

LOS SONDADORES MONOHAZ (II)

Francisco J. PÉREZ CARRILLO DE ALBORNOZ



En la mar este instrumento (la sonda) es de muy gran provecho porque nos descubre las celadas y engaños encubiertos que muchas veces nos roban las haciendas y las vidas porque están encubiertos debajo del agua y no los vemos hasta estar caídos en los lazos que están puestos para nuestra perdición...

Espejo de Navegantes. Alonso de Chaves (ca. 1538).

Fundamento de la medición de los sondadores



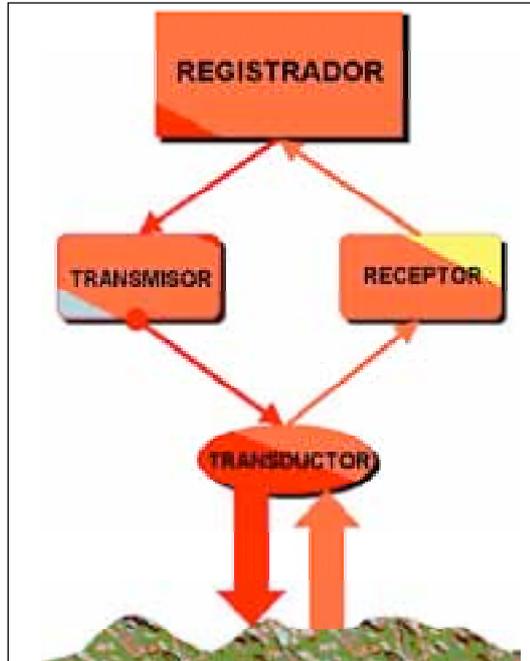
SENCIALMENTE un sondador es un sistema de telemetría por ecos, donde un transmisor emite energía a través del agua y un receptor recibe la fracción de energía que es reflejada por el fondo.

El sistema comprende los medios necesarios para medir el tiempo transcurrido, así como el proceso de la señal para su posterior registro.

Al tratar aquí los sondadores utilizados en Hidrografía, diremos que utilizan siempre la transmisión de impulsos. Este tipo de sondadores se caracteriza por la emisión de una serie continua de impulsos de corta duración, separados entre sí por espacios relativamente grandes comparados con la duración del impulso.

Principios de funcionamiento del sondador

El transmisor emite un impulso verticalmente hacia abajo en el agua. Cuando encuentra un obstáculo (blanco) en su camino, se refleja parte de la energía contenida en el impulso y vuelve hacia el transductor. La señal reflejada (eco) es detectada, amplificada, registrada en el sistema de adquisición de datos y normalmente aplicada a un sistema de presentación gráfica. De esta



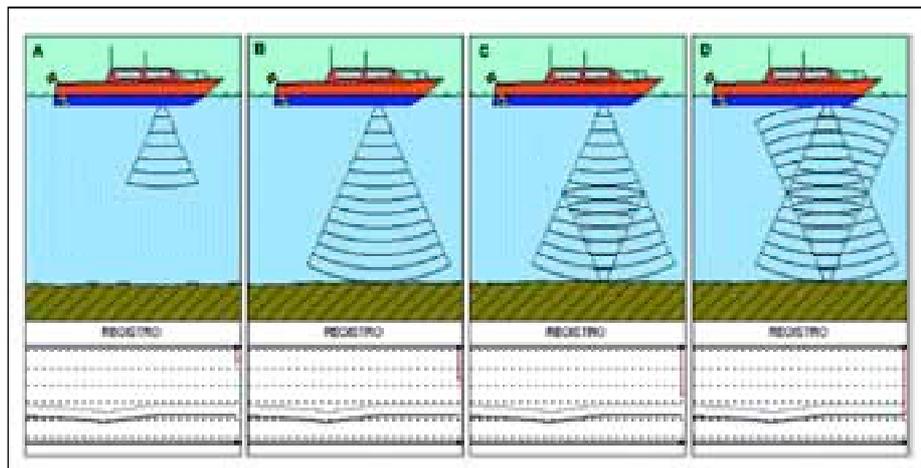
forma la medida del tiempo se convierte en una medida de distancia, al conocer la velocidad de propagación del sonido en el agua.

Es evidente que el tiempo transcurrido entre la emisión del impulso y la recepción del eco es doble que el empleado por el citado impulso en llegar al obstáculo considerado, puesto que el eco debe recorrer el mismo camino en sentido inverso. Por tanto la distancia al obstáculo es:

$$D = 1/2v \cdot t$$

donde v = velocidad de propagación del sonido, y t = intervalo de tiempo entre la emisión y la recepción.

Junto con la velocidad de propagación del sonido en el agua, cuyo conocimiento es fundamental para el correcto funcionamiento de los sondadores, otro factor importante es la frecuencia de trabajo.



Principios de funcionamiento del sondador.

Lo normal es que los sondadores funcionen simultáneamente con dos frecuencias diferentes. La principal ventaja que presenta esta forma de trabajo es que, debido a las características de reflexión que ofrecen los objetos a diferentes frecuencias, no sólo se puede obtener la profundidad, sino también diferentes capas según su densidad, por ejemplo sedimentos orgánicos, cables, tuberías, etcétera.

Un sondador trabajando con doble frecuencia combina la gran fiabilidad de las frecuencias altas para aguas poco profundas y la capacidad de sondear grandes profundidades con la frecuencia baja.

Con respecto a cómo son los ecos producidos en el fondo, y aunque hablaremos del tema con más detalle, podemos decir lo siguiente (1):

Un fondo duro y liso refleja la señal transmitida como un espejo. El impulso emitido llega a todo el área del fondo iluminada, casi en el mismo instante, y el eco de partes diferentes de este área vuelve a la superficie, también, casi en el mismo instante. La señal del eco recibida es, básicamente, una copia atenuada del impulso de transmisión.

La señal del eco en fondo en pendiente se caracteriza por tener una mayor duración y un tiempo de subida más lento.

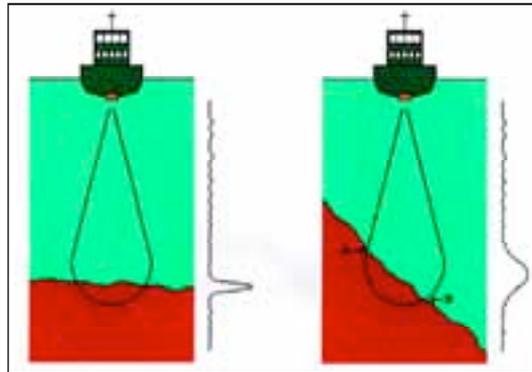
El impulso emitido alcanza primero la pendiente en el punto A y con el tiempo el punto de reflexión recorre la pendiente hacia el punto B.

El algoritmo de detección de fondo que incorporan todos los sondadores sigue siempre el primer retorno bueno del fondo. Para un fondo en pendiente, y en otros casos que

vamos a analizar, se tomará como bueno el del punto A. Este valor de profundidad detectado es siempre inferior al que existe en el eje del transductor.

Como ya hemos dicho en páginas anteriores, el conocimiento de la velocidad de propagación del sonido en el agua en la zona en la que estamos trabajando es esencial para que el cálculo de la profundidad que se efectúa en el sondador sea lo más exacto posible, ya que en la fórmula que se utiliza el intervalo de tiempo es calculado por el mismo sondador, pero la velocidad debe serle proporcionada:

1. Introduciendo la velocidad directamente mediante una operación que se llama *calibración* y que pasamos a describir a continuación (2):



Eco del fondo.



Método de calibración de la barra.

Antes de comenzar el trabajo, y en la zona donde se va a efectuar el levantamiento, se arría una barra o plancha de dos en dos metros y hasta la profundidad de 10 metros. La barra será la adecuada a la manga del bote e irá provista en sus extremos de dos cabos o cadenas perfectamente medidas y marcadas a las profundidades de calado; dichas marcas se harán coincidir con la superficie del agua, con el bote a ser posible a la deriva para evitar arrastres de la barra por corriente.

Durante estas operaciones y en cada profundidad, se ajustará la velocidad de propagación hasta que coincidan la profundidad verdadera y la

que marca el sondador. Se tomará como velocidad la media de las obtenidas.

Al final de la jornada de trabajo, se efectúa una recalibración para comprobación (3).

2. Hoy día lo más habitual es la introducción en el sistema de un perfil de velocidad del fluido obtenido mediante un perfilador.

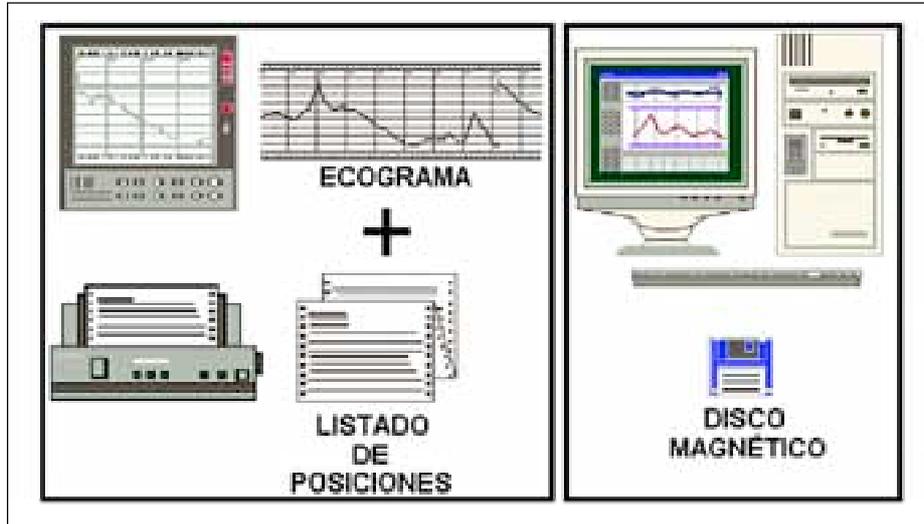
Ecogramas

Hoy en día los resultados de los trabajos se recogen en dos formatos: analógico y digital.

El registro analógico, que se llama *ecograma*, es fundamental para:

- Comprobar a bordo que el trabajo se efectúa correctamente.
- Comprobar el trabajo durante el posproceso y efectuar el estudio de posibles errores, si bien existen aplicaciones informáticas desarrolladas para la detección de esos errores.

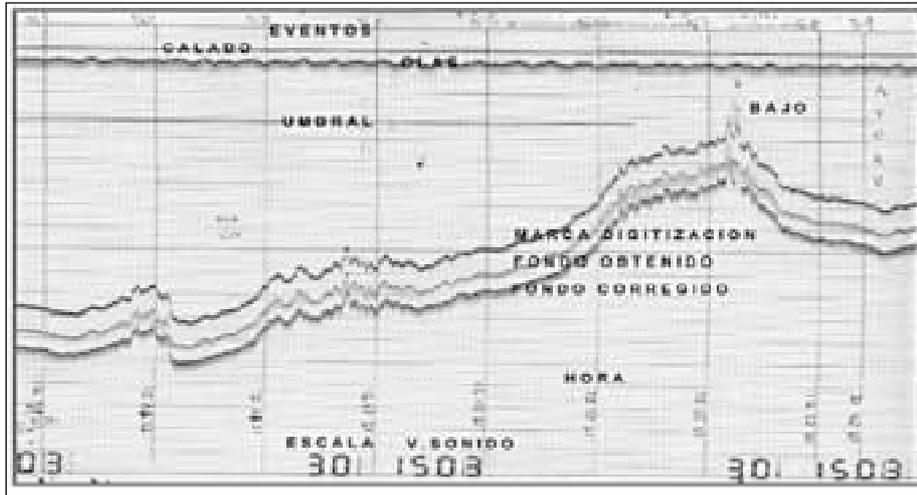
Dentro de un ecograma tipo estándar podemos distinguir las siguientes marcas:



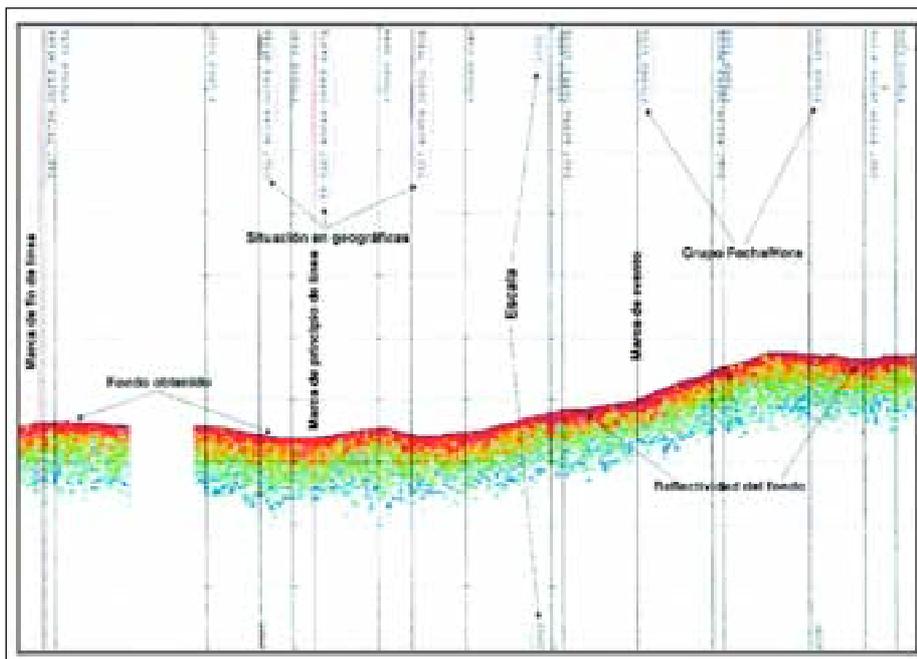
Recogida y presentación analógica y digital de los datos.

- *Evento*: marca vertical que aparece en el registro a intervalos regulares, según el tiempo que se haya establecido; la numeración comienza cada vez que se arranca el programa, excepto que se indique lo contrario. Está en correlación con la marca de eventos en los datos digitales y la impresora.
- *Calado*: distancia entre la superficie del agua y el transductor. La marca que aparece en el registro es el origen de transmisión, desplazada hasta hacerla coincidir con el calado.
- *Ola*: marca que aparece en el registro indicando la altura de la ola en ese momento.
- *Umbral*: filtro de digitización de eco. Todo ruido producido entre el origen de transmisión y la marca no se digitiza.
- *Marca de digitización*: marca de confirmación de grabación de datos digitales. Está un centímetro por encima de la marca del fondo obtenido.
- *Fondo obtenido*: marca que indica el perfil del fondo sin tener en cuenta la corrección por altura de ola.
- *Fondo corregido*: marca del perfil del fondo corregido por la altura de la ola correspondiente al momento.
- *Escala*: rango de profundidad. En este caso, de 0-50 metros (4). El primer dígito indica la escala y el segundo la amplitud.
- *Velocidad del sonido*: velocidad de propagación del sonido en el agua, obtenida mediante calibración.

TEMAS PROFESIONALES



Ecograma monohaz, papel térmico blanco y negro (5).



Ecograma de un sondador actual (6).

- *Hora*: instante en que se produce el evento.
- *Bajo*: fondo menor que el entorno.

En un ecograma del tipo de un sondador monohaz de última generación:

- *Marca del evento*: marca vertical que aparece en el registro a intervalos regulares, según el tiempo que se haya establecido.
- *Fondo obtenido*: registro del perfil del fondo escalado según rango de profundidad.
- *Escala*: Rango de profundidad. En este caso de 1.000-2.000 metros.
- *Grupo fecha/hora*: instante en el que se produce el evento.
- *Marca de principio/final de línea*: instante en el que comienza o finaliza la línea.
- *Situación de geográficas*: posición del punto correspondiente a la marca.
- *Reflectividad del fondo*: calidad del fondo según las tablas del fabricante.

Con este tipo de ecograma (en color) se puede conocer, comparándolo con una tabla que se entrega con la documentación del sondador, cómo son las primeras capas del subsuelo (7).

Antes de continuar con el estudio del funcionamiento de los sondadores de un solo haz, es conveniente hacer un inciso para recordar cuál fue el primer sondador utilizado a bordo de un buque español para la determinación de profundidades, con vistas a desvelar el relieve submarino.

Se trataba de un sondador acústico sistema *Echo*, construido en Londres y que había sido ideado por el Almirantazgo británico. El aparato marcaba con bastante precisión hasta una profundidad de 230 metros. Comparados sus registros con las profundidades obtenidas con escandallo mecánico, los errores no excedían del 5 por 100. En las pruebas a que fue sometido se pasó intencionadamente por encima de los bancos de las Laxiñas, a la salida de Ferrol, señalando perfectamente todas las variaciones del fondo (8).

Fue instalado en octubre de 1927 en el buque planero *Giralda* y «...algunos marineros del buque, desconocedores de los misterios que la ciencia descubre en su correr vertiginoso a través de los tiempos, dieron al aparato el sobrenombre de *la bruja*, que desde el primer momento jocosamente le aplicaron...» (9).

Con anterioridad a este primer sondador acústico, el *Tratado de Navegación* de Luis de Ribera y Uruburu (10) habla de los escandallos de eco y dice que eran «máquinas insustituibles hasta la aparición de los sondadores de eco».

El más famoso de estos llamados escandallos de eco fue el que se probó a bordo del acorazado *San Marco* de la Marina italiana, cuyas experiencias

TEMAS PROFESIONALES

vienen detalladas en la *Rivista Marítima* (11). En su funcionamiento se trataba de apreciar lo más exactamente posible el intervalo transcurrido desde que se producía el ruido de la explosión de una bomba cerca de la superficie del agua, hasta la percepción del eco al reflejarse la onda sonora en el fondo del mar. La bomba empleada, cargada con dos kilos de explosivo, se lanzaba por la popa unida a un flotador, provocándose la explosión eléctricamente. Los receptores acústicos eran dos hidrófonos, que se instalaron en la obra viva del buque, cerca de la proa a banda y banda (12).

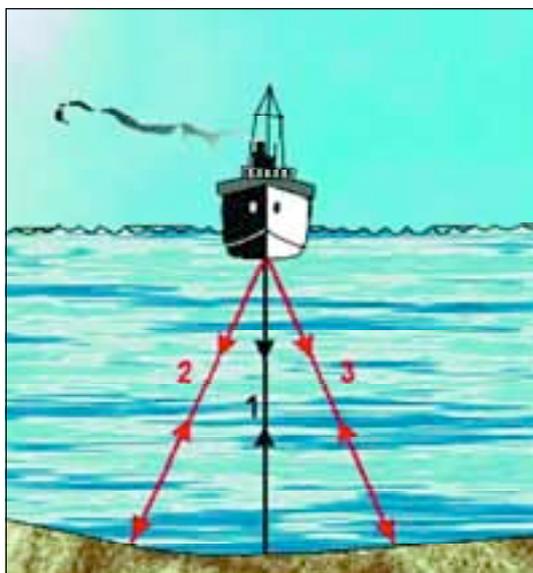
Después de este pequeño recordatorio de los antecesores de los sondadores monohaz que utilizamos en la actualidad, vamos a seguir viendo cómo trabajan.

Tipología del fondo

El método de los sondadores acústicos proporciona las profundidades de objetos situados verticalmente debajo de un barco, pero ¿qué ocurre con objetos situados no verticalmente debajo, sino un tanto desviados y alejados del barco?

Vamos a distinguir entre los diferentes fondos que podemos encontrar:

Fondo Plano

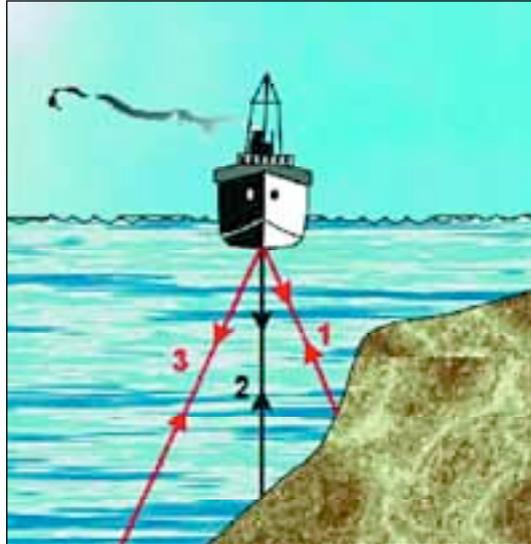


Ecos sobre fondo plano (13).

El problema es sencillo mientras el fondo sea plano. El camino más corto del barco al fondo es la conexión vertical, es decir, la profundidad del agua [1]. Un haz sónico inclinado [2 ó 3] tiene que recorrer mayor distancia. Los ecos de los objetos directamente debajo del barco llegarán antes que los procedentes de otras direcciones que no sean la vertical. Por tanto, si se usa el tiempo de inicio del eco total para el cronometrado, que es lo habitual, se obtendrá la profundidad verdadera en la posición del buque.

Fondo en pendiente

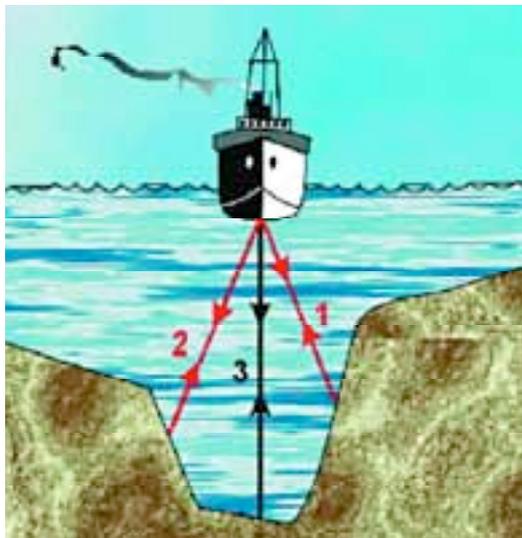
La situación es diferente cuando el fondo está en pendiente. En ese caso, el primer eco parcial que llega no proviene del punto verticalmente debajo, sino que, dependiendo de la forma de la pendiente, de algún punto al lado [1]. El eco que proviene del punto que está verticalmente debajo [2], que es el que da la profundidad verdadera bajo la quilla, llega más tarde. Queda sumergido en el eco general, y no puede identificarse. En casos como éste, el punto inicial de los ecos no indica la profundidad verdadera.



Ecos sobre fondo inclinado (14).

Fondo irregular

Errores similares se producen en fondos marinos irregulares. Si el barco, como en el dibujo adjunto, está encima de una sima estrecha, es posible que no se registre la sima, porque los ecos de los lados de la sima [1 y 2] llegarán antes que los ecos del fondo de la sima [3]. Estos últimos no podrían distinguirse del volumen de ecos, y no tendrán valor alguno para la medición. De nuevo no se indica la profundidad verdadera bajo el barco. Se produce una indicación de profundidad inferior porque el volumen total de



Ecos sobre fondo irregular (15).

ecos corresponde al tiempo de tránsito del camino más corto entre el barco y el fondo del mar [1]. Además el perfil del fondo no aparecerá correctamente.

Error en la situación de los fondos

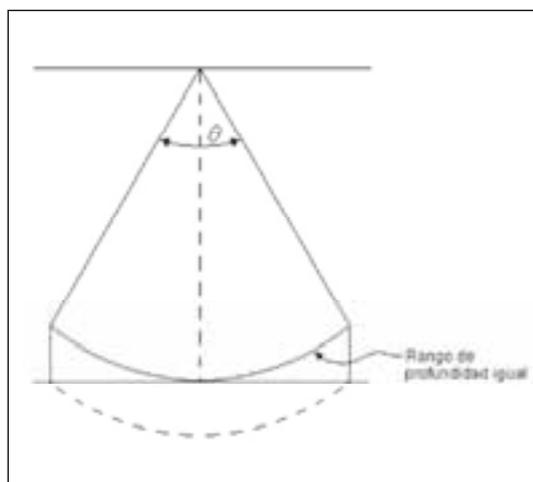
Según la Publicación Especial n.º 44 (S-44) de la OHI «..la exactitud de la posición de una sonda es la exactitud en la posición de la sonda en el fondo, localizada en un marco de referencia geodésico. La excepción a esto son los levantamientos de clase 2 y clase 3 (34) usando sondadores de un solo haz, donde es la exactitud de la posición del sondador del Sistema de Sondar».

Vamos a hacer un breve estudio para examinar los parámetros que afectan la posición de una sonda individual en relación con el transductor en el instante de la recepción.

Los errores en la posición de las sondas relativos al transductor pueden tener las siguientes causas:

- 1) Resolución en profundidad.
- 2) Ancho de haz.
- 3) El movimiento del barco a lo largo de la derrota.
- 4) La inclinación del fondo.
- 5) Los movimientos verticales del barco, la cabezada y el balanceo.

Resolución en profundidad



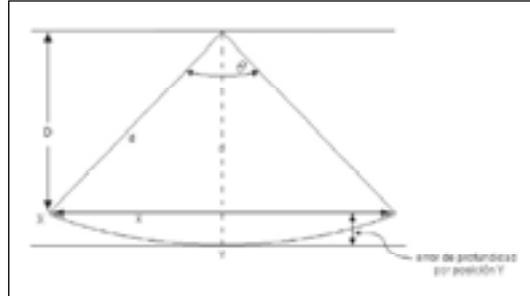
Medida de profundidad correcta (17).

Podemos definir la resolución en profundidad como la mínima diferencia de profundidad que es capaz de medir un sondador (16).

Un sondador mide el mínimo intervalo de tiempo o distancia en el tiempo en que la onda acústica está viajando.

Como el haz de sonido tiene aproximadamente una forma cónica, la distancia o profundidad podemos medirla sobre un segmento esférico. La profundidad correcta es la perpendicular desde el transductor del barco hasta el fon-

do. Sólo cuando el punto de corte de esta perpendicular con el fondo se encuentra en la primera superficie que toca el fondo se registra la profundidad correcta. Sólo si el fondo es plano y el barco está exento de cualquier tipo de movimiento se cumple la condición anterior.



Medida de profundidad incorrecta (18).

Si el retorno de la señal viene de un punto situado en el perímetro de la superficie de igual distancia, la distancia aparecerá como la profundidad del punto vertical bajo el transductor. La sonda por tanto será más pequeña y desplazada de su verdadera situación.

$$e = d - D$$

$$e = d - d \cos \theta/2$$

$$e = d (1 - \cos \theta/2)$$

Pero como $0/4 = 1 - \cos \theta/2$, por tanto $e = 2d \text{ sen}^2 \theta/4$

Donde:

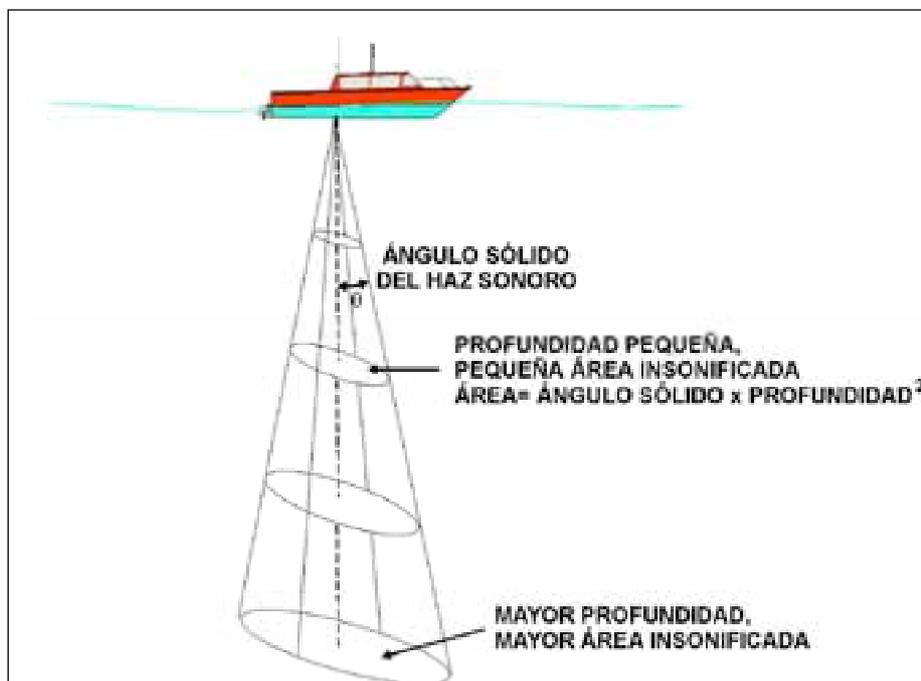
- e es el error de la profundidad.
- d es la profundidad grabada.
- D es la profundidad real.
- θ es el ancho del haz en grados.

Y es la posición en la cual se graba la profundidad. El objeto en X e Y parecerá a la misma profundidad d , la cual no puede ser resuelta de la verdadera profundidad D en posición X .

La ecuación anterior puede ser usada para calcular un posible porcentaje de error en la profundidad usando el ancho de haz del transductor, calculando el error probable que podría estar presente en la posición grabada, no teniendo en cuenta el movimiento del barco (cabeceo y balanceo) en un fondo plano.

Error de posición debido al ancho de haz

No se consideran las formas de haz con diferentes dimensiones angulares al través y de proa a popa. Se asumirá que el haz del transductor del sondador es perfectamente cónico.



Dependencia del área insonificada con la profundidad (19).

El posible error de profundidad y posición debido a la anchura del haz limita la capacidad del sondador para resolver la profundidad, por lo que se denomina normalmente resolución de profundidad de la ecosonda, o más específicamente de ese transductor en particular.

La anchura del haz también determina el área sobre la que se puede obtener la profundidad mínima, con una sola señal. Al estar en función de la anchura del haz, es posible expresar la anchura lineal (sobre el fondo) de este área como porcentaje de la profundidad, lo que permitirá al hidrógrafo calcular el porcentaje probable de error de la posición de una sonda.

La resolución de la profundidad descrita no debe confundirse con la capacidad del transductor de distinguir entre dos blancos a casi la misma distancia dentro del haz, que viene determinado por la longitud del pulso. Esta capacidad tiene poca trascendencia en la medición de profundidades, ya que en ese caso al hidrógrafo sólo le importa el eco más cercano.

La ecuación siguiente calcula la dimensión lineal máxima de la «huella»:

$$x = 2d \tan \theta/2 \quad (20).$$

Donde:

x es la anchura lineal (diámetro) del área.
 d es la profundidad registrada.
 θ es la anchura del haz del transductor.

Los efectos de la capacidad de resolución debido al ancho del haz son:

- La profundidad registrada será la distancia hasta el objeto más cercano dentro del círculo de cobertura (huella).
- Si el objeto está en el extremo del ancho del haz (que es el peor caso posible), su profundidad se registrará como mayor que la verdadera en una cantidad igual a la resolución de profundidad de esa profundidad.
- La posición de la profundidad se representará verticalmente debajo del transductor, cuando puede estar en cualquier punto de la huella del ancho del transductor a esa profundidad.
- Obviamente, si el transductor está situado directamente encima de la cumbre de un pico sumergido, medirá la distancia más corta, y por tanto la menor profundidad encima de él.

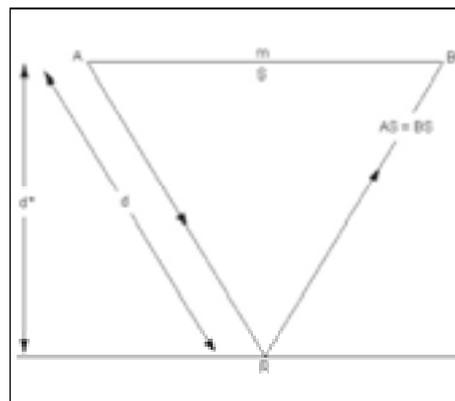
Movimiento del barco a lo largo de la derrota

Sea un barco en la posición A transmitiendo un pulso y que esté en la posición B en la recepción del eco reflejado, habiendo recorrido una distancia m .

El lugar geométrico de los puntos R es una elipsoide de focos A y B y eje de revolución AB , centrado en el punto S , el punto medio de AB (22).

Para barcos con velocidades normales, es decir, menores de 20 nudos, el elipsoide puede ser considerado una esfera con centro en S y radio a , siendo $a = RA/2 + RB/2$. Entonces el error que afecta a SR comparado con $(AB + BR)/2$ es menor que el 0,002 por 100 de la profundidad registrada.

Por tanto, en el movimiento del barco a lo largo de su propia derrota para velocidades normales de avance cualquier error de profundidad o situación puede ser ignorado, ya que es despreciable con relación al transductor.



Error de medida por desplazamiento de barco (21).

Cabeceo y balanceo

Los movimientos de cabeceo y balanceo del barco tienen un efecto completamente diferente sobre las sondas. Con estos movimientos, el haz sonoro no alcanza un punto verticalmente debajo del barco.



Efectos del movimiento del barco con un haz no estabilizado (23).

Cuando durante los levantamientos la embarcación de sondas está sometida a este tipo de movimiento, no sólo no se mide la profundidad bajo el barco, que es el propósito con este tipo de sondadores, sino que la sonda obtenida es situada por el equipo de posicionamiento (sea visual o radioeléctrico) justo bajo el barco, con lo cual se está registrando una sonda errónea en la posición correcta.

Hoy día para corregir estos defectos existen los llamados sensores de movimiento, que colocados lo más próximos posible al centro de gravedad del barco registran los movimientos para ser transmitidos a sistemas que o bien estabilizan el haz o bien lo compensan (24).

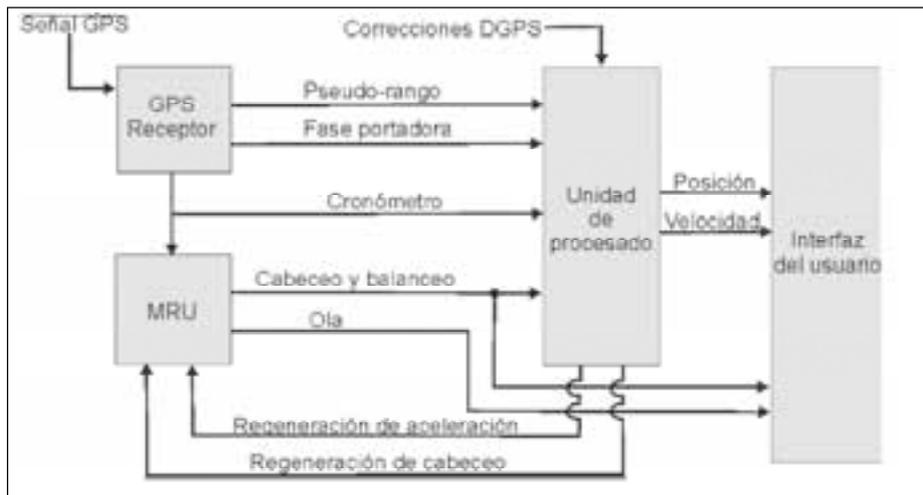
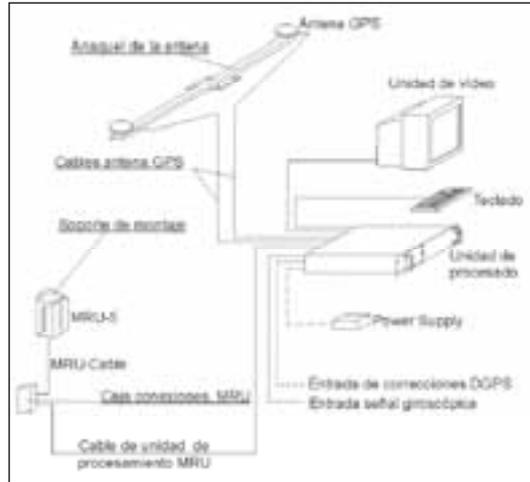
La diferencia entre estabilización y compensación es la siguiente:

- Con la estabilización el sistema del que hablamos dirige el haz directamente hacia abajo, deshaciendo el movimiento de balanceo o cabezada.
- Con la compensación reduce la distancia medida a la vertical. Este método, evidentemente, no es el más ortodoxo para calcular la profundidad correcta bajo el barco, pero sí permite durante el procesado, al conocer los datos del movimiento, eliminar las sondas que puedan ser erróneas. Cuando el fondo es razonablemente regular puede ser aceptada esta solución.

Fondo inclinado

Puede haber dos alternativas: navegar contra la pendiente o a lo largo de la pendiente.

El primer eco que se recibe del fondo es el del punto situado a la mínima distancia (m) siendo d la verdadera distancia bajo el transductor y la que corresponde a la situación del equipo de posicionamiento. Cuando se trata de pequeñas irregularidades en el fondo no afectan al resultado.



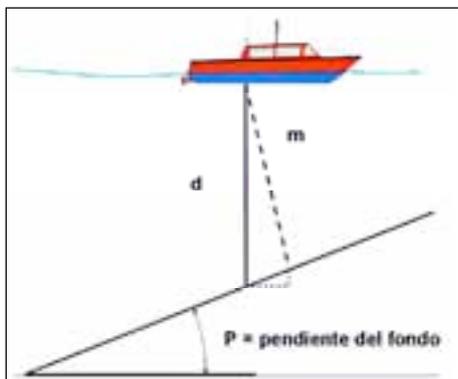
Sistema completo de un sensor de movimiento (25).

Siendo α el ancho del haz y φ el ángulo de la pendiente, podemos formular el error (cuando se navega a lo largo de la pendiente) de la forma siguiente:

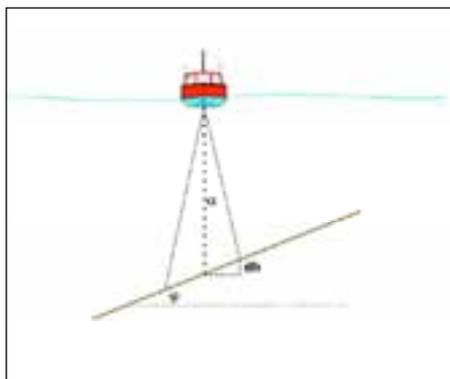
$$D_h = \text{profundidad} \times \text{tg } \alpha/2 \times \text{tg } \varphi \quad (26).$$

Si α es 10° y φ es 30° , el error sobre 100 m será de 5 m. Considerando esto, se puede pensar que lo mejor sería un transductor de haces con ángulos estrechos pero,

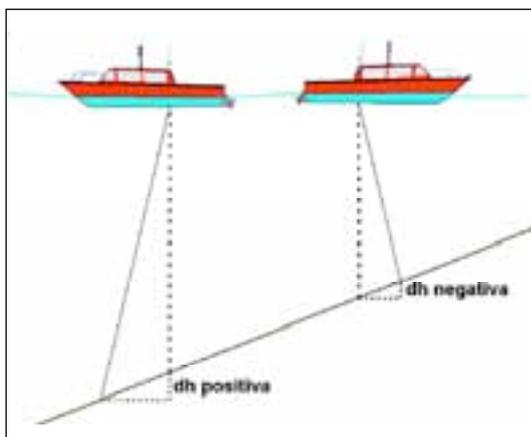
TEMAS PROFESIONALES



Error por mínima distancia.



Error navegando a lo largo de la pendiente.



Error navegando contra la pendiente.

como ya hemos visto en páginas anteriores, presenta algunas desventajas.

La corrección de la medida de profundidad en el caso de navegar contra la pendiente es extraordinariamente compleja y se hace cuando se procesan los datos y sólo se aplica en casos excepcionales.

Para minimizar los errores de profundidad y situación cuando se está sondando con fondo inclinado, se recurre normalmente a los métodos siguientes:

- a) Utilización de transductores de haz estrecho.
- b) Utilización de una baja velocidad durante el trabajo.



TEMAS PROFESIONALES

- (1) EA 400 Series. Manual. Simrad. 2000, pág. 6.
- (2) Se utiliza en botes y embarcaciones neumáticas normalmente.
- (3) Normas para los levantamientos hidrográficos. Instituto Hidrográfico de la Marina. 2.^a ed. Cádiz, 1994, pp. 17-7.
- (4) Sondador Atlas Deso 25. Archivo de la Sección de Hidrografía. Instituto Hidrográfico de la Marina.
- (5) Simrad EA-500. Perfil obtenido a bordo del BIO *Hespérides* en mayo de 2000.
- (6) Se separan los colores que se observan en el ecograma con las tablas.
- (7) CERVERA, Joaquín: *Sondador acústico sistema Echo instalado en al planero* Giralda. REVISTA GENERAL DE MARINA año 1928. Tomo II, p. 546.
- (8) Ídem.
- (9) Artes Gráficas Grijelmo. Bilbao, 1945, p. 660.
- (10) Números correspondientes a diciembre 1924 y enero 1925.
- (11) ESTRADA, Rafael: *Los sondadores acústicos y ultraacústicos*. REVISTA GENERAL DE MARINA. Mayo 1925, p. 615.
- (12) PÉREZ CARRILLO DE ALBORNOZ, F. J., y otros: *Dispositivos utilizados en hidrografía para el levantamiento de cartas náuticas*. Instituto Hidrográfico de la Marina. Cádiz, 2000.
- (13) Ídem.
- (14) Ídem.
- (15) Según la clasificación de levantamientos existen cuatro clases:
 - Clase especial: levantamientos indicados para puertos, zonas de atraque y canales en zonas críticas específicas con un espacio mínimo bajo la quilla y con fondos especialmente peligrosos para los buques.
 - Clase 1: puertos, canales de accesos a los puertos, rutas recomendadas, canales de navegación interior y zonas costeras con mucho tráfico comercial con espacio bajo quilla mesos crítico y fondos menos peligrosos y con profundidades inferiores a 100 m.
 - Clase 2: zonas con profundidades inferiores a 200 m no cubiertas por la clase 1 y donde una descripción general de la batimetría es suficiente para asegurar que no hay peligro para la navegación.
 - Clase 3: zonas no cubiertas por las clases anteriores en aguas con profundidad superior a 200 metros.
- (16) PÉREZ CARRILLO DE ALBORNOZ, F. J., y otros: *Dispositivos utilizados en hidrografía para el levantamiento de cartas náuticas*. Instituto Hidrográfico de la Marina, 2000.
- (17) Ídem..
- (18) Ídem.
- (19) Ilustración de Multibeam Sonar of Operation. Sea Beam, 2000.
- (20) PÉREZ CARRILLO DE ALBORNOZ, F. J. y otros: *Dispositivos utilizados en hidrografía para el levantamiento de cartas náuticas*. Instituto Hidrográfico de la Marina, 2000.
- (21) Ídem.
- (22) Ídem.
- (23) Multibeam Sonar Theory of Operation. Sea Beam, 2000.
- (24) SEAPATH. User's manual, Novia Maritime AS. Division Seatex. Noruega, 1997.
- (25) Ídem.
- (26) Accuracy when using an echosounder. Kongsberg-Simrad.