

Sonar biológico – elementos biofísicos y biomiméticos

Biological sonar - biophysical and biomimetic elements

G. Alcuri¹

Recibido: mayo 2017

Acceptado: julio 2017

Resumen.- Las estructuras y sistemas biológicos observados desde un punto de vista físico pueden ser fuente de inspiración fértil en el trabajo de concepción de dispositivos y mecanismos tecnológicos. En efecto, en el proceso de la adaptación evolutiva, los seres vivos llegan a desarrollar soluciones optimizadas frente a los problemas de conservación y transmisión de su propia existencia. Profundizando en este concepto básico se muestra que resultados de la investigación científica fundamental pueden orientar acciones inscritas en las llamadas ciencias del ingeniero, proponiendo resultados prácticos tangibles. Los sonares biológicos, y especialmente aquellos que equipan los delfines, son un ejemplo concreto de esta orientación biofísica – biónica – biomimética. Se exponen en este trabajo algunos resultados significativos de la experiencia adquirida en el tema y consecuencias prácticas materializadas en el terreno industrial.

Palabras claves: Ecolocación; cetáceos; adaptación evolutiva; detección – localización.

Summary.- Physically observed biological structures and systems can be a source of fertile inspiration in the work of designing technological devices and mechanisms. Indeed, in the process of evolutionary adaptation, living beings come to develop optimized solutions to the problems of conservation and transmission of their own existence. Deepening this basic concept we show that results of fundamental scientific research can guide actions inscribed in the flames of the engineer sciences, proposing tangible practical results. Biological sonars, and especially those that equip dolphins, are a concrete example of this biophysical - bionic - biomimetic orientation. This paper presents some significant results of the experience in the subject and industrial application consequences.

Keywords: Echolocation ; cetaceans; evolutionary adaptation ; detection; localization.

1. Introducción - Algunas ideas básicas.- El termino SONAR encuentra su origen en la composición de los vocablos en lengua inglesa de SOund NAvigation And Ranging para denominar un conjunto de técnicas y de instrumentos destinados a la detección y la localización de objetos sumergidos utilizando las propiedades particulares de la propagación sonora en un medio líquido. Los trabajos originales de Paul Langevin y de Constantin Chilowski en la época de la primera Guerra Mundial son hoy la base de los medios de detección sub marina de todas las marinas militares, también corrientemente utilizados en la pesca, la navegación, la cartografía y la prospección petrolera. La pertinencia de los principios de propagación acústica en el medio líquido llevó los procesos evolutivos a desembocar sobre sistemas perfeccionados de obtención y transmisión de la información en el reino animal, llegando a desarrollar sistemas de auto información particularmente eficaces en el caso de mamíferos marinos. El concepto general de sonar se aplica entonces a sistemas de “ecolocación” (auto información acústica) en medio acuático e inclusive aéreo, descritos a partir de 1764 en los trabajos del abate italiano Lazaro Spalanzani.

¹ ALCTRA Recherche & Développement, Dame Marie - France

La orientación de estudio mostrada aquí está dirigida especialmente a los cetáceos, pero debe tenerse en cuenta que varios grupos zoológicos presentan capacidades de ecolocación para mejor desplazarse, alimentarse y protegerse, como ciertas aves, murciélagos o pinípedos.

El orden de los cetáceos muestra numerosas formas de adaptación optimizada al medio acuático a nivel del sistema respiratorio, del sistema circulatorio, de las características hidrodinámicas en términos de forma corporal y de estructura de la piel y otros elementos anatómico - fisiológicos claves que son fuente de interés desde el punto de vista físico y biológico – biométrico. Resumiendo el concepto, a partir de la investigación en este grupo zoológico se encara la aplicación de soluciones biológicas en la concepción de dispositivos técnicos integrados en un proceso de interpretación de mecanismos y principios naturales.

Sin entrar en consideraciones biológicas especializadas se recuerda que “los delfines” (sujeto principal de los estudios presentados) pertenecen al orden de los cetáceos, son mamíferos acuáticos (marinos y de agua dulce) originalmente terrestres, habiendo incorporado a lo largo del proceso evolutivo adaptaciones específicas a la vida acuática.

El orden de los cetáceos (una centena de especies) se divide en dos sub órdenes, los odontocetos equipados de dientes (de 2 a 260) y los mysticetos, caracterizados por la presencia de “barbas” o “ballenas” en la mandíbula superior, utilizados para la filtración de grandes masas de agua que contienen los organismos planctónicos que constituyen su alimentación.

2. Señales SONAR.- Los odontocetos y en particular la familia Delphinidae muestran los sistemas sonar más desarrollados. En ellos se ha probado la propia existencia del sistema y se describieron aspectos del funcionamiento a través del estudio etológico en el medio natural y en cautiverio. Las propiedades adaptativas que caracterizan los sistemas y las estructuras biológicas observadas desembocan sobre capacidades de auto información que pueden converger con los resultados de optimizaciones teóricas de las propiedades de las señales. Y esto incluyendo la regulación de las emisiones en función de la situación relacional entre el individuo o una población y su medio exterior. El sistema se adapta, por ejemplo, a una situación de vigilancia en “campo ancho” para pasar, incorporando una capacidad de focalización, a una función de intercepción. Aquí se incluyen reglajes de la señal en función de la velocidad de desplazamiento relativa (predador / presa), de las características de retro difusión del objetivo o de características del medio; y esto fusionando la información con otras fuentes disponibles (visión), y agregando finalmente criterios de optimización energética. Es fácil de percibir entonces el interés de una aproximación biónica del tema y el valor tecnológico que puede encerrar la comprensión de los mecanismos y las estructuras asociadas.

Los delfines emiten señales en forma de pulsos (llamados “clicks” en la comunidad bioacústica internacional) que presentan características temporales y frecuenciales regulables, adicionando una capacidad de modulación de la cadencia de repetición de esas señales según las necesidades en términos de discriminación y en función de la dinámica de los desplazamientos y del entorno. La integración perceptiva de esa información conduce a la obtención de una imagen acústica del medio externo complementaria, a diferentes niveles, de la imagen visual. Se anota que la imagen visual puede tener en ciertas ocasiones un valor sensiblemente nulo en el caso de aguas turbias o de animales presentando capacidades visuales reducidas. En estos casos la imagen del medio interpretada a nivel central es esencialmente acústica.

Es importante señalar que los delfines (término genérico) desarrollaron también un sistema de comunicación acústico (entre individuos), emitiendo y recibiendo señales de tipo “silbido”, portadoras de información fundamental para la vida de los individuos y los grupos de individuos dentro de una organización social compleja. El sistema de comunicación funciona “en paralelo” al sistema de ecolocación.

Simplificando la descripción de un mecanismo biológico de ecolocación, se puede resumir su estructura en el esquema de la figura I (Alcuri, G) [1].

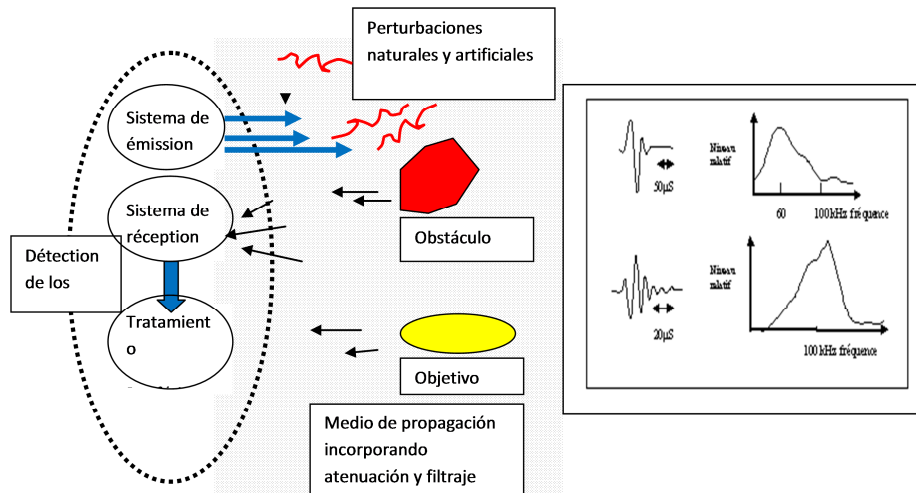


Figura I.- Presentación esquemática del proceso de ecolocación. Las señales emitidas son modificadas por los obstáculos y los objetivos para ser recuperadas por el sistema de recepción. Las señales de retorno incorporan también las transformaciones derivadas de la naturaleza del medio de propagación y de las perturbaciones provocadas por la reverberación y la presencia de fuentes secundarias diversas. A la derecha se muestran ejemplos de señales sonar de la especie *Tursiops truncatus*. Los clicks (adoptando el término usado en la bibliografía especializada) presentan distribuciones espectrales respectivamente con máximos alrededor de 52 kHz y más allá de 100 kHz, gamas frecuenciales totalmente inaccesibles a la percepción humana (Evans & Au) [2].

Ya se ha señalado que los sistemas sonar biológicos están dotados de una ductilidad adaptativa considerable observable en las transformaciones morfológicas, espectrales y bajo forma de modulación temporal (señales por unidad de tiempo) de las emisiones, correspondiendo a las necesidades vitales del individuo y a las características del medio externo. Withlow Au muestra un ejemplo particularmente ilustrativo. En condiciones de estudio de señales en medio marino observa sectores de máxima energía en las zonas de 120 y 140 kHz, con niveles acústicos del orden de 220 dB re 1μPa. La experimentación en pileta (espacio confinado) permite la observación de desplazamientos espectrales importantes y la disminución considerable del nivel de emisión (-50 dB), respondiendo a la aplicación de un proceso de feedback adaptativo a la búsqueda de la mejor información según la importancia de la reverberación y de la incidencia del ruido de fondo, importante en medio natural pero con menor nivel de reverberación. La experimentación en cautividad, ofreciendo la posibilidad de un mejor control metodológico, debe tener en cuenta esos aspectos biofísicos asociados a los factores etológicos dentro del objetivo de comprender e interpretar el funcionamiento de un mecanismo complejo funcionando en un organismo altamente evolucionado. En la orientación de estudio de señales y de los medios de producción y control el trabajo en pileta se impone para poder “interrogar” el sistema en condiciones suficientemente controladas. Es así que una experiencia materializada con delfines en cautividad abrió el camino a una serie de acciones largas y complejas en un terreno frontera entre la biología y la física.

Los trabajos emprendidos por el autor con Albin Dziedzic, en el marco del Laboratoire de Physiologie Acoustique (CNRZ Jouy en Josas - Francia) [3] se presenta a un delfín de la especie *Tursiops truncatus*, al que se colocaron ventosas opacas sobre los ojos, una serie de objetos de forma y dimensiones diferentes. Se solicita al animal de aportar un objeto anular instalado en un soporte en compañía de otro objeto presentando progresivamente formas convergentes con la forma del objeto a detectar.

El animal debe al principio discriminar una forma anular con respecto a un triángulo (inscrita en un anillo), luego se le presenta un cuadrilátero y así sucesivamente para llegar de esta manera a solicitar la diferenciación entre el anillo y un dodecágono.



Figura II.- Una ventosa se instala sobre los ojos del animal, sabiendo que el delfín puede, con una simple acción muscular, desprenderse del objeto para poner fin a la experimentación, si él lo desea. El delfín se aproxima a su objetivo y elige la forma solicitada en relación con una forma semejante, presentada simultáneamente con el fin de determinar los umbrales de discriminación.

Una red de hidrófonos instalada detrás del soporte de los objetos, asociada a instrumentos de grabación y análisis alta frecuencia conducen al conocimiento del aspecto físico de las señales durante el proceso de identificación / prensión / transporte de los objetos. De esta manera visualizamos una transformación efectiva de las señales según la situación relativa animal / objetivo / medio externo. Un ejemplo representativo de los resultados obtenidos según esta metodología de estudio de un sonar integrado a un organismo viviente evolucionado está presentado en la figura III.

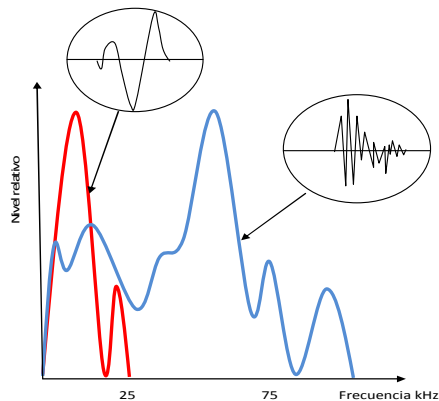


Figura III.- La figura muestra la presentación temporal y la densidad espectral de señales en dos fases de acción de discriminación entre la referencia anular y una forma pentagonal. A) Señal emitida a una distancia animal / objetivo < 4 m, B) Señal emitida a una distancia animal / objetivo > 4 m. Durante el proceso de reconocimiento acústico de formas, el tratamiento de señal muestra las dos fases mencionadas de exploración e interceptación. Al principio las señales son de tipo baja frecuencia, luego el contenido espectral evoluciona en función de la forma a detectar, al mismo tiempo que aumenta el número de clics por unidad de tiempo.

La masa de información disponible sobre las señales obtenidas en circunstancias diferentes autoriza la formulación de interpretaciones teóricas del funcionamiento de sistemas biológicos derivados de la adaptación evolutiva en un propósito de detección / discriminación y navegación. Kamminga y Beisma proponen una expresión matemática global basada en una función de Gabor capaz de converger sobre una señal de ecolocación tipo observada en delfines.

$$s(t) = A \begin{bmatrix} \cos(2\pi f_0 t + \phi) \\ \text{or} \\ \sin(2\pi f_0 t + \phi) \end{bmatrix} e^{-\pi^2 \frac{(t-\tau_0)^2}{\Delta\tau^2}}$$

Donde

A= Amplitud relativa

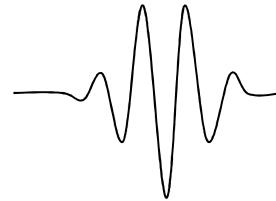
f_0 = frecuencia pico

τ_0 = baricentro de la señal

$\Delta\tau$ = duración rms de la señal

Φ = desplazamiento de fase

Dando una forma de señal (termino sinus) del tipo:



Destacamos que no es corriente llegar a expresiones matemáticas simples y robustas tratándose de la descripción e interpretación de una función biológica compleja.

Comprobamos que esas señales son capaces de aportar a los órganos de análisis del animal un conjunto de informaciones de calidad excepcional. Los resultados experimentales obtenidos con diferentes especies de delfines nos permiten citar algunos ejemplos representativos de las capacidades de los sistemas de ecolocación en medio acuáticos:

Detección de un hilo metálico de 0.2 mm de diámetro.

Diferenciación entre dos piezas metálicas de forma idéntica con espesores de 2,2 mm et 2,7 mm respectivamente.

Diferenciación entre dos discos metálicos de dimensiones idénticas pero de materia diferente.

Reconocimiento de una especie de pez (preferida a otra) a partir de un trozo del animal presa.

Todas estas capacidades sensiblemente superiores a aquellas de los sonares tecnológicos operacionales motivaron una reflexión conceptual pertinente como corolario de estudios originales realizados en aguas uruguayas sobre la especie *Pontoporia blainvillei* (Platanistidae). En el curso de una misión internacional en la que se obtuvo por primera vez señales de tipo sonar en esta especie, se constata una mortandad importante como consecuencia de la colisión accidental de los animales con las redes de pesca. Considerando que las redes “deberían” ser detectadas por el sonar, ese aparente disfuncionamiento del sistema llevó a profundizar sobre las condiciones ambientales, comportamentales y ecológicas propias al período de trabajo en mar. En las múltiples acciones exploratorias, pocas señales de ecolocación fueron detectadas a pesar de la presencia de numerosos grupos de *Pontoporia*. Al mismo tiempo, una actividad acústica importante fue observada a partir de manifestaciones comportamentales de una especie de pez

que se identificó en el contenido estomacal de los numerosos ejemplares de *Pontoporia* recuperados muertos en las redes. Se deduce que el cetáceo obtiene su alimentación a partir del uso exclusivo de su sonar pasivo, usando (como los submarinos y naves de guerra) las propias señales de la presa. La desactivación del sistema de sonar activo está muy probablemente ligada a una búsqueda de optimización del gasto energético de la función. Esta deducción condujo a desarrollar ese concepto en un marco más general, que no trataremos en esta presentación de tipo conceptual, pero que se mostró particularmente fértil en la interpretación funcional de diferentes manifestaciones biológicas.

El ejemplo de esta especie “minimizadora” de su esfuerzo acústico encuentra su manifestación opuesta en una especie amazónica (*Sotalia*), productora de cantidades enormes de señales como consecuencia de la presión ejercida por un medio turbio, poblado de obstáculos donde se desplaza y busca su alimentación un animal que dispone de poca información visual.

La disponibilidad de grandes volúmenes de señales de ecolocación y de comunicación intra específica pertinentes condujo a formular ciertas hipótesis [4] que tienen que ver con el funcionamiento de las fuentes de emisión, entrando de lleno en la orientación biofísica (y luego biónica) del tema.

3. El aspecto anatómico – fisiológico.- El mecanismo de fonación de los delfines suscitó múltiples trabajos de investigación centrados sobre las vías respiratorias superiores y ciertas estructuras craneanas, sabiendo que estos animales hacen uso sincronizado de emisiones de tipo click sonar (auto información sobre el medio y objetivos con valor biológico) y de tipo silbidos (comunicación entre individuos). Esta doble función acústica podría indicar la existencia de fuentes orgánicas diferentes. La mayoría de los autores situaron las fuentes a nivel de las vías respiratorias supra craneanas, mientras que otros (por ejemplo Purves y Morris) postularon que las señales son emitidas a nivel de la epiglotis, por la acción “rítmica” del músculo palatofaríngeo de cada tubo nasal, para ser transmitidas bajo forma de shocks a las estructuras óseas del rostro. Según esta orientación, las estructuras óseas de la región frontal del cráneo serían responsables de un fenómeno de focalización de las señales según el eje antero posterior en la dirección del medio externo.

En otra dirección conceptual, se puede observar que las vías respiratorias superiores del grupo zoológico considerado presentan una estructura compleja, incluyendo cavidades, válvulas, conductos y músculos asociados que sugieren la presencia de capacidades funcionales específicas. La observación anatómica y el recurso a medios de tomografía avanzados muestran que las válvulas (plugs) nasales accionan, según control de músculos presentes en la zona rostral, flujos aéreos que provienen de los pulmones, circulando según un sistema de regulación sofisticado en un conjunto de sacos aéreos y pasajes controlados a partir del trabajo de mecanismos nerviosos avanzados. Aceptando que el origen de las emisiones está situado en ese sistema aéreo controlado y piloteado por un mecanismo neuro muscular, se plantea el problema de la conducción de las señales hacia el medio líquido externo. Aquí, las ideas más aceptadas presentan la posibilidad de una acción de adaptación y focalización por parte de la mandíbula superior y de una estructura adiposa (melón) que participarían a una función de tipo “antena direccional”.

En resumen, un sistema regulado compuesto de fuentes asociadas a contracciones y relajamientos musculares, seguidas de una red de resonadores, de filtros y de proyectores acústicos, configura un modelo conceptual apto a explicar las características de las señales que son observadas luego de su propagación en medio líquido. Figura IV.

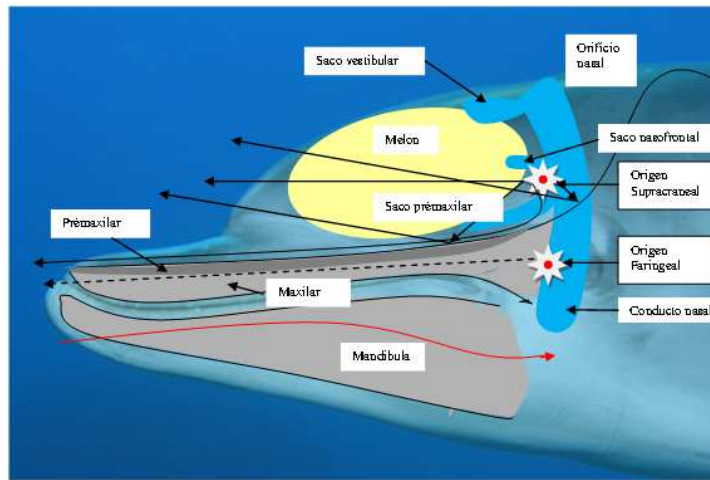


Figura IV.- Presentación esquemática de las fuentes de emisión sonar (hipótesis 1: supra craneal; hipótesis 2: faríngeo), de las estructuras asociadas a la función de fonación. Se muestran las vías de recepción (maxilar) de las señales acústicas conduciendo a los órganos auditivos internos y a un tratamiento de señal adaptado y posteriormente a la integración de la información a nivel central.

La hipótesis del origen faríngeo hace pensar en una función de focalización – guía de onda a nivel del conjunto maxilar / pre maxilar, incluyendo una posibilidad de compresión de la señal con consecuencias en el ensanchado de la banda espectral útil. El contenido físico y biónico de esta idea condujo (Alcuri, G) [4] a estudiar las condiciones de transmisión de señales a través de las estructuras óseas. El desarrollo de técnicas originales de interferometría holográfica a doble exposición, permitiendo la visualización de un régimen vibratorio provocado sobre la estructura biológica, aportó un cierto nivel de comprensión funcional de ellas. Varias derivaciones aplicativas de este método de estudio de propagaciones en medio sólido fueron materializadas en el estudio de estructuras no homogéneas de geometría compleja.

En el caso de las investigaciones sobre el sonar de cetáceos, se ha excitado un cráneo de *Sotalia teuzzi* con la ayuda de dispositivos en cerámica piezoeléctrica instalados en la fosa nasal derecha. La técnica acusto-óptica utilizada permite la obtención de la interferencia en luz coherente del espectro de difracción del hueso en estado de reposo con el correspondiente provocado por la excitación mecánica. La interpretación de la imagen de franjas (figura V) muestra aspectos representativos del comportamiento mecánico en alta frecuencia de las estructuras. La imagen indica la identidad funcional del pre maxilar y del maxilar asociada a la simetría derecha / izquierda y a la ausencia de la supuesta compresión de ondas. Más allá de comprobar la impropiiedad de la hipótesis faríngea, el método constituye una vía de caracterización de estructuras complejas, sabiendo que, complementariamente, ciertos dispositivos específicos creados en el marco del desarrollo de esta tecnología (como las cerámicas a doble cuerpo y autocontrol de la emisión) son aplicadas hoy a la obtención de la función de transferencia mecánica de piezas industriales en operaciones de control de calidad.

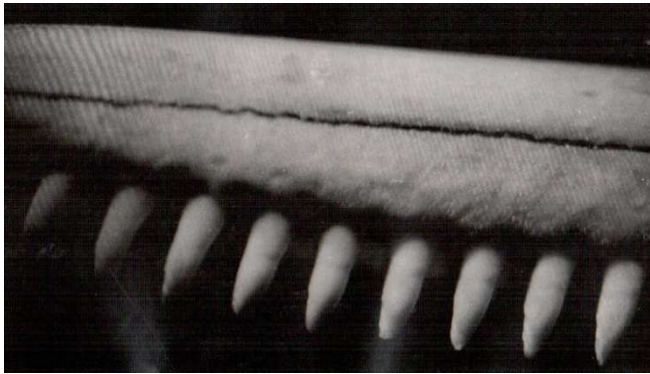


Figura V.- La imagen obtenida por interferometría holográfica a doble exposición sobre un cráneo excitado por señales acústicas de alta frecuencia conduce a una interpretación funcional de las estructuras no homogéneas y de geometría compleja. La transposición del método y de medios técnicos específicos encuentra aplicaciones industriales numerosas

La existencia de una doble fuente acústica responsable respectivamente de las señales de ecolocación y de comunicación es corrientemente citada en la bibliografía. Sin embargo, el análisis de emisiones de *Sotalia fluviatilis* grabadas (como se indicó más arriba) en su nicho ecológico amazónico muestra que los clicks de ecolocación pueden integrarse sobre largas señales monocromáticas de comunicación. En los trabajos publicados particularmente en Comptes Rendus de la Academie des Sciences de Paris se identificaron evoluciones estructurales que marcan el pasaje en forma continua de señales de tipo click a modulaciones monocromáticas, y viceversa. Las numerosas constataciones realizadas en una gran cantidad de secuencias de grabación autorizan a considerar una unicidad funcional de las fuentes sonoras, capaces de generar en un continuo fisiológico los dos tipos de emisiones especializadas (Alcuri, G) [5]. La figura VI ilustra una observación a la base de la posición interpretativa enunciada. Se observa la morfología de clicks de ecolocación, la existencia de señales de estructura más compleja (dobles clicks) y de señales de comunicación sensiblemente monocromáticas.

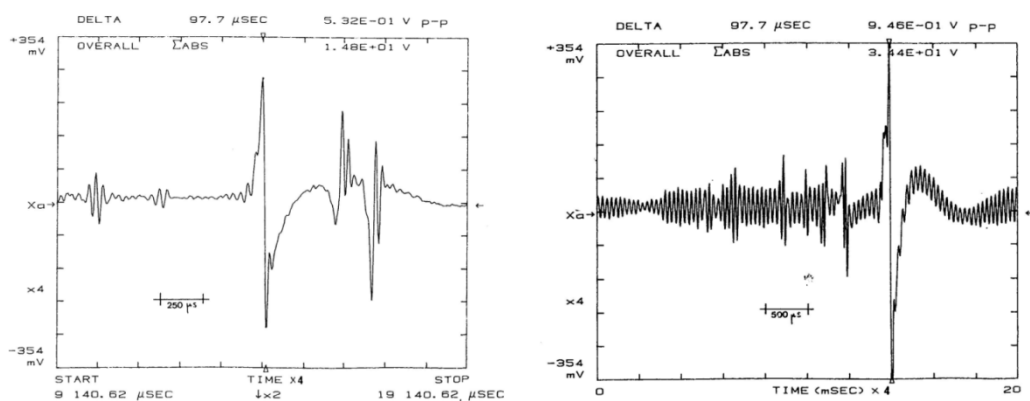


Figura VI.- Estructura compleja de una fracción de salva de *Sotalia* en su medio natural y transformación de una señal sinusoidal en click y restablecimiento de la estructura primitiva. La observación lleva a concebir la existencia de una única fuente acústica regulada fisiológicamente para transformar físicamente las señales resultantes dentro de una adaptación funcional en continuo en un biotopo particularmente difícil.

El resumen de ciertas características del sistema sonar de los cetáceos emprendido en este trabajo fue concentrado en el grupo de los Odontocetos, porque la práctica de la orientación biofísica y biónica exige la disponibilidad de mucha información pertinente. Sin embargo, la posibilidad de encontrar una función análoga en el grupo de los Mysticetos (ballenas) fue explorada en el marco de iniciativas internacionales (Canadá – EE.UU – Francia) pensando que la proximidad biológica de los dos grupos y la existencia de un repertorio acústico rico justifican el emprendimiento de trabajos en esa dirección. Con la colaboración de los colegas estadounidenses y canadienses se emprendió la construcción de un laberinto dedicado a la experimentación con una ballena (*Megaptera novaenglie*) mantenida en semi libertad en una ensenada de Newfoundland, Canadá. La ballena fue equipada de “anteojos” opacos y la observación de sus desplazamientos fue asociada a la adquisición de señales acústicas emitidas por el animal. Luego de permitir a la ballena de continuar su ruta migratoria, se concluyó que mucho trabajo resta todavía para demostrar la extensión de la capacidad sonar a todo el orden de los Cetáceos.



Figura VII.- Una ballena (*Megaptera novaenglie*) retenida provisoriamente en una ensenada se desplaza en el laberinto construido en aguas de Newfoundland (Canadá) para probar experimentalmente la relación entre las emisiones acústicas y una eventual función sonar.

4. Derivados biomiméticos del estudio de cetáceos sudamericanos.- Pensando en el interés conceptual de las orientaciones biónicas y biomiméticas en el campo de la ingeniería, se recuerda que el neologismo *biomimetics* (en lengua inglesa) se atribuye al universitario e inventor norteamericano Otto Schmitt describiendo la idea de inspirarse de estructuras, sistemas y procesos biológicos en el trabajo de concepción tecnológica. Se incluyen entonces en la bibliografía de esta presentación referencias que abordan tres grandes temas significativos: una presentación global de la disciplina (Helman Cohen – Reich) [6], aplicaciones derivadas del estudio de organismos marinos (Kottapalli – Asadnia – Miao – Triantafyllou) [7] y transferencia biomimética en dirección de la ingeniería civil (Pacheco Torgal – Labrincha – Diamanti – Yuu – Lee) [8].

Se resume gráficamente en la figura VIII el material biológico considerado en esta forma de encarar problemas físicos / industriales basada en las enseñanzas extraídas de los organismos vivientes. La localización de esos interesantes sujetos biológicos con respecto a los grandes centros de producción científica del hemisferio norte muestra también el valor de una generalización geográfica de los esfuerzos de investigación.

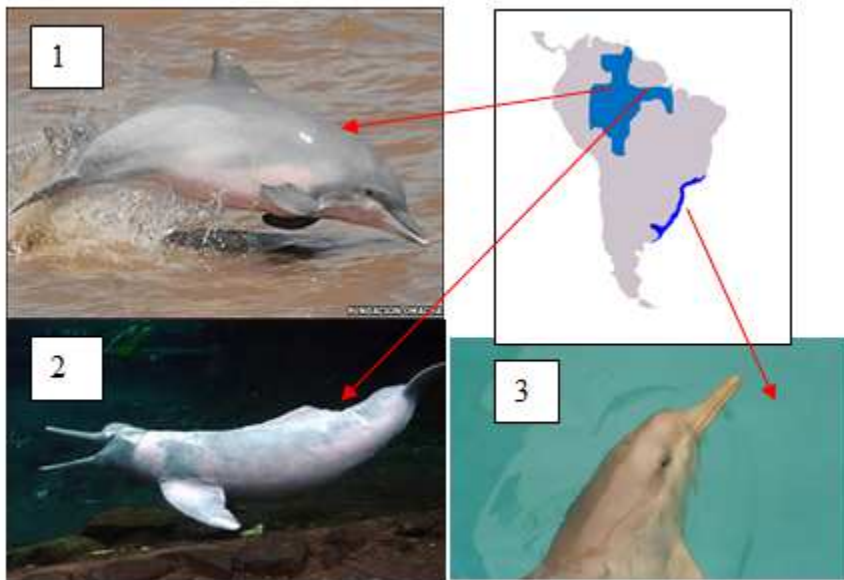


Figura VIII.- Aspecto y localización de especies cuyo estudio inspiró aplicaciones tecnológicas.

1) *Sotalia fluviatilis* (Delphinidae)

2) *Inia geoffrensis* (Iniidae)

3) *Pontoporia blainvillei* (Pontoporiidae – Platanistoidea)

Las particularidades en términos de señal y de sistema de regulación que fueron específicamente analizados en desarrollos conceptualmente biomiméticos pueden ser resumidas y visualizadas en la presentación gráfica de la figura IX.

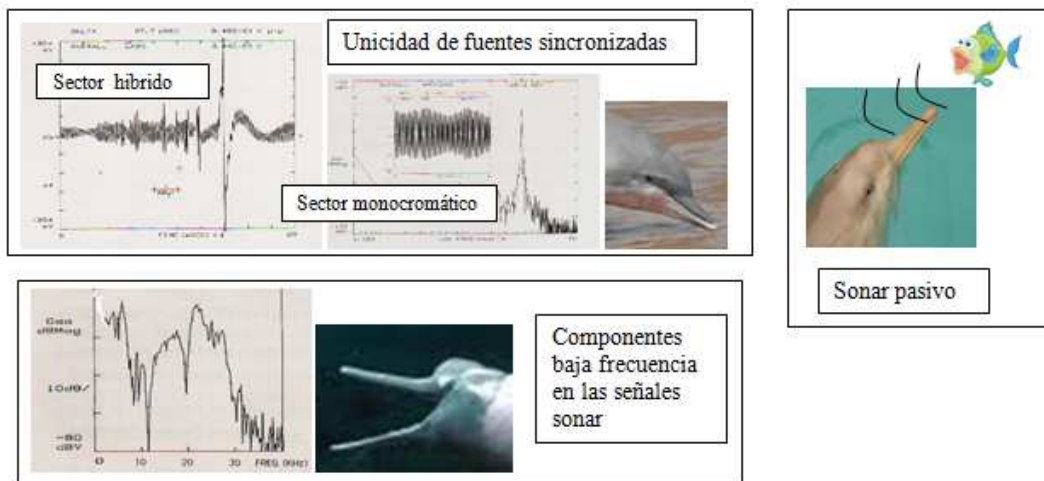


Figura IX.- Puntos claves en una serie de conceptos biomiméticos.

Sobre la base de los principios funcionales descritos a partir del análisis anatómico, fisiológico y etológico se puede intentar una materialización tecnológica capaz de producir señales bien

adaptadas al reconocimiento de un medio y a la detección de situaciones físicas que encierran un interés industrial.

Los diferentes órganos encargados de sub funciones del sistema sonar biológico pueden encontrar su equivalente físico en generadores piezoeléctricos, dispositivos de guía de ondas, lentes acústicos, reflectores y mecanismos informáticos de tratamiento de señal asociados, en última instancia, a métodos de tratamiento avanzado de la información bajo forma de redes neuronales artificiales, estadísticas avanzadas, SVM – Support Vector Machine , entre otros. En la figura siguiente se incluye un esquema de dispositivos efectivamente construidos que permitieron la creación y el perfeccionamiento de módulos técnicos que encontraron aplicación en el tratamiento de numerosos problemas industriales.

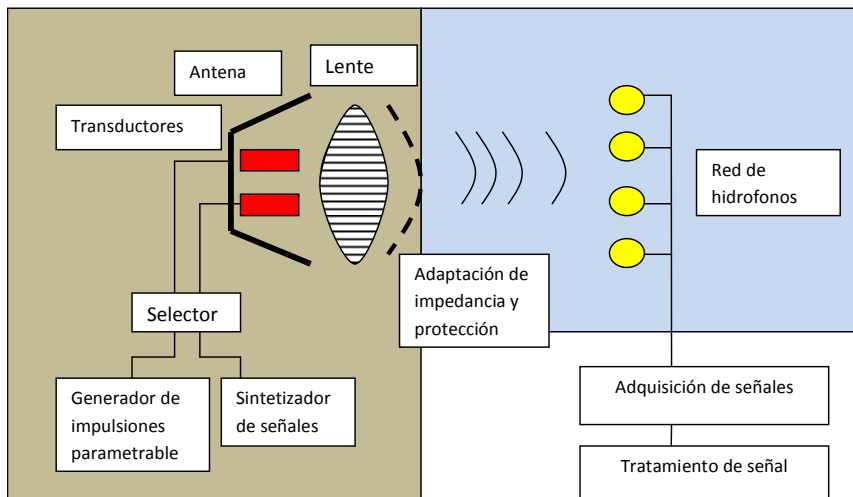


Figura X.- Construcción de un sistema sonar biomimético y simulación de los mecanismos de emisión. La interpretación de los resultados después de propagación en un medio controlado contribuye a una mejor comprensión del funcionamiento del sistema biológico incomparablemente más complejo y multifuncional que el dispositivo técnico.

Aplicaciones prácticas fueron consideradas al estar confrontados a problemas en la industria nuclear cuando es necesario detectar la presencia de cuerpos perturbadores en un medio físicamente hostil donde la utilización de cámaras video es imposible, la presencia humana es totalmente excluida y las operaciones de mantenimiento son muy difíciles y costosas a través de paredes ciegas de gran espesor.

Una transposición biofísica de los sistemas sonar presentados fue obtenida luego de haber integrado las condiciones del medio, las limitaciones dimensionales, las posibilidades de instalación a ciegas y los objetivos técnicos de la operación, en medio de exigencias de robustez y durabilidad extremas. Figura XI.

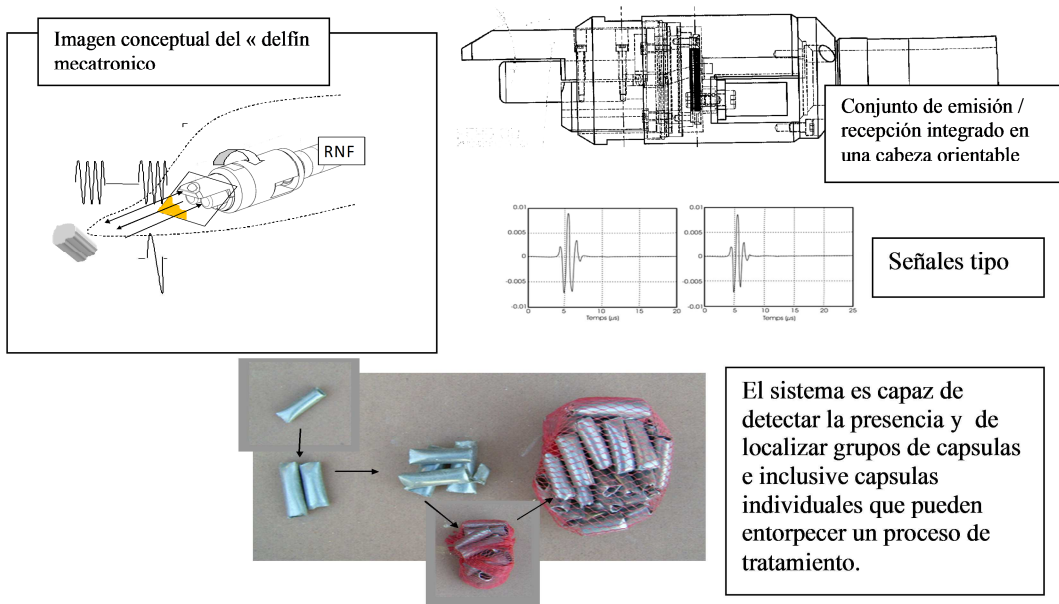


Figura XI.- Un « delfín mecatrónico » desempeña con éxito la función de reconocimiento – detección – localización en una instalación de retratamiento de combustible nuclear

En este caso, las emisiones resultan de la acción de transductores centrados sobre una frecuencia de 40 kHz, presentando características de amortiguamiento que son responsables de una respuesta en banda ancha. Dadas las distancias de detección solicitadas (entre 1 y 10 m) los tiempos de propagación son muy largos en comparación con las condiciones de operación habituales de los dispositivos de control ultra sonoro en la industria. Esto obligó el desarrollo de básculas electrónicas capaces de configurar el sistema sucesivamente en modo emisión y recepción según la llegada de los ecos buscados, como debe hacerlo el modelo animal. El acercamiento al modelo natural, en oposición a los medios usuales de trabajo ultrasonoro, está presente en la gama de frecuencias utilizadas, bien adaptadas a la exploración del medio a distancias métricas.

El ejemplo presentado concierne entonces un sistema de ecolocación activa incluyendo un módulo de emisión, un módulo de recepción del resultado de retro-propagación de señales, un módulo de tratamiento de señal que permite el cálculo de la distancia sistema / objetivo y un módulo de interface con el operador humano. Cabe señalar que la obtención de la distancia al objetivo necesita el conocimiento de la velocidad de propagación de las ondas acústicas en el medio considerado. Dada la variabilidad estructural de ese medio, el sonar se auto calibra continuamente reconociendo una emergencia estructural conocida y permanente, en aplicación de un criterio de aprendizaje, como lo haría un sistema natural. Sabiendo esa posición de referencia, la velocidad de propagación es obtenida fácilmente y ese dato es introducido en pseudo tiempo real en el módulo de tratamiento de señal. La posición de un objeto nuevo es de esta manera determinada a partir de la distancia temporal del eco captado y de la información de velocidad introducida según el método descrito (Figura XII).

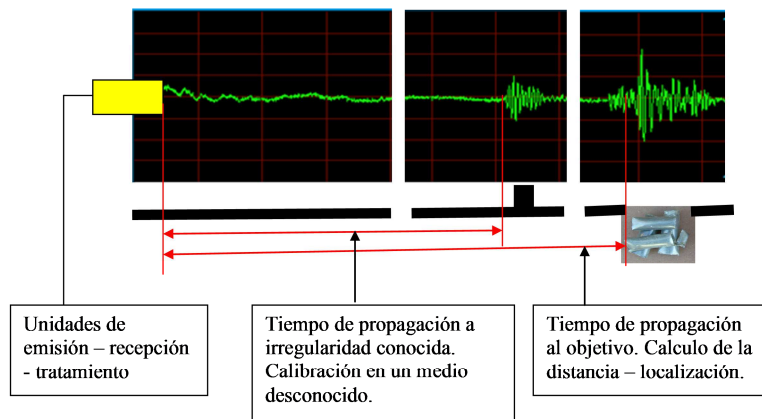


Figura XII. La señal retro-propagada por una irregularidad conocida sirve de referencia para el conocimiento de la velocidad de propagación en un medio desconocido. La información es introducida en el cálculo de la posición del objetivo (objetos perturbadores).

El medio de trabajo nuclear presenta similitudes conceptuales con el de la petroquímica y de la explotación petrolera y del transporte de energía eléctrica alta tensión (criticidad, inaccesibilidad, especificidad de las situaciones físicas...). Estos sectores, permeables a la innovación “no tradicional” constituyeron campos de aplicación de los conocimientos y los conceptos extraídos del estudio del mundo animal

En el transporte de la electricidad a muy alta tensión (100.000 – 200.000 – 400.000 V) la aparición de fenómenos de tipo “descargas parciales” puede marcar el comienzo de procesos de ruptura con consecuencias graves desde el punto de vista funcional y estructural. Se observó que las descargas precursoras pueden generar perturbaciones en un medio gaseoso que toman la forma de propagaciones ultrasonoras totalmente separadas frecuentemente del ruido de fondo ambiental, compuesto de frecuencias bajas y medias. Los ultrasonidos se propagan con dificultad en el medio aéreo, pero la existencia de antenas, captosres y sistemas de adquisición de tipo “sonar pasivo” vistos anteriormente indica que ciertos modelos biológicos son capaces de superar esas dificultades. Es así que, con medios técnicos desarrollados por analogía, se desemboca en la disponibilidad actual de dispositivos de detección a distancia adaptados a las características físicas de las señales de descargas y al medio de propagación no controlable y poblado de obstáculos e irregularidades.

El concepto de recepción pasiva de señales acústicas ultrasonoras (comprendidas entre 20 y 200 kHz) de tipo impulsional fue la base del desarrollo de dispositivos fijos y móviles de detección de fenómenos que llevan el nombre de “popcorn” que ocurren en los procesos industriales de obtención de butadieno. Se comprueba que ciertos desequilibrios estructurales provocan colapsos en el seno de polímeros intermedarios (Alcuri – Thoret-Bauchet) [9] que producen impulsiones de alta frecuencia, que se transforman en una fuente de información de valor industrial. En efecto, las manifestaciones “popcorn” que hoy se pueden detectar y evaluar de manera sistemática pueden ser precursores de fenómenos muy agresivos en el marco de la instalación petroquímica. La figura XII muestra ejemplos de recepción y pre tratamiento de señales provenientes de fenómenos de descargas parciales y de popcorn, donde la similitud con las salvas de los sonares biológicos es evidente.

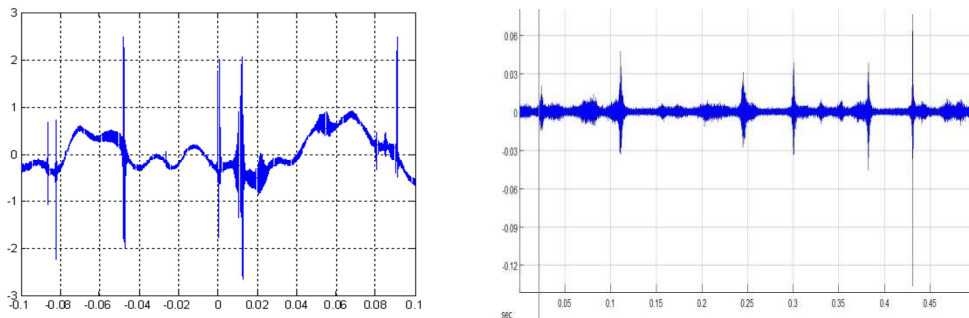


Figura XII.- En un sistema de recepción pasivo las señales de tipo impulsional en salvas descubiertas en presencia de descargas parciales, a la izquierda y en relación con fenómenos popcorn en procesos de producción de butadieno, a la derecha. El estudio de las señales conduce al conocimiento y a la evaluación de situaciones industriales indeseables e inclusive peligrosas.

En los dos casos expuestos la evolución del nivel relativo de las señales y la distribución temporal de las salvas permiten el establecimiento de criterios predictivos y de ayuda a la decisión introduciendo umbrales móviles según un método de aprendizaje que recurre al conocimiento experto del tema, como en la naturaleza.

6. Conclusiones – perspectivas.- El estudio de los sistemas sonar biológicos, y en particular de los cetáceos odontocetos, ofrece ejemplos notables de optimizaciones funcionales producto de una larga adaptación evolutiva. Numerosas manifestaciones anatómicas y fisiológicas en el reino animal como en el reino vegetal están cargadas de informaciones valiosas susceptibles de inspirar direcciones de investigación con gran contenido físico, pudiendo desembocar en aplicaciones técnicas. En el caso de los sistemas de ecolocación se cuenta con señales que al propagarse en el medio externo pueden ser analizadas con la ayuda de todas las capacidades de adquisición, tratamiento, almacenamiento y transformación experimental que ofrecen la gama de instrumentación disponible y el conocimiento teórico fundamental. De esta manera se dispone de medios eficaces para trasladar la reflexión biofísica al medio interno del organismo animal en un objetivo de interacción interpretativa entre las señales, las estructuras biológicas y las observaciones fisiológicas. Simultáneamente se constata que la diversidad biológica global se encuentra asociada a un sistema que presenta invariantes funcionales con un marcado carácter de transversalidad. El sonar está presente dentro de “soportes biológicos” muy diversos, en especies que presentan dimensiones que van de aproximadamente un metro hasta treinta metros, viviendo en mar abierto y alimentándose a grandes profundidades o habitando en zonas costeras o en vías fluviales continentales. La alta especialización del sistema combinada a la diversidad funcional y ambiental de los portadores confirma el interés que encierra, en un principio, la profundización del conocimiento de los mecanismos en una óptica puramente biológica, para luego incorporar una perspectiva biónica y biomimética.

7. Bibliografía

- [1] Alcuri, G Le sonar des Dauphins. Acoustique & Techniques. 2010 N°61, pp 35-42.
- [2] Withlow W.L. Au, The sonar of dolphins, Springer, New York, 1993.
- [3] Dzedzic, A - Alcuri, G. Variation in the characteristics of pulse emissions of a *Tursiops truncatus* during the approach process and the acoustic identification of different polygonal shapes. In R.G. Busnel & J. F. Fish, Animal sonar system, Plenum Press, New York.1980 pp 881 - 884.

- [4] Alcuri, G. . The role of cranial structures in odontocete sonar signal emission In R.G. Busnel & J. F. Fish, *Animal sonar system*, Plenum Press, New York. 1980 pp 847 - 849.
- [5] G. Alcuri, *Communication and sonar signal in Sotalia, analysis of functional simultaneity*, E.A.A.M, 21 Symposium, Madrid, 1993.
- [6] Helfman Cohen, Y.; Reich, Y. *Biomimetic Design Method for Innovation and Sustainability*. Springer 2017, XXVII, 254p. 77 illus.
- [7] Kottapalli, A.G.P.; Asadnia, M. ; Miao, J. ; Triantafyllou, M.S. *Biomimetic Microsensors Inspired by Marine Life*. Springer 2017, IX, 112p. 86 illus.
- [8] Pacheco Torgal, F. ; Labrincha, J.A. ; Diamanti, M.V. ; Yu, C.P. ; Lee, H.K. (Eds.) *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*. Springer 2015, XII. 437 p. 149 illus.
- [9] Alcuri, Gustavo , Thoret Bauchet, Jean Pierre, *Process to monitor unwanted formation of a polymer having internal strain by acoustic emission analysis*. Patent Pub. N° WO/2008/084045 International Application PCT/EP2008/050141; 2008