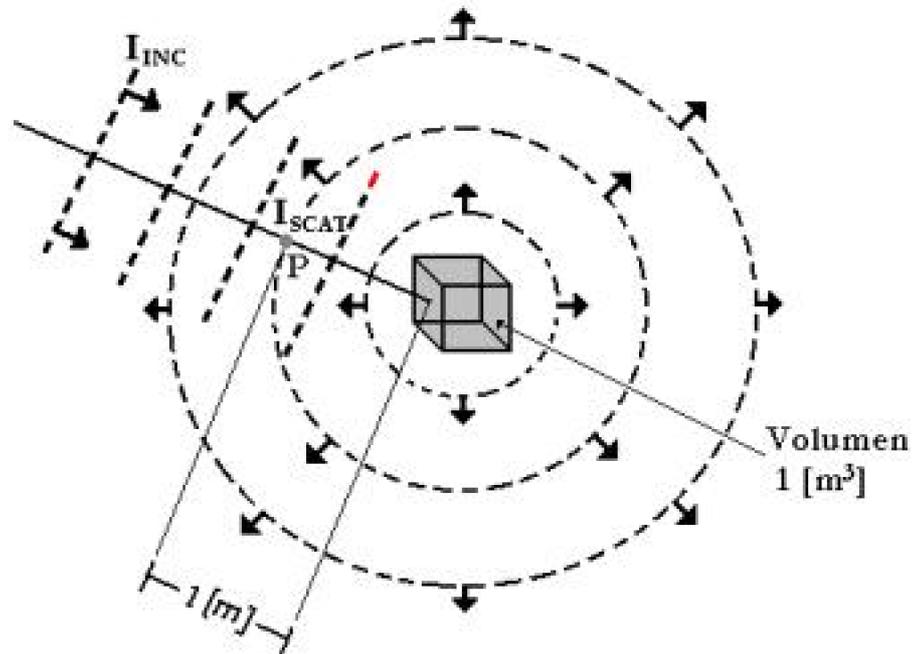
$$TS = 10 \log \sigma_{bs} \quad (5.1.5.3)$$

### 5.1.6. Nivel de Reirradiación de Volumen.

El nivel de reirradiación de volumen (volume backscattering strength)  $S_V$ , es una cantidad análoga al  $TS$ , pero referida a un volumen. La cual se define como la razón entre, la intensidad de sonido reirradiado,  $I_{SCAT}$ , por un volumen a una distancia de 1 m., y la intensidad de la onda plana incidente,  $I_{INC}$  es decir:

$$S_V = 10 \log \frac{I_{SCAT}}{I_{INC}} \quad (5.1.6.1)$$

Visualmente  $S_V$  se muestra en la Figura 5.1.6.1:



**FIGURA 5.1.6.1.** Visualización de la definición de  $S_V$  para un volumen de  $1 [m^3]$ . Urick (1983).

Como se observa en la Figura 5.1.6.1, la reirradiación de sonido se produce en todas las direcciones, pero sólo se mide la  $I_{SCAT}$  en la dirección que va hacia la fuente, a una distancia de 1 m., desde el volumen, que en la figura corresponde al punto P.

#### 5.1.7. Relación entre Nivel de Blanco y Nivel de Reirradiación de Volumen.

Existe un algoritmo, para ecosondas de haz simple, que permite, a partir de una medición de  $S_V$  sobre un blanco individual, obtener un valor  $TS$ . La relación es la siguiente (Ref. Internet):

$$TS = S_V + 20 \log r + 10 \log \left( \frac{c^2 V^2}{2} \right) \quad (5.1.7.1)$$

donde:

r	= distancia blanco – transductor [m].
c	= velocidad del sonido [m/s].
$\psi$	= ángulo equivalente del haz del transductor [estereorradián].
$\tau$	= longitud de pulso [s].

### 5.1.8. Ganancia Variable en el Tiempo.

La *ganancia variable en el tiempo* (time-varied gain) **TVG**, es una función cuyo propósito es compensar la pérdida de sonido debido a la propagación. Esta ganancia es aplicada internamente por el sonar sobre la señal recibida por el transductor. La función **TVG** simple, para un solo sentido, es:

$$TVG = 20 \log r \quad [dB] \quad (5.1.8.1)$$

Considerando las pérdidas debido a la absorción, la función **TVG**, para un solo sentido, es:

$$TVG = 20 \log r + 2\alpha r \quad [dB] \quad (5.1.8.2)$$

La función **TVG** final es:

$$TVG = 40 \log r + 2\alpha r \quad [dB] \quad (5.1.8.3)$$

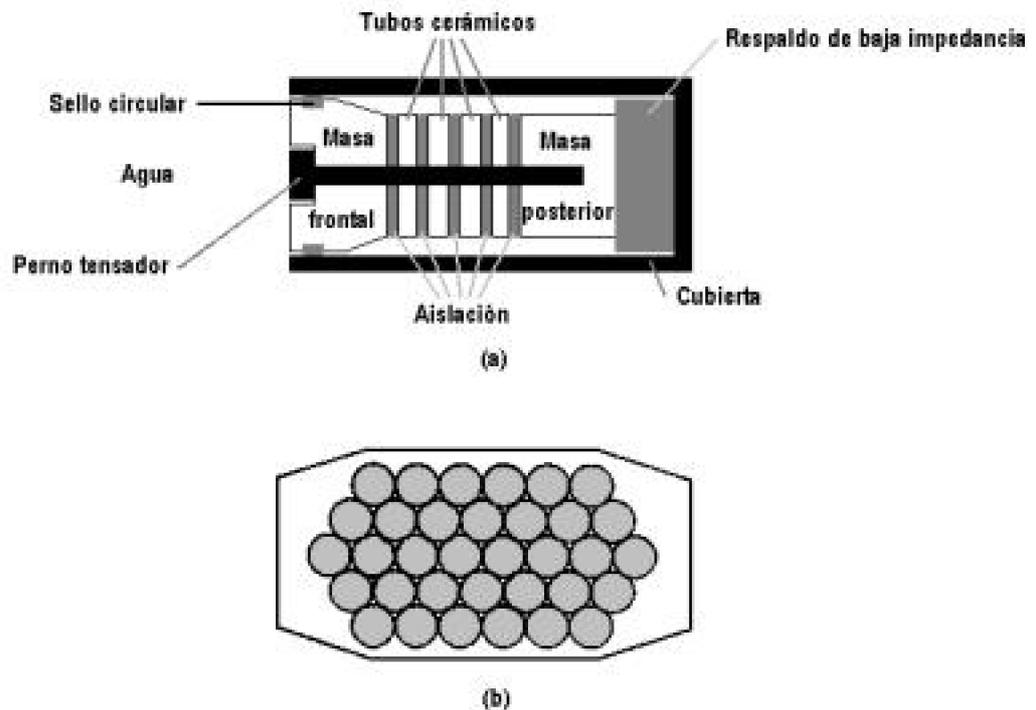
la cual corrige la pérdida de propagación en dos sentidos, fuente-blanco y blanco-fuente.

### 5.1.9. Equipamiento.

#### 5.1.9.1. Transductor.

Un *transductor* es un dispositivo que transforma un tipo de energía en otra. En el caso de un transductor acústico submarino, su función es convertir una señal eléctrica en un ping acústico y viceversa. Un transductor común es hecho de materiales cerámicos, con características piezoeléctricas. El material piezoeléctrico posee la característica que cuando una presión es aplicada en sobre él, este se deforma y genera un voltaje proporcional a la deformación, y de forma reversible, cuando se aplica un voltaje sobre esta cerámica, el material se deforma generando una radiación de sonido. Los transductores de cerámica poseen una alta eficiencia, y son los preferidos en aplicaciones pesqueras.

Un transductor se compone, por lo general, de un conjunto de elementos transductores individuales. La Figura 5.1.9.1(a), muestra la estructura de un típico elemento individual transductor de cerámica, luego en la Figura 5.1.9.1(b) muestra una configuración de 34 elementos que forman el transductor.

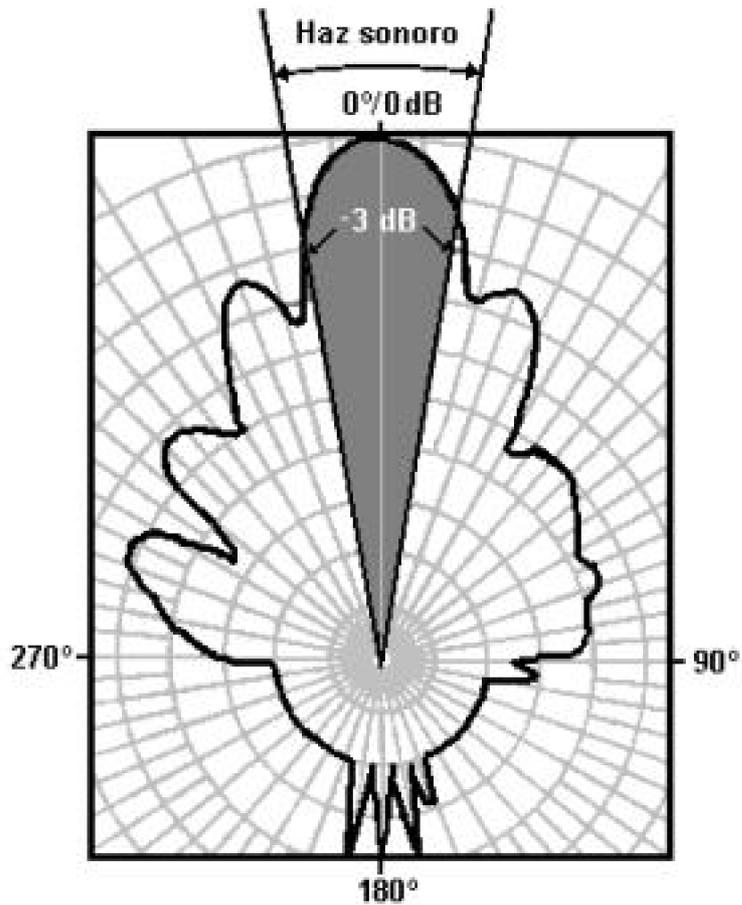


**FIGURA 5.1.9.1.1.** Detalle de: (a) Elemento individual de transductor cerámico de 35 mm de diámetro (vista lateral). (b) conjunto de 34 elementos que conforman un transductor (vista frontal). MacLennan (1992).

Cada elemento está compuesto de 4 tubos de cerámica con dos masas de acero frontal y posterior las cuales están diseñadas para asegurar una eficiente transferencia de energía hacia el agua. Los tubos de cerámica se mantienen juntos por un perno tensador. Un material de baja densidad asegura que la mayor cantidad de energía acústica se transmita en dirección hacia el agua. Este tipo de transductor es reversible: podría ser usado tanto para transmitir como para recibir ondas sonoras.

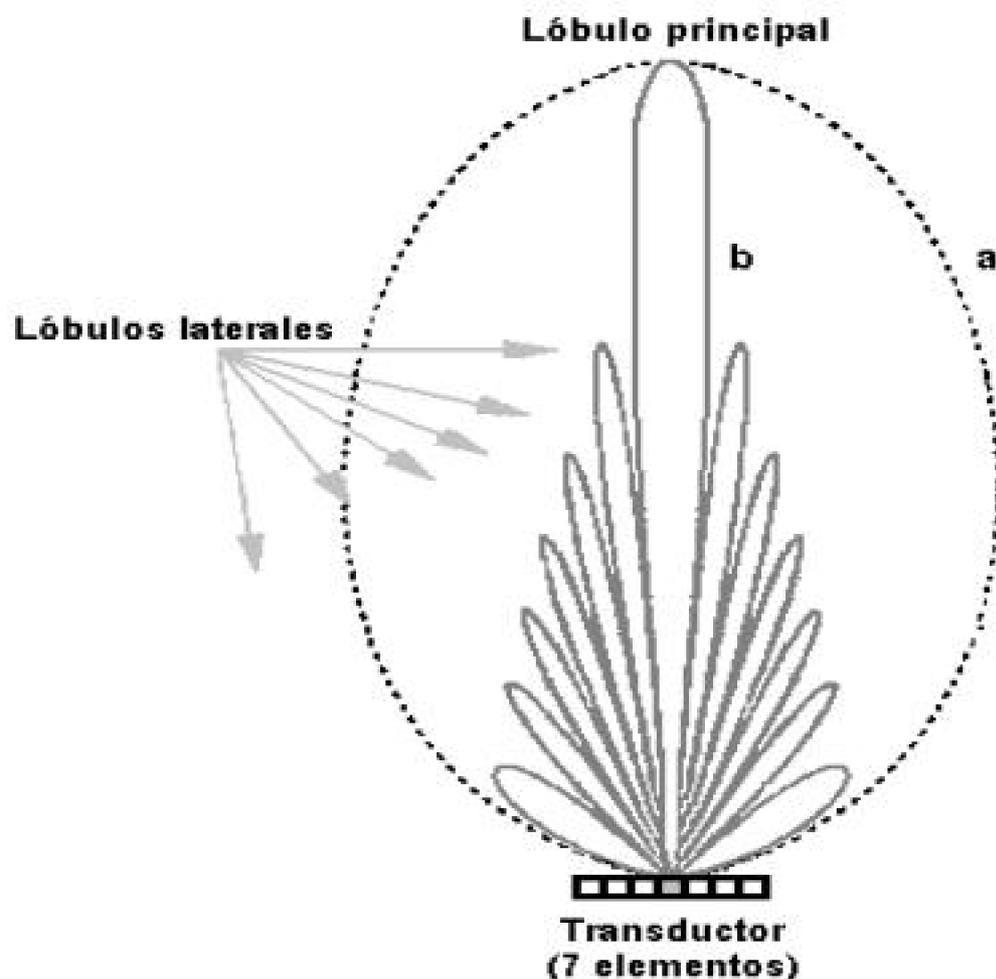
#### 5.1.9.1.1. El Patrón del Haz.

El transductor irradia sonido en diferentes direcciones, la forma de la irradiación se conoce como *patrón del haz*. El *patrón del haz* describe el cambio de sensibilidad de la emisión y/o recepción acústica del transductor. Del patrón del haz del transductor, solo una fracción es considerada como efectiva para efectos de detección, la comprendida entre el eje acústico (ó punto de 0 [dB] del lóbulo principal) y el punto de -3 [dB], esta fracción de irradiación se conoce como *haz sonoro*. La Figura 5.1.9.1.1 muestra un ejemplo de *patrón del haz*:



**FIGURA 5.1.9.1.1.1.** Patrón de haz y haz sonoro de un transductor.

Como un transductor se forma a partir de un conjunto de elementos transductores individuales, si se conoce el patrón del haz de cada elemento, se puede obtener el patrón de haz transductor sumando los patrones individuales de cada elemento, Figura 5.1.9.1.1.2.



**FIGURA 5.1.9.1.1.2.** Ejemplos de patrón de polar de haz. (a) para un elemento. (b) para un transductor de 7 elementos. MacLennan (1992).

La Figura 5.1.9.1.1.2(a) muestra el patrón polar de un elemento, en el cual existe sólo un nodo a  $\alpha = 90^\circ$ . En la Figura 5.1.9.1.1.2(b), se muestra la superposición de 7 elementos, lo cual entrega el patrón polar completo del transductor. Este posee un lóbulo principal central, y en forma simétrica 6 lóbulos laterales, separados entre ellos por nodos.

#### 5.1.9.1.2. El Pulso.

El *pulso* es una señal acústica de período, frecuencia y amplitud fijas. En la detección de blancos submarinos, el transductor envía un *ping*, que es un tren de pulsos, con frecuencia y amplitud constantes. Los parámetros, a considerar en el ping, son:

- Frecuencia del Pulso.
- N° de Pulsos ó ciclos por emisión de ping.
- Duración del Ping.
- Longitud del Ping.

La *frecuencia del pulso*, que forma el ping, es por lo general ultrasónica (> 20 [kHz]), debido a que las ondas ultrasónicas presentan una mayor direccionalidad y ofrecen una mejor resolución del blanco. Las frecuencias de mayor uso, en aplicaciones pesqueras son: 38, 120, 420 [kHz]. Por limitaciones de diseño, no se ha podido crear transductores que trabajen sólo a una frecuencia. En su defecto, la frecuencia del pulso, corresponde a la frecuencia central de un *ancho de banda (BW)* de trabajo, el cual puede ser si puede ser manejado.

El *nº de pulsos por emisión*, es la cantidad de pulsos que componen el ping, este nº genera la duración  $\tau$ , y longitud  $L$ , del ping. La  $\tau$  es la extensión temporal del ping, definida como:

$$\tau = \frac{n^{\circ} \text{ pulsos}}{\text{frecuencia}} \quad [s] \quad (5.1.9.1.2.1)$$

Para obtener  $L$  basta multiplicar  $\tau$  por la velocidad del sonido en el agua,  $c$ , que para efectos teóricos es 1500 [m/s], es decir:

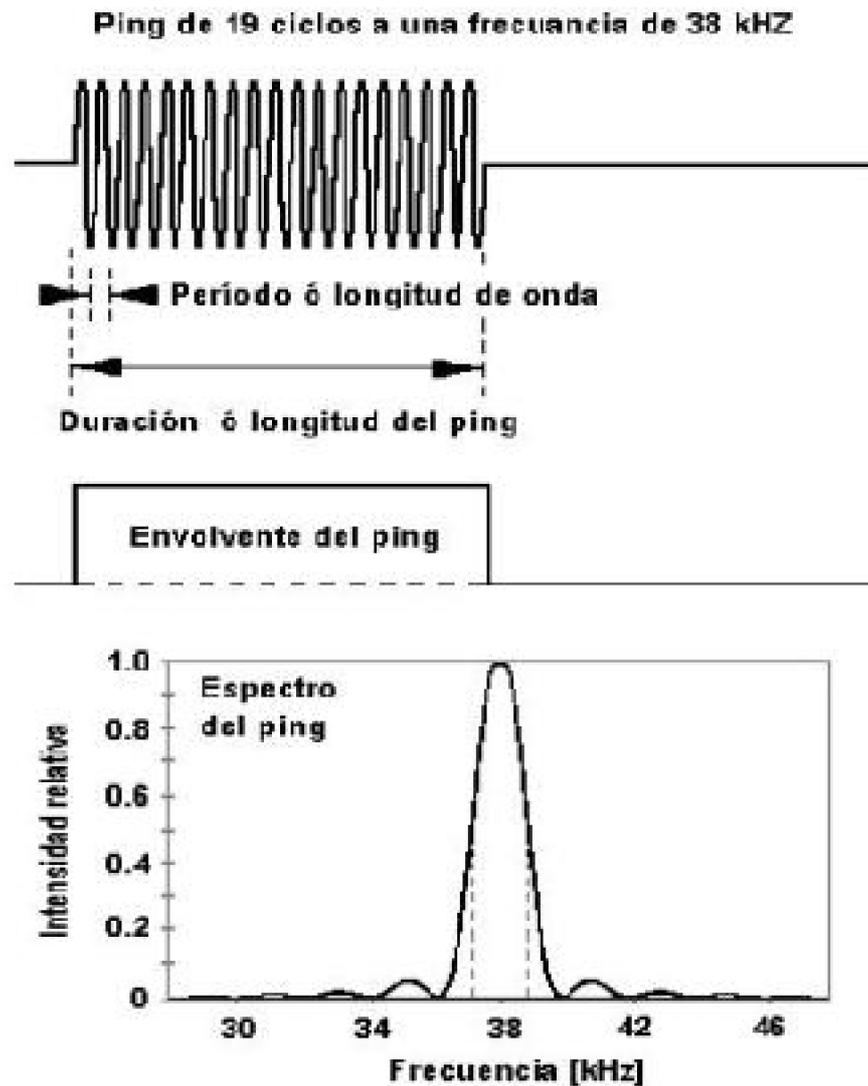
$$L = c \cdot \tau \quad [m] \quad (5.1.9.1.2.2)$$

$L$  ó  $\tau$  influyen importantemente en la resolución del blanco. Lo recomendable, es trabajar con una  $L$  lo más cercana a la longitud del blanco que se desea detectar, debido a que el sonar forma el blanco detectado con todos los ecos generados dentro de un ping (ó una  $L$ ) y si:

$L > d$ , donde  $d$  es la longitud del blanco, se podría tener más de un blanco dentro del ping, lo generaría un error, pues el sonar registrará sólo un blanco.

$L < d$ , dos ping seguidos podrían cubrir un solo blanco lo que haría que el sonar registre dos blancos diferentes, siendo este uno solo.

Otro parámetro que cabe ser mencionado es la envolvente del ping, la cual es la curva que muestra las amplitudes máximas de los pulsos.



**FIGURA 5.1.9.1.2.1.** Ilustración de un Ping de 38 [kHz], su envolvente y su espectro de frecuencia. MacLennan (1992).

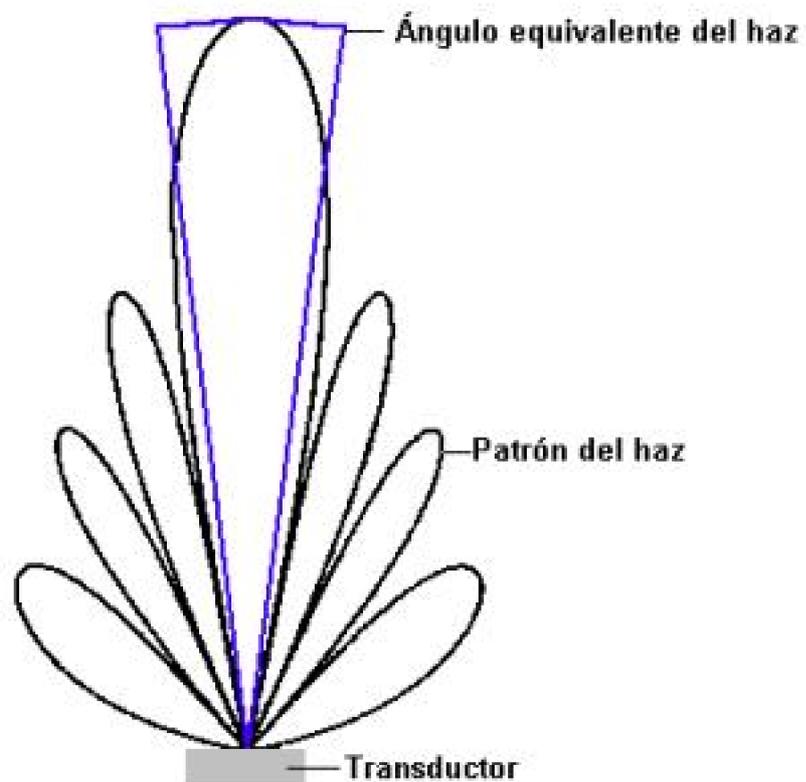
La Figura 5.1.9.1.2.1, visualiza los conceptos expresados anteriormente, para un ping de formado por 19 pulsos de 38 [kHz]. El espectro de frecuencias esta graficado con respecto a una intensidad relativa al valor máximo, las líneas discontinuas indican el **BW** del ping, que se establece entre los puntos de los  $-3$  [dB], con respecto al valor máximo relativo, para este caso corresponde a 1.8 [kHz]. Para el ping de la Figura 5.1.9.1.2.1, la duración y longitud es:

$$\tau = \frac{19}{38000} [\text{Hz}] = 0,5 \cdot 10^{-3} [\text{s}]$$

$$\bar{v} = 0,5 \cdot 10^{-3} [\text{s}] \cdot 1500 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = 0,75 [\text{m}]$$

### 5.1.9.1.3. Angulo Equivalente del Haz.

El *ángulo equivalente del haz* ó *equivalent beam angle*,  $\square$ , es una medida del ancho del haz. Se define como el ángulo sólido formado hasta el ápice del lóbulo principal del patrón del haz, que produciría la misma eco integral que el haz real del transductor.



**FIGURA 5.1.9.1.3.1.** Angulo equivalente del haz. MacLennan (1992).

También es común expresar el ángulo equivalente del haz, en forma logarítmica, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$EPA = 10 \log \psi \quad (5.1.9.1.3.1)$$

Algunos valores de  $\psi$  son:

Marca	Modelo	Frecuencia [kHz]	Ángulo de haz [grados]	Amplitud del haz equivalente [estereorradianes]	EBE [dB]
Siemens	33-3	32	9°	0.016	-18
Siemens	200-7C	200	7° ± 1°	0.009 ± 20%	-21

**TABLA 5.1.9.1.3.1.** Valores de ángulo equivalente del haz para transductores de haz simple.

### 5.1.9.2. El Sonar.

El *sonar* es un instrumento desarrollado para la navegación, investigación y pesca. Existen de dos tipos de sonar, activos y pasivos. El *sonar activo* es el más usado y funciona emitiendo sonido y recibiendo ecos generados desde un blanco. El *sonar pasivo* sólo escucha el sonido generado por algún blanco. En la actualidad, las aplicaciones del sonar pasivo se limitan a la investigación de sonidos generados por mamíferos marinos. Originalmente los sonares activos se utilizaron con dos propósitos básicos: medida de la profundidad y localización de objetos en el agua ó en el fondo marino. Pero el desarrollo de diversas áreas de investigación los ha ido especializando en diferentes tareas, algunos de los más comunes son:

**Sonar:** Es el equipo más común tanto en navegación como para detectar cardúmenes de peces. Posee un transductor rotatorio que realiza un barrido horizontal (similar al radar), además el haz puede ser inclinado en sentido vertical. Trabaja a frecuencias ultrasónicas (> 20 [kHz])

**Ecosonda:** Equipo que trabaja sólo en forma vertical al fondo marino se ocupa para detectar la presencia de cardúmenes de peces entre la embarcación y del fondo marino. Trabaja a frecuencias ultrasónicas (> 20 [kHz])

**Sonar activo de baja frecuencia:** Equipo que trabaja a frecuencias menores a 2 [kHz], su función es detectar objetos a grandes distancias (kilómetros).

**Sonar penetrador de sedimentos:** Como su nombre indica, es un equipo que su función es obtener información sobre el tipo de fondo marino. Trabaja a frecuencias de 1 – 10 [kHz].

#### 5.1.9.2.1. Funcionamiento de la Ecosonda.

Existen ecosondas tanto análogos como digitales, actualmente las últimas son los de mayor uso. El principio de funcionamiento general para ambas es el mismo. Una ecosonda se compone básicamente de cuatro partes contenidas en una misma unidad, a la que sólo debe conectarse externamente el transductor. Estas se observan en la figura 5.1.9.2.1.1:

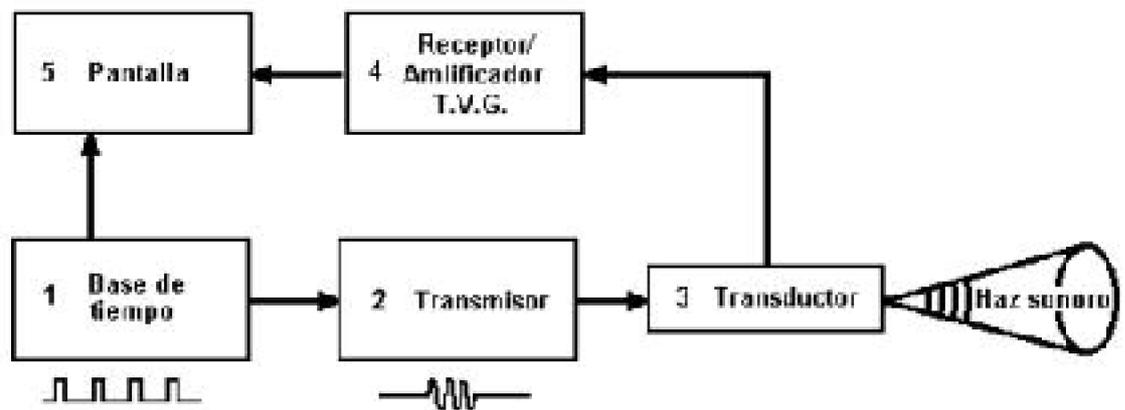


FIGURA 5.1.9.2.1.1. Diagrama en bloques de una ecosonda. Johannesson (1983).

Su operación se inicia cuando la Base de Tiempo (bloque 1) genera un pulso eléctrico (modulado) que enciende el Transmisor (bloque 2), el que a su vez produce un pulso de frecuencia central  $f$  [Hz] y duración  $\tau$  [ms] para activar al Transductor (bloque 3). La energía eléctrica es convertida por el transductor en energía acústica, en forma de ping, el que es irradiado hacia el agua y va insonificando objetos en su camino de propagación. Parte de los ecos de los objetos insonificados retornan al transductor y son convertidos nuevamente en señales eléctricas. Las señales retornadas, por lo general, son pequeñas, por lo que deben ser amplificadas, pero de una determinada forma, relativas al tiempo ocurrido después de su transmisión. El Receptor / Amplificador TVG (bloque 4), cumple esta función, compensa en forma de amplificación, sobre la señal eléctrica recibida, la pérdida de energía de la señal generada por la absorción del medio (agua) sobre la señal acústica. Luego la señal eléctrica es procesada, donde es detectada la información que ella posee (p.e. amplitud, duración, ubicación) y luego visualizada en una Pantalla (bloque 5).

### 5.1.9.3. El Eco Integrador.

Es un instrumento de procesamiento de datos. Ocupado para la estimación de biomasa dentro de volúmenes de agua muestreados por la ecosonda. Las señales son capturadas desde una salida de la ecosonda. Su función es sumar ó integrar la energía de los ecos retornados desde uno ó más volúmenes de agua, el cual es seleccionado por el operador. El principio de trabajo de este instrumento se conoce como “Teoría de Eco Integración”, la cual se presenta a continuación en forma general.

La eco integración ocupa los valores rms medio cuadrado  $\bar{v}^2$  (generados por los blancos) como una medida de densidad de peces en un volumen de agua muestreado. La intensidad sonora es proporcional al voltaje cuadrado. El voltaje promedio cuadrado es proporcional a la intensidad promedio integrada por un pez desde un volumen de agua. Conociendo la *señal acústica media de integración*  $\bar{\sigma}_0$ , uno puede estimar un número promedio de peces en un volumen de agua dado.

El voltaje rms cuadrado generado por un pez individual (Gallucci, 1996) es:

$$v^2 = p b^2(\theta) G \sigma_{bs} \quad [V] \quad (5.1.9.3.1)$$

donde:

p	= presión acústica rms proyectada por el transductor [dB].
b(θ)	= factor patrón de haz del transductor (el mismo para emisión y recepción).
G	= constante que incluye todas las pérdidas y ganancias del sistema.
σ <sub>bs</sub>	= sección transversal acústica de reirradiación.

Donde G es:

$$G = r_s^2 g^2 tvg^2 10^{\frac{-2\alpha R}{10}} R^{-4} \quad (5.1.9.3.2)$$

Incluyendo la constante G en la expresión 5.1.9.3.1, se obtiene:

$$v^2 = p^2 b^2(\theta) \sigma_{bs} r_s^2 g^2 tvg^2 10^{\frac{-2\alpha R}{10}} R^{-4} \quad [V] \quad (5.1.9.3.2)$$

donde:

r <sub>s</sub>	= sensibilidad de recepción.
g	= ganancia fija.
tvg	= ganancia variable en el tiempo.
R	= distancia al blanco.
α	= coeficiente de absorción.

La teoría de eco integración establece que: “El voltaje rms promedio cuadrado correspondiente a una distancia R es igual al voltaje rms promedio cuadrado de un pez individual por el volumen muestreado y la densidad de peces (biomasa)” (Gallucci, 1996). Así el voltaje promedio cuadrado a una distancia R es:

$$\bar{v}^2 = \delta \cdot Vol \cdot p^2 \bar{b}^2(\theta) \sigma_{bs} r_s^2 g^2 tvg^2 10^{\frac{-2\alpha R}{10}} R^{-4} \quad [V] \quad (5.3.9.3.3)$$

donde:

$\bar{\sigma}_{\theta_s}$  = sección transversal acústica media de reirradiación.

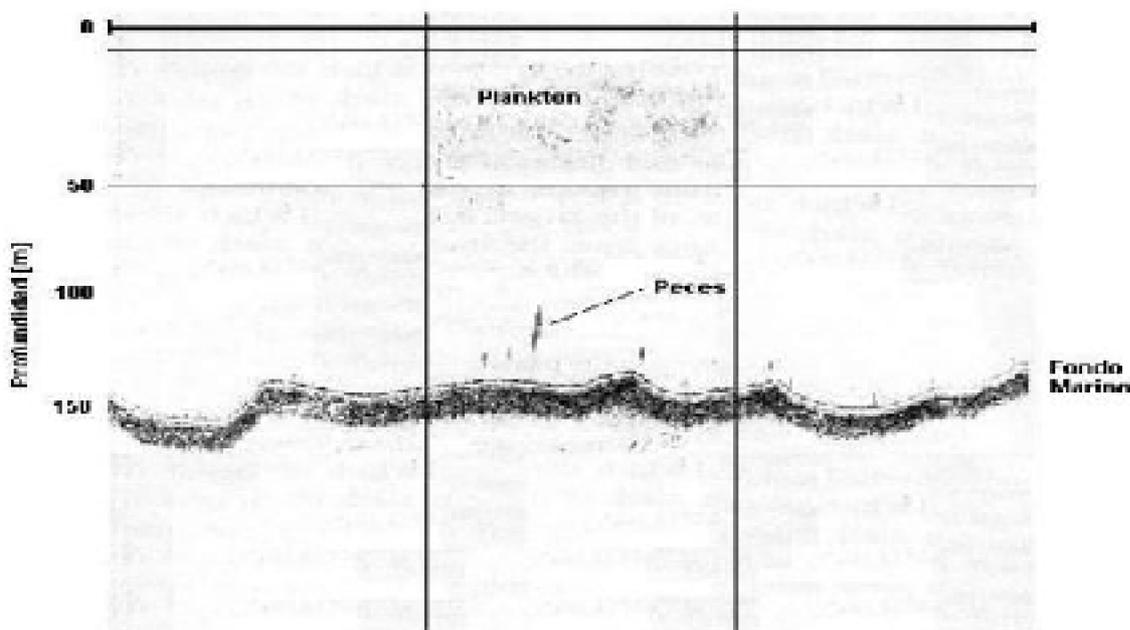
$\bar{\delta}^2(\theta)$  = factor patrón de haz medio del transductor

$\delta$  = densidad de peces, biomasa [peces/m<sup>3</sup>].

Vol = volumen muestreado [m<sup>3</sup>].

#### 5.1.9.4. El Ecograma.

Corresponde a la visualización del barrido sónico realizado por una ecosonda. En el cual se observan los objetos detectados por haz acústico. Los primeros ecogramas fueron bastante simples, eran impresos de forma continua en rollos de papel. El desarrollo tecnológico de las ecosondas ha traído como consecuencia una mejor forma de presentación del ecograma. La mayoría de las ecosondas poseen una pantalla, la cual va visualizando y almacenando (en forma digital) el barrido realizado por la transductor, lo que facilita el análisis posterior de datos.



**FIGURA 5.1.9.4.1.** Ecograma monocromo en papel de un Ecosonda Simrad EK400. MacLennan (1992).

En la Figura 5.1.9.4.1 se observa un ecograma monocromo realizado por una ecosonda Simrad EK400, a 38 [kHz], impreso sobre papel. El eje vertical del ecograma, indica la profundidad, en [m], con respecto a la posición del transductor (línea a 0 [m]). El eje horizontal, por lo general, indica el tiempo de duración del barrido, en [min]. En este caso, las dos líneas verticales son marcas de intervalos de 15 [min], por lo que, la duración total de este ecograma corresponde a 45 [min], de izquierda a derecha. La línea de 50 [m] es sólo una marca de profundidad. Manchas difusas sobre esta línea corresponden a ecos generados por la presencia de plankton. Las marcas verticales

sobre el fondo marino corresponden a pequeños grupos de peces.

Los ecogramas digitales permiten una mayor facilidad al momento de analizar datos, pues pueden ser guardados y posteriormente reproducidos. El ecograma mostrado en la Figura 5.1.9.4.2, corresponde al entregado por una ecosonda BioSonics DT-6000. A diferencia del ecograma anterior (Figura 5.1.9.4.1), este posee la graduación del eje horizontal en pings, lo que permite una mayor exactitud. También entrega las diferencias de los valores de TS de los blancos encontrados de acuerdo a paleta de colores graduada en valores de TS (borde vertical izquierdo de la figura), la cual es ajustable. Además permite realizar una ampliación de algún tramo del ecograma que se desee observar con mayor detalle.

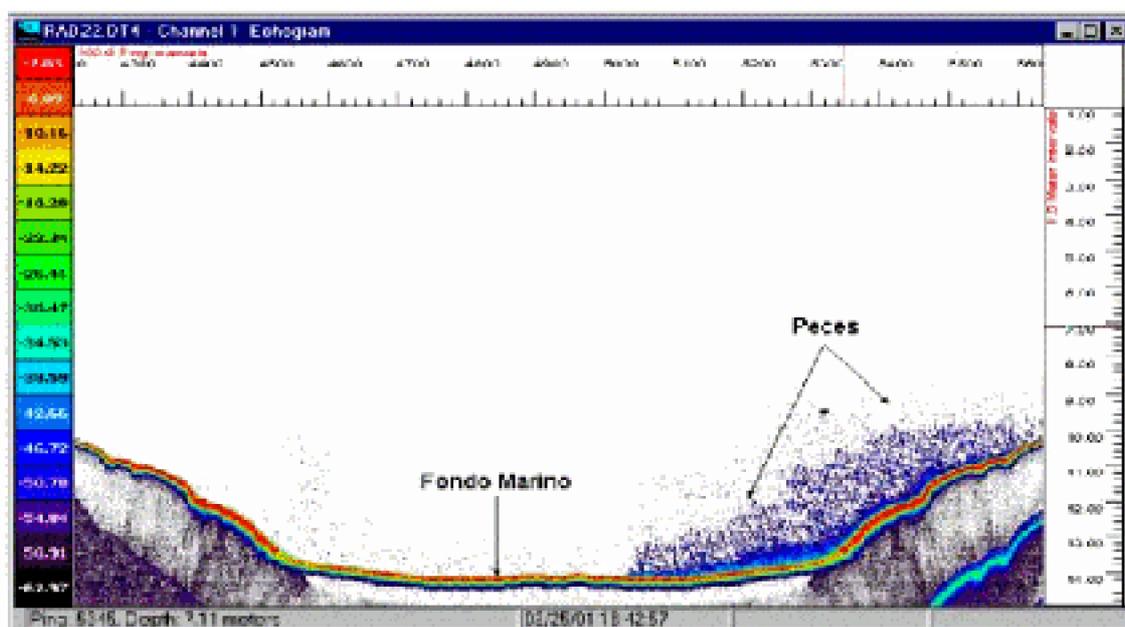


FIGURA 5.1.9.4.2. Ecograma digital ecosonda BioSonics DT-6000.

## 5.2. Granjas de Cultivo de Salmones

### 5.2.1. Módulos de Cultivo de Salmones.

Un módulo ó granja de cultivo es un conjunto de jaulas unidas entre si. La mayoría se compone de jaulas cuadradas (también existen jaulas circulares) desmontables. Están hechas por lo general de fierro, aluminio y madera. El número de jaulas promedio por módulo es de 14. El módulo se mantiene a flote por medio de un gran número de flotadores, que son ubicados bajo los pasillos que unen las jaulas del módulo. La mayoría de los módulos cuentan con una bodega, la cual almacena el alimento junto con otros insumos. Todas las jaulas son cubiertas por una segunda red, la cual se conoce como "Lobera", pues como hace mención su nombre, sirve para proteger los cultivos de peces de los lobos marinos.

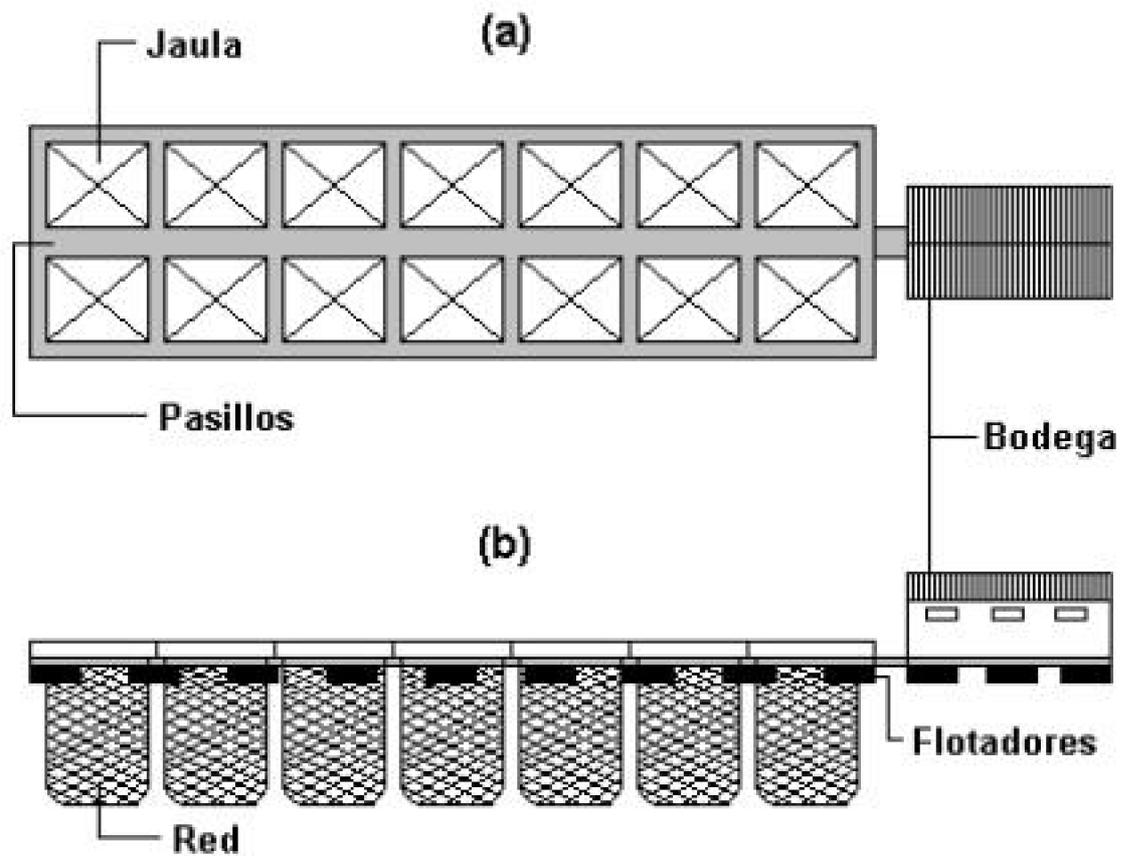


FIGURA 5.2.1.1. Módulo de cultivo de salmones, (a) vista de planta, (b) vista lateral.

### 5.2.2. Jaula de Cultivo.

La estructura de típica de una jaula de cultivo de peces se forma por:

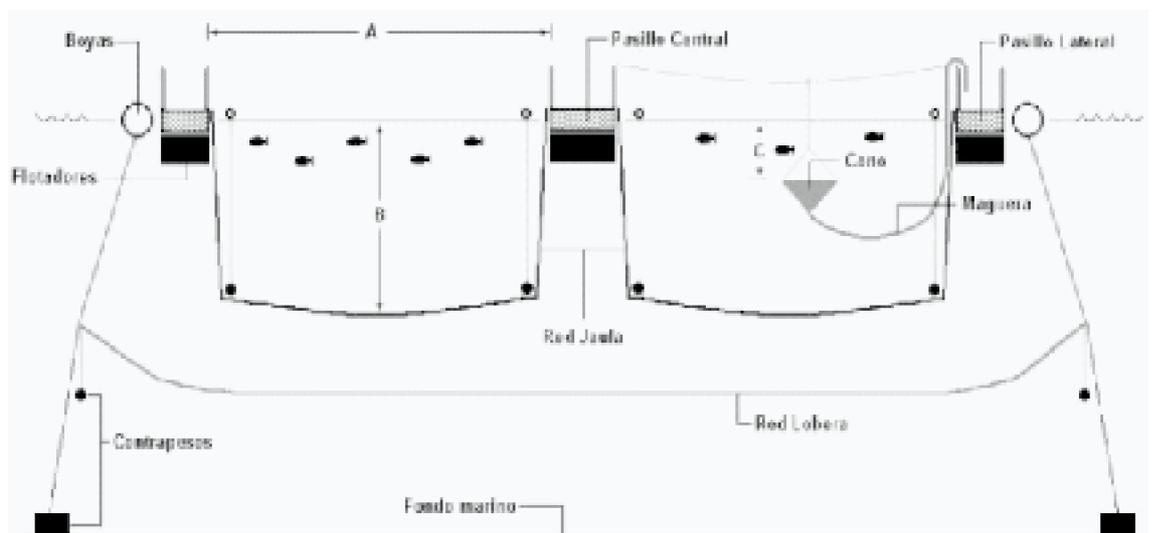
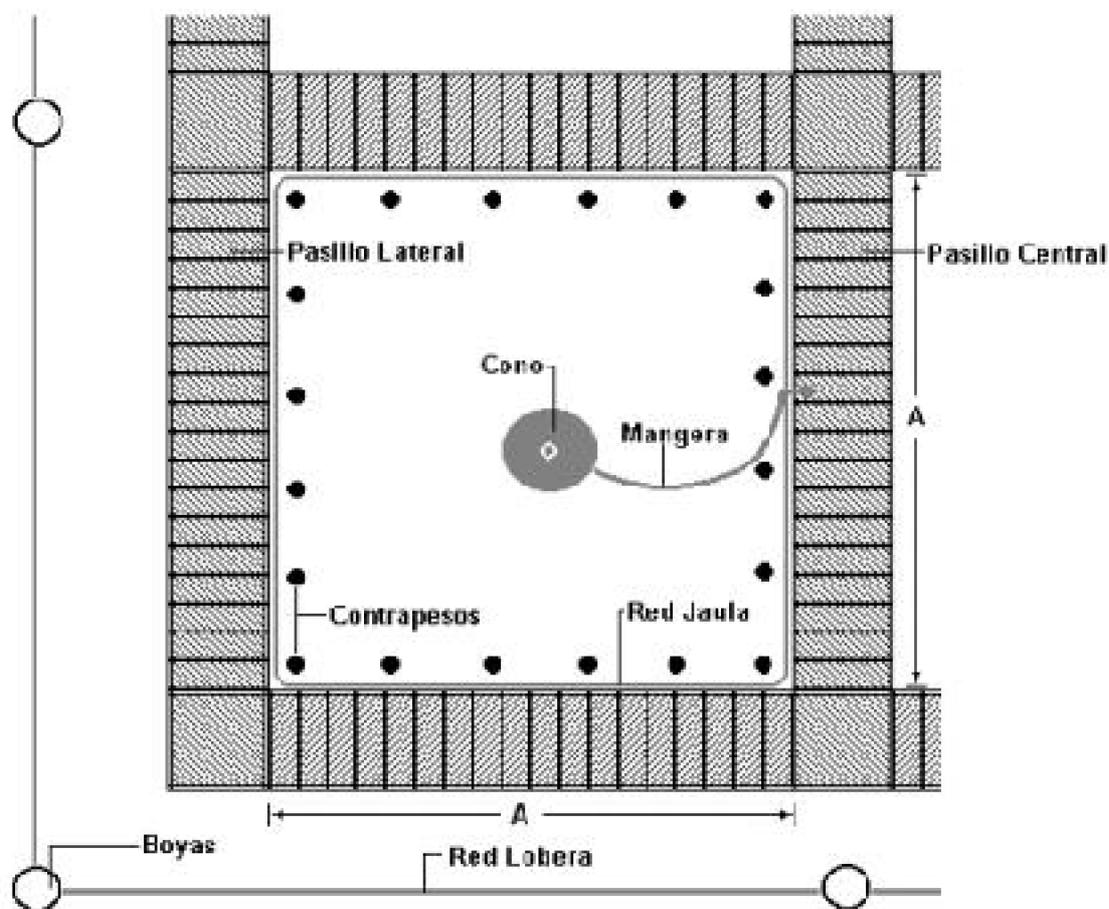


FIGURA 5.2.2.1. Corte transversal a un módulo, que muestra dos jaulas (en vista lateral).



**FIGURA 5.2.2.2.**Detalle jaula de cultivo vista de planta.

Las dimensiones de una jaula, oscilan de acuerdo al tamaño y cantidad de peces que se desean cultivar. Por lo que las dimensiones para una jaula cuadrada, Figuras 5.2.2.1 y 5.2.2.2, son:

**TABLA 5.2.2.1.** Dimensiones jaula de cultivo.

	Metros
A (lado)	15 – 20
B (fondo)	10 – 15

### 5.2.3. Contrapesos.

Para lograr mantener la forma de la jaula, estas cuentan con contrapesos que ayudan a tensar las redes. Su montaje es por lo general atado con un cabo al borde de la estructura metálica de jaula. Entre los tipos de contrapesos tenemos:

**Fabricados:** son rectángulos de plástico (similares a un bidón) rellenos de arena, de dimensiones 10x30x40 [cm] y con peso de 10 a 15 [Kg].

**Artesanales:** son sacos rellenos con piedras ó arena, con pesos comunes que van de 5 – 20 [Kg].

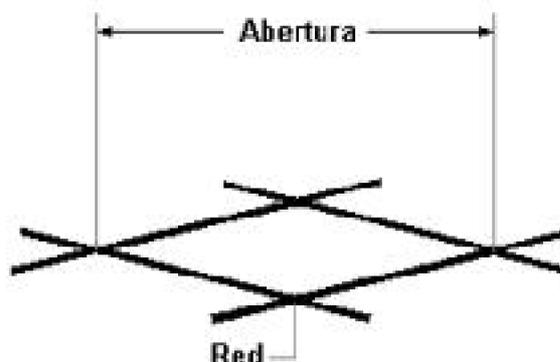
Los mas usados son los de tipo artesanal.

**5.2.4. Redes.**

Las redes usadas acuicultura, son fabricadas en fibras de alta tenacidad como el nylon, poliéster ó polietileno. Son por lo general, teñidas y resinadas, lo cual ofrece una mayor duración y resistencia. Según su tejido se clasifican en:

- Redes en tejido Raschel: de uniones tejidas.
- Redes con nudo: de uniones anudadas.

Tejidos que pueden ser usados en la confección de redes para jaulas de cultivo ó usadas como loberas.



**FIGURA 5.2.4.1. Abertura de red.**

Las redes son clasificadas de acuerdo al tamaño de malla ó abertura, que corresponde a la longitud estirada entre dos uniones horizontales de la red, Figura 0004, y características de la fibra que la forma (entregadas en la titulación del hilo). Lo cual varia dependiendo del tamaño del pez que se desea introducir. Los tipos de redes, para jaulas de cultivo, de mayor uso son:

**TABLA 5.2.4.1. Características de redes de cultivo de peces.**

Abertura [pulg]	Titulación Hilo	Alto [m]	Largo [m]	Peso [m]	$p_s$ [Kg/m <sup>2</sup> ]
5/16	210/12	6.09	183.00	156.18	0.14
5/16	210/12	7.50	183.00	183.87	0.13
3/4	210/36	18.00	183.00	467.62	0.14
1	210/42	24.00	183.00	499.40	0.11
1	210/42	29.25	183.00	608.36	0.11
1 ½	210/60	43.88	117.12	547.07	0.11
1 ½	210/72	21.00	183.00	485.78	0.13
2	210/24	48.00	106.14	196.58	0.04
2	210/72	28.00	91.50	268.77	0.10
5	210/24	24.38	91.50	35.87	0.02

Fuente: Redes Banidotti, Italia. Distribuidas por Küpfer Ltda.

En el caso de redes loberas, sus características son:

**TABLA 5.2.4.2. Características de redes loberas.**

Abertura [pulg]	Titulación Hilo	Alto [m]	Largo [m]	Peso [m]	$p_s$ [Kg/m <sup>2</sup> ]
14	210/96	33.25	91.50		
18	210/96	42.75	91.50		
14	210/120	35.00	183.00	149.82	0.02
14	210/180	35.00	183.00	249.70	0.04
18	210/120	45.00	91.50	79.90	0.02
14	210/100	35.00	183.00	145.28	0.02
14	210/100	35.00	183.00	227.00	0.04

Fuente: Redes Banidotti, Italia. Distribuidas por Küpfer Ltda.

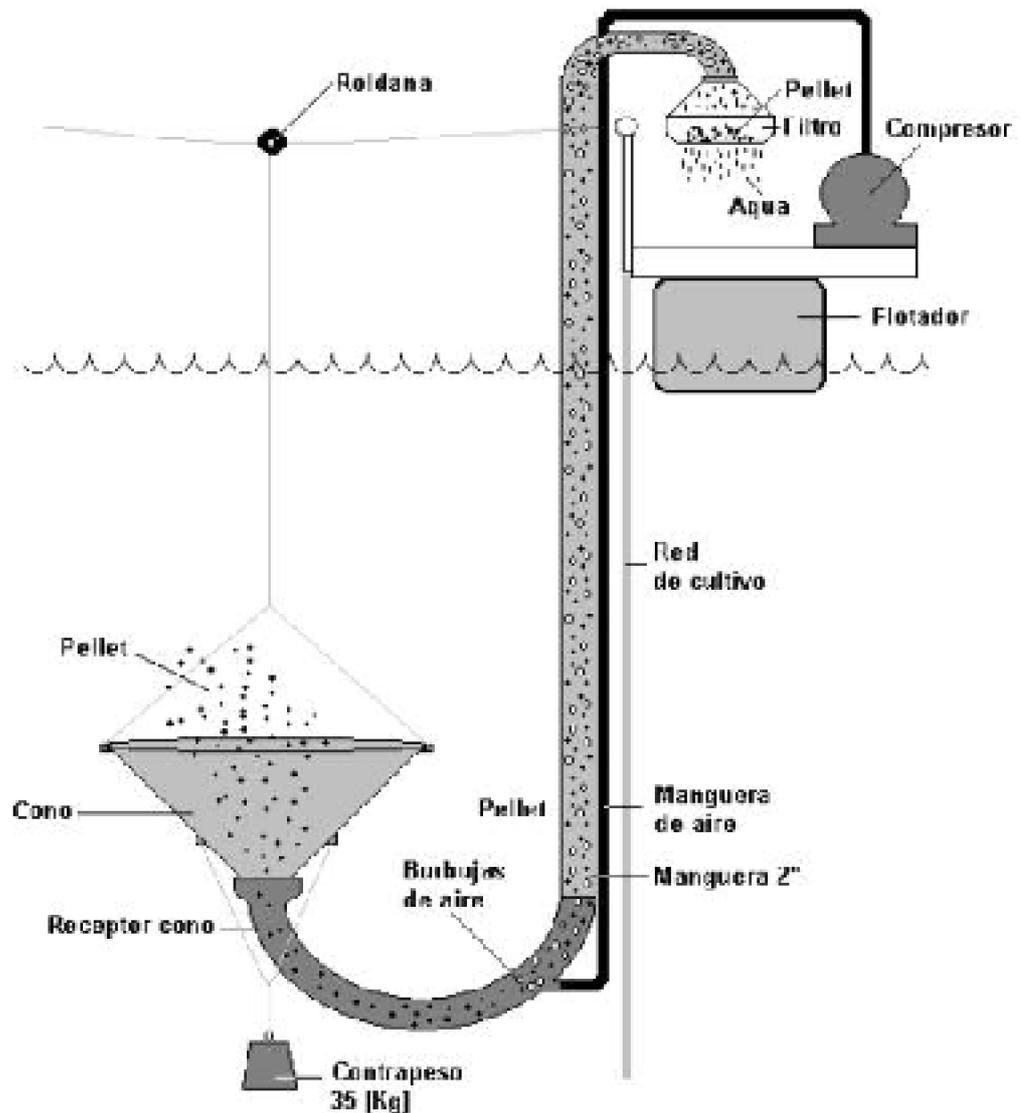
donde  $p_s$ , en ambas tablas, corresponde a la densidad superficial que se estimó a partir de los datos que entregó el fabricante.

#### **5.2.5. Sistema Air-Lift.**

Al momento de dejar de alimentarse los peces, el alimento comienza a caer, una parte es consumida por peces silvestres y la otra se acumula en el fondo marino contaminándolo, además de generar pérdidas económicas.

El sistema air-lift ó lift-up, es un sistema diseñado para detectar pérdidas de alimento. Es el más usado en la actualidad. Su principal limitante es la poca cobertura que ofrece sobre el área potencial de caída de alimento perdido (aproximadamente de 3 a 10%).

El sistema consiste de un cono plástico (ubicado generalmente de 6 a 8 [m] de profundidad) unido a una manguera, de por lo general 2" de diámetro, a la cual se le introduce aire por medio de una segunda manguera que va conectada a un compresor. Se generan burbujas de aire, las cuales suben a la superficie (por diferencia de presión), detrás de ellas se crea un vacío que succiona agua y alimento, recogido por el cono, el que es llevado a la superficie donde un filtro separa el agua del alimento, Figura 5.2.5.1.

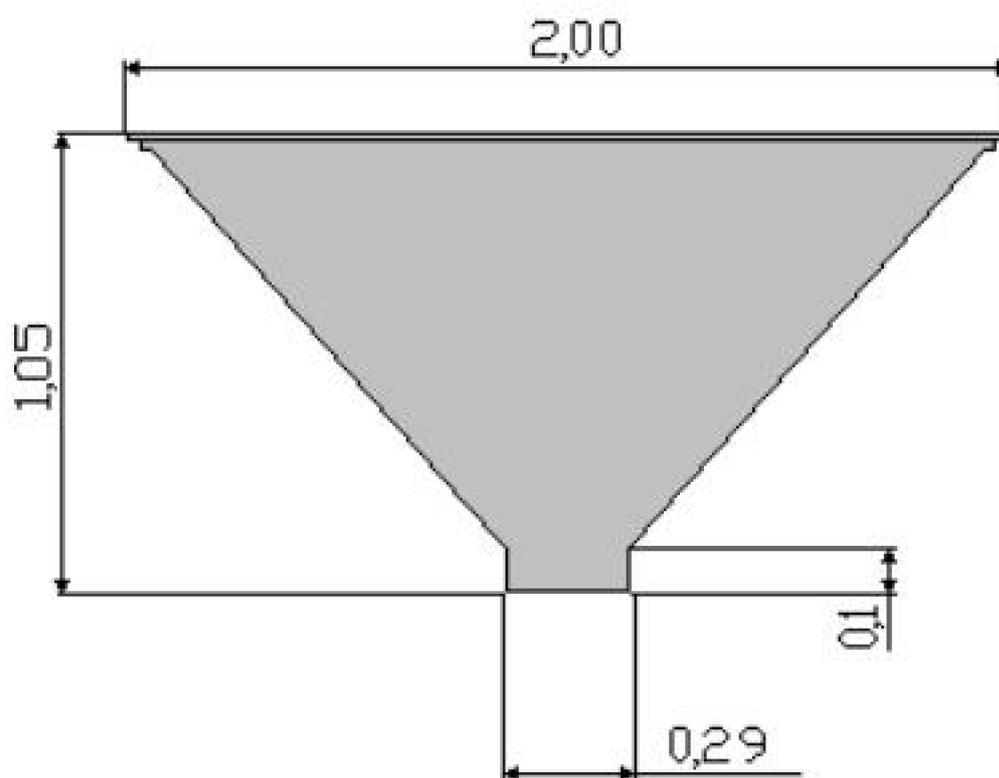


**FIGURA 5.2.5.1.** Esquema del montaje de un sistema air – lift.

El cono de un sistema air-lift, es fabricado por lo general, en polietileno virgen de media densidad, las características de uno marca Austral Plastic son:

**TABLA 5.2.5.1.** Características de cono para air-lift

Características	Medida
Radio mayor	1.00 [m]
Radio menor	0.145 [m]
Altura	1.05 [m]
Espesor	0.008 [m]
Peso aproximado	35 [Kg]



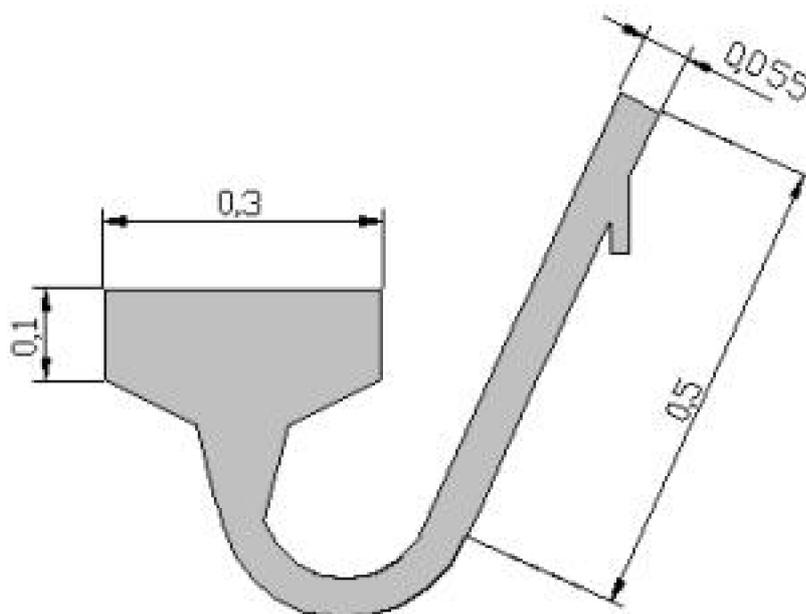
**FIGURA 5.2.5.2.** Dimensiones de cono de air-lift en [m].

Las relaciones entre altura y superficie (tomando como altura 0 [m] el borde exterior del radio menor del cono), para el cono presentado en la Figura 5.2.5.2 son:

**TABLA 5.2.5.2.** Relación altura – superficie para un cono para air-lift.

Altura [m]	Radio [m]	Diámetro [m]	S [m <sup>2</sup> ]
0.00	0.145	0.29	0.07
0.10	0.145	0.29	0.07
0.20	0.235	0.47	0.17
0.30	0.325	0.65	0.33
0.40	0.415	0.83	0.54
0.50	0.505	1.01	0.80
0.60	0.595	1.19	1.11
0.70	0.685	1.37	1.47
0.80	0.775	1.55	1.89
0.90	0.865	1.73	2.35
1.05	1.000	2.00	3.14

El cono es unido a la manguera, que lleva el pellet con agua a la superficie, por una pieza llamada receptor. Figura 5.2.5.3.



**FIGURA 5.2.5.3.** Dimensiones receptor como air-lift en [m].

### 5.2.6. Peces Silvestres.

Las granjas de cultivo de salmones en sus alrededores, pero principalmente bajo ellas, generan una acumulación de especies silvestres de peces, atraídas por el alimento que se pierde (que cae desde las jaulas). Entre las especies silvestres de peces más comunes en centros de cultivo, de esta región, tenemos:

- Jurel (*Trachurus Murphy*)
- Pejerrey (*Odonthestes Regia*)
- Robalo (*Eleginops Maclovinus*)

Las dimensiones de estas especies son:

**TABLA 5.2.6.1.** Dimensiones de especies silvestres de peces, encontradas bajo centros de cultivos.

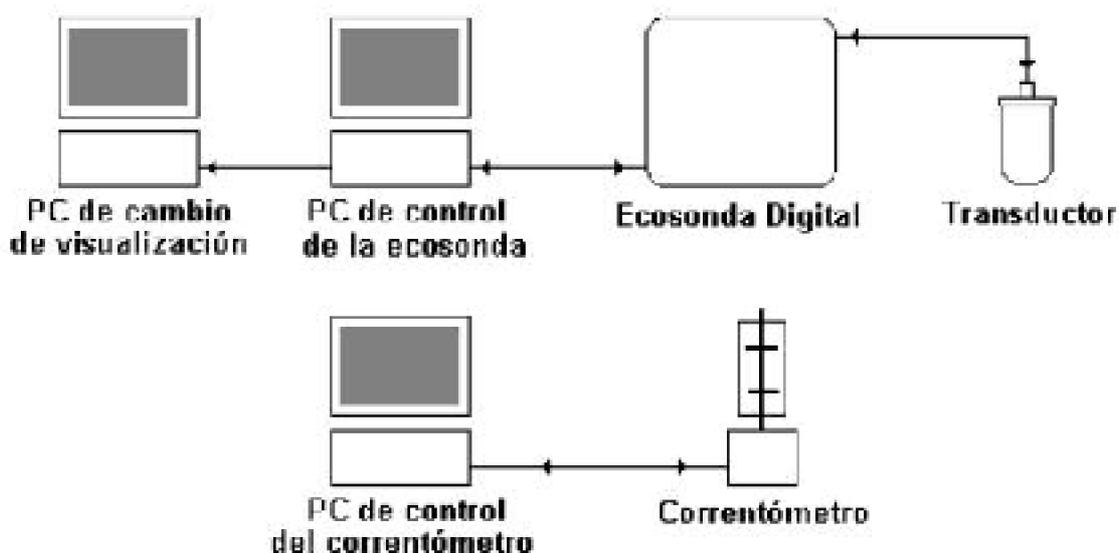
Especie	Tamaño [m]	
	Promedio	Máximo
Jurel	0,24	0,66
Pejerrey	0,20	0,35
Róbalo	0.40	0,80

## 5.3. Monitor Hidroacústico de Alimento de Salmónidos

Una aplicación diferente de un sistema acústico fue realizada por el Instituto de Fomento Pesquero de Chile (IFOP), que desarrollo un monitor hidroacústico prototipo para detectar

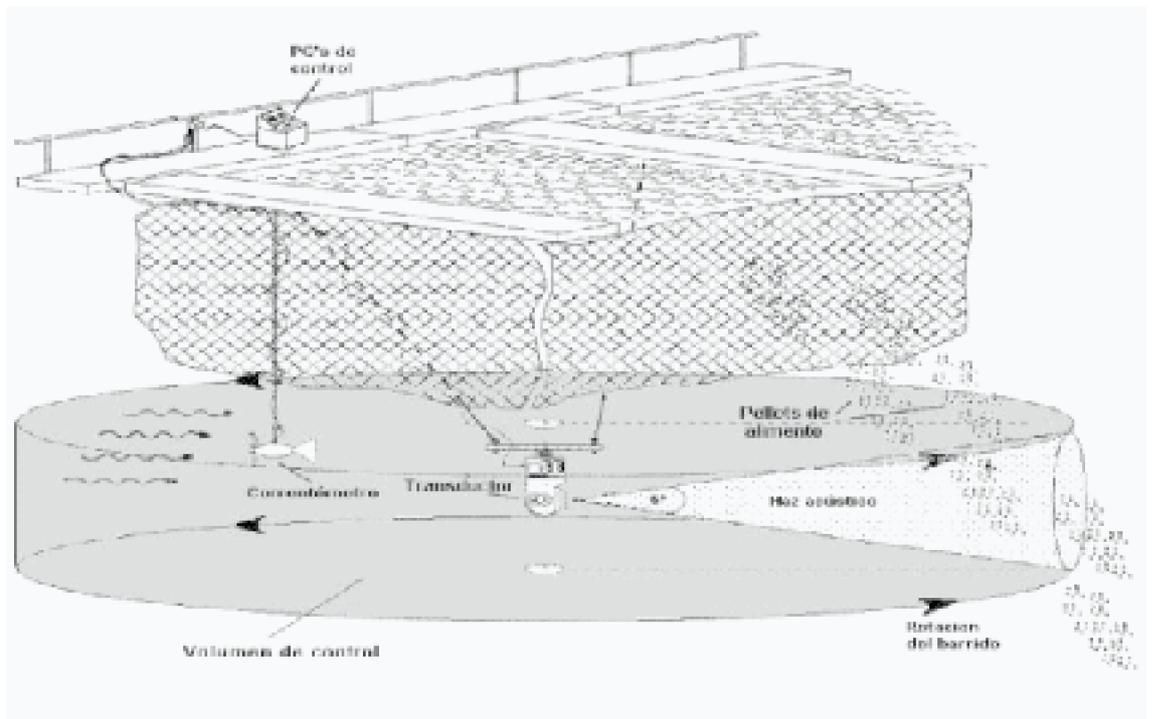
alimento de salmones. Esto bajo el marco del Proyecto FONDEF N° D97I2020 “Monitor para optimizar el proceso de alimentación de salmónidos cultivados en balsas-jaulas utilizando técnicas hidroacústicas de detección” (Proyecto MONALISA).

El monitor hidroacústico, esta formado por una ecosonda digital y dos computadores, uno para el manejo del sistema (visualización, almacenamiento y procesamiento de los datos) y el otro para cambiar la visualización del ecograma. El sistema además posee un medidor de corriente manejado externamente desde un tercer PC (Figura 5.3.1).



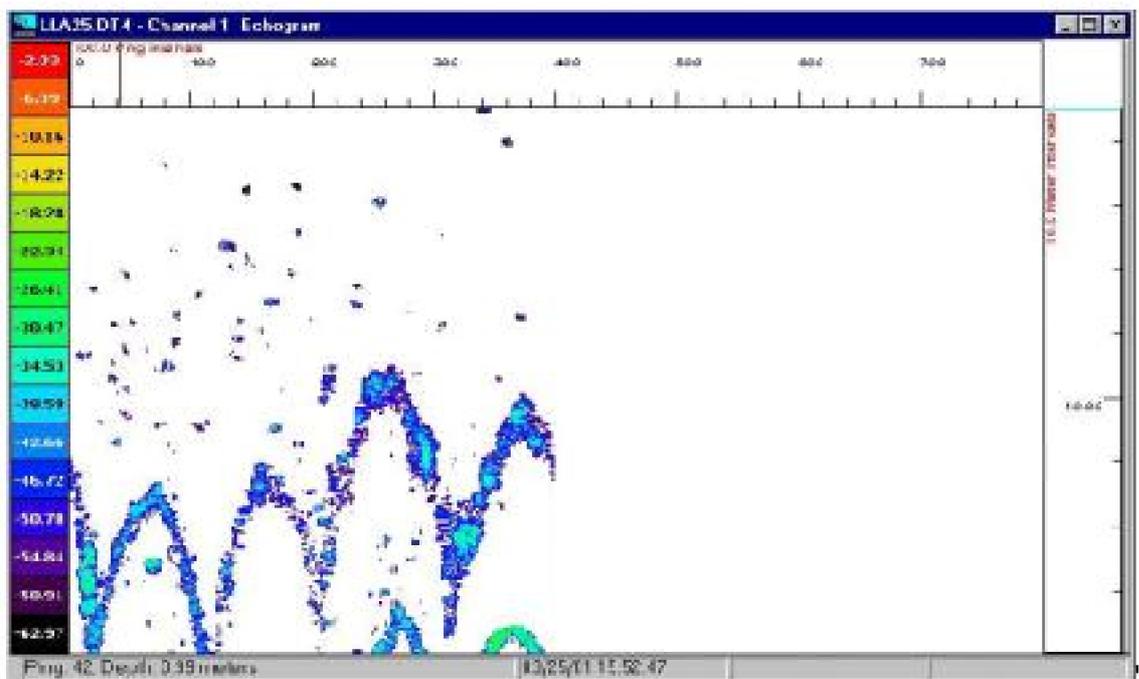
**FIGURA 5.3.1.** Esquema del monitor hidroacústico de alimento.

La ecosonda digital fue implementada para realizar barridos circulares y trabaja a una frecuencia de 200 [kHz] con un transductor de haz simple de 6,5°, que se encuentra montado sobre una unidad rotatoria. El transductor y el medidor de corriente se encuentran sumergidos bajo la jaula de cultivo (Figura 5.3.2). El monitor hidroacústico de alimento realiza barridos sobre una superficie de interés (superficie de control), la cual es ubicada bajo la jaula de cultivo. El inicio, la dirección y la cobertura del barrido se controla por medio del programa de control del monitor. La cobertura puede ser definida con valores entre 0° - 360°. El monitor hidroacústico realiza un barrido completo (360°) en 400 pings, para una tasa de pings de 9.01 [pps], por lo que cada ping recorre 0.9°. El monitor hidroacústico de alimento inicia su funcionamiento cuando se comienza a alimentar a los salmones y termina de barrer cuando detecta alguna partícula de pellet sobre la superficie de control y se activa una alarma sonora.

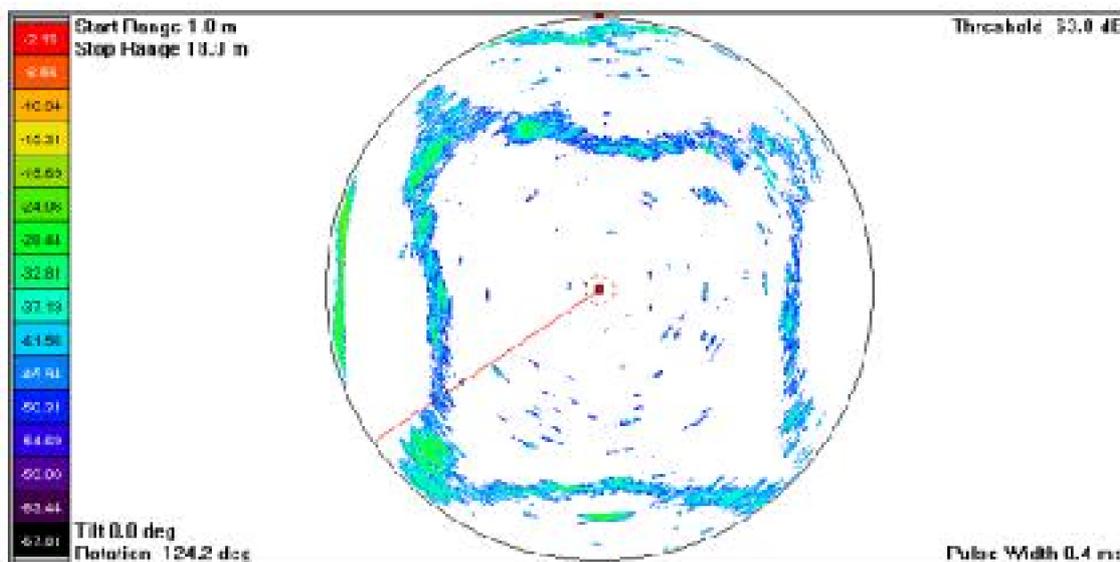


**FIGURA 5.3.2.** Montaje del monitor hidrocústico de alimento de salmónidos. Basado en Acker (2001).

El monitor hidrocústico de alimento es controlado desde un PC por el programa Visual Acquisition. Además, el PC de control del monitor hidrocústico, entrega un ecograma que corresponde a la visualización lineal (Figura 5.3.2) del barrido circular del transductor. Un segundo PC, toma la visualización del primer PC y forma una vista polar (Figura 5.3.3).



**FIGURA 5.3.2.** Ecograma de una jaula de cultivo generado por el primer PC, vista lineal.



**FIGURA 5.3.3.** Visualización polar del ecograma anterior (vista tipo sonar).

Además el monitor hidroacústico posee dos programas para el estudio de los ecogramas.

Visual Acquisition Play: Que sirve sólo para reproducir los ecogramas almacenados, en visualización lineal y polar.

Visual Analyzer: Que sirve para el análisis de los ecogramas, sólo en visualización lineal.