

ARTÍCULO



Efecto del fenómeno de cáustica en el proceso de detección submarina

Caustic effect phenomenon in the process of submarine detection

Fecha recepción: 2010-04-30 / Fecha aceptación: 2010-11-03

María Alejandra Vélez Senior, m_aleja1@hotmail.com
Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla",
Cartagena de Indias, D. T. y C., Colombia.

RESUMEN

Conocer el fenómeno de cáustica se ha convertido en tema de interés para el estudio del funcionamiento y eficacia de los sonares, además, para la aplicación de su concepto en temas de defensa y táctica antisubmarina. La aparición del fenómeno en el proceso de detección submarina que realizan buques de guerra durante el desarrollo de operaciones militares crea un panorama táctico distorsionado debido a la aparición de pulsos falsos que genera la formación de una cáustica al interior del sonar. Físicamente, el fenómeno depende de la ley de reflexión del sonido y por medio del método de rayos se consigue una aproximación a la solución de la ecuación que rige el problema: Ecuación de ondas.

El presente artículo pretende contribuir a la comprensión del tema con el fin de tener mejores elementos de juicio en táctica antisubmarina, para discernir entre una marcación verdadera y una señal espuria.

Palabras claves: Cáustica, sonar, reflexión, método de rayos, parámetro de ondas.

ABSTRACT

Knowing the caustic phenomenon has become a topic of interest to study the functioning and effectiveness of sonars, in addition to the application of its concept on defense and antisubmarine tactics. The emergence of the phenomenon in the process of detecting underwater warships engaged in the development of military operations creates a tactical picture distorted due to the appearance of false pulses generated by the formation of a caustic inside the ring. Physically the phenomenon depends on the law of reflection of sound and using the ray method is achieved by an approach to the solution of the equation governing the problem: wave equation.

This article aims to contribute to the understanding of the topic in order to have better evidence in anti-submarine tactics and to distinguish a true bearing and a spurious signal.

Key words: Caustic, sonar, wave parameters, reflection, ray method.

INTRODUCTION

Throughout history, sound has been the best way to transport energy in the ocean [1], which has been used in different ways to explore the seas. Detection of underwater sound is made by sonar equipment, which is indispensable for the investigation of the ocean and also for military uses because of its large scope and reliability of the information provided. The invention of the sonar dates back to the fifteenth century; since then, thanks to the progress and developments in technology, the use of sonar opened a field of multiple options for science and is of considerable interest in defense – related issues, particularly in the anti-submarine warfare.

During the course of military operations, data deployed by the sonar are assessed by operators, who interpret this information and make decisions in real time based on the information the equipment presents.

The success of anti-submarine naval operations requires the highest level of readiness of equipment and staff training in order to ensure thorough exploitation of the capacity of the equipment and technology available on board. Therefore, it is necessary that the personnel involved in such missions be trained on the physical phenomena which in this case, as is the example of caustics, affects the results shown by the sonar during the detection process.

Hence, the importance of having sufficient grounds to evaluate the accuracy of the data is high, as well as knowing the possible sources of misinformation and correcting any faults which may occur. This is achieved through better and more comprehensive instruction in the technical submarine and surface schools, which should include the study of caustics, its causes and effects for the staff engaged in detection processes through the use of sonars of this kind, so as to bear such effect in mind when seeking to discern possible causes of false markings on the data presented by the equipment. This instruction should consider using software that allows to develop simulation models of the behavior of sound in the ocean, and thus ensure the greatest impact on the results aboard.

At the time of acoustic wave reflection, if it gets stuck and crashes infinitely into the inner part of the sonar, the phenomenon of caustics occurs, which affects the authenticity of this information and gives rise to spurious pulses which complicate the detection process of a target.

There are documents of interest on this phenomenon, both in Optics and Underwater Acoustics, which provides information on the physical and mathematical foundations of caustics. In order to understand the problem, the ray method is used as the best approximation to the Wave Equation, taking into account basic concepts of reflection of sound in cylindrical surfaces, which resembles the shape of the sonar where the phenomenon occurs.

It is also important to explore new technologies at the time of updating sonar systems of vessels carrying out submarine detection operations, in order to ensure that the impact of these physical phenomena on the data obtained from the sonar be minimized or even thoroughly corrected.

MATERIALS AND METHODS

Theoretical Foundations

Sound involves the vibration of a body, which constitutes the source, and generates wave propagation through a medium, which in turn implies a transport of energy through mechanical waves. These waves propagate in the direction of sound, resulting in a longitudinal wave. In order to measure the speed of sound, density of the medium and compressibility module are taken into account, but in the ocean these two parameters are not constant and the sound becomes dependent on temperature, salinity and depth [1].

In order to determine the factors which have an impact on sound transmission in the ocean, it must be taken into account that the sea is limited by its bottom and surface, which has strong effects against the propagation of sound [1]. Likewise, the ocean has vertical variations, which makes it a non-uniform means and cau-

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia el sonido ha sido la mejor forma de transportar energía en el océano [1], por lo cual se ha utilizado en diferentes formas para la exploración de los mares. La detección del sonido bajo el agua es realizada por sonares, equipo que es indispensable para la investigación del océano y también para usos militares, debido a su gran alcance y a la fiabilidad de los datos que suministra. La invención del sonar se remonta al siglo XV, desde entonces, gracias al progreso y evolución de la tecnología, el uso del sonar abrió un campo de múltiples opciones para la ciencia y es de considerable interés para temas de defensa, en especial en la Guerra Antisubmarina.

Durante el desarrollo de operaciones militares, los datos desplegados por el sonar son evaluados por los operadores, quienes interpretan esta información y toman decisiones en tiempo real con base a la información que arroja el equipo.

El éxito de las operaciones navales antisubmarinas requiere un máximo nivel de alistamiento del material y de entrenamiento del personal que garantiza la correcta explotación de la capacidad de los equipos y la tecnología disponible a bordo. Por esto, se hace necesario que el personal que participa en este tipo de misiones se capacite sobre los fenómenos físicos que en este caso, como la cáustica, afecta los resultados que arroja el sonar durante el proceso de detección.

De ahí nace la importancia de tener juicios suficientes para evaluar la veracidad de los datos, conocer las posibles fuentes de información errónea y corregir las fallas que se presenten. Lo anterior se logra mediante una mejor y más amplia instrucción en las escuelas técnicas de submarinos y superficie, donde se incluya el estudio de la cáustica, sus causas y efectos para el personal comprometido en el proceso de detección mediante empleo del sonar tipo, con el fin de tener presente dicho efecto cuando se pretenda discernir posibles causas de marcaciones falsas en los datos desplegados por el equipo. Esta instrucción debe considerar el empleo de software que permita desarrollar modelos simulados del comportamiento del sonido en el océano, para de esta manera garantizar el mayor efecto en los resultados a bordo.

En el momento de la reflexión de la onda acústica, si éste queda atrapado y se choca infinitamente al interior del sonar, se produce el fenómeno de cáustica, el cual afecta la autenticidad de esta información, dando origen a pulsos espurios que complican el proceso de detección de un blanco.

Existen documentos de interés sobre este fenómeno, tanto en Óptica como en Acústica Submarina, lo cual aporta información sobre los fundamentos físicos y matemáticos de la cáustica. Para la comprensión del problema se utiliza el método de rayos como la mejor aproximación a la Ecuación de Ondas, teniendo en cuenta conceptos básicos de reflexión del sonido en superficies cilíndricas, lo cual asemeja la forma del sonar donde se forma el fenómeno.

Así mismo, es importante explorar nuevas tecnologías en el momento de modernizar los sistemas de sonar de los buques que realicen operaciones de detección submarina, con el fin de garantizar que se minimice e incluso corrija el impacto de estos fenómenos físicos sobre los datos arrojados por el sonar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fundamentos teóricos

El sonido involucra la vibración de un cuerpo que constituye la fuente emisora y genera la propagación de ondas a través de un medio, que a su vez implica un transporte de energía por medio de ondas mecánicas, las cuales se propagan en la misma dirección del sonido, teniendo como resultado una onda longitudinal. Para la medición de la velocidad del sonido, se toman en cuenta, la densidad del medio y el módulo de compresibilidad, pero en el océano estos dos parámetros no son constantes y el sonido pasa a depender de la temperatura, salinidad y profundidad [1].

Para determinar los factores que afectan la transmisión acústica en el océano se debe tener presente que el mar es un medio limitado con el fondo y la superficie, lo cual tiene efectos contundentes frente a la propagación del sonido [1]. Así mismo el océano tiene variaciones verticales que lo hace un medio no homogéneo lo

ses wave refraction, thereby reducing the effectiveness of the signal in terms of transmission and reception of echoes generated by any obstacles in its path [1]. In the case of the dimensions of the sonar dome, the speed of sound is constant and, for simplicity it is considered to be equal to its value in the water - air interface.

Acoustic model for solving the wave equation.

An acoustic model refers to the algorithms and software which allow to obtain approximate solutions of the wave equation for sound propagation in the ocean [7]. The wave equation is the starting point of the models and the ray method is an approach to the solution of this equation, when working with high frequency values.

The principle of this model is based on the assumption that sound energy is transmitted along its propagation path in the form of rays [7].

Linear wave equation:

$$\nabla^2 P - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = f(r, t) \tag{1}$$

Where P is the pressure of the acoustic signal, which is a function of signal propagation and time, C is the speed of sound propagation in the ocean medium, which depends on water salinity, temperature and depth, and $f(r, t)$ represents the point source that produces the signal with a ω frequency. Because equation (1) is a linear differential equation, its solution can be achieved by separation of variables by two independent functions in r and t, thus:

$$P(r, t) = e^{i\omega t} p(r) \tag{2}$$

$$f(r, t) = e^{i\omega t} \delta(z - z_f) \tag{3}$$

Where $\delta(z - z_f)$ is the Kronecker delta. The wave equation is thus obtained in a more simple manner, and it is called the *Helmholtz* equation:

$$\nabla^2 p - \frac{\omega^2}{c^2} p = -\delta(z - z_f) \tag{4}$$

Where z represents the depth and Z_f is the depth at which the sound source is located. This equation can be solved in a practical manner by the ray method.

Ray method. Many results obtained in marine acoustics research processes are interpreted by means of this method. For this analysis, it is necessary to obtain the ray equations, and additionally find the solution to the Helmholtz equation in the form of a series called "ray series" [8].

$$p(r) = e^{i\omega r} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j(x)}{(i\omega)^2} \tag{5}$$

If the Helmholtz equation (4) is replaced and the terms are compared in ω , the following approximations are obtained, where $O(\omega^2)$, $O(\omega)$, are the terms of second and first order, respectively.

$$O(\omega^2) \quad |\nabla T|^2 = \frac{1}{c^2}(X) \text{ Ecuación Eikonal}$$

$$O(\omega) \quad 2\nabla T \nabla A_0 + (\nabla^2 T) A_0 = 0 \tag{6}$$

$$O(\omega^{1-j}) \quad 2\nabla T \nabla A_j + (\nabla^2 T) A_j = -\nabla^2 A_{j-1}$$

Thus we obtain the Eikonal equation, valid only for high frequencies. The remaining frequencies are called transport equations, which are used in determining loss of signal transmission [6].

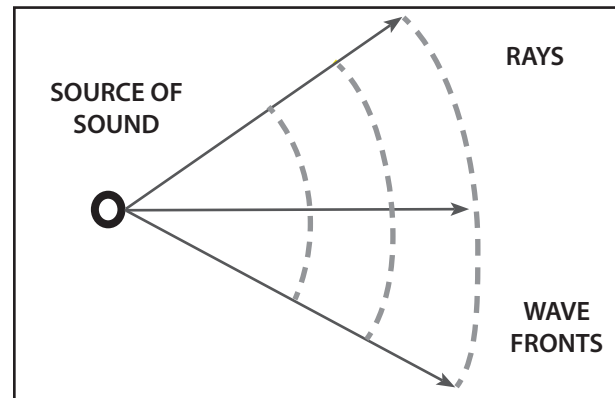


Figure 1. Propagation of rays of sound.

The mathematical method of characteristics can solve the Eikonal equation [9]. It is through this method that a group of rays is introduced, and rays lie perpendicular to the wave fronts (figure 1). Then, by means of algebraic concepts, it is found that ray equations are

que produce refracción de la onda, eventualmente reduciendo la eficacia de la señal en cuanto a su transmisión y a la recepción de ecos generados por eventuales obstáculos en su trayectoria [1]. Para el caso de las dimensiones del domo del sonar, la velocidad del sonido es constante y por simplicidad se considera que es igual a su valor en la interfase agua - aire.

Modelo acústico para la solución de la ecuación de ondas.

Un modelo acústico hace referencia a los algoritmos y programas de cómputo que permiten obtener soluciones aproximadas de la ecuación de ondas para la propagación del sonido en el océano [7]. La ecuación de ondas es el punto de partida de los modelos y el método de rayos es una aproximación a la solución de esta ecuación, cuando se trabaja con valores de alta frecuencia.

El principio de este modelo se basa en asumir que la energía sonora se transmite a lo largo de su trayectoria de propagación en forma de rayos [7].

Ecuación lineal de ondas:

$$\nabla^2 P - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = f(r, t) \tag{1}$$

Donde P es la presión de la señal acústica que es función de la propagación de la señal y del tiempo, C es la velocidad de propagación del sonido en el medio oceánico que depende de la salinidad del agua, la temperatura y la profundidad y $f(r, t)$ representa la fuente puntual que produce la señal con una frecuencia ω . Debido a que la ecuación (1), es una ecuación diferencial lineal, su solución se puede realizar mediante la separación de variables por medio de dos funciones independientes en r y t, así:

$$P(r, t) = e^{i\omega t} p(r) \tag{2}$$

$$f(r, t) = e^{i\omega t} \delta(z - z_f) \tag{3}$$

Donde $\delta(z - z_f)$ es el delta de Kronecker, y así se obtiene la ecuación de ondas de una manera más simple y se denominada ecuación de Helmholtz.

$$\nabla^2 p - \frac{\omega^2}{c^2} p = -\delta(z - z_f) \tag{4}$$

Donde z representa la profundidad y Z_f es la profundidad a la cual se encuentra la fuente sonora. Esta ecuación se puede resolver de manera práctica mediante el Método de rayos.

Método de rayos. Por medio de este método se interpretan muchos resultados obtenidos en investigaciones realizadas en acústica submarina, para lo cual se necesita obtener las ecuaciones de rayos, además de buscar la solución de la ecuación de Helmholtz en la forma de una serie denominada "de rayos" [8].

$$p(r) = e^{i\omega r(x)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j(x)}{(i\omega)^2} \tag{5}$$

Si se sustituye en la ecuación de Helmholtz (4) y se comparan los términos en ω , se obtienen las siguientes aproximaciones, donde $O(\omega^2)$, $O(\omega)$, son los términos de segundo y primer orden respectivamente.

$$O(\omega^2) \quad |\nabla T|^2 = \frac{1}{c^2}(X) \text{ Ecuación Eikonal}$$

$$O(\omega) \quad 2\nabla T \nabla A_0 + (\nabla^2 T) A_0 = 0 \tag{6}$$

$$O(\omega^{1-j}) \quad 2\nabla T \nabla A_j + (\nabla^2 T) A_j = -\nabla^2 A_{j-1}$$

Es así como se obtiene la ecuación Eikonal, válida sólo para altas frecuencias y las restantes son llamadas ecuaciones de transporte que son útiles para determinar la pérdida de transmisión de la señal [6].

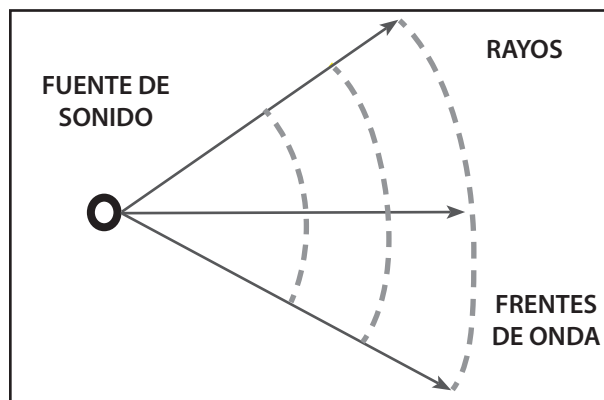


Figura 1. Propagación del sonido en rayos.

El método matemático de las características permite solucionar la ecuación Eikonal [9]. Por medio de este método se introduce un grupo de rayos que se ubican

given by the system of coupled ordinary differential equations [8].

$$\frac{dr}{ds} = c\xi(s), \quad \frac{d\xi}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{dc}{dr} \quad (7)$$

$$\frac{dz}{ds} = c\xi(s), \quad \frac{d\xi}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{dc}{dz} \quad (8)$$

Where $(r(s), z(s))$ represent the trajectory of the ray in the plane (r, z) . In order to perform calculations of the trajectory of the ray in the medium, it is necessary to arrange to have z as an independent variable. In so doing are the above equations reduced to the following differential equation:

$$\frac{d^2z}{dr^2} = \left[1 + \left(\frac{dz}{dr} \right)^2 \right] \left[-\frac{C_r}{C} \frac{dz}{dr} + \frac{C_z}{C} \right] \quad (9)$$

Where C_r and C_z represent the derivatives of $C(r, z)$ with respect to r and z , respectively. This equation also allows for tracking the trajectories of sound in order to take into account the dependence of sound on depth and range. However, if the speed of sound is considered to be independent from range, the equation is presented thus:

$$\frac{d^2z}{dr^2} = \left[1 + \left(\frac{dz}{dr} \right)^2 \right] \left[\frac{C_z}{C} \right] \quad (10)$$

If the above equation is integrated by analytical methods, the integral form of Snell's law is found, whereby a is the constant of the ray.

$$r(z) = r(z_0) + \int_{z_0}^z \frac{ac(z)}{\sqrt{1 - a^2c^2(z)}} \quad (11)$$

The trajectory of the ray is given by the position of the emitting source and the angle at which the ray leaves the source.

$$r = 0, \quad z = z_f, \quad \xi = \frac{\sin(\theta)}{C(z_f)} \quad (12)$$

It is important to remember that frequency values must be high for the model to have validity in the derivation of the equations of rays, unlike the theory of normal modes, which is preferably applied at low frequencies and long distances.

Reflection of sound and concept of caustics

In a medium with constant speed of sound, the ray will reflect upon impinging on a surface, "being the angle of reflection equal to the angle of incidence" [7].

Figure 2 visually shows the reflection of sound on a flat surface. Geometrically, it is assumed that the $sOPR$ triangles are congruent.

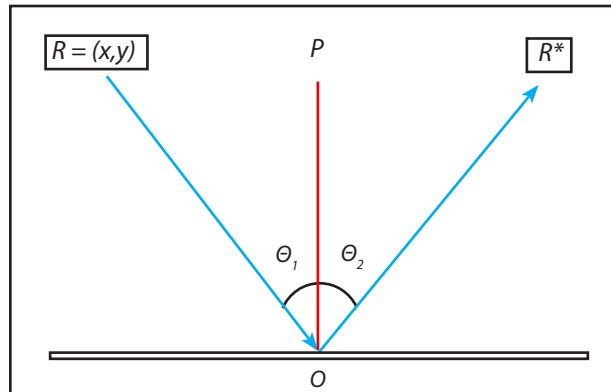


Figure 2. Angle of incidence is equal to the angle of reflection.

Reflection of sound in cylindrical surfaces. In order to analyze the phenomenon of caustics in a sonar whose hydrophones are covered with plastic cylinder, it is necessary to know the behavior of the ray against the cylindrical surface (figure 3). In this case the rays are reflected as in a flat surface.

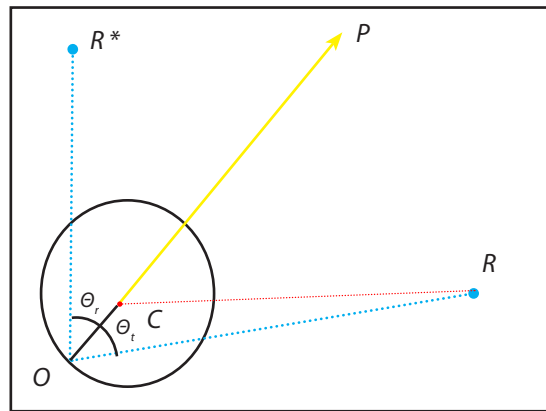


Figure 3. Reflection of a ray from an R point.

The caustic phenomenon occurs when, at the moment of ray reflection, rays are trapped, thereby internally reflecting themselves a finite number of times, according to the absorption of the material, in this case the sonar.

de manera perpendicular a los frentes de onda (figura 1). Luego, por medio de conceptos algebraicos se encuentra que las ecuaciones de rayos están dadas por el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas [8].

$$\frac{dr}{ds} = c\xi(s), \quad \frac{d\xi}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{dc}{dr} \quad (7)$$

$$\frac{dz}{ds} = c\zeta(s), \quad \frac{d\zeta}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{dc}{dz} \quad (8)$$

Donde $(r(s), z(s))$ representan la trayectoria del rayo en el plano (r, z) . Para efectuar los cálculos de la trayectoria del rayo en el medio es necesario hacer un arreglo para tener z como variable independiente. Al hacer esto, las ecuaciones anteriores se reducen a la ecuación diferencial:

$$\frac{d^2z}{dr^2} = \left[1 + \left(\frac{dz}{dr} \right)^2 \right] \left[-\frac{C_r}{C} \frac{dz}{dr} + \frac{C_z}{C} \right] \quad (9)$$

En donde C_r y C_z representan las derivadas de $C(r, z)$ con respecto a r y z respectivamente. Esta ecuación también permite trazar las trayectorias del sonido para tener en cuenta la dependencia del sonido con la profundidad y el rango, pero si se considera la velocidad del sonido independiente del rango, la ecuación se presenta así:

$$\frac{d^2z}{dr^2} = \left[1 + \left(\frac{dz}{dr} \right)^2 \right] \left[\frac{C_z}{C} \right] \quad (10)$$

Si se integra por métodos analíticos la ecuación anterior, se encuentra la forma integral de la ley de Snell, donde a es la constante del rayo.

$$r(z) = r(z_0) + \int_{z_0}^z \frac{ac(z)}{\sqrt{1 - a^2c^2(z)}} \quad (11)$$

La trayectoria del rayo está dada por la posición de la fuente que emite y el ángulo con el cual sale el rayo de la fuente de sonido.

$$r = 0, \quad z = z_f, \quad \xi = \frac{\sin(\theta)}{C(z_f)} \quad (12)$$

Es importante recordar que en la deducción de las ecuaciones de rayos, para que el modelo tenga validez los valores de frecuencia deben ser altos, en comparación con la teoría de modos normales, que preferiblemente se aplica a bajas frecuencias y largas distancias.

Reflexión del sonido y concepto de cáustica

En un medio con velocidad del sonido constante, el rayo al incidir sobre una superficie se refleja, "siendo el ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia" [7].

En la figura 2 se muestra de manera visual la reflexión del sonido en una superficie plana. Geométricamente, se infiere que los triángulos $\triangle OPR$ son congruentes.

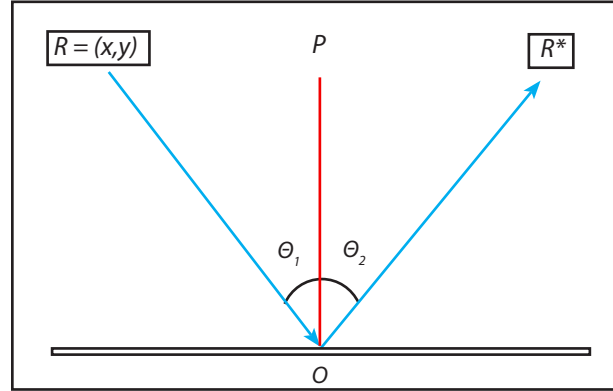


Figura 2. Ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Reflexión del sonido en superficies cilíndricas.

Para el análisis del fenómeno de cáusticas en un sonar donde sus hidrófonos se encuentran cubiertos cilindro plástico, es necesario conocer el comportamiento del rayo frente a la superficie cilíndrica (figura 3). En este caso los rayos se reflejan igual que en una superficie plana.

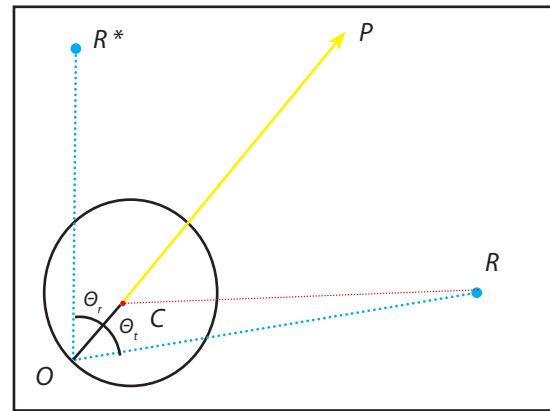


Figura 3. Reflexión de un rayo que parte del punto R.

El fenómeno de cáustica ocurre al momento de la reflexión de los rayos, estos son atrapados, reflejándose internamente un número finito de veces, de acuerdo con la absorción del material, en este caso del sonar.

Concept of caustics. In optics, it is easy to see a caustic using a flashlight and a cup of coffee with a flat bottom. Taking into account the reflection on the bottom of the cup (figure 4), it can be seen how the light shines obliquely in the cup [6].

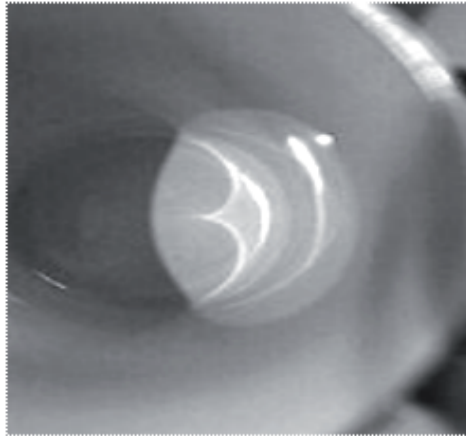


Figure 4. Nephroid caustic as a cup of tea [12].

This phenomenon is also observed in natural settings like the ocean, where sunlight beams give rise to this effect (figure 5).

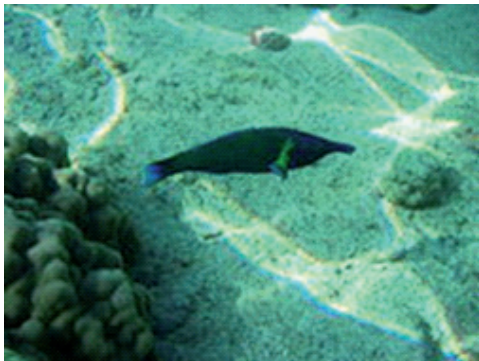


Figure 5. Caustic in nature [13].

In order to model the effect of the caustic wherein reflection can be simulated of rays of sound within the cylinder covering the array of the sonar, a designed software was used, which allows modeling across different variables parameterized according to the proposed objectives. In this particular case, the “CAUSTICA” software was used; it was developed by Germán Bohórquez in C# language [7]. By using the software, graphs were produced illustrating the concept of caustic in each particular case hereon analyzed and explained.

The following figure shows the cardioid-shaped curve, formed by the reflected rays which are tangent to the curve that bears the name of *caustic*.

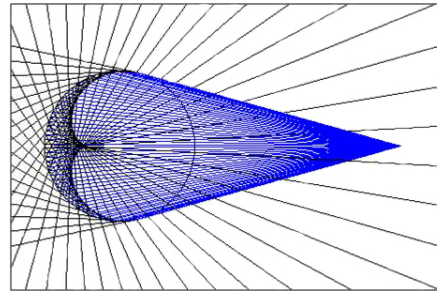


Figure 6. Form of a sound ray caustic.

The peak at the focal point of the caustic is located between the center and the edge of the curve which appears, resembling the shape of a cardioid, this is described as lines curved around both sides of a right angle regarding the direction of light. In the figure above it can be seen that the rays are concentrated near the top; because of this, intensity is higher in this area. The top is the focal point of the reflecting surface, between the apex and the center of curvature [5].

The figure below shows the behavior of the ray of sound as it hits within the cylinder for the first time and leaves it and when receiving more than one ray (figures 7, 8, 9, 10,11).

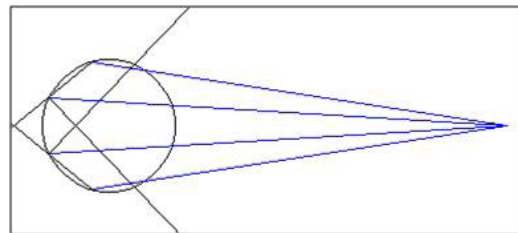


Figure 7. Internal reflection upon receiving 4 rays of sound.

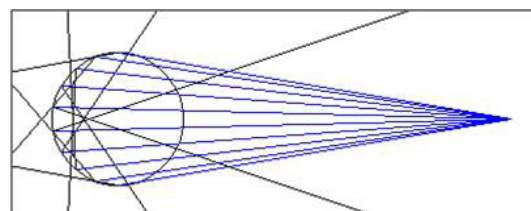


Figure 8. Internal reflection upon receiving 10 rays of sound.

Concepto de cáustica. En óptica, es fácil ver una cáustica utilizando una linterna y una taza de café con fondo plano, teniendo en cuenta la reflexión sobre el fondo de la taza (figura 4) podemos observar como de manera oblicua brilla la luz en la taza [6].

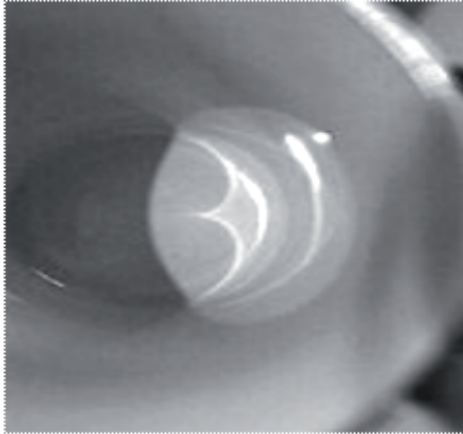


Figura 4. Cáustica en forma de nefroide en una taza de té [12].

Este fenómeno también se observa en escenarios naturales como el océano, donde los rayos de luz solar dan origen a este efecto (figura 5).



Figura 5. Cáusticas en la naturaleza [13].

Con el propósito de modelar el efecto de la cáustica en donde se pueda simular la reflexión de los rayos del sonido dentro del cilindro que recubre el arreglo del sonar, se empleó un software diseñado para este propósito, el cual permite modelar a través de diferentes variables que se parametrizan, de acuerdo a los objetivos propuestos. En este caso particular el software "CÁUSTICA", desarrollado por Germán Bohórquez en lenguaje C# [7]. Mediante el empleo del *software* se elaboraron las gráficas que ilustran el concepto de la cáustica en cada caso particular que se analiza y explica.

En la siguiente figura se observa la curva en forma de cardioide que se forma debido a los rayos reflejados los cuales son tangentes a la curva que lleva el nombre de cáustica.

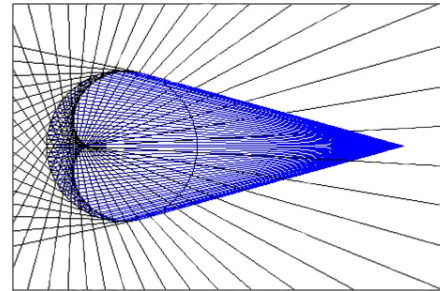


Figura 6. Forma de una cáustica de rayos de sonido.

La cúspide en el punto focal de la cáustica se ubica entre el centro y el borde de la curva que aparece semejando la forma de un cardioide, esto es lo que se describe como líneas curvas entorno a ambas partes del ángulo recto con respecto a la dirección de la luz. En la figura anterior se puede observar que los rayos se concentran cerca de la cúspide, debido a esto la intensidad es mayor en esa área. La cúspide es el punto focal de la superficie reflectante, entre el vértice y el centro de la curvatura [5].

A continuación se observa el comportamiento del rayo de sonido cuando choca dentro del cilindro por primera vez y sale de él y cuando se reciben más de un rayo (figuras 7, 8, 9, 10,11).

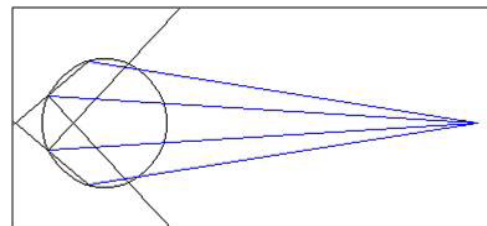


Figura 7. Reflexión interior al recibir 4 rayos de sonido.

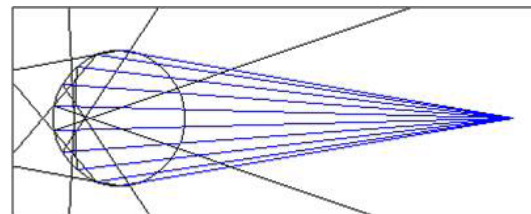


Figura 8. Reflexión interior al recibir 10 rayos de sonido.

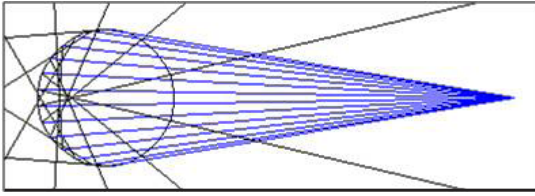


Figure 9. Internal reflection upon receiving 14 rays of sound.

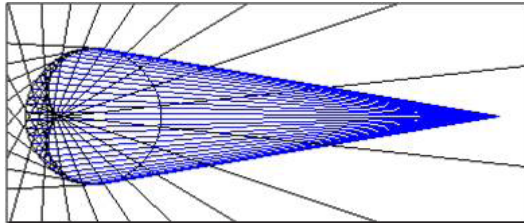


Figure 10. Internal reflection upon receiving 30 rays of sound.

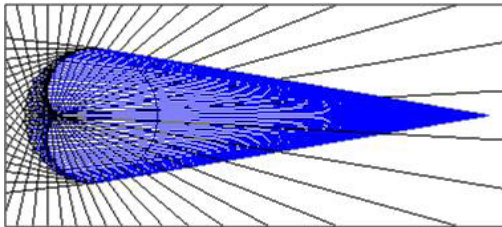


Figure 11. Internal reflection upon receiving 60 rays of sound.

The figure above shows a point of convergence of the reflected rays; this point is denominated the caustic focus. The distance from the focus to the center of the circle is given by the following equation:

$$f(r, d) = \frac{dr}{2d + r} \quad (13)$$

Where r is the radius of the sonar circle or cylinder and d is the distance at which the source which emits rays is located.

Here are shown variations observed in the focus of the caustic when changing the distance of the source whence the rays of sound come, after finding an obstacle or contact and keeping the same number of rays of sound. To illustrate it graphically, the following condition is assumed:

Sound ray number: 50
 Condition: $d \gg r \leftrightarrow d \rightarrow \infty$

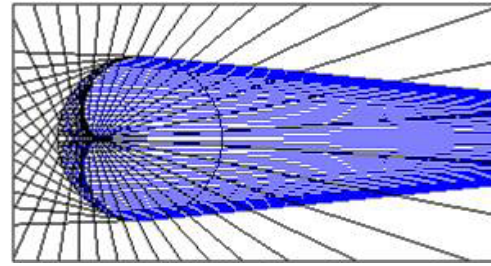


Figure 12. Caustic for $d = 10r, r = 50$.

It can be observed in figure 12 that the source whence rays of sound come is quite far from the cylinder (sonar); as a consequence rays do not come in a parallel manner.

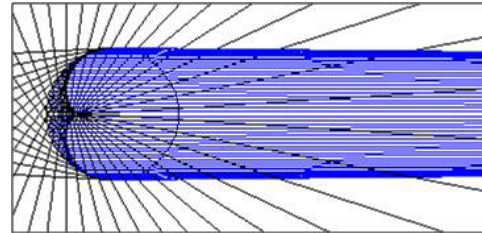


Figure 13. Caustic for $d = 100r, r = 50$.

Figure 13 shows the rays which reach the cylinder in an almost completely parallel manner. The following figure shows when $d \rightarrow \infty$.

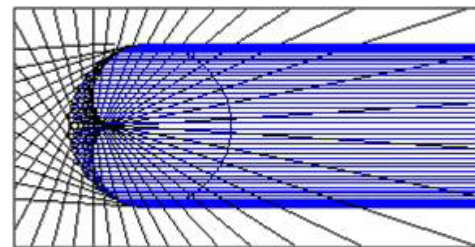


Figure 14. Caustic for $d \rightarrow \infty$.

Similarly, it can be only very slightly seen that the caustic focus moves slightly away from the center of the cylinder when the source is much farther, thus maintaining the caustic regardless of the variations of the source, even if it moves too far away from the cylinder.

RESULTS

Up to now, only the case in which the ray of sound hits the cylinder once had been considered, but as it

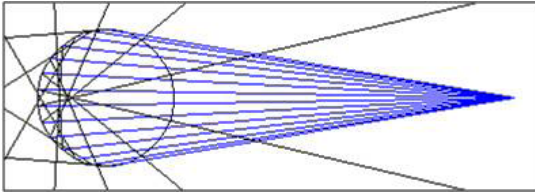


Figura 9. Reflexión interior al recibir 14 rayos de sonido.

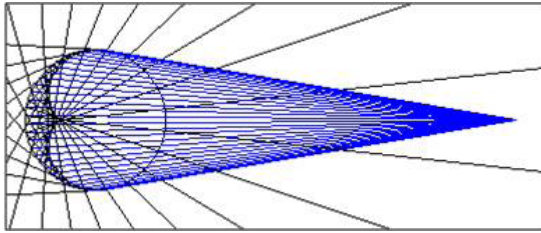


Figura 10. Reflexión interior al recibir 30 rayos de sonido.

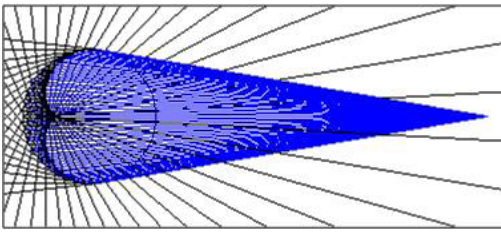


Figura 11. Reflexión interior al recibir 60 rayos de sonido.

En la anterior figura se observa un punto de convergencia de los rayos reflejados, este punto se denomina foco de la cáustica. La distancia del foco al centro del círculo se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$f(r, d) = \frac{dr}{2d + r} \quad (13)$$

Donde r es el radio de la circunferencia o cilindro del sonar y d es la distancia a la cual se encuentra ubicada la fuente que emite los rayos.

A continuación se mostrarán las variaciones que se presentan en el foco de la cáustica cuando cambia la distancia de la fuente desde donde vienen los rayos de sonido luego de haber encontrado un obstáculo o contacto, manteniendo el mismo número de rayos de sonido. Para ilustrar gráficamente, se asume la siguiente condición:

Número de rayos de sonido: 50
Condición: $d \gg r \leftrightarrow d \rightarrow \infty$

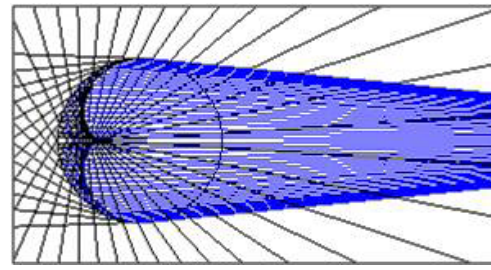


Figura 12. Cáustica para $d=10r, r=50$.

En la figura 12 se puede observar que la fuente de donde vienen los rayos de sonido se encuentra muy alejada del cilindro (sonar), por lo que los rayos no llegan en forma paralela.

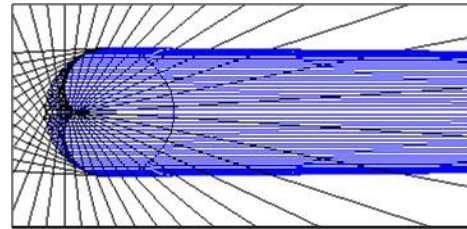


Figura 13. Cáustica para $d=100r, r=50$.

En la figura 13 se observan los rayos que llegan al cilindro casi totalmente paralelos. Ahora, observemos cuando $d \rightarrow \infty$.

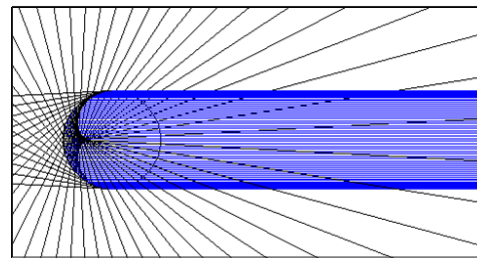


Figura 14. Cáustica para $d \rightarrow \infty$.

De igual forma se observa muy ligeramente que el foco de la cáustica se aleja un poco del centro del cilindro cuando la fuente esta mucho más lejos, manteniéndose la cáustica sin importar las variaciones de la fuente, incluso si se aleja demasiado del cilindro.

RESULTADOS

Hasta el momento sólo se había considerado el caso en el cual el rayo de sonido choca una sola vez en el

turns out, the ray may continue to reflect itself until its intensity is attenuated. In this case, it is possible to form other higher - order caustics which are named according to the number of times the beam reflects itself inside the cylinder.

The intensity of the caustic depends on the number of times the ray of sound is reflected inside the cylinder. Thus, a ray that is reflected once has greater intensity than a ray that is reflected twice; so the intensity of a ray that has hit the cylinder n times is greater than the intensity of a ray that has hit the cylinder m times, provided n is greater than m [7].

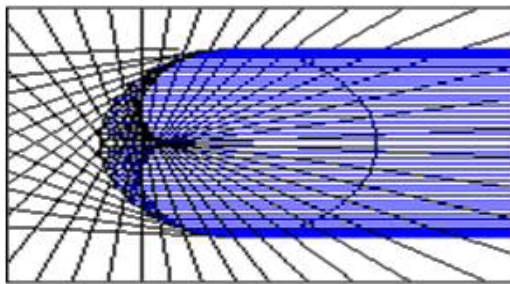


Figure 15. Caustic of order 1 for $d \rightarrow \infty$.

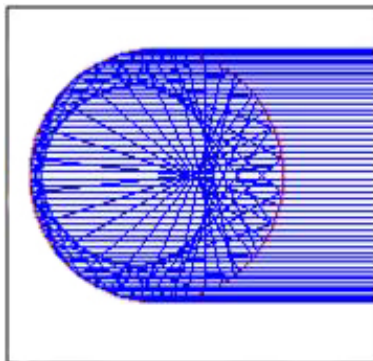


Figure 16. Caustic of order 2, $d \rightarrow \infty$.

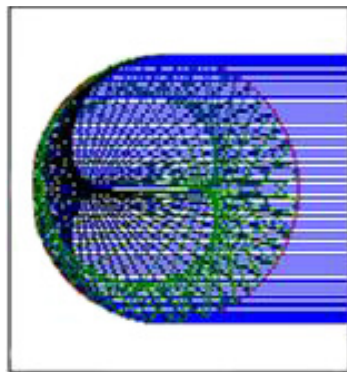


Figure 17. Caustic of order 1 and order 2 for $d \rightarrow \infty$.

Likewise, there may be n - superior order caustics where the phenomenon is maintained while varying the distance from the source and increasing the number of reflections of the ray.

The physical caustic phenomenon indeed can occur effectively and may affect the information provided by the sonar, whereby the cylindrical arrangement enhances their formation and affects the interpretation of the markings from reception of rays of sound reflected from the possible contact.

Now, the problem within the cylinder that covers the sonar occurs at the moment the hydrophone arrays of the equipment perform scans at different angles, which at the time that the sonar is located at position where the caustic is, immediately causes a marking as if it were a contact, as illustrated in the figure below.

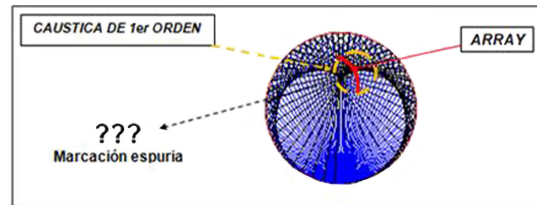


Figure 18. 1st order caustic detected by sonar array

This phenomenon, which is undesirable and complicates the detection process, especially when marking targets, may occur with higher - order caustic as shown in figure 19.

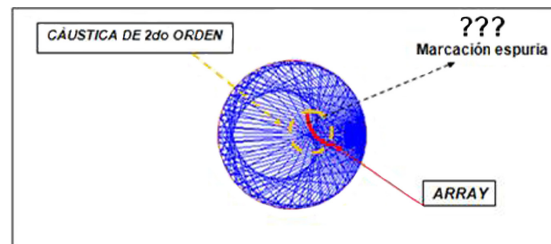


Figure 19. 2nd order caustic detected by sonar array.

DISCUSSION

The phenomenon of the caustic is a physical reality and technology advances significantly to correct its effect on modern sonar systems, but in the case of sonar equipment on board the Armada Nacional frigate - type units, the level of technology does not allow for full correction, which becomes a risk to the integrity and

interior del cilindro, pero resulta que el rayo puede continuar reflejándose hasta que su intensidad se atenué. En este caso, es posible que se formen otras cáusticas de orden superior que se denominan según el número de veces que el rayo se refleja en el interior del cilindro.

La intensidad de la cáustica depende del número de veces que el rayo de sonido se refleje al interior del cilindro, es así como un rayo que se reflejó una vez, tendrá mayor intensidad que un rayo que se haya reflejado dos veces, por lo que la intensidad de un rayo que se ha estrellado n veces es mayor que la intensidad de un rayo que lo ha hecho m veces, siempre que n sea mayor m [7].

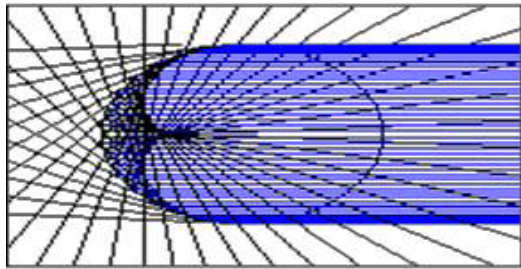


Figura 15. Cáustica de orden 1, para $d \rightarrow \infty$.

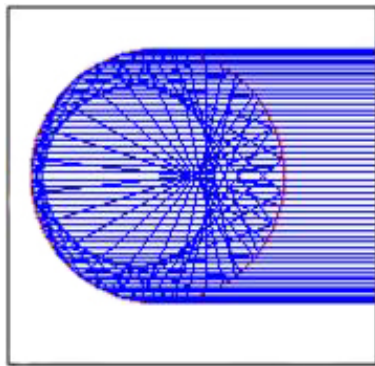


Figura 16. Cáustica de orden 2, para $d \rightarrow \infty$.

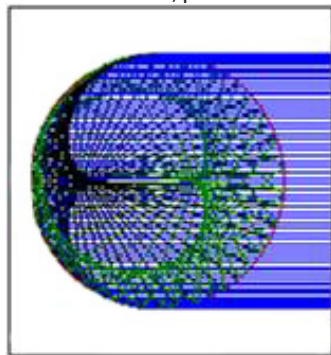


Figura 17. Cáustica de orden 1 y orden 2, para $d \rightarrow \infty$.

Así mismo, se pueden presentar cáusticas de n órdenes superiores donde se mantiene el fenómeno aunque varíe la distancia de la fuente y aumente el número de reflexiones del rayo.

El fenómeno físico de cáustica efectivamente puede presentarse y afectar de manera particular la información suministrada por los equipos de sonar, donde la disposición cilíndrica del sistema favorece su formación e incide en la manera en que pueden ser interpretadas las marcaciones desplegadas de recepción de los rayos de sonido reflejados del posible contacto.

Ahora bien, el problema dentro del cilindro que recubre el sonar se presenta al momento en que los arreglos de hidrófonos que tiene el equipo realizan barridos en diferentes ángulos, lo cual permite que en el momento en que el arreglo del sonar se ubique en la posición donde se encuentra la cáustica, inmediatamente arrojará la marcación como si fuese un contacto, como se ilustra en la siguiente figura.

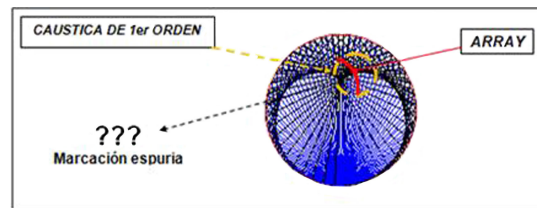


Figura 18. Cáustica de 1er orden detectada por el arreglo del sonar.

Este fenómeno que es indeseable y que complica el proceso de la detección, especialmente en la marcación de blancos, se puede presentar con las cáusticas de órdenes superiores como se ilustra en la figura 19.

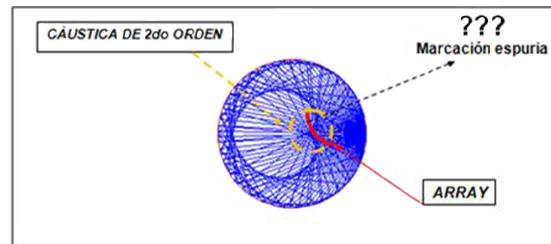


Figura 19. Cáustica de 2do orden detectada por el arreglo del sonar.

DISCUSIÓN

El fenómeno de la cáustica es una realidad física y la tecnología avanza de forma significativa para corregir

survival of the warship, since the highest threat comes from submarine attack.

If no reliable information is obtained from the sonar on a target, ill-advised strategic decisions may be made, such as taking evasive maneuvers in an inappropriate manner, or even launching a weapon. In the case of ASW, a torpedo may be launched with wrong parameters, thus revealing the position of the ship platform.

This consideration means there is high prevalence in assessment of risks generated by misinterpretation of a contact in the sonar, due to the appearance of one or more caustics which generates false pulses or spurious markings which may be mistaken for potential contacts, distorting thus operation scenarios.

Only a proper reading and interpretation can ensure or contribute to the integrity and safety of the ship in a submarine detection process, which is why the training of personnel operating the equipment as the decision maker must include this item. Needless to say, caustics is rarely shown and taught in military schools and training centers.

However, it is important to consider all factors affecting the performance of sonars, such as sound design, vessel design, sonar operation, the operation of the ship, target design, target operation, sonar conditions, operator training, tactical geometry and the marine medium [14].

Thus, the effect of the caustic shown above, highlights the importance of furthering studies on different aspects of this phenomenon, including the study of caustics, its causes and effects for staff engaged in the detection processes by use of sonar, so this effect can be taken into account when attempting to discern possible causes of false markings on the data shown by the equipment.

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to Dr. Rer. Nat. Hernán Estrada Bustos for his revision and guidance on the subject, Mr. Frigate Commander Luis Otero (CIOH) and Lord Admiral ® William Porras for his comments and evaluation on the issue; as well as the "Almirante Padilla" Naval Academy, especially the School of Physical Oceanography, for their support in the submittal of this work.

BIBLIOGRAPHICAL REFERENCES

- [1] URICK, R. Principles of underwater sound, Mc Graw Hill, 1983. p.111, 120.
- [2] BURDIC, W. Underwater acoustic system analysis, Prentice Hall, 1984. p.115, 120.
- [3] URICK, R. Sound propagation in the sea, Peninsula Publishing, 1982. p. 2-1, 3-3.
- [4] GLAESER, G. Reflections on Spheres and Cylinders of Revolution. 1999.
- [5] SALAZAR, D. Modelling of a Sonar Array.
- [6] UCKE, C, ENGELHARDT, C. Playing with caustic phenomena, Munich.
- [7] BOHORQUEZ, G. Reflexiones en cilindros de revolución.
- [8] BERG R. E, Stork D. G. The Physics of Sound. 2nd ed, Prentice Hall 1994.
- [9] RAYLEIGH D. The Theory of Sound. Dover.1945. Available from URL <http://www.beyonddiscovery.org/>.
- [10] BELLIS M. The Sonar History. Available from URL <http://www.personal.psu.edu/users/l/u/lum143/Project3.html>.
- [11] ESPINOSA L. Cartilla Sistemas de Armas III, Armada Nacional de Colombia. 2006.
- [12] VENTER P. Caustique dans un liquide. Available from URL <http://en.wikipedia.org/wiki/Date=20/09/>.
- [13] MILAZINKOVA, R. Available from URL <http://home.comcast.net/~milazinkova/Fogshadow.html> 2007.

su efecto en los sistemas de sonar modernos; sin embargo, en el caso de los sonares instalados a bordo de las unidades tipo Fragata Misilera de la Armada Nacional el nivel de tecnología no permite su plena corrección, lo que se convierte en riesgo para la integridad y supervivencia del buque de guerra, pues la más efectiva amenaza proviene del ataque submarino.

Si no se tiene una información confiable de la información que arroja el sonar sobre un blanco, se pueden tomar decisiones estratégicas poco acertadas, como realizar maniobras evasivas en forma inadecuada ó lanzar un arma, en el caso de la Guerra Antisubmarina, un torpedo con los parámetros errados, delatando la posición del buque plataforma.

La anterior consideración significa una alta valoración de existencia de riesgos generados por la errónea interpretación de un contacto en el sonar, debido a la aparición de una o varias cáusticas lo cual genera pulsos falsos o marcaciones espurias que se confunden con posibles contactos, distorsionando el escenario de operación.

Solamente una adecuada lectura e interpretación podrá garantizar o contribuir a la integridad y seguridad del buque que se encuentre en un proceso de detección submarina, es por esto que la capacitación del personal que opera estos equipos como de quien toma las decisiones debe incluir este tema que pocas veces se ilustra y enseña en las escuelas militares o centros de formación.

Sin embargo, es importante considerar todos los factores que afectan el desempeño del sonar, tales como: el diseño del sonar, el diseño del buque, la operación del sonar, la operación del buque, el diseño del blanco, la operación del blanco, la condición del sonar, el entrenamiento del operario, la geometría táctica y el medio marino [14].

De esta forma, el efecto de la cáustica demostrado anteriormente, sustenta la importancia de continuar estudios sobre diferentes aspectos de este fenómeno, que incluya el estudio de la cáustica, sus causas y efectos para el personal comprometido en el proceso de detección mediante empleo del sonar, con el fin de tener presente dicho efecto cuando se pretenda discernir posibles causas de marcaciones falsas en los datos desplegados por el equipo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Rer. Nat. Hernán Estrada Bustos por su revisión y orientación en el tema, al señor Capitán de Fragata Luis Otero (CIOH) y al señor Almirante® William Porras por sus observaciones y evaluación del tema y a la Escuela Naval "Almirante Padilla", en especial a la Facultad de Oceanografía Física por el apoyo para la presentación de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] URICK, R. Principles of underwater sound, Mc Graw Hill, 1983. p.111, 120.
- [2] BURDIC, W. Underwater acoustic system analysis, Prentice Hall, 1984. p.115, 120.
- [3] URICK, R. Sound propagation in the sea, Peninsula Publishing, 1982. p. 2-1, 3-3.
- [4] GLAESER, G. Reflections on Spheres and Cylinders of Revolution. 1999.
- [5] SALAZAR, D. Modelling of a Sonar Array.
- [6] UCKE, C, ENGELHARDT, C. Playing with caustic phenomena, Munich.
- [7] BOHORQUEZ, G. Reflexiones en cilindros de revolución.
- [8] BERG R. E, Stork D. G. The Physics of Sound. 2nd ed, Prentice Hall 1994.
- [9] RAYLEIGH D. The Theory of Sound. Dover.1945. Available from URL <http://www.beyonddiscovery.org/>.
- [10] BELLIS M. The Sonar History. Available from URL <http://www.personal.psu.edu/users/l/u/lum143/Project3.html>.
- [11] ESPINOSA L. Cartilla Sistemas de Armas III, Armada Nacional de Colombia. 2006.
- [12] VENTER P. Caustique dans un liquide. Available from URL <http://en.wikipedia.org/wiki/Date=20/09/>.
- [13] MILAZINKOVA, R. Available from URL <http://home.cast.net/~milazinkova/Fogshadow.html> 2007.