



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Departament d'Enginyeria Electrònica

Sistemas inalámbricos para la monitorización continua del comportamiento de especies marinas

Tesis doctoral presentada como requisito parcial
para la obtención del título de Doctor por la
Universitat Politècnica de Catalunya, dentro del
Programa de Doctorado en Ingeniería Electrónica

David Sarrià Gandul

Director:

Doctor Antoni Mànuel Làzaro

Codirectores:

Doctor Joaquín del Río Fernández

Doctor Jacopo Aguzzi

Marzo de 2014

Este trabajo de Tesis se ha desarrollado en el marco de los siguientes proyectos de investigación:

NORIT. CTM2005-02034/MAR. Incidencia de los ritmos de emergencia de la cigala (*Nephrops norvegicus*) en la evaluación de sus poblaciones.

RESBAC. TRA2009_0294. Redes de sensores submarinos acústicos aplicados al seguimiento de especies de interés comercial.

RITFIM. CTM2010-16274 (subprograma MAR). Ritmos Fisiológicos e Influencia del Hábitat en Crustáceos de Ambientes Marinos Profundos.

Resumen

En este trabajo de Tesis se proponen y evalúan nuevos métodos para la monitorización de especies marinas, empleando tecnologías ópticas, por radiofrecuencia y acústicas para estudios biológicos en laboratorio (acuarios de experimentación) y en espacios abiertos.

Se ha realizado un estudio de las tecnologías empleadas para la monitorización de especies, presentado y analizado las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas. Aunque la tecnología óptica permite el estudio de especies sin contacto (no invasiva), requiere un correcto posicionamiento de sus elementos y está limitada por el alcance, las condiciones cambiantes del medio y la bioincrustación. Los dispositivos de radiofrecuencia permiten el estudio de especies que emergen a la superficie, o las que habitan en entornos de agua dulce; en el entorno marino esta tecnología se encuentra restringida debido a la gran absorción que sufren las señales electromagnéticas en ese medio. Los dispositivos acústicos facilitan la monitorización de especies en espacios abiertos de gran extensión, permitiendo su localización y seguimiento; sin embargo, esta tecnología presenta una gran sensibilidad a diferentes factores que impone el medio marino como el multicamino, la variación temporal y espacial del canal o el efecto Doppler, entre otros.

La investigación se ha estructurado en tres partes donde, utilizando las tecnologías citadas, se han propuesto, diseñado y validado con éxito diferentes sistemas de medida.

En primer lugar, se han evaluado los detectores de infrarrojos y las cámaras de bajo coste para la monitorización de especies en laboratorio. La propuesta contempla diferentes soluciones que independizan el sistema de las dimensiones del acuario, permitiendo su ampliación y configuración automática. Así mismo, mediante los algoritmos de procesado programados se han reducido las detecciones erróneas causadas por alteraciones de la calidad del agua (turbiedad), la presencia de partículas que obstruyen la línea de vista entre el par emisor-receptor y el deterioro de los transductores.

En la segunda parte del trabajo de Tesis se han propuesto soluciones aplicando la tecnología RFID (Radio Frequency IDentification), mediante el diseño y validación experimental de un sistema de localización y seguimiento de especies en acuarios de experimentación. La propuesta realizada plantea mecanismos que independizan el sistema del tamaño del acuario, y permiten la autoconfiguración de sus componentes. Los resultados obtenidos han demostrado la validez de esta tecnología para localizar y seguir la trayectoria de especies bentónicas en espacios reducidos y con una resolución de varios centímetros.

Finalmente, se ha evaluado el rendimiento de un equipo acústico comercial en mar abierto, a baja profundidad y en las proximidades de un entorno con arrecifes artificiales, donde ocurren complejas y numerosas reflexiones. Debido a la falta de estándares, la incompatibilidad entre fabricantes y con objeto de mejorar los resultados anteriores, en esta parte de la investigación se ha propuesto, construido y evaluado un prototipo de transductor acústico y una plataforma abierta de comunicaciones OFDM (Ortogonal Frequency Division Multiplexing), acercando la tendencia y los avances actuales en materia de comunicaciones acústicas a los sistemas de monitorización de especies marinas.

Palabras clave: monitorización de especies, detectores de infrarrojos, adquisición de imagen, RFID, comunicaciones acústicas, OFDM.

Abstract

In this Thesis, new methods for monitoring marine species using optical, radio frequency and acoustic technologies have been proposed and evaluated for biological studies in the laboratory and open sea.

A study of the current technologies for monitoring species has been carried out, analyzing the advantages and disadvantages of each one. Although optical technologies allow a non-contact (non-invasive) species monitoring, they require a correct positioning of the elements and they are limited to some factors such as the distance (range), the environmental conditions and the biofouling. Radiofrequency devices allow the study of species that come to the surface, or those that live in freshwater environments. But this technology is restricted in the marine environment due the high absorption of the electromagnetic signals in that environment. Acoustic devices facilitate the monitoring of species in open sea and large areas, allowing location and tracking of the animals, but this technology has to challenge different aspects such as the multipath, the temporal and spatial variation of the channel or the Doppler effect, among others.

This research has been divided in three parts according the above technologies, in which have been proposed, designed and evaluated successfully different systems to monitoring species.

First, the infrared detectors and low-cost cameras have been evaluated for laboratory applications. The proposal provides different solutions such the expansion and the auto configuration to make the system independent of the aquaria size. Likewise, through different algorithms proposed have been reduced false activity detections caused by changes in water quality (turbidity), the presence of particles that obstruct the line of sight between the transmitter and the receiver, and the deterioration of the transducers.

In the second part of this work, solutions have been proposed using RFID (Radio Frequency IDentification) technology through the design and experimental validation of a system for tracking species in experimental aquaria. The proposal provides solutions applied to make the system independent of the aquaria size. The results have demonstrated the validity of this technology to locate and track benthic species in confined spaces with a resolution of several centimeters.

Finally, the performance of a commercial acoustic monitoring system in shallow waters and near an artificial reef environment where complex and numerous reflections occur, has been evaluated. Due to the lack of standards, the incompatibility between

manufacturers and the need to improve the previous results, this part of the research has been directed to build and evaluate an acoustic underwater transducer prototype and an open OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) communication platform, approaching the current advances in underwater acoustics towards the species monitoring systems.

Keywords: monitoring species, infrared detectors, image acquisition, RFID, acoustic communications, OFDM.

Agradecimientos

Quisiera desde estas líneas expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han alentado o han contribuido en la realización de la presente Tesis Doctoral.

En primer lugar, quiero agradecer al Dr. Antoni Mànuel, director de esta investigación, su dedicación, esfuerzo y apoyo para tirar adelante este proyecto, y confiar en mí desde el principio.

Agradecer también a los Dres. Joaquín del Río y Jacopo Aguzzi, codirectores de esta tesis, por sus aportaciones, comentarios e ideas que han enriquecido el trabajo realizado, y que han sido fuente de inspiración.

Quiero dar las gracias a José Antonio García y Valerio Sbragaglia, compañeros del Instituto de Ciencias del Mar del CSIC, por su inestimable ayuda durante los ensayos experimentales. Así como por la participación de la Dra. Guiomar Rotllant del Instituto de Investigación IRTA y la colaboración de Corrado Costa, miembro del Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura.

Así mismo, hago extensivos estos agradecimientos a todos mis compañeros del grupo de investigación SARTI, con los que he compartido muchas horas de trabajo, especialmente a Javier Cadena y Marc Nogueras por su valiosa ayuda y experiencia; y a Carlos Viñolo, Ivan Masmitjà y de forma más personal a Oriol Pallarés, por su significativa colaboración en aspectos claves de esta Tesis.

Por último, quiero agradecer el apoyo y comprensión de mis padres, mi hermana y el resto de mi familia, sin ellos no habría sido posible llegar hasta aquí.

Contenido

Resumen	vii
Abstract	ix
Agradecimientos	xi
Acrónimos	xvii
1 Introducción	1
1.1 Sistemas y métodos de monitorización de especies	3
1.1.1 Monitorización sin contacto.....	3
1.1.2 Monitorización con contacto.....	5
1.2 Condicionantes del medio marino	11
1.2.1 Métodos y limitaciones de las comunicaciones subacuáticas.....	11
1.2.2 Suministro de energía eléctrica.....	14
1.2.3 Características del medio y de las especies.....	15
1.3 Comparativa entre las tecnologías actuales	15
1.3.1 Monitorización con dispositivos ópticos.....	15
1.3.2 Monitorización con dispositivos de radiofrecuencia	17
1.3.3 Monitorización con dispositivos acústicos.....	18
1.4 Objetivos y estructura del trabajo de Tesis	18
2 Monitorización de especies mediante dispositivos ópticos	21
2.1 Estudio y evaluación de los detectores de presencia	21
2.1.1 Emisor, receptor y circuitos de acondicionamiento.....	22
2.1.2 Análisis de la absorción	24
2.1.3 Disposición y número de transductores	26
2.2 Adquisición de imagen	28

2.2.1	Adquisición con una y múltiples cámaras	29
2.2.2	Consideraciones para trabajar con múltiples cámaras	30
2.2.3	Pruebas realizadas en el acuario de experimentación.....	31
2.3	Plataforma de medida propuesta.....	32
2.3.1	Planteamiento.....	33
2.3.2	Alimentación y comunicaciones	33
2.3.3	Sistema de adquisición	37
2.3.4	Sistema de iluminación	39
2.4	Experimentación práctica.....	40
2.4.1	Instalación y materiales	40
2.4.2	Resultados preliminares	44
2.4.3	Algoritmos de detección.....	48
2.4.4	Resultados finales	53
2.5	Sumario	54
3	Monitorización de especies mediante dispositivos de radiofrecuencia	57
3.1	Consideraciones preliminares.....	57
3.1.1	Condiciones impuestas por el medio	57
3.1.2	Otras consideraciones.....	60
3.2	Estudio y evaluación de RFID	60
3.2.1	Lectores y tags RFID.....	60
3.2.2	Pruebas de alcance.....	63
3.2.3	Separación y disposición de las antenas	66
3.3	Sistema de localización y seguimiento propuesto.....	69
3.3.1	Planteamiento.....	70
3.3.2	Controlador de lectores.....	72
3.3.3	Sistema de alimentación y comunicaciones	74
3.4	Instalación de la propuesta.....	76
3.4.1	Acuario de experimentación.....	76
3.4.2	Estructura de la instalación	77
3.4.3	Instalación de las antenas y los controladores.....	77
3.4.4	Control del sistema	79
3.4.5	Adhesión de los tags	80
3.5	Resultados experimentales.....	80
3.5.1	Consumo	80

3.5.2	Estabilidad	81
3.5.3	Detecciones.....	81
3.5.4	Efectividad de los lectores	83
3.5.5	Trayectorias y ocupación de las zonas.....	86
3.5.6	Movilidad y resolución.....	88
3.6	Sumario.....	91
4	Monitorización de especies mediante dispositivos acústicos	93
4.1	Experimentaciones preliminares.....	93
4.1.1	Experimentación de alcance en el mar	96
4.1.2	Experimentación de alcance entre biotopos.....	99
4.1.3	Experimentación con especies en el mar	103
4.1.4	Evaluación del equipo VR2W en laboratorio	107
4.1.5	Estudio de materiales absorbentes.....	110
4.2	Discusión y propuesta	114
4.3	Implementación del transductor acústico.....	116
4.3.1	Evaluación y construcción de transductores.....	116
4.3.2	Respuesta acústica.....	123
4.4	Planteamiento y desarrollo del prototipo.....	129
4.4.1	Propuesta	129
4.4.2	Desarrollo del prototipo.....	131
4.4.3	Pruebas de consumo	133
4.5	Experimentación del prototipo en el mar.....	134
4.5.1	Adaptación y pruebas de estanqueidad	134
4.5.2	Evaluación del prototipo en mar abierto.....	135
4.6	Sumario.....	138
5	Conclusiones y futuras líneas de trabajo	139
5.1	Conclusiones	139
5.1.1	Monitorización de especies mediante dispositivos ópticos.....	139
5.1.2	Monitorización de especies mediante dispositivos de radiofrecuencia	142
5.1.3	Monitorización de especies mediante dispositivos acústicos.....	143
5.2	Aportaciones	144
5.3	Futuras líneas de investigación	145
5.4	Publicaciones	146

5.4.1 Revistas indexadas.....	146
5.4.2 Congresos.....	147
5.4.3 Revistas de divulgación.....	149
5.4.4 Publicaciones derivadas	150
Anexo A	151
Anexo B	153
Anexo C	155
Bibliografía	157

Acrónimos

ADC	Analog-to-Digital Converter
DAC	Digital-to-Analog Converter
DDS	Direct Digital Synthesis
FFT	Fast Fourier Transform
FPGA	Field Programmable Gate Array
HF	High Frequency
IR	Infrared
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
LF	Low Frequency
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PIT	Passive Integrated Transponder
PPM	Pulse Position Modulation
PWM	Pulse Width Modulation
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency IDentification
SPL	Sound Pressure Level
TVR	Transmit Voltage Response
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UID	Unique Identification Number
USB	Universal Serial Bus
VLF	Very Low Frequency

Capítulo 1

Introducción

Los ecosistemas marinos proporcionan un sustento clave en el equilibrio ecológico de la Tierra y son una importante fuente de recursos de gran impacto económico¹. No obstante, debido a la extensa superficie y profundidad que abarcan², y a las dificultades para su estudio y exploración, son unos de los ecosistemas más desconocidos (Ramírez & S.M., 2006). Se estima que en los océanos habitan cerca del 50 % de las especies del planeta y que solo se ha explorado el 5 % de la vida (Coml, 2014; NOAA, 2014).

De las especies conocidas, la inmensa mayoría, el 98 % aproximadamente, viven sobre el fondo marino (bentónicas), y sólo un 2 % nadan libremente (pelágicas) (Thurman & Burton, 2010). La mayoría de las formas bentónicas viven en la franja intermareal, o en zonas poco profundas y menos de un 1 % de ellas viven en fondos por debajo de los 2.000 metros de profundidad.

Actualmente, los ecosistemas marinos y las especies que los habitan se encuentran seriamente amenazados por la presión pesquera, el cambio climático, la acidificación y la contaminación (Fenberg et al., 2012). Se estima que el 30-35 % del hábitat marino mundial se encuentra gravemente dañado, y que un tercio de las pesquerías se encuentran sobreexplotadas (Fao, 2014). Estudios recientes, como el presentado por el *Programa Internacional sobre el Estado del Océano* (IPSO, 2014), revelan este importante declive.

Frente a esta situación, se ha incrementado la necesidad de obtener una mayor información de la biología de las especies, como el tamaño de la población, su movimiento, comportamiento, crecimiento, edad y fecundidad, especialmente de aquellas que se encuentran sobreexplotadas y/o en riesgo de extinción (Coml, 2014; NOAA, 2014).

La creciente importancia que está adquiriendo la gestión sostenible del medio marino y los ecosistemas litorales en las políticas estatales, se demuestra en los numerosos convenios internacionales firmados en los últimos años como la red de Áreas Marinas

¹ Se calcula que los ecosistemas costeros suministran servicios valorados en unos 26.000 millones de euros anuales (Mangos, Bassino, & Sauzade, 2010).

² Los océanos, con una profundidad promedio de 3.800 metros y unos 1.370 x 10⁶ kilómetros cúbicos de agua, cubren aproximadamente el 71 % de la corteza terrestre.

Protegidas o el protocolo sobre las zonas especialmente protegidas y la diversidad biológica en el Mediterráneo (Ospar, 2014; Unep, 2014). Fruto de estas políticas han surgido las áreas marinas protegidas (Jones, Qiu, & De Santo, 2013), cuyo objetivo fundamental es preservar la biodiversidad de algunas zonas de importancia singular (Tundi Agardy, 1994). Otras medidas han sido los periodos de veda y la reducción del número y/o tamaño de las capturas por parte de las pesquerías comerciales (Oceana, 2014). Estas medidas o programas de repoblación requieren para su ajuste un correcto conocimiento de las especies objeto de explotación comercial, como su actividad, distribución, población, cambio de comportamiento o biomasa (Vierod, Guinotte, & Davies, 2013).

Para estimar la biomasa y biodiversidad en ecosistemas profundos, suelen utilizarse modelos de previsión de capturas en base a la hora del día y la estación del año (Christensen & Pauly, 1992; Heymans, Coll, Libralato, & Christensen, 2011). Estos modelos se realizan a partir de los datos aportados por barcos pesqueros de arrastre o buques oceanográficos, utilizando ecosondas o sónares. Sin embargo, estudios recientes han demostrado que para algunas especies, en ciclos completos diarios, las diferencias horarias revelan variaciones de la densidad, superiores al doble de los individuos, debido a que la actividad rítmica repercute considerablemente en las estimaciones demográficas, dada la estrecha relación entre comportamiento y capturabilidad (Aguzzi, Sardà, Abelló, Company, & Rotllant, 2003; Bahamon, Sarda, & Aguzzi, 2009). Dichos estudios señalan un desconocimiento del comportamiento y la población de ciertas especies. Por ello, y debido a las grandes dificultades y costes para realizar estos estudios (Bailey, King, & Priede, 2007), así como para poder evaluar la influencia de variables y agentes externos como el fotoperiodo, las mareas o la convivencia en grupo, el comportamiento de las especies también es estudiado en laboratorio, requiriéndose para ello herramientas y sistemas adecuados para este entorno (Aguzzi, Costa, Menesatti, et al., 2009).

De forma general, en esta área, tanto para estudios en laboratorio como en espacios abiertos, los sistemas de medida deben ser poco invasivos (de forma que el método de medición no altere el comportamiento de la especie) y capaces de recoger largas extensiones temporales de su actividad. El consumo y la autonomía de los sistemas, así como las restricciones de las comunicaciones subacuáticas son factores que condicionan la monitorización de las especies durante mayores periodos, y en tiempo real.

Tal como se detalla en los próximos apartados, la monitorización de especies se realiza mediante diferentes técnicas, utilizando dispositivos ópticos, por radiofrecuencia y acústicos; pero, debido a las condiciones que impone el medio, algunas tecnologías y métodos resultan adecuados en laboratorio, mientras que otros lo son en espacios abiertos. Al final de este capítulo, tras detallar los sistemas actuales, y discutir sus ventajas e inconvenientes, se presentan los objetivos de esta Tesis, proponiendo nuevas soluciones para la monitorización de especies en laboratorio y en espacios abiertos.

1.1 Sistemas y métodos de monitorización de especies

Los sistemas empleados para el estudio y la monitorización de especies marinas pueden clasificarse en dos grupos o categorías: los que permiten medir o registrar la actividad de éstas sin contacto (monitorización sin contacto), y los que requieren un dispositivo adherido o implantado (monitorización con contacto).

1.1.1 Monitorización sin contacto

Dentro de este grupo destacan dos métodos o técnicas, la filmación mediante cámaras y la detección remota.

Filmación con cámaras

El estudio de especies mediante video o imagen es una técnica relativamente reciente. Las primeras investigaciones en entornos marinos datan de 1950 (George, Lythgoe, & Lythgoe, 1985). Desde entonces, las cámaras han sido utilizadas para censar especies, estudiar la diversidad, monitorizar los cambios de abundancia (F. Centre, 2000) o analizar la estructura de asociaciones de peces. También han sido empleadas en la gestión de las pesquerías, evaluando la biomasa en base a la estimación de la talla de ciertas especies. De forma experimental se han aplicado para calcular el tamaño de cardumen en túnidos y para la estimación de la talla de peces mediante técnicas estroboscópicas o mediante estéreo-visión (Beumer, Grant, & Smith, 2003).

Las cámaras han sido aplicadas para el estudio de especies marinas en laboratorio (Newland, Chapman, & Neil, 1988), en aguas someras (Santamaria et al., 2013; Aguzzi et al., 2011), y a gran profundidad (Aguzzi, Costa, Fujiwara, et al., 2009; Aguzzi et al., 2013). La filmación a mayor profundidad con propósitos científicos ha sido realizada a 7.700 metros de profundidad en la fosa de Japón en el Océano Pacífico (Jamieson, Fujii, Solan, & Priede, 2009). Por otro lado, las cámaras también han sido adaptadas para ser transportadas por vehículos submarinos (Davis & Pilkaln, n.d.).



Figura 1.1 Contaje de peces a través de las imágenes capturadas por el observatorio submarino OBSEA. Extraído de (Aguzzi et al., 2011).

De forma general las cámaras son empleadas utilizando el modelo de monitorización sin contacto. No obstante, la Crittercam utiliza el modelo de monitorización con contacto (Marshall, 1998). Esta cámara fue concebida como herramienta de investigación para ser portada por animales marinos; además de la captura de vídeo y audio, combina la adquisición de datos ambientales como la temperatura, aceleración y profundidad (Geographic, 2014). Hasta el momento, ha permitido estudiar ballenas, tiburones, leones marinos, focas, tortugas marinas, pingüinos, entre otros. Actualmente, las dimensiones, peso y autonomía (entre 3 a 6 horas), impiden utilizar esta herramienta con especies más pequeñas o durante más tiempo.

DetECCIÓN REMOTA

En detección remota destacan las ecosondas, los hidrófonos y la tecnología LIDAR

Las ecosonda o el sónar (SONAR, Sound Navigation and Ranging) son sistemas acústicos que además de cartografiar el fondo marino permiten, a partir de las señales acústicas reflejadas, estimar la abundancia de los recursos marinos y estudiar su comportamiento, (Denbigh & Weintroub, 1987; J., Smith, Lawton, & Anderson, 2011; Freitas et al., 2011). Mediante esta técnica actualmente se evalúa el estado en el que se encuentra un determinado stock y se estima su abundancia y distribución espacial. Para llevar a cabo este tipo de estudios, se realizan campañas de investigación a bordo de barcos pesqueros o buques oceanográficos.

Los hidrófonos se utilizan para medir la presencia de cetáceos y estudiar las señales de ecolocalización (Au, 2004; Gordon & Tyack, 2001). Otras aplicaciones en este campo son las estimaciones de la población, los estudios de comportamiento y los esfuerzos de mitigación relacionados con las colisiones entre los mamíferos marinos y los buques, y su exposición a sonidos fuertes de origen antropogénico, como la sísmica activa, la explotación de petróleo y gas, y otros usos del sónar (Dutoit, Kandia, & Stylianou, 2009; Popper, 2003; André et al., 2011).

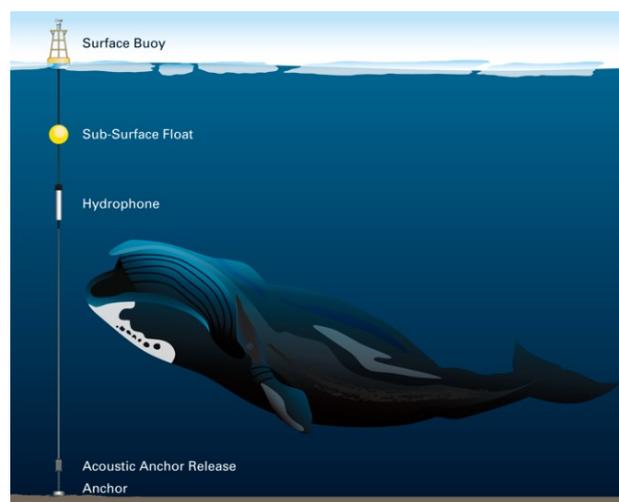


Figura 1.2 Esquema de instalación de un hidrófono para el estudio de cetáceos. Fuente (Whoi, 2014).

La tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging) permite también el estudio y evaluación de los recursos pesqueros: detección y abundancia de especies marinas en regiones específicas. Hasta la fecha, un equipo de este tipo, transportado en un avión a una altura de 1.700 m, ha sido capaz de detectar peces hasta profundidades de 16 m (J. A. Butler, 1990).

Por otro lado en tecnologías ópticas, los detectores por infrarrojos también han sido utilizados, aunque con fauna terrestre y en laboratorio (Pałucha-Poniewiera, Brański, Lenda, & Pilec, 2010; Schochet, Kelley, & Landry, 2004). El equipo Animal Activity Meter de la empresa Columbus Instruments (Columbus, 2014) es una solución comercial que aplica este método para el estudio de roedores; se compone de diferentes emisores y receptores de infrarrojos que estratégicamente situados, en la jaula o recinto donde habita el individuo, posibilitan el estudio de comportamiento y aprendizaje de animales.

La cámara de caza es otra de las tecnologías identificadas y que puede clasificarse dentro de esta categoría por su principio de funcionamiento. Está compuesta por una cámara y sensores PIR (piroeléctricos), permitiendo detectar el movimiento y capturar de forma automática instantáneas o vídeos de los animales que se encuentran en su rango de acción. Esta herramienta ha sido concebida para el estudio de especies terrestres.

1.1.2 Monitorización con contacto

Dentro de este grupo se identifican diferentes tecnologías y métodos.

Sistemas de marcaje (carentes de electrónica)

En esta categoría se encuentran los alambres de códigos (*Coded Wire Tags*) y los implantes visibles (*Visible Implant Tags*), soluciones comerciales de la compañía Biomark (Biomark, 2014), ver Figura 1.3.

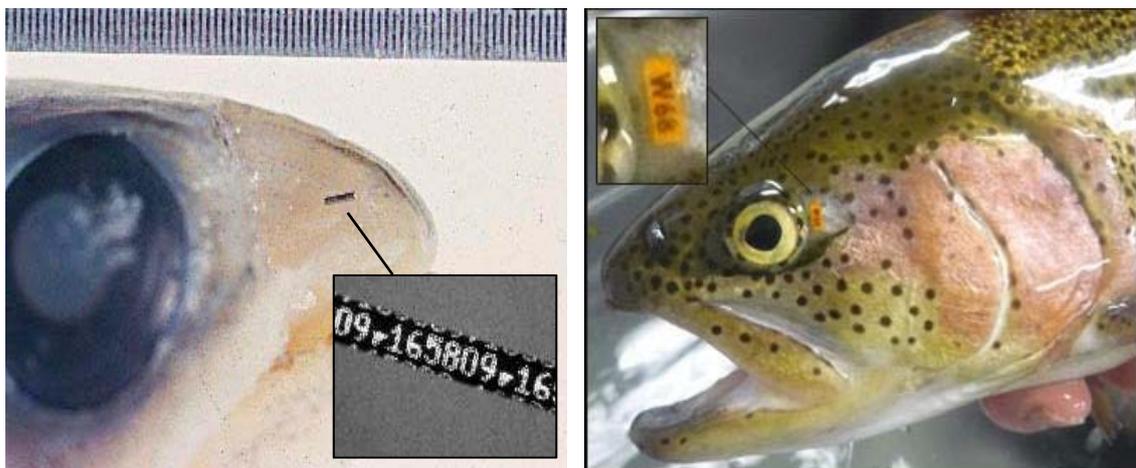


Figura 1.3 Alambres de códigos a la izquierda; implantes visibles a la derecha. Imagen extraída y editada de (Biomark, 2014).

Los alambres de códigos son etiquetas de acero inoxidable magnetizadas, con un número o código identificativo impreso. Tienen un diámetro de 0,25 mm y una longitud estándar de 1,1 mm, y se inyectan con dispositivos especiales.

Los implantes visibles son elastómeros de colores que, implantados debajo del tejido transparente o translúcido de los individuos, permiten de forma visual su identificación, bien sea por su color o por su código identificativo.

Aunque ambas soluciones son aptas para especies acuáticas, requieren una operación manual para su identificación.

Registadores (dataloggers)

Otra de las tecnologías para estudiar especies acuáticas son los registradores (dataloggers). Son dispositivos que adheridos o implantados a los animales, recogen y almacenan datos de su entorno, como la temperatura o la profundidad. Después de su recuperación, pueden analizarse los datos registrados.

La empresa Star-Oddi (Star-Oddi, 2014) lidera este mercado y ofrece dispositivos como el *DST GPS*, capaz de registrar la temperatura y presión, así como la posición GPS, enviada acústicamente a través de sónares especiales desde superficie. Otro dispositivo destacable de esta marca, es el *DST Magnetic*, capaz de registrar la temperatura, presión, fuerza y sentido del campo magnético terrestre, así como la inclinación en sus tres ejes.

Dado que los dispositivos basados en registrador no tienen la capacidad para transmitir los datos adquiridos, el consumo que tienen es relativamente bajo, ofreciendo una gran autonomía y permitiendo su utilización con especies pequeñas. Actualmente, el dispositivo más pequeño de esta casa tiene unas dimensiones de 6 x 17 mm, un peso de 1 gramo, y tiene una autonomía de 9 meses registrando la temperatura cada 10 minutos.

La problemática que presenta este método/tecnología es la dificultad para recuperar los dispositivos (posible pérdida), y la imposibilidad de poder trabajar con los datos en tiempo real.

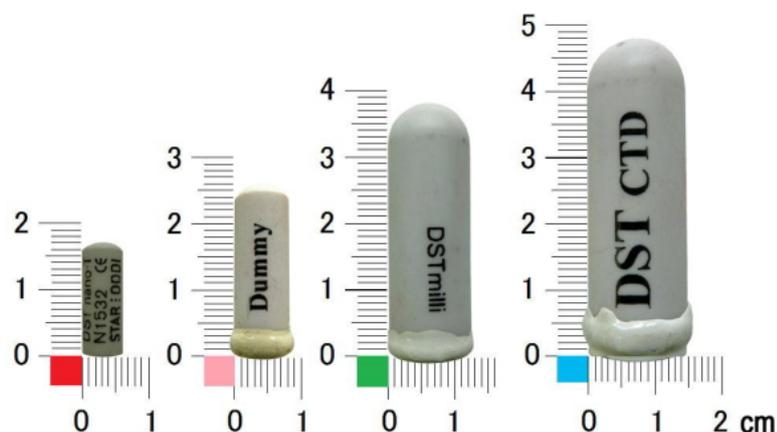


Figura 1.4 Diferentes dataloggers para especies acuáticas. Fuente (Star-Oddi, 2014).

Transmisores de radiofrecuencia

Existen diferentes transmisores de radio en la banda de VHF (Very High Frequency), alrededor de los 147 y los 168 MHz, específicamente diseñados para el estudio de especies acuáticas. Esta tecnología requiere dos dispositivos: el transmisor portado por la especie, y el receptor que, instalado en las proximidades, permite localizarlo.

El transmisor envía periódicamente una señal con un número o código de serie, permitiendo la identificación de su portador. Dependiendo de los modelos existentes, pueden además enviar variables del entorno como la temperatura, la profundidad o el movimiento de la especie. El dispositivo opera con una pequeña pila, y su autonomía está condicionada por la cadencia de las transmisiones. Dependiendo del tamaño del transmisor y la capacidad de su pila, la vida útil de estos dispositivos puede variar desde varios días a años (Lotek, 2014).

Para monitorizar a las especies mediante esta tecnología pueden aplicarse dos métodos: instalar múltiples receptores en los alrededores de la zona de análisis, o realizar un barrido por la región de estudio mediante embarcaciones. Con estos dispositivos se estudia la movilidad y la migración de las especies y su interacción con el medio, información de especial importancia en investigaciones conductuales.

Debido a la gran atenuación de las señales electromagnéticas en el medio marino (Heidemann, Wills, & Syed, 2006), esta tecnología solo se aplica para especies que emergen a la superficie o que habitan en aguas de poca conductividad (Lotek, 2014).

Por otro lado, (Joshi, Naga VishnuKanth, Samdaria, Bagla, & Ranjan, 2008) propone un sistema que utiliza transmisores con el estándar ZigBee, con el que estima la posición de diferentes individuos a través de la señal recibida por diferentes estaciones fijas, instaladas en las inmediaciones del lugar. Esta tecnología ha sido planteada para especies terrestres. Para especies marinas esta tecnología está restringida por la absorción de las señales de radiofrecuencia en este entorno (Lotek, 2014).



Figura 1.5 Transmisor de radiofrecuencia a la derecha y receptor autónomo a la izquierda. Imágenes extraídas de (Lotek, 2014).

Transmisores con GPS y comunicaciones por satélite

Dentro de esta área, existen transmisores que adheridos a la especie, y dotados de un sistema de localización GPS y de comunicaciones vía satélite, permiten seguir la trayectoria de especies marinas que recorren grandes distancias (Hoenner, Whiting, Hindell, & McMahon, 2012; Schofield et al., 2007), evitando la instalación de receptores por el océano, ver Figura 1.6.

Debido a la gran atenuación de las señales electromagnéticas en los entornos marinos y al tamaño y peso del dispositivo, este sistema solo opera cuando la especie se encuentra en la superficie y además esta tecnología solo es apta para especies de tamaños medianos y grandes, como delfines, tortugas y ballenas.



Figura 1.6 Geolocalización de diferentes ballenas en la costa Australiana (izquierda). Transmisor con GPS a la derecha.

Sistemas de Telemetría

Existe una amplia variedad de implantes comerciales disponibles para la identificación y el seguimiento fisiológico de especies en laboratorio. Las principales marcas son Data Sciences International (Datasci, 2014), Biomedic Data Systems (Bmds, 2014), y Respironics (Minimitter, 2014). La mayoría de estos sistemas utilizan alguna forma de energía inductiva y de telemetría y/o transmisores de muy baja potencia. Los implantes disponibles permiten medir diferentes variables de la especie como su actividad, temperatura, presión arterial, ritmo cardíaco o frecuencia respiratoria, entre otros (Kramer K, 2003). En algunos casos la potencia necesaria para operar se deriva de la energía de radiofrecuencia transmitida desde el receptor (Mohensi P, Naja K, Eliades S, 2005; Michael AC, 2007).

En esta área existe múltiples propuestas y diseños como la de (Zabaco, 2011), se trata de un implante que se alimenta a través de un sistema modular que genera un campo magnético uniforme, permitiendo al animal moverse libremente. Para el estudio de especies acuáticas destaca el *CEMG2*, del fabricante Lotek (Lotek, 2014). Se trata de un transmisor de radio para peces que permite recoger y enviar la información de su actividad muscular, medida a través de sondas insertadas en la musculatura, ver Figura 1.7.



Figura 1.7 Dispositivo de telemetría para especies acuáticas. Fuente (Lotek, 2014).

Transponders RFID

La utilización de los PIT (Passive Integrated Transponder) para la detección de especies acuáticas ha crecido desde 1990 (Prentice, E. F., T. A. Flagg, 1990; Prentice, E. F., T. A. Flagg, C. S. McCutcheon, 1990; Downing, S. L. , E. F. Prentice, R.W. Frazier, J. E. Simonson, 2001).

Los PIT son transponders RFID (Radio Frequency IDentificación), también llamados “tags RFID”, de baja frecuencia (120-134,2 kHz) con un encapsulado biocompatible, ver Figura 1.8. Tras ser energizados con lectores (operan mediante inducción), transmiten un código identificativo único (UID, Unique Identification Number) basados en los estándares ISO 11784 y 11785.

Los PIT se insertan con agujas de gran calibre o mediante operación quirúrgica en vía subcutánea o en alguna cavidad corporal (Taylor et al., 2012). Aunque en diferentes experimentaciones como la realizada por (Roussel, Haro, & Cunjak, 2000) con salmón del Atlántico (*Salmo salar*), no reportó mortalidad después de la cirugía, ni pérdida de los dispositivos, (Kaemingk, Weber, McKenna, & Brown, 2011) sugiere una normalización de las técnicas de implantación para diferentes especies. Dichas recomendaciones tienen como objeto la reducción de las tasas de infección y del daño a los tejidos, así como la mejora del proceso de cicatrización de las heridas.

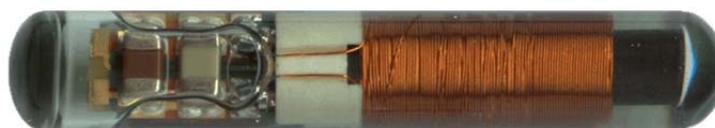


Figura 1.8 Transponder PIT, compuesto por una antena con un circuito de conversión de energía, y un microchip encargado de transmitir el UID.

La identificación manual a través de lectores portátiles ha sido uno de los métodos más practicados y comunes. Actualmente se pueden encontrar sistemas automáticos que instalados de forma fija y operando en continuo, permiten registrar la presencia de los individuos en su medio natural, sin ningún tipo de manipulación o recuperación después de su marcado inicial. Estos sistemas han demostrado su viabilidad con especies de agua dulce, tanto en ríos (W. T. Centre, Newburgh, & Park, 2004), como en presas (Nunnallee, Prentice, Jonasson, & Patten, 1998), permitiendo estudiar la migración y la supervivencia. En estas instalaciones el lector maneja múltiples antenas distribuidas de orilla a orilla, cubriendo transversalmente la zona de paso, ver Figura 1.9.



Figura 1.9 Dos arrays de antenas para la detección de peces marcados con PITs en el río Methow en Washington.

Dispositivos acústicos

Esta tecnología requiere dos dispositivos, el transmisor portado por la especie, y el receptor que, instalado/ubicado en las proximidades, permite localizarlo. Los principales fabricantes de esta tecnología son Vemco (Vemco, 2014), Lotek (Lotek, 2014) y Hti-Sonar (Htisonar, 2014).

En espacios abiertos este tipo de dispositivos tiene un alcance máximo de 200 metros, y tamaños similares a los dispositivos de radiofrecuencia anteriormente explicados. El funcionamiento de los mismos es similar, periódicamente envían una señal acústica con un identificador único y dependiendo del modelo, pueden enviar variables del entorno. No se localizan transmisores capaces de guardar la información para volcarla después acústicamente. Actualmente, el transmisor comercial más pequeño es el modelo V5 de Vemco, con un tamaño de 5 x 12 mm; su tiempo útil es de 100 días transmitiendo su identificador cada 90 segundos.

La recepción se realiza con hidrófonos autónomos o cableados compatibles con la marca y modelos de los transmisores, existiendo incompatibilidad entre fabricantes debido a las diferentes modulaciones, codificaciones y frecuencias utilizadas. Las frecuencias acústicas pueden variar entre 69 a 300 kHz.

Los hidrófonos autónomos actúan como *dataloggers*, y después del periodo de experimentación deben recuperarse para descargar y analizar los datos registrados (Bridger, Booth, Mckinley, Scruton, & Lindstrom, 2001; López, 2008). Estos modelos permiten estudiar el tiempo de residencia o la migración de las especies de unas zonas a otras. De forma cableada permiten la detección y localización de los individuos en tiempo real; algunos modelos de altas prestaciones permiten localizar la posición y las trayectorias que realizan aplicando técnicas de triangulación (Htisonar, 2014; Erol-kantarci & Mouftah, 2010).

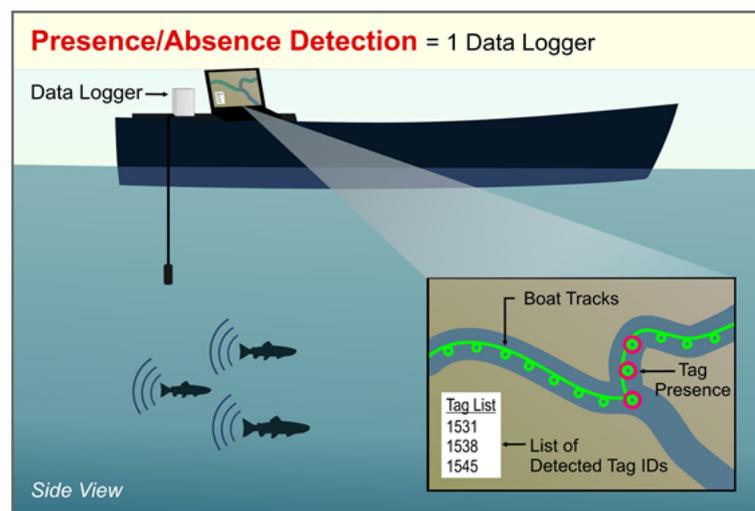


Figura 1.10 Concepto de operación de un sistema acústico utilizando un receptor móvil instalado en una embarcación. Fuente (Htisonar, 2014).

1.2 Condicionantes del medio marino

En los siguientes apartados se resumen las limitaciones que impone el medio marino a los equipos anteriores.

1.2.1 Métodos y limitaciones de las comunicaciones subacuáticas

Las señales ópticas, electromagnéticas y acústicas permiten las comunicaciones subacuáticas. Cada técnica presenta una serie de particularidades, con sus ventajas y desventajas, debido principalmente a las características fisicoquímicas del medio.

Comunicaciones subacuáticas basadas en señales ópticas

Aunque los métodos ópticos permiten tasas muy elevadas de transmisión, debido a la dispersión y a la gran absorción que experimenta la luz en el agua, esta técnica no permite grandes distancias y requiere fuentes y receptores de gran precisión (Tang, Dong, & Zhang, 2012).

No todas las frecuencias del espectro de la luz se ven afectadas de la misma manera. Las partículas absorben selectivamente ciertas longitudes de onda, por lo que algunas radiaciones o colores se atenúan rápidamente en los primeros metros (rojo, amarillo, naranja), mientras que otros (violeta, azul y verde) viajan más lejos (el color azul el que penetra más), ver Figura 1.11. Por otro lado, la dispersión de la luz causada por las moléculas de agua y las partículas en suspensión, separa la luz modificando su dirección de propagación. Como consecuencia de estos dos procesos, la luz se debilita conforme aumenta la distancia o la profundidad.

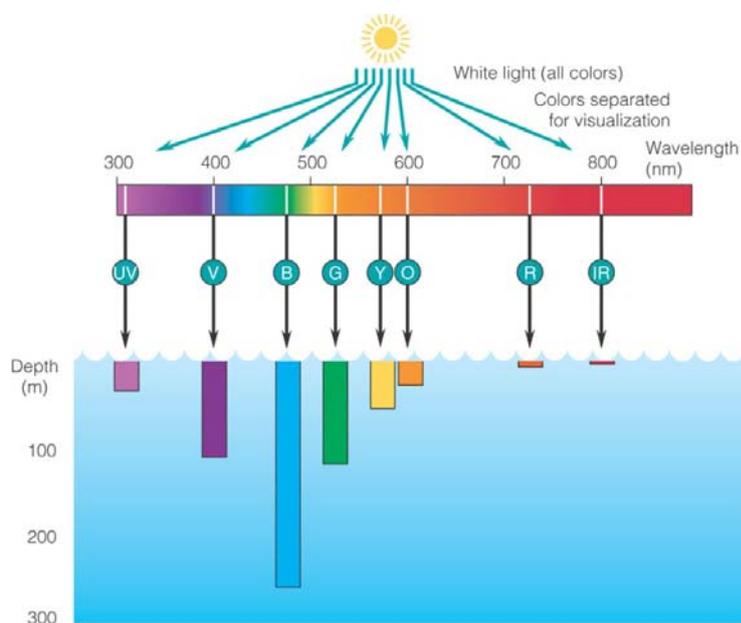


Figura 1.11 Absorción de la luz en el mar.

Dependiendo de la claridad de las aguas (menores partículas en suspensión) la luz podrá llegar más lejos. El promedio de la penetración de la luz se ha calculado en 200 metros (Stewart, 2008).

Por otro lado, la mayoría de la vida marina se concentra en las zonas costeras y en las capas más superficiales de los océanos donde, gracias a la entrada de la luz solar, las plantas pueden realizar la fotosíntesis, generando el soporte vital para la base de la cadena alimentaria. En estas zonas, existe un gran contenido de partículas derivadas de la producción biológica de microorganismos, o traídas por los sistemas fluviales, olas, mareas u otros movimientos de agua. Así, en las zonas donde predomina la vida también existen dificultades para que la luz pueda penetrar grandes distancias.

Comunicaciones subacuáticas basadas en señales electromagnéticas

El agua en su estado puro es un aislante, pero debido a la presencia de sales es un medio conductor de electricidad.

La conductividad varía sobre todo con la temperatura y la salinidad (a mayor salinidad, mayor conductividad). Cuanto mayor es la conductividad, mayor es la atenuación de las señales de radio que pasan a través de ella, siendo muy elevada en agua de mar, del orden del dB por metro (L. Butler, 1987).

Por otro lado, en las comunicaciones tierra-agua, el cambio de medio introduce una atenuación adicional (atenuación por refracción), que en el agua de mar es muy alta, de unos 60 dB para bajas frecuencias (J. A. Butler, 1990)

Dado que la atenuación depende de la frecuencia, mediante el uso de frecuencias más bajas se puede mejorar el alcance, pero a costa de antenas de mayor tamaño y potencias de transmisión superiores (Milica Stojanovic, n.d.)

Comunicaciones subacuáticas basadas en señales acústicas

El medio subacuático presenta unas propiedades que favorecen el empleo de ondas acústicas en lugar de las ondas electromagnéticas. Las ondas sonoras y ultrasonoras pueden penetrar desde la superficie del mar hasta grandes profundidades debido a la baja atenuación que experimentan las señales acústicas, del orden del dB por km (Aparicio, García, Jiménez, Álvarez, & Ureña, n.d.).

No obstante, la velocidad de propagación de las ondas acústicas es cinco veces más lenta que las ondas electromagnéticas y puede variar entre los 1.400 a 1.600 metros por segundo. Estas variaciones se deben a los cambios de salinidad, temperatura y presión del agua del océano. Dado que estas variables dependen de las condiciones del lugar en un momento dado, la velocidad de propagación es variable tanto en espacio como en tiempo (Brekhovskikh & Lysanov, 1982).

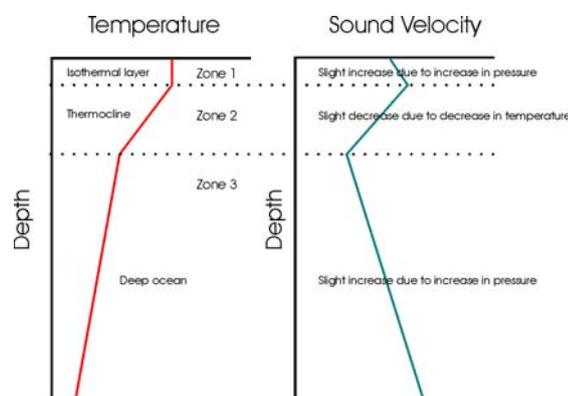


Figura 1.12 Perfil de la temperatura del agua y velocidad del sonido en función de la profundidad.

Por otro lado, la superficie y el fondo marino afectan a la correcta recepción de señales debido al enmascaramiento de las señales acústicas reflejadas. Dado que el mar no es un medio homogéneo, presenta variaciones de temperatura y densidad que modifican la trayectoria de las ondas afectando la velocidad de propagación, y dificultando el proceso de sincronización. Por otro lado, la velocidad de propagación, cinco veces menor que la luz, comporta tasas de transferencia mucho menores que las dos tecnologías anteriores (Milica Stojanovic, n.d.). Otros factores como el ruido (ambiental y causado por el hombre), el efecto Doppler y el multicamino dificultan la recepción de señales acústicas bajo el agua (M Stojanovic, 2008; William Shieh, 2009).

1.2.2 Suministro de energía eléctrica

Bajo el mar, las dificultades para la obtención de energía impiden que los sistemas descritos puedan operar de forma continua durante largos periodos, quedando limitados a la autonomía de sus baterías.

Existen algunas soluciones como el abastecimiento a través de sistemas flotantes situados en superficie, aunque no siempre son soluciones económicamente viables. En zonas o entornos próximos a tierra puede ser viable a través de la red de suministro eléctrico; en estos casos y para este tipo de sistemas también se han utilizado fuentes alternativas como generadores termoeléctricos o placas solares (Biomark, 2014).

Por otro lado, los observatorios submarinos cableados son otra alternativa de conexión. Estas plataformas proporcionan alimentación y comunicaciones a los equipos conectados en sus puertos, permitiendo además la transmisión de la información en tiempo real.

Actualmente se encuentran observatorios submarinos en EEUU (Mars), Canadá (Neptune y Venus), Japón (Donet), España (Obsea), ver Figura 1.13. Por lo general, están ubicados en zonas de especial relevancia geológica, física y/o química.

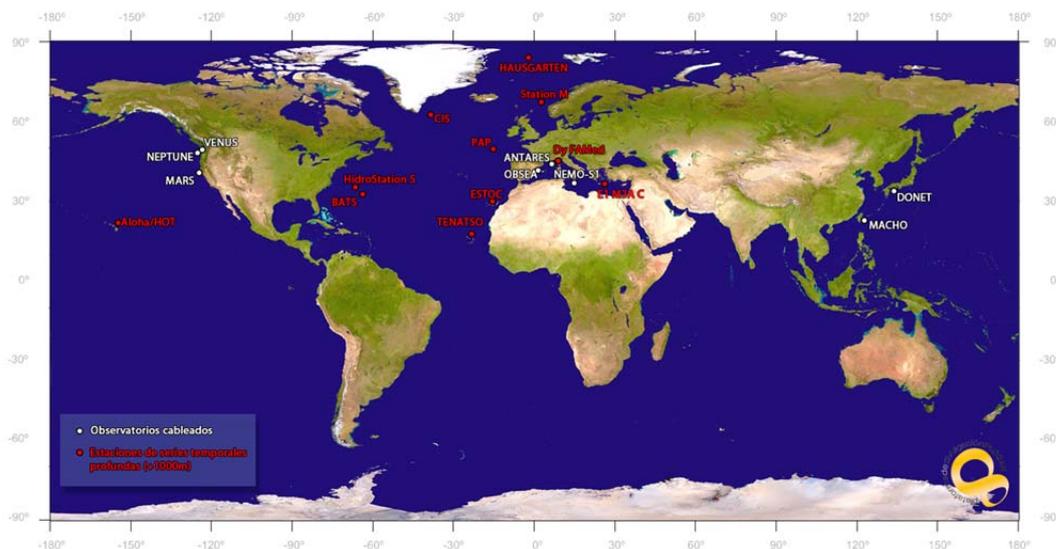


Figura 1.13 Localización de los principales observatorios submarinos. (Plocan, 2014).

1.2.3 Características del medio y de las especies

La luz es indispensable para la vida en el mar, lleva a cabo la fotosíntesis, produciendo materia orgánica que sirve de alimento a vegetales y animales. También permite la visión a los animales que presentan órganos fotorreceptores.

La fotoperiodicidad y la intensidad de la luz regulan diferentes funciones de las especies como su reproducción, migración, etc. Por otro lado, y tal como se ha comentado anteriormente, conforme la profundidad aumenta penetran menos las radiaciones. De forma general, se considera que los rayos del Sol no penetran a más de 300 m de profundidad.

Por otro lado, diferentes estudios demuestran la poca sensibilidad de los órganos visuales de muchas especies a la luz roja y a las longitudes de onda por encima de los 600 nm (Weiss, Lozano-Álvarez, Briones-Fourzán, & Negrete-Soto, 2006).

La bioincrustación es otro de los factores a tener en cuenta y sucede en zonas donde predomina la vida. Se inicia en el mismo momento en que se sumerge cualquier superficie, y progresa rápidamente: al final de la primera semana, ya se han adherido los nutrientes necesarios para permitir la presencia de colonizadores cada vez mayores. Existen ciertas pinturas que permiten contrarrestarla, aunque desfavorables para la vida marina al contener productos químicos tóxicos. En esta materia se han desarrollado polímeros orgánicos anti-incrustantes (Delauney, Compère, & Lehaitre, 2013). Pero, hasta ahora, los mejores resultados obtenidos han sido los publicados por la Universidad de Wisconsin-Madison y la Universidad Estatal de Pensilvania, donde mediante electrodos microscópicos (entre 8 y 25 micrómetros) y aplicando pequeñas descargas eléctricas, se ha demostrado una reducción de la acumulación de estos organismos en un 50 % (Perez, 2008).

La corrosión y las condiciones cambiantes del medio como las corrientes, las mareas y la turbidez son otros factores presentes y relacionados con esta materia.

1.3 Comparativa entre las tecnologías actuales

Los sistemas de monitorización identificados pueden clasificarse en tres tipos, los que utilizan dispositivos ópticos para capturar/medir su comportamiento, y los que emplean las comunicaciones por radiofrecuencia o acústicas para transmitir su identidad y actividad. A continuación se realiza un breve análisis de cada una de las tecnologías, identificando las áreas de trabajo de esta Tesis.

1.3.1 Monitorización con dispositivos ópticos

Esta tecnología o método de monitorización permite el estudio de especies sin contacto, siendo poco invasiva. No obstante, los dispositivos ópticos en el medio marino se

encuentran seriamente condicionados por el medio (turbidez y atenuación/ausencia de luz) y por la bioincrustación.

En esta categoría de dispositivos destacan las cámaras, las cuales se utilizan en laboratorio y en espacios abiertos a baja y gran profundidad. El consumo y autonomía de las mismas, limitan su utilización a varias horas de grabación. Para extender el tiempo de adquisición (toma de imágenes) se requiere una conexión cableada. Los observatorios submarinos cableados permiten que esta tecnología pueda operar durante largos periodos, proporcionando imágenes en tiempo real.

Debido a la absorción y dispersión de la luz, las cámaras requieren fuentes de iluminación externa. Aunque en instalaciones poco profundas pueda ser prescindible, la iluminación es necesaria para capturar las escenas durante los periodos nocturnos. Dado que niveles elevados de luz pueden dañar los órganos visuales de las especies, o modificar/alterar su comportamiento, deben utilizarse focos especiales trabajando a partir de las longitudes de onda correspondientes al rojo (Weiss et al., 2006).

Debido al principio de operación de los dispositivos ópticos, la bioincrustación afecta gravemente al rendimiento de esta tecnología, requiriendo sistemas automáticos de limpieza y/o un mantenimiento preventivo y continuo de los equipos. Sin embargo, en lugares controlados como los existentes en laboratorio (acuarios de experimentación) esta tecnología no presenta las dificultades anteriores y pueden realizarse un mantenimiento de los equipos con facilidad, sin costosos despliegues técnicos/logísticos. En estos entornos también se resuelven de forma indirecta los problemas relacionados con la alimentación y las comunicaciones, permitiendo una mayor operatividad.

Como se ha descrito, la medición de la actividad de especies a partir de detectores ópticos ha sido probada con fauna terrestre en exteriores y en laboratorio; y actualmente existen diferentes soluciones comerciales que utilizan esta técnica.

La mayoría de especies marinas son insensibles (sus órganos visuales) a las longitudes de onda del infrarrojo. Dicha particularidad resulta favorable para medir mediante emisores y receptores de infrarrojos la actividad y/o presencia de los individuos, sin alterar su comportamiento. Por otro lado, la luz infrarroja se atenúa rápidamente (en los primeros metros) en este entorno (Pegau, Gray, & Zaneveld, 1997). No obstante, en entornos de laboratorio (acuarios), el alcance puede ser suficiente, siendo uno de los puntos identificados y abordados en este trabajo de investigación.

Dado que los estudios requieren grandes series temporales de datos, la turbidez del agua puede provocar una variación de la señal medida y provocar una falsa detección. Por otro lado, durante las experimentaciones también pueden aparecer partículas que obstaculicen el par emisor-receptor; éstas pueden provenir de elementos desprendidos del acuario, o del propio animal (mudas). Por ello, para evitar falsas detecciones y contrarrestar estas situaciones, es necesario el estudio de diferentes mecanismos y algoritmos.

Para el estudio de especies marinas se emplean sistemas de filmación e iluminación costosos, capaces de soportar las condiciones del medio: estanqueidad y grandes presiones.

En entornos de laboratorio, las cámaras pueden instalarse fuera de los acuarios. Fruto de la evolución de esta tecnología y su diversificación para diferentes usos y aplicaciones, existe un grupo de cámaras de muy reducido coste: las cámaras web. Aunque éstas han sido diseñadas para videoconferencia y tienen prestaciones inferiores a las cámaras profesionales, pueden tener aplicación en esta área de trabajo (Bradley & Clarke, 2011). Cabe destacar las que además están provistas de iluminación infrarroja, punto destacado para recoger la actividad de la especie durante los periodos nocturnos, sin requerir elementos adicionales (focos o fuentes de luz). Con una baja inversión y mediante este tipo de cámaras pueden cubrirse múltiples zonas de análisis, o realizar diferentes experimentaciones al mismo tiempo: varios estudios en múltiples acuarios de forma simultánea. Siendo la segunda área identificada y estudiada en la presente Tesis.

1.3.2 Monitorización con dispositivos de radiofrecuencia

Los dispositivos identificados de esta tecnología son viables para especies que emergen a la superficie o que habitan en aguas de poca conductividad (agua dulce). En el medio marino esta tecnología está limitada por el alcance debido a la gran absorción de las señales electromagnéticas. El alcance puede mejorarse utilizando frecuencias más bajas, lo que conlleva antenas más grandes, punto desfavorable en esta área, dado que los transmisores son transportados por los animales.

Para poder estudiar a especies de reducido tamaño el transmisor precisa ser pequeño y liviano, características que condicionan la autonomía o tiempo de vida del dispositivo. Dado que el consumo más importante se debe a la transmisión, disminuyendo la cadencia de envíos es posible alargar el tiempo de vida de éstos. Es una solución utilizada para alargar la duración de la experimentación, no obstante es válida para el estudio de especies cuya actividad varía lentamente (no recorren grandes distancias o lo hacen de una forma muy lenta), o cuando interesa conocer el desplazamiento de los individuos con poca precisión.

La tecnología RFID, aunque en su versión pasiva (tags pasivos) no permite grandes alcances, presenta una característica destacada e interesante en esta área, los tags se “alimentan inalámbricamente” a través del campo magnético de los lectores. La reducción del tamaño físico del chip y el despliegue masivo de los mismos en muchas y diferentes áreas, ha permitido reducir sus costes, punto también favorable. Esta tecnología lleva utilizándose durante más de una década para identificar especies. Gracias a la estandarización y regulación de RFID, para la identificación de los tags pueden emplearse integrados y lectores comerciales soportando dichas normas. Esta tecnología se utiliza para identificar manualmente a los individuos y de forma automatizada para estudiar la migración de peces en ríos.

Aunque en entornos marinos esta tecnología está muy limitada por el alcance, en entornos de laboratorio y para el estudio de especies bentónicas (que se mueven por el

fondo), el alcance puede ser suficiente para permitir su localización y seguimiento, siendo la tercera área de trabajo en esta investigación.

1.3.3 Monitorización con dispositivos acústicos

Las ondas acústicas sufren una baja atenuación y permiten alcanzar grandes distancias. No obstante, existen diferentes factores que dificultan la recepción correcta de señales: el multicamino, la reflexión de la señal (ecos), el efecto Doppler, la variación temporal y espacial del canal (Caley & Duncan, 2013; Kinsler, Frey, Coppens, & Sanders, 1999).

En monitorización de especies destacan diferentes dispositivos acústicos que convenientemente fijados al animal (monitorización con contacto), y utilizando hidrófonos especiales permiten localizar y obtener datos de la especie.

Estos dispositivos tienen reducidas dimensiones y pueden utilizarse para especies de pequeño tamaño. Están dotados de una electrónica que, alimentada por una pequeña batería, tiene la capacidad de transmitir datos acústicamente periódicamente. Para aumentar el tiempo de vida de los dispositivos, y al igual que los dispositivos por radiofrecuencia, la cadencia de las transmisiones es un factor que conviene ser ajustado en función de las necesidades del estudio (mayor duración o resolución de los datos).

Los fabricantes de estos dispositivos emplean protocolos propietarios, así como modulaciones y frecuencias de emisión diferentes impidiendo que puedan interconectarse transmisores e hidrófonos de marcas diferentes, por ejemplo, Vemco utiliza 96 y 180 KHz, mientras que Lotek opera a 76 y 200 kHz.

Recientemente, la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) está siendo aplicada dentro del área de las comunicaciones acústicas subacuáticas debido a su robustez frente al multicamino y sus mayores tasas de transmisión (Akyildiz, Pompili, & Melodia, 2005; Heidemann et al., 2006; Nakashima, Matsuoka, & Yoshimura, 2006).

Con objeto de acercar e impulsar los avances en materia de comunicaciones acústicas (Ribas, Sura, & Stojanovic, 2010; Vadde, Indushree, & Sequeira, 2011) a estos sistemas, la cuarta propuesta plantea el estudio y propuesta de una plataforma de comunicación OFDM apta para estos entornos.

1.4 Objetivos y estructura del trabajo de Tesis

Dadas las motivaciones expuestas anteriormente, la presente Tesis aspira a reducir el vacío y las limitaciones tecnológicas localizadas en esta área, aportando nuevos métodos para la monitorización de especies marinas tanto en acuarios como en espacios abiertos.

La investigación aborda tres líneas de investigación, basadas en las tres tecnologías para la monitorización de especies identificadas: óptica, radiofrecuencia y acústica. Tras

estudiar los sistemas y las tecnologías actuales, y habiendo analizado las ventajas e inconvenientes de cada una de ellos, los objetivos del presente trabajo son los siguientes:

- Evaluación de los detectores de infrarrojos para la monitorización de especies marinas en acuarios de experimentación. Comprende la propuesta e implementación de una plataforma de medida apta para este entorno, así como el estudio y la evaluación de algoritmos que contrarresten las falsas detecciones de actividad producidas por alteraciones del medio.
- Estudiar la viabilidad de las cámaras de bajo coste en acuarios de experimentación, así como la gestión de múltiples cámaras de este tipo en estos entornos.
- Evaluación de la tecnología RFID para la localización y seguimiento de especies marinas en acuarios de experimentación. Comprende la propuesta e implementación de una plataforma de localización y seguimiento de especies para este entorno.
- Propuesta y desarrollo de una plataforma abierta de comunicación acústica apta para la monitorización de especies, que permita la evaluación de nuevos protocolos y métodos en materia de comunicaciones acústicas, capaz de implementar una comunicación OFDM.

Este trabajo de investigación se estructura en cinco capítulos. En el primero, se detallan las motivaciones de esta investigación y el estado del arte de los sistemas actuales, describiendo las ventajas e inconvenientes de cada metodología, y se enmarcan los diferentes objetivos de esta Tesis.

En el segundo capítulo se presenta la investigación realizada con los detectores infrarrojos para su utilización en laboratorio. En ese capítulo se propone y desarrolla un sistema de medida para la monitorización de especies (de agua dulce o marina) en acuarios de experimentación. Comprende el desarrollo y evaluación de la propuesta, así como la implementación y validación de algoritmos específicos para evitar falsas detecciones. También se estudia la viabilidad de las cámaras de bajo coste en entornos de laboratorio, presentando una solución para la adquisición con múltiples cámaras. Las propuestas y desarrollos se evalúan en múltiples ensayos realizados con cigalas en doce acuarios experimentales.

En el tercer capítulo se realiza la evaluación de la tecnología RFID para su utilización en acuarios. Comprende el planteamiento y desarrollo de un sistema modular RFID para la localización, identificación y seguimiento de especies en acuarios. El sistema propuesto y desarrollado ha sido evaluado en un ensayo realizado con cuatro cigalas en un acuario de experimentación.

Capítulo 1

En el cuarto capítulo se propone y desarrolla una plataforma acústica para la monitorización de especies marinas para espacios abiertos. Para su consecución se evalúa una plataforma comercial, tanto en laboratorio como en el mar (con y sin especies), se estudia la absorción de diferentes materiales y se propone y desarrolla un prototipo de transductor acústico sumergible. Finalmente, se realiza un ensayo en el mar donde se evalúan las prestaciones de emisión de la propuesta.

En el quinto capítulo se resumen las conclusiones y se resaltan las aportaciones de este trabajo de Tesis. Asimismo se proponen y plantean las futuras líneas de investigación.

Capítulo 2

Monitorización de especies mediante dispositivos ópticos

En este capítulo se evalúan los detectores de presencia infrarrojos y las cámaras web para el estudio y monitorización de especies en acuarios de experimentación.

La investigación se divide en cuatro partes; en la primera, se estudia la longitud de onda más adecuada (dentro del rango de los infrarrojos) para trabajar en entornos subacuáticos, proponiendo diferentes emisores, receptores y circuitos para realizar la detección de presencia. Con los elementos propuestos se evalúa el alcance y la absorción en el agua. Posteriormente se identifican las ubicaciones de los transductores para realizar las medidas, y se propone un método para calcular el número de emisores/receptores necesarios.

En la segunda parte se evalúan las cámaras web para su utilización en entornos de laboratorio, presentando los métodos y las consideraciones para trabajar con múltiples cámaras de este tipo.

En la tercera y cuarta parte de esta investigación se presenta y desarrolla un sistema de medida basado en detectores y cámaras, evaluándolo en acuarios de experimentación con especies.

2.1 Estudio y evaluación de los detectores de presencia

En este apartado se analizan los detectores de presencia infrarrojos para la medición de la actividad de especies en acuarios de experimentación. Tras estudiar la longitud de onda más adecuada para este medio y detallar los emisores, receptores, así como los circuitos de acondicionamiento y excitación que se proponen, se evalúa la absorción de esta radiación en agua dulce y salada, y en función de la profundidad.

2.1.1 Emisor, receptor y circuitos de acondicionamiento

Tal como indica la norma (ISO 20473, 2007), de acuerdo a la longitud de onda, el rango del infrarrojo (IR, infrared) se clasifica en tres zonas: infrarrojo cercano (de 780 nm a 3000 nm), infrarrojo medio (de 3000 nm a 50 μm) e infrarrojo lejano (de 50 μm a 1000 μm).

Bajo el agua, el infrarrojo presenta un coeficiente de absorción creciente con su longitud de onda, ver Figura 2.1. Debido a ello, en entornos subacuáticos, la zona o región más apropiada para conseguir un mayor alcance es el infrarrojo cercano.

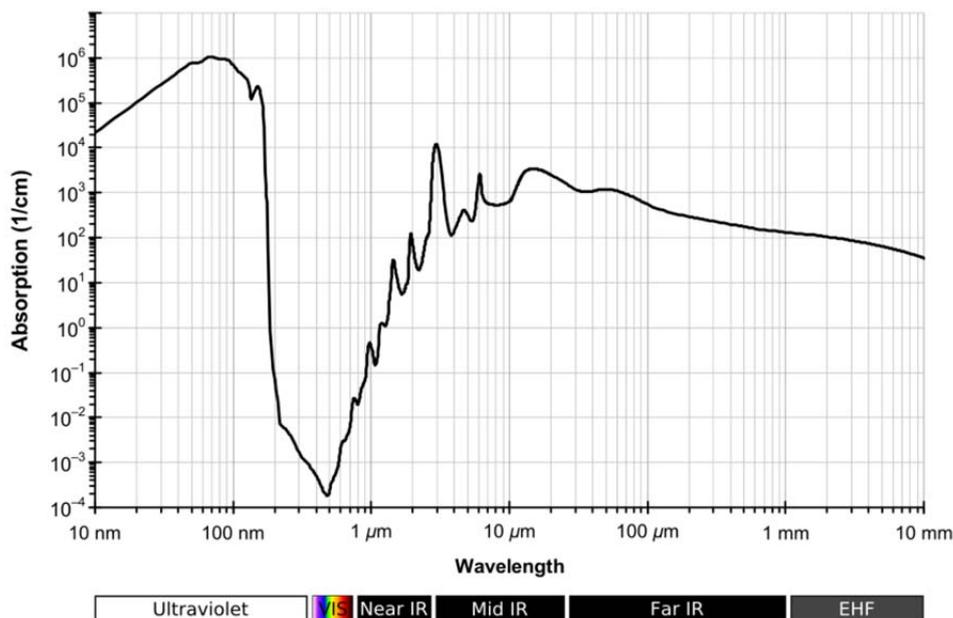


Figura 2.1 Absorción en el agua en función de la longitud de onda, (Kebes, 2008).

Emisor infrarrojo y driver

Después de realizar una comparativa entre diferentes emisores y con objeto de simplificar el proceso de enfoque del par emisor-receptor durante los ensayos, se propuso la utilización del emisor SFH485, que presenta el mayor ángulo de radiación de los estudiados, ver Tabla 2.1. En esta elección primó la sencillez para la realización de los ensayos (enfoque de los transductores); tal como se demuestra más adelante, este modelo cubrió el alcance para las dimensiones del acuario con el que se realizaron las pruebas.

Tabla 2.1 Comparativa entre diferentes emisores de infrarrojos.

Modelo	Intensidad resplandeciente	Ángulo de intensidad media	Longitud de onda
HIRL5010	100 mW/sr a 100 mA	$\pm 6^\circ$	850 nm
SFH484-2	80 mW/sr a 100 mA	$\pm 8^\circ$	880 nm
SFH4512	40 mW/sr a 100 mA	$\pm 10^\circ$	950 nm
SFH485	25 mW/sr a 100 mA	$\pm 20^\circ$	880 nm

Para polarizar al emisor de infrarrojos se empleó un transistor bipolar (BC560) que actuó como interruptor (saturación o corte). El circuito se fijó para proporcionar una corriente de 22 mA al emisor (5 veces por debajo de su intensidad máxima permitida). Las pruebas de alcance realizadas, y que se presentan más adelante, validan este circuito para el alcance fijado (dimensión del acuario y distancia entre el par emisor-receptor).

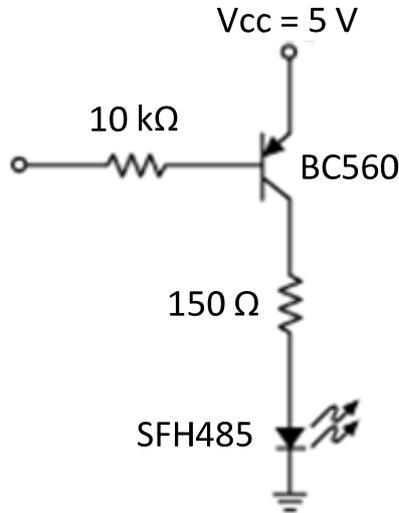


Figura 2.2 Driver utilizado para las medidas.

Receptor infrarrojo y circuito de acondicionamiento

Para la recepción se propuso un fotodiodo con filtro de rechazo a la banda visible. Esta decisión estuvo motivada para evitar un offset o saturación de la señal debida a la luz visible presente en las pruebas. Conviene señalar que los acuarios de experimentación disponen de sistemas de iluminación que emulan los periodos de luz para mantener y controlar los ciclos circadianos de los animales.

El receptor empleado fue el SFH203FA de Osram, el cual disponía de este filtro y trabajaba en la misma longitud de onda que el emisor anteriormente propuesto (880 nm).

El acondicionamiento se realizó con un amplificador operacional en configuración conversión corriente-tensión (amplificador de transimpedancia), ver Figura 2.3.

Fue implementado con el amplificador operacional TLC2274 debido a sus características de bajo ruido ($9\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) y baja corriente de Bias (110 pF); características relevantes para estos entornos: la débil corriente en el receptor (debida a la gran absorción de la radiación en este medio) necesita ser amplificada, y niveles elevados de ruido y/o corriente de Bias pueden, tras ser amplificados, enmascarar o saturar la salida del amplificador. La resistencia del circuito se fijó a $1\text{M}\Omega$; su valor fue adecuado para realizar las medidas de alcance que se presentan en el siguiente apartado.

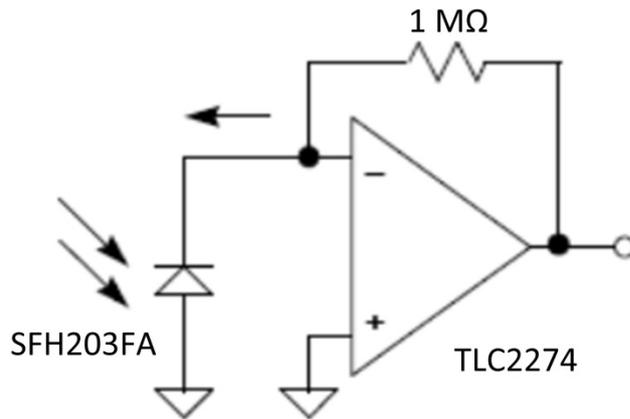


Figura 2.3 Acondicionamiento del receptor de infrarrojos.

2.1.2 Análisis de la absorción

Con los dispositivos propuestos se realizaron diferentes pruebas experimentales para medir la absorción de la radiación infrarroja en el agua. Los ensayos se efectuaron en un acuario de metacrilato (grosor de sus paredes: 10 mm), y posicionando los transductores según se indica (Figura 2.4):

- Emisor en la parte superior del acuario, enfocando hacia abajo
- Receptor en la base del acuario, enfocando hacia arriba

Las pruebas experimentales se realizaron primero con el acuario vacío, y las otras con agua dulce y salada (marina). Para los ensayos con agua, la metodología fue la misma: por cada incremento de 10 mm de la columna de agua, se midió la señal del receptor a la salida del amplificador (se realizó el promedio de 20 medidas consecutivas).

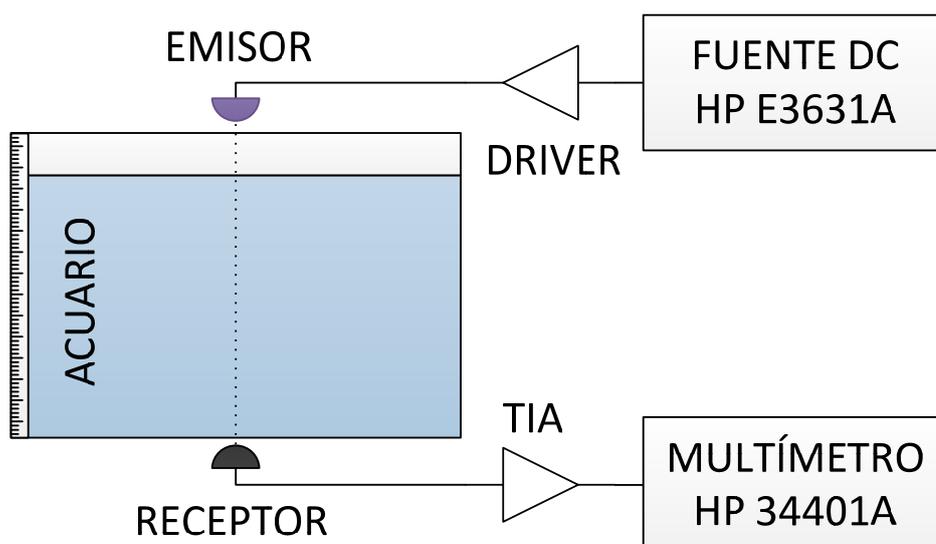


Figura 2.4 Esquema de medida para las pruebas de absorción, utilizando el circuito de emisión (driver) y recepción (amplificador de transimpedancia) planteados.

Las mediciones se iniciaron con el acuario vacío y finalizaron cuando se alcanzó una columna de agua de 200 mm. Por cada incremento de la columna de agua se esperó un minuto para conseguir una estabilización del agua en el acuario. Los ensayos se realizaron en las instalaciones del Instituto de Ciencias del Mar del CSIC; el agua marina procedió de los circuitos de la Zona de Acuarios Experimentales, y el agua dulce de las instalaciones de agua potable.

En las pruebas no se apreció una alteración o saturación de señal debida a la luz de la sala donde se realizaron las pruebas (fluorescentes), por lo que la señal recibida no estuvo enmascarada y correspondió con la entregada por el emisor de infrarrojos.

A partir de las medidas realizadas en aire se analizó la absorción en función del nivel de la columna de agua, ver Figura 2.5. Los resultados demostraron una atenuación creciente con la columna de agua, y muy similar entre el agua dulce y salada. Aun a pesar de la gran atenuación registrada, el nivel de señal recibido (con el acuario lleno) era aceptable: rondó 1,2 V.

Así, por tanto, los componentes y los circuitos de acondicionamiento propuestos demostraron ser adecuados para la detección de presencia bajo el agua, con el acuario utilizado, tanto con agua dulce como salada.

Para acuarios con mayores dimensiones (mayor distancia entre emisor y receptor) se recomienda ajustar la corriente entregada por el driver y/o utilizar emisores de mayor potencia (intensidad resplandeciente); y en caso necesario, ajustar la electrónica de acondicionamiento del receptor.

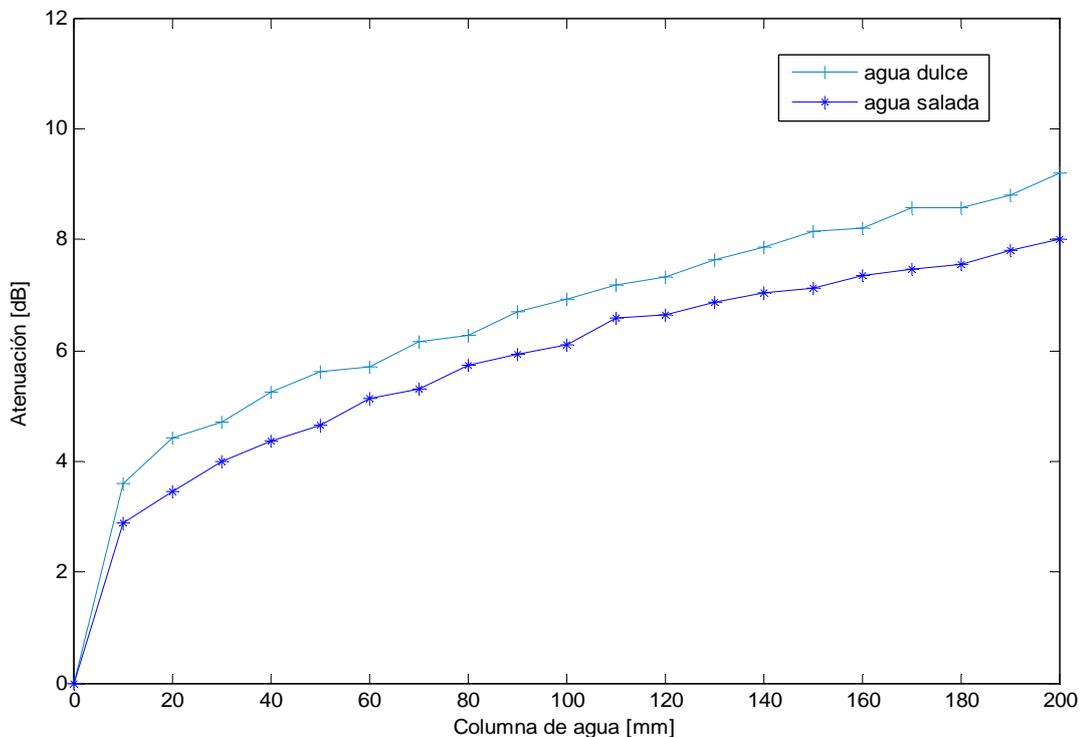


Figura 2.5 Atenuación medida en función de la columna de agua.

2.1.3 Disposición y número de transductores

En este apartado se estudia la posición y número de transductores necesarios para medir la actividad de las especies en los acuarios. En la primera parte se identifican las configuraciones de instalación posibles, discutiendo las ventajas e inconvenientes de cada disposición. Después se plantea una metodología para calcular el número de transductores necesarios.

Disposición de los transductores

Se identifican dos posibles ubicaciones de los transductores. Como se observa en la Figura 2.6 pueden ubicarse fuera del acuario sobre el plano horizontal o vertical. Ambas disposiciones son viables para medir la presencia de la especie en diferentes partes o zonas del acuario; sin embargo, cada una presenta ventajas e inconvenientes.

Disposición horizontal:

- Se requieren menos transductores para detectar el paso de la especie. El caso más sencillo es un par emisor-receptor por cada zona donde se desea detectar el paso del animal.
- Permite la detección de especies tanto bentónicas (se mueven por el fondo) como pelágicas (se mueven libremente), aunque para las últimas se requieren más transductores.
- Poca robustez frente a la presencia de cuerpos extraños (mudas u objetos desprendidos del acuario). Es necesario más transductores (redundancia) para salvar estas situaciones.
- La instalación de los transductores se realiza a los lados del acuario, pero la altura de colocación depende de las características de la especie.
- Los transductores se encuentran poco expuestos, menor mantenimiento.

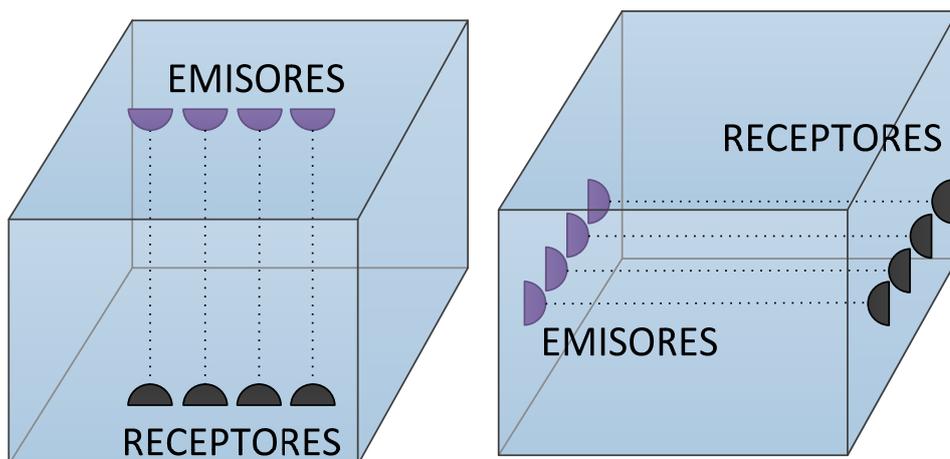


Figura 2.6 Disposición de los transductores fuera del acuario. Izquierda, disposición vertical; derecha, disposición horizontal.

Disposición vertical:

- Se requieren más transductores para detectar el paso de la especie. Éstos deben distribuirse en barreras de detección cubriendo las diferentes zonas de paso.
- Permite la detección de especies tanto bentónicas como pelágicas.
- Robustez frente a fallos de los transductores: se pueden aplicar algoritmos para descartar los transductores (de las barreras) que no miden correctamente.
- La instalación es más sencilla que en la disposición horizontal: únicamente se deben enfrentar las barreras de emisores y receptores en los puntos requeridos.
- Los transductores situados en la parte superior del acuario están más expuestos a las condiciones del medio que los ubicados en la parte inferior.

Número de transductores

Mientras que la configuración horizontal requiere tantos transductores como puntos o zonas de medida, la configuración vertical exige cubrir toda la zona de paso con transductores dispuestos en barreras. En este apartado se presenta una metodología para calcular el número de receptores y emisores necesarios con esta disposición. Para el cálculo se han planteado las siguientes consideraciones preliminares:

- Las barreras cubrirán el ancho del acuario.
- La separación entre transductores debe ser inferior al ancho de la especie. De esta forma no existe una forma de que el animal sortee la barrera.
- La distancia entre receptores puede reducirse respecto al punto anterior como estrategia para reducir posibles fallos (redundancia de receptores).
- Dependiendo del ángulo de radiación de los emisores y la altura de colocación de las barreras, si la iluminación cubre a todos los receptores, puede evitarse la redundancia de emisores.

La metodología propuesta para calcular el número de transductores necesarios es la siguiente:

- El número de receptores y transmisores es fijado teniendo en cuenta la anchura del acuario y de la especie. Dependiendo de la altura de colocación de los transductores, puede requerirse un menor número de emisores (debido al ángulo de radiación, un emisor puede estar cubriendo varios receptores); no obstante, si los emisores se fijan teniendo de acuerdo a los principios anteriores (anchura del acuario y la especie), el sistema de detección es independiente de la distancia de separación de los transductores: en el peor caso (emisores muy cerca de los receptores), cada emisor estará enfrentado con un receptor.
- Para ofrecer robustez en los receptores se puede añadir redundancia. Se puede duplicar el número de receptores y/o emisores. Dependiendo de la altura de colocación de la barrera de emisores, se puede evitar la duplicación de emisores, reduciendo el coste y el consumo (altura para que el ángulo de radiación de los emisores cubran los receptores redundantes).

2.2 Adquisición de imagen

En este apartado se han evaluado las cámaras web USB para su aplicación en entornos con acuarios experimentales. Se ha estudiado tanto su viabilidad, como la posibilidad de trabajar con múltiples cámaras de este tipo de forma simultánea.

Tal como se observó, no todos los fabricantes de estas cámaras ofrecen una lista completa de sus características, esto resulta un inconveniente para su selección.

Si las distancias lo permiten, el conexionado puede realizarse directamente: cámara contra el equipo de control. En caso contrario, o cuando el número de cámaras es superior al de puertos disponibles del equipo, pueden utilizarse concentradores USB. Tal como cita la norma, mediante concentradores puede conseguirse una distancia máxima de 30 metros (Axelson, 2005).

Los ensayos se realizaron con múltiples cámaras USB provistas de seis leds infrarrojos integrados en su carcasa, permitiendo la captura de escenas a 0 lux, ver Figura 2.7. Las características más destacadas de esta cámara son las siguientes:

- Lente y sensor: 6 mm, CMOS 1/4, 350K píxeles.
- Sensor: Foco: 30 mm al infinito.
- Resolución máxima: 640 x 480.
- S/N > 42 dB.
- Consumo: DC 5 V @ 65 mA.
- Interfaz USB 2.0 (480 Mbps).
- Control de exposición automático.
- Compatible con drivers TWAIN, VFW y Direct Show.



Figura 2.7 Modelo de la cámara USB utilizada en las pruebas.

2.2.1 Adquisición con una y múltiples cámaras

Se evaluaron dos métodos para la adquisición de imagen de forma automatizada:

- Entorno Matlab y Image Acquisition Toolbox.
- Entorno LabVIEW y la API (Application Programming Interface) IMAQdx.

El primer ensayo consistió en realizar una captura automatizada controlada por tiempo. Ambos entornos demostraron su correcta operación garantizando las capturas y la estabilidad del sistema.

El segundo ensayo consistió en repetir el procedimiento anterior poro adquiriendo desde múltiples cámaras. Para esta prueba se conectaron cuatro cámaras idénticas a un concentrador USB (ver Figura 2.8).

Esta segunda prueba no fue superada por el entorno LabVIEW demostrando una fuga de memoria (memory leak) en las funciones de la API IMAQdx. Este problema fue advertido por National Instruments (NI, 2010).

Matlab y la Image Acquisition Toolbox demostraron un correcto funcionamiento operando con múltiples cámaras de forma continua.

Dada la capacidad de LabVIEW para ejecutar scripts en Matlab, se hizo un tercer test para evaluar la posibilidad de trabajar con ambos entornos. La aplicación desarrollada para la prueba y que se ejemplifica de forma sencilla en la Figura 2.9 fue evaluada para adquirir de una y múltiples cámaras. Ofreció resultados correctos, aportando la prestación que inicialmente LabVIEW no podía conseguir.



Figura 2.8 Conexión para la adquisición mediante múltiples cámaras.

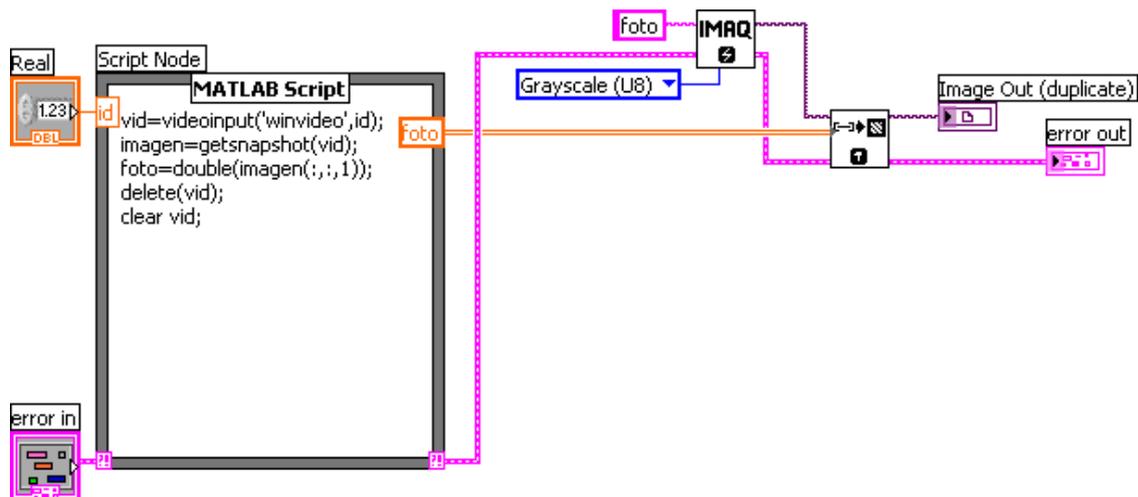


Figura 2.9 Adquisición de imagen en LabVIEW a través de Matlab.

2.2.2 Consideraciones para trabajar con múltiples cámaras

Se identificó una desventaja cuando se emplearon múltiples cámaras idénticas (mismo modelo/fabricante y driver), y es la necesidad de realizar una primera adquisición para poder asociar el nombre de la cámara (o su identificador de manejo) con la escena que está capturando (acuario donde se ha instalado). Si posteriormente se intercambian las conexiones este proceso debe repetirse.

Dado que la función (hwInfo.DeviceInfo(i).DeviceName) de la toolbox de Matlab permitió extraer el nombre de la cámara, se propuso forzar su nombre durante la instalación del driver, evitando que todas las cámaras adoptasen el mismo nombre por defecto. Esta planteamiento fue probado modificando el parámetro “UsbDeviceDesc” del fichero del driver, ver Figura 2.10.

El resultado fue favorable y repitiendo el procedimiento por cada cámara se les pudo asignar un nombre diferente. Mediante este método, independientemente de la toma donde se conecten, la asociación de su posición (escena que captura o acuario donde se ha instalado) queda implícita a su nombre, y es posible acceder a ella inequívocamente.

```

:-----
: Localizable
:-----
CameraClassName="Camera device"
SX="sonix"
SXTIMfg=""
UsbDeviceDesc = "USB PC Camera"
SN.ExtensionDLL="vsnpstd"
SUI102DefaultPath = "System\Sonix\PCCAM\snpstd"
DefaultSettingPath = "System\Sonix\PCCAM\snpstd\Defaultsettings"
RunOncePath = "SOFTWARE\Microsoft\windows\CurrentVersion\RunOnce"
RunPath = "SOFTWARE\Microsoft\windows\CurrentVersion\Run"
UninstallRegistryPath = "Software\Microsoft\windows\CurrentVersion\Uninstall\snpstd"
SnapshotChanged="Snapshot Changed Event"
PropPage_CustomCameraProp="Custom Camera Property Page"
Plugin_CustomCameraProp= "WDM Custom ICustomCamera interface handler"
SrcDiskId = "PCCam Installation Disk"

```

Figura 2.10 Modificación del nombre de la cámara.

2.2.3 Pruebas realizadas en el acuario de experimentación

Se realizaron pruebas en uno de los acuarios de experimentación para evaluar la captura de las imágenes en total oscuridad. En esta prueba se instaló una de las cámaras en un acuario y se buscó la mejor ubicación.

Debido a la reflexión de la luz de sus leds sobre las paredes del acuario y el agua, se experimentó una limitación de su ubicación. Las mejores posiciones se encontraron en la parte superior del acuario (captura cenital) y en los laterales del acuario, ver Figura 2.11.

Así, aun a pesar que el foco de iluminación integrado en la cámara permite reducir la complejidad de la instalación evitando la incorporación de un foco de luz externo, los reflejos limitan la ubicación/posición de la cámara durante la experimentación. La posición cenital es la que se recomienda. Para esta posición se debe analizar previamente la altura de colocación de la cámara, sopesando el ángulo de visión de ésta y la escena que debe capturar.

Las capturas realizadas a oscuras tuvieron buena calidad de imagen, ver Figura 2.12. No obstante, y a pesar que la cámara integraba su propio foco de luz, se pudo observar la dependencia de la iluminación; la utilización de focos externos puede ayudar a mejorar la uniformidad de la iluminación.

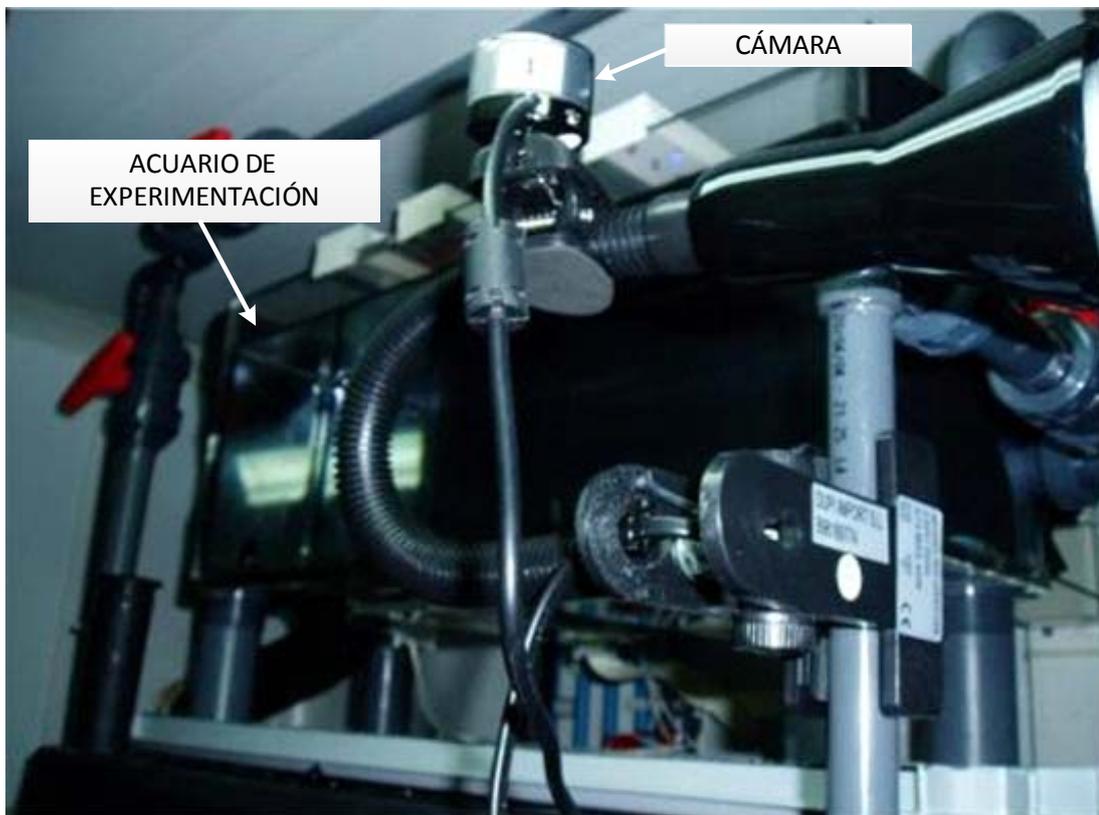


Figura 2.11 Instalación de la cámara en una posición lateral.

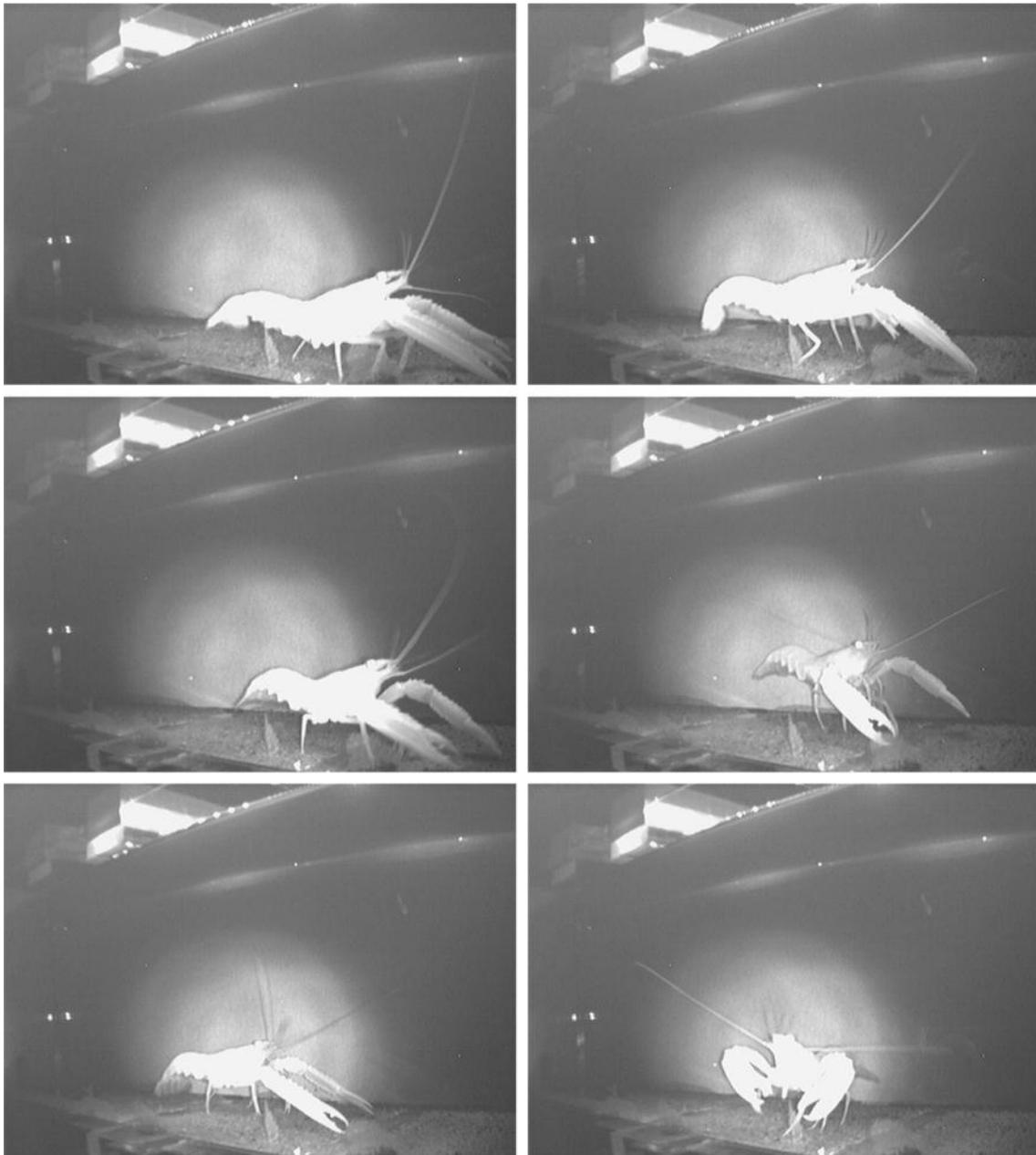


Figura 2.12 Capturas realizadas en un acuario de experimentación.

2.3 Plataforma de medida propuesta

Después de validar los detectores de presencia, en este apartado se propone y presenta una arquitectura hardware para la utilización de este método de medida en acuarios de experimentación.

Inicialmente se realiza una discusión de los requisitos y necesidades en estos entornos. Posteriormente se propone la interfaz de comunicaciones y el sistema de alimentación, y su arquitectura.

2.3.1 Planteamiento

En entornos de experimentación en laboratorio se requieren sistemas flexibles y con capacidad de ampliación, de esta forma no están limitados a un determinado tipo de estudio o configuración. En estos entornos también se requiere la presencia de sistemas de iluminación que emulen los ciclos día y noche durante los experimentos con animales, ver Figura 2.13.

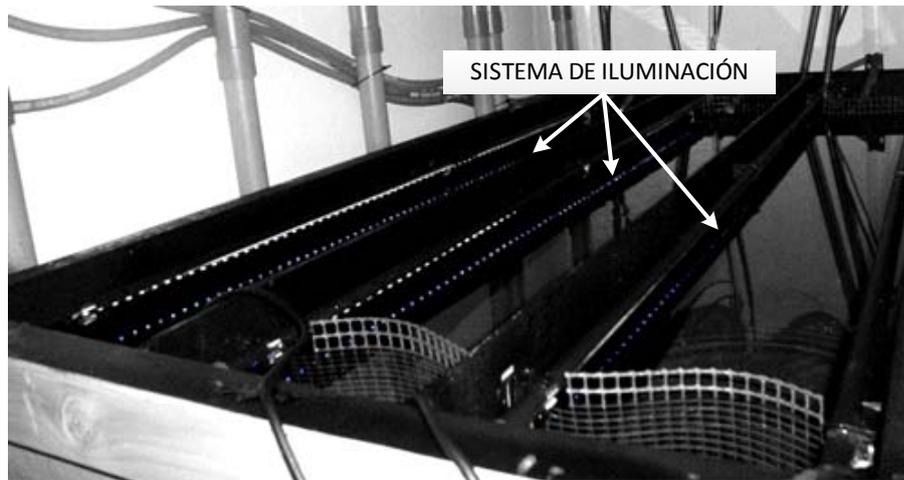


Figura 2.13 Sistema de iluminación diurno compuesto por múltiples leds azules en un acuario de experimentación. Cortesía del Instituto de Ciencias del Mar, CSIC.

Estas consideraciones se han tenido en cuenta en la propuesta que se presenta, basada en dos diseños: sistema de adquisición y sistema de iluminación. El primero se encarga de adquirir el nivel de señal de los receptores; el segundo de acondicionar los emisores y emular el ciclo de luz diurno.

Ambos diseños son gobernados por un microcontrolador de propósito general que se comunica con un equipo central a través de una interfaz de comunicaciones, permitiendo procesar y guardar los datos adquiridos.

Se estudiaron diferentes sistemas de comunicaciones para simplificar el conexionado y permitir la utilización de múltiples réplicas del mismo diseño sobre la misma interfaz. Para seleccionar el más adecuado se estudiaron aspectos como la alimentación y la sencillez de conexión.

2.3.2 Alimentación y comunicaciones

Aunque hoy en día existen diferentes interfaces de altas prestaciones, todavía es muy común encontrar equipos y sistemas que mantienen el estándar RS232. Esta interfaz, aunque es eficaz, presenta algunas características que la condicionan: baja velocidad, tamaño de los conectores, requiere configuración, etc.

En este caso particular de estudio, resulta apropiado que los diferentes dispositivos conectados puedan instalarse y configurarse de forma rápida y sencilla. Aunque existen diferentes interfaces cableadas e inalámbricas que mejoran las prestaciones de la interfaz RS232, como USB (Universal Serial Bus), Bluetooth, Zigbee, Ethernet o WiFi, no todas implementan mecanismos de instalación y/o configuración sencillos.

Una interfaz inalámbrica puede resultar interesante en los entornos de experimentación por dos motivos:

- Flexibiliza la instalación.
- Reduce la complejidad y el tiempo de la instalación.

También resulta una interfaz adecuada si el número de dispositivos de la instalación es elevado. Sin embargo, para un funcionamiento continuo y durante largos periodos, requisitos en esta área de trabajo, es necesaria una instalación cableada.

Con objeto de reducir la complejidad de la instalación, resulta interesante la utilización de interfaces que suministren por el mismo cable la alimentación. Es el caso de USB y Ethernet, en su versión PoE (Power over Ethernet).

Por un lado, la interfaz USB en su versión 2.0 es capaz de ofrecer 2,5 W (5 V @ 500 mA) de potencia por puerto y velocidades de transferencia de hasta 480 Mbps (Axelson, 2005). Por otro, Ethernet IEEE 802.3 es capaz de ofrecer velocidades de hasta 1 Gbps. En la norma IEEE 802.3af se describe la máxima potencia que pueden suministrar las líneas de alimentación de su versión PoE (IEEE, 2012): 15,4 W (48 V @ 400 mA o 44 V @ 350 mA).

Una relativa ventaja de USB respecto a Ethernet es el coste de los transceptores, conectores, cables y elementos de conectividad y expansión, ver Tabla 2.2. Además, USB implementa de facto la tecnología plug-and-play (enchufar y usar), facilitando la instalación y uso, puntos requeridos en esta área de trabajo. Por ello, USB fue la interfaz escogida para el desarrollo de la propuesta.

Tabla 2.2 Comparativa entre las interfaces USB y Ethernet. Precios orientativos a proveedores electrónicos e informáticos durante el año 2013.

	USB (2.0)	Ethernet (PoE)
Velocidad	480 Mbps	1 Gbps
Potencia que maneja	2,5 W (5 V @ 500 mA)	15,4 W (48 V @ 400 mA o 44 V @ 350 mA)
Coste transceptor	6 € (FT232BM USB a UART)	55 € (Xport Lantronix Ethernet a UART)
Coste cables	4 € (cable USB 2.0)	6 € (cable 10 m categoría 5)
Coste expansión	25 € (concentrador USB de 7 puertos)	40 € (switch 5 puertos)

Consideraciones de la interfaz USB

La interfaz USB provee 5V a través de su puerto y soporta un máximo de 127 dispositivos conectados mediante concentradores, permitiendo anidar en cascada hasta 4 de éstos. La norma fija la longitud máxima del cableado a 5 metros, por lo que la distancia máxima entre un dispositivo y el host puede llegar hasta 25 m.

Algunos microcontroladores o procesadores embebidos soportan la interfaz USB. Los que no lo soportan pueden hacer uso de los conversores de interfaces. El integrado FT232BM de la empresa Future Technology Devices International Ltd. (FTDI, 2013a) es uno de ellos, y fue evaluado/utilizado en la propuesta.

Validación y pruebas con la interfaz USB

Como se ha descrito, la facilidad de instalación y configuración son puntos interesantes en este tipo de entornos. Desde un terminal, el chip FT232BM puede ser visto como un puerto serie virtual o un dispositivo USB, existiendo dos métodos para manejar el dispositivo (FTDI, 2010):

- A través del driver Virtual Com Port (VCM) el dispositivo es visto como un puerto COM, y se puede acceder a él normalmente a través de aplicaciones que puedan manejar el puerto serie.
- A través del driver D2XX y la DLL (Dynamic-link Library) facilitada por el fabricante. Esta metodología permite acceder a las características propias de la interfaz USB, permitiendo acceder al nombre asignado al dispositivo.

Mediante el primer método, el host puede conectarse a los dispositivos conectados pero no puede identificarlos. Esta limitación puede resolverse aplicando soluciones de interoperabilidad en el software de los dispositivos. No obstante, el segundo método (driver D2XX) permite de facto la identificación de los dispositivos sin modificar el firmware del dispositivo desarrollado. La asignación de nombres a los dispositivos y la capacidad de identificarlos es una característica interesante en esta área de aplicación, y permite:

- Reconocer a dos dispositivos con idéntico hardware (réplicas) o con el mismo sistema de comunicaciones (mismo chip conversor).
- Reconocer a los dispositivos independientemente de la toma donde se hayan conectado (es posible intercambiar el conexionado sin requerir una reconfiguración del software que los maneja).

Dado que el driver D2XX cumplió los objetivos planteados (facilitar la flexibilidad y el manejo de los dispositivos) se evaluó este método. La prueba se realizó mediante dos montajes como el de la Figura 2.14. Se utilizó el conversor FTI232BM y, tal como indicó su hoja de características, una memoria EEPROM (93LC46B) para almacenar los datos de configuración. Para la grabación del nombre del dispositivo se empleó el software Mprog que facilitó el fabricante (FTDI, 2013b).

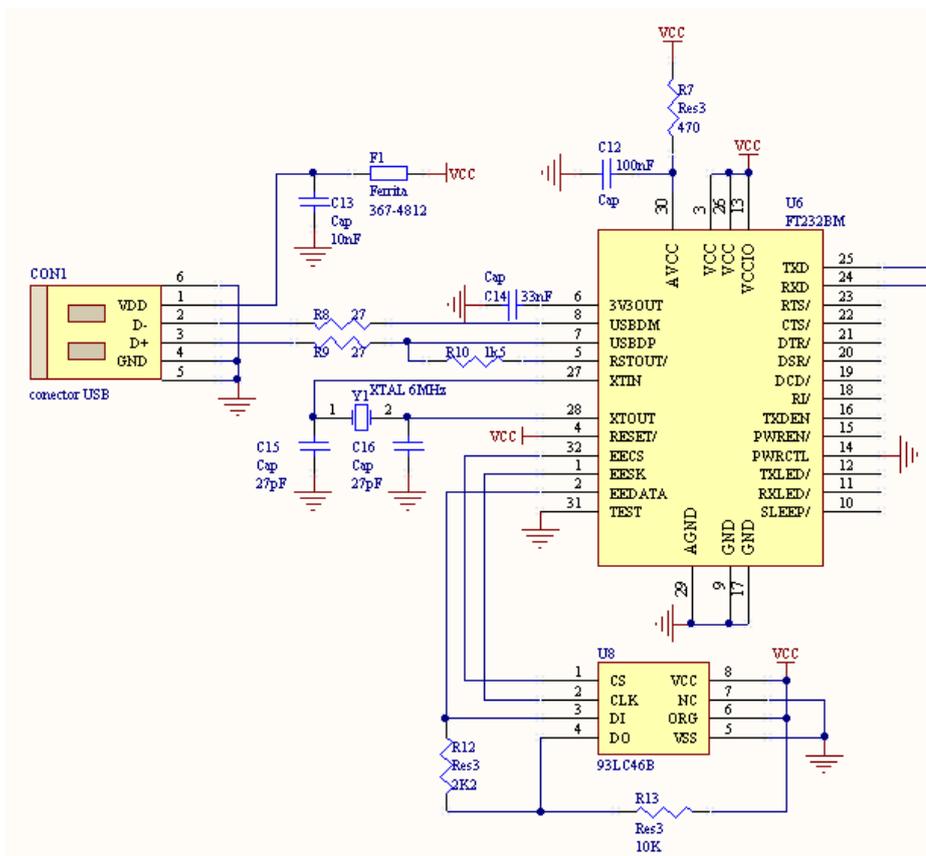


Figura 2.14 Esquema del bloque de comunicaciones compuesto por el chip FT232BM y una memoria EEPROM para asignar y almacenar la identidad al dispositivo.

Se realizaron dos pruebas. La primera consistió en listar los nombres de los dispositivos, la segunda en acceder a uno de ellos mediante nombre. Las pruebas se hicieron a través de funciones de LabVIEW que accedieron a la DLL del fabricante, ver Figura 2.15. Los resultados de ambas pruebas validaron el proceso de identificación de los dispositivos, así como la independencia de su toma de conexión.

Validada esta interfaz para ofrecer flexibilidad y capacidad de ampliación a la propuesta, se plantearon los diseños de los sistemas de adquisición e iluminación.

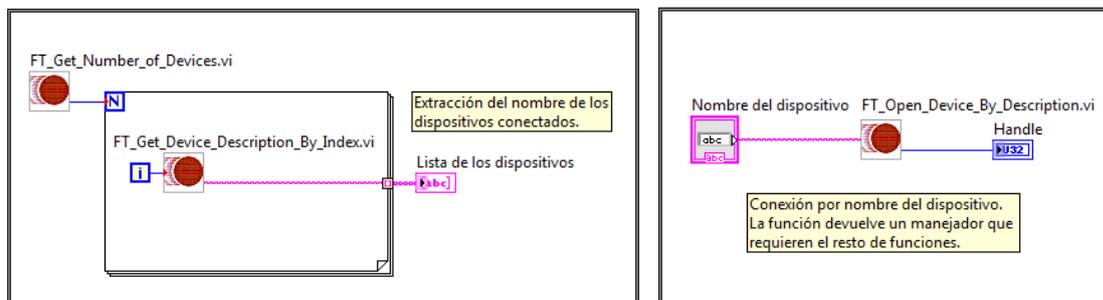


Figura 2.15 Extracción del nombre de los dispositivos y conexión con uno de ellos a través de su nombre.

2.3.3 Sistema de adquisición

El sistema de adquisición propuesto se basa en un diseño gobernado por un microcontrolador de propósito general y la electrónica de acondicionamiento validada anteriormente. Dispone del conversor FTD232BM para su control a través de un equipo externo.

Se propuso la adquisición de hasta 64 receptores. Con objeto de no replicar por cada receptor la etapa de acondicionamiento, se propuso la multiplexación analógica de las señales de los fotodiodos, se hizo a través de los multiplexores analógicos HEF4067B de NXP Semiconductors.

Los requisitos del microcontrolador para la propuesta eran: la disponibilidad de múltiples líneas digitales (para manejar los multiplexores), un convertidor analógico digital (para adquirir las señales) y un módulo de comunicación serie asíncrona (para la distribución de las señales). El microcontrolador PIC16F88 de Microchip cubrió estos requisitos.

Los 64 receptores se gestionaron mediante cuatro multiplexores. Las cuatro salidas de cada multiplexor se acondicionaron mediante el amplificador cuádruple TLC2274 trabajando en conversión I-V, validado en el estudio anterior. La propuesta contempla cuatro conectores donde realizar las conexiones con los receptores. Dependiendo del tipo de estudio, el número de receptores pueden variar de un estudio a otro. Los receptores pueden disponerse en placas realizadas a medida, soportando los conectores propuestos y reduciendo la dificultad de la instalación. El esquema de la electrónica planteada se presenta en la Figura 2.16, su implementación puede consultarse en el Anexo A.1.

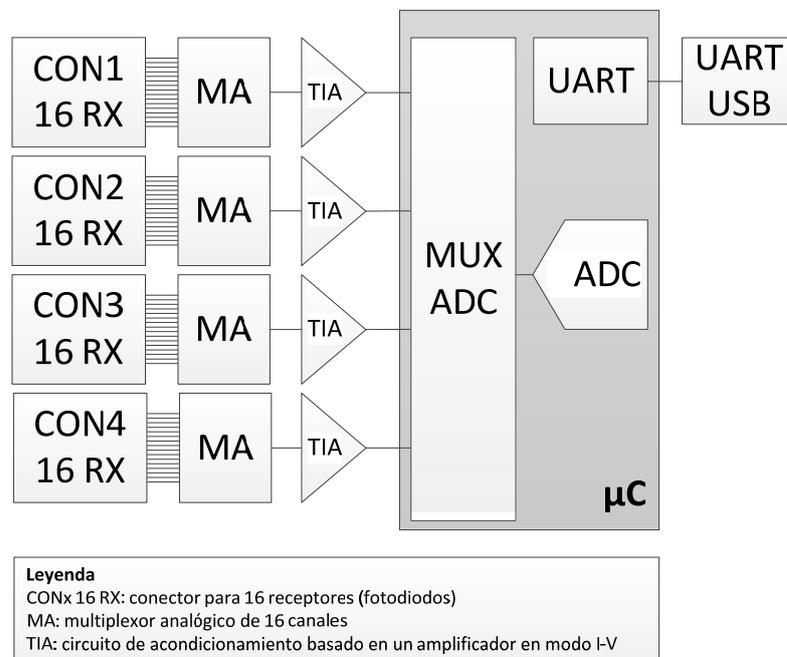


Figura 2.16 Esquema hardware del sistema de adquisición. La propuesta se alimenta a través del bus USB. El sistema se gobierna a través del puerto de comunicaciones del microcontrolador.

El firmware del microcontrolador fue programado para transmitir el nivel de señal de los receptores por petición/solicitud (a través del puerto serie). Las operaciones programadas fueron las siguientes:

- Seleccionar el receptor (activación de las líneas digitales del multiplexor).
- Aplicar un tiempo de espera (tiempo de muestreo y retención del convertidor analógico-digital).
- Digitalización de la señal.
- Promedio de 10 adquisiciones sobre cada receptor.
- Almacenamiento temporal de las medidas promediadas de los 64 receptores.
- Envío de las medidas promediadas por la interfaz de comunicaciones.

En la Figura 2.17 se observa el funcionamiento de funcionamiento global de estas operaciones. El microcontrolador selecciona cada uno de los receptores (canales 1 al 4: señales digitales que manejan los multiplexores), adquiere y almacena en memoria las medidas, y posteriormente envía toda la información por el puerto serie (canal 5). En la prueba efectuada se adquiere la señal de los 5 receptores del conector 1, y los 16 restantes del conector 2 y conector 3.

Por otro lado, se evaluó la tasa máxima de peticiones practicable. Se hizo enviando peticiones continuas y comprobando si el microcontrolador podía adquirir la señal de todos los receptores y procesar la siguiente petición. Se comprobó que el tiempo podía reducirse hasta los 200 ms.

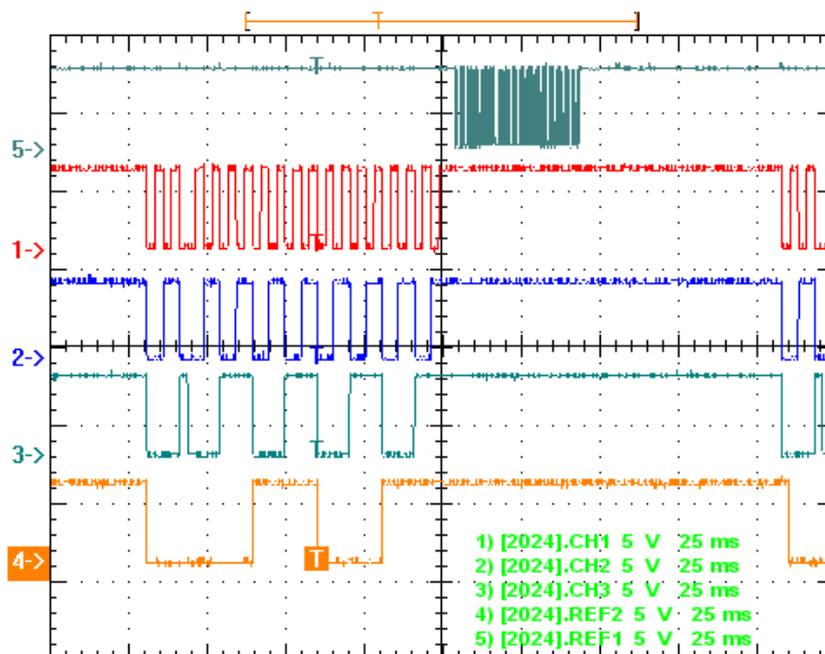


Figura 2.17 Multiplexación y transmisión de señales. Canales 1 a 4: señales digitales que multiplexan las señales de los transductores a la entrada del convertido. Después de la conmutación, se adquiere la señal y se almacena en memoria, para finalmente enviarla (canal 5).

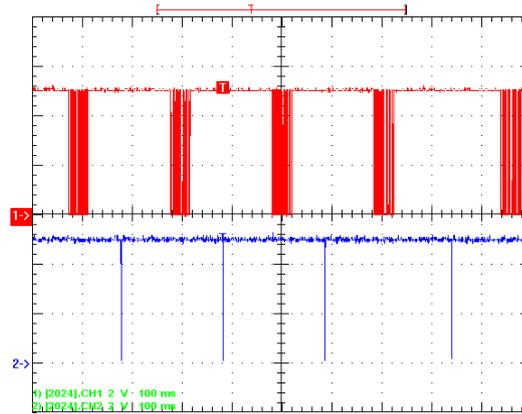


Figura 2.18 Test para medir la tasa de adquisición del sistema. El procedimiento se realiza enviando peticiones continuas desde el equipo anfitrión (canal 2). El microcontrolador devuelve el valor de todas las señales de los transductores (canal 1).

2.3.4 Sistema de iluminación

El sistema de iluminación está basado en el diseño del apartado anterior y utiliza el mismo microcontrolador (PIC16F88) y convertidor de interfaz (FTDI232BM). Considerando que en el diseño anterior se aplica la redundancia de transductores planteada, en esta propuesta se han manejado 32 emisores. Éstos pueden encenderse y apagarse en grupos de 8. El driver utilizado para polarizar los transmisores es el propuesto y validado en la primera parte de esta investigación. El esquema del diseño se detalla en la Figura 2.19.

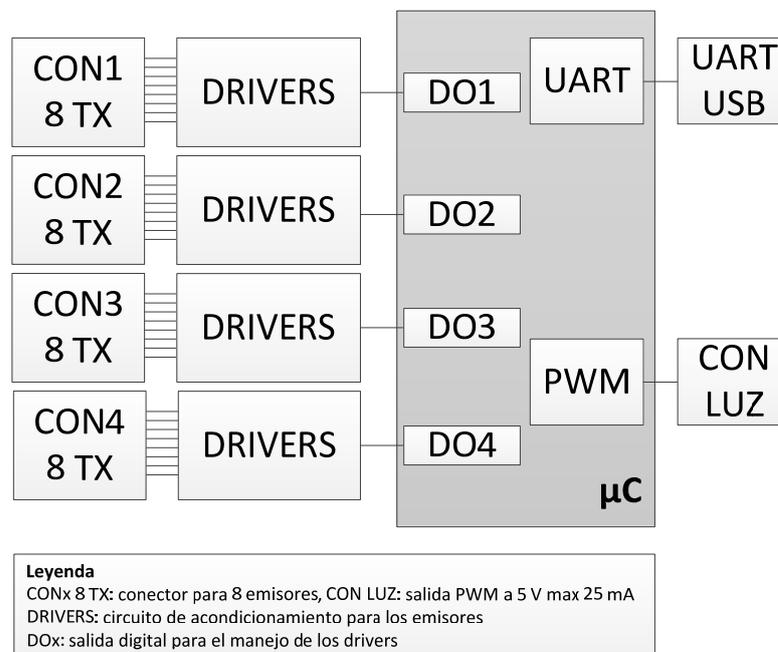


Figura 2.19 Esquema hardware del sistema de iluminación. El diseño se alimenta a través del bus USB. El microcontrolador puede encender y apagar bloques de 8 emisores.

Mediante el módulo PWM (Pulse-width modulation) se genera una señal pulsante que permite regular la intensidad de luz sobre leds (Microchip, 2009), resolviendo la necesidad identificada (emular los ciclos día y noche).

Debido al consumo de los emisores y al límite de corriente de la interfaz USB, solo pueden encenderse de forma controlada 2 bloques de 8 emisores simultáneamente (consumo aproximado de 350 mA).

El microcontrolador fue programado para que mediante comandos se pudiera controlar el encendido de los bloques de emisores y manejar la intensidad de la luz diurna. El firmware programado realiza las siguientes operaciones:

- Recoger el comando de control por el puerto serie (interrupción sobre el puerto serie).
- Decodificar el comando y actuar encendiendo y apagando el bloque de emisores o regulando el valor de la intensidad de luz (porcentaje del pulso PWM).

La implementación física del diseño puede consultarse en el Anexo A.2.

2.4 Experimentación práctica

En el siguiente apartado se evalúa la electrónica propuesta en un ensayo experimental con cigalas (*Neprophs norgevicus*). En la primera parte se presentan las características de este ensayo, los materiales utilizados y las consideraciones relativas a la instalación del sistema. En el segundo se presentan los resultados preliminares. En el tercero se presentan diferentes algoritmos que evitan errores de medida causados por diferentes agentes externos identificados. En el último apartado se presentan los resultados finales.

2.4.1 Instalación y materiales

Las propuestas electrónicas se evaluaron en condiciones reales de experimentación con doce cigalas dispuestas en doce acuarios (una cigala por acuario) de metacrilato (600 x 200 x 250 mm y 10 mm de grosor en sus paredes).

El ensayo se realizó en una de las cámaras isotérmicas de la Zona de Acuarios Experimentales (ZAE) del Instituto de Ciencias del Mar del CSIC, donde se instaló y ensambló la electrónica a los acuarios.

Adecuación del acuario

Los acuarios utilizados fueron mecanizados con una madriguera³ y tres zonas de detección para medir la presencia de la especie en tres lugares del acuario: una en las inmediaciones de la madriguera, otra inmediatamente después, y otra más adelante, ver Figura 2.20.

³ Esta especie se esconde en galerías o madrigueras que construye.

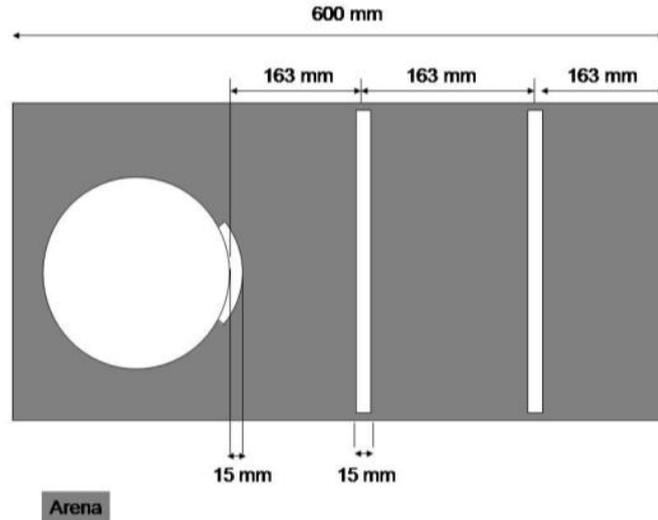


Figura 2.20 Alzado del acuario y ventanas donde se ubicaron los receptores.

Para medir la actividad de los individuos en los doce acuarios de forma simultánea se replicaron los sistemas de adquisición e iluminación. Se propuso la ubicación de los transductores en posición vertical, por las ventajas expuestas anteriormente.

Dado el del ancho del acuario y de la especie (abdomen), y según la propuesta realizada (ver apartado 2.1.3), fueron necesarios 8 receptores por barrera; sin embargo se practicó redundancia de receptores y se utilizaron 16. Para la barrera situada en la madriguera se utilizaron únicamente 5 fotodiodos. Dado que el sistema de medida planteado podía medir hasta 64, se montó un sistema de adquisición e iluminación por acuario.

El estudio de esta especie requería el uso de iluminación azul para recrear las condiciones lumínicas en las que habita y emular los ciclos día/noche. Se utilizaron 8 leds azules (480 nm).

En resumen, cada acuario requirió 37 receptores, 18 emisores y 8 leds azules que se distribuyeron de la siguiente manera:

- 2 barreras con 16 receptores cada una.
- 2 barreras con 8 emisores cada una y 4 leds azules.
- 1 barrera con 5 receptores.
- 1 barrera con 2 emisores.

Los emisores y receptores se montaron en placas PCB respetando las dimensiones y las líneas de los conectores del sistema de adquisición e iluminación (ver Anexo A.3 y Anexo A.4). Posteriormente se protegieron en el interior de zócalos de plástico, ver Figura 2.21.

El esquema de la instalación de los transductores se observa Figura 2.22, y la instalación realizada en uno de los acuarios en la Figura 2.23. Las placas de adquisición y de iluminación fueron protegidas utilizando cajas de policarbonato, ver Figura 2.24. En la Tabla 2.3 se resume el número de componentes utilizados.



Figura 2.21 Barreras con los emisores y receptores.

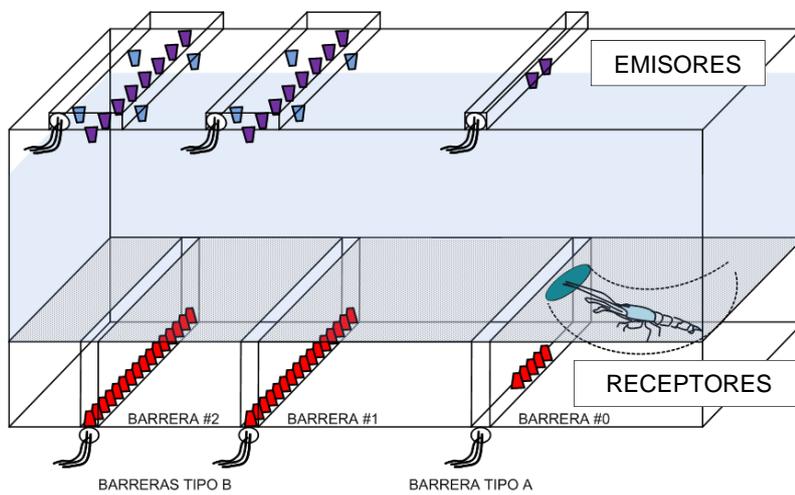


Figura 2.22 Esquema del montaje de los transductores.

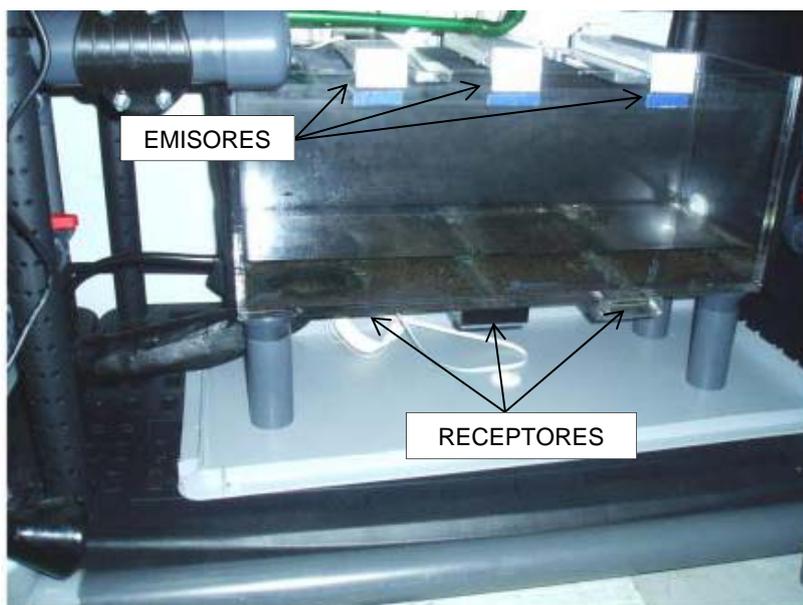


Figura 2.23 Instalación realizada en uno de los acuarios.

Tabla 2.3 Resumen de la instalación realizada.

Componentes de la instalación	1 acuario	12 acuarios
Placas de adquisición	1	12
Placas de iluminación	1	12
Placas con 16 receptores	2	24
Placas con 5 receptores	1	12
Placas con 8 emisores y 4 leds azules	2	24
Número total de receptores	37	444
Número total de emisores	18	216
Número total de leds azules	8	96



Figura 2.24 Protección de los sistemas de adquisición e iluminación.

Instalación y manejo del sistema

La instalación del sistema de medida en los 12 acuarios fue realizada mediante concentradores USB, ver Figura 2.25. Se hizo uso de la misma infraestructura para evaluar de forma simultánea las cámaras web: operando en condiciones reales de experimentación y adquiriendo de forma continua.

El control del sistema se realizó mediante una aplicación desarrollada con el lenguaje de programación LabVIEW, ver Figura 2.26. Los puntos más destacados de esta aplicación son los siguientes:

- Solicita a cada sistema de adquisición la señal digitalizada de sus receptores.
- Recoge el valor de los receptores, los marca con la hora del sistema y los guarda en disco de forma clasificada.
- En función de la hora del sistema y diferentes parámetros de configuración (amanecer, duración del amanecer, atardecer y duración del atardecer) aplica el nivel de intensidad requerido al sistema de iluminación.
- Adquiere y almacena la imagen de las cámaras, marcándolas con la hora del sistema.
- El periodo de adquisición de los receptores y de las cámaras es configurable, para los ensayos fue fijado a 5 segundos.

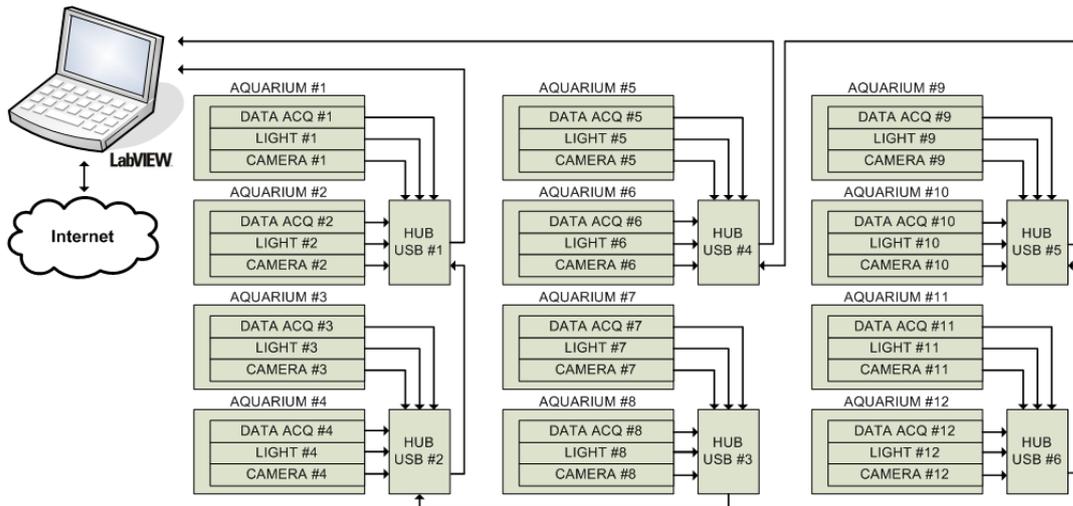


Figura 2.25 Estructura del sistema sobre los doce acuarios de experimentación.

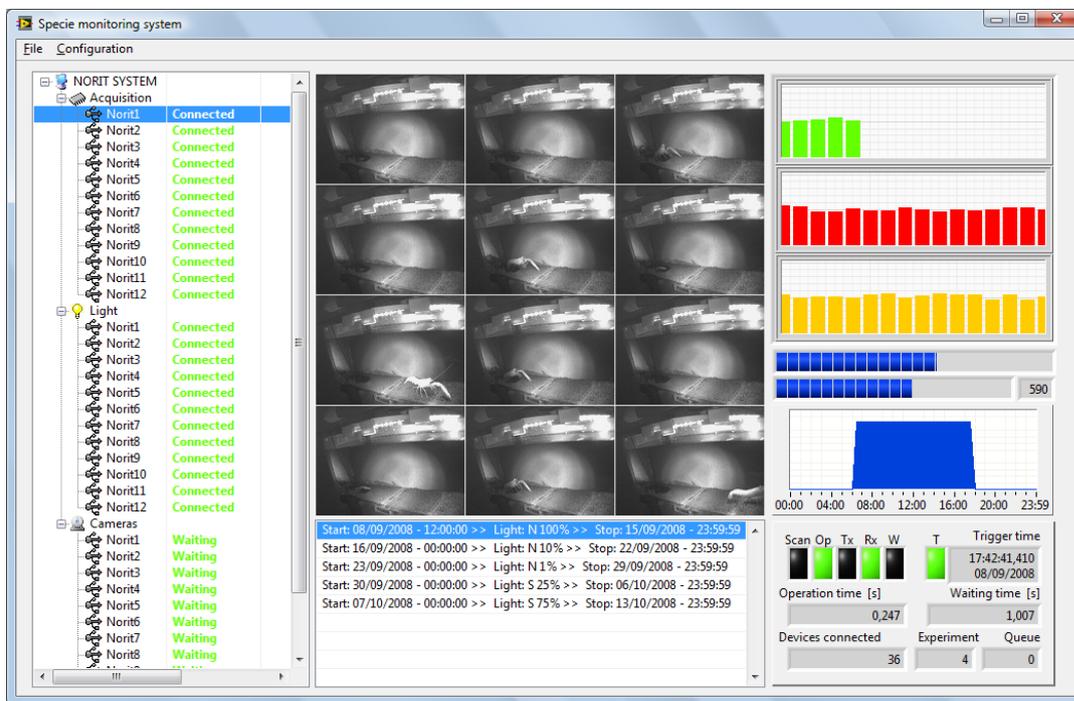


Figura 2.26 Aplicación de control desarrollada para las experimentaciones. A la izquierda los dispositivos conectados, en el centro las imágenes de los acuarios y a la derecha la intensidad de los receptores y del sistema de iluminación diurno.

2.4.2 Resultados preliminares

Todas las gráficas de este apartado tienen las siguientes consideraciones: el nivel de señal de los receptores corresponde con el valor digital del ADC de 10 bits del μC ; la caída de la señal se debe al paso de la especie; para distinguir las diferentes señales se les ha sumado un offset; el eje de abscisas son muestras; en negro se ha trazado el nivel de iluminación diurno (ciclo día-noche), la señal en estado alto corresponde al día.

En primer lugar se analizaron las señales de los receptores durante un día de experimentación. Se observó actividad de la especie fuera de la madriguera durante el periodo nocturno, ver Figura 2.27.

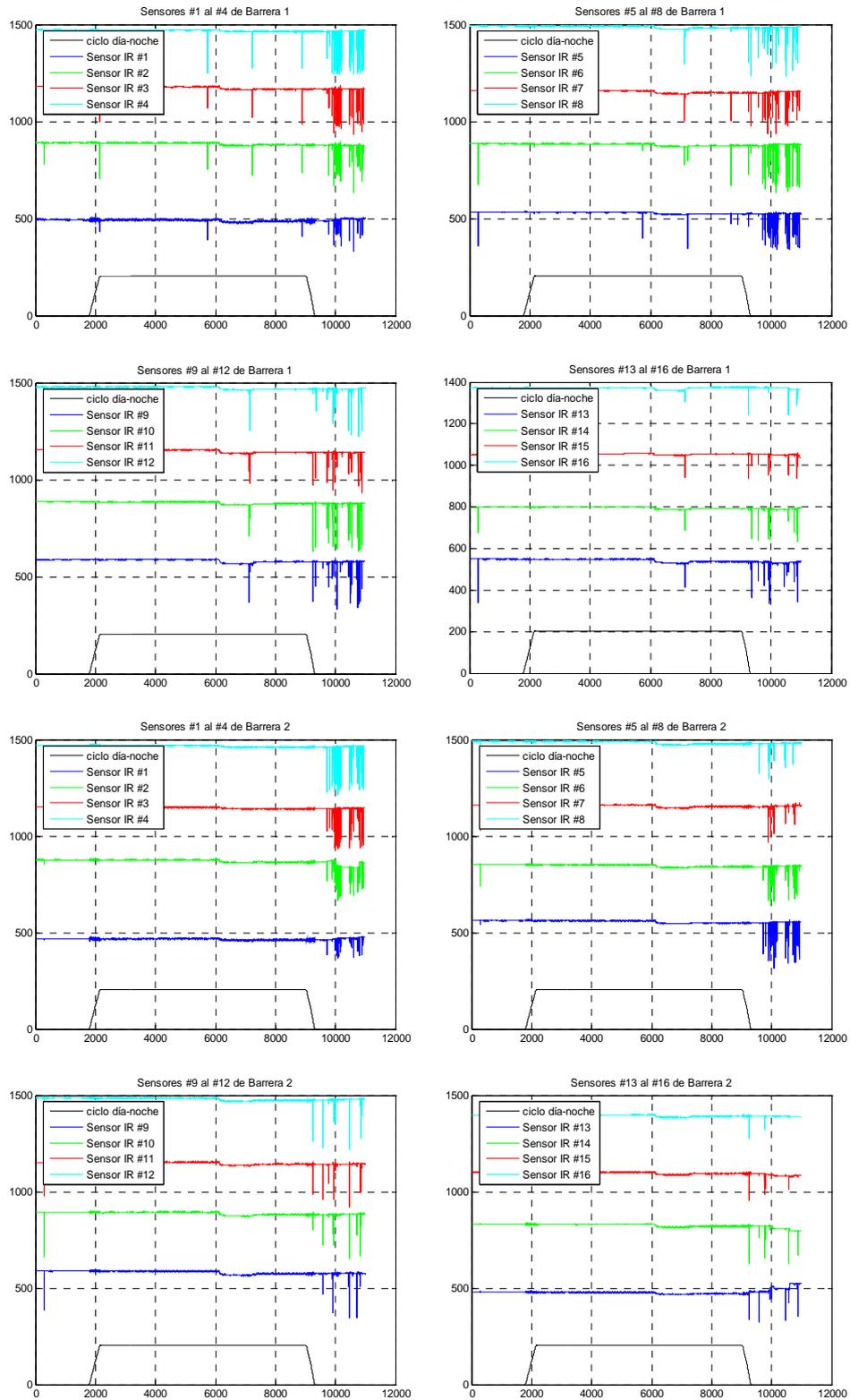


Figura 2.27 Nivel de los receptores de las barreras 1 y 2 durante un día de experimentación.

La actividad nocturna demostró ser acorde con los datos de la biología de esta especie (Chapman & Rice, 1971). Después se analizó el estado de las señales de las barreras durante todo el experimento, ver Figura 2.28 y Figura 2.29.

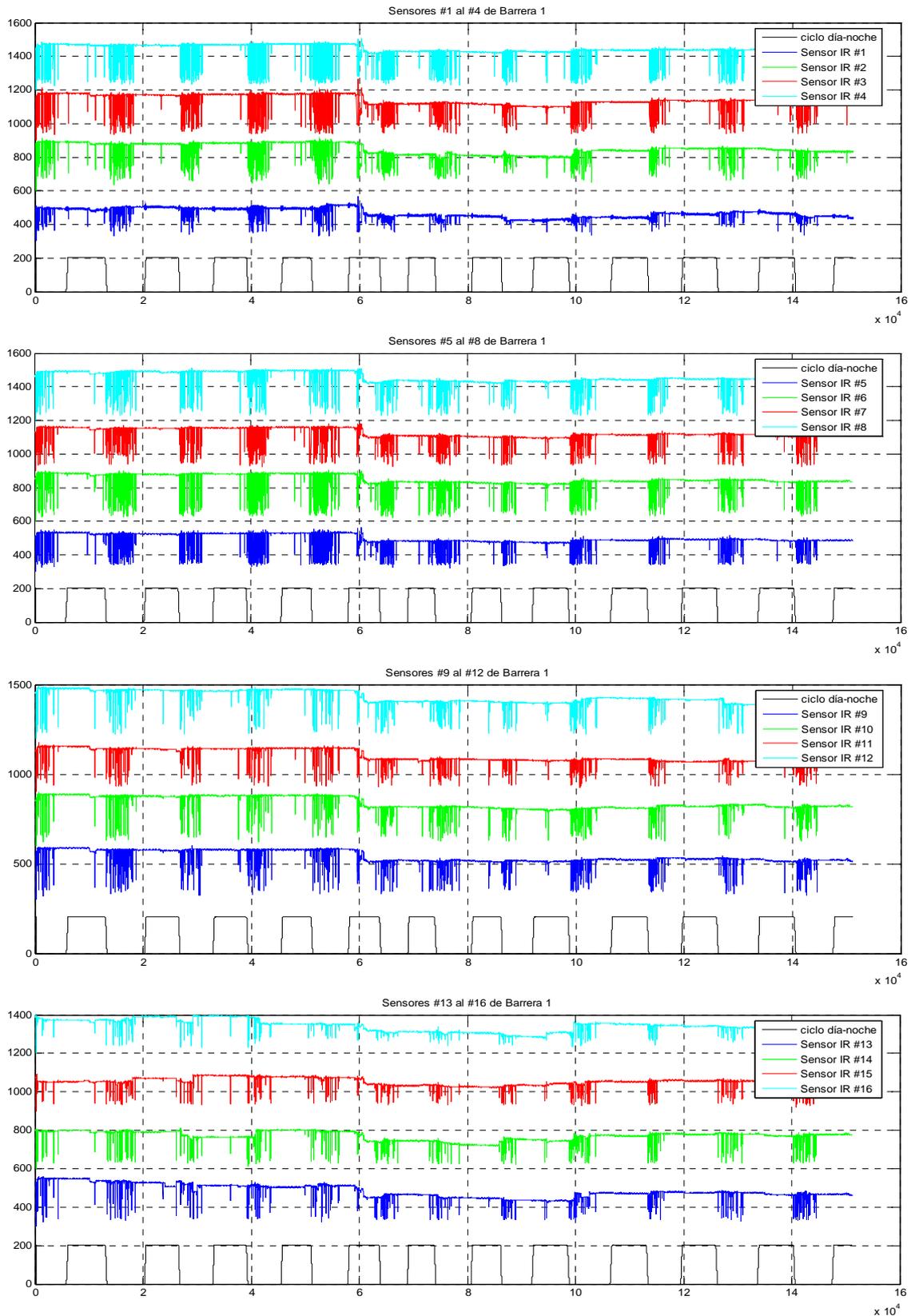


Figura 2.28 Nivel de los receptores de la barrera 1 durante 12 días de experimentación.

Aunque se siguió repitiendo el patrón de actividad de la especie, las señales presentaron una fluctuación durante el periodo de experimentación que demostró estar relacionada con la calidad del agua: turbidez.

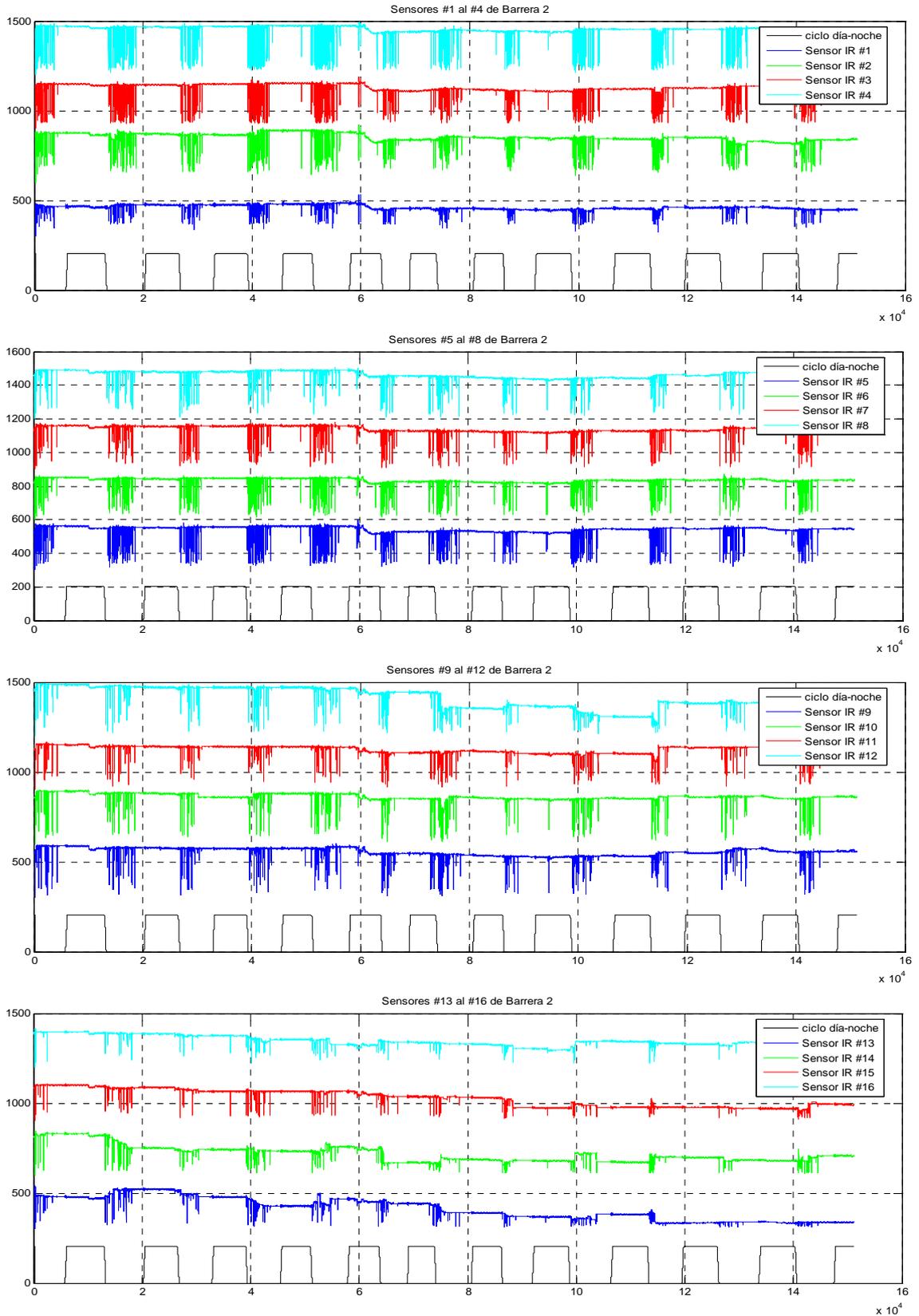


Figura 2.29 Nivel de los receptores de la barrera 2 durante 12 días de experimentación.

El resultado de este análisis demostró que para realizar el procesamiento de la actividad de los animales en las barreras, una detección de nivel no es suficiente, requiriéndose procedimientos que se adapten a las condiciones cambiantes del medio. En el siguiente apartado se discuten los agentes externos que pueden alterar la medida, y se proponen dos estrategias para contrarrestarlas.

2.4.3 Algoritmos de detección

Se identificaron tres agentes externos que pueden alterar el valor de la señal de los receptores y causar un error en la medición de la actividad de la especie:

- Avería de los transductores (emisores y/o receptores).
- Presencia de pequeñas partículas no controladas próximas a los transductores.
- Condiciones no controlables del medio.

Aunque estos agentes pueden no manifestarse en ensayos de corta duración (pocas horas o días), las experimentaciones en laboratorio con animales demandan grandes series temporales de datos, y por tanto, se requieren procedimientos y estrategias que las contrarresten. A continuación se proponen dos métodos.

Algoritmo 1

El procedimiento que se plantea permite contrarrestar falsas detecciones debidas a una avería de los transductores, ya sea en los emisores o en los receptores, así como por la presencia de pequeñas partículas no controladas.

Este algoritmo es aplicable gracias a la redundancia de receptores, técnica que ha sido expuesta con anterioridad y que fue aplicada durante la experimentación. Tal como se observa en la Figura 2.30, una avería en un emisor puede provocar la pérdida del receptor que está enfrentado a éste; no obstante, el resto siguen recibiendo señal. Una pérdida o avería en uno de los receptores no supone un problema si la distancia entre sus adyacentes es igual al ancho de la especie. El algoritmo que se presenta consiste en computar actividad cuando dos receptores consecutivos procesen actividad; esto es, cuando en ambos se reduzcan los niveles de intensidad por debajo del umbral de detección (determinado en el segundo algoritmo).

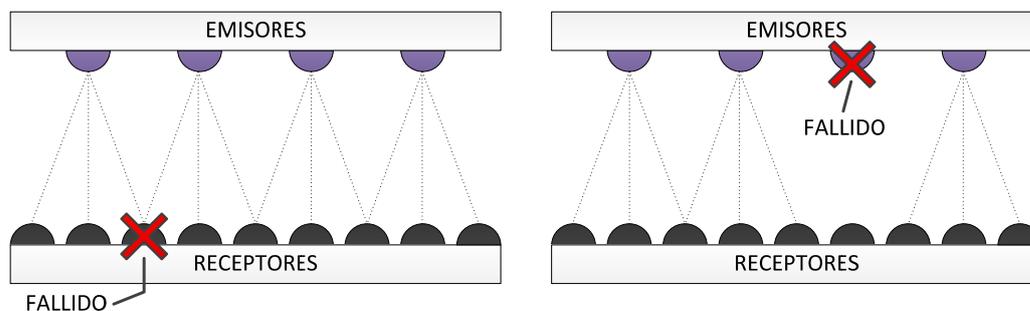


Figura 2.30 Avería en los transductores; izquierda: fallo en uno de los receptores; derecha: fallo en uno de los emisores.

Este mecanismo evita la detección de actividad por pérdida de emisores o receptores, o por la presencia de pequeñas partículas como mudas u objetos desprendidos del acuario sobre uno de los receptores.

Algoritmo 2

El procedimiento que se plantea calcula, en función de las condiciones variantes del medio, el umbral para procesar las detecciones (umbral adaptativo). Las condiciones del medio que pueden causar una variación de la señal en los receptores y que fueron identificadas durante las experimentaciones son las siguientes:

- Variación de las propiedades del agua (turbidez).
- Variación del nivel del agua en el acuario.
- Agitación del agua.

Por estas razones, se propuso la utilización de un umbral adaptado a la tendencia de la señal de los receptores. Mediante un análisis inicial se comprobó que una regresión lineal y de grado dos no satisfacían los propósitos dado que la señal de los receptores podía fluctuar repetidas veces durante experimentaciones de larga duración (varios días); mientras que una regresión cúbica sí permitió seguir la tendencia de los receptores en estos casos, y fue el método propuesto para calcular el umbral; éste fue fijado al 65 % de la tendencia, Figura 2.31.

Los datos experimentales fueron evaluados con este método y demostraron superar las variaciones del medio, ver Figura 2.32, Figura 2.33 y Figura 2.34. En todas estas figuras se consideran los siguientes puntos: el nivel de señal corresponde al nivel entregado por el ADC de 10 bits del μC ; las caídas abruptas de señal son causadas por el paso de la especie; para distinguir las diferentes señales se les ha sumado un offset; el eje de abscisas son muestras (1 muestra cada 5 segundos); se ha trazado en negro el ciclo día-noche, la señal en estado alto marca el día, mientras que la baja, la noche.

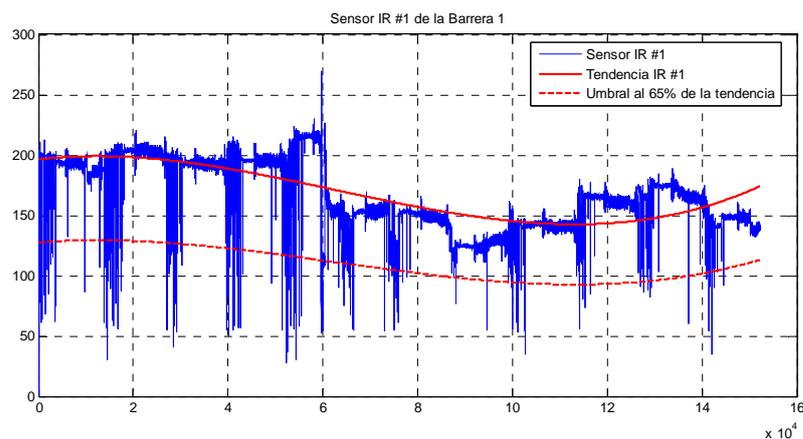


Figura 2.31 Tendencia de la señal de uno de los receptores aplicando una regresión cúbica. El nivel de señal corresponde al valor entregado por el ADC de 10 bits del μC . el eje de abscisas son muestras. Las caídas abruptas se deben a la detección de la especie, mientras que la fluctuación de los máximos, a las variaciones del medio. La tendencia sigue la señal del receptor. El umbral de detección se ha fijado al 65% de la tendencia.

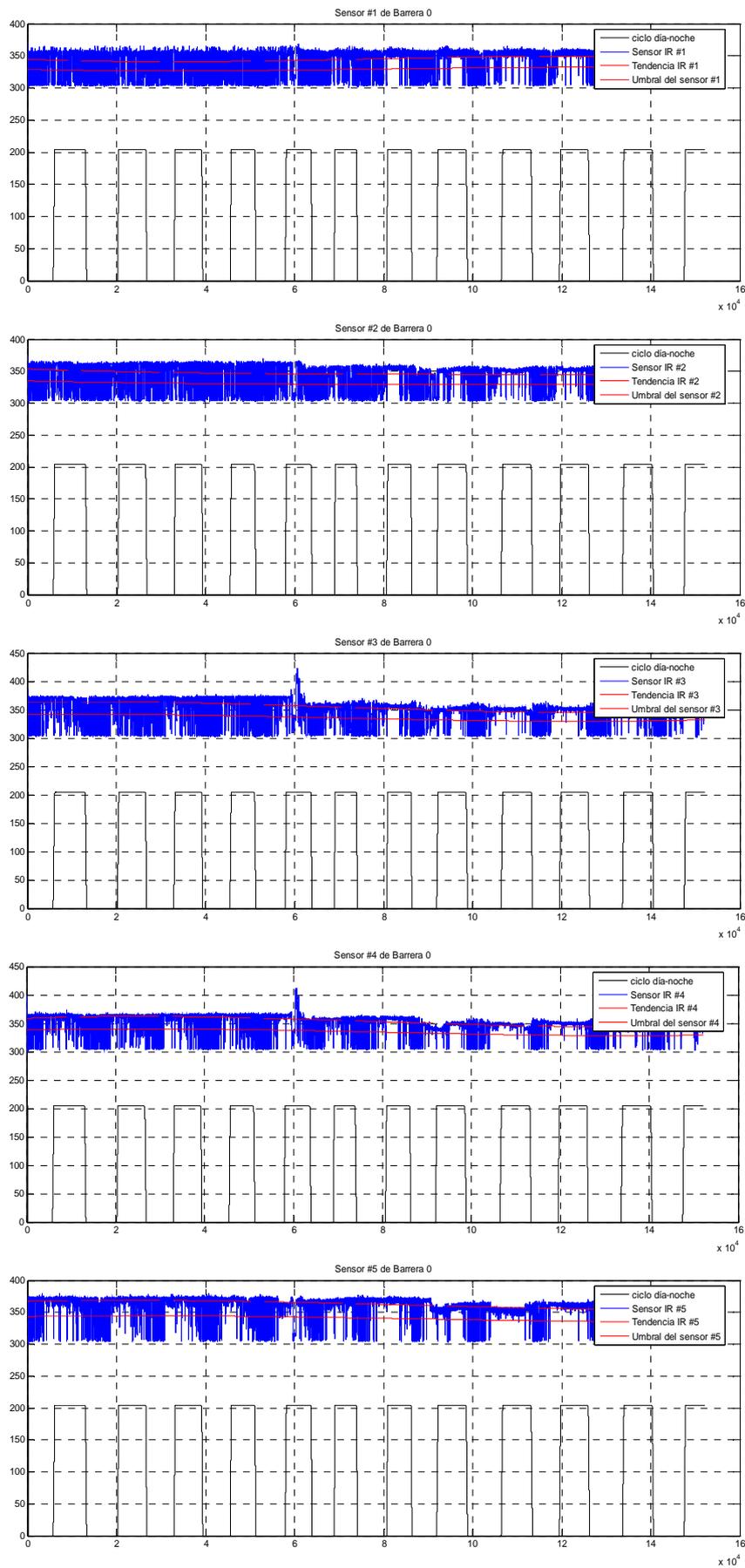


Figura 2.32 Umbral adaptativo calculado para los receptores de la barrera 0.

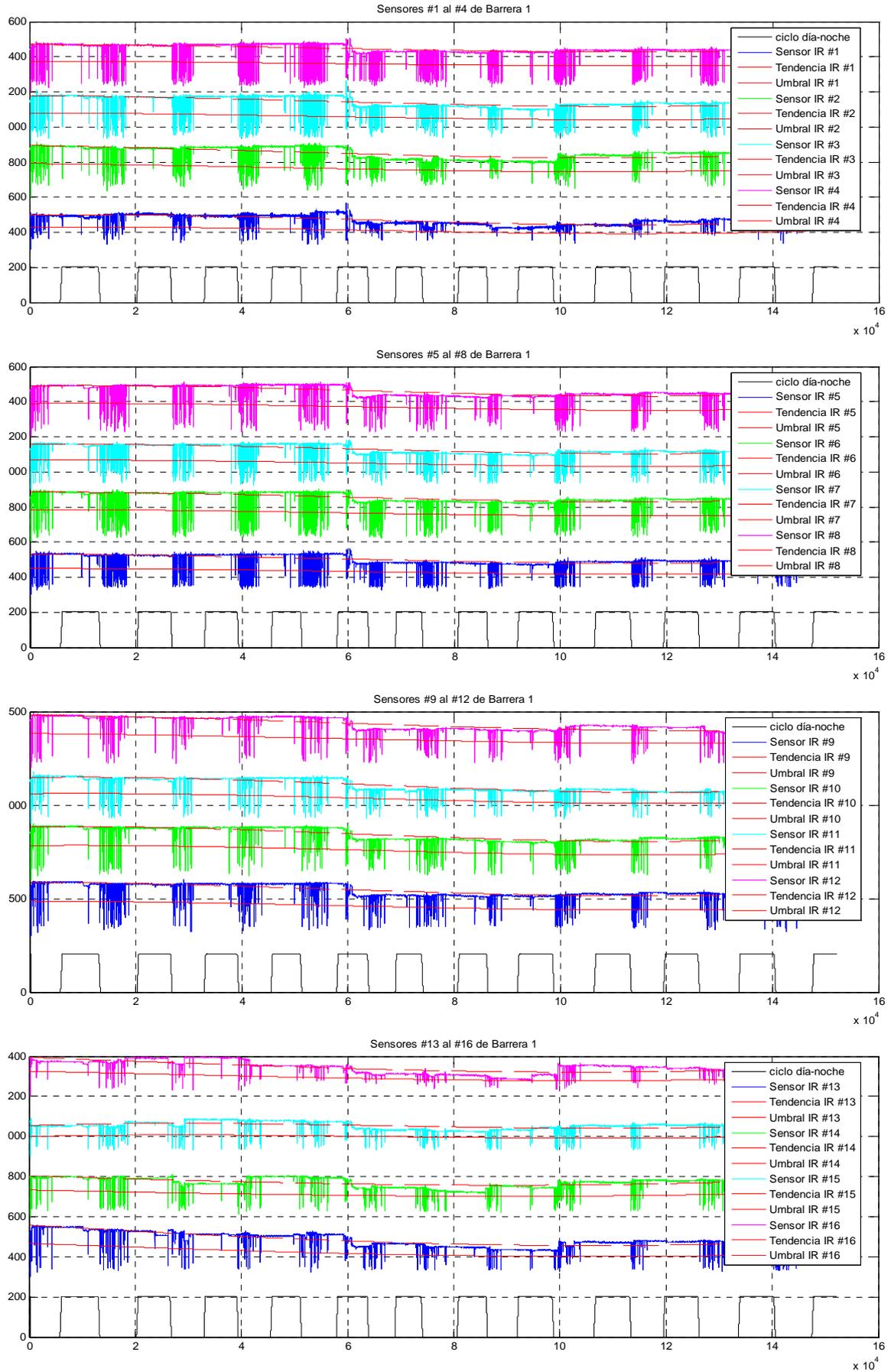


Figura 2.33 Umbral adaptativo calculado para los receptores de la barrera 1.

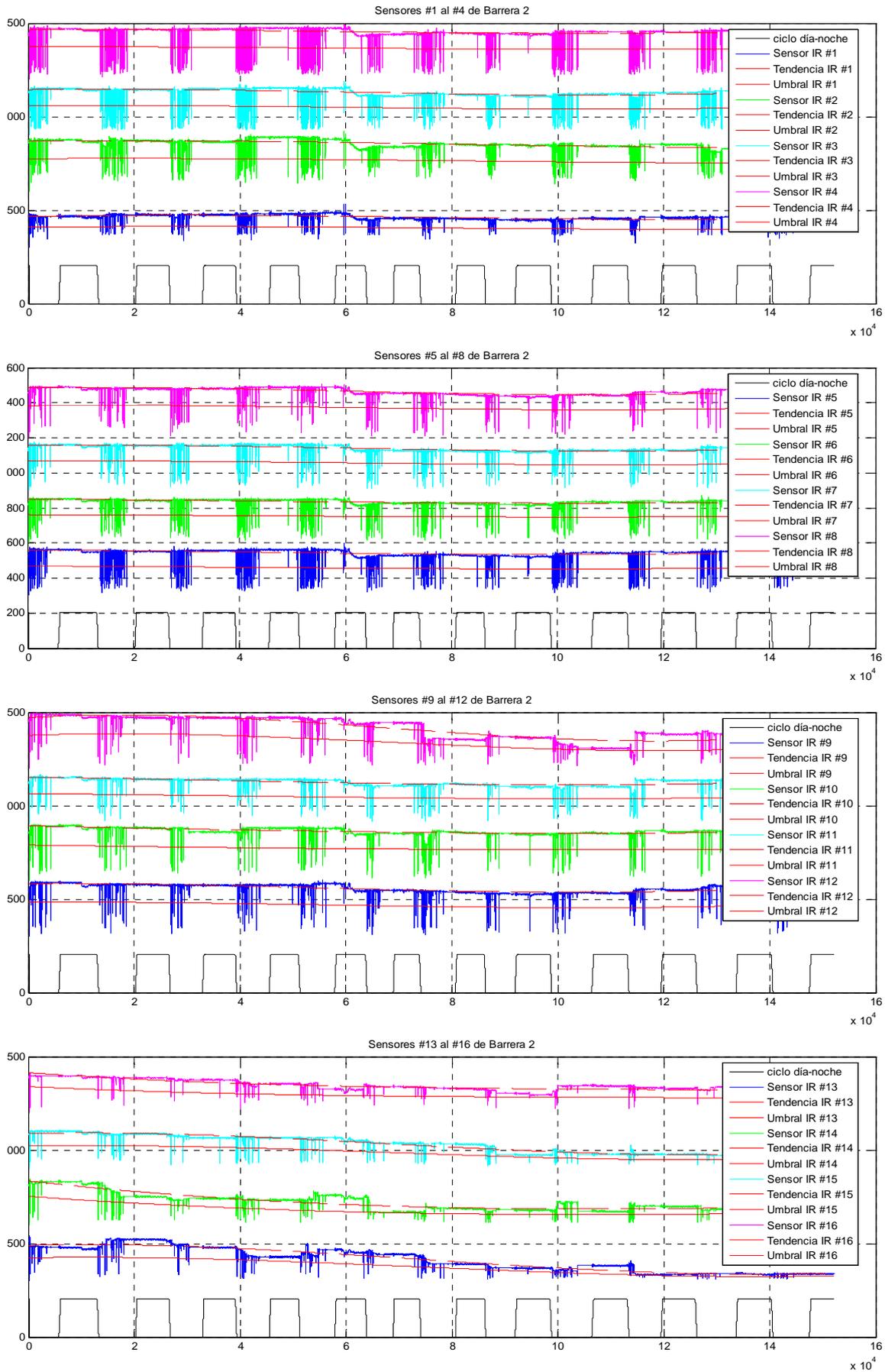


Figura 2.34 Umbral adaptativo calculado para los receptores de la barrera 2.

Conclusiones de los algoritmos planteados

Se han presentado dos algoritmos que contrarrestan los efectos de tres agentes externos que pueden darse durante las experimentaciones: avería de los transductores, presencia de pequeñas partículas no controladas y condiciones variables del medio.

La regresión cúbica ha demostrado ser adecuada para fijar el umbral de detección de los receptores. No obstante, esta metodología puede ser dependiente de la especie, y conviene ser estudiada con otros animales. Aunque la misión de estos algoritmos es ofrecer robustez al método de detección de presencia de los animales, también pueden ofrecer información útil para el mantenimiento del sistema.

2.4.4 Resultados finales

A continuación se presenta la metodología para procesar las detecciones:

1. Se aplica el algoritmo 2 sobre los datos.
2. Se compara la señal de cada receptor con el umbral hallado con el algoritmo anterior, y en función del tiempo. El resultado de esta operación produce una señal binaria: “detección” o “no detección” en el receptor.
3. Se aplica el algoritmo 1 y se procesa detección en la barrera solo si dos receptores adyacentes han procesado “detección”.

Este procedimiento aplicado sobre los datos experimentales devuelve la actividad (detección o no detección) de la especie sobre las barreras, ver Figura 2.35 y Figura 2.36.

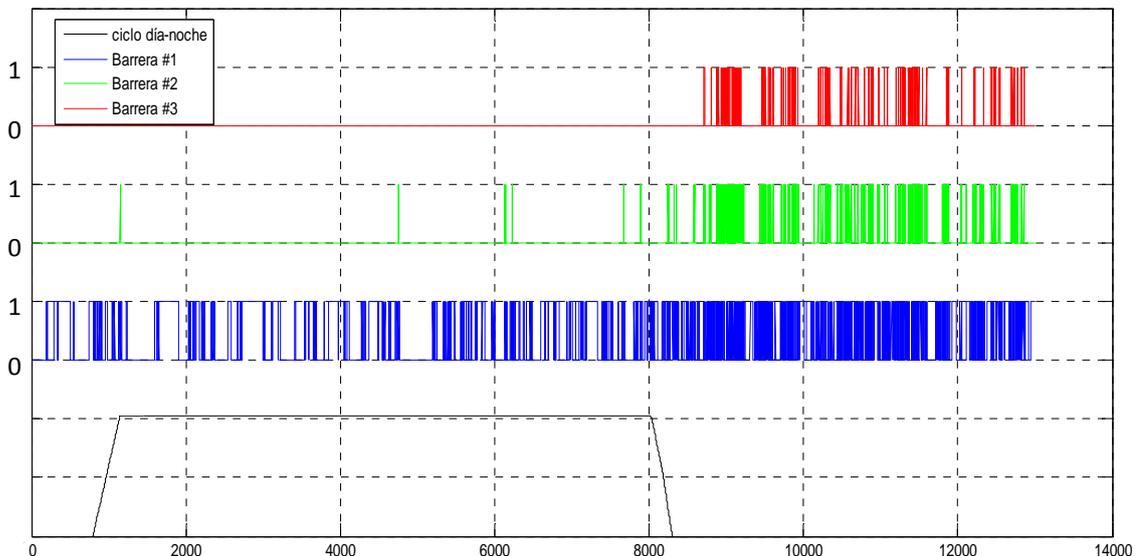


Figura 2.35 Actividad de la especie en las tres zonas de medición durante un día de experimentación. Las tres señales corresponden a la actividad o no actividad de la especie sobre las barreras. Se ha aplicado un offset para poder visualizar las señales. Estado lógico alto significa actividad. La señal “ciclo día-noche” marca el día (señal arriba) y la noche (señal abajo).

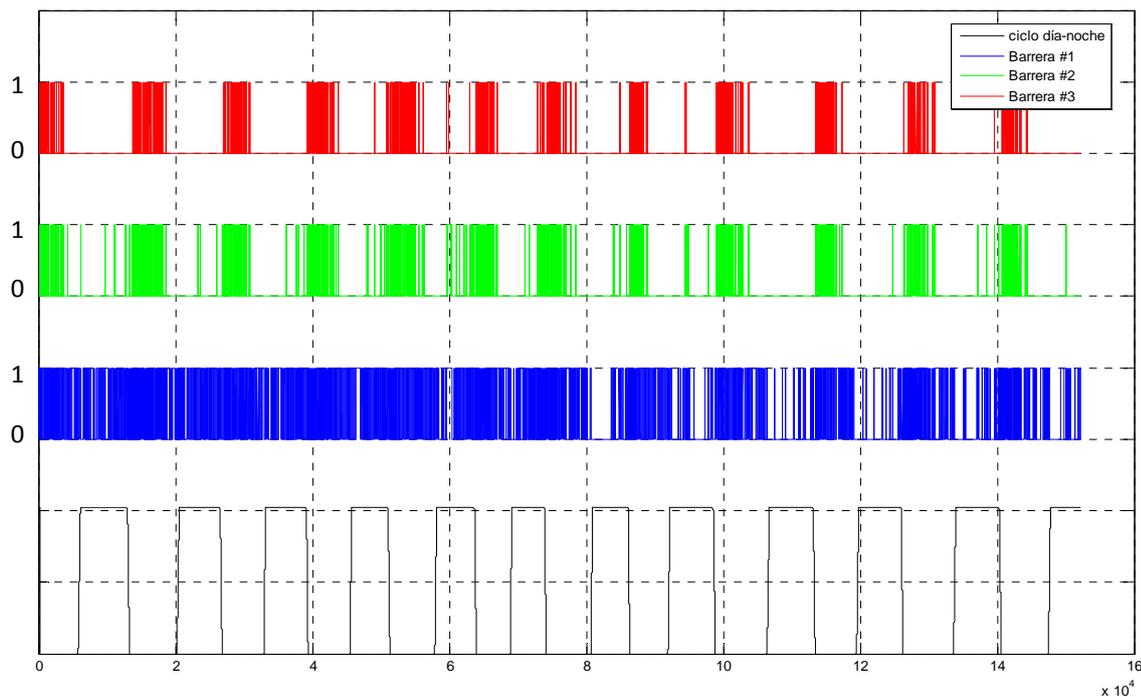


Figura 2.36 Actividad de la especie en las tres zonas de medición durante doce días de experimentación. Las tres señales corresponden a la actividad o no actividad de la especie sobre las barreras. Se ha aplicado un offset para poder visualizar las señales. Estado lógico alto significa actividad. La señal “ciclo día-noche” marca el día (señal arriba) y la noche (señal abajo).

Los resultados demostraron una marcada actividad nocturna que se correspondió con los datos de la biología de esta especie (Chapman & Rice, 1971; Chapman & Howard, 1979) y que permitió validar al sistema. Los ensayos realizados con el equipo demostraron su correcto funcionamiento en continuo, trabajando durante más de 30 días.

2.5 Sumario

En este capítulo se ha estudiado la viabilidad de los detectores de presencia y el uso de las cámaras web en el rango de los infrarrojos para la monitorización de especies en laboratorio.

La absorción de la luz infrarroja demostró ser alta pero aceptable para cumplir el cometido. Los ensayos fueron realizados manteniendo constante la iluminación, y permitieron la detección de especies a 25 cm con una columna de agua de 20 cm. Para mayores distancias (acuarios más grandes) deben aplicarse mayores potencias de emisión; se recomienda la utilización de drivers y dispositivos con mayor potencia u otras técnicas de iluminación (e.g. pulsantes).

Se han identificado dos formas para colocar los transductores, presentando las ventajas e inconvenientes de cada configuración. La disposición vertical requiere un mayor número de transductores y mediante el método que ha sido propuesto puede hallarse su valor. La

instalación de los transductores fuera del acuario es adecuada para realizar la medición, y al mismo tiempo reduce el mantenimiento de los mismos. No obstante, puede requerir una mecanización de los acuarios: ventanas donde instalar los transductores.

Las cámaras web han demostrado operar correctamente en estos entornos durante experimentaciones largas, tanto con una como con múltiples cámaras, y ofrecen gran flexibilidad a un coste reducido. Las que presentan focos integrados reducen la complejidad de la instalación pero su ubicación está limitada por los reflejos. Las capturas almacenadas durante los experimentos fueron utilizadas en otras investigaciones para el desarrollo de algoritmos de seguimiento de especies, derivándose diferentes publicaciones que pueden consultarse en el último capítulo.

Se ha presentado, construido y evaluado un sistema de medida basado en detectores infrarrojos. La utilización de la interfaz USB ha demostrado ser adecuada, resolviendo las necesidades detectadas en estos entornos: capacidad de expansión y facilidad de instalación/manejo. Los resultados obtenidos demostraron su correcto funcionamiento, pero la necesidad de utilizar técnicas para evitar errores de medida que pueden causar diferentes agentes externos identificados. Se han presentado y utilizado dos métodos: la redundancia de transductores y la utilización de algoritmos específicos.

Los detectores de presencia infrarrojos permiten medir el paso de las especies (tanto bentónicas como pelágicas) sobre zonas delimitadas, permitiendo estudiar los tiempos de ocupación y la movilidad del individuo de unas zonas a otras. No permiten identificar a la especie, por lo que en ensayos grupales (múltiples individuos conviviendo en un mismo acuario) los datos ofrecidos son a nivel colectivo y no es posible separar/extraer la información por individuo.

Por otro lado, las cámaras pueden permitir seguir el recorrido de las especies (trazar sus trayectorias); no obstante, a nivel colectivo este proceso requiere algoritmos específicos y/o la utilización de marcas u objetos fijados al animal.

Ambas tecnologías (detectores y cámaras) han demostrado ser adecuadas para el estudio de especies en laboratorio. En entornos abiertos están limitadas por el alcance, las condiciones cambiantes del medio, la autonomía, las comunicaciones y el mantenimiento de sus elementos.

Capítulo 3

Monitorización de especies mediante dispositivos de radiofrecuencia

En este capítulo se plantea y evalúan los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID) para la localización y seguimiento de especies en acuarios de experimentación.

Esta investigación se divide en cuatro partes. En la primera, se realiza un estudio preliminar, identificando las consideraciones y limitaciones de los dispositivos de radiofrecuencia para la monitorización de especies acuáticas.

En la segunda parte se evalúan diferentes tags y lectores. Se realizan pruebas de alcance en aire y en agua, estudiando la disposición y separación de las antenas para la implementación de un sistema de localización y seguimiento de especies bajo el agua; el cual se presenta en la tercera parte de esta investigación.

En la última parte el sistema planteado es instalado en un acuario y evaluado en condiciones reales con cuatro cigalas. Los resultados obtenidos son presentados al final del capítulo.

3.1 Consideraciones preliminares

En este apartado se identifican y analizan las limitaciones de esta tecnología para el estudio y monitorización de especies.

3.1.1 Condiciones impuestas por el medio

Tal como se introducido en el primer capítulo, bajo el agua, las comunicaciones por radiofrecuencia presentan alcances reducidos debido a la gran atenuación que sufren las señales en este medio. Se distinguen dos tipos: las causadas por el propio medio, y las causadas por refracción (cambio de medio).

Atenuación causada por el medio

Las señales de radiofrecuencia sufren bajo el agua una importante pérdida o atenuación que depende de la conductividad del agua. Cuanto mayor es, mayor es la absorción, y por tanto, menor el alcance de las comunicaciones.

Así, en primer lugar, para la utilización de esta tecnología conviene sopesar la conductividad del medio. De forma general, el fabricante de transmisores Lotek recomienda trabajar con esta tecnología en aguas con conductividades por debajo de los 0,8 S/m (Lotek, 2014).

En segundo lugar, conviene estudiar la máxima profundidad o distancia entre el receptor y la especie (portadora del transmisor). En este caso, cuando la profundidad o distancia entre equipos es superior a los 20 m, Lotek sugiere el empleo de dispositivos acústicos en lugar de los de radiofrecuencia.

La atenuación de las ondas de radio en el agua y en cualquier medio conductor, aumenta tanto con la conductividad como con la frecuencia y puede calcularse mediante la ecuación siguiente (L. Butler, 1987):

$$\alpha \text{ [dB/m]} = 0,0173 \cdot \sqrt{f \cdot \sigma}$$

Donde,

f es la frecuencia de la señal en Hz.

σ es la conductividad del medio en S/m.

A partir de la ecuación anterior y aplicando conductividades del agua típicas -agua de mar de 4,8 S/m, y agua dulce 0,05 S/m (L. Butler, 1987; Riley & Skirrow, 1975)- se ha calculado la atenuación para dos rangos de frecuencia, ver Tabla 3.1. Tal como se observa, cuanto menor es la frecuencia, menor es la pérdida y mejor su potencial para las comunicaciones.

Independientemente de la atenuación causada por el medio, para alcanzar mayores distancias de transmisión pueden aplicarse dos métodos: aumentar la potencia de transmisión y/o trabajar con frecuencias menores. Tanto la primera solución como la segunda comprometen el peso y tamaño de los transmisores. Una mayor potencia de transmisión requiere pilas o baterías de mayor capacidad (para mantener la misma autonomía), y por tanto, mayores dimensiones y peso. Una frecuencia de trabajo menor implica antenas de mayores dimensiones.

Tabla 3.1 Atenuación en agua dulce y salada para diferentes frecuencias de trabajo.

Atenuación del medio	$f = 125 \text{ kHz}$	$f = 13,56 \text{ MHz}$
Agua salada	13,40 dB/m	139,57 dB/m
agua dulce	1,37 dB/m	14,25 dB/m

Atenuación por refracción o cambio de medio

Cuando la señal de radio cambia de medio (de aire a agua o viceversa) se produce una pérdida o atenuación de señal por refracción. Esta pérdida puede calcularse a partir de la ecuación siguiente (L. Butler, 1987):

$$\alpha \text{ por refracción [dB]} = -20 \cdot \log \left(\frac{7,4586}{10^6} \cdot \sqrt{\frac{f}{\sigma}} \right)$$

Aplicando los mismos datos de conductividad detallados en el apartado anterior, se observa una atenuación alta para bajas frecuencias tanto en agua dulce como salada, ver Tabla 3.2. Aunque es posible reducirla utilizando frecuencias más altas, se ha visto la gran atenuación que causa el medio con la frecuencia.

Tabla 3.2 Atenuación por refracción para diferentes frecuencias de trabajo.

Atenuación por refracción	f = 125 kHz	f = 13,56 MHz
Agua salada	58,39 dB	38,04 dB
Agua dulce	38,57 dB	18,21 dB

Dimensionado de la antena

Cuando las ondas electromagnéticas penetran en otro medio, la longitud de onda se reduce proporcionalmente al índice de refracción de ese medio. Esta reducción, tiene implicaciones en las dimensiones e ingeniería de la antena. En el agua, la longitud de onda puede calcularse a partir de la ecuación siguiente (L. Butler, 1987):

$$\lambda[\text{m}] = 1000 \cdot \sqrt{\frac{10}{f \cdot \sigma}}$$

Tal como puede calcularse, en el agua de mar, la longitud de onda a 125 kHz es de 4 m comparada con los 2,4 km en aire. La reducción de la longitud de onda en agua dulce no es tan dramática pero aún considerable. A 13,56 MHz la dimensión es de 0,4 m en agua salada, frente a los 3,8 m con agua dulce y los 22 m en aire, ver Tabla 3.3.

Así, cuando las antenas operan bajo el agua, las dimensiones físicas de las antenas son mucho menores que sus equivalentes en aire en términos de longitud de onda. Por otro lado, sumergiendo las antenas se evita la atenuación por refracción.

Tabla 3.3 Longitudes de onda para diferentes frecuencias de trabajo.

λ	f = 125 kHz	f = 13,56 MHz
en aire	2.400 m	22 m
en agua dulce	40 m	3,84 m
en agua salada	4,08 m	0,392 m

3.1.2 Otras consideraciones

Se identifican aspectos externos que condicionan esta tecnología. Estos puntos no están relacionados con el medio, sino con la especie bajo análisis y el estudio a realizar:

Peso del animal

Tal como se discute en (Jepsen, Schreck, Clements, Thorstad, & others, 2005) los dispositivos no deberían exceder del 2 % del peso del animal. Para especies muy pequeñas puede ser necesario un estudio previo de la flotabilidad que introduce el transmisor al animal (Jepsen, Koed, Thorstad, & Baras, 2002).

Actividad del animal y duración de la experimentación

Para transmisores que operan con pilas o baterías, la cadencia entre envíos debe ser apropiada a la actividad/movilidad de la especie y la duración del estudio (para maximizar la duración de la batería).

Para especies que tienen gran movilidad, y dependiendo del estudio a realizar, puede ser necesario incrementar la tasa de transmisiones para poder conocer de forma más detallada su actividad, trayectorias, etc.

Para alargar el tiempo de vida del dispositivo pueden emplearse baterías de mayor capacidad, pero a costa de un mayor peso y dimensiones; asunto que debe discutirse en función de la especie y del tipo de estudio a realizar.

3.2 Estudio y evaluación de RFID

En este apartado se ha evaluado el alcance de diferentes tags y lectores RFID comerciales, realizando las medidas en aire y en agua (dulce y salada).

Después se plantea la disposición de antenas para la implementación de un sistema de localización y seguimiento; en esta parte se analiza la separación que debe de aplicarse entre antenas, y que determina la resolución del sistema.

3.2.1 Lectores y tags RFID

Los sistemas RFID se clasifican dependiendo del rango de frecuencias que emplean. Existen cuatro tipos: LF o de baja frecuencia (entre 125 ó 134,2 kHz); HF o alta frecuencia (13,56 MHz); UHF o de frecuencia ultra alta (868 a 956 MHz); y de microondas (2,45 GHz o por encima), (Finkenzeller & Waddington, 1999).

En el mercado existen diferentes integrados que implementan los diferentes estándares de RFID, como el SLRC400 de NXP Semiconductors o el TRF7970A de Texas Instruments. Estos chips se pueden manejar y controlar de forma sencilla con microcontroladores, pero requieren antenas sintonizadas (Microchip, 2003).

Por otro lado, existen lectores comerciales y OEM (Original Equipment Manufacturer). Estos últimos resultan particularmente interesantes al integrar la antena (resuelven el problema del diseño y ajuste de las mismas), facilitando su integración con otros sistemas (documentación abierta y accesible), y son más económicos que los lectores comerciales.

Debido a ello, la investigación se ha realizado utilizando lectores comerciales: tres lectores OEM y dos lectores comerciales, uno con antena integrada y otro con antena externa (ver Figura 3.1). Debido a la atenuación causada por el medio y por refracción, los sistemas escogidos fueron de LF y HF.

Las características de los lectores empleados el estudio, como su frecuencia de trabajo y los estándares que soportan se resumen en la Tabla 3.4. El consumo de cada uno de ellos fue medido con las tensiones especificadas y operando normalmente.

Para la realización de los ensayos se emplearon diferentes tags pasivos de LF y HF, ver Figura 3.2. Las características de los mismos pueden consultarse en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4 Características de los lectores RFID utilizados para el estudio.

Modelo y Fabricante	Tipo de lector	Frecuencia	Estándar	Tamaño	Interfaz	Alcance máximo	Consumo
ID ISC.MR100A Feig Electronic	Comercial	13,56 MHz	ISO15693	Lector: 145 x 85 x 27 mm	RS232	400 mm	400 mA @ 12 V
				Antena: 100 x 100 mm			
SL102 Stronglink	Comercial	125 kHz	ISO10536	120 x 83 x 27 mm	USB	100 mm	45 mA @ 5 V
SL015M Stronglink	OEM	13,56 MHz	ISO15693	80 x 55 mm	UART	80 mm	44 mA @ 5 V
SL018 Stronglink	OEM	13,56 MHz	ISO14443A	65 x 45 mm	I2C	60 mm	42 mA @ 5 V
SL030 Stronglink	OEM	13,56 MHz	ISO14443A	38 x 38 mm	I2C	60 mm	40 mA @ 3,3 V



Figura 3.1 Lectores RFID utilizados para el estudio.

Tabla 3.5 Características de los tags RFID utilizados para el estudio.

Modelo	Fabricante	Frecuencia	Estándar	Formato y tamaño	Masa
A	Stronglink	125 kHz	SMC4100 ISO 10536	Cilíndrico 17 x 5 mm	0,72 g
B	NXP Semiconductors	13,56 MHz	ISO 15693-2/3 ISO 18000-3	Disco 17 x 3,5 mm	0,60 g
C	NXP Semiconductors	13,56 MHz	ISO 15693-2/3 ISO 18000-3	Disco 20 x 0,8 mm	0,51 g
D	Texas Instruments	13,56 MHz	ISO 15693-2/3 ISO 18000-3	Disco 22 x 3 mm	2,04 g
E	NXP Semiconductors	13,56 MHz	ISO 15693-2/3 ISO 18000-3	Disco 25 x 1 mm	0,78 g
F	Texas Instruments	13,56 MHz	ISO 15693-2/3 ISO 18000-3	Disco 30 x 0,8 mm	0,65 g
G	NXP Semiconductors	13,56 MHz	ISO 15693-2/3 ISO 18000-3	Disco perforado 35 x 6,5 mm	3,58 g
H	NXP Semiconductors	13,56 MHz	ISO 14443 ISO 18000-3	Disco 30 x 2 mm	1,54 g
I	Texas Instruments	13,56 MHz	ISO 15693-2/3 ISO 18000-3	Tarjeta 85,6 x 54 x 0,76 mm	5,38 g
J	NXP Semiconductors	13,56 MHz	ISO 14443 ISO 18000-3	Tarjeta 85,6 x 54 x 0,76 mm	5,38 g

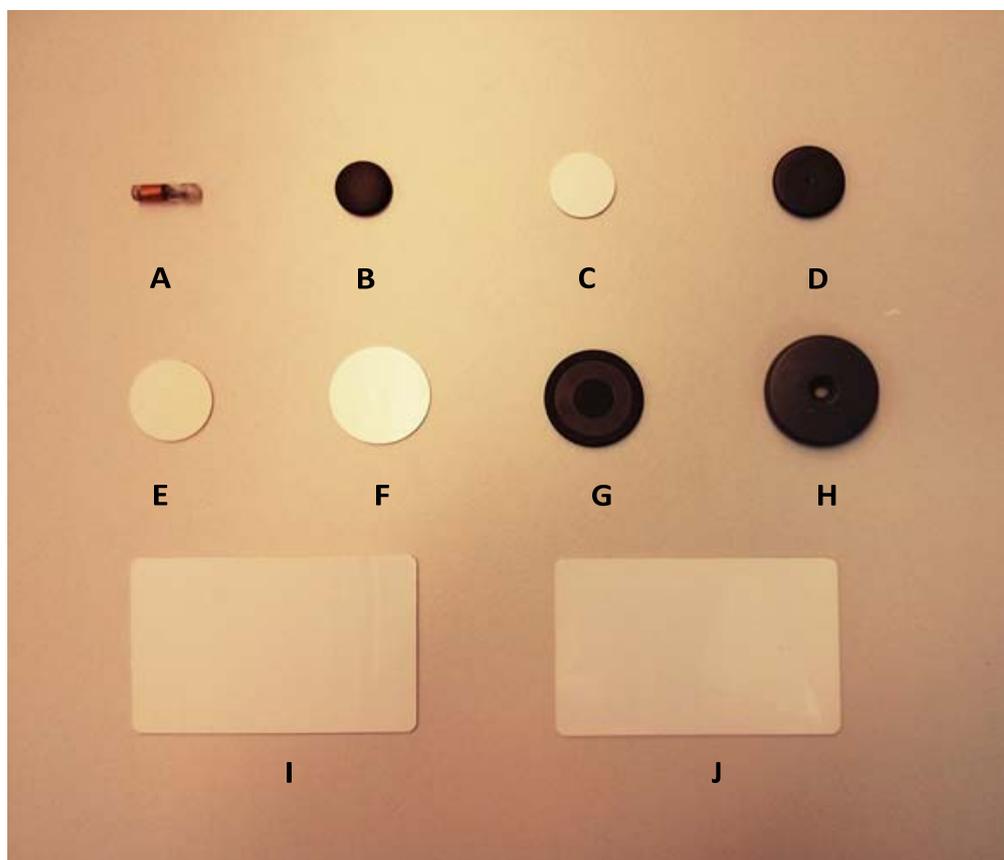


Figura 3.2 Tags RFID utilizados para el estudio.

3.2.2 Pruebas de alcance

Los diferentes ensayos que se presentan en este apartado fueron realizados utilizando un acuario de fibra de vidrio y resina de poliéster de 1.500 x 750 x 400 mm y 5 mm de grosor; acuario que posteriormente fue utilizado en la experimentación práctica.

Se realizaron cuatro tipos de ensayos para evaluar el alcance de los diferentes tags y lectores seleccionados:

- Lectores y tags en aire.
- Lectores y tags con el acuario vacío.
- Lectores y tags con el acuario lleno de agua dulce.
- Lectores y tags con el acuario lleno de agua salada.

Consideraciones para la realización del ensayo

Como se ha descrito, el alcance se ve favorecido (cancelación de la atenuación por refracción) si los lectores se instalan en el interior del acuario (lectores sumergidos).

A pesar de ello, se decidió evaluar el segundo caso (instalación de los lectores en el exterior). Esta configuración, aunque ofrece un menor alcance (en primer lugar por la atenuación por refracción; y en segundo, por la distancia que se pierde por el grosor del acuario), permite una mayor facilidad de instalación siendo también una solución más económica (no requiere lectores estancos ni instalaciones bajo el agua).

Procedimiento

El alcance fue medido utilizando el siguiente procedimiento:

- Posicionamiento del tag sobre el centro de la antena del lector.
- Separar el tag verticalmente hasta que el lector no pueda detectarlo.
- En los ensayos con el acuario el lector/antena se posicionó bajo el acuario y el tag en el interior.

Lectores y tags en aire

En esta prueba se experimentó un reducido alcance entre el lector y el tag de baja frecuencia (tag A - lector SL102). Esta pareja también presentó otro gran inconveniente por lo que se descartó su utilización: la detección del tag era dependiente de su inclinación, y debido a su formato cilíndrico y el diseño de la antena del lector, solo era detectado cuando se encontraba en posición vertical sobre la antena del lector, ver Figura 3.3.

Con el resto de tags se experimentó una menor dependencia de la inclinación. Como era de esperar, el máximo alcance se consiguió cuando éstos se encontraron planos y paralelos a las antenas.

Los resultados obtenidos en este ensayo se resumen en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Alcance entre los diferentes tags y lectores en aire.

Modelo	ID ISC.MR100A	SL102	SL015M	SL018	SL030
A	-	20 mm	-	-	-
B	58 mm	-	50 mm	-	-
C	90,75 mm	-	64,8 mm	-	-
D	158 mm	-	78 mm	-	-
E	111 mm	-	76 mm	-	-
F	148 mm	-	82,6 mm	-	-
G	166 mm	-	85,3 mm	-	-
H	-	-	-	26,5 mm	26,5 mm
I	235 mm	-	122 mm	-	-
J	-	-	-	46,5 mm	32,5 mm

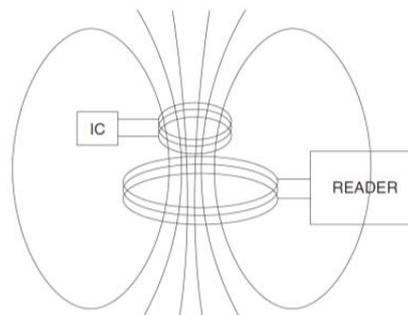
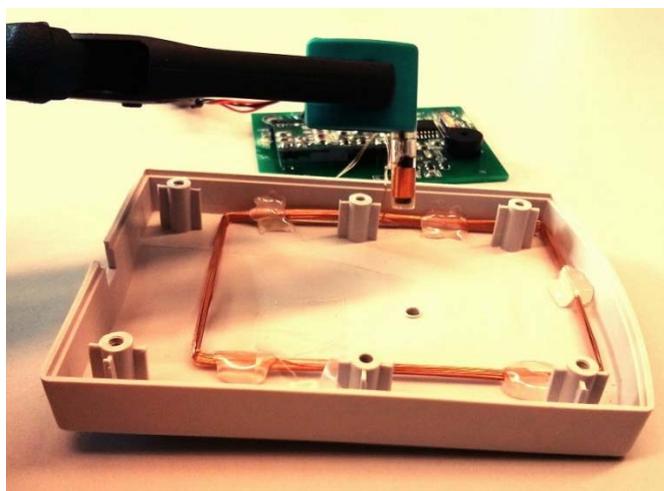


Figura 3.3 Posición de mayor inducción para el lector y tag de baja frecuencia.

Lectores y tags con el acuario vacío.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.7, las distancias indicadas marcan la altura máxima que pudo separarse el tag del fondo del acuario.

Tabla 3.7 Alcance de los diferentes tags y lectores con el acuario vacío.

Modelo	ID ISC.MR100A	SL102	SL015M	SL018	SL030
A	-	15 mm	-	-	-
B	52 mm	-	44 mm	-	-
C	84,75 mm	-	58,8 mm	-	-
D	152 mm	-	72 mm	-	-
E	105 mm	-	70 mm	-	-
F	142 mm	-	76,6 mm	-	-
G	160 mm	-	79,3 mm	-	-
H	-	-	-	20,5 mm	20,5 mm
I	229 mm	-	116 mm	-	-
J	-	-	-	40,5 mm	26,5 mm

Lectores y tags con el acuario lleno de agua dulce y salada

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los ensayos realizados con agua dulce (ver Tabla 3.8), y agua salada (ver Tabla 3.9).

En estos ensayos se observó la pérdida de alcance debida al medio. Como se esperaba, el alcance fue menor en agua salada.

Aunque para LF la atenuación no afectó tanto, el lector SL102 y el tag A, ya fueron descartados anteriormente debido a las dos limitaciones que presentaban: reducido alcance y gran dependencia de la inclinación.

Los SL018 y SL030 presentaban una característica interesante debido a su reducido tamaño, sin embargo resultaron inadecuados para detectar tags de pequeño tamaño.

Los resultados obtenidos con los lectores SL015M e ID ISC.MR 100A y diversos tags de pequeño tamaño y livianos (B, C, E y F), fueron satisfactorios, pudiendo ser empleados para esta área de aplicación.

Tabla 3.8 Alcance de los diferentes tags y lectores con el acuario lleno de agua dulce.

Modelo	ID ISC.MR100A	SL102	SL015M	SL018	SL030
A	-	13 mm	-	-	-
B	48 mm	-	40 mm	-	-
C	80 mm	-	52 mm	-	-
D	140 mm	-	60 mm	-	-
E	90 mm	-	60 mm	-	-
F	130 mm	-	65 mm	-	-
G	150 mm	-	65 mm	-	-
H	-	-	-	15 mm	15 mm
I	215 mm	-	105 mm	-	-
J	-	-	-	35 mm	20 mm

Tabla 3.9 Alcance de los diferentes tags y lectores con el acuario lleno de agua salada.

Modelo	ID ISC.MR100A	SL102	SL015M	SL018	SL030
A	-	10 mm	-	-	-
B	25 mm	-	15 mm	-	-
C	60 mm	-	18 mm	-	-
D	120 mm	-	40 mm	-	-
E	65 mm	-	40 mm	-	-
F	110 mm	-	42 mm	-	-
G	125 mm	-	42 mm	-	-
H	-	-	-	*	*
I	190 mm	-	60 mm	-	-
J	-	-	-	10 mm	*

* no se pudo medir

Para los tags analizados, el lector ID ISC.MR 100A tuvo mejor respuesta que el SL015M. No obstante, el tamaño de su antena es mayor, y para la propuesta que se realiza en este capítulo (utilización de múltiples antenas para localizar las especies) presentaba un compromiso entre alcance y resolución de la detección (localización).

3.2.3 Separación y disposición de las antenas

Para estudiar la viabilidad de la propuesta, fue necesario estudiar la disposición y número de antenas para cubrir la zona de estudio.

Para la implementación de un sistema de localización basado en antenas/lectores RFID, es necesario cubrir la zona de estudio con el mayor número de antenas posible. Tal como se observa en la Figura 3.4 la disposición ideal es solapando los rangos de detección de las antenas. No obstante, esta configuración produce un acoplamiento entre antenas, causando que múltiples lectores detecten el tag, aun encontrándose lejos de éste (la señal se ha ido acoplado entre antenas).

Uno de los ensayos realizados fue la inhabilitación de las antenas (lectores) cuyo rango se solapa con la antena que se interroga. Tal como se experimentó, las señales siguieron acoplándose aun estando los lectores apagados y desconectando las antenas de sus lectores; solo se obtuvieron resultados satisfactorios alterando la frecuencia de resonancia de la antena (incorporando una capacidad a la antena) o cortando su espira.

Estas soluciones, aun siendo efectivas, dificultaban el desarrollo e implementación del sistema (diseño, ajuste, control); por este motivo se evaluó la distancia de separación mínima entre antenas para evitar el acoplamiento, y estudiar la resolución o rango que puede conseguirse (número de antenas por metro cuadrado) sin modificar la electrónica de los lectores o las antenas.

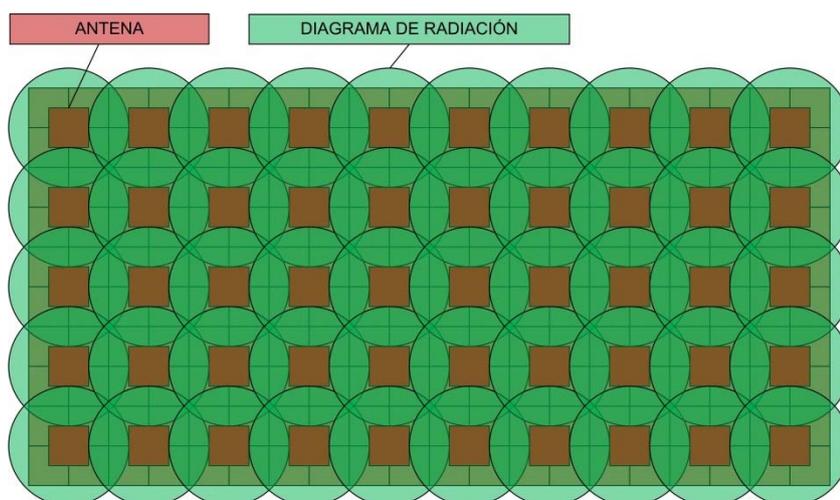


Figura 3.4 Disposición ideal de antenas para la implementación de un sistema de localización y seguimiento. El diagrama de radiación se solapa entre antenas evitando zonas muertas; no obstante, dicha disposición causa un acoplamiento de señales entre antenas/lectores.

Para la evaluación de este punto se han realizado dos tipos de ensayos empleando múltiples lectores dispuestos sobre el mismo plano:

- Alcance lateral entres los lectores (antenas) y los tags.
- Acoplamiento entre antenas.

Mediante la primera prueba se midió el alcance lateral de los diferentes tags y lectores. En el segundo, se midió la separación mínima entre dos lectores para evitar el acoplamiento de señales.

Alcance lateral

Este análisis se realizó en aire para tratar el peor caso (cuando existe mejor alcance). Consistió en aproximar lateralmente el tag hacia el lector hasta conseguir que éste lo detectase, momento en el cual se midió la distancia lateral entre ellos, ver Figura 3.5. Los resultados obtenidos pueden consultarse en la Tabla 3.10.



Figura 3.5 Esquema para medir el alcance lateral.

Tabla 3.10 Alcance lateral entre tags y antenas.

Modelo	ID ISC.MR100A	SL102	SL015M	SL018	SL030
A	-	0 mm	-	-	-
B	20 mm	-	6 mm	-	-
C	32 mm	-	12,5 mm	-	-
D	67 mm	-	29 mm	-	-
E	41 mm	-	16 mm	-	-
F	58 mm	-	22 mm	-	-
G	70 mm	-	34 mm	-	-
H	-	-	-	0 mm	0 mm
I	102 mm	-	58 mm	-	-
J	-	-	-	0 mm	3 mm

Los lectores SL018, SL030 y SL102 demostraron una baja sensibilidad de detección lateral. Sin embargo, dichos lectores no superaron las pruebas de alcance para detectar tags pequeños bajo el agua.

Para los lectores ID ISC.MR100A y SL015M se observaron diferentes alcances laterales en función del tamaño del tag (crecientes con su tamaño). El lector SL015M presentó siempre menor alcance lateral que el ID ISC.MR100A, pero como ya se observó en el apartado anterior, el alcance vertical también fue inferior.

Acoplamiento

El segundo análisis permitió conocer cuánto podían aproximarse las antenas sin que se produjese un acoplamiento entre ellas. El ensayo se realizó con dos antenas. Se fijó un tag en la segunda, y se aproximó el conjunto hacia la primera. Cuando el tag fue detectado por la primera, se anotó la distancia de separación entre ellas (ver Figura 3.6). Los resultados pueden consultarse en la Tabla 3.11.

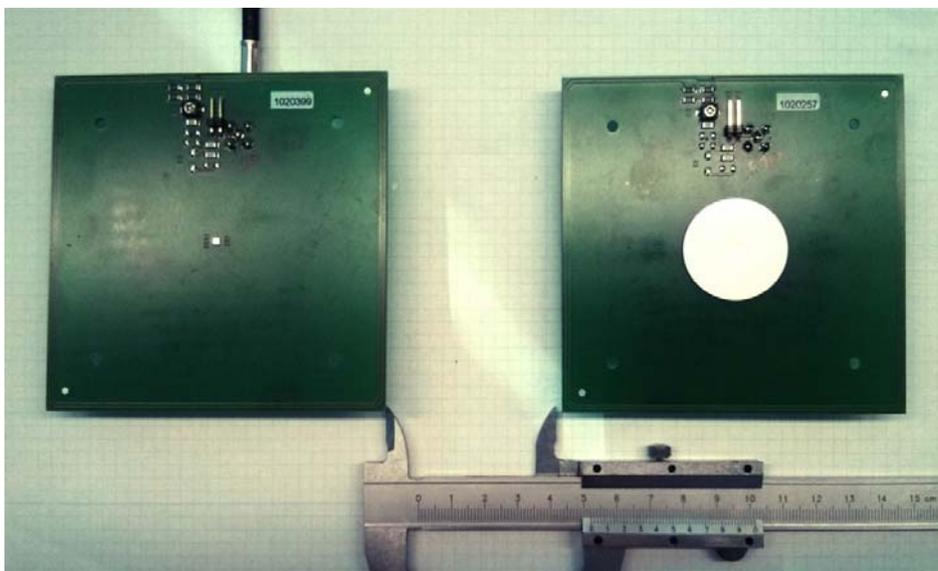


Figura 3.6 Esquema para medir la separación lateral entre antenas.

Tabla 3.11 Separación mínima entre antenas para evitar el acoplamiento.

Modelo	ID ISC.MR100A	SL102	SL015M	SL018	SL030
A	-	117 mm	-	-	-
B	33 mm	-	67 mm	-	-
C	65 mm	-	64 mm	-	-
D	102 mm	-	48 mm	-	-
E	78 mm	-	60 mm	-	-
F	90 mm	-	46 mm	-	-
G	85 mm	-	50 mm	-	-
H	-	-	-	8 mm	6 mm
I	110 mm	-	51,5 mm	-	-
J	-	-	-	5 mm	32 mm

Con los lectores SL102 no se experimentaron errores de detección por acoplamiento, esto es, el primer lector no pudo detectar el tag posicionado en el segundo, aunque ambas antenas se acercasen. No obstante, se observó una pérdida de alcance vertical que se recuperó cuando los lectores se separaron 117 mm. Los resultados obtenidos demostraron que el lector SL102 fue el que peor resolución ofreció para la implementación de la propuesta, aunque ya había sido descartado antes debido al alcance vertical.

Con el resto de los lectores también se experimentó una ligera pérdida de alcance vertical, aunque de menor intensidad. No se apreció esta pérdida cuando los lectores se separaron la distancia que evitó el acoplamiento entre antenas.

Los resultados obtenidos demostraron que respetando las distancias y sin modificar la electrónica del lector ni las antenas, era viable la implementación de un sistema de localización basado en múltiples antenas y con una resolución por debajo del centímetro.

A continuación se plantea el esquema de disposición de antenas que debe aplicarse para la implementación de esta propuesta. Teniendo en cuenta que la separación entre antenas introduce espacios muertos, zonas donde la especie puede no ser detectada, una distribución escalonada disminuye la posibilidad de que este hecho suceda (mediante esta disposición la especie debería realizar cambios de dirección continuados para sortear las zonas de detección), ver Figura 3.7.

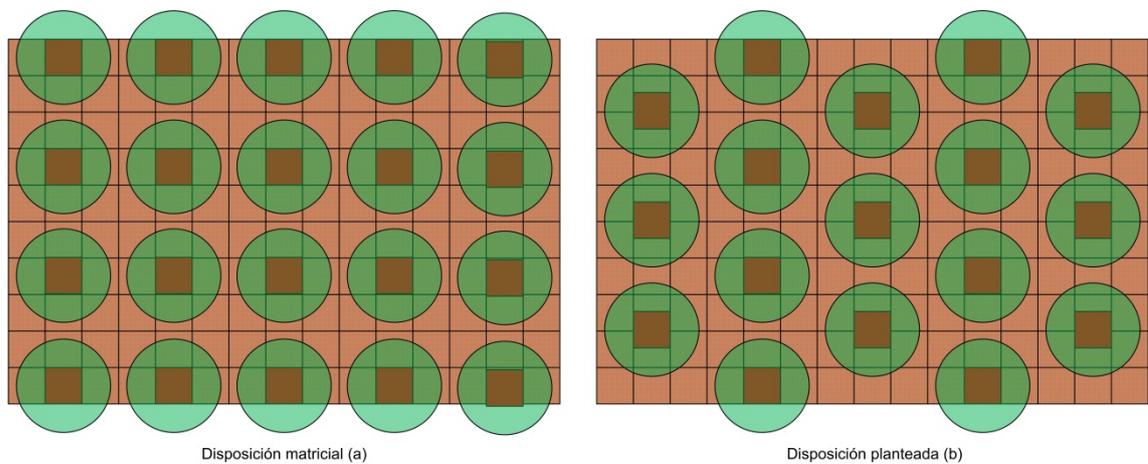


Figura 3.7 Instalación de antenas en formato o disposición matricial (a). Instalación de las antenas en distribución escalonada (b).

3.3 Sistema de localización y seguimiento propuesto

En este apartado se presenta la estructura de un sistema que, instalado en un acuario y utilizando la distribución de antenas propuesta, permite localizar la ubicación de los individuos (posición), estudiar su movilidad y trazar sus trayectorias.

A continuación se realiza una discusión de los requisitos y necesidades de este sistema, proponiendo más adelante su arquitectura.

3.3.1 Planteamiento

Debido a los diferentes escenarios que pueden darse en estos entornos (tamaño de los acuarios y/o necesidades específicas) el diseño de un sistema de este tipo requiere una arquitectura flexible y ampliable, de forma que no esté limitado a un caso particular y pueda adaptarse fácilmente a otras configuraciones.

Tal como se ha presentado, son diferentes las interfaces que soportan los lectores RFID, y todos ellos son controlables desde ordenadores, microcontroladores o procesadores embebidos. No obstante, los lectores de propósito general (no destinados a la logística o el control de stocks) no han sido diseñados para una operar simultáneamente sobre una misma máquina; pudiendo requerir una configuración o identificación manual (selección del puerto o interfaz del lector). Por otro lado, el aplicativo de control entregado por el fabricante del lector podría impedir el manejo de múltiples lectores, si no es a través de repetidas instancias de dicha aplicación.

Por ello, se requieren aplicaciones específicas para el manejo de los lectores. Debido a las características antes mencionadas (flexibilidad y capacidad de ampliación), resulta particularmente interesante que el sistema pueda autoconfigurarse. Estas consideraciones requieren soluciones tanto a nivel software (aplicación de control del sistema y firmware de ciertos componentes), como hardware (desarrollos electrónicos e interfaz de comunicaciones).

La reducción del cableado juega un papel importante en estos entornos de trabajo, donde prima la sencillez de interconexión de los diferentes elementos y la reducción de posibles errores/fallos. Al mismo tiempo, una reducción del cableado disminuye el coste y el tiempo de instalación y facilita la reparación/mantenimiento del equipo, cuestiones de gran importancia en este campo de aplicación. En este sentido las interfaces que incluyen líneas de alimentación en su cableado resultan particularmente interesantes.

Los ensayos realizados en el capítulo anterior con la interfaz USB demostraron resolver el problema de la identificación y manejo de múltiples dispositivos iguales (réplicas de un mismo hardware conectadas a un equipo); y al mismo tiempo, redujeron la complejidad de la instalación, al suministrar la alimentación por el mismo cableado. Así, esta interfaz resulta igualmente válida en este otro planteamiento hardware.

Para adaptar los lectores RFID a la interfaz USB se requieren modificaciones a nivel hardware. Se identifican dos posibles soluciones: adaptar la interfaz de cada uno de ellos y conectarlos al equipo de control, o controlarlos a través de un controlador intermedio el cual permite manejar a un grupo de ellos, ver Figura 3.8.

El primer caso presenta una sencillez aunque ciertas limitaciones:

- **Coste:** cada lector debe incluir un módulo de conversión. Para un número elevado de lectores el coste económico puede resultar elevado.
- **Número de lectores:** el límite máximo de lectores que pueden conectarse es de 127, límite de la norma USB (Axelson, 2005).

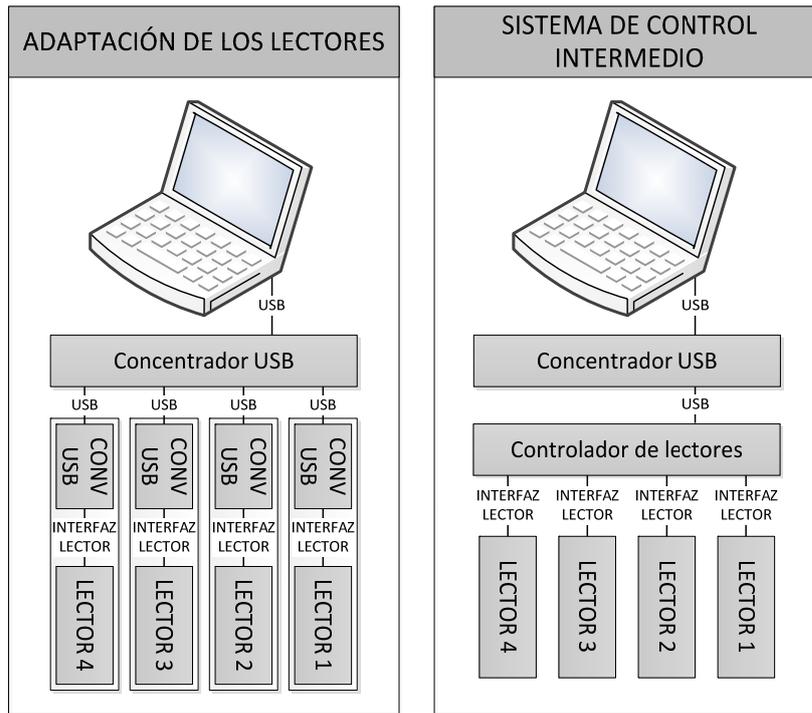


Figura 3.8 Posibles soluciones para adaptar los lectores a la interfaz USB. A la izquierda, mediante conversores de interfaz; a la derecha, mediante un sistema de control compatible con la interfaz del lector.

El segundo caso permite conectar un mayor número de lectores o antenas al equipo, y debido a ello, es la solución propuesta para la implementación del sistema. Se basa en controlar a un conjunto de lectores o antenas de forma descentralizada a través de dispositivos intermedios conectados al equipo anfitrión.

El controlador de lectores puede estar gobernado por un microcontrolador de prestaciones reducidas; éste no necesita potencia de cálculo, únicamente interrogar en secuencia a los lectores y enviar la información recogida al host.

Por otro lado, si se multiplexa la señal de salida, un mismo lector puede ser capaz de manejar múltiples antenas. No obstante, este método requiere una electrónica más compleja e introduce pérdidas de potencia y desajustes en las antenas. Debido al bajo coste de los lectores OEM con antenas integradas, no se consideró multiplexar además de la interfaz, las antenas.

Realizada esta discusión, y con objeto de resolver las necesidades detectadas, se plantean dos sistemas:

- Controlador de lectores.
- Sistema de alimentación y comunicaciones.

Bajo este planteamiento, el controlador gestiona múltiples lectores, manteniendo la interfaz nativa de éstos. El segundo sistema proporciona la alimentación necesaria a los lectores y permite que puedan ser gobernados por el host, ver Figura 3.9.

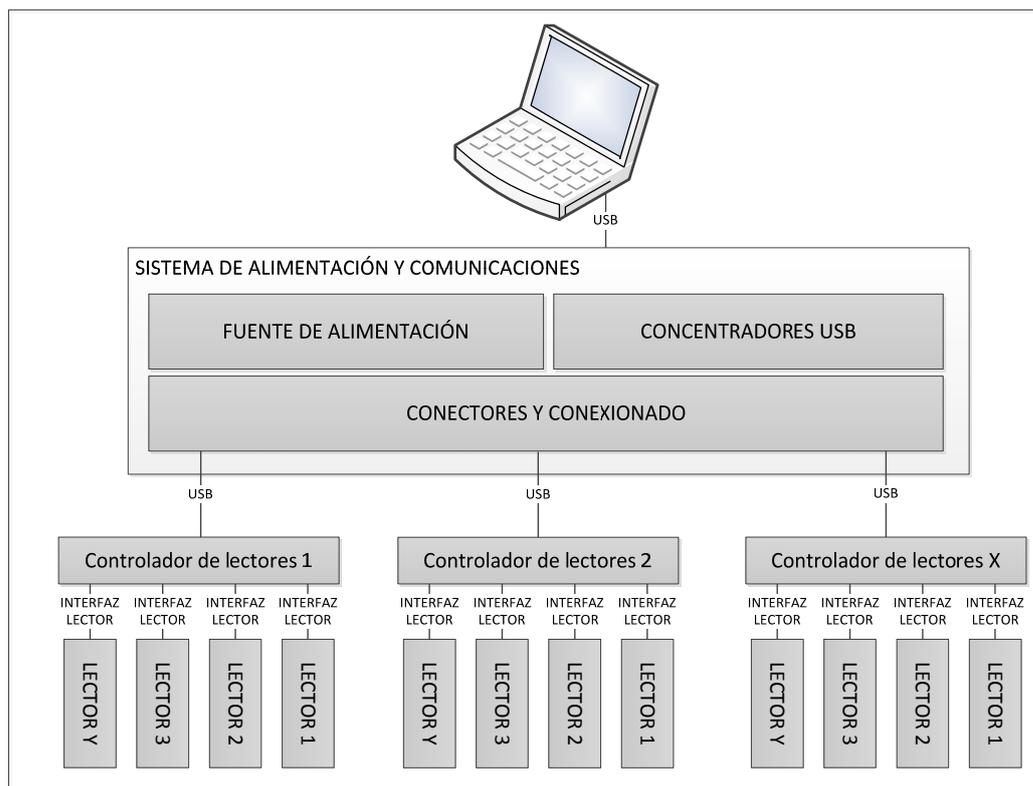


Figura 3.9 Esquema de la propuesta realizada. El número de lectores que soporta el controlador de lectores dependerá de su diseño. Conectando nuevos controladores al sistema de alimentación y comunicaciones el sistema es ampliable, el límite lo impondrá su diseño (conectores y potencia total demandada).

Aunque se ha descrito que la interfaz USB proporciona alimentación a través de sus líneas, la propuesta planteada utiliza una fuente de alimentación; son dos los motivos: ofrecer una mayor potencia a los controladores y poder proporcionar otras tensiones de alimentación a los lectores.

A continuación se detalla la arquitectura hardware planteada para cada sistema.

3.3.2 Controlador de lectores

La arquitectura del controlador de lectores se basa en un microcontrolador de propósito general, que se encarga de interrogar en secuencia los lectores conectados, ver Figura 3.10.

La propuesta permite la conexión de hasta 7 lectores con interfaz UART; interfaz de los lectores SL015M, los cuales respondieron adecuadamente en este entorno (superaron las pruebas de alcance).

Para la consulta de los lectores se propone la multiplexación de la interfaz utilizando dos multiplexores/demultiplexores de alta velocidad (74HC4051). El microcontrolador escogido fue el PIC16F88 y el conversor de interfaz de UART a USB el FT232BM; componentes utilizados en el anterior capítulo.

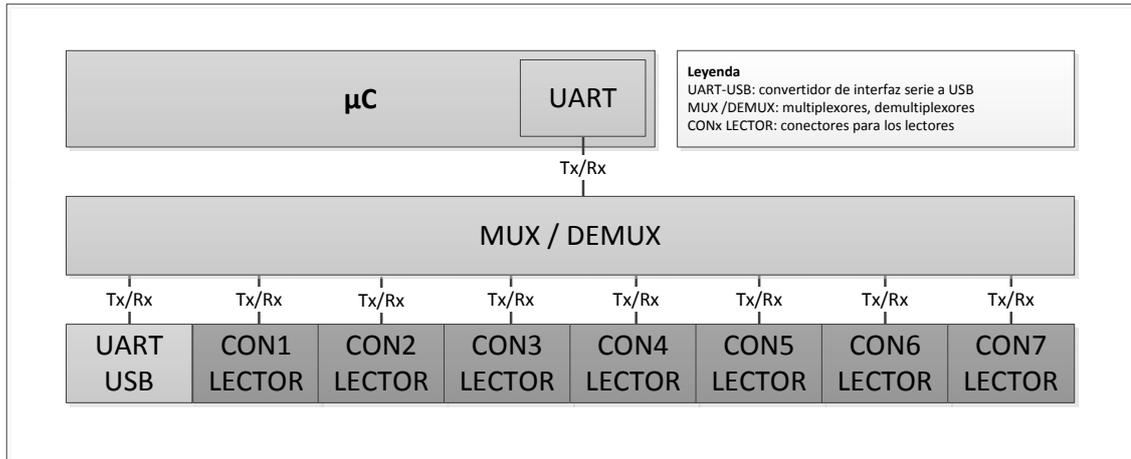


Figura 3.10 Propuesta hardware del controlador de lectores. Acepta hasta un máximo de siete lectores. La comunicación con el dispositivo es a través de USB.

El esquema propuesto es una solución de propósito general compatible con lectores con interfaz UART; pero capaz de manejar otros lectores (con otra interfaz) si se añaden conversores de interfaz en las tomas de entrada.

Modo de funcionamiento

El controlador puede operar del siguiente modo: el host solicita al controlador el estado de los lectores mediante una solicitud; el controlador detecta el comando e interroga a los lectores en secuencia; recabados los datos, son retornados al host donde son procesados.

Los datos que cada controlador puede enviar al host son los siguientes:

- Estado de cada lector (información que permite saber si los lectores operan correctamente y si han detectado un tag en su rango de acción).
- UID del tag detectado por cada lector (bytes de identificación del tag).

Evidentemente, la consulta a los lectores debe realizarse a partir del protocolo propietario del lector utilizado, requiriendo su implementación en el firmware del controlador.

Dadas las necesidades identificadas y detalladas en el apartado anterior, se propone que esta arquitectura incorpore tanto a nivel hardware como software las siguientes soluciones que favorecen el proceso de identificación y configuración de los mismos:

Reconocimiento del dispositivo

Tal como se demostró y evaluó en el capítulo anterior, es posible acceder a la interfaz del convertidor UART a USB mediante el nombre del dispositivo (asignado y grabado previamente con las herramientas facilitadas por el fabricante de este chip).

Este método permite independizar los controladores de su conexión (toma USB donde se conectaron), y el orden de conexión de los mismos.

Mediante la DLL del fabricante es posible consultar el número y nombre de dispositivos conectados, facilitando a la aplicación de control (equipo anfitrión) la identificación y control de los controladores.

Funcionamiento sin configuración

En estos entornos y para esta propuesta otra de las necesidades detectadas es su capacidad de autoconfiguración. Se identifican diferentes situaciones que pueden requerir la intervención manual de los lectores/controladores:

- El lector puede no contestar, puede ser porque ha sido desconectado intencionadamente (no se requiere) o por un fallo (deterioro de alguno de los componentes).
- Se ha conectado un nuevo controlador al sistema.

Para el primer caso se propone que el firmware del controlador interrogue en secuencia a todos los lectores, y si tras un determinado lapso de tiempo uno de ellos no contesta, se interrogue al siguiente (consulta no bloqueante). Este método evita que los controladores conectados al sistema tengan que configurarse, y permite seguir trabajando aunque partes del mismo se hayan podido averiar.

La segunda situación puede resolverse si el software del equipo anfitrión realiza una consulta de los lectores conectados antes de iniciar la experimentación. Esto es posible gracias al punto anterior (reconocimiento de los dispositivos). Así, esta solución permite que el sistema pueda ampliarse (conectando nuevos controladores y lectores al sistema) sin requerir una configuración manual por cada uno de ellos.

Estas soluciones han sido aplicadas sobre el desarrollo electrónico realizado, el cual puede consultarse en el Anexo B.1.

3.3.3 Sistema de alimentación y comunicaciones

El sistema de alimentación y comunicaciones que se propone permite la conexión de múltiples controladores de lectores, y su gobierno desde el equipo anfitrión.

Tal como ha sido discutido, la interfaz USB permite resolver las necesidades detectadas, y por ello, ha sido planteada en la propuesta. Aunque ésta proporciona alimentación a través de sus líneas, se ha planteado la utilización de una fuente de alimentación externa para ofrecer mayor potencia a los controladores o soportar otras tensiones de funcionamiento.

El esquema del sistema propuesto se muestra en la Figura 3.11. Se distinguen tres elementos:

- Fuente de alimentación.
- Comunicaciones (concentradores USB).
- Placa de conexiones.

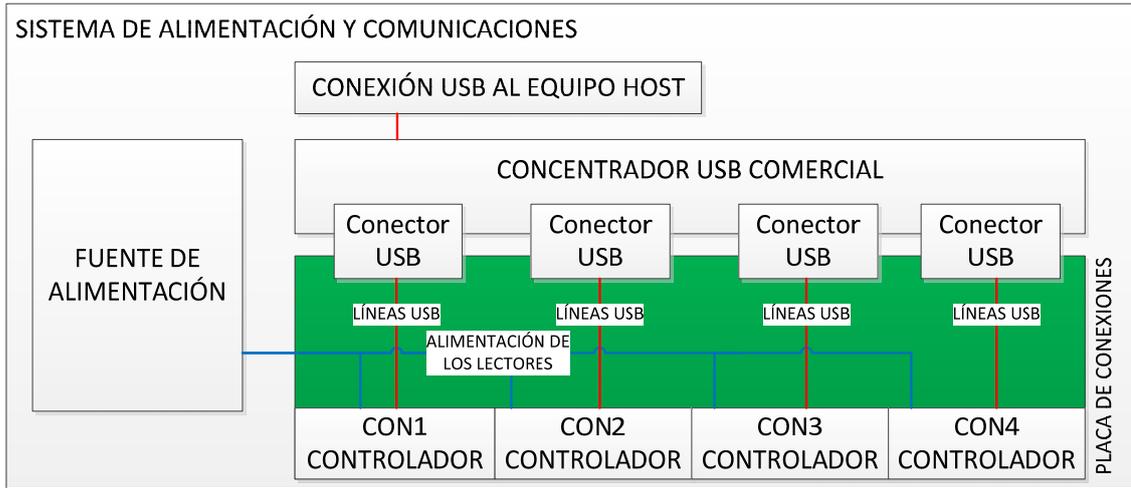


Figura 3.11 Esquema del sistema de alimentación y comunicaciones. Para ampliar el sistema deben de incorporarse placas de conexiones y concentradores USB.

En la placa de conexiones se realiza la interconexión de las líneas de alimentación, de los controladores y del concentrador USB. Es una arquitectura ampliable, y añadiendo más placas de conexiones y concentradores puede incrementarse el número de controladores que puede manejar el sistema. El límite lo fija la norma USB: 127 dispositivos y no pueden encadenarse más de cuatro concentradores (Axelson, 2005).

La corriente que puede demandar el controlador dependerá del modelo y número de lectores utilizados. Para no rebasar los límites de la especificación USB, se ha propuesto alimentar los lectores mediante una fuente externa y utilizando otro tipo de cableado.

El cable UTP - Ethernet de Categoría 5 con pares trenzados de sección AWG24, soporta una corriente máxima por conductor de 0,577 A. Utilizando dos pares para alimentar los lectores es posible suministrar hasta 1,154 A. El resto de líneas se dedican a las comunicaciones (D+ y D- del bus USB) y a la alimentación de la electrónica del controlador (alimentación y masa procedentes del concentrador USB). Si los lectores demandan mayores corrientes pueden aplicarse dos soluciones: subir la tensión y bajarla en la electrónica del controlador de lectores, o utilizar otro tipo de cableado con mayor sección.

Aunque mediante concentradores y cableado USB 3.0 es posible suministrar hasta 4,5 W (5 V @ 900 mA) por conexión, la propuesta además de ofrecer una mayor potencia: 5,77 W (5 V @ 1,15 A), permite manejar otras tensiones de suministro modificando únicamente la tensión de la fuente de alimentación (interesante para aquellos lectores que requieren otras tensiones de operación). El controlador de lectores es totalmente compatible con esta modificación, dado que su electrónica se alimenta a través de una línea a parte.

La propuesta ha sido implementada físicamente con dos placas de conexiones y dos concentradores, permitiendo conectar hasta 8 controladores, o lo que es lo mismo 56 lectores. Su diseño puede consultarse en el Anexo B.2 y el Anexo B.3.

3.4 Instalación de la propuesta

A continuación se detallan las consideraciones técnicas y de instalación de la propuesta planteada sobre un acuario, con el que posteriormente se realiza una experimentación con múltiples cigalas. Se utilizaron los lectores SL015M y los tag del tipo F (disco de 2,5 cm de diámetro), los cuales demostraron ser adecuados, ver apartado 3.2.

3.4.1 Acuario de experimentación

Se utilizó un acuario de fibra de vidrio y resina de poliéster de 1.500 x 750 x 400 mm y 5 mm de grosor, mecanizado con 4 madrigueras, ver Figura 3.12.



Figura 3.12 Acuario de experimentación.

3.4.2 Estructura de la instalación

Teniendo en cuenta la distancia de separación que debe practicarse entre lectores (SL015M), las dimensiones y formas de la base del acuario, y las necesidades del estudio (analizar la actividad en las madrigueras) se estimó una instalación de 37 lectores/antenas. Las cuales se distribuirían de la siguiente forma:

- 2 lectores por madriguera (uno en la boca y otro en el interior de la madriguera).
- 29 lectores cubriendo la base del acuario.

La estructura de la instalación utilizando las propuestas planteadas anteriormente (controlador de antenas y sistema de alimentación y comunicaciones) se esquematiza en la Figura 3.13.

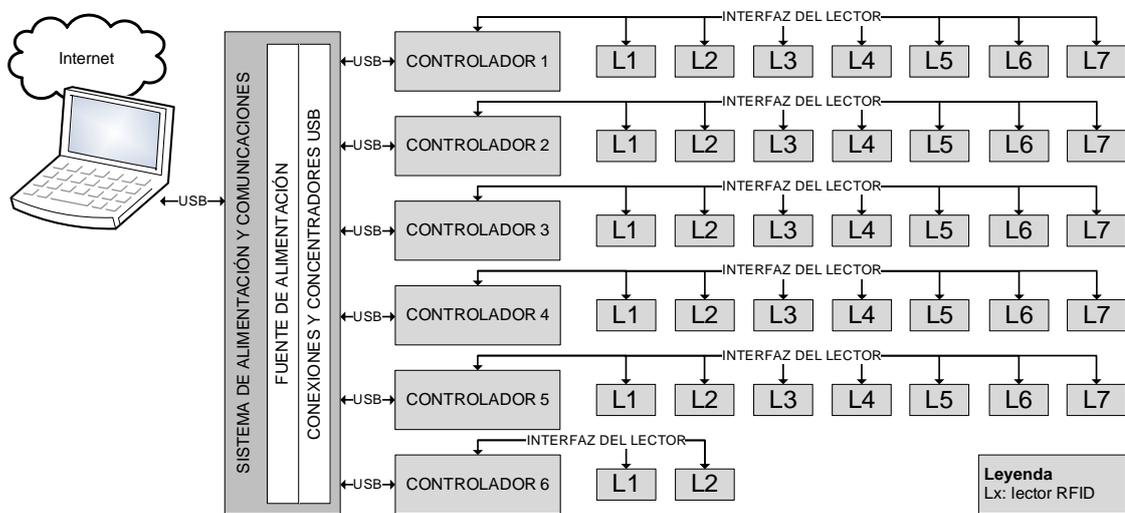


Figura 3.13 Estructura de la instalación.

3.4.3 Instalación de las antenas y los controladores

Los lectores/antenas se instalaron bajo el acuario. La electrónica de los controladores se protegió mediante cajas de plástico que fueron fijadas a los lados del acuario. Los lectores se protegieron en el interior de zócalos de plástico de 2 mm de grosor, y se dispusieron utilizando la distribución escalonada (anteriormente presentada, ver Figura 3.7).

Tras la instalación de los diferentes lectores se anotaron las coordenadas donde fueron ubicados (ordenadas y abscisas). Esta información después fue utilizada para los cálculos de las trayectorias de los animales.

Debido a la presencia de las madrigueras y al soporte del acuario (baldas que lo sostienen), las distancias entre lectores/antenas fueron algo superiores en algunas zonas. Se dispusieron dos lectores por madriguera; uno para medir la presencia del individuo en la entrada de la madriguera, y otro después, para medir su presencia en el interior, ver Figura 3.14. La instalación completa del sistema puede observarse en la Figura 3.15.



Figura 3.14 Instalación de los lectores en una de las madrigueras.

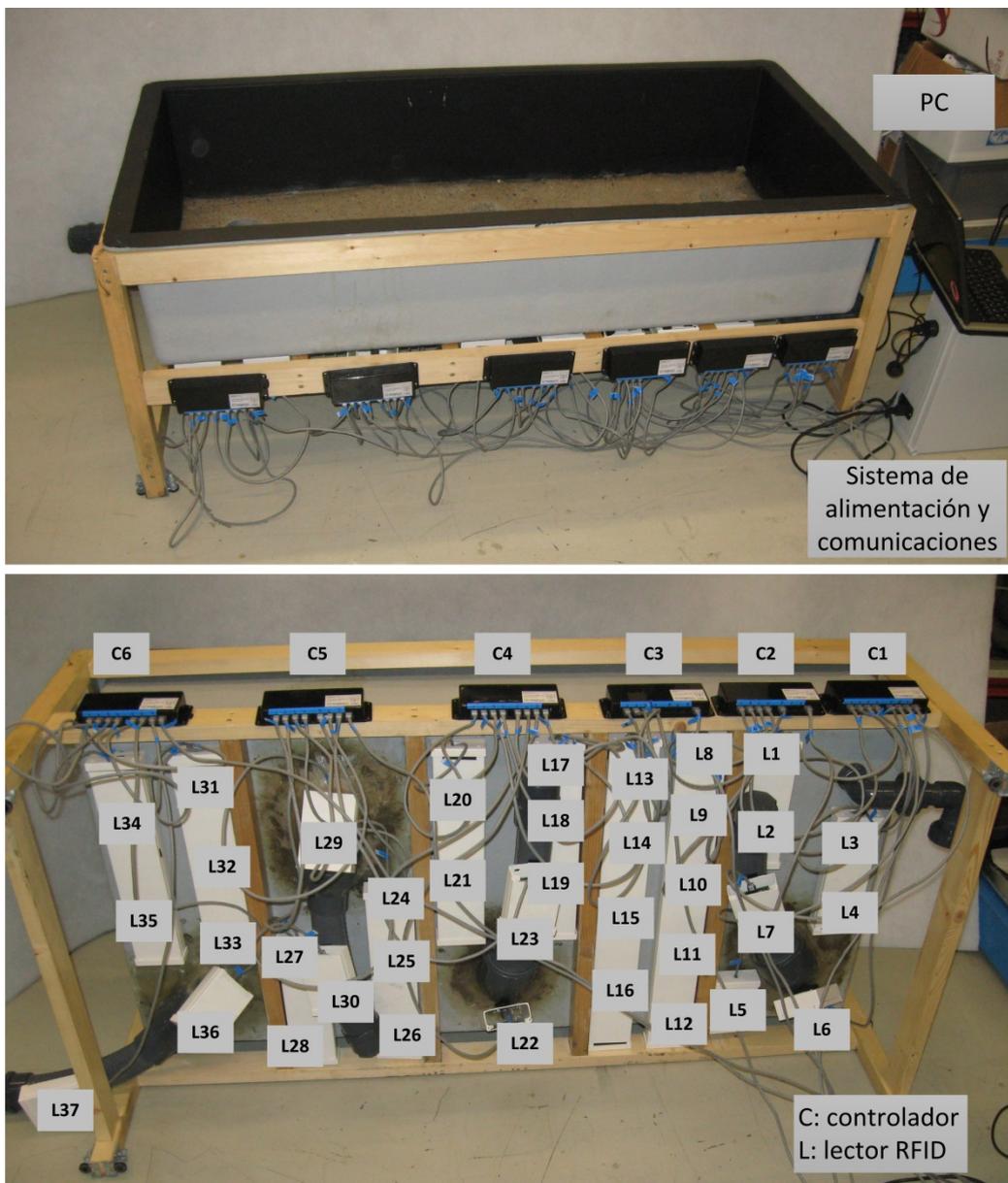


Figura 3.15 Instalación de la propuesta en el acuario de experimentación.

3.4.4 Control del sistema

El sistema se gobernó mediante un aplicativo desarrollado con el lenguaje de programación LabVIEW, ver Figura 3.16.

En esta aplicación se implementaron las técnicas anteriormente propuestas para favorecer el proceso de identificación y configuración de los dispositivos. Estas técnicas permitieron reconocer automáticamente a los dispositivos y éstos pudieron ser conectados y desconectados en caliente.

Los puntos más destacados de esta aplicación se describen a continuación:

- Continuamente examina el número y el nombre de los controladores de antenas que se conectan al equipo.
- Interroga el estado de los lectores a los controladores.
- Recoge los datos de los controladores (estado de los lectores), los marca con la hora del sistema y los guarda en disco para su posterior análisis.
- Muestra en pantalla la última posición de los individuos (tags) y los tags que han sido detectados.
- El periodo entre consultas es configurable. Durante la experimentación se fijó en 5 segundos.

Se propuso la ejecución automática de la aplicación tras reanudar el Sistema Operativo; de esta forma, la aplicación puede recuperar el control del experimento (control de los dispositivos y almacenamiento de los datos) tras un reinicio súbito del equipo, situación que puede darse durante experimentaciones de gran duración. Para ofrecer mayor robustez a esta situación puede utilizarse un sistema de alimentación ininterrumpido.

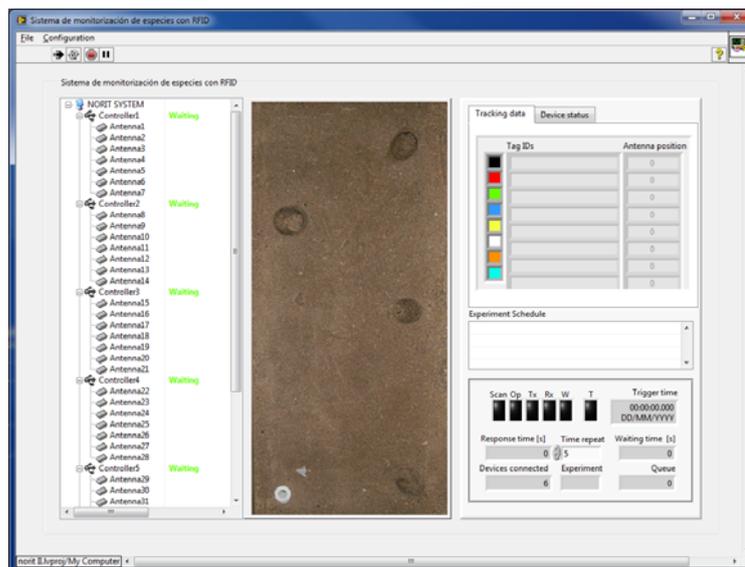


Figura 3.16 Sistema de control programado para las experimentaciones. A la izquierda una lista de los controladores y lectores RFID conectados, en el centro un gráfico donde se representa la ubicación de los individuos en el acuario, a la derecha diferentes visualizadores que indican el estado de los dispositivos y del experimento.

3.4.5 Adhesión de los tags

Se realizó una experimentación comprobando la correcta adhesión de los tags RFID a las cigalas, ver Figura 3.17.

Se decidió pegar el tag a la cola de los individuos mediante un pequeño cordel; su adhesión al caparazón no era efectiva debido a la altura del individuo y a su inclinación (tag inclinado).



Figura 3.17 Ensayos para comprobar la fijación y la posición idónea del tag.

3.5 Resultados experimentales

La experimentación con cigalas se realizó en una de las cámaras isotérmicas de la Zona de Acuarios Experimentales del Instituto de Ciencias del Mar del CSIC.

El equipo fue evaluado en condiciones reales de experimentación con cuatro cigalas marcadas con tags y conviviendo en el mismo acuario.

La duración del ensayo fue de 12 días consecutivos (272 horas aproximadamente). Mediante los datos recogidos, se han realizado diferentes análisis para estudiar y evaluar el sistema propuesto.

3.5.1 Consumo

Antes de la experimentación se hizo una prueba para hallar el consumo del sistema. En este ensayo se midió la corriente demandada por los controladores y su dependencia con la presencia de tags.

La corriente medida por cada controlador fue de 308 mA en estado normal de funcionamiento (corriente demandada por los siete lectores).

Se observó un aumento de 95 mA cuando uno de los tags se posicionó sobre uno de los lectores. Teniendo en cuenta este hecho, y considerando el peor caso (siete lectores con un tag sobre cada antena/lector), la demanda por controlador podía ascender hasta 973 mA, corriente que podía soportar el cableado propuesto (1,154 A).

Para la experimentación con cuatro individuos, la corriente requerida por los lectores de un controlador podía variar entre 308 mA y 688 mA (cuatro tags sobre los diferentes lectores de un controlador).

Así, la potencia demandada de la instalación (relativa a los 37 lectores y para cuatro tags), podía variar entre 8,15 W (1,63 A @ 5V) y 10,05 W (2,01 A @ 5V); potencia que soportaba sin problemas la fuente de alimentación propuesta (100 W).

3.5.2 Estabilidad

Durante la experimentación no ocurrieron caídas o cuelgues de los controladores ni de los lectores. La aplicación pudo manejar y registrar los datos que entregaron los 37 lectores, realizando un total de 196.147 consultas por lector (periodo de muestreo de 1 consulta cada 5 segundos).

Al introducir los individuos en el acuario se produjeron pequeñas salpicaduras de agua. Se proponen dos medidas para solucionar este punto durante la intervención con los animales: instalar los controladores bajo el acuario, y/o utilizar conectores y cajas con mayor grado de protección.

Por otro lado, no se perdió ningún tag, por lo que el método de adhesión demostró ser efectivo. Aunque una de las cigalas murió durante el ensayo (individuo #3), este hecho no se debió al proceso de fijación del tag.

3.5.3 Detecciones

A partir de los datos recogidos se analizaron las detecciones por individuo (ocasiones en que los lectores detectaron la presencia de los tags).

Durante el ensayo se detectaron a los individuos en 70.674 ocasiones, distribuyéndose como se indica en al Tabla 3.12.

Tabla 3.12 Detecciones totales por individuo.

Individuo	Número de detecciones
#1	18.862
#2	5.444
#3	18.722
#4	27.646

Los datos preliminares demostraron que los cuatro individuos fueron detectados durante la experimentación.

No ocurrieron detecciones simultáneas (múltiples lectores detectado al mismo individuo), confirmando la correcta separación de las antenas; por tanto, no se dieron errores por acoplamiento de señales entre antenas.

Se procesaron un total de 605 detecciones incorrectas (el lector no fue capaz de leer el UID del tag correctamente), causadas por una mala posición del tag en el momento de la lectura (tag inclinado o en los límites del rango del lector). Teniendo en cuenta este dato, el sistema detectó a los tags con un acierto del 99,15 %.

A pesar de la elevada fiabilidad de las detecciones, éstas fueron escasas en comparación con el número de consultas realizadas (196.147) y diferían entre individuos, hecho que podía estar relacionado con la movilidad de los animales, la frecuencia de las consultas, y la presencia de zonas de no detección; puntos que se estudian a continuación.

Tal como analizó en el apartado referente a la distribución de lectores, alejando las antenas unas de otras, se evitaba el acoplamiento de señales. Sin embargo, esta separación introducía un margen o zona de incertidumbre donde los individuos podían no ser detectados.

La instalación realizada en el acuario, presentaba zonas de incertidumbre debido a la difícil instalación de las antenas cerca de las madrigueras y del soporte del acuario, ver Figura 3.14 y Figura 3.15.

Por otro lado, las madrigueras también eran zonas de incertidumbre (tan solo se instalaron dos antenas en el recorrido de toda la madriguera). Así, y teniendo en cuenta la biología de esta especie (reside durante ciertos periodos en el interior de las madrigueras), la pérdida de detecciones también estaba relacionada con la posición de los individuos en el interior de éstas.

A partir del número de detecciones acumuladas (ver Figura 3.18), se analizaron los momentos de incertidumbre (periodos en los que no fue posible localizar a los individuos); este hecho puede observarse cuando la pendiente de dicha representación es igual a cero.

Mediante este análisis también pudo observarse que la movilidad de los individuos 1 y 4 posibilitaron tasas de detección/localización más altas y constantes. El número de detecciones por hora calculado por individuo se resume en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Tasa de detecciones por individuo durante la experimentación.

Individuo	Detecciones por hora
#1	62,24
#2	19,98
#3	68,72
#4	101,48

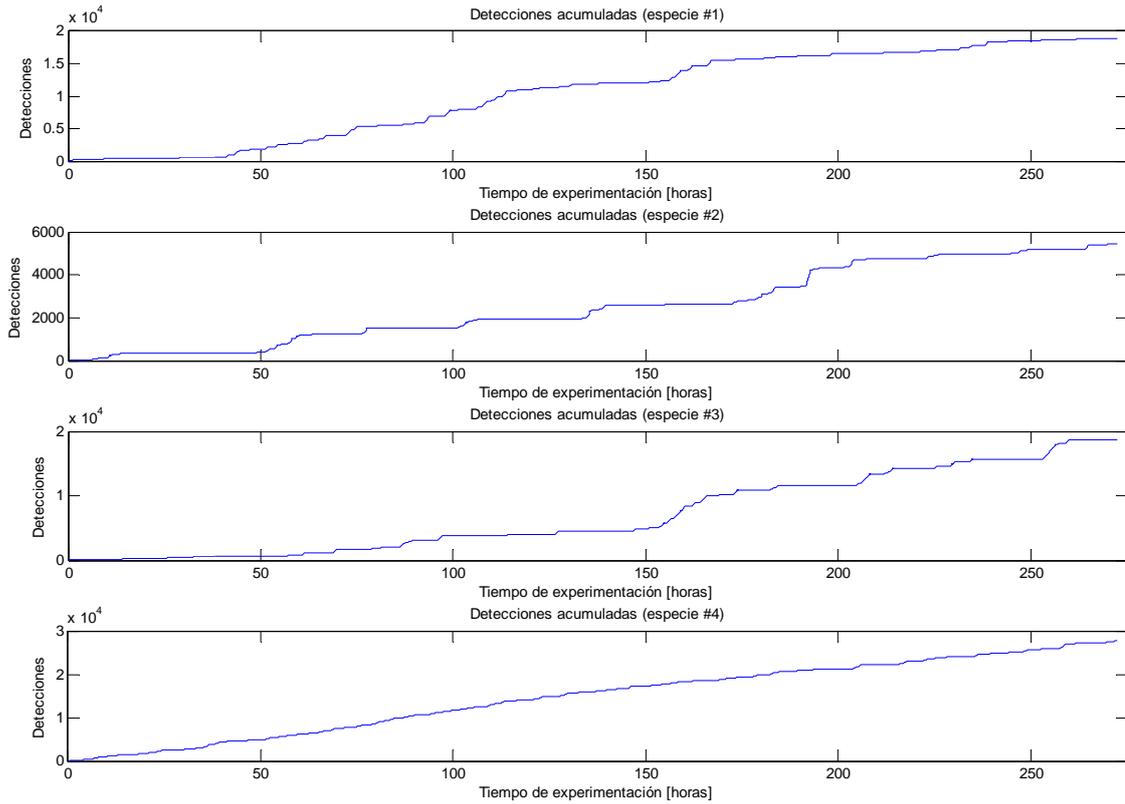


Figura 3.18 Detecciones acumuladas por individuo.

Por otro lado, aunque el individuo #3 pereció, por la posición que ocupó (cerca de uno de los lectores), se siguió detectando su presencia; y por ello, el número de detecciones de este individuo fue alto.

No obstante, dicho individuo residió en una posición cercana a uno de los lectores de la madriguera (lector 7), por lo que el tag no fue detectado de forma continua, punto que puede observarse en la gráfica anterior.

3.5.4 Efectividad de los lectores

En este apartado se ha estudiado la efectividad de los lectores, esto es, si todos los lectores/antenas detectaron la presencia de los individuos; evaluando de forma indirecta si la posición de las antenas bajo el acuario se había realizado correctamente.

El resultado obtenido (ver Tabla 3.14) reveló que tres lectores (23, 30 y 36) no fueron capaces de detectar la presencia de los individuos. Los lectores citados correspondieron con los ubicados en las madrigueras, ver Figura 3.19.

Los lectores 23 y 30, instalados en el interior de las madrigueras 2 y 3 respectivamente, no detectaron ningún individuo. Sin embargo, sí lo hicieron los lectores ubicados en la entrada de dichas madrigueras. Los datos no permitieron determinar si el problema se debió a la posición/ubicación de los lectores, o si por el contrario, fueron los individuos los que no llegaron a explorar el interior de ambas madrigueras.

Tabla 3.14 Detecciones por lector e individuo durante la experimentación.

#Lector	Individuo #1	Individuo #2	Individuo #3	Individuo #4	Detecciones totales
1	668	598	2	1.379	2.647
2	20	12	0	51	83
3	591	261	12	832	1.696
4	106	269	3	382	760
5	6.302	745	16	411	7.474
6	45	0	22	0	67
7	0	0	18.293	0	18.293
8	1.015	251	2	1.250	2.518
9	17	5	3	66	91
10	5	6	0	23	34
11	19	16	3	32	70
12	4.343	388	112	17	4.860
13	23	26	1	160	210
14	8	10	0	71	89
15	108	3	0	61	172
16	348	147	2	177	674
17	19	13	0	444	476
18	6	11	0	24	41
19	1.365	44	1	1.949	3.359
20	7	5	0	39	51
21	12	14	0	17	43
22	1	35	0	159	195
23	0	0	0	0	0
24	559	12	0	119	690
25	1.490	835	12	268	2.605
26	8	6	2	27	43
27	173	19	4	90	286
28	877	610	8	32	1.527
29	0	3	0	112	115
30	0	0	0	0	0
31	309	50	39	4.180	4.578
32	385	862	183	2.008	3.438
33	20	29	1	11.749	11.799
34	4	4	0	1.259	1.267
35	9	7	1	222	239
36	0	0	0	0	0
37	0	148	0	36	184

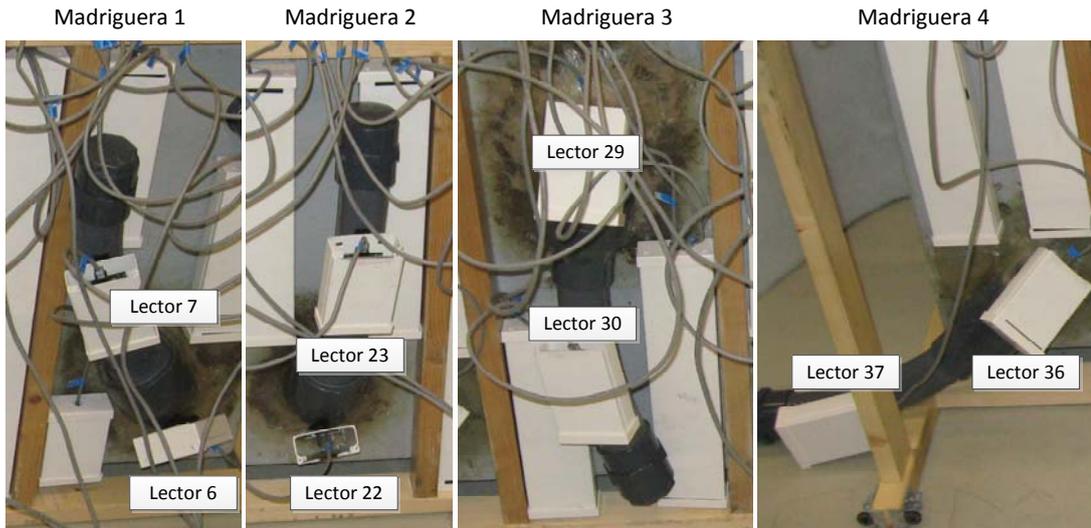


Figura 3.19 Lectores instalados en las madrigueras.

El lector 36, ubicado en la entrada de la madriguera 4 tampoco capturó la presencia de ningún animal; mientras que el lector 37, instalado en una posición más lejana, sí lo hizo. Así, en este caso, la incapacidad para detectar a los individuos se debió a la posición del lector respecto del tag (posición/inclinación). Por otro lado, los lectores ubicados en la madriguera 1 operaron correctamente.

En la Figura 3.20 se ha representado gráficamente el número de detecciones medidas por cada lector/antena y por cada individuo. Como se observa, los individuos fueron detectados en más ocasiones fuera de las madrigueras.

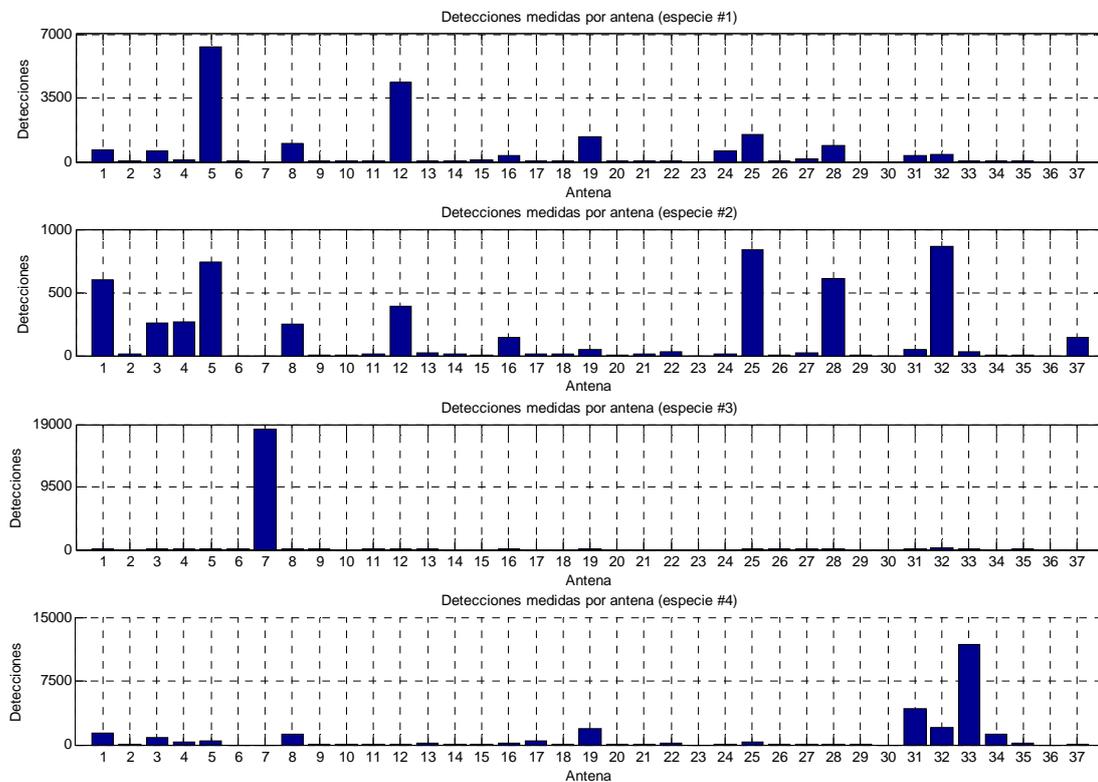


Figura 3.20 Detecciones por antena e individuo.

3.5.5 Trayectorias y ocupación de las zonas

En este apartado se ha realizado un estudio de las trayectorias y la ocupación de las zonas más frecuentadas. Mediante este análisis se observa la gran movilidad de los individuos 1, 2 y 4, mientras que el 3 apenas se desplazó hasta que pereció.

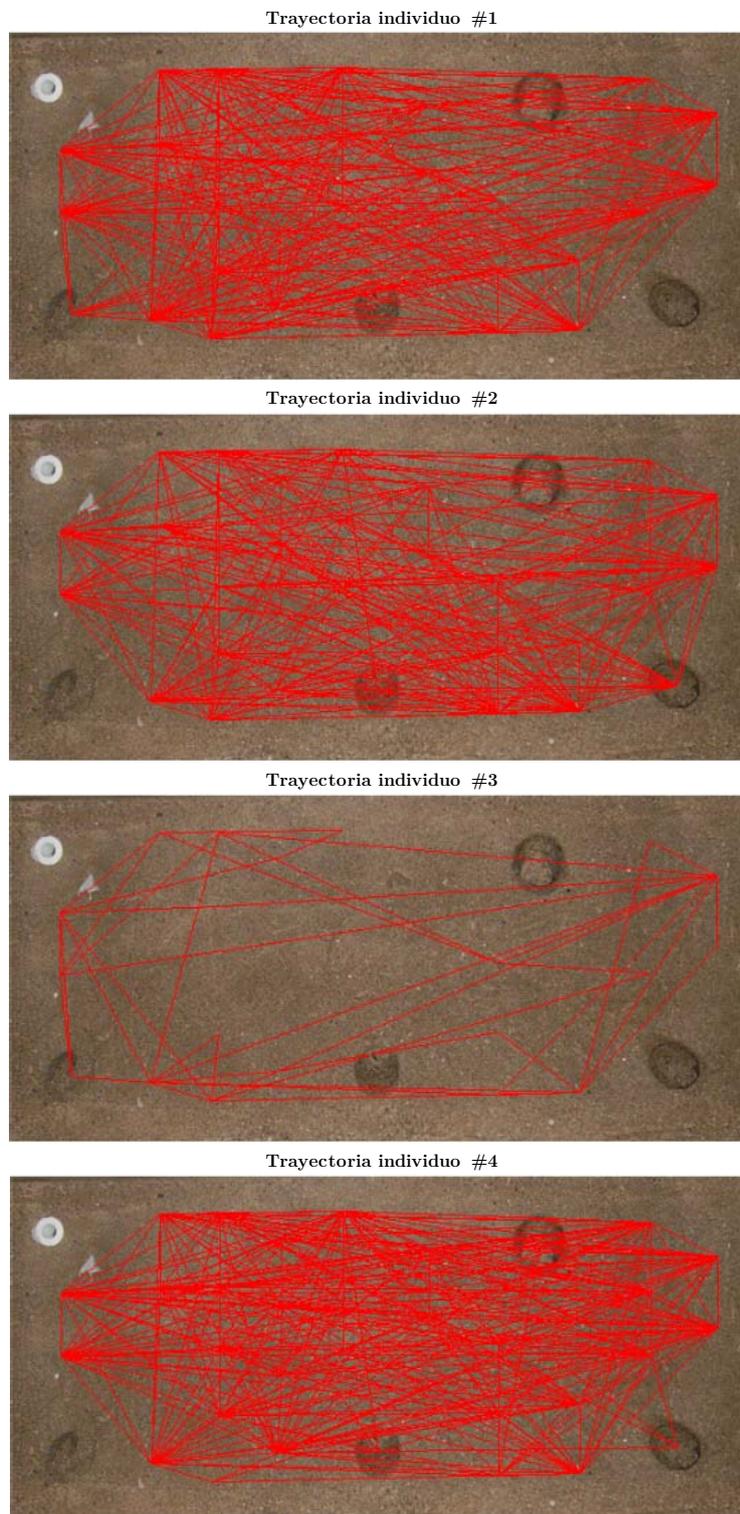


Figura 3.21 Trayectorias realizadas por los diferentes individuos.

En la Figura 3.22 se muestran las zonas más frecuentadas por los diferentes individuos. En este gráfico, la burbuja representa la ubicación (posición) frecuentada por cada individuo en el acuario, y su radio, el número de ocasiones que ocupó ese punto.

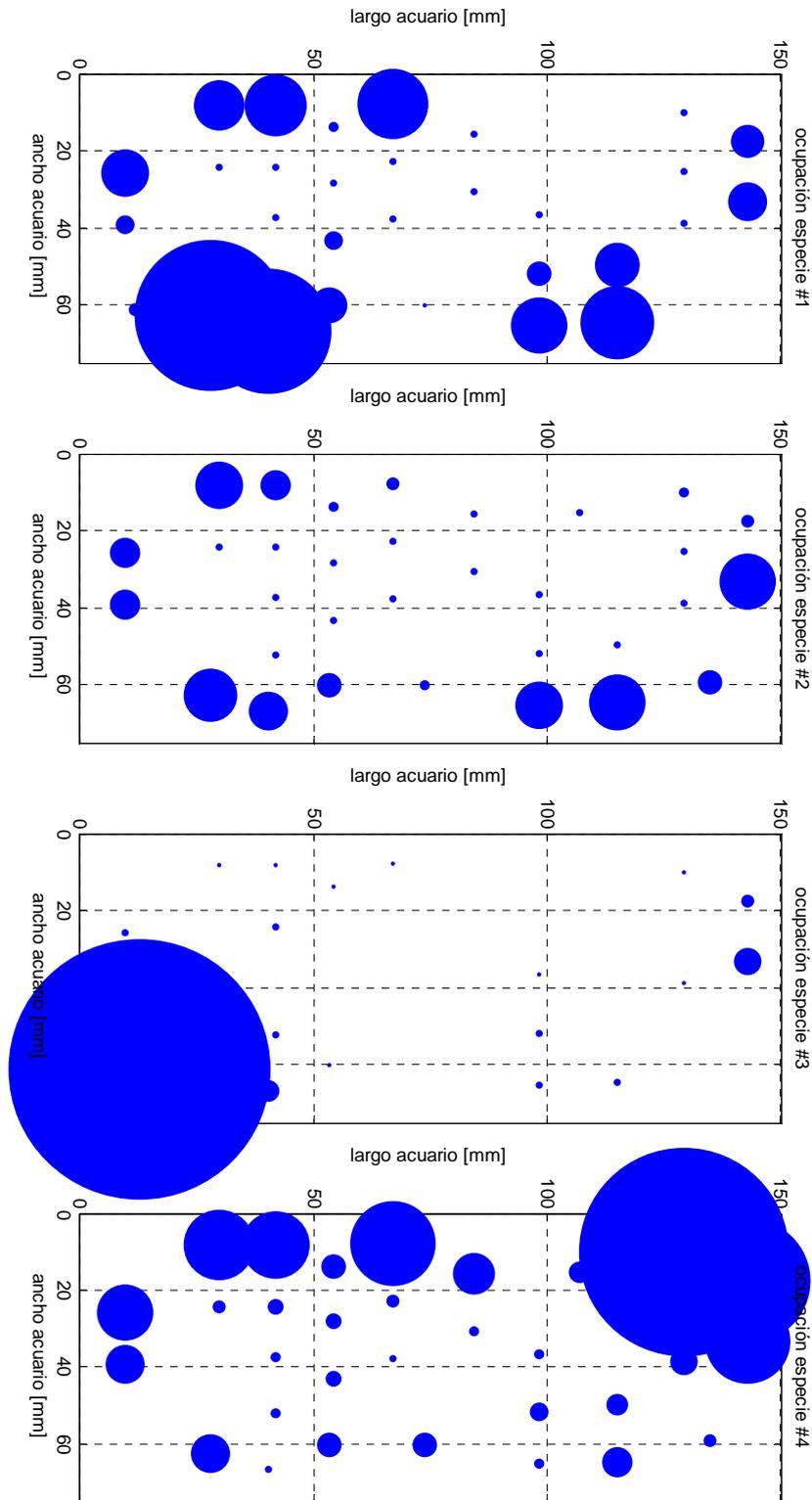


Figura 3.22 Zonas frecuentadas por los diferentes individuos.

Los resultados demostraron que los individuos recorrieron el acuario y fueron detectados por los diferentes lectores instalados. Los resultados del gráfico de ocupación determinaron la ubicación más frecuentada por los individuos.

Dichos resultados no permitían obtener la tasa o movilidad de los individuos, ni determinar la resolución del sistema; puntos que se analizan a continuación.

3.5.6 Movilidad y resolución

En este apartado se ha estudiado la movilidad de los individuos. Para ello se calculó la distancia recorrida entre detecciones consecutivas, ver Figura 3.23.

Para los individuos que habían demostrado más movilidad (individuos 1 y 4) se observaron picos más repetitivos y elevados que reflejaron que la velocidad y/o dirección que tomaron les permitió sortear los lectores (evitar la detección) en ciertos momentos.

Esta situación era posible si la especie se movía por zonas de incertidumbre, o a una velocidad inadecuada para el periodo de adquisición fijado, y que para el ensayo se fijó a 5 segundos.

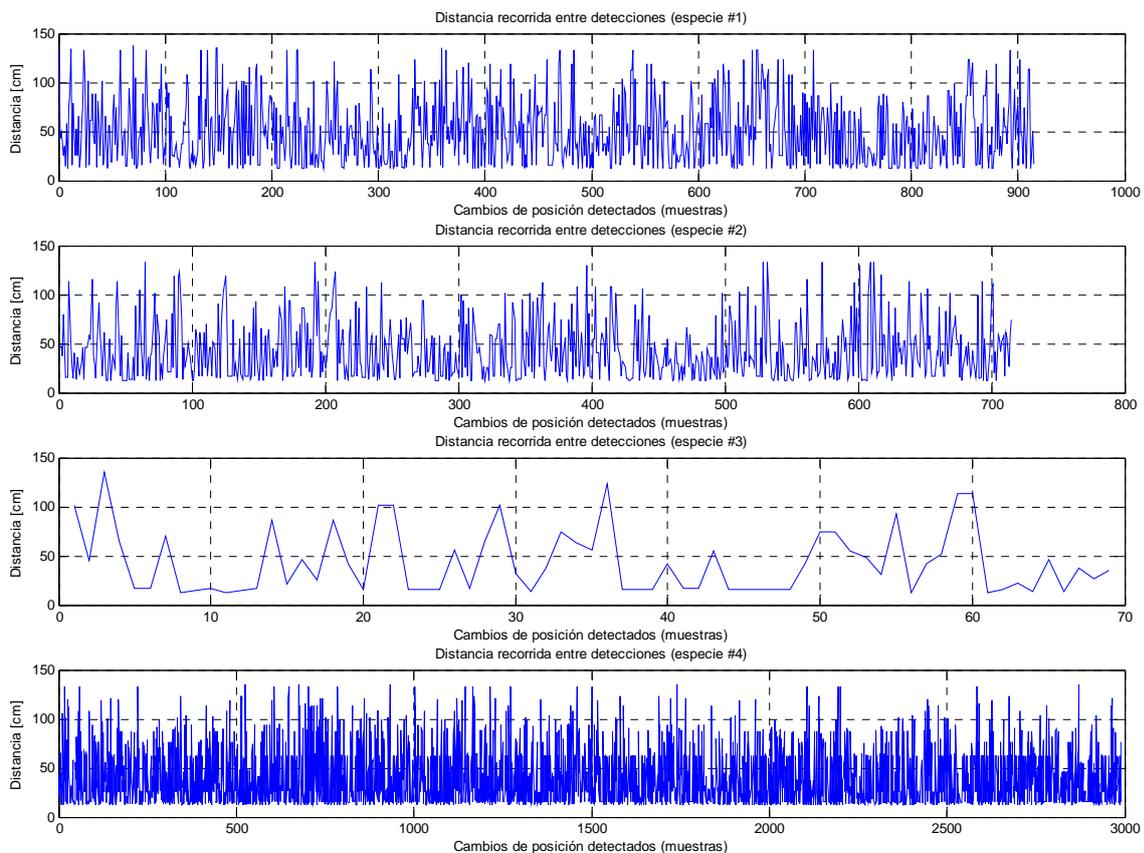


Figura 3.23 Distancia recorrida de los individuos durante el experimento. El eje de ordenadas marca la distancia recorrida entre una detección y la siguiente.

Se realizó un histograma de los datos anteriores (ver Figura 3.24) para estudiar con mayor detalle la distancia entre detecciones; obteniendo una primera representación de la resolución del sistema para las condiciones dadas: número de antenas, posición donde se instalaron, periodo de adquisición y movilidad de los animales.

La distancia entre detecciones más baja, fue la que más se repitió para los cuatro individuos. Este resultado confirmó que los individuos, durante su trayectoria, principalmente fueron detectados por los lectores instalados de forma consecutiva a lo largo y ancho del acuario. Aunque también se observó que en su paso, pudieron esquivar uno o varios lectores.

Estos datos (distancia entre detecciones) fueron ordenados en orden ascendente para obtener una segunda apreciación de la resolución, ver Figura 3.25. Mediante los resultados obtenidos se observó lo siguiente:

- El individuo 1 esquivó más lectores contiguos que el resto.
- Los individuos 2 y 4 presentaron resoluciones parecidas.
- Aunque el individuo 3 pereció pocas horas después de iniciar la experimentación, se observó una reducida distancia entre detecciones (buena resolución), durante la mayor parte del tiempo en que se registró su actividad.
- El individuo 4 presentó mejor resolución que el resto de individuos.

A partir de los datos hallados y mediante diferentes operadores estadísticos se estudió la resolución del sistema. Los resultados se resumen en la Tabla 3.15.

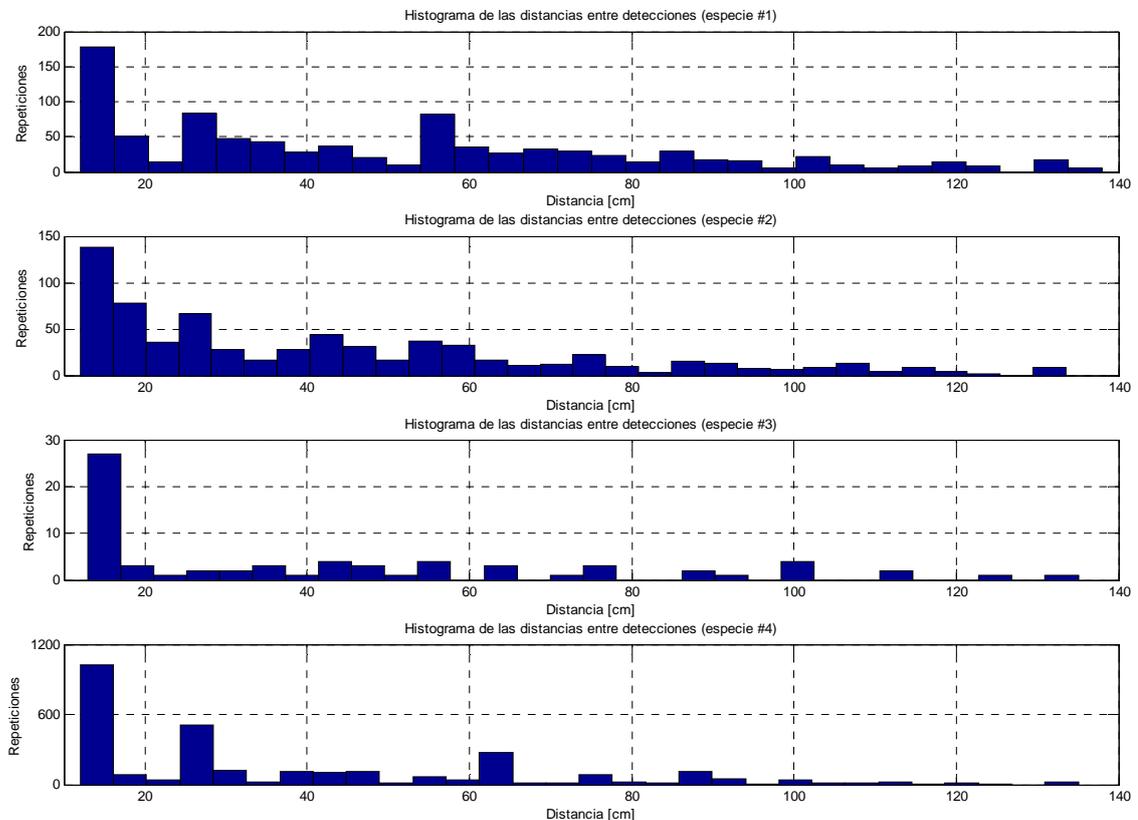


Figura 3.24 Histograma de la distancia entre detecciones.

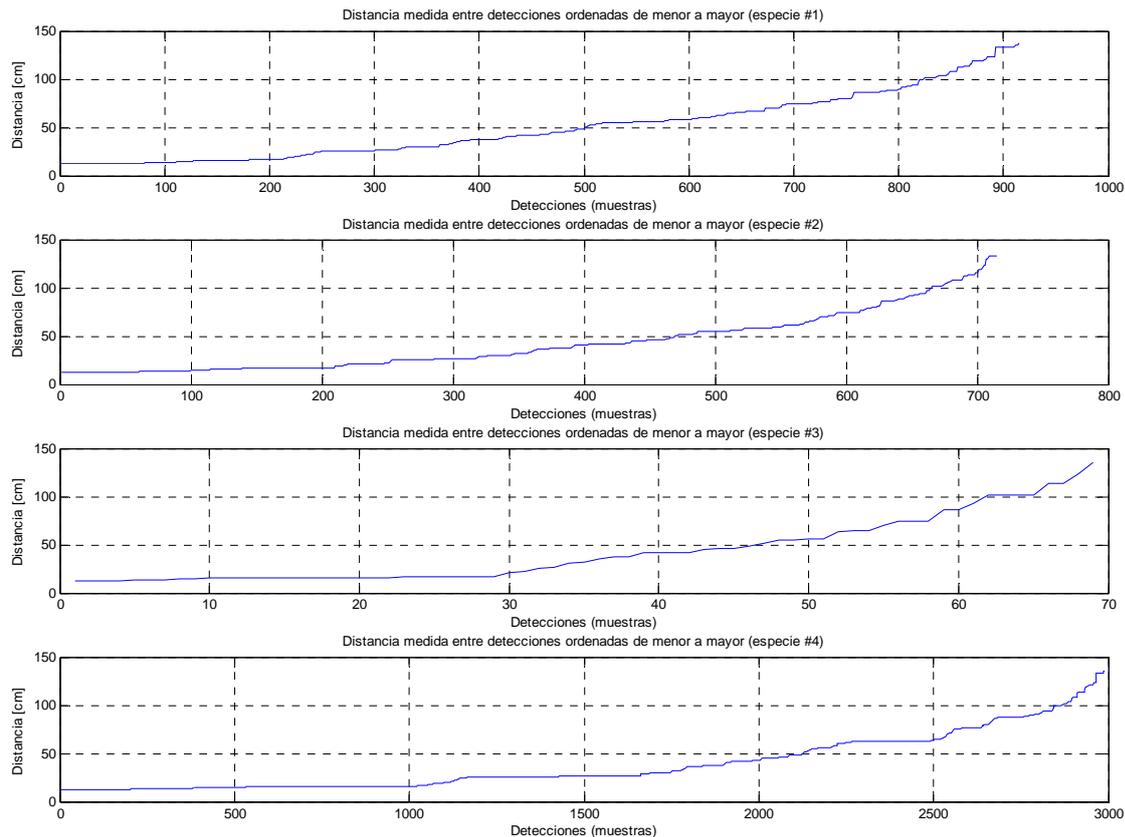


Figura 3.25 Distancia entre detecciones ordenadas en orden ascendente.

Tabla 3.15 Estadística de las distancias entre detecciones. A: distancia mínima entre detecciones, B: distancia media entre detecciones, C: mediana de las distancias entre detecciones, D: distancia media entre el 80 % de las detecciones más cercanas, E: distancia media entre el 70 % de las detecciones más cercanas.

Individuo	A	B	C	D	E
#1	12 cm	49,9 cm	42,52 cm	36,85 cm	31,92 cm
#2	12 cm	42,78 cm	32,74 cm	30,35 cm	26,26 cm
#3	12,93 cm	43,20 cm	32,33 cm	29,09 cm	24,35 cm
#4	12 cm	38,70 cm	26,67 cm	26,85 cm	22,35 cm

Los resultados demostraron una resolución mínima de 12 cm, que correspondió con la mínima distancia de separación entre antenas realizada en la instalación.

La distancia media, considerando el 80 % de las detecciones más cercanas, fue de unos 30 cm para todos los individuos.

Los datos también reflejaron dos puntos que deben ser mejorados para aumentar la resolución del sistema: la reducción de las zonas de incertidumbre y el ajuste de la frecuencia de muestreo en función de la movilidad de los individuos.

Las zonas de incertidumbre pueden reducirse mejorando el acondicionamiento del acuario (madrigueras y soporte), permitiendo la instalación de un mayor número de antenas (sin que se produzca acoplamiento entre antenas). Otra posibilidad, aunque de mayor complejidad técnica, es la instalación de las antenas en el interior del acuario.

Otro mecanismo para mejorar la resolución (trayectorias de los individuos) es adecuando la frecuencia de muestreo a la movilidad de la especie. Esto puede resolverse disminuyendo el periodo entre consultas en la aplicación del equipo de control; otra solución es modificar el firmware de los controladores para que operen de forma autónoma (interrogación de los lectores de forma continua) e informen al host la detección de los individuos (tags).

3.6 Sumario

En este capítulo se ha estudiado la viabilidad de los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID) para la localización y seguimiento de especies en acuarios; tecnología que presenta una característica interesante en esta área de aplicación, debido a su principio de funcionamiento (inducción electromagnética), evitando la utilización de pilas o baterías en el transmisor (tags pasivos).

La propuesta realizada ha contemplado la utilización de múltiples lectores dispuestos en la base del acuario. En los ensayos, el alcance conseguido entre los diferentes lectores y tags comerciales demostró ser adecuado para la monitorización de especies bentónicas.

Para un funcionamiento correcto, las diferentes antenas deben separarse las unas de las otras para evitar el acoplamiento. Este hecho condiciona la resolución del sistema, y en las pruebas realizadas demostró ser de pocos centímetros.

Después de la validación de los puntos anteriores, y en base a las necesidades detectadas en estos entornos de experimentación, se planteó la arquitectura de un sistema de monitorización capaz de manejar múltiples lectores RFID comerciales, y que permite la localización y seguimiento de especies. El sistema propuesto es flexible y ampliable, pudiendo cubrir diferentes escenarios: tamaños de acuario, número de zonas de localización, etc.

En la última parte de esta investigación, el sistema fue implementado e instalado en un acuario de experimentación, en el que se realizó un ensayo con cuatro cigalas. Los resultados preliminares indicaron que la posición y ángulo de inclinación del tag son factores críticos, y requieren una especial consideración para que el sistema opere correctamente.

Debido a la dificultad para instalar lectores cerca de las madrigueras, existieron zonas o caminos donde los animales no pudieron ser localizados. El periodo de consultas también demostró ser dependiente para la detección continua de los individuos.

Capítulo 3

Los puntos anteriores pueden mejorarse acomodando el acuario para la instalación de las antenas, y aumentando la frecuencia de las consultas, o modificando el firmware del controlador para que se realicen de forma automática.

Bajo las consideraciones anteriores, la investigación realizada ha demostrado la viabilidad de RFID para la monitorización de especies bentónicas. Esta tecnología permite identificar, localizar y seguir a diferentes individuos de forma simultánea por el acuario; así como medir los tiempos de ocupación de los animales en zonas delimitadas. Debido a su principio de operación, también resuelve una de las necesidades identificadas en estos entornos: el estudio de las especies durante mayores extensiones temporales.

Capítulo 4

Monitorización de especies mediante dispositivos acústicos

La investigación realizada en este capítulo se estructura en cuatro partes. En la primera, se evalúa el rendimiento de un equipo comercial para la monitorización de especies, realizando diferentes experimentaciones en mar y en laboratorio, con y sin especies. Los resultados de esta primera parte motivan los bloques siguientes de esta investigación.

En la segunda parte se construye un transductor acústico sumergible, utilizando una cerámica piezoeléctrica; siendo un primer prototipo para el diseño de transmisores de pequeño tamaño. En este apartado se describe el procedimiento y los métodos utilizados para su implementación; posteriormente se caracteriza en frecuencia y se compara su respuesta con la obtenida con un hidrófono comercial.

En la tercera parte se propone y desarrolla una plataforma de comunicación acústica, apta para el campo de la monitorización de especies, que permite la utilización e implementación de diferentes protocolos y modulaciones, y soporta la multiplexación OFDM.

En la cuarta y última parte, dicha plataforma es adaptada para trabajar bajo el agua, y junto con el transductor construido, son evaluados en el mar.

Los objetivos más detallados de cada bloque, así como los sistemas y métodos de medida utilizados se detallan en los siguientes apartados.

4.1 Experimentaciones preliminares

En este apartado se evalúa el rendimiento del hidrófono VR2W y los transmisores V6 de Vemco, diseñados para la monitorización de especies en espacios abiertos. Se realizan tres experimentaciones en el mar y una en laboratorio, con objeto de estudiar su operación en estos entornos.

Posteriormente, y con objeto de reducir la tasa de errores de la comunicación detectados en acuarios, se estudia el grado de absorción acústica de diferentes materiales.

A continuación se resume el principio de funcionamiento y las características del equipo comercial; después, se introducen y detallan las experimentaciones, así como los materiales y métodos utilizados.

Descripción del hidrófono VR2W y los transmisores V6

El hidrófono VR2W es un receptor acústico autónomo que actúa como datalogger, almacenando en memoria la información enviada por los transmisores, los cuales son portados por las especies, ver Figura 4.1.

Los transmisores, cada cierto tiempo emiten una señal acústica codificando su identidad; y mediante la cual, es posible determinar a su portador (especie).

El tamaño de los transmisores V6 es de 5 x 16,5 mm y tienen una autonomía de 64 días transmitiendo cada 30 segundos. Como se detalla en sus especificaciones, su señal puede ser detectada con el hidrófono VR2W a una distancia máxima de 200 m.

Las señales recibidas (identificadores) se almacenan en la memoria del hidrófono junto con la hora de llegada (a partir del reloj interno del equipo el cual debe sincronizarse en tierra antes de su uso). Posteriormente, tras finalizar la experimentación, el hidrófono debe ser recuperado para extraer y analizar los datos registrados.

Instalando múltiples hidrófonos estratégicamente sobre el área de estudio es posible detectar la movilidad de las especies de unas zonas a otras. Tal como indica su fabricante, el alcance final del sistema depende de múltiples factores, como la potencia de los transmisores, la absorción de señal, si hay línea de vista entre el transmisor y el hidrófono, la reflexión/refracción, el multicamino y el ruido ambiental (producido por el hombre o marino). Por ello, para fijar la distancia de colocación de los hidrófonos se recomienda estudiar previamente el rango cubierto en la zona de análisis (Vemco, 2013).



Figura 4.1 Hidrófono VR2W (a la izquierda) y transmisor V6 de Vemco (a la derecha). Fuente (Vemco, 2013 y 2014)

Descripción de las experimentaciones realizadas en el mar

Tal como se ha explicado, la operatividad de este equipo depende de las condiciones del entorno. Los tres ensayos realizados en el mar se llevaron a cabo en las inmediaciones del observatorio submarino OBSEA.

El observatorio está situado a 20 m de profundidad, a 4 km de la costa de Vilanova i la Geltrú, en una zona protegida y restringida a la pesca donde se encuentran biotopos artificiales que propician y concentran fauna marina. Los biotopos son cúbicos de hormigón de 2,5 x 2,5 x 2,5 m, ver Figura 4.2. Pueden consultarse más datos de la zona y del observatorio en (Nogueras, Artero, del Río, Mànuel, & Sarriá, 2009; del Río, 2011) y (Obsea, 2014).

Los biotopos concentran fauna muy diversa y de gran interés biológico (Baine, 2001; Duffey, 1997). En estos entornos, las señales acústicas se ven afectadas, existiendo reflexiones y reverberaciones que el receptor (hidrófono) debe de ser capaz de discriminar (Ranz Guerra, 2007).

En las dos primeras experimentaciones se evalúa la tasa de emisiones capturadas y perdidas, fijando la posición más adecuada de los hidrófonos para el tercer ensayo.

Los tres ensayos se realizaron con cuatro hidrófonos VR2W y múltiples transmisores V6. En los dos primeros, los hidrófonos y transmisores fueron adaptados con el sistema lastre-boya mostrado en la Figura 4.3. En el tercer experimento se utilizó el mismo sistema, pero los transmisores fueron adheridos a múltiples especies. La ubicación de cada uno de los hidrófonos se detalla en los apartados correspondientes.

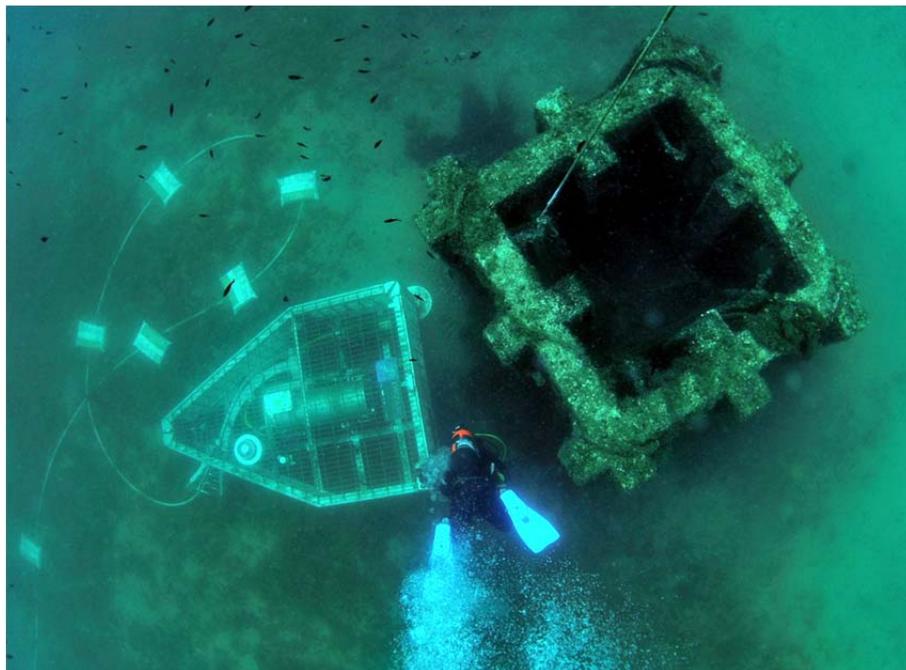


Figura 4.2 Observatorio OBSEA y uno de los biotopos a su lado. Fuente (Obsea, 2014).

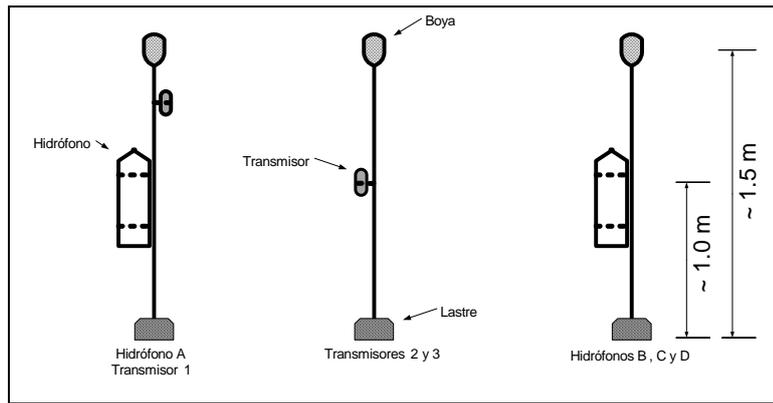


Figura 4.3 Instalación de los hidrófonos y transmisores.

En la cuarta experimentación se evaluó el rendimiento del equipo en laboratorio, en un acuario de cristal de 81 x 36 x 45 cm con una capacidad de 100 litros. A partir de los resultados obtenidos, y con objeto de reducir la tasa de errores de la comunicación, en el quinto experimento se estudió el grado de absorción acústica de diferentes materiales.

4.1.1 Experimentación de alcance en el mar

Descripción del ensayo

Para evaluar el alcance de las comunicaciones en las inmediaciones del observatorio, se ubicaron cuatro hidrófonos VR2W y tres transmisores V6 en lugares estratégicos (ver Figura 4.4) de forma fija y durante 118 horas.

La configuración permitió evaluar el alcance en diferentes puntos, emitiendo desde dentro y fuera de uno de los biotopos. Posteriormente, y mediante los datos recogidos, se evaluaron las detecciones capturadas y perdidas. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

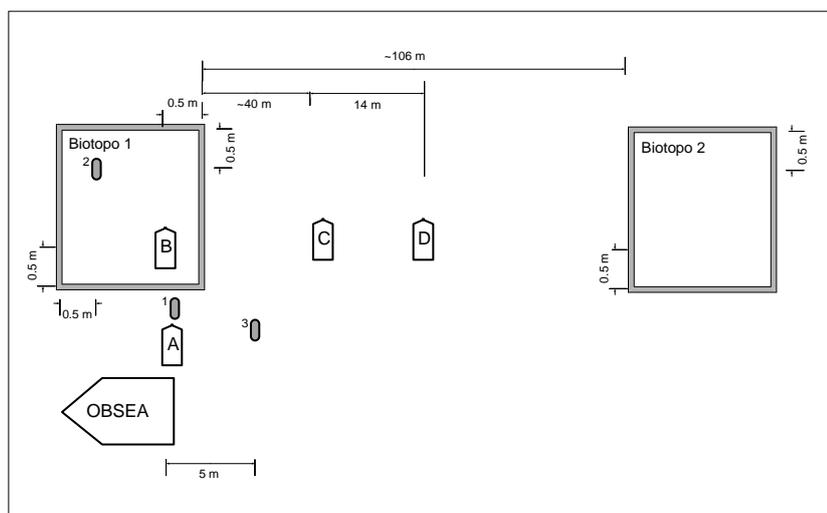


Figura 4.4 Disposición de los hidrófonos y transmisores durante el ensayo de alcance.

Resultados del ensayo

Las transmisiones capturadas por los hidrófonos demostraron la gran dependencia de la ubicación de los elementos (transmisores y los hidrófonos) sobre una zona con obstáculos (presencia del biotopo). Los resultados se resumen en la Tabla 4.1.

La ubicación del transmisor 1, muy próxima a la pared del biotopo, impidió que los hidrófonos alejados (hidrófono C y D) pudieran registrar un gran número de emisiones (pérdidas del 90 % de las transmisiones); su posición también afectó ligeramente a su hidrófono más cercano (hidrófono A).

Aunque el transmisor 2 presentaba inicialmente una situación compleja (al estar ubicado en interior del biotopo) respecto al transmisor 1, presentó mejor rendimiento, tanto con el hidrófono A como con el B. Por otro lado, aunque el hidrófono B también se encontraba en el interior del biotopo, detectó al transmisor 1 en más ocasiones (1,53 %) que el hidrófono A, situado fuera y junto a dicho transmisor.

El hidrófono C, situado en una posición intermedia, alejado del biotopo y los transmisores, fue el que registró un mayor número de transmisiones. Respecto a éste, el hidrófono D, situado 14 m más lejos, perdió alrededor del 3 % de las detecciones.

Dado que los transmisores aplican un tiempo de espera pseudo-aleatorio⁴ entre transmisiones, y que no es público, la tasa de transmisiones perdidas se realizó considerando el promedio entre transmisiones que facilita el fabricante (1 emisión cada 30 segundos). Los resultados se resumen en la Tabla 4.2.

Los resultados indicaron pérdidas superiores al 33 % para todas las configuraciones. La tasa más baja (33,40 %) fue conseguida por la pareja transmisor 3 e hidrófono C, ambos situados fuera del biotopo.

Como se observa en la el porcentaje de pérdidas (transmisiones perdidas) fue mayor en las inmediaciones del biotopo, demostrando su influencia; aunque, en dicha posición, la presencia de fauna es un factor a tener en cuenta, y que también pudo intervenir en la pérdida de las detecciones.

Para conocer la evolución temporal de las detecciones durante el experimento, se calculó el número de emisiones registradas por hora y por hidrófono, ver Figura 4.5.

Tabla 4.1 Número de transmisiones capturadas durante experimento de alcance.

Transmisor	Hidrófono A	Hidrófono B	Hidrófono C	Hidrófono D
1	8.014	8.137	243	35
2	8.409	8.464	9.113	8.832
3	8.381	8.336	9.431	9.090

⁴ Mecanismo que demuestra disminuir las colisiones cuando múltiples transmisores operan simultáneamente (Vemco, 2014).

Tabla 4.2 Estimación de las transmisiones perdidas durante el experimento de alcance.

Transmisor	Hidrófono A	Hidrófono B	Hidrófono C	Hidrófono D
1	43,40 %	42,54 %	98,28 %	99,75 %
2	40,61 %	40,23 %	35,64 %	37,63 %
3	40,81 %	41,13 %	33,40 %	35,81 %

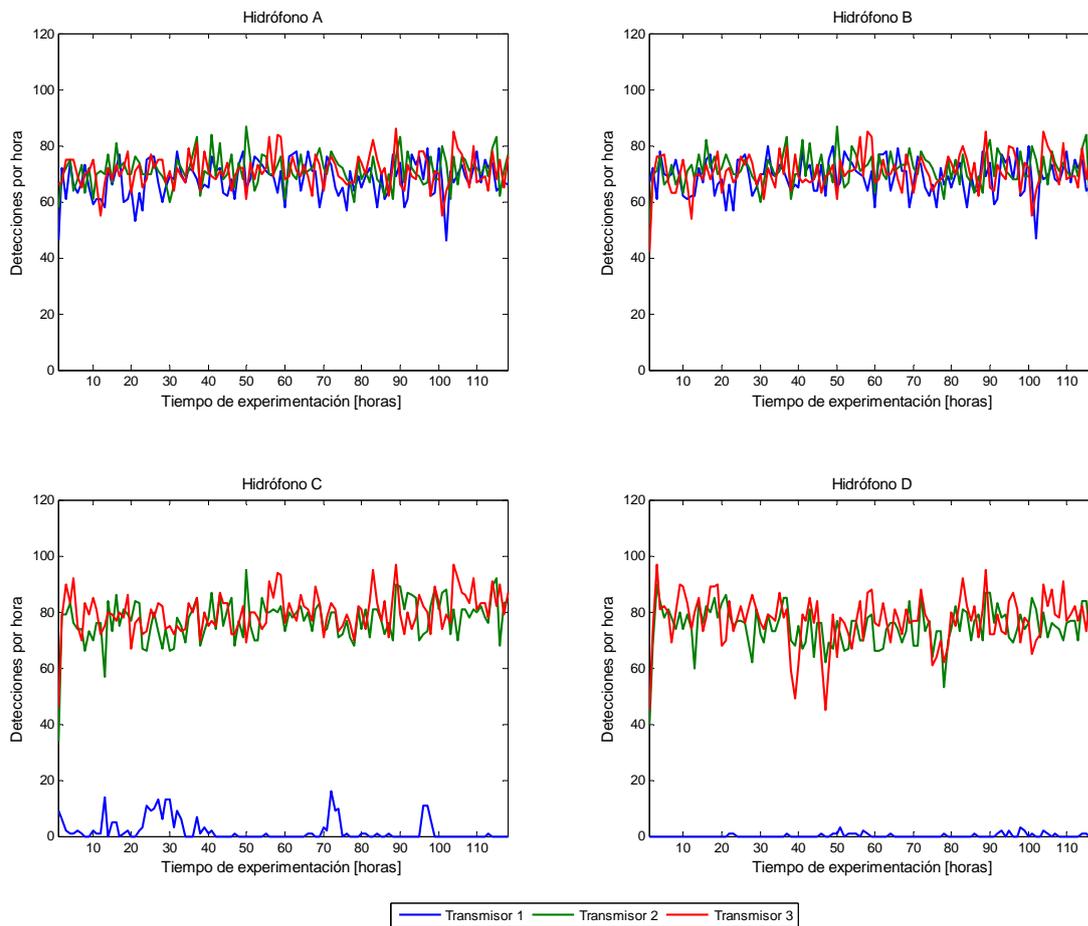


Figura 4.5 Número de transmisiones capturadas por hora y por hidrófono.

El mayor número de transmisiones capturadas, se dio con los hidrófonos C y D y el transmisor 3, consiguiendo un máximo de 97 detecciones por hora. Este resultado correspondió con transmisiones cada 37,11 segundos.

A partir de los datos presentados en la Figura 4.5 se halló el periodo mínimo y promedio entre transmisiones capturadas. Los resultados pueden consultarse en la Tabla 4.3.

Las configuraciones que ofrecieron un promedio más alto fueron el hidrófono C y el transmisor 3, el hidrófono C y el transmisor 2, y el hidrófono D y el transmisor 3; siendo también las que ofrecieron mejores tasas puntuales (periodos entre transmisiones de 37 segundos). Las tres configuraciones el hidrófono estuvo situado fuera del biotopo.

Tabla 4.3 Estimación del periodo de detecciones (transmisiones capturadas).

Hidrófono	Transmisor	Tiempo mínimo [s]	Tiempo promedio [s]
A	1	45,57	53,01
A	2	41,38	50,52
A	3	41,86	50,67
B	1	45,00	52,21
B	2	41,38	50,19
B	3	42,35	50,96
C	1	225,0	1748,15
C	2	37,89	46,61
C	3	37,11	45,04
D	1	1200	12137,14
D	2	41,38	48,10
D	3	37,11	46,73

Tabla 4.4 Número de detecciones erróneas durante el experimento de alcance.

Transmisor	Hidrófono A	Hidrófono B	Hidrófono C	Hidrófono D
ID 6531	3	4	0	0
ID 33122	2	3	0	0
ID 11888	0	0	1	0

Por otro lado, se detectó la presencia de tres transmisores erróneos que no formaron parte de la experimentación, ver Tabla 4.4.

La detección de éstos pudo estar causada por las reflexiones o colisiones entre transmisiones. Dichas detecciones representaron una tasa de errores muy baja, inferior al 0,03 %.

Conclusiones del ensayo

El equipo evaluado ha demostrado operar en este entorno (en los alrededores y en interior de un biotopo) aunque presenta una gran dependencia de la posición de sus elementos (hidrófonos y transmisores). Emitiendo desde el biotopo se capturó la señal a 54 m. Todos los hidrófonos perdieron al menos un 33 % de las emisiones.

4.1.2 Experimentación de alcance entre biotopos

Descripción del ensayo

En el segundo experimento se estudió la pérdida de detecciones en los biotopos, y el alcance entre dos biotopos. Los hidrófonos y transmisores se desplegaron según se indica en la Figura 4.6. El ensayo tuvo una duración de 479 horas.

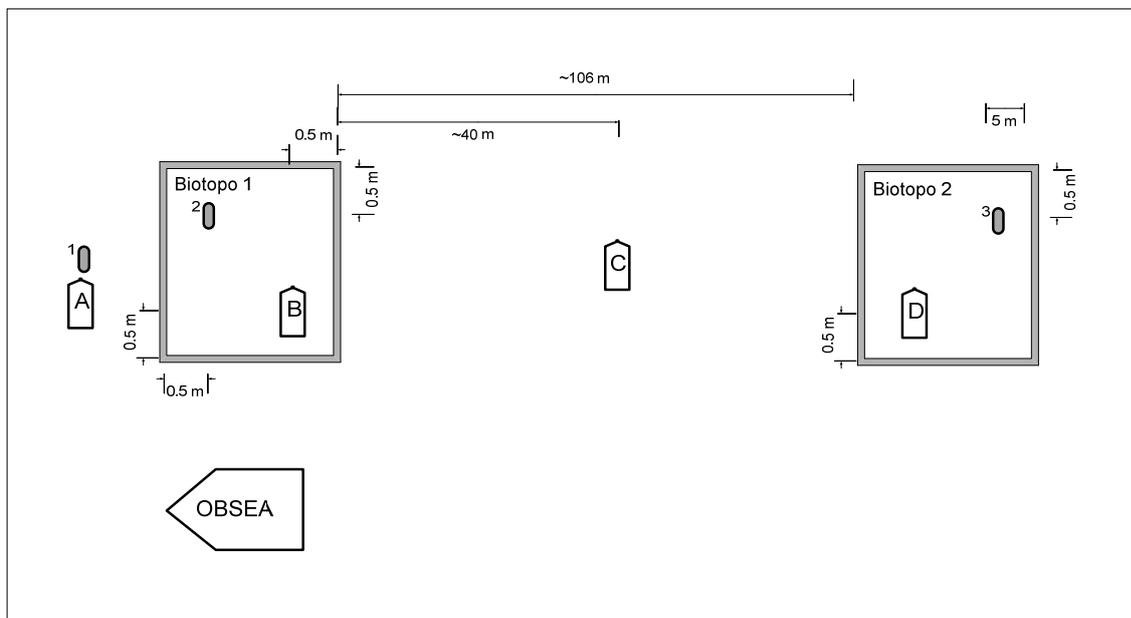


Figura 4.6 Disposición de los hidrófonos y transmisores durante el experimento de alcance entre biotopos.

El hidrófono B y el transmisor 2 fueron ubicados en el interior de uno de los biotopos, mientras que el hidrófono D y el transmisor 3 se instalaron en el segundo. Esta configuración fue realizada para estudiar y comparar las detecciones capturadas en el interior de los biotopos; y para estudiar si existía alcance entre ellos, y entre otro intermedio (hidrófono C).

El hidrófono A y el transmisor 1 se instalaron en las inmediaciones del primer biotopo. El transmisor 1 fue colocado detrás del biotopo, presentando una posición de difícil recepción para el hidrófono C y D (pérdida de la línea de vista).

A continuación se presentan los resultados obtenidos.

Resultados del ensayo

Los resultados obtenidos (ver Tabla 4.5) demostraron que no pudo conseguirse una comunicación entre biotopos a 106 m de distancia.

El hidrófono A registró más detecciones que el hidrófono B (situado dentro del biotopo), tanto del transmisor que se instaló fuera (transmisor 1), como dentro del biotopo (transmisor 2); aunque la diferencia fue mínima.

El hidrófono C detectó a todos los transmisores. No obstante, las pérdidas para el transmisor 3, ubicado a 66 m de éste, fueron elevadas, ver Tabla 4.6.

Por otro lado, la ubicación del transmisor 1 (detrás del biotopo), impidió la correcta recepción de la señal en el hidrófono C, éste perdió el 99 % de las transmisiones.

Tal como se demuestra en la Tabla 4.6, en este otro experimento las pérdidas también fueron altas, superiores al 28 %.

Tabla 4.5 Transmisiones capturadas durante el ensayo de alcance entre biotopos.

Transmisor	Hidrófono A	Hidrófono B	Hidrófono C	Hidrófono D
1	37.941	37.532	575	0
2	40.980	40.474	7.912	0
3	0	0	2.616	30.556

Tabla 4.6 Estimación de las transmisiones perdidas durante el experimento de alcance.

Transmisor	Hidrófono A	Hidrófono B	Hidrófono C	Hidrófono D
1	34 %	34,70 %	99 %	100 %
2	28,71 %	29,60 %	86,24 %	100 %
3	100 %	100,0 %	95,45 %	46,84 %

Al igual que en el experimento anterior, los datos fueron tratados para analizar las detecciones registradas por hora y por configuración, ver Figura 4.7.

Mediante este análisis se observó que 40 horas antes de finalizar el ensayo, el hidrófono B perdió totalmente al transmisor 1 y parcialmente al transmisor 2. Este hidrófono presentaba golpes en su carcasa, por lo que dichas pérdidas se asociaron a las condiciones del mar (el sistema de sujeción no permitió mantener al hidrófono en una posición estable y adecuada).

Tanto el hidrófono A como el B detectaron con gran estabilidad los transmisores 1 y 2 (ver Figura 4.7), pero no fueron las configuraciones que obtuvieron el mayor índice de detecciones puntual.

La mayor tasa la consiguió la pareja hidrófono D y transmisor 3, con 119 detecciones por hora, casi la tasa máxima del transmisor (120 transmisiones por hora). No obstante, a partir de las 50 horas de experimentación, las detecciones se volvieron inestables, ver Figura 4.7. Dado que este hidrófono también presentó algunos golpes en su carcasa, se consideró que la fluctuación se debió de nuevo a las condiciones del mar (vaivén del transmisor y/o del hidrófono).

Aunque el hidrófono C detectó a todos los transmisores, presentó un bajo rendimiento y una inestabilidad en comparación con el anterior experimento (en ambos ensayos la posición del hidrófono fue la misma). Tal como muestra la Figura 4.7, las detecciones de los diferentes transmisores mostraron una cierta correlación; por lo que las condiciones del mar (corrientes) pudieron causar dicha inestabilidad.

El tiempo mínimo y promedio entre detecciones se resume en la Tabla 4.7. La pareja que obtuvo el mejor promedio fue el hidrófono A y el transmisor 2, con detecciones cada 42,08 segundos.

Por otro lado, durante el experimento se registraron tres transmisores erróneos, ver Tabla 4.8, demostrando una tasa de errores muy baja, del 0,005 %.

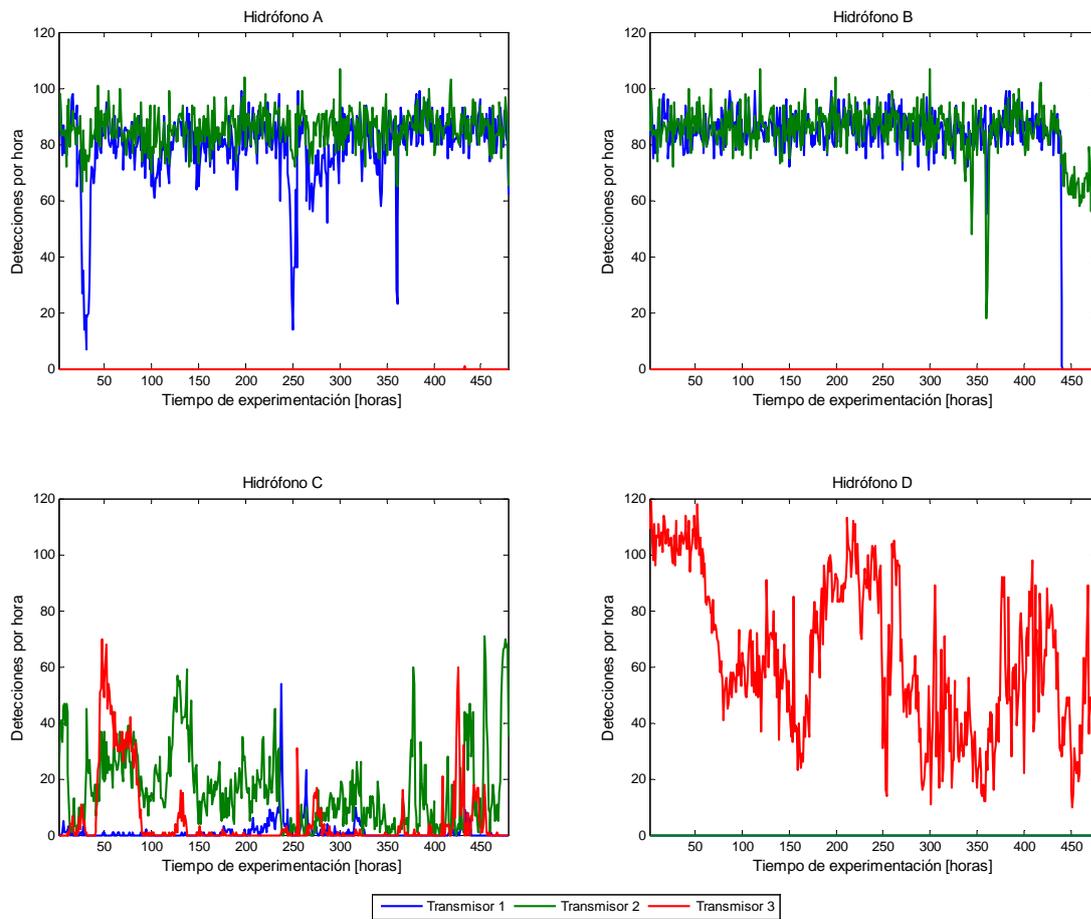


Figura 4.7 Número de transmisiones capturadas por hora y por hidrófono.

Tabla 4.7 Estimación del periodo de detecciones (transmisiones capturadas).

Hidrófono	Transmisor	Tiempo mínimo [s]	Tiempo promedio [s]
A	1	36,36	45,45
A	2	33,65	42,08
A	3	-	-
B	1	36,36	42,54
B	2	33,65	42,11
B	3	-	-
C	1	66,67	2998,96
C	2	50,70	217,95
C	3	51,43	659,17
D	1	-	-
D	2	-	-
D	3	30,25	56,43

Tabla 4.8 Número de detecciones erróneas durante el experimento de alcance.

Transmisor	Hidrófono A	Hidrófono B	Hidrófono C	Hidrófono D
ID 11888	0	0	3	0
ID 57133	0	0	1	1
ID 61000	0	0	1	1

El transmisor con ID 11888 también fue detectado durante el anterior experimento; se desconoce si dicha señal se originó por las reflexiones o por las colisiones de múltiples transmisiones. Dado que el hidrófono D no registró a los transmisores 1 y 2, las dos detecciones erróneas que registró éste se originaron por la reflexión de la señal del transmisor 3 (paredes del biotopo o fauna marina).

Conclusiones del ensayo

En este experimento, de mayor extensión temporal, se ha observado la gran dependencia del equipo con las condiciones del medio (fluctuación y pérdida de las detecciones). El hidrófono que no tenía línea de vista con uno de los transmisores, no fue capaz de capturar sus emisiones.

Emitiendo desde el interior de uno de los biotopos se pudo capturar la señal a 66 m. Entre biotopos, a 106 m, la señal se perdió. Todos los hidrófonos perdieron al menos un 28 % de las emisiones.

4.1.3 Experimentación con especies en el mar

Descripción del ensayo

En este ensayo se analizó el rendimiento del equipo en régimen dinámico (transmisores en movimiento - portados por diferentes especies).

La experimentación se realizó en las inmediaciones de la misma área (observatorio submarino OBSEA). Los hidrófonos se ubicaron como se detalla en la Figura 4.8.

Dado que en el anterior experimento se demostró que no había comunicación entre biotopos, la disposición de los hidrófonos permitía detectar el movimiento de los individuos de unos biotopos a otros.

La experimentación se realizó con tres centollos (*Maja squinado*) y tres langostas (*Palinurus mauritanicus*), dos especies con diferente grado de movilidad. Los transmisores se fijaron sobre el caparazón de los animales (ver Figura 4.9).

Los individuos fueron liberados por buceadores en los diferentes biotopos según se detalla en la Tabla 4.9. La duración del experimento se fijó en 64 días (tiempo de vida del transmisor).

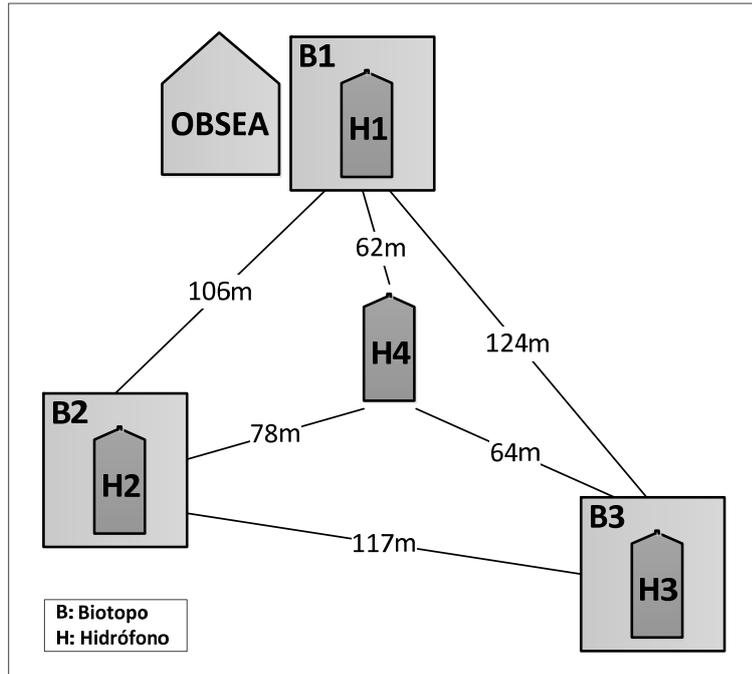


Figura 4.8 Disposición de los hidrófonos durante el experimento con especies.



Figura 4.9 Fijación de los transmisores. Izquierda centollo, derecha langosta.

Tabla 4.9 Transmisores, especies y lugar de liberación.

Transmisor	Especie	Liberación
1	Centollo 1	Biotopo 1 (B1)
2	Centollo 2	Biotopo 2 (B2)
3	Centollo 3	Biotopo 3 (B3)
4	Langosta 1	Biotopo 1 (B1)
5	Langosta 2	Biotopo 2 (B2)
6	Langosta 3	Biotopo 3 (B3)

Resultados del ensayo

En primer lugar, se analizó el número de detecciones por individuo, y el tiempo de permanencia en la zona cubierta por cada hidrófono.

Como se observa en la Tabla 4.10, los centollos demostraron una gran movilidad, mientras que las langostas residieron en la zona de experimentación durante más tiempo.

Posteriormente se contabilizó el número de detecciones (emisiones registradas) por hora de cada especie, ver Figura 4.10.

Tabla 4.10 Detecciones totales y tiempo de permanencia en la zona de estudio.

Transmisor	Especie	Detecciones totales	Tiempo de permanencia [horas]
1	Centollo 1	1.858	20
2	Centollo 2	243	9
3	Centollo 3	3.395	38
4	Langosta 1	148.680	1.534
5	Langosta 2	60.856	1.550
6	Langosta 3	14.028	240

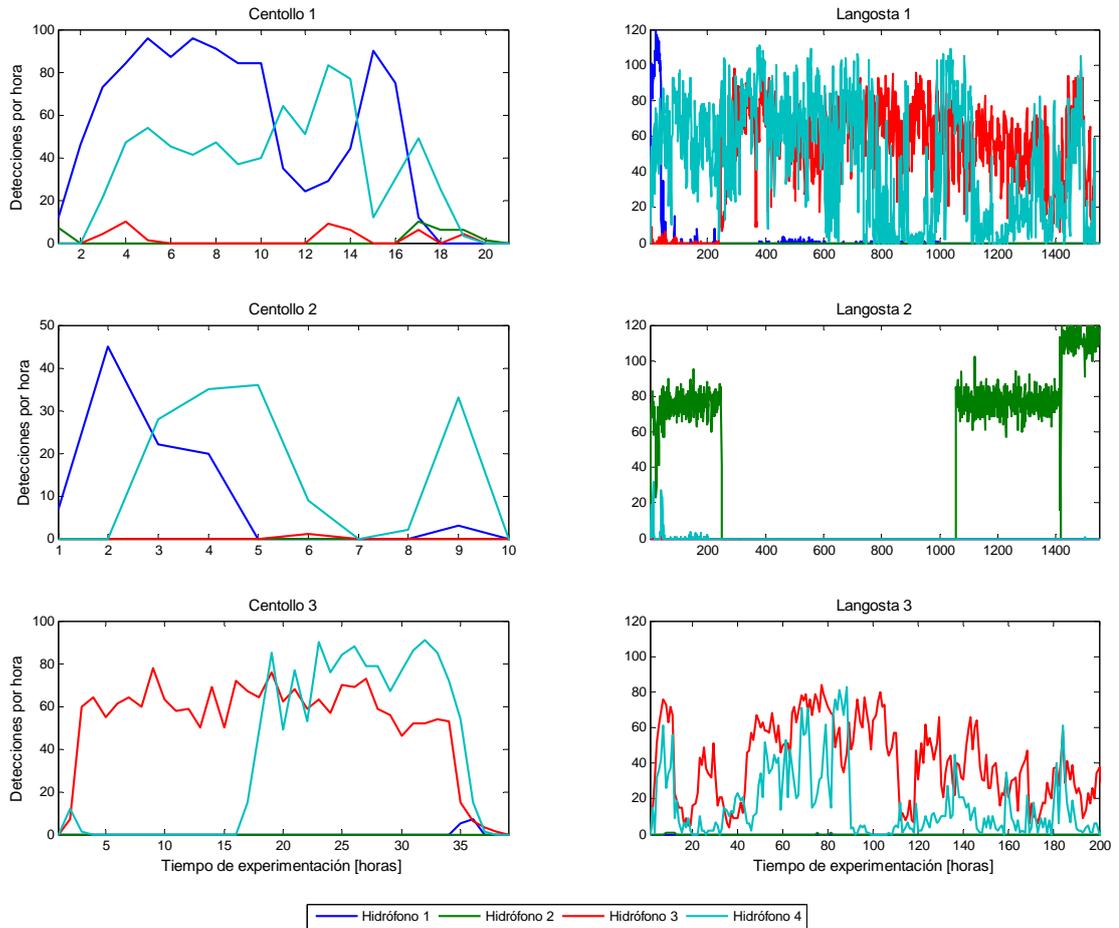


Figura 4.10 Número de detecciones por hora registradas por cada especie.

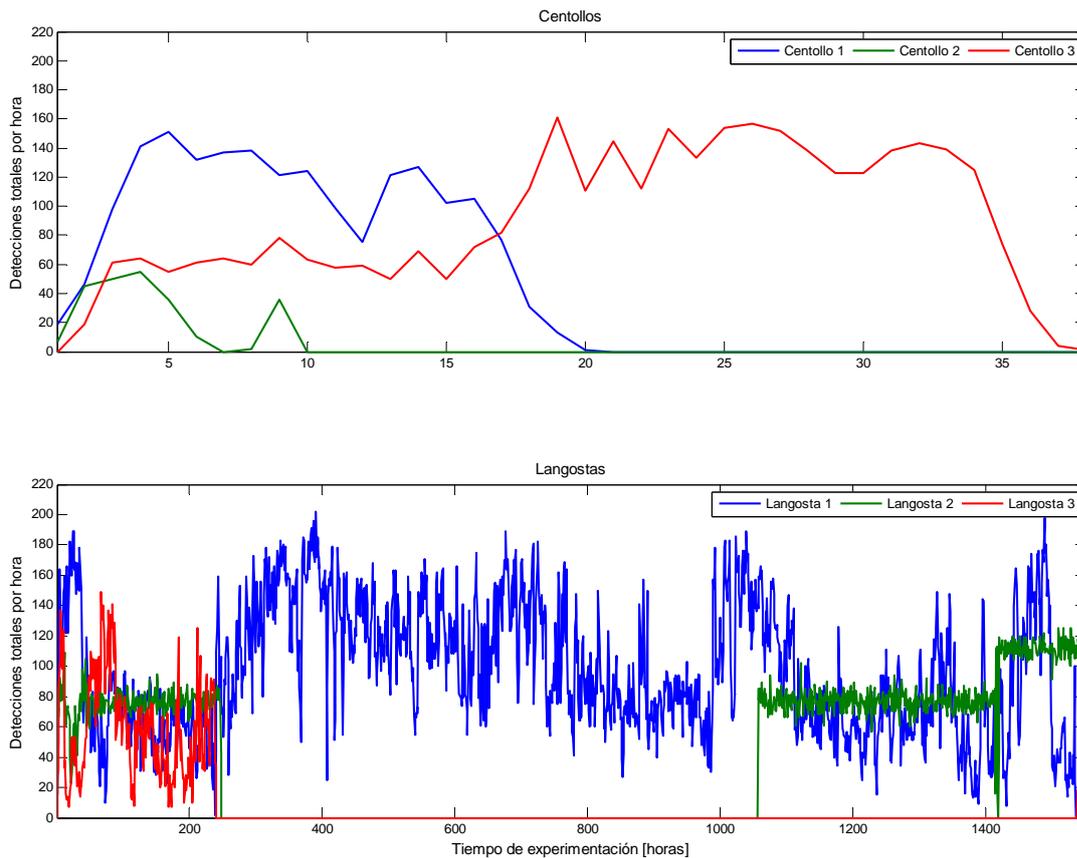


Figura 4.11 Detecciones totales registradas durante el ensayo con especies.

Como se observa en la Figura 4.10, los incrementos y decrementos de las detecciones en los diferentes hidrófonos indicaron la movilidad de los centollos de unas zonas a otras.

El centollo 2 fue el individuo que menos tiempo permaneció en la zona donde fue liberado; tras completar la instalación de los hidrófonos, éste ya se había dirigido hacia el primer biotopo.

A pesar de la alta movilidad de los centollos, dos de ellos (centollo 1 y 3) obtuvieron un pico de 90 detecciones por hora; dicho de otro modo, en el mejor de los casos, las pérdidas fueron de un 25 %.

Las detecciones fueron más estables para los individuos que permanecieron durante más tiempo en la zona y próximos a los hidrófonos, fue el caso de las langostas. A pesar de ello hubo ciertas diferencias entre ellas.

De las tres langostas, la liberada en el biotopo 1 (langosta 1) fue la única que durante la experimentación realizó una exploración hacia otro biotopo; y residió en su nuevo hábitat (alrededores del biotopo 3) hasta el final del experimento. Aunque el hidrófono central también pudo detectar su presencia, las detecciones en el hidrófono del biotopo 3 fueron menos inestables pero aún variables, entre 40 y 80 detecciones por hora (pérdidas entre el 33 % y el 67 % de las emisiones).

Aunque la langosta 2 presentó una incertidumbre en su localización de alrededor un mes, ésta regresó a la zona y permaneció allí durante el resto de la experimentación; demostrando bastante estabilidad en sus detecciones aunque variable, entre 70 y 110 detecciones por hora (pérdidas entre un 8 % y un 42 %).

La langosta 3 no sobrevivió al experimento y durante una de las inmersiones fue retirada. No obstante, se observó cierta movilidad por los picos y valles en sus detecciones, pero no se apreció estabilidad en sus detecciones.

Conclusiones del ensayo

En este otro ensayo se ha observado de nuevo la pérdida de detecciones para dos tipos de especies con diferente movilidad. Para las langostas, que permanecieron en la zona de análisis y no realizaron grandes desplazamientos, se pudo evidenciar también la variabilidad de las detecciones.

Para especies con gran movilidad (se desplazan lejos), es necesario cubrir con hidrófonos mayores áreas. La presencia de obstáculos en la zona (como biotopos) requiere un estudio preliminar del alcance. Para especies que residen en la zona, conviene sopesar la tasa de emisiones del transmisor; ajustando la candencia a un valor apropiado, es posible alargar la autonomía del transmisor.

Los datos que entrega el software del fabricante (datos recogidos por los hidrófonos) proporcionan la marca de tiempo de las detecciones pero con una resolución de un segundo, impidiendo la aplicación de algoritmos propios para triangular la posición de los individuos.

4.1.4 Evaluación del equipo VR2W en laboratorio

Descripción del ensayo

Los equipos acústicos para la monitorización de especies se aplican en espacios abiertos. Con objeto de estudiar la viabilidad de estos sistemas en laboratorio (aplicaciones para el estudio de especies en acuarios), en este apartado se evalúa el rendimiento del equipo VR2W (tasa de detecciones registradas) en un acuario de experimentación.

Procedimiento

En este ensayo, debido a la autonomía y el coste de los transmisores, la señal de uno de ellos fue sintetizada y reproducida externamente. A continuación se detallan los pasos.

La señal del transmisor fue capturada mediante un hidrófono comercial (8103 de Brüel & Kjaer), un amplificador de carga convencional, y una tarjeta de adquisición de National Instruments (NI PCI-6115). Para evitar las reflexiones de la señal, la medida se hizo en aire, uniéndolo al hidrófono.

Tras identificar la señal y observar su modulación, fue sintetizada digitalmente mediante una aplicación programada con LabVIEW. Posteriormente, la señal fue reproducida

mediante la tarjeta NI PCI-6115, un driver (amplificador operacional OPA454) y otro hidrófono comercial del mismo tipo (este modelo puede actuar como proyector).

Para generar la misma potencia acústica, se midió el nivel de señal del transmisor. Se hizo ubicando el transmisor y uno de los hidrófonos comerciales a una distancia de 10 cm (en el interior del acuario), y analizando la señal antes de la primera reflexión. Después, el transmisor fue sustituido por el otro hidrófono (en la misma posición), y mediante la tarjeta y el amplificador se reprodujo la señal; se ajustó la amplitud de salida hasta conseguir (con el hidrófono y el amplificador de carga) el mismo nivel de señal que se obtuvo con el transmisor.

Posteriormente, el hidrófono VR2W fue ubicado en el interior del acuario, a 10 cm del proyector, ver Figura 4.12. Se realizaron transmisiones cada 10 segundos durante aproximadamente 23 horas; después, se recogieron y analizaron los datos del hidrófono VR2W.

Experimentación y resultados

Analizando la señal se observó que este equipo utiliza la modulación PPM (Pulse Position Modulation); relativamente fácil de implementar (Riter, Boatright, & Shay, 1971) pero muy sensible a la interferencia por caminos múltiples (Jing-wei, Sen, Dan-dan, & Xiao, 2010).

Se identificaron 8 ráfagas de pulsos; cada ráfaga era una señal sinusoidal de 180 kHz de 5 ms de duración. La transmisión tuvo una duración de 1,57 segundos; el tiempo entre ráfagas se ha resumido en la Tabla 4.11.



Figura 4.12 Evaluación del hidrófono VR2W en laboratorio.

Tabla 4.11 Tiempo entre ráfagas para el transmisor con ID 763.

Tiempo entre ráfagas [ms]						
1 a 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	6 a 7	7 a 8
121	194	265	240	180	265	300

El sistema de codificación de los datos (identificador del transmisor en el mensaje) está reservado por el fabricante, aunque éste ofrece información de sus diferentes formatos y esquemas en (Vemco, 2007).

Después de sintetizar la señal capturada y ajustar la amplitud de salida, se procedió a la fase de experimentación.

En el ensayo se realizaron un total de 8280 transmisiones. El hidrófono VR2W fue capaz de capturar un total de 7475, obteniendo un rendimiento total del 90,28 %.

Por otro lado, no se detectaron datos erróneos (presencia de otros identificadores en los datos), por lo que el algoritmo de detecciones del propio equipo (que no es público) demostró efectividad en este entorno.

Analizando el porcentaje de detecciones por hora (ver Figura 4.13), se pudo observar que el rendimiento fluctuó a lo largo del ensayo, siendo la tasa más baja del 60 %. La variación de la temperatura del agua, la presencia de burbujas, los pequeños movimientos de los elementos (hidrófonos), así como las reflexiones y la reverberación pudieron ser los causantes de dicha fluctuación.

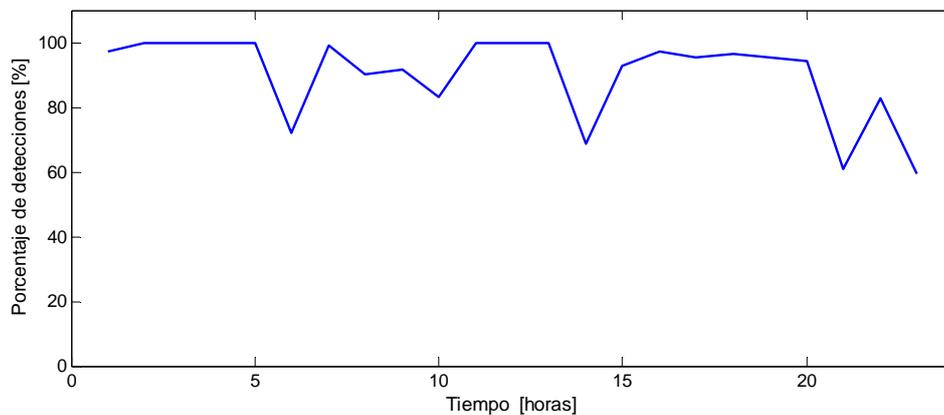


Figura 4.13 Porcentaje de transmisiones detectadas por hora durante el ensayo.

Conclusiones del ensayo

Aunque el equipo VR2W ha demostrado operar en este entorno, se observó su vulnerabilidad al presentar una fluctuación de las detecciones. La modulación que emplea este equipo, es poco robusta en este entorno donde existe una gran reverberación y numerosas y complejas reflexiones (rebotes en las paredes del acuario). No obstante, el

largo periodo entre ráfagas y la duración de los pulsos han permitido ofrecer tasas de detección altas. La adecuación del acuario con materiales absorbentes puede ayudar a mejorar las detecciones, punto que es abordado en siguiente apartado.

Por otro lado, el empleo de otras técnicas más robustas como la multiplexación OFDM (Akyildiz et al., 2005; Palou, 2009), pueden mejorar el rendimiento obtenido con este equipo en este entorno.

Se identifica como futura línea de investigación, la utilización de técnicas de triangulación como las presentadas por (Alcocer, Oliveira, & Pascoal, 2007; Erol-kantarci & Mouftah, 2010), para la localización y seguimiento de las especies en acuarios.

4.1.5 Estudio de materiales absorbentes

Con objeto de mejorar de forma externa el rendimiento de las comunicaciones (reducción de errores causados por las reflexiones y reverberaciones) en entornos de reducidas dimensiones (acuarios), en esta parte de la investigación, se estudia la absorción acústica de diferentes materiales.

Descripción del ensayo y procedimiento

En este ensayo se realizó la medición de la absorción acústica de tres tipos de materiales (corcho, espuma acústica y conglomerado de madera con grosores de 3 mm, 3 cm y 1 cm respectivamente), bajo el agua (en un acuario) y en función de la frecuencia.

Para realizar la medición, se emplearon dos hidrófonos 8103 de Brüel & Kjaer (uno actuando como proyector y otro como hidrófono), un generador de funciones, una fuente de alimentación, un amplificador de carga convencional, un driver (amplificador operacional OPA454), y una tarjeta de adquisición NI-6115. El esquema del sistema de medida se detalla en la Figura 4.15.

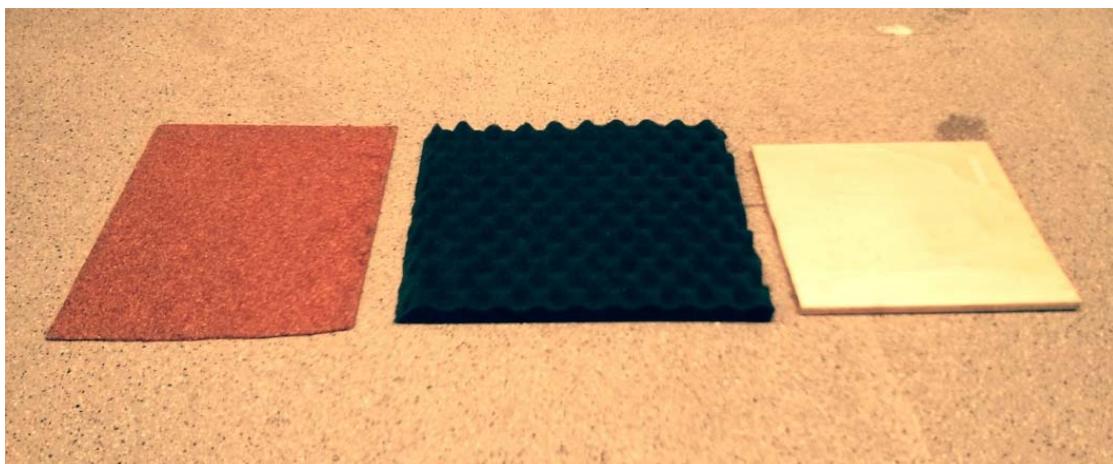


Figura 4.14 Materiales utilizados para el estudio de absorción acústica.

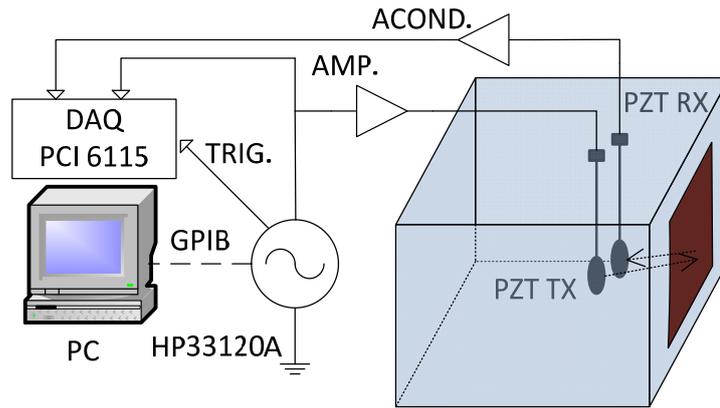


Figura 4.15 Sistema de medida para el estudio de la absorción acústica.

Los transductores se ubicaron en una zona estratégica del acuario para poder medir la señal reflejada de una de las paredes. Para ello, la señal reflejada debía llegar mucho más tarde que la señal emitida, pero antes que los ecos de las otras paredes, el fondo o la superficie. Fijada la posición de los transductores (se describe en el siguiente apartado), se colocó el material en la pared del acuario y se realizó el ensayo. En función del grosor del material, se corrigió la posición de los transductores; así, la distancia transductor-material fue siempre la misma. Dado que los tres materiales analizados tenían flotabilidad positiva, tuvieron que ser sujetos a las paredes (ver Figura 4.16).

El generador de funciones se configuró para la generación de una señal sinusoidal de dos ciclos. La frecuencia de la señal partió en 20 KHz, y por cada generación/medida, se incrementó 1 kHz hasta alcanzar los 200 kHz.

La medida se realizó mediante el conjunto: hidrófono, amplificador de carga y tarjeta de adquisición. Mediante la señal de sincronismo del generador de funciones se pudo sincronizar la adquisición, y extraer fácilmente la ventana de muestras de la señal reflejada. La tarjeta se configuró a 2 MS/s.



Figura 4.16 Colocación de los materiales en el acuario. A la izquierda la madera, en el centro la espuma y a la derecha el corcho.

Posicionamiento de los transductores

En este apartado se plantea la ubicación de los transductores para la medición de la señal reflejada de una de las paredes; se han identificado dos límites. El primero, lo fija la frecuencia mínima de análisis y el número de ciclos emitidos, determinando la distancia mínima entre el transductor y la pared de análisis. El segundo, fija la distancia máxima de separación (respecto la pared de análisis), y depende de la distancia del obstáculo más cercano (presente en el acuario).

Aproximando los transductores (emisión y recepción) la complejidad del posicionamiento se reduce; y el primer límite puede calcularse con la ecuación siguiente:

$$d_{\min} = \frac{v \cdot \text{ciclos}}{2 \cdot f}$$

donde,

- d_{\min} es la distancia mínima a la pared de análisis en metros.
- v es la velocidad del sonido bajo el agua, típicamente 1500 m/s.
- ciclos es el número de ciclos emitidos.
- f es la mínima frecuencia de señal emitida.

El límite máximo depende de la proximidad de las otras paredes, la superficie y el fondo. Para un acuario rectangular, la posición que maximiza esa distancia, se encuentra ubicando los transductores en la mitad de la pared más larga, y a una altura igual a la mitad del nivel de agua. La distancia máxima puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$d_{\max} = d_{\text{pared}} - \frac{v \cdot \text{ciclos}}{2 \cdot f}$$

donde,

- d_{\max} es la distancia máxima a la pared de análisis en metros.
- d_{pared} es la distancia en metros del siguiente obstáculo más cercano.
- v es la velocidad del sonido bajo el agua, típicamente 1500 m/s.
- ciclos es el número de ciclos emitidos.
- f es la mínima frecuencia de señal emitida.

Mediante las ecuaciones presentadas se calculó la distancia para realizar las medidas con un acuario de 81 x 36 x 45 cm. La distancia mínima de separación de los transductores respecto a la pared a analizar era de 7,5 cm. (frecuencia mínima de análisis de 20 kHz, y una emisión de dos ciclos de señal).

Considerando los datos anteriores y un nivel de agua de 42 cm, el obstáculo más cercano era la superficie o el fondo (ambos a 21 cm de los transductores); por lo que la separación máxima entre la pared y los transductores era de 13,5 cm.

Así, las medidas podían realizarse ubicando los transductores entre 7,5 cm y 13,5 cm de la pared de análisis. Fuera de este rango, la señal útil se enmascara con las reflexiones de las otras paredes, del fondo y de la superficie.

A continuación se presentan los resultados de la experimentación; para los ensayos se aplicó una separación de 10 cm.

Resultados de la experimentación

En la Figura 4.17 se muestra la respuesta en frecuencia del sistema (etapa de amplificación, proyector, hidrófono y amplificador de carga) junto con la absorción de cada material. En la Figura 4.18 se muestra la absorción de cada material respecto la referencia (la respuesta del sistema con el cristal).

Los resultados obtenidos demostraron que, en el margen de frecuencias analizado, ninguno de los materiales absorbió significativamente las señales acústicas. No obstante, de todos ellos, la madera conglomerada fue el material que experimentó mayor absorción; aunque, no fue superior a 3 dB. Por debajo de 50 kHz la absorción de la madera era muy similar al resto de materiales.

La espuma no respondió de una forma estable con la frecuencia. La mejor respuesta se obtuvo entre los 45 y 49 kHz, y entre 100 y 140 kHz; sin embargo, la mejora que introdujo a estas frecuencias fue baja, por debajo de 2,5 dB y 1 dB, respectivamente. Fuera de estos márgenes, la absorción fue peor que la pared del acuario.

Con el corcho, los resultados que se obtuvieron no fueron significativos, su comportamiento fue estable con la frecuencia y similar a la pared del acuario.

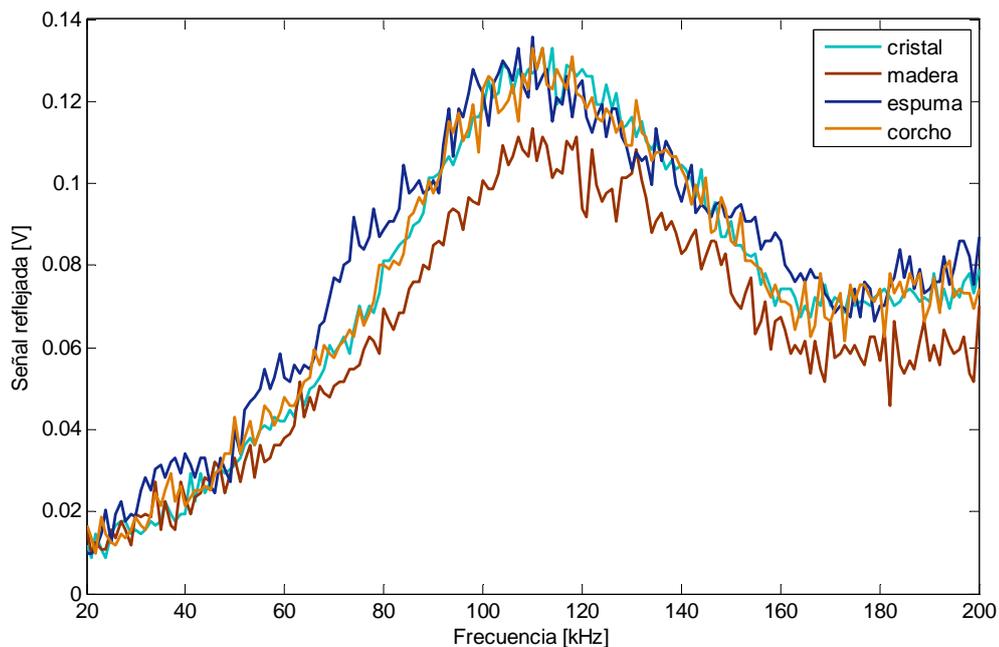


Figura 4.17 Nivel de la señal reflejada en función del material ensayado y la frecuencia.

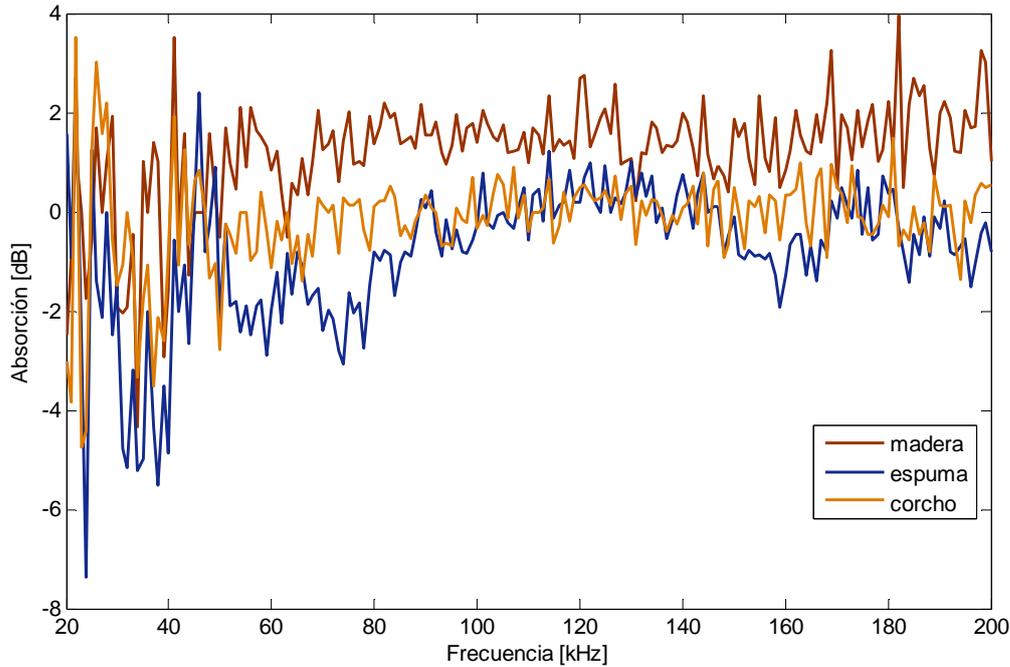


Figura 4.18 Absorción en función del material ensayado y la frecuencia.

Conclusiones del ensayo

Se ha presentado una metodología para medir la absorción acústica de diferentes materiales bajo el agua y empleando materiales convencionales

Este estudio ha demostrado que ninguno de los materiales evaluados (conglomerado de madera, espuma acústica y corcho) ha atenuado las señales acústicas de forma significativa y/o de forma selectiva en frecuencia.

Por tanto, la adecuación del acuario (con los materiales citados) para la mejora de su respuesta acústica (minimización de la reverberación y reflexiones) no es relevante. La mejora de las comunicaciones en estos entornos debe plantearse a través de modulaciones y técnicas más robustas.

4.2 Discusión y propuesta

El equipo evaluado (hidrófono VR2W y los transmisores V6), aunque presenta una gran flexibilidad (hidrófonos autónomos, requiere una mínima configuración para su puesta en marcha), en un entorno de baja profundidad y con arrecifes demostró una gran dependencia de la ubicación/posición de sus elementos, revelando una variabilidad y pérdida de detecciones.

Posteriormente, en laboratorio (aunque el equipo no está destinado para el estudio de especies en acuarios) también se observó una fluctuación de las detecciones, y se comprobó que su modulación era sensible a las interferencias por caminos múltiples.

En esta área o campo de aplicación no se observa la utilización de un estándar: los diferentes fabricantes emplean distintas frecuencias, modulaciones, mecanismos de acceso al medio, así como esquemas de codificación y protocolos diferentes. Por ejemplo, el fabricante Vemco opera a 69 y 180 KHz, Lotek a 76 y 200 kHz y Htisonar a 307 kHz. Estas divergencias, impiden que estos equipos puedan interconectarse. Por otro lado, la gama de transmisores está limitada, y debido a que la información de estos sistemas (relativa a su funcionamiento) no es pública, solo su fabricante puede desarrollar nuevos transmisores y/o adaptarles prestaciones adicionales.

Recientemente, la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) ha ganado la atención dentro del área de las comunicaciones acústicas subacuáticas debido a las características que presenta (Tong, Benson, Li, & Kastner, 2010),(William Shieh, 2009). Se trata de un esquema de modulación que entre otras características, y de forma general, permite:

- combatir la interferencia por caminos múltiples mediante la utilización de tiempos de guarda.
- estimar y ecualizar el canal a través de señales piloto.
- alcanzar mayores tasas de transmisión al repartir la información en múltiples canales ortogonales.

Aunque OFDM ofrece una gran robustez, es muy sensible a errores producidos por pérdidas de sincronización, ya sea en frecuencia (efecto Doppler) o en tiempo (errores de sincronismo) (Li, Zhou, Stojanovic, Freitag, & Willett, 2007; M Stojanovic, 2008). Por su propia naturaleza, las señales tienen una gran variación en su envolvente (Huang, Zhou, & Willett, 2008), causando una alta relación entre la potencia pico y la potencia media (PAPR, Peak-to-Average Power Ratio). Cuestiones que actualmente se encuentran en investigación (Kumar, 2013).

En la actualidad existen algunos prototipos que operan como plataformas para la investigación y mejora de OFDM en el medio marino, como el WHOI Micro-Modem, de la Institución Oceanográfica Woods Hole (Freitag et al., 2005), o el UCSD Modem, de la Universidad Californiana de San Diego (Benson et al., 2010).

Estas plataformas han sido concebidas para la mejora de las comunicaciones a larga distancia (por encima del km) y se encuentran algo sobredimensionadas para el área de aplicación de esta Tesis; en sus diseños no prima el tamaño, el bajo coste o el consumo. Sus arquitecturas pueden contemplar un procesador digital de señal (DSP) para tratar la señal (algoritmos de procesado), y una FGPA para subir y bajar en frecuencia (mezclar digitalmente) las señales generadas/recibidas (Fifield, 2000; Yan et al., 2010).

Por las razones anteriores, y con objeto de acercar e impulsar los avances en materia de comunicaciones acústicas a los sistemas de monitorización actuales, en esta investigación se ha planteado el desarrollo de una plataforma abierta de comunicación acústica, de bajo consumo, reducido tamaño y capaz de soportar OFDM. Para la consecución de dicha propuesta se plantea y estudia también el desarrollo del transductor acústico.

4.3 Implementación del transductor acústico

Los transductores acústicos comerciales (hidrófonos) por su tamaño y coste económico no resultan adecuados para el desarrollo de transmisores para especies.

Existen diferentes trabajos que abordan esta problemática (desarrollo de transductores de menores tamaños y prestaciones), aunque enfocados a la implementación de transductores para módems acústicos. Por un lado, (Jurđak et. al), propone la utilización de altavoces y micrófonos, pero las frecuencias acústicas que emplea esta propuesta no resultan adecuadas para su aplicación con especies. Por otro, (Benson et al, 2009) utiliza un fatómetro, equipo similar al sónar y empleado para localizar peces, sin embargo, el estrecho haz del mismo resulta un inconveniente para esta área de aplicación, donde se requiere omnidireccionalidad.

El trabajo realizado por (Benson et al., 2010) resuelve los problemas anteriores, presentando un prototipo realizado con una cerámica piezoeléctrica (Rodríguez & Garza, 2000) y un compuesto de uretano. (Barlow, Rankin, & Dawson, 2008) aplica un método similar para construir un hidrófono de mayores dimensiones. En este apartado, y a partir de los trabajos anteriores, son evaluados diferentes compuestos encapsulantes para la implementación de pequeños transductores acústicos subacuáticos, aptos para esta área de aplicación.

4.3.1 Evaluación y construcción de transductores

Esta investigación se divide en dos partes; en la primera, se evalúa la frecuencia de resonancia y la respuesta acústica en emisión de cuatro discos piezoeléctricos (ver Figura 4.19) encapsulados con diferentes compuestos.

En la segunda parte, y después de haber identificado el compuesto con mejor respuesta, se construyen múltiples transductores utilizando discos y cilindros piezoeléctricos (ver Figura 4.20). Mediante un análisis de su impedancia se estudia la repetitividad del proceso de fabricación y las diferencias entre ambos tipos de piezoeléctricos. Después, se comparan los resultados con los ofrecidos por dos hidrófonos del tipo 8103 Brüel & Kjaer, construidos también con piezoeléctricos.

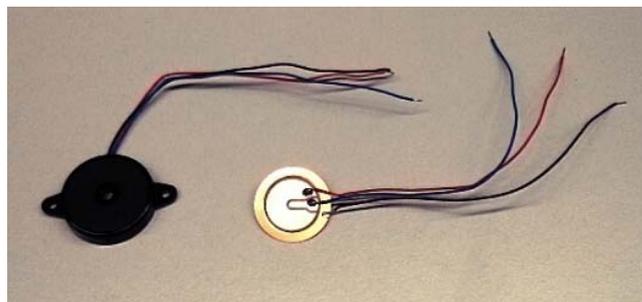


Figura 4.19 Disco piezoeléctrico utilizado como transductor acústico sumergible. En su carcasa (izquierda), fuera de ella (derecha).



Figura 4.20 Cilindro piezoeléctrico utilizado como transductor acústico sumergible.

Compuestos encapsulantes

Para la evaluación de los diferentes compuestos se utilizaron discos piezoeléctricos, de 1,5 cm de diámetro; fueron extraídos de sus carcasas, e introducidos en moldes donde se les aplicaron diferentes compuestos, ver Figura 4.21.

El proceso se realizó a temperatura ambiente y las proporciones de la mezclas fueron las indicadas por cada fabricante. Las características de los compuestos se resumen en la Tabla 4.12.

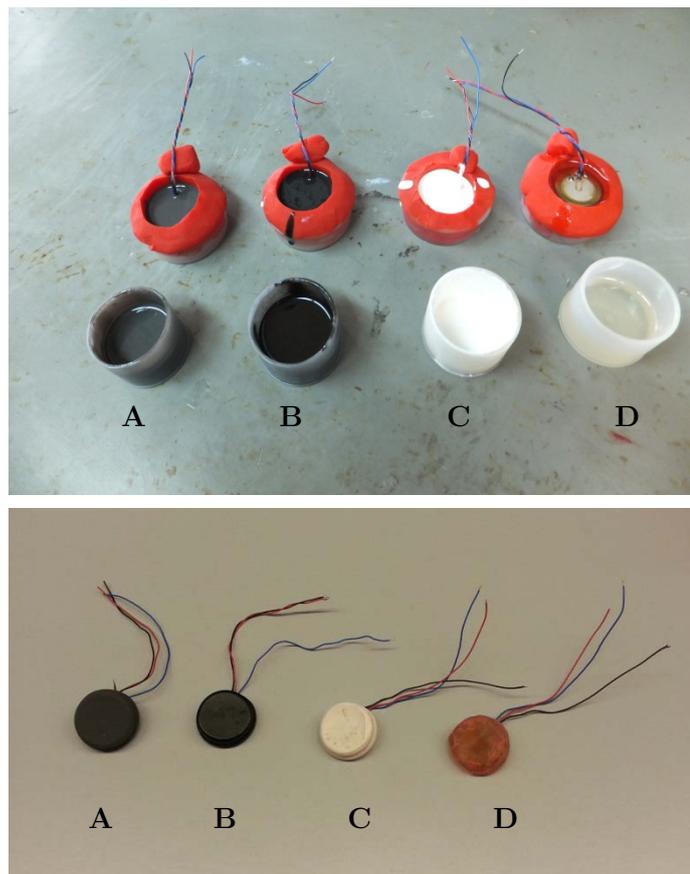


Figura 4.21 Discos piezoeléctricos encapsulados con diferentes compuestos - A: caucho, B: epoxi 85 Shore, C: epoxi 80 Shore, D: poliuretano; arriba, el procedimiento; abajo, el acabado final.

Tabla 4.12 Características de los diferentes compuestos.

Características	A	B	C	D
Material	Caucho	Epoxi	Epoxi	Poliuretano
Dureza	No definida, muy blando	85 Shore D	80 Shore D	12 Shore A
Color	Gris	Negro	Blanco	Semitransparente
Propiedades especiales	Dieléctrica, elástica, conductividad térmica	Piroretardante	Resistencia química, resistencia al agua	Compuesto aislante
Tiempo de cura	10 min	24 horas	24 horas	24 horas

Terminado el proceso de cura, se comprobó que los compuestos A y D eran parecidos y blandos; mientras que el B y C eran duros.

Frecuencia de resonancia

Para analizar la frecuencia de resonancia y su desplazamiento, causado por la masa del compuesto, se midió la impedancia. Se hizo mediante el esquema de la Figura 4.22.

Mediante la medida de la corriente y tensión en bornes del piezoeléctrico (divisor de tensión entre la impedancia de salida del generador y la del piezoeléctrico) se halló la impedancia para el rango de frecuencias de 1 kHz hasta los 200 kHz, con saltos de 250 Hz. La medida se realizó para los cuatro piezoeléctricos encapsulados y para uno sin encapsular (ver Figura 4.23).

El disco sin encapsular presentó tres frecuencias de resonancia, situadas a 4, 28 y 125 kHz aproximadamente. No obstante, para los discos encapsulados únicamente se apreció una frecuencia de resonancia, que para los compuestos duros B y C rondó los 66 y 59 kHz respectivamente; mientras que para los compuestos blandos A y D apenas varió respecto a una de frecuencias de resonancias del disco sin encapsular (125 kHz). Para todos ellos, la impedancia decreció con la frecuencia, y a partir de los 7,2 kHz, decreció más lentamente y de forma lineal.

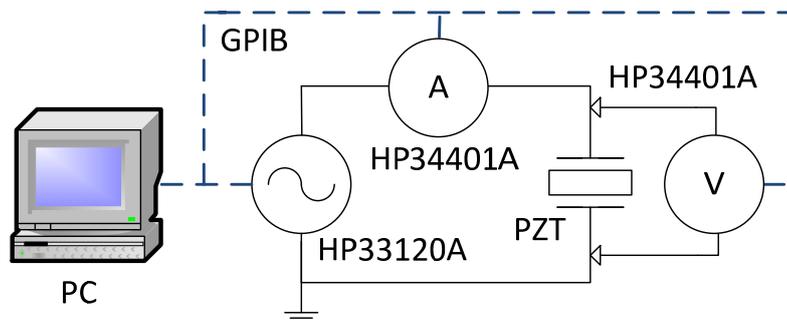


Figura 4.22 Disposición para la medición de la impedancia de los discos piezoeléctricos.

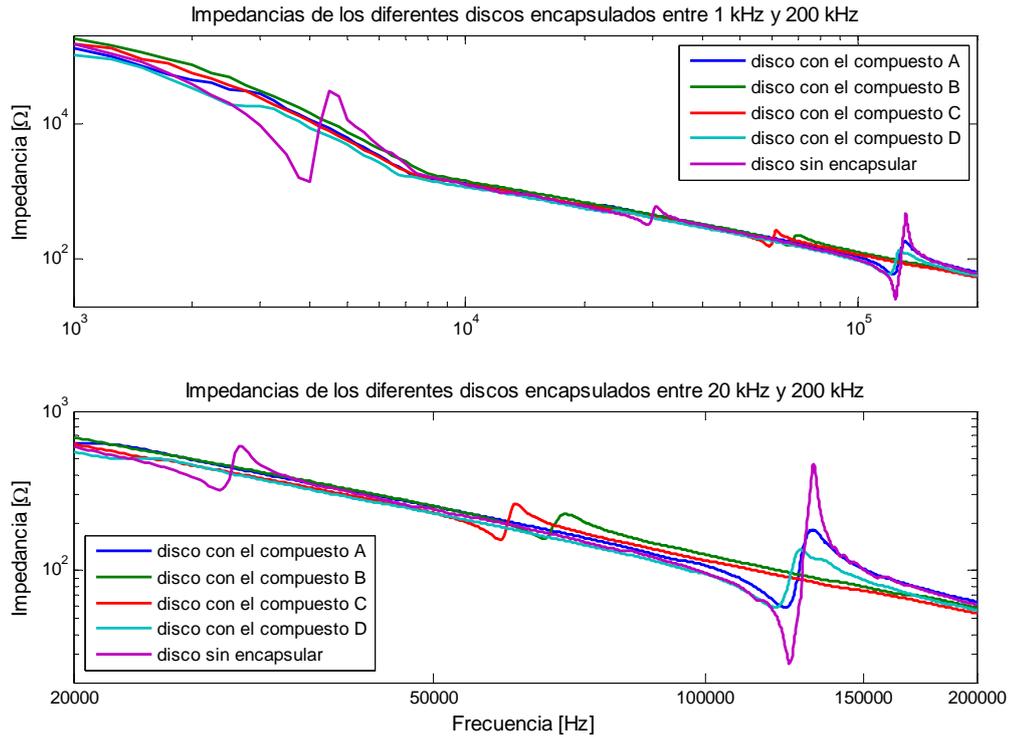


Figura 4.23 Impedancia de los discos piezoeléctricos en función de la frecuencia y del compuesto aplicado.

Análisis preliminar de la respuesta acústica en emisión

Habiendo detectado la frecuencia de resonancia de cada uno de ellos, se realizó un análisis preliminar de la respuesta acústica que ofrecían. La medida se hizo mediante el montaje de la Figura 4.24.

El generador de funciones se fijó para cada disco a su frecuencia de resonancia, y mediante el hidrófono 8103 de Brüel & Kjaer y un amplificador de carga convencional se midió la respuesta.

En el ensayo el disco con el compuesto B ofreció mejor respuesta acústica que el resto (ver Tabla 4.13). Los compuestos blandos demostraron ser inadecuados y la respuesta fue casi imperceptible por el circuito de medida.

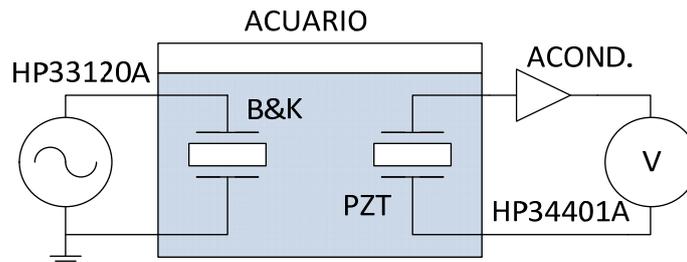


Figura 4.24 Esquema para medir la respuesta acústica.

Tabla 4.13 Respuestas ofrecidas por los diferentes discos.

Compuesto utilizado	Respuesta en la frecuencia de resonancia
A	1 mV
B	300 mV
C	200 mV
D	2 mV

Construcción de diferentes transductores

Tras comprobar que el compuesto B ofreció mejor respuesta, se construyeron múltiples transductores aplicando este compuesto.

Se utilizaron los discos y cilindros piezoeléctricos presentados al principio del apartado. Las características de los cilindros se detallan en la Tabla 4.14.

Para encapsular los piezoeléctricos se utilizó un molde donde se aplicó la mezcla indicada por el fabricante; el proceso de curado se realizó a temperatura ambiente. El acabado final de los diferentes transductores construidos puede consultarse en la Figura 4.25.

Con objeto de estudiar la repetitividad del proceso de fabricación de los transductores, se analizó la impedancia de tres de cada tipo; se empleó el procedimiento detallado antes. Después, las medidas se compararon con la impedancia de los hidrófonos 8103 de Brüel & Kjaer.

Tabla 4.14 Características del piezoeléctrico cilíndrico.

Diámetro externo	Diámetro interno	Longitud	Capacidad a 1kHz	Frecuencia de resonancia
10 mm	8 mm	10 mm	4,5 nF	165 kHz



Figura 4.25 Transductores construidos. Con discos piezoeléctricos a la izquierda; con cilindros piezoeléctricos a la derecha.

Los resultados obtenidos con los discos construidos fueron muy similares, ver Figura 4.26. La impedancia decreció con la frecuencia, y aproximadamente a partir de los 7,2 kHz lo hizo de forma lineal. La frecuencia de resonancia se localizó próxima a los 70 kHz, existiendo una ligera variación de ésta entre ellos.

La impedancia entre los múltiples cilindros construidos también fue similar, ver Figura 4.27. Decreció con la frecuencia y a partir de los 41 kHz lo hizo de forma lineal. La frecuencia de resonancia se localizó en 130 kHz (35 kHz por debajo de su frecuencia natural, ver Tabla 4.14). Los cilindros 1 y 2 presentaron una variación de su impedancia en los alrededores de la frecuencia de resonancia.

La impedancia de los dos hidrófonos 8103 de Brüel & Kjaer se observa en la Figura 4.28. Se encontraron dos zonas donde la impedancia decreció de forma lineal. La primera se localizó entre 20 y 50 kHz, y la segunda entre 50 y 115 kHz, aproximadamente. La frecuencia de resonancia se halló en 123 kHz, y se observó una mayor similitud entre ambos hidrófonos.

Los discos tuvieron siempre una impedancia menor, seguida de los cilindros y los hidrófonos, ver Figura 4.29. Mientras que los cilindros y los discos presentaron una zona lineal donde la impedancia decreció de forma constante, los hidrófonos presentaron dos zonas.

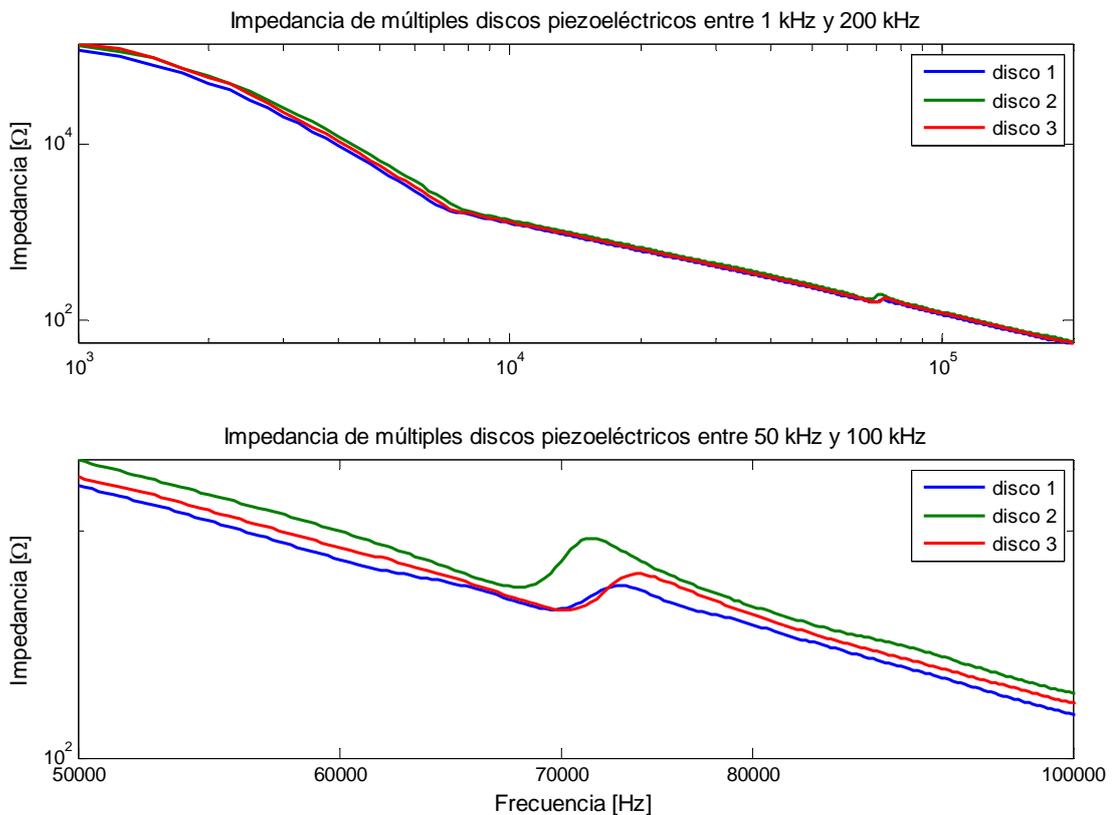


Figura 4.26 Impedancia de múltiples transductores construidos con discos.

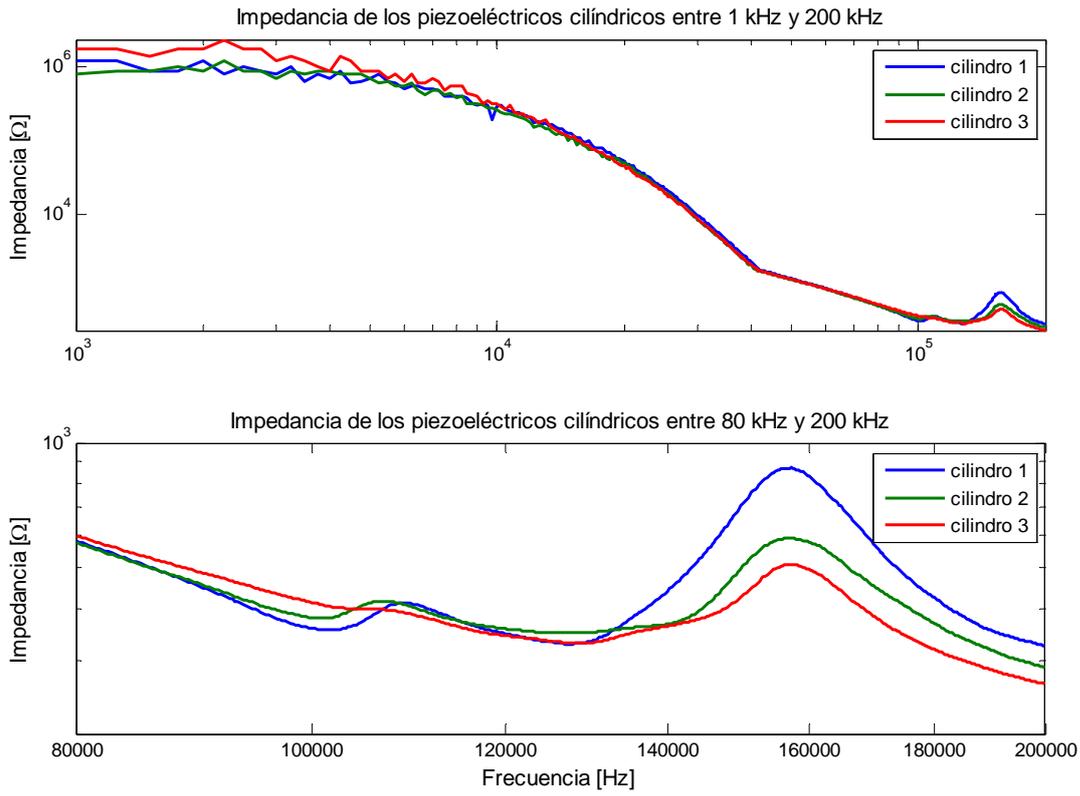


Figura 4.27 Impedancia de los piezoelectricos cilindricos.

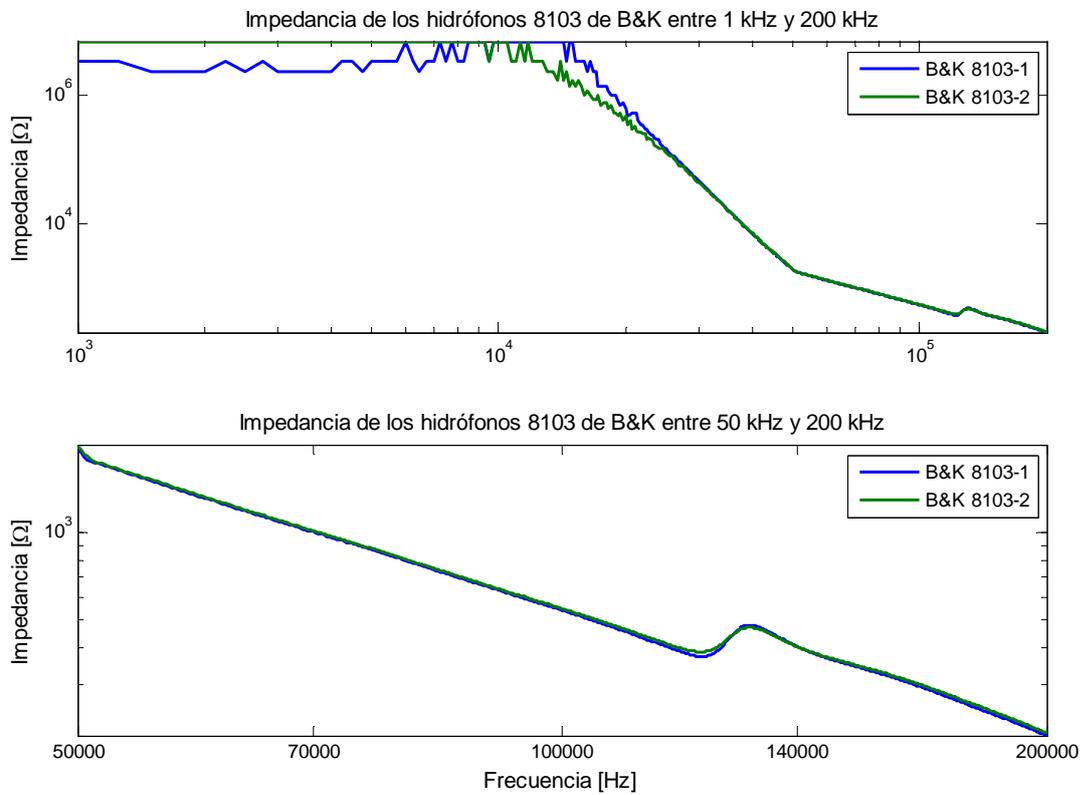


Figura 4.28 Impedancia de los hidrófonos 8103 de Brüel & Kjaer.

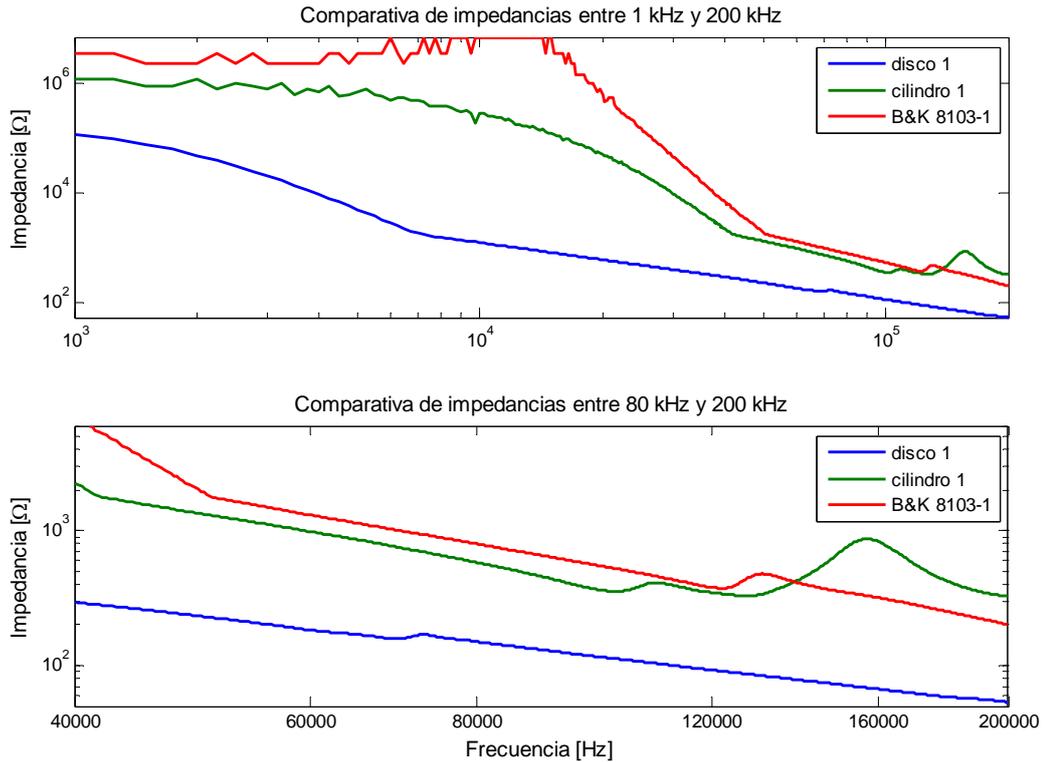


Figura 4.29 Comparativa de impedancias entre transductores.

Conclusiones del ensayo

Se ha realizado un estudio comparativo entre diferentes compuestos encapsulantes para la implementación de transductores acústicos utilizando piezoeléctricos.

La respuesta acústica en emisión demostró ser pobre para los compuestos blandos, mientras que tuvo un mejor comportamiento para los duros.

Aunque el proceso de fabricación fue manual, entre ellos la impedancia de resonancia fue muy similar; y se desplazó debido a la masa del compuesto.

En el siguiente apartado, con objeto de poder valorar con mayor detalle las prestaciones y las pequeñas variaciones detectadas, se analiza la respuesta acústica de todos ellos.

4.3.2 Respuesta acústica

En este apartado se estudia la respuesta acústica de los transductores construidos, operando como emisores (proyectores) y receptores (hidrófonos).

Para la realización de las medidas se emplearon las etapas de amplificación y acondicionamiento que se describen a continuación.

Etapa de amplificación

La etapa utilizada para la realización de las medidas está basada en dos amplificadores operaciones de potencia conectados en paralelo (ver Figura 4.30). Aunque la etapa es capaz de entregar hasta 100 mA y manejar tensiones de hasta ± 50 V, para los ensayos la etapa actuó como buffer y trabajó con tensiones bajas, inferiores a 10 V de pico a pico.

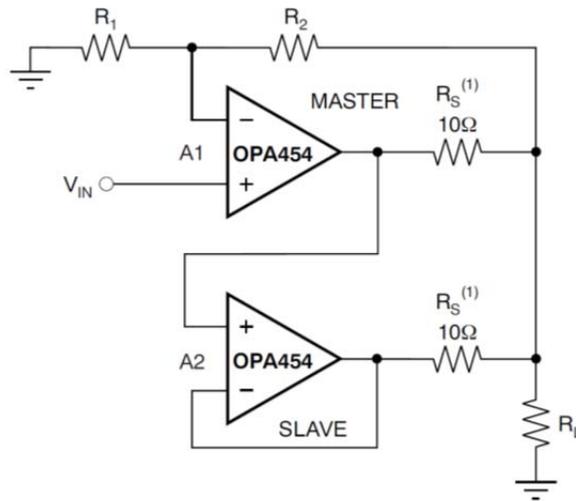


Figura 4.30 Etapa de amplificación basada en dos operacionales OPA454.

Etapa de acondicionamiento

Para acondicionar la señal del transductor piezoeléctrico se ha utilizado un amplificador de carga convencional, ver Figura 4.31. La etapa se comporta como un filtro paso banda, donde el límite inferior lo fijan los componentes del circuito y el límite superior el piezoeléctrico y su cableado.

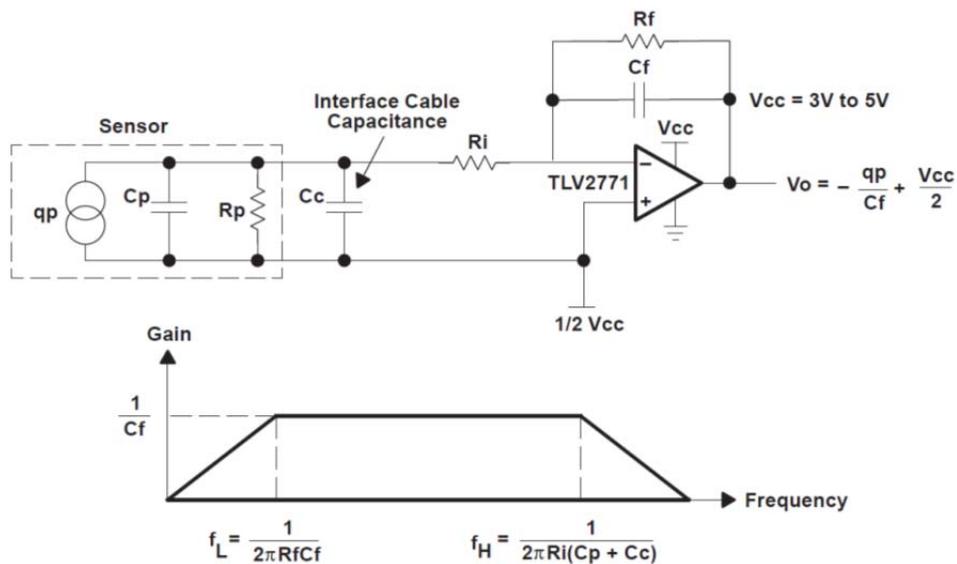


Figura 4.31 Etapa de acondicionamiento basada en un amplificador de carga.

Procedimiento

Para la realización de las medidas se utilizaron dos transductores por ensayo. Uno actuó como proyector y el otro como receptor. Aplicando un barrido de frecuencias se midió la respuesta del sistema. El esquema de medida se muestra en la Figura 4.32.

Para que las pérdidas por dispersión no introdujeran desviaciones en los diferentes ensayos, los transductores se ubicaron siempre a la misma distancia, en la zona central del acuario (alejados de las paredes, superficie y fondo); la señal generada consistió en una señal sinusoidal de tres ciclos.

La adquisición de señal se sincronizó mediante la señal de disparo del generador de funciones. Se tomaron muestras tanto de la señal de emisión como de recepción, utilizando una tarjeta de adquisición (NI PCI-6115) configurada a 2 MS/s por canal. Teniendo en cuenta que la adquisición se sincronizó con la generación, la medida se realizó hallando la tensión pico a pico máxima en la ventana de muestras correspondientes a la llegada de la señal. Los transductores se ubicaron para evitar las señales reflejadas, ver Figura 4.33.

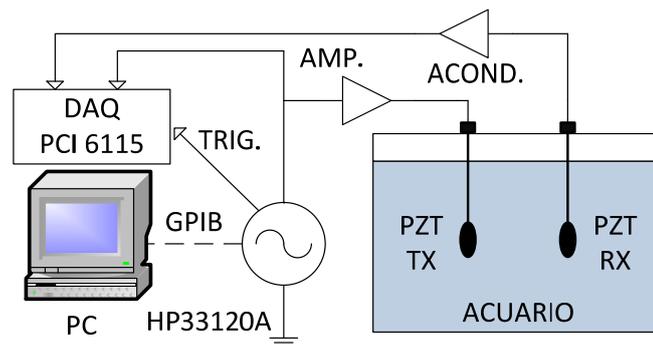


Figura 4.32 Sistema de medida para el análisis de la respuesta acústica.

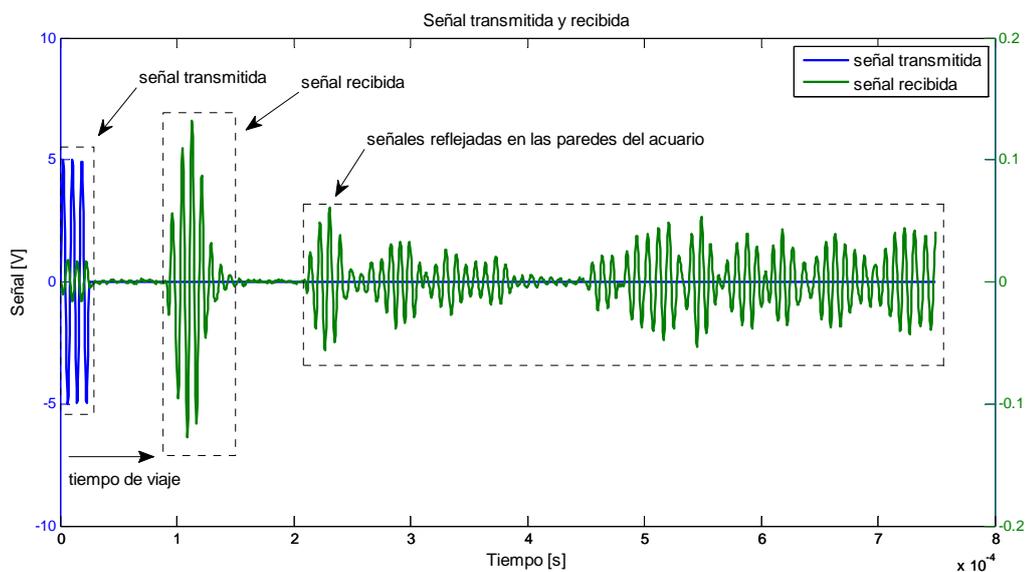


Figura 4.33 Procedimiento para medir la respuesta acústica.

El ensayo se dividió en tres partes. En la primera, los transductores construidos actuaron como hidrófonos, y el 8103 de Brüel & Kjaer como proyector; su característica típica para este modo de operación puede consultarse en (Kjaer, 2014).

En la segunda parte, los transductores construidos fueron utilizados como proyectores, y el 8103 como hidrófono.

En tercer y último lugar, se analizó la respuesta emitiendo y recibiendo con los diferentes transductores, realizando una comparativa entre ellos.

Ensayo 1: transductores construidos actuando como receptores

En el primer ensayo se analizó la respuesta emitiendo con los hidrófonos 8103 de Brüel & Kjaer y recibiendo con los diferentes transductores construidos.

Los resultados demostraron una mejor respuesta de los cilindros respecto los discos, ver Figura 4.34; no obstante, la frecuencia de resonancia de los cilindros era cercana a la máxima respuesta de emisión de los transductores 8103.

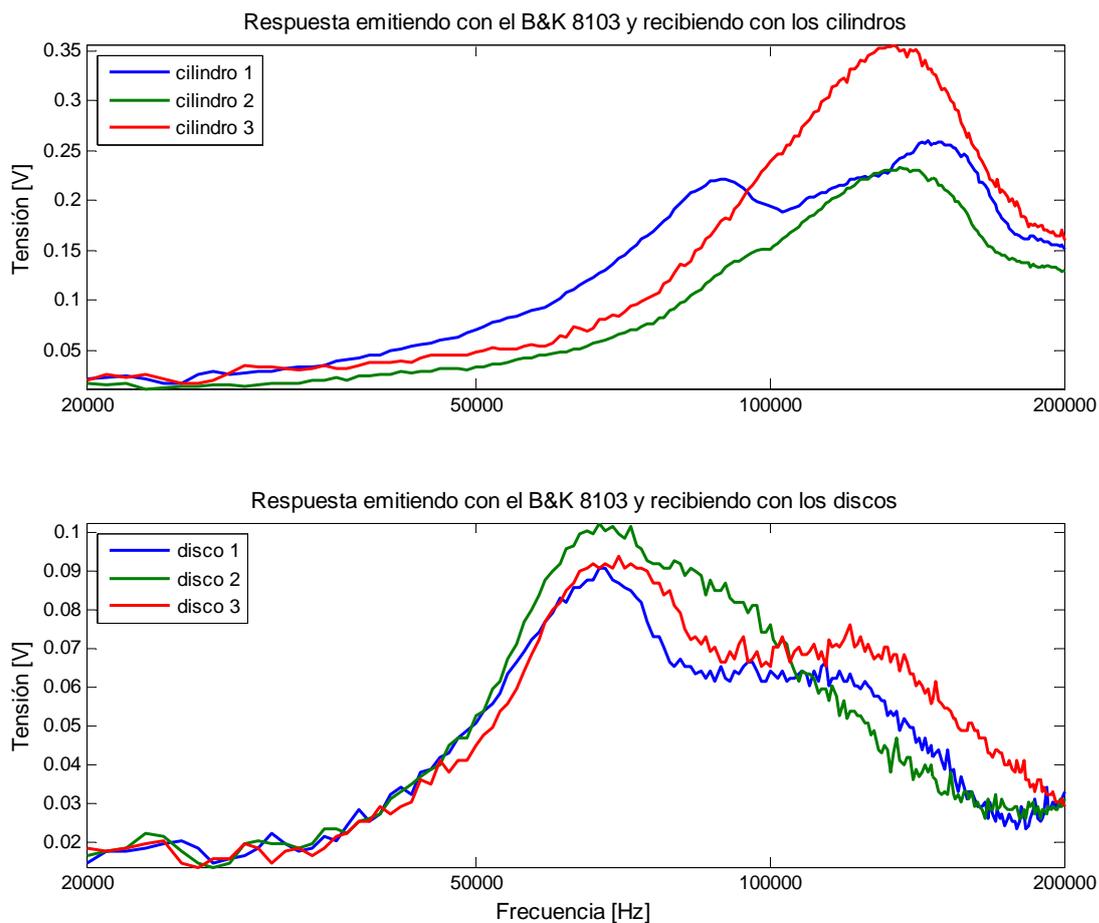


Figura 4.34 Respuesta del sistema emitiendo con el hidrófono 8103 de Brüel & Kjaer y recibiendo con los diferentes discos y cilindros piezoeléctricos.

Los cilindros 1 y 2 presentaron deformaciones de su respuesta, que pudieron deberse a la presencia de burbujas en el compuesto durante su tiempo de curado o por una fijación excesiva del cable durante la fabricación. Este hecho ya había sido advertido en el apartado anterior.

La mayor respuesta la ofreció el cilindro 3, que en el anterior apartado demostró una menor impedancia. Por otro lado, el cilindro 2 obtuvo una ligera menor respuesta que el cilindro 1, aunque como se comprobó, este hecho se debió a un desajuste de su inclinación durante las medidas.

Con los discos se observó una segunda cresta después de la frecuencia de resonancia de éstos. La primera se debió a la frecuencia de resonancia en sí del transductor; la segunda, a la máxima respuesta en emisión del hidrófono 8103.

Ensayo 2: transductores construidos actuando como proyectores

En el segundo ensayo los cilindros y los discos fueron utilizados como proyectores, y el transductor 8103 de Brüel & Kjaer como hidrófono, ver Figura 4.35.

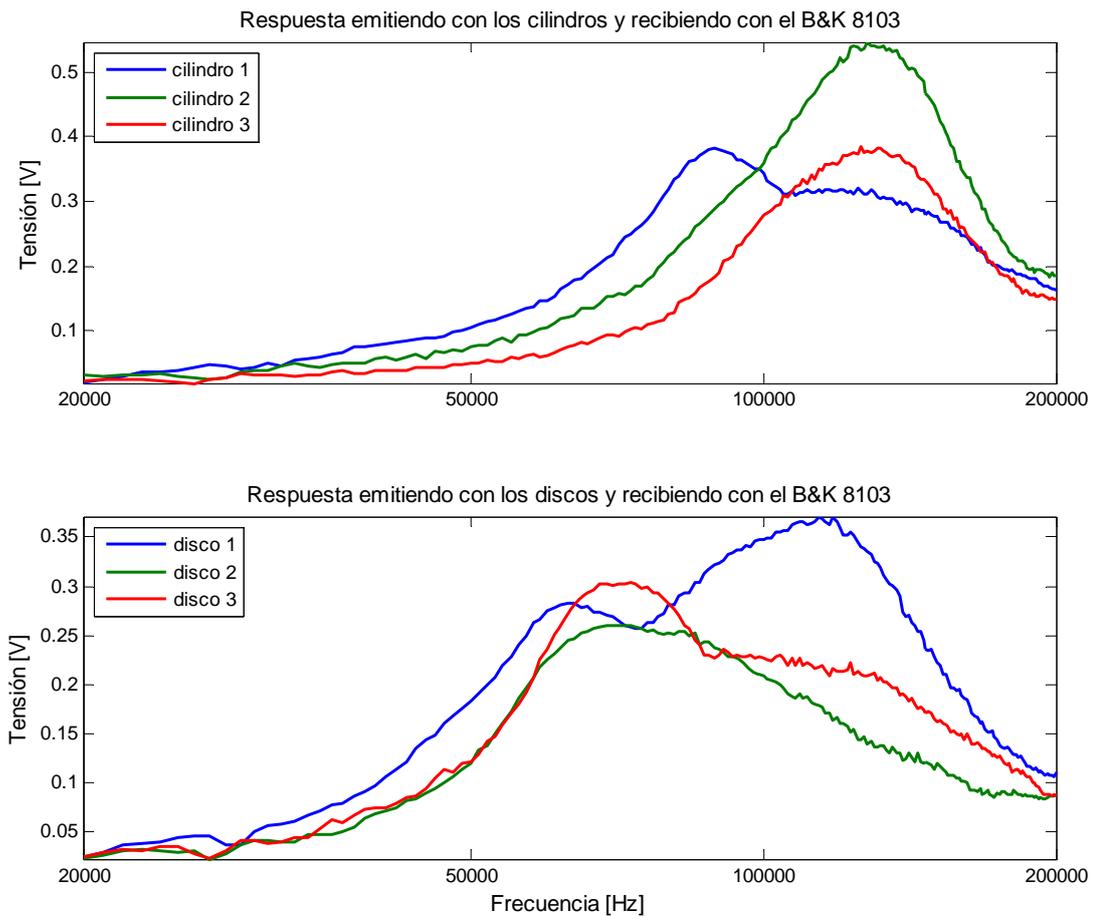


Figura 4.35 Respuesta del sistema emitiendo con los diferentes discos y cilindros piezoeléctricos y recibiendo con el hidrófono 8103 de Brüel & Kjaer.

En la respuesta de los cilindros se observó de nuevo la imperfección cerca de su frecuencia de resonancia. El cilindro 2 tuvo mayor respuesta que el 3 debido, de nuevo, a un desajuste de su inclinación al realizar las medidas.

Los discos ofrecieron una menor eficiencia electroacústica. Se observó una ligera imperfección en la respuesta del disco 1, que también fue identificada en la curva de su impedancia (imperfección del proceso de fabricación). Debido a ello, el disco 1 fue más eficiente al principio, en la frecuencia de resonancia lo fue el disco 2; y pasado ésta, el disco 1 fue de nuevo más eficiente.

Ensayo 3: comparativa entre transductores

Tras evaluar a la pareja de transductores 8103 de Brüel & Kjaer, uno como proyector y el otro como hidrófono, se compararon las respuestas de todos los transductores emitiendo y recibiendo, ver Figura 4.36.

Los cilindros actuando como hidrófonos ofrecieron niveles algo superiores que los hidrófonos 8103, mientras que la respuesta del disco fue pobre. No obstante, el cilindro presentó mayores problemas en su proceso de construcción: en dos de ellos apareció una imperfección cerca de la frecuencia de resonancia.

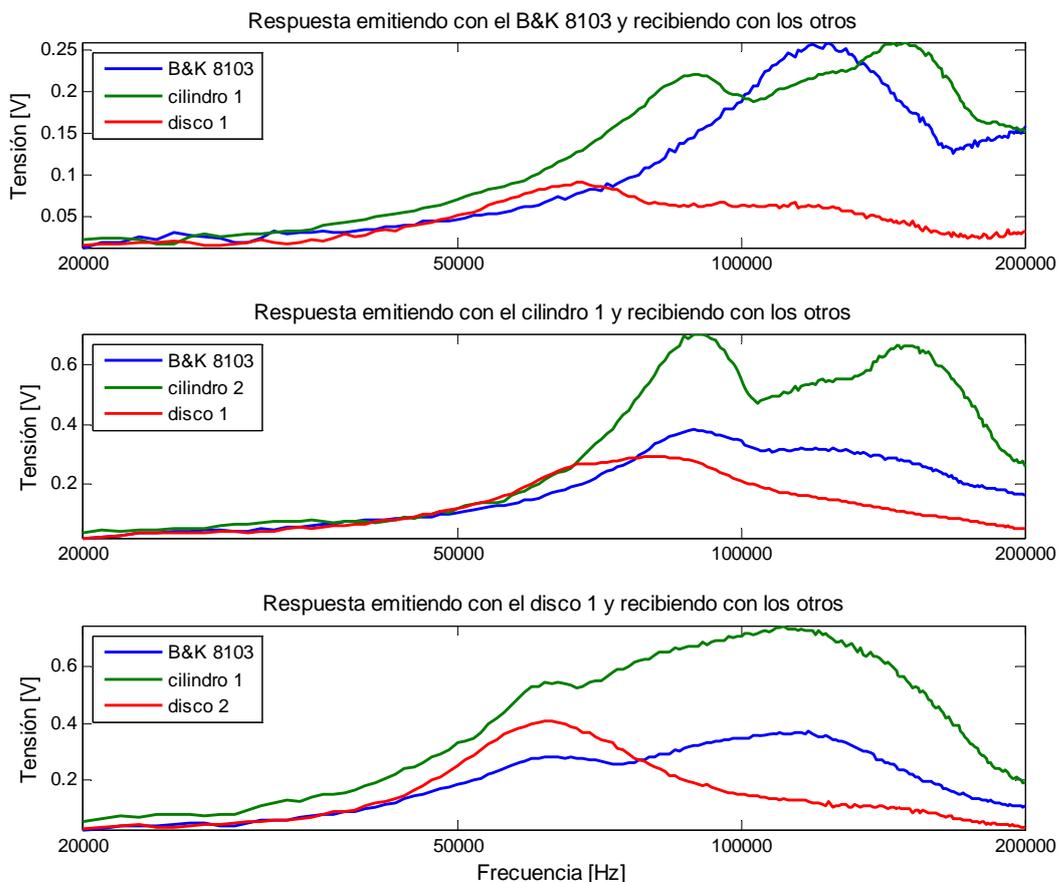


Figura 4.36 Comparativa de la respuesta entre los diferentes transductores y el hidrófono calibrado de Brüel & Kjaer.

Actuando como emisores, el cilindro y el disco demostraron una ligera mayor potencia acústica que el 8103, Por otro lado, ambos presentaban ángulos de emisión diferentes, mientras el disco tenía un comportamiento más direccional, el cilindro ofrecía omnidireccionalidad.

Conclusiones de los ensayos

En este apartado se ha realizado una caracterización frecuencial de los diferentes transductores construidos. En este tipo de ensayos se requieren equipos y materiales específicos y costosos. No obstante, se ha presentado una metodología, que permite realizar este tipo de medidas con material convencional y respetando una serie de consideraciones.

Para evitar las reflexiones y medir únicamente la señal útil (transmitida) se ha optado por emitir varios ciclos de señal y posicionar los transductores a una distancia donde las reflexiones llegaran más tarde que la señal útil.

Para obtener medidas más precisas es necesario el uso de soportes y estructuras que permitan ubicar a los transductores con mayor exactitud (distancia y ángulo).

Las medidas fueron realizadas sobre todo el conjunto (amplificador, proyector, hidrófono y acondicionador). No obstante, mediante la curva de calibración en emisión (TVR, Transmit Voltage Response), la respuesta en frecuencia del circuito acondicionador, y aplicando una corrección debida a la distancia (dispersión), es posible hallar la respuesta en emisión de los transductores.

Los resultados obtenidos con los transductores construidos han permitido validar el compuesto utilizado. Aunque los cilindros piezoeléctricos han demostrado un buen comportamiento operando como proyectores o hidrófonos, el proceso de fabricación provocó irregularidades en la respuesta en dos de ellos.

4.4 Planteamiento y desarrollo del prototipo

Con objeto de acercar e impulsar los avances actuales en materia de comunicaciones acústicas, al campo de la monitorización de especies, en esta apartado se presenta y desarrolla una propuesta hardware orientada al bajo consumo, de reducido tamaño y capaz de manejar OFDM.

4.4.1 Propuesta

La propuesta se esquematiza en la Figura 4.37, y presenta una parte digital y analógica para cumplir los mismos propósitos que las plataformas acústicas descritas durante la discusión de este capítulo, pero utilizando un procesador con prestaciones más reducidas que las DSPs y evitando la utilización de FPGAs para mezclar la señal.

Los elementos principales del sistema propuesto son, un microcontrolador con capacidades DSP (DsPIC33FJ128GP804), y un mezclador doblemente balanceado basado en una celda de Gilbert (SA612) (Carr, 1992).

Presenta una arquitectura half-duplex, utilizando un único transductor para la transmisión y recepción de los datos. La modulación y demodulación OFDM es realizada mediante las transformadas de Fourier (IFFT y FFT respectivamente) que el microcontrolador desarrolla de forma eficiente. Tal como indica su fabricante, utilizando su máximo rendimiento, 40 MIPs (mega instrucciones por segundo), una FFT de 512 puntos puede realizarse en 476,14 μ s.

La adquisición y generación de señal se realiza mediante el convertidor analógico-digital (ADC) y digital-analógico (DAC) integrados en microcontrolador. El ancho de banda de la señal lo limita el filtro antialiasing del DAC, por lo que la máxima frecuencia que puede generarse (en banda base) se encuentra cerca de los 20 kHz.

La amplificación (PA en el esquema) y el acondicionamiento de señal (LNA) se han implementado mediante las etapas anteriormente utilizadas para los ensayos (dos amplificadores OPA454 y un amplificador de carga convencional). En ambas etapas se han propuesto amplificadores programables para controlar la potencia de salida, y poder amplificar la señal recibida.

En la propuesta destaca el oscilador local, implementado mediante un sintetizador de frecuencia digital (DDS, Direct Digital Synthesizer) modelo AD9833, el cual es manejado a través de SPI (Serial Peripheral Interface). Los DDSs permiten generar frecuencias de salida con gran resolución (Cordesses, 2004; Devices, 1999), característica interesante para OFDM debido a la importancia de la sincronización.

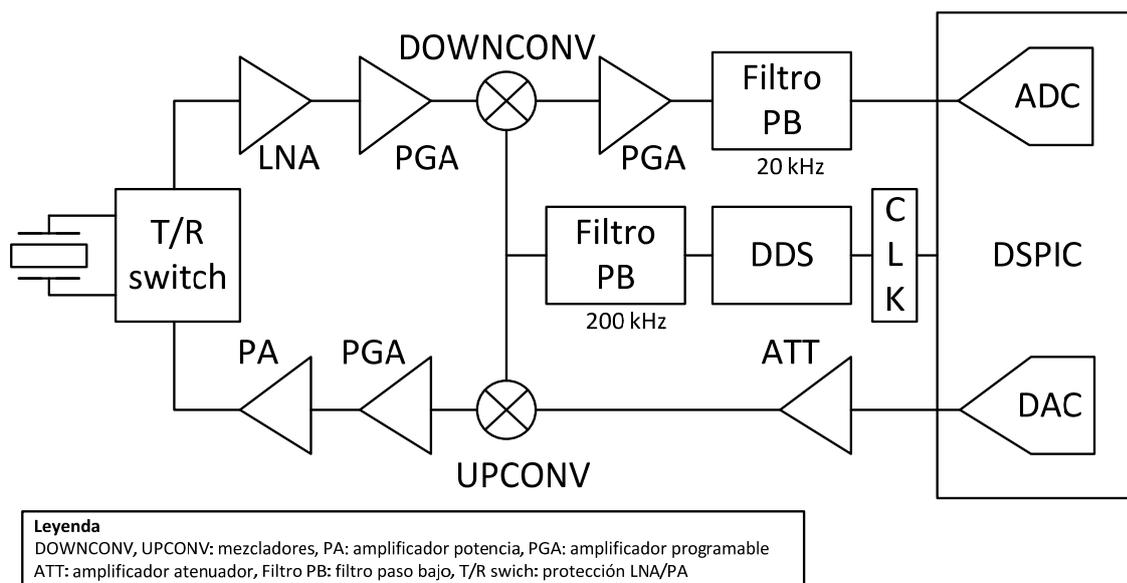


Figura 4.37 Esquema de la plataforma hardware propuesta.

Para conseguir un consumo reducido se planteó el encendido y apagado de todos sus componentes, incluyendo el propio oscilador externo del microcontrolador. De esta forma, y en función de las necesidades de operación, las diferentes partes del diseño pueden ser apagadas, disminuyendo el consumo y mejorando su eficiencia energética.

Durante un periodo de inactividad, el consumo de la propuesta puede ser muy bajo: el microcontrolador puede operar a través de su oscilador RC interno, y utilizar un modo de funcionamiento que ronda los 92,4 μW (28 μA a 3,3 V).

Se han propuesto dos métodos de alimentación: a través de una batería (funcionamiento autónomo), y a través de una conexión o sistema cableado; éste fue considerado para el uso/evaluación de la propuesta de forma continua/prolongada a través de sistemas cableados y/o con autoabastecimiento energético como boyas u observatorios submarinos. Por ello, y con objeto de poder manejar la propuesta de forma remota, la propuesta presenta una interfaz de comunicaciones Ethernet.

4.4.2 Desarrollo del prototipo

En este apartado se describen diversos puntos relativos al desarrollo e implementación del prototipo, detallando cuestiones hardware y software que fueron aplicadas y evaluadas.

Implementación hardware

Se consideró añadir un puerto de expansión para futuras ampliaciones y/o mejoras de sus prestaciones: conexión de periféricos, sensores u otros componentes no considerados en la propuesta. El puerto de expansión propuesto consistió en 4 pines remapeables por software a los diferentes periféricos del microcontrolador, una línea de alimentación y otra de masa.

Por otro lado, dadas las limitaciones de memoria, y con objeto de disponer de mayor capacidad de almacenamiento, se incorporó un módulo de memoria microSD.

La plataforma propuesta se alimenta a 3,3 V e incluye un convertidor Boost que proporciona 12 V al amplificador de potencia. La amplificación es controlable, permitiendo un ajuste entre 1 V y 10 V de pico a pico.

Aunque el DDS permitió generar una señal sinusoidal dentro de un rango de frecuencias elevado, debido a la amplificación del propio mezclador, los componentes que acompañaron al diseño fueron seleccionados para permitir mezclar correctamente las señales en el rango comprendido entre 80 y 200 kHz.

En la Figura 4.38 se muestra el prototipo construido. En el Anexo C.1 puede consultarse con mayor detalle su implementación.



Figura 4.38 Implementación física de la propuesta.

Implementación Software

En este apartado se validan las prestaciones del microcontrolador para la implementación de una comunicación OFDM. Posteriormente, se propone una aplicación funcional para evaluar al prototipo de forma remota.

La plataforma fue inicialmente programada para evaluar una comunicación OFDM simple. Para ello se realizaron diferentes ensayos con las funciones de correlación y las transformadas de Fourier (IFFT y FFT) de la librería de procesamiento del microcontrolador. Las transformadas estaban restringidas a 512 puntos, por lo que el límite de portadoras está limitado también a 512.

La implementación de una transmisión OFDM simple (basada en un preámbulo, tiempo de guarda, símbolo, tiempo de guarda, símbolo) no presentó inconvenientes relacionados con las prestaciones del microcontrolador. A continuación se detallan estas cuestiones.

El tiempo de cálculo de las IFFTs (símbolos) demostró ser muy inferior a los tiempos de guarda (tiempo entre símbolos) que se practican en el medio marino, y que rondan varios milisegundos (Matsuoka, Nakashima, & Yoshimura, 2008; Ribas, 2009).

Para conseguir la máxima eficiencia en la generación de los símbolos, se mapeó el DAC a memoria DMA. Este modo de operación permitió transferir la señal mientras se calculaba el siguiente símbolo (mediante la IFFT).

Por otro lado, también se evaluó una recepción OFDM simple. Se realizó mapeando el ADC sobre DMA. Cada 512 muestras, y mientras el ADC seguía trabajando, se realizó

una correlación con una señal patrón (preámbulo). Detectado el preámbulo, un temporizador midió el tiempo de llegada de cada símbolo, disparando el proceso de demodulación de la señal (FFT).

Para la evaluación de esta parte, la señal transmitida fue generada con una tarjeta de adquisición (NI PCI-6115), se envió a la entrada del DAC del prototipo. El resultado obtenido fue satisfactorio y las correlaciones podían realizarse sin saturar la memoria del DAC (adquiriendo a 70 ksps).

Los múltiples envíos podían detectarse (detección del preámbulo) y se cumplían los tiempos de proceso (el tiempo para realizar las FFTs estaba por debajo del tiempo de guarda, que se fijó a 5 ms). En este ensayo pudo observarse la importancia de la sincronización (detección precisa del preámbulo) para capturar correctamente la ventana de muestras correspondientes al símbolo.

Tras comprobar la viabilidad de las prestaciones del microcontrolador para soportar una comunicación OFDM, el prototipo quedó dispuesto para la adaptación e incorporación de los algoritmos actuales para este tipo de comunicación: mecanismos de sincronización precisos, ecualización del canal, corrección de la desviación en frecuencia y en fase de las portadoras, disminución del PAPR, etc.

Para evaluar el prototipo bajo el agua, se desarrolló una aplicación basada en comandos simples. La aplicación se controla a través de la interfaz Ethernet y permite:

- Cargar en memoria dos señales digitalizadas (preámbulo y símbolo).
- Seleccionar la amplificación de salida.
- Seleccionar la frecuencia del oscilador local.
- Encender y apagar cada uno de sus módulos.
- Generar un envío simple, continuo, o una transmisión OFDM compuesta de un preámbulo y un símbolo separados por un tiempo de guarda.
- Configurar el tiempo de guarda entre el preámbulo y el símbolo.

Posteriormente, y debido a la disponibilidad del observatorio submarino OBSEA para la evaluación del prototipo, en su código se añadió un gestor de arranque (Bootloader). De esta forma, y en caso necesario, su firmware podría ser reprogramado de forma remota.

4.4.3 Pruebas de consumo

Este ensayo fue realizado para proporcionar datos orientativos del consumo del prototipo, y puedan considerarse y mejorarse en futuras investigaciones en esta área de trabajo: el diseño de transmisores y receptores OFDM de pequeño tamaño y bajo consumo.

El análisis se realizó habilitando y deshabilitando los diferentes módulos que componen su diseño. La medida de consumo transmitiendo se realizó con un transductor conectado.

Los resultados del análisis se resumen en la Tabla 4.15. El componente de mayor consumo fue el convertidor serie-Ethernet con 557 mW.

Tabla 4.15 Consumo del prototipo desarrollado.

Configuraciones	Consumo
DSPIC @ 40 MIPS y componentes apagados	488,8 mW
DSPIC @ sleep (bajo consumo) y componentes apagados	150 μ W
Convertor serie-Ethernet (XPORT)	557 mW
DSPIC @ 40 MIPS, transmitiendo en continuo a 80 kHz y mínima potencia de salida	622,6 mW

No obstante, el módulo de comunicaciones es requerido si opera de forma cableada; y en tales casos, se suele disponer de una línea de alimentación. Operando de forma autónoma puede desactivarse.

Durante una transmisión, operando a 80 MHz y a mínima potencia, el consumo del microcontrolador rondó los 623 mW. Mediante su red RC (oscilador interno), y activando su modo de bajo consumo pudo disminuirse hasta 150 μ W. Operando con una batería de 2000 mAh, se ha estimado una autonomía de 10 h si se transmite de forma continua, y de 1,5 años con la electrónica en bajo consumo y a la espera.

4.5 Experimentación del prototipo en el mar

En este apartado se detalla la adaptación realizada al prototipo para su operación bajo el agua, y los resultados experimentales de su evaluación en el mar.

4.5.1 Adaptación y pruebas de estanqueidad

El prototipo fue adaptado para su evaluación en el observatorio submarino OBSEA. Para su interconexión se utilizó un conector wetmate submarino (conectable bajo el agua), marca GISMA. Para proteger la electrónica se utilizó una caja de policarbonato y pasamuros con juntas tóricas, ver Figura 4.39.



Figura 4.39 Adaptación del prototipo para su operación bajo el mar.

Posteriormente, se realizaron diferentes pruebas para validar su estanqueidad. La evaluación se realizó en una cámara hiperbárica (ver Figura 4.40); las pruebas mostraron un ligero combado de la tapa cuando se sometió a 2 bares de presión (20 m de profundidad). Sometido a esa presión durante dos días de duración, demostró estanqueidad; no obstante, para mejorar la protección se enresinó la electrónica.



Figura 4.40 Evaluación del prototipo en la cámara hiperbárica a 2 bares de presión.

4.5.2 Evaluación del prototipo en mar abierto

En este último apartado se presenta la evaluación del prototipo bajo el mar.

Descripción del ensayo

La experimentación fue realizada a 20 metros de profundidad, en las instalaciones del observatorio OBSEA. Esta plataforma, permite la interconexión de instrumentos marinos a través de sus tomas disponibles; y dispone, entre otros, de un hidrófono de la marca Bjørge, modelo Naxys (Stream, 2013), ver Figura 4.41.



Figura 4.41 Observatorio submarino OBSEA y su hidrófono cableado Naxys.

Debido a la naturaleza del observatorio (cableado), el prototipo podía alimentarse de forma continua y controlarse remotamente. Su hidrófono fue utilizado para medir la potencia acústica transmitida por el prototipo.

El prototipo fue conectado a una de las tomas de instrumentos del observatorio e instalado a 2 m aproximadamente del hidrófono, ver Figura 4.42. Tras proporcionarle alimentación y comprobar su correcto funcionamiento (consumo estable y contestación a los comandos enviados), se procedió con el ensayo.

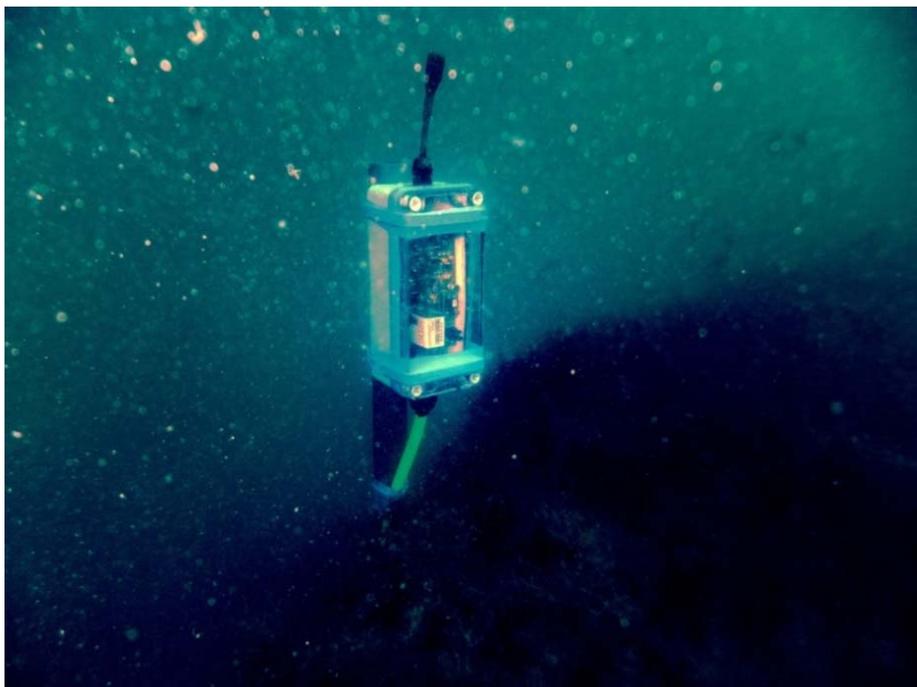


Figura 4.42 Instalación del prototipo en el observatorio submarino OBSEA.

Experimentación y resultados del ensayo

En el ensayo se midió la potencia acústica del prototipo haciéndolo trabajar a diferentes frecuencias de emisión. Se ajustó el amplificador para proporcionar una amplitud de salida de 7,4 V de pico a pico y se generó una señal piloto de 100 Hz y 20 ms de duración; mediante el mezclador y el oscilador local, la señal se subió en frecuencia y se realizó el barrido. La frecuencia del oscilador partió en 80 kHz y por cada transmisión, se incrementó 1 kHz, hasta alcanzar los 190 kHz. En la Figura 4.43 puede observarse la representación temporal de la señal transmitida.

Aplicando el procedimiento documentado en (Center, 1990) se calculó el nivel de presión acústica (SPL: Sound Pressure Level) y la respuesta del transmisor en función de la tensión (TVR: Transmitting Voltage Response). A continuación se detallan los pasos.

A partir de la señal recibida por el hidrófono y su sensibilidad, se calculó la presión acústica (SPL). Para su cálculo se aplicó el factor de corrección debido a la distancia entre ambos instrumentos (hidrófono y prototipo), existiendo una pérdida por dispersión de 6 dB. Después, mediante la tensión entregada por el amplificador (medida previamente en laboratorio) se calculó la respuesta TVR, ver Figura 4.44.

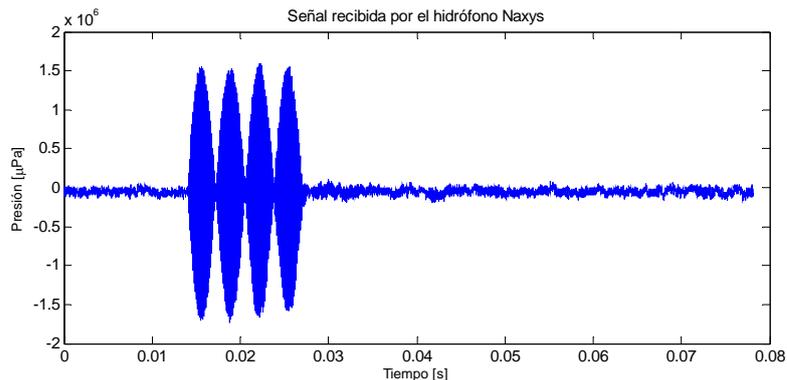


Figura 4.43 Señal generada por el prototipo y recogida por el hidrófono Naxys.

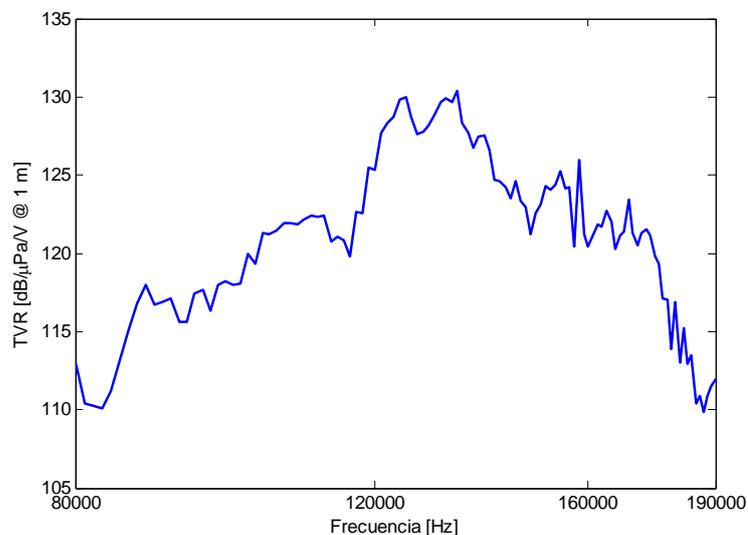


Figura 4.44 Respuesta en emisión del prototipo en función de la tensión aplicada.

La máxima presión acústica fue de 141,8 dB/ μ Pa @ 1 m a 134 kHz, frecuencia donde se identificó la resonancia del transductor construido.

Conclusiones del ensayo

En este ensayo se ha podido analizar la respuesta del prototipo y su operatividad bajo el agua. El nivel de presión acústica que ofrece se encuentra dentro de los rangos que entregan los transmisores acústicos comerciales para especies, y que rondan los 137 y los 152 dB/ μ Pa @ 1m, (Vemco, 2014; Htisonar, 2014). Para conseguir una mayor presión acústica basta con aumentar la excursión de salida sin saturar la etapa de potencia y respetando el slew rate del amplificador.

Las medidas realizadas han permitido representar la respuesta del prototipo en función de la frecuencia y la tensión aplicada y comparar su presión acústica con la de un transmisor comercial.

4.6 Sumario

En este capítulo se ha evaluado en mar abierto y en laboratorio un sistema acústico comercial para la monitorización de especies. Las pruebas realizadas han demostrado la variabilidad y pérdida de detecciones en entornos con obstáculos (biotopos y paredes), evidenciando una dependencia con la posición/ubicación de sus elementos (hidrófonos y transmisores).

Se ha identificado una falta de estándares e incompatibilidad entre fabricantes; y dado que los procedimientos que utilizan no son públicos, solo sus fabricantes pueden mejorar, modificar o desarrollar nuevos transmisores, aptos para sus marcas.

Por los motivos anteriores, y con objeto de acercar e impulsar los avances actuales en materia de comunicaciones acústicas a estos sistemas, la investigación realizada se ha enfocado en la propuesta y desarrollo de una plataforma abierta de comunicación acústica de bajo consumo, reducido tamaño y capaz de soportar OFDM. Debido a la inexistencia de transductores comerciales de reducido tamaño, aptos para esta área de aplicación, se ha estudiado también el diseño e implementación del transductor acústico.

El prototipo se basa en un microcontrolador con capacidades DSP, un mezclador analógico y un DDS, evitando la utilización de DSPs y FPGAs que presentan algunas arquitecturas de módems acústicos. Los ensayos realizados han validado las prestaciones de la propuesta para la implementación de una comunicación OFDM.

En la última parte de esta investigación, el transductor y el prototipo han sido evaluados y validados en el mar. Las medidas realizadas han permitido representar la respuesta del sistema en función de la frecuencia y la tensión aplicada (TVR). Por otro lado, el nivel de presión acústica (SPL) conseguido ha sido de 141,8 dB/ μ Pa @ 1 m, nivel dentro de los márgenes de los transductores acústicos comerciales para especies.

Capítulo 5

Conclusiones y futuras líneas de trabajo

5.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis se han discutido y presentado nuevos sistemas y métodos para la monitorización de especies, tanto en acuarios como en mar abierto. Se han abordado tres líneas de investigación, que corresponden a las diferentes tecnologías que se aplican en esta área: óptica, radiofrecuencia y acústica.

Habiendo analizado las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas, son cuatro los objetivos planteados y alcanzados. Dos de ellos corresponden a la investigación relativa a los dispositivos ópticos, y los restantes a los de radiofrecuencia y acústica.

A continuación se exponen los principales resultados y conclusiones de este trabajo ordenados por objetivos y agrupados por área de investigación.

5.1.1 Monitorización de especies mediante dispositivos ópticos

Objetivo 1: Evaluación de los detectores de presencia para la medición de la actividad de especies marinas en acuarios experimentales. Comprende la propuesta e implementación de una plataforma de medida apta para estos entornos, modular y ampliable, así como el estudio y la evaluación de algoritmos robustos ante las falsas detecciones producidas por alteraciones del medio no controladas.

Los detectores de presencia posibilitan la monitorización de especies subacuáticas sin contacto. Esta técnica es viable en laboratorio y permite el estudio del tiempo de ocupación y la movilidad de los animales sobre zonas delimitadas. Mediante una correcta instalación de los transductores pueden aplicarse para el estudio de especies bentónicas o pelágicas. El coste de la instalación, el mantenimiento, la alimentación y las

comunicaciones, las condiciones cambiantes del medio y la bioinscrutación suponen grandes obstáculos para su aplicación en mar abierto.

En esta parte de la investigación se han descrito dos métodos para la colocación de los transductores en el acuario. La posición de los emisores en la parte superior, ilumina el fondo del acuario, y puede tener una doble utilidad (foco de luz) si se utilizan cámaras (objetivo 2). Si la instalación de los transductores se realiza fuera del acuario, se requiere la incorporación de ventanas transparentes en las zonas de medición.

Debido al principio de esta técnica de medida, en ensayos grupales (múltiples individuos conviviendo en la misma zona de estudio), los datos obtenidos son a nivel colectivo y no es posible separar/extraer la información por individuo.

A pesar de la gran atenuación que experimenta la radiación infrarroja bajo el agua, ha sido posible realizar las medidas con una columna de agua de 25 cm y utilizando una intensidad de iluminación media/baja (5 veces por debajo de su potencia máxima). El empleo de técnicas de iluminación pulsantes puede mejorar el alcance de la medida, aunque se requiere una sincronización entre la generación y la recepción del estímulo/señal.

El sistema de medida planteado permite la adquisición de hasta 64 receptores. La interfaz escogida y su diseño permiten la escalabilidad; no está limitado para un determinado tipo de estudio, acuario o animal. Replicando el sistema es posible incrementar el número de zonas de medida o posibilitar ensayos con múltiples acuarios de forma simultánea. El número máximo de sistemas que pueden conectarse está limitado por la norma USB, y es de 127.

La identificación del dispositivo o de su puerto, permite reducir la complejidad de la puesta a punto o configuración de los experimentos. La propuesta realizada consistió en la utilización de la librería DLL que proporciona el fabricante y la asignación de un nombre a cada una de las réplicas. Este proceso puede realizarse después de la programación del firmware del microcontrolador.

Las pruebas de validación y con animales demostraron el correcto funcionamiento del sistema en ciclos completos de 24 h durante 20 días consecutivos. Dichas experimentaciones fueron realizadas en 12 acuarios con 12 réplicas del sistema. El conexionado de todo el sistema se hizo utilizando concentradores USB.

Se han presentado y evaluado dos algoritmos que haciendo uso de la redundancia de transductores, permiten reducir las detecciones erróneas causadas por alteraciones de la calidad del agua (turbiedad), la presencia de partículas que obstruyen la línea de vista entre el par emisor-receptor (e.g. mudas), y el deterioro de los transductores.

La electrónica que quedó expuesta al ambiente sufrió un cierto deterioro. Se precisa una mayor protección de los elementos: resinas y utilización de conectores con un mayor grado de protección. La redundancia de transductores aplicada en este trabajo es una recomendación que ofrece mayor robustez.

Objetivo 2: Estudiar la viabilidad de las cámaras web en acuarios de experimentación marina. Se propone el desarrollo de una plataforma de adquisición de imagen de carácter abierto, que permita la gestión de múltiples cámaras e independice el proceso de adquisición respecto al de procesado.

Las cámaras web proporcionan gran flexibilidad en entornos de laboratorio a un coste reducido. La interfaz USB permite reducir la complejidad de la instalación, punto a considerar cuando se manejan múltiples cámaras.

Dependiendo de las características de la especie y del tipo de experimentación, debe sopesarse la calidad de imagen, la resolución, así como el ángulo de visión que proporcionan. Aunque, pueden ser parámetros difícilmente accesibles por los fabricantes de estas cámaras, un estudio preliminar de la imagen en el entorno real de trabajo, puede resultar suficiente para comprobar su viabilidad.

Para la experimentación con especies es fundamental que estas cámaras puedan trabajar sin luz durante los periodos nocturnos. Aunque los sensores de imagen son sensibles a la longitud del espectro del infrarrojo, algunas marcas y modelos de cámara analizados tienen mejor sensibilidad en este rango y por tanto, han resultado más adecuadas.

Los entornos de programación Matlab y LabVIEW resultaron adecuados para la adquisición y tratamiento de imagen. Ambos demostraron una correcta operación cuando se adquirió de forma continua con una sola cámara. No obstante, LabVIEW demostró ser ineficaz para la adquisición múltiple debido a una fuga de memoria (memory leak) que ocurre para ciertas cámaras USB.

Matlab y la Image Processing Toolbox demostraron un correcto funcionamiento operando de forma continua y con múltiples cámaras. El proceso de adquisición pudo integrarse con LabVIEW mediante la función Matlab script, restaurando la prestación que no se conseguía inicialmente.

Cuando se emplean múltiples cámaras del mismo modelo/fabricante puede existir un problema de asociación entre el nombre/identificador de la cámara y su ubicación física (en los acuarios). Esta cuestión fue solucionada modificando uno de los parámetros del driver de la cámara, e instalando cada una de forma secuencial. Este aporte permite el manejo unívoco de múltiples cámaras independientemente del orden de conexión y de la toma donde se conectaron.

La utilización de cámaras en laboratorio ha permitido el estudio y monitorización de la actividad de las especies (tiempos de ocupación en determinadas áreas, trayectorias, ritmos, velocidad, etc.) en función de parámetros que pueden aplicarse de forma externa y controlada, causando un mínimo impacto al animal, cuestión de gran relevancia para estos estudios. No obstante, cuando el análisis es grupal (múltiples individuos conviviendo en un solo acuario) pueden requerirse marcas identificativas. Éstas han sido aplicadas en publicaciones derivadas.

Las publicaciones derivadas de esta área de investigación del trabajo de Tesis y relacionadas con los dos objetivos anteriores han sido:

(Sarriá et al., 2007a), (Sarriá et al., 2007a), (Sarriá et al., 2008a), (Sarriá et al., 2008b), (Aguzzi et al., 2008a), (Aguzzi et al., 2008b), (Sarriá & del Río 2009), (Sbragaglia et al., 2011a), (Sbragaglia et al., 2011b), (Sbragaglia et al., 2011c).

5.1.2 Monitorización de especies mediante dispositivos de radiofrecuencia

Objetivo 3: Evaluación y desarrollo de un sistema de localización y seguimiento de especies basado en RFID apto para la experimentación en acuarios. Comprende la propuesta e implementación de una plataforma de medida escalable y apta para estos entornos.

La monitorización de especies por radiofrecuencia se emplea en campo abierto y en los entornos subacuáticos, pero solo es efectiva en aguas con poca conductividad (agua dulce). En acuarios de experimentación el alcance puede ser suficiente para captar la señal, tanto en agua dulce como salada; no obstante, no se encontraron equipos que utilizando radiofrecuencia permitieran localizar la posición de las especies, siendo éste el punto trabajado en esta parte de la investigación.

Esta tecnología requiere que la especie porte un pequeño transpondedor o tag (monitorización con contacto). Los tags pasivos son alimentados a través del campo magnético del lector, y han sido los utilizados en este trabajo. Éstos proporcionan un alcance menor que los activos o semi-pasivos, pero no requieren mantenimiento ni recarga, por lo que resultan particularmente interesantes en esta área de aplicación.

La propuesta realizada ha contemplado la utilización de múltiples lectores instalados matricialmente en la base del acuario. Las pruebas realizadas con diferentes lectores comerciales demostraron un alcance suficiente para detectar la presencia de los tags en las proximidades del fondo del acuario y con agua marina.

El lector de baja frecuencia demostró ser ineficaz debido al diseño de su antena y a su baja potencia; y también reveló una disminución importante de su alcance debido al acoplamiento (presencia de lectores cercanos). Los resultados obtenidos con los lectores de HF ofrecieron mejores alcances y una mejor directividad (menores distancias entre lectores para evitar el acoplamiento).

Para la ejecución de este objetivo fue desarrollado un sistema electrónico que permitió manejar a múltiples lectores RFID. La interfaz de esta propuesta, dados los resultados anteriores, también fue USB. Se implementaron dos técnicas/metodologías para identificar a las múltiples réplicas del prototipo y evitar su configuración.

Debido a la gran atenuación de la señal de radiofrecuencia, uno de los requisitos para el correcto funcionamiento del sistema, ha sido la colocación de los lectores/antenas lo más cerca posible de la base del acuario; para mejorar el alcance, el grosor de la base del acuario debe ser mínimo.

Por otro lado, el ángulo de inclinación del tag es un factor crítico. Dependiendo de la especie (altura respecto el fondo y ángulo de su cuerpo en posición erguida), y del lugar de la colocación del tag, este hecho puede suponer una limitación. Con lectores de mayor potencia/alcance se ha comprobado que este aspecto puede mejorarse; no obstante, puede haber una pérdida de resolución debida al acoplamiento entre antenas, por lo que también deben ser directivos. Otra consideración a tener en cuenta es el estadio en el que se encuentra el animal, las mudas pueden causar una pérdida del tag durante el experimento.

De forma general, para mejorar la resolución de la posiciones, se requieren lectores de pequeño tamaño, de mayor potencia y directividad. Los lectores y tags que emplean un mecanismo de acceso al medio resultan interesantes en el sector industrial; no obstante, en esta área de aplicación, dado que para mejorar la resolución se requieren lectores de pequeño tamaño, esta característica puede ser prescindible (difícilmente dos individuos van a estar dentro del rango del lector).

Debido a la dificultad para instalar los lectores cerca de las madrigueras, existieron zonas no cubiertas por el rango de los lectores. La latencia entre consultas también demostró ser dependiente para la localización de los individuos. Este punto puede mejorarse disminuyendo el periodo entre consultas en el software de control del equipo anfitrión, o modificando el firmware del microcontrolador y haciendo que los controladores operen de forma autónoma.

Bajo las consideraciones anteriores, la investigación realizada ha demostrado la viabilidad de la tecnología RFID para la monitorización de especies bentónicas. Esta tecnología permite identificar, localizar y seguir a diferentes individuos de forma simultánea por el acuario; también permite medir los tiempos de ocupación de los individuos en zonas delimitadas.

Las publicaciones derivadas de esta parte del trabajo de investigación han sido:

(Aguzzi et al., 2008a), (Aguzzi et al., 2009), (Sarriá et al., 2009a), (Sarriá et al., 2009b), (Aguzzi et al., 2011), (Costa et al., 2011), (Costa et al., 2012)

5.1.3 Monitorización de especies mediante dispositivos acústicos

Objetivo 4: Desarrollo de una plataforma acústica para la monitorización de especies marinas en espacios abiertos. Comprende la propuesta y desarrollo de un prototipo de carácter abierto que permita la evaluación de nuevos protocolos, técnicas y avances en materia de comunicaciones acústicas, apta y compatible con OFDM.

Los sistemas de monitorización mediante comunicaciones acústicas permiten estudiar especies subacuáticas en entornos abiertos, tanto en agua dulce como marina. Esta tecnología actualmente no se utiliza para monitorizar especies en acuarios experimentales, y es una de las áreas identificadas para investigaciones futuras.

Existe un número reducido de empresas dedicadas a la fabricación y comercialización de transmisores y receptores acústicos para especies. Por otro lado, cada una de ellas utiliza diferentes frecuencias de operación, modulaciones y codificaciones de la señal, existiendo incompatibilidad entre fabricantes. Las modulaciones que actualmente se aplican son poco robustas frente a los efectos indeseados del medio subacuático y todavía no se encuentran transmisores OFDM de pequeño tamaño.

El análisis realizado con el equipo comercial VR2W tanto en el laboratorio como en mar abierto, demostró su dependencia con el entorno, y sus limitaciones técnicas para poder triangular la posición de los individuos. Los resultados obtenidos pueden servir como referencia para el desarrollo y perfeccionamiento de estos sistemas (nuevos transmisores y receptores).

Con objeto de mejorar los transmisores actuales, en esta parte de la investigación, se ha desarrollado un transductor acústico subacuático basado en un piezoeléctrico de pequeñas proporciones y se ha presentado una metodología para su caracterización, utilizando material convencional y respetando una serie de consideraciones.

Para impulsar los avances actuales en materia de comunicaciones dentro del área de monitorización de especies, se ha presentado y desarrollado una propuesta hardware orientada al bajo consumo, de tamaño reducido y capaz de manejar OFDM.

La propuesta ha sido implementada físicamente y es una plataforma abierta para el desarrollo y la validación de nuevas técnicas y protocolos para el diseño de futuros equipos de monitorización (transmisores y receptores para su aplicación con especies). También supone una plataforma apta para impulsar el desarrollo y la mejora de las redes de sensores submarinos, cuyas necesidades son similares.

Las publicaciones derivadas del trabajo de investigación han sido:

(Sarriá et al., 2010), (Sarriá et al., 2011a), (Sarriá et al., 2011b), (Sarriá & Molino 2011), (Sarriá et al., 2012a), (Sarriá et al., 2012b), (Pallarés et al., 2013), (Sarriá et al., 2013)

5.2 Aportaciones

Se resumen a continuación las principales aportaciones de este trabajo de investigación:

- Diseño e implementación de un sistema de monitorización de especies basado en infrarrojos y apto para el estudio de animales en acuarios experimentales. El prototipo es flexible y escalable y no está limitado al tamaño del acuario.
- Diseño e implementación de un sistema de monitorización de especies basado en RFID, apto para la localización y seguimiento de animales en acuarios experimentales. El prototipo es flexible y escalable y no está limitado al tamaño del acuario.

- Descripción metodológica para el desarrollo de transductores acústicos sumergibles basados en piezoeléctricos.
- Descripción metodológica y consideraciones técnicas para medir la absorción acústica de materiales y realizar la caracterización frecuencial de transductores. Los métodos utilizan material convencional y pueden realizarse en un acuario de pequeñas dimensiones.
- Diseño y desarrollo de una plataforma hardware de comunicación acústica para la evaluación y mejora de los algoritmos actuales de OFDM y su futura aplicación al área de monitorización de especies. El prototipo permite manejar otras modulaciones y sirve de plataforma de investigación acústica para dispositivos pequeños y de bajo consumo. Puede operar de forma autónoma o cableada a través de redes de observatorios u otros equipos submarinos.

5.3 Futuras líneas de investigación

Fruto de la investigación realizada surgen nuevas líneas de trabajo en las tres áreas o tecnologías estudiadas.

Monitorización de especies mediante dispositivos ópticos

El prototipo que ha sido propuesto es escalable y permite ser reconfigurado de acuerdo a las necesidades: número y extensión de las zonas de medida en el acuario. No obstante, debido a la dispersión y atenuación de la luz, para mediciones a mayor distancia (acuarios más grandes), pueden ser viables otros planteamientos; como por ejemplo, la medición utilizando técnicas reflexivas y/o la utilización de drivers pulsantes y emisores de mayor potencia.

Monitorización de especies mediante dispositivos de radiofrecuencia

El sistema que ha sido planteado permite la localización y seguimiento de especies en laboratorio mediante la utilización de lectores RFID. La propuesta no está ligada al tamaño del acuario, y dependiendo de las necesidades puede ser ampliado. Debido a que en la propuesta se utilizan lectores RFID comerciales, las prestaciones finales del sistema de medida están marcadas por las características de éstos.

La investigación y desarrollo de antenas y lectores RFID diseñados específicamente para estos entornos puede mejorar el alcance de la detección, permitiendo la utilización de tags más pequeños, y al mismo tiempo resolver los problemas asociados con su fijación (pérdida de alcance debido a la inclinación). Se requieren lectores y antenas pequeños con mayor potencia/alcance y directividad.

Monitorización de especies mediante dispositivos acústicos

Esta tecnología actualmente no se utiliza para el estudio de especies en acuarios, siendo ésta un área de investigación para la localización y seguimiento de especies en laboratorio, con mayor precisión, sencillez y menor coste que el planteamiento realizado con RFID.

Respecto a los trabajos realizados, una futura línea de investigación es el desarrollo y evaluación de los protocolos, técnicas y métodos en materia de comunicaciones acústicas en la plataforma de trabajo planteada. La instalación de un segundo prototipo en las instalaciones del observatorio OBSEA es una futura línea de actuación para la validación de las comunicaciones punto a punto de forma remota y en un ambiente real.

Otra línea de trabajo es el desarrollo de transmisores de pequeño tamaño apto para especies, y que implementen las propuestas planteadas. Su diseño puede iniciarse a partir de los trabajos referentes al diseño del transductor y a la propuesta hardware que se han presentado.

Otra área de trabajo abierta, aunque no asociada a la monitorización de especies, es la integración de las técnicas y tecnologías planteadas para el avance y progreso de las redes de sensores subacuáticos (UWSN).

5.4 Publicaciones

Las publicaciones derivadas de este trabajo de investigación son las siguientes:

5.4.1 Revistas indexadas

(Aguzzi et al., 2008a) Jacopo Aguzzi, David Sarriá, José Antonio García, Joaquín del Río, Francesc Sardà, and Antoni Mànuel. 2008. “A New Tracking System for the Measurement of Diel Locomotor Rhythms in the Norway Lobster, *Nephrops Norvegicus* (L).” *Journal of Neuroscience Methods* 173 (2) (August 30): 215–224. ISSN 0165–0270. doi:10.1016/j.jneumeth.2008.06.009.

Citado 17 veces. En *Journal Citation Reports Impact factor 2.092 37/65 Q3 Biochemical Research Methods*

(Aguzzi et al., 2011) Jacopo Aguzzi, Valerio Sbragaglia, David Sarriá, José Antonio García, Corrado Costa, Joaquín del Río, Antoni Mànuel, Paolo Menesatti, and Francesc Sardà. 2011. “A New Laboratory Radio Frequency Identification (RFID) System for Behavioural Tracking of Marine Organisms.” *Sensors* 11 (10) (January): 9532–9548. ISBN 1424–8220. Basel, Switzerland. doi:10.3390/s111009532.

Citado 6 veces. En *Journal Citation Reports Impact factor 1.739 14/58 Q1 Instruments & Instrumentation*

(Costa et al., 2012) Corrado Costa, Francesca Antonucci, Federico Pallottino, Jacopo Aguzzi, David Sarriá, and Paolo Menesatti. 2012. “A Review on Agri-Food Supply Chain Traceability by Means of RFID Technology.” *Food and Bioprocess Technology* 6 (2) (September 9): 353–366. ISSN 1935–5130. doi:10.1007/s11947-012-0958-7.

Citado 5 veces. En Journal Citation Reports Impact factor 4,115 6/124 Q1 Food and Bioprocess Technology

(Sbragaglia et al., 2013) Valerio Sbragaglia, Jacopo Aguzzi, José Antonio García, David Sarriá, Spartacus Gomáriz, Corrado Costa, Paolo Menesatti, M Vilaró, Antoni Mànuel, and Francesc Sardà. 2013. “An Automated Multi-Flume Actograph for the Study of Behavioural Rhythms of Burrowing Organisms.” *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 446: 177–185. ISSN 0022–0981. doi:10.1016/j.jembe.2013.05.018.

En Journal Citation Reports Impact factor 2,263 Q2 Marine&Freshwater Biology 27/100

5.4.2 Congresos

(Sarriá et al., 2007a) David Sarriá, Joaquín del Río, Antoni Mànuel, Jacopo Aguzzi, and Francesc Sardà. 2007. “Acquisition and Tracking System to Measure Emergence Activity Rhythms on *Nephrops Norvegicus* L. Population Assessment.” In 2nd International Symposium on Tagging and Tracking Marine Fish with Electronic Devices. San Sebastian, Spain.

(Sarriá et al., 2007b) David Sarriá, Joaquín del Río, Antoni Mànuel, Jacopo Aguzzi, José Antonio García, and Francesc Sardà. 2007. “Data and Image Acquisition System to Measure Emergence Activity Rhythms on *Nephrops Norvegicus* Population Assessment.” In 2nd International Workshop on Marine Technology, 105–106. ISSN 1886–4864. Vilanova i la Geltrú, Spain.

(Sarriá et al., 2008a) David Sarriá, Joaquín del Río, Antoni Mànuel, Jacopo Aguzzi, José Antonio García, and Francesc Sardà. 2008. “Actographic Detection System Based on Infrared and Computer Vision Technologies to Measure the Behaviour of Species.” In 16th IMEKO TC4 Symposium: Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements, ISBN 978–8–8903–1493–3. Florence, Italy. <http://hdl.handle.net/10261/20012>.

(Sarriá et al., 2008b) David Sarriá, Joaquín del Río, Antoni Mànuel, Jacopo Aguzzi, José Antonio García, and Francesc Sardà. 2008. “Infrared and Imaging Application to Measure Emergence Activity Rhythms on *Nephrops Norvegicus* (L.) Population Assessment.” In IEEE Sensors Applications Symposium, 74–78. ISBN 978–1–42441963–0. Atlanta, USA.

(Aguzzi et al., 2008b) Jacopo Aguzzi, Francesc Sardà, José Antonio García, David Sarriá, Joaquín del Río, and Antoni Mànuel. 2008. “The Measurement of Door-Keeping and Emergence Diel Rhythms in the Norway Lobster, *Nephrops Norvegicus* (L.) by a

New Tracking System.” In IX Colloquium Crustacea Decapoda Mediterranea. Vol. 2. Torino, Italy.

(Sarriá et al., 2009a) David Sarriá, Joaquín del Río, Antoni Mànuel, Xavier Roset, Jacopo Aguzzi, and Francesc Sardà. 2009. “A New Tracking System to Study the Behaviour of Species.” In XIX IMEKO World Congress, Fundamental and Applied Metrology, 1645–1648. ISBN 978–963–88410–0–1. Lisbon, Portugal.

(Sarriá et al., 2009b) David Sarriá, Joaquín Del Río, Antoni Mànuel, Jacopo Aguzzi, Francesc Sardà, and José Antonio García. 2009. “Studying the Behaviour of Norway Lobster Using RFID and Infrared Tracking Technologies.” In IEEE Oceans, ISBN 978–1–4244–2523–5. Bremen, Germany. doi:10.1109/OCEANSE.2009.5278280.

(Costa et al., 2011) Corrado Costa, Jacopo Aguzzi, Paolo Menesatti, Antoni Mànuel, Clara Boglione, David Sarriá, José Antonio García, et al. 2011. “Versatile Application of RFID Technology to Commercial and Laboratory Research Contexts : Fresh Fish Supply-Chain and Behavioural Tests.” In 4th International Workshop on Marine Technology, 48. ISSN 1886–4864. Cádiz, Spain.

(Sarriá et al., 2011a) David Sarriá, Erik Molino, Antoni Mànuel, Albert Garcia-Benadí, Guiomar Rotllant, Enric Gisbert, Francesc Sardà, Jacopo Aguzzi, and Valerio Sbragaglia. 2011. “Monitoring Species in Artificial Reefs Using Acoustic Communications.” In 4th International Workshop on Marine Technology, 59. ISSN 1886–4864. Cádiz, Spain.

(Sarriá et al., 2011b) David Sarriá, Erik Molino, Joaquín del Río, Antoni Mànuel, Francesc Sardà, Jacopo Aguzzi, and Guiomar Rotllant. 2011. “Monitoring Species Using Acoustic Communications.” In IEEE Oceans, ISBN 978–1–4577–0086–6. Santander, Spain.

(Sbragaglia et al., 2011a) Valerio Sbragaglia, Jacopo Aguzzi, José Antonio García, Juan José Chiesa, David Sarriá, Antoni Mànuel, Joaquín del Río, and Francesc Sardà. 2011. “Inter-Individual and Depth-Related Variability of Nephrops Norvegicus Biological Rhythms and Implications on Its Population Assessment.” In World Conference on Marine Biodiversity, 153. Aberdeen, UK.

(Sbragaglia et al., 2011b) Valerio Sbragaglia, Jacopo Aguzzi, José Antonio García, Juan José Chiesa, David Sarriá, Antoni Mànuel, Joaquín del Río, and Francesc Sardà. 2011. “Inter-Individual and Depth-Related Variability of Nephrops Norvegicus Biological Rhythms and Its Implications on in Stock Assessment.” In XI Latin American Symposium of Chronobiology. Cholula, Puebla, Mexico.

(Sbragaglia et al., 2011c) Valerio Sbragaglia, Jacopo Aguzzi, José Antonio García, Juan José Chiesa, David Sarriá, Antoni Mànuel, Francesc Sardà, and Corrado Costa. 2011. “Behavioural Phenotype Plasticity in the Norway Lobster, *Nephrops Norvegicus* (L.), by New Actigraphic Methods.” In ASAB Easter Conference, 29. Cambridge, UK.

(Sarriá et al., 2012a) David Sarriá, Erik Molino, and Antoni Mànuel. 2012. “Acoustic Telemetry System for Underwater Sensors.” In IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2604–2607. ISBN 978–1–4577–1771–0. Graz, Austria.

(Pallarés et al., 2013) Oriol Pallarés, David Sarriá, Carlos Viñolo, Joaquín del Río, and Antoni Mànuel. 2013. “Preliminary OFDM Based Acoustic Communication for Underwater Sensor Networks Synchronization.” OCEANS - Bergen, 2013 MTS/IEEE. Bergen, Norway. doi:10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608057.

(Sarriá et al., 2013) David Sarriá, Oriol Pallarés, Joaquín del Río, and Antoni Mànuel. 2013. “Low Cost OFDM Based Transmitter for Underwater Acoustic Communications.” In OCEANS - Bergen, 2013 MTS/IEEE, 1–4. ISBN 978–1–4799–0000–8. Bergen, Norway. doi:10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608135.

5.4.3 Revistas de divulgación

(Sarriá & del Río 2009) David Sarriá & Joaquín del Río. 2009. “Monitorización de Especies Marinas Con LabVIEW.” Foro Tecnológico Sobre Diseño Gráfico de Sistemas, NI-Days Magazine: 42–46. <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-11714>.

(Sarriá et al., 2009c) David Sarriá, Joaquín del Río, Antoni Mànuel, Jacopo Aguzzi, and Francesc Sardà. 2009. “RFID Tracking System to Study the Behaviour of Species.” Instrumentation Viewpoint (7): 7. ISSN 1886–4864.

(Aguzzi et al., 2009) Jacopo Aguzzi, Francesc Sardà, José Antonio García, Corrado Costa, Paolo Menesatti, David Sarriá, Joaquín del Río, and Antoni Mànuel. 2009. “Quando Acquistare Lo Scampo.” EuroFishmarket Magazine 2: 62–66. ISBN 1974–3084. Milano, Italy.

(Sarriá et al., 2010) David Sarriá, Antoni Mànuel, Joaquín del Río, Erik Molino, Francesc Sardà, Jacopo Aguzzi, and Guiomar Rotllant. 2010. “Species Habits Observation Using Acoustic Techniques.” Instrumentation Viewpoint (10): 17. ISSN 1886–4864.

(Sarriá & Molino 2011) David Sarriá & Erik Molino. 2011. “Design of an Acoustic Transmitter for Marine Applications.” Instrumentation Viewpoint (12): 13. ISBN 1886–4864.

(Sarriá et al., 2012b) David Sarriá, Oriol Pallarés, and Antoni Mànuel. 2012. “Low-Cost Acoustic Transmitter for Underwater Sensor Networks.” Instrumentation Viewpoint (13): 20. ISSN 1886–4864.

5.4.4 Publicaciones derivadas

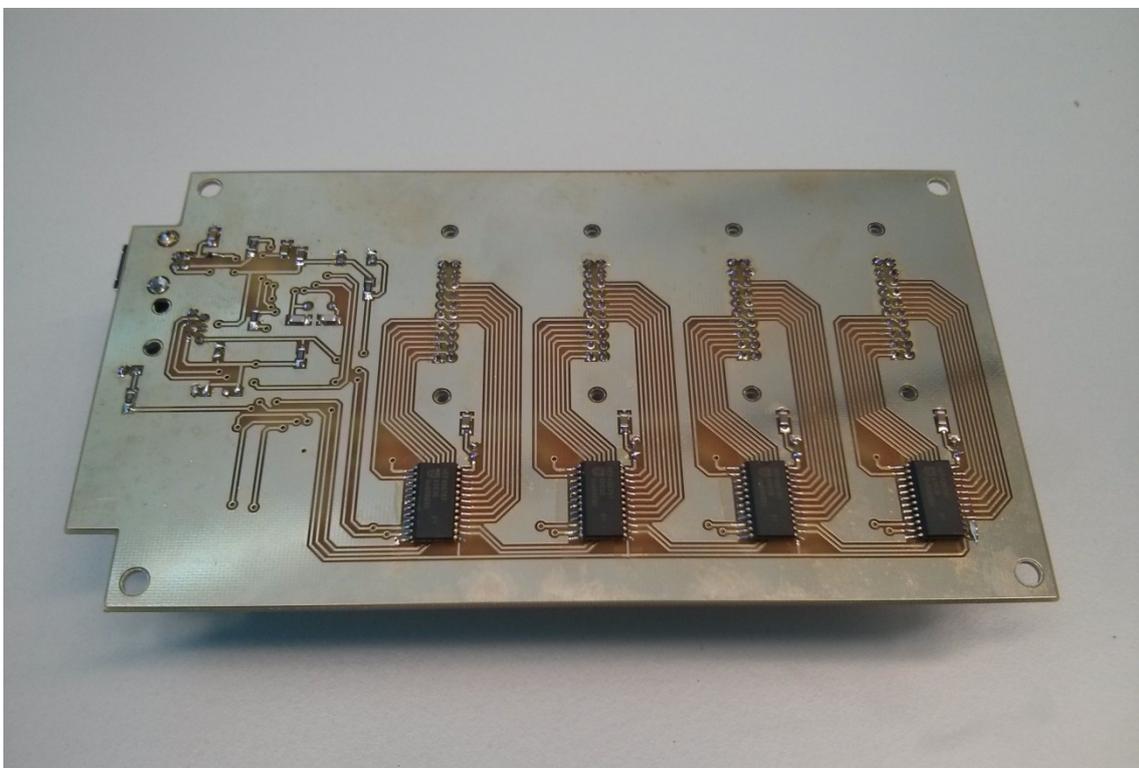
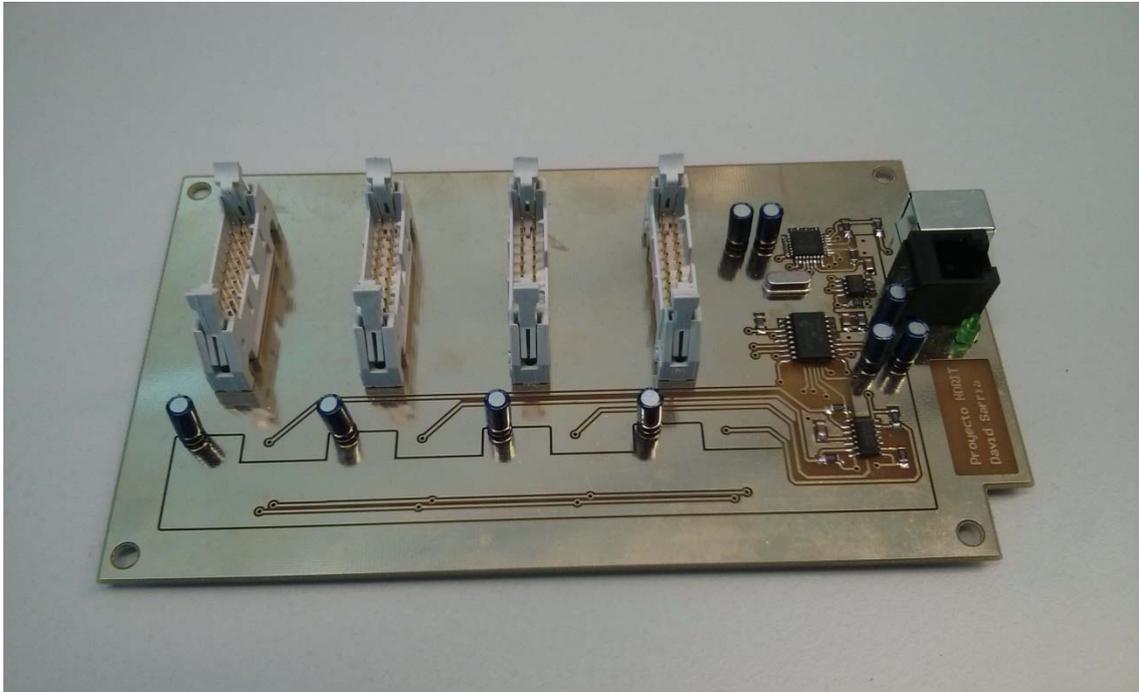
(Sarriá et al., 2012c) David Sarriá, Spartacus Gomáriz, Carla Artero, Antoni Mànuel, Jacopo Aguzzi, Valerio Sbragaglia, José Antonio García, and Francesc Sardà. 2012. “A Novel Day-Night and Tide Simulating Video-Actographic System for Studying the Behaviour of Nephrops Norvegicus (crustacea Decapoda).” In 10th Colloquium Crustacea Decapoda Mediterranea (CCDM), 142. Athens, Greece.

(Sbragaglia et al., 2012a) Valerio Sbragaglia, Jacopo Aguzzi, José Antonio García, David Sarriá, Corrado Costa, Paolo Menesatti, Francesc Sardà, et al. 2012. “Hydrodynamic Entreinment of Behavioural Rhythms in the Deep Sea Benthic Organism: Nephrops Norvegicus (crustacea: Decapoda) as a Model.” In 10th Colloquium Crustacea Decapoda Mediterranea (CCDM), 120. Athens, Greece.

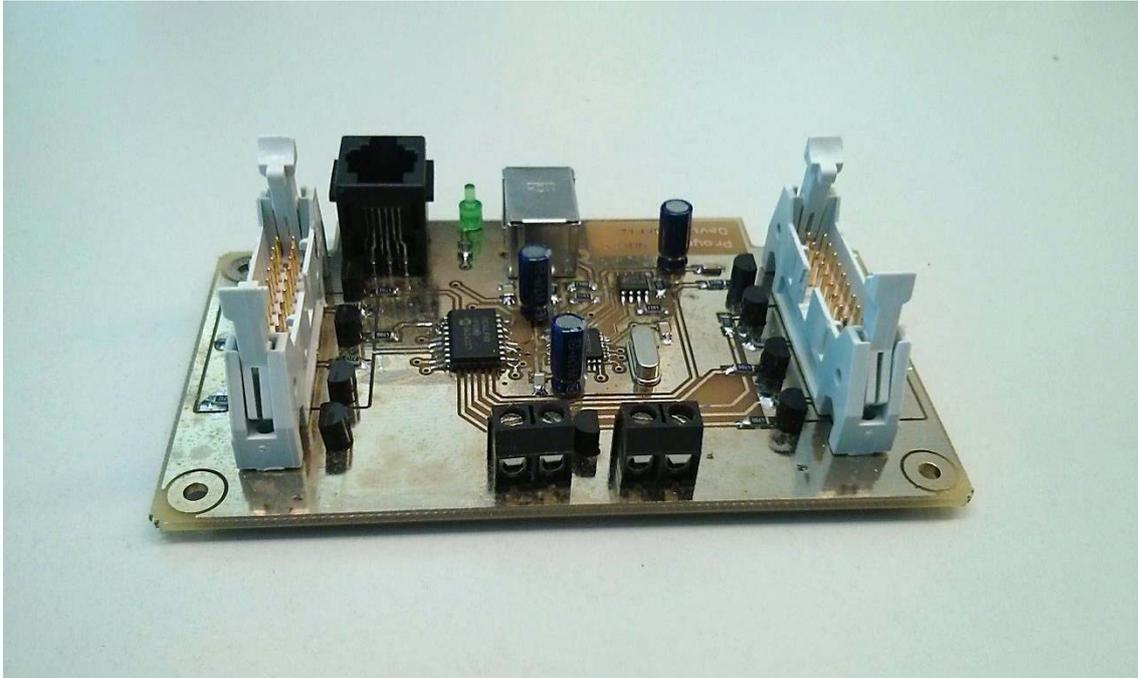
(Sbragaglia et al., 2012b) Valerio Sbragaglia, Jacopo Aguzzi, José Antonio García, M Vilaró, Francesc Sardà, David Sarriá, Spartacus Gomáriz, Antoni Mànuel, Corrado Costa, and E Ramírez-Llodra. 2012. “Simulated Deep-Sea Hydrodynamic Benthic Regimes Modulate Nephrops Norvegicus Burrow Emergence.” In Deep-Sea Biology Symposium, 238. Wellington, New Zealand.

Anexo A

En este anexo se presentan los desarrollos relacionados con el capítulo de monitorización de especies mediante dispositivos ópticos.



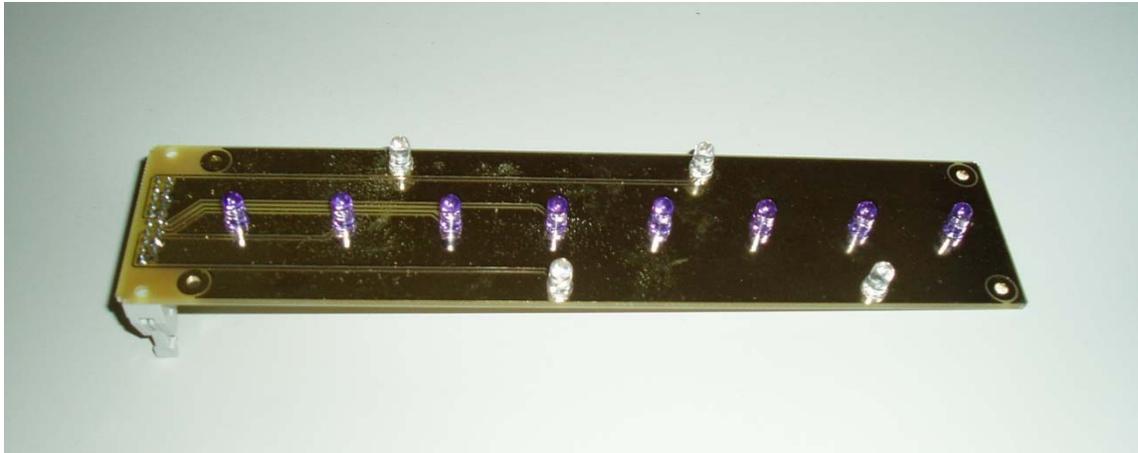
Anexo A.1 Sistema de adquisición.



Anexo A.2 Sistema de iluminación.



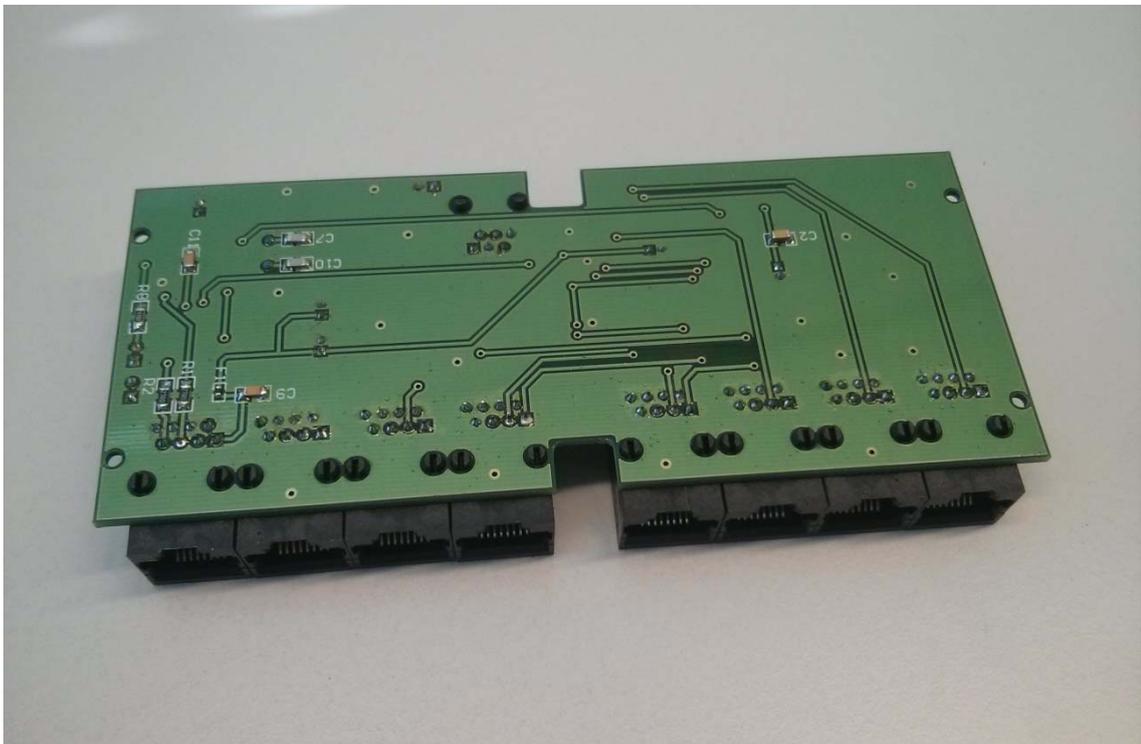
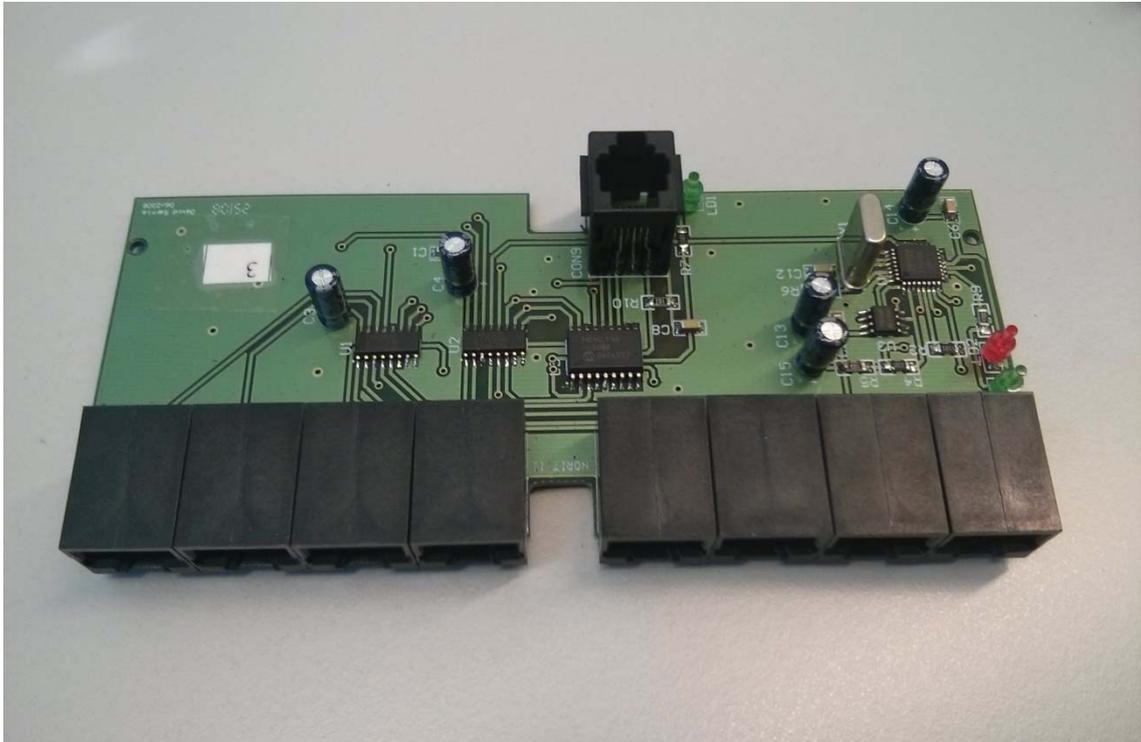
Anexo A.3 Barrera con los receptores de infrarrojos.



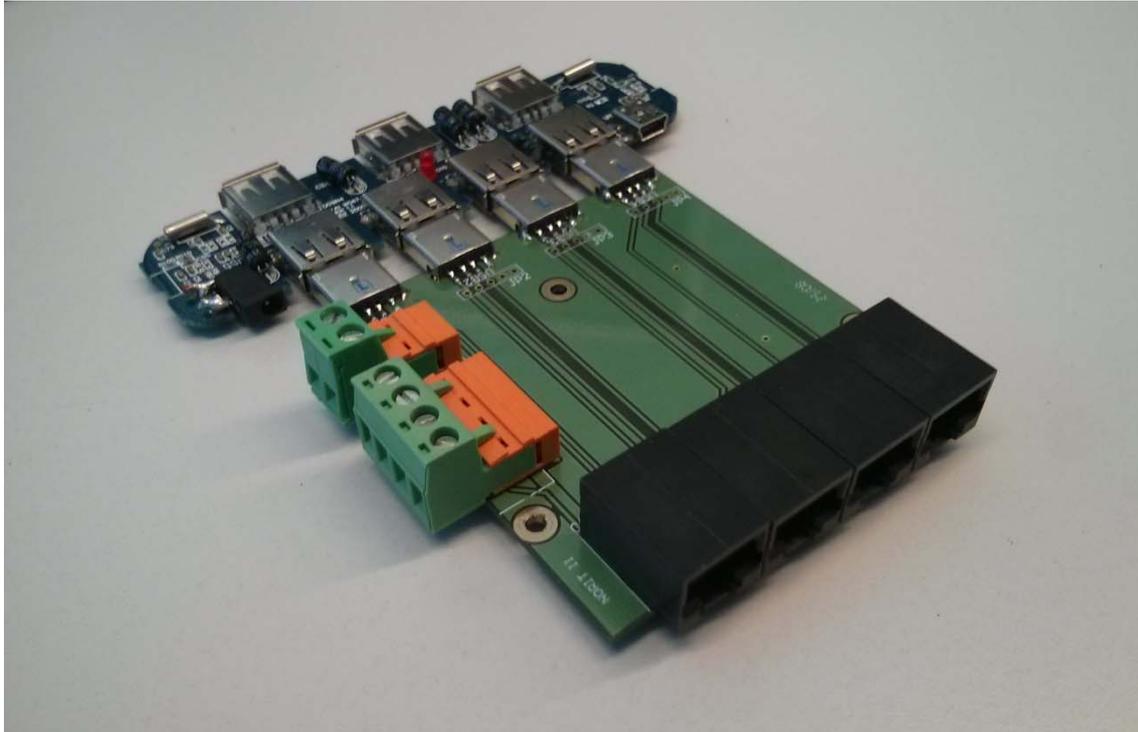
Anexo A.4 Barreras con los emisores de infrarrojos y los leds azules.

Anexo B

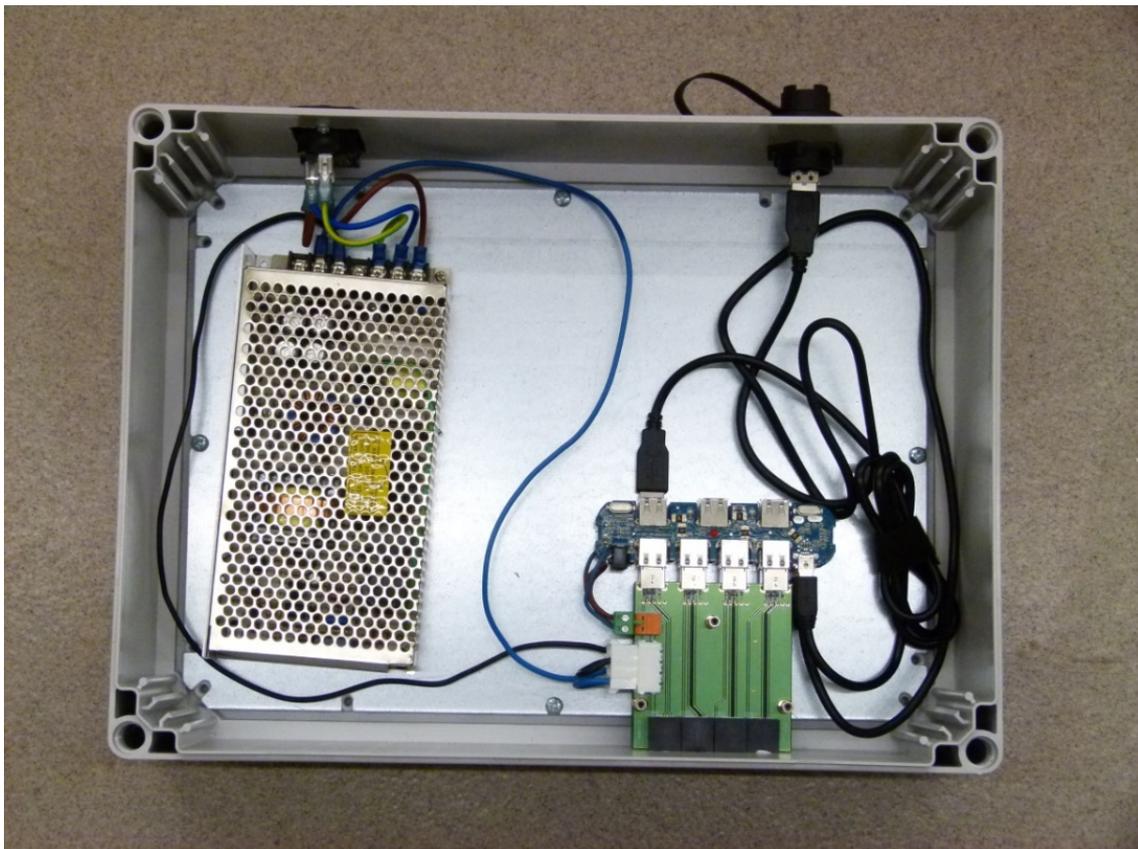
En este anexo se presentan los desarrollos relacionados con el capítulo de monitorización de especies mediante dispositivos de radiofrecuencia.



Anexo B.1 Controlador de lectores RFID.



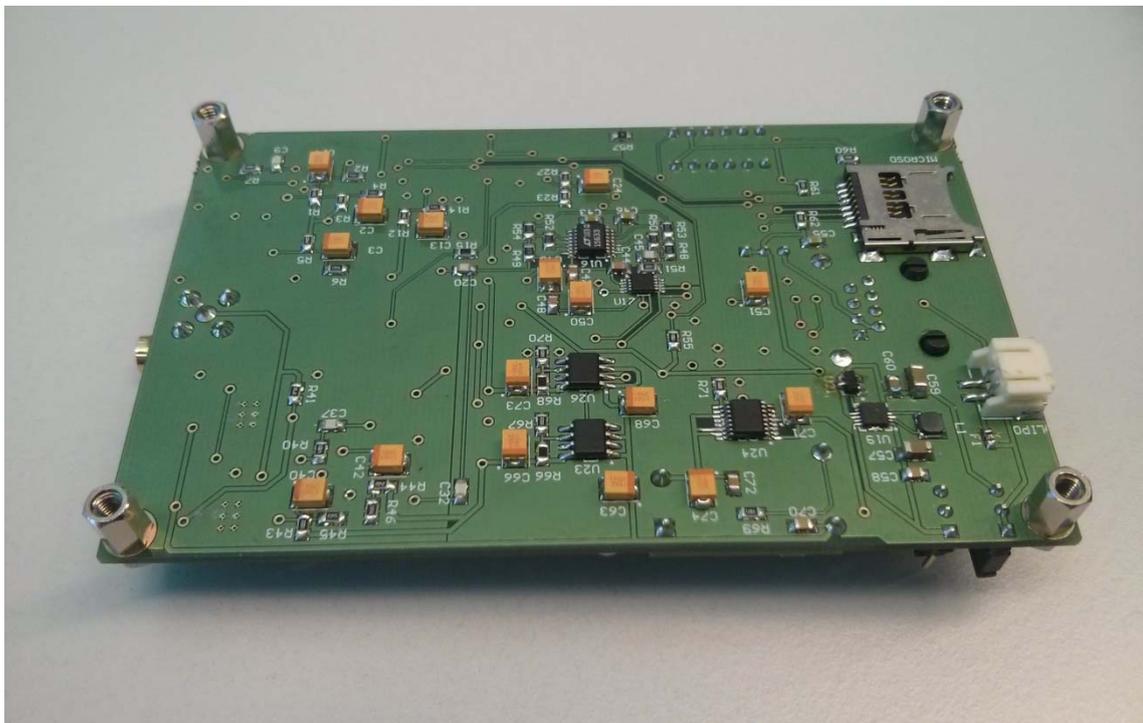
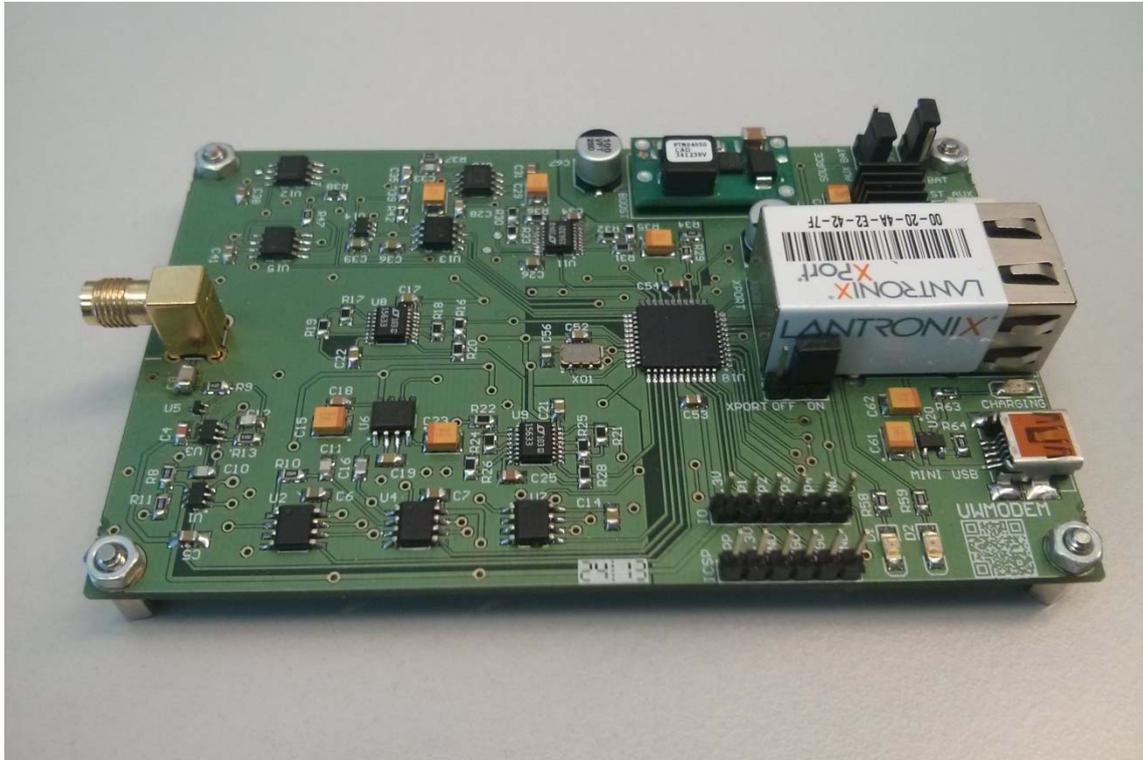
Anexo B.2 Placa de conexiones del sistema de alimentación y comunicaciones.



Anexo B.3 Sistema de alimentación y comunicaciones, compuesto por una fuente de alimentación de 100 W, dos concentradores y dos placas de conexiones, soportando hasta 8 controladores, es decir, 56 lectores RFID.

Anexo C

En este anexo se presenta la plataforma de comunicación acústica planteada en el capítulo de monitorización de especies mediante dispositivos acústicos.



Anexo C.1 Prototipo del sistema de comunicaciones acústico.

Bibliografía

- Aguzzi, J., Costa, C., Fujiwara, Y., Iwase, R., Ramirez-Llorda, E., & Menesatti, P. (2009). A novel morphometry-based protocol of automated video-image analysis for species recognition and activity rhythms monitoring in deep-sea fauna. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *9*(11), 8438–55. Molecular Diversity Preservation International. Retrieved February 5, 2014, from <http://www.mdpi.com/1424-8220/9/11/8438>
- Aguzzi, J., Costa, C., Menesatti, P., García, J. A., Chiesa, J. J., & Sardà, F. (2009). Monochromatic blue light entrains diel activity cycles in the Norway lobster, *Nephrops norvegicus* (L.) as measured by automated video-image analysis. *Scientia Marina*, *73*(4), 773–783. Retrieved February 11, 2014, from <http://scientiamarina.revistas.csic.es/index.php/scientiamarina/article/view/1102/1145>
- Aguzzi, J., Costa, C., Menesatti, P., Mànuel, A., del Río, J., García, J. A., Fujiwara, Y., et al. (2013, September 13). Potential applications of automated video-image analysis in the pelagic and demersal environment including the deep-sea. Retrieved February 5, 2014, from <http://hdl.handle.net/10261/81972>
- Aguzzi, J., Mànuel, A., Condal, F., Guillén, J., Nogueras, M., del Río, J., Costa, C., et al. (2011). The new Seafloor Observatory (OBSEA) for remote and long-term coastal ecosystem monitoring. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *11*(6), 5850–72. Retrieved February 5, 2014, from <http://upcommons.upc.edu/e-prints/handle/2117/12706>
- Aguzzi, J., Sardà, F., Abelló, P., Company, J., & Rotllant, G. (2003). Diel and seasonal patterns of *Nephrops norvegicus* (Decapoda: Nephropidae) catchability in the western Mediterranean. *Marine Ecology Progress Series*, *258*, 201–211. Inter Research. Retrieved February 12, 2014, from <http://hdl.handle.net/10261/40529>
- Akyildiz, I. F., Pompili, D., & Melodia, T. (2005). Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, *3*(3), 257–279. Retrieved January 21, 2014, from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1570870505000168>
- Alcocer, A., Oliveira, P., & Pascoal, A. (2007). Study and implementation of an EKF GIB-based underwater positioning system. *Control Engineering Practice*, *15*(6), 689–701. Retrieved February 12, 2014, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066106000797>
- André, M., Solé, M., Lenoir, M., Durfort, M., Quero, C., Mas, A., Lombarte, A., et al. (2011). Low-frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *9*(9), 489–493. Ecological Society of America. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1890/100124>

Bibliografía

- Aparicio, J., García, E., Jiménez, A., Álvarez, F., & Ureña, J. (n.d.). Modelos de Propagación de Señales Acústicas en Entornos Subacuáticos. Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá. Departamento de Ing. Eléctrica, Electrónica y Automática, Universidad de Extremadura.
- Au, W. W. L. (2004). Echolocation signals of wild dolphins. *Acoustical Physics*, 50(4), 454–462. Nauka/Interperiodica. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1134/1.1776224>
- Axelson, J. (2005). *USB complete: everything you need to develop custom USB peripherals* (3rd ed., p. 572). Madison, Lakeview Research.
- Bahamon, N., Sarda, F., & Aguzzi, J. (2009). Fuzzy diel patterns in catchability of deep-water species on the continental margin. *ICES Journal of Marine Science*, 66(10), 2211–2218. Retrieved February 7, 2014, from <http://icesjms.oxfordjournals.org/cgi/content/long/66/10/2211>
- Bailey, D. M., King, N. J., & Priede, I. G. (2007). Cameras and carcasses: historical and current methods for using artificial food falls to study deep-water animals. *Marine Ecology Progress Series*, 179–191.
- Baine, M. (2001). Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance. *Ocean & Coastal Management*, 44(3-4), 241–259. Retrieved February 12, 2014, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569101000485>
- Barlow, J., Rankin, S., & Dawson, S. (2008). A guide to constructing hydrophones and hydrophones arrays for monitoring marine mammal vocalizations. *NOAA Technical Memorandum*, (NOAA-TM-NMFS-SWFSC-417).
- Benson, B., Li, Y., Kastner, R., Faunce, B., Domond, K., Kimball, D., & Schurgers, C. (2010). Design of a low-cost, underwater acoustic modem for short-range sensor networks. *Oceans'10 Ieee Sydney*, 1–9. Ieee. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5603816>
- Beumer, J. P., Grant, A., & Smith, D. C. (2003). *Aquatic Protected Areas: What Works Best and How Do We Know?: World Congress on Protected Areas. Cairns, Australia, August 2002*. Australian Society for Fish Biology. Retrieved from http://books.google.es/books?id=9_NEAAAAYAAJ
- Biomark. (2014). Biomark :: Biomark | Specialists in Electronic Identification. Retrieved February 6, 2014, from <http://www.biomark.com/>
- Bmds. (2014). Lab Animal Identification - Bio Medic Data Systems. Retrieved February 6, 2014, from <http://www.bmds.com/>

- Bradley, E. S., & Clarke, K. C. (2011). Outdoor webcams as geospatial sensor networks: challenges, issues and opportunities. *Cartography and Geographic Information Science*, 38(1), 3–19. Taylor & Francis.
- Brekhovskikh, L. M., & Lysanov, I. (1982). *Fundamentals of ocean acoustics*. Springer.
- Bridger, B. C. J., Booth, R. K., Mckinley, R. S., Scruton, D. A., & Lindstrom, R. T. (2001). Monitoring fish behaviour with a remote, combined acoustic / radio biotelemetry system, 17, 1999–2002.
- Butler, J. A. (1990). *Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas: manual introductorio* (p. 212). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Retrieved from <http://books.google.es/books?id=VK68AAAACAAJ>
- Butler, L. (1987). Underwater Radio Communication. *Amateur Radio*, (April), 1–8.
- Caley, M., & Duncan, A. (2013). Multi-path doppler and delay spreading in a shallow marine environment. *Acoustics Australia*, 41.
- Carr, J. J. (1992). NE602 Primer. *Elektor Electronics*, 79–85.
- Center, N. U. S. (1990). *Acoustic Measurements for Sonar Transducer Test Personnel* (p. 197). New London, Connecticut.
- Centre, F. (2000). *Fisheries Centre Research Reports*. Fisheries Centre, University of British Columbia. Retrieved from <http://books.google.es/books?id=m8AaAQAAIAAJ>
- Centre, W. T., Newburgh, W., & Park, I. (2004). A cross-river antenna array for the detection of miniature passive integrated transponder tags in deep , fast flowing rivers, 44, 1441–1443.
- Chapman, C. J., & Howard, F. G. (1979). Field observations on the emergence rhythm of the Norway lobster *Nephrops norvegicus*, using different methods. *Marine Biology*, 51(2), 157–165. Springer-Verlag. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/BF00555195>
- Chapman, C. J., & Rice, A. L. (1971). Some direct observations on the ecology and behaviour of the Norway lobster *Nephrops norvegicus*. *Marine Biology*, 10(4), 321–329. Springer-Verlag. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/BF00368092>
- Christensen, V., & Pauly, D. (1992). ECOPATH II — a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics. *Ecological Modelling*, 61(3-4), 169–185. Retrieved February 12, 2014, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304380092900168>

Bibliografia

- Columbus. (2014). Columbus Instruments International. Retrieved February 5, 2014, from <http://www.colinst.com/>
- Coml. (2014). Census of Marine Life. Retrieved February 12, 2014, from <http://www.coml.org/>
- Cordesses, L. (2004). Direct digital synthesis: a tool for periodic wave generation (part 1). *Signal Processing Magazine, IEEE*, 21(4), 50–54.
- Datasci. (2014). Datasci. Retrieved February 6, 2014, from <http://www.datasci.com/>
- Davis, D. L., & Pilkahn, C. H. (n.d.). Measurements with underwater video: camera field width calibration and structured lighting. *Marine Technology Society Journal*, 26(4), 13–19. Marine Technology Society. Retrieved February 5, 2014, from <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=4674453>
- Delauney, L., Compère, C., & Lehaitre, M. (2013). Biofouling protection for marine underwater observatories sensors. *Oceans 2009*, (May 2009), 1–4.
- Del Río, J. (2011). *Aportaciones a la interoperabilidad en las redes de sensores aplicación a la monitorización submarina*. Universitat Politècnica de Catalunya. Retrieved January 30, 2014, from http://cataleg.upc.edu/record=b1394074~S1*cat
- Denbigh, P. N., & Weintroub, J. (1987). Fish Stock Assessment by a Statistical Analysis of Echo Sounder Signals. In H. Merklinger (Ed.), *Progress in Underwater Acoustics SE - 13* (pp. 103–112). Springer US. Retrieved from http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4613-1871-2_13
- Devices, A. (1999). A technical tutorial on digital signal synthesis. *Application Note*, 1–122. Retrieved February 12, 2014, from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:A+Technical+Tutorial+on+Digital+Signal+Synthesis#0>
- Downing, S. L., Prentice, R. W., Frazier, J. E., Simonson, and E. P. N. (2001). Technology Developed for Diverting Passive Integrated Transponder (PIT) Tagged Fish at Hydroelectric Dams in the Columbia River Basin. *Aquacultural Engineering*, 25, 149–164.
- Duffey, E. (1997). Spider adaptation to artificial biotopes: the fauna of percolating filter beds in a sewage treatment works. *Journal of applied ecology*, 34(5), 1190–1202. Blackwell. Retrieved February 12, 2014, from <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=2056822>
- Dutoit, T., Kandia, V., & Stylianou, Y. (2009). How can marine biologists track sperm whales in the oceans? *Applied Signal Processing SE - 6* (pp. 187–222). Springer US. Retrieved from http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-74535-0_6

- Erol-kantarci, M., & Mouftah, H. T. (2010). Localization Techniques for Underwater Acoustic Sensor Networks, (December), 152–158.
- Fao. (2014). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved February 12, 2014, from <http://www.fao.org/home/en/>
- Fenberg, P. B., Caselle, J. E., Claudet, J., Clemence, M., Gaines, S. D., Antonio García-Charton, J., Gonçalves, E. J., et al. (2012). The science of European marine reserves: Status, efficacy, and future needs. *Marine Policy*, *36*(5), 1012–1021. Retrieved January 20, 2014, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X12000383>
- Fifield, J. M. (2000). *A Software Defined OFDM Modulator*. University of Michigan.
- Finkenzeller, K., & Waddington, R. (1999). *RFID handbook: radio-frequency identification fundamentals and applications*. Wiley New York.
- Freitag, L., Grund, M., Singh, S., Partan, J., Koski, P., & Ball, K. (2005). The WHOI micro-modem: an acoustic communications and navigation system for multiple platforms. *OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE* (pp. 1086–1092 Vol. 2).
- Freitas, R., Ricardo, F., Pereira, F., Sampaio, L., Carvalho, S., Gaspar, M., Quintino, V., et al. (2011). Benthic habitat mapping: Concerns using a combined approach (acoustic, sediment and biological data). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *92*(4), 598–606. Elsevier Ltd. Retrieved February 12, 2014, from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272771411000813>
- FTDI. (2010). FT232R Data Sheet. Retrieved January 12, 2014, from http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf
- FTDI. (2013a). Future Technology Devices International Ltd. Retrieved January 12, 2014, from <http://www.ftdichip.com>
- FTDI. (2013b). FTDI Utilities. Retrieved January 12, 2014, from <http://www.ftdichip.com/Support/Utilities.htm>
- Geographic, N. (2014). Crittercam, Photos, Videos, Wildlife -- National Geographic. Retrieved February 6, 2014, from <http://animals.nationalgeographic.com/animals/crittercam/>
- George, J. D., Lythgoe, G. I., & Lythgoe, J. N. (1985). *Underwater photography and television for scientists*. Clarendon Press. Retrieved from <http://books.google.es/books?id=j24ZAQAIAAJ>

Bibliografia

- Gordon, J., & Tyack, P. (2001). Acoustic Techniques for Studying Cetaceans. In P. H. Evans & J. Raga (Eds.), *Marine Mammals SE - 8* (pp. 293–324). Springer US. Retrieved from http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-0529-7_8
- Heidemann, J., Wills, J., & Syed, a. (2006). Research challenges and applications for underwater sensor networking. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006.*, 228–235. Ieee. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1683469>
- Heymans, J. J., Coll, M., Libralato, S., & Christensen, V. (2011). *Treatise on Estuarine and Coastal Science. Treatise on Estuarine and Coastal Science* (pp. 93–113). Elsevier. Retrieved February 12, 2014, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123747112009050>
- Hoenner, X., Whiting, S. D., Hindell, M. A., & McMahon, C. R. (2012). Enhancing the Use of Argos Satellite Data for Home Range and Long Distance Migration Studies of Marine Animals. *PLoS ONE*, 7(7), e40713. Public Library of Science. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0040713>
- Htisonar. (2014). Acoustic Telemetry for Fisheries Research. Retrieved February 3, 2014, from http://www.htisonar.com/acoustic_tags.htm
- Huang, J., Zhou, S., & Willett, P. (2008). Nonbinary LDPC Coding for Multicarrier Underwater Acoustic Communication. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 26(9), 1684–1696.
- IEEE. (2012). IEEE 802.3 Ethernet. Retrieved January 12, 2014, from <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.3.html>
- IPSO. (2014). State of Ocean. Retrieved February 11, 2014, from <http://www.stateoftheocean.org/>
- ISO 20473. (2007). Optics and photonics - Spectral bands. *ISO 20473*. ISO, Geneva, Switzerland.
- J., C. B., Smith, S. J., Lawton, P., & Anderson, J. T. (2011). Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92(3), 502–520. Elsevier Ltd. Retrieved January 20, 2014, from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272771411000485>
- Jamieson, A. J., Fujii, T., Solan, M., & Priede, I. G. (2009). HADEEP: Free-Falling Landers to the Deepest Places on Earth. *Marine Technology Society Journal*, 43, 151–160.

- Jepsen, N., Koed, A., Thorstad, E., & Baras, E. (2002). Surgical implantation of telemetry transmitters in fish: how much have we learned? In E. Thorstad, I. Fleming, & T. Næsje (Eds.), *Aquatic Telemetry SE - 28* (Vol. 165, pp. 239–248). Springer Netherlands. Retrieved from http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-0771-8_28
- Jepsen, N., Schreck, C., Clements, S., Thorstad, E. B., & others. (2005). A brief discussion on the 2% tag/bodymass rule of thumb. *Aquatic telemetry: advances and applications, FAO/COISPA, Rome*, 255–261.
- Jing-wei, Y. I. N., Sen, Y., Dan-dan, Y. A. O., & Xiao, Z. (2010). Study of underwater acoustic communication based on vector Pattern time delay shift coding * Abstract :, (60802060), 1–6.
- Jones, P. J. S., Qiu, W., & De Santo, E. M. (2013). Governing marine protected areas: Social–ecological resilience through institutional diversity. *Marine Policy*, *41*, 5–13. Retrieved January 23, 2014, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X12002679>
- Joshi, A., Naga VishnuKanth, I., Samdaria, N., Bagla, S., & Ranjan, P. (2008). GPS-less animal tracking system. *2008 Fourth International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks*, 120–125. Ieee. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4772694>
- Kaemingk, M. a., Weber, M. J., McKenna, P. R., & Brown, M. L. (2011). Effect of Passive Integrated Transponder Tag Implantation Site on Tag Retention, Growth, and Survival of Two Sizes of Juvenile Bluegills and Yellow Perch. *North American Journal of Fisheries Management*, *31*(4), 726–732. Retrieved February 12, 2014, from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02755947.2011.611863>
- Kebes. (2008). Optical Absorption of Water Compendium. Retrieved from <http://omlc.ogi.edu/spectra/water/abs/index.html>
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (1999). *Fundamentals of acoustics. Fundamentals of Acoustics, 4th Edition, by Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, pp. 560. ISBN 0-471-84789-5. Wiley-VCH, December 1999.* (Vol. 1, p. 560).
- Kjaer, B. &. (2014). Product data. Retrieved from www.bksv.com
- Kramer K, K. L. (2003). Evaluation and applications of radiotelemetry in small laboratory animals. *Physiol Genomics*, *13*(3), 197–205.
- Kumar, P. (2013). Performance evaluation of modified OFDM for underwater communications. *Communications Workshops (ICC), 2013 IEEE International Conference on* (pp. 967–971).

Bibliografia

- Li, B., Zhou, S., Stojanovic, M., Freitag, L., & Willett, P. (2007). Non-Uniform Doppler Compensation for Zero-Padded OFDM over Fast-Varying Underwater Acoustic Channels. *OCEANS 2007 - Europe* (pp. 1–6).
- López, À. (2008). El radioseguiment a les illes Medes. *Omnis Cellula*, ISSN 1696-8107.
- Lotek. (2014). Radio, Acoustic, Satellite & Archival Telemetry Solutions. Retrieved February 6, 2014, from <http://www.lotek.com/>
- Mangos, A., Bassino, J.-P., & Sauzade, D. (2010). The economic value of sustainable benefits rendered by the mediterranean marine ecosystems. *Plan Bleu. UNEP/MAP Regional Activity Centre. ISBN 978-2-912081-26-1*, (July).
- Marshall, G. J. (1998). Crittercam: An animal-borne imaging and data logging system. *Marine Technology Society journal*, 32(1), 11–17. Marine Technology Society. Retrieved February 5, 2014, from <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=1580044>
- Matsuoka, H., Nakashima, Y., & Yoshimura, T. (2008). Acoustic OFDM system and its extension. *The Visual Computer*, 25(1), 3–12. Retrieved February 12, 2014, from <http://link.springer.com/10.1007/s00371-008-0281-5>
- Michael AC, B. L. (2007). *Electrochemical Methods for Neuroscience* (p. 544). CRC Press.
- Microchip. (2003). Antenna Circuit Design for RFID Applications. *Design, Rfid Antenna*, 1–50.
- Microchip. (2009). *Compiled Tips 'N Tricks Guide* (DS01146B ed., p. 137). Microchip Technology Inc. Retrieved from <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/01146B.pdf>
- Minimitter. (2014). Mini Mitter, Respiration, activity, temperature, animal monitoring. Retrieved February 6, 2014, from <http://www.minimitter.com/>
- Mohenshi P, Naja K, Eliades S, W. X. (2005). Wireless multichannel biopotential recording using an integrated FM telemetry circuit. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 13, 263–271.
- Nakashima, Y., Matsuoka, H., & Yoshimura, T. (2006). Evaluation and Demonstration of Acoustic OFDM. *Signals, Systems and Computers, 2006. ACSSC '06. Fortieth Asilomar Conference on* (pp. 1747–1751).
- Newland, P. L., Chapman, C. J., & Neil, D. M. (1988). Swimming performance and endurance of the Norway lobster *Nephrops norvegicus*. *Marine Biology*, 98(3), 345–350.

- NI. (2010). Can I Acquire From Multiple USB Cameras Simultaneously Using IMAQdx? - National Instruments. Retrieved January 12, 2014, from <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/D13527D8471D5FC5862576A4006BD081>
- NOAA. (2014). What percentage of life is estimated to be in the ocean? Retrieved February 12, 2014, from <http://www.noaa.gov>
- Nogueras, M., Artero, C., del Río, J., Mánuel, A., & Sarriá, D. (2009). Control and acquisition system design for an Expandable Seafloor Observatory (OBSEA). *IEEE Oceans* (pp. ISBN 978-1-4244-2522-8). Bremen, Germany. Retrieved January 7, 2014, from <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5278330>
- Nunnallee, E. P., Prentice, E. F., Jonasson, B. F., & Patten, W. (1998). Evaluation of a flat-plate PIT tag interrogation system at Bonneville Dam. *Aquacultural Engineering*, 17(4), 261–272. Retrieved February 12, 2014, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860998000168>
- Obsea. (2014). Obsea. Retrieved from www.obsea.es
- Oceana. (2014). Oceana. Retrieved February 12, 2014, from <http://oceana.org/es/eu/portada>
- Ospar. (2014). OSPAR Commission. *Marine Ecology Progress Series*. Retrieved February 12, 2014, from <http://www.ospar.org/welcome.asp?menu=0>
- Palou, G. (2009). *Underwater Acoustic MIMO OFDM: An experimental analysis*. Massachusetts Institute of Technology.
- Pałucha-Poniewiera, A., Brański, P., Lenda, T., & Pilc, A. (2010). The antidepressant-like action of metabotropic glutamate 7 receptor agonist N,N'-bis(diphenylmethyl)-1,2-ethanediamine (AMN082) is serotonin-dependent. *The Journal of pharmacology and experimental therapeutics*, 334(3), 1066–74. Retrieved February 12, 2014, from <http://jpet.aspetjournals.org/cgi/content/long/334/3/1066>
- Pegau, W. S., Gray, D., & Zaneveld, J. R. V. (1997). Absorption and attenuation of visible and near-infrared light in water: dependence on temperature and salinity. *Applied Optics*, 36(24), 6035–6046. OSA. Retrieved February 2, 2014, from <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-36-24-6035>
- Perez, R. E. (2008). *Examination of the Effects of Localized Electric Signals on the Inhibition of Undesired Biological Adhesion*. (T. U. of W.- Madison, Ed.) (p. 105). ProQuest.
- Plocan. (2014). Plataforma Oceánica de Canarias - Últimas Noticias. Retrieved February 12, 2014, from <http://www.plocan.eu/>

Bibliografía

- Popper, A. N. (2003). Effects of Anthropogenic Sounds on Fishes. *Fisheries*, 28(10), 24–31. Taylor & Francis. Retrieved February 7, 2014, from [http://dx.doi.org/10.1577/1548-8446\(2003\)28\[24:EOASOF\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1577/1548-8446(2003)28[24:EOASOF]2.0.CO;2)
- Prentice, E. F., T. A. Flagg, and C. S. M. (1990). Fish-marking techniques. *Electronic tags* (pp. 317–322). Fish-marking techniques. American Fisheries Society, Symposium 7, Bethesda, Maryland.
- Prentice, E. F., T. A. Flagg, C. S. McCutcheon, and D. F. B. (1990). PIT-tag monitoring systems for hydroelectric dams and fish hatcheries (pp. 323–334). Fish-marking techniques. American Fisheries Society, Symposium 7, Bethesda, Maryland.
- Ramírez, E., & S.M., B. D. (2006). *La exploración de la biodiversidad marina. Desafíos científicos y tecnológicos* (p. 32).
- Ranz Guerra, C. (2007). Aguas muy poco profundas en acústica submarina. Factores que limitan la propagación de señales. *Revista de Acústica*, 38, 16–27. Sociedad Española de Acústica. 0210-3680. Retrieved February 12, 2014, from <http://hdl.handle.net/10261/4865>
- Ribas, J. (2009). *Underwater Wireless Video Transmission using Acoustic OFDM*. Massachusetts Institute of Technology.
- Ribas, J., Sura, D., & Stojanovic, M. (2010). Underwater wireless video transmission for supervisory control and inspection using acoustic OFDM. *Oceans 2010 Mts/Ieee Seattle*, 1–9. Ieee. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5663839>
- Riley, J. P., & Skirrow, G. (1975). *Chemical Oceanography*. Academic Press.
- Riter, S., Boatright, P. A., & Shay, M. T. (1971). Pulse Position Modulation Acoustic Communications. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, (2).
- Rodríguez, M. C., & Garza, F. J. E. (2000). Actuadores piezoeléctricos. *Ingenierías*, III(6), 22–28.
- Roussel, J.-M., Haro, A., & Cunjak, R. A. (2000). Field test of a new method for tracking small fishes in shallow rivers using passive integrated transponder (PIT) technology. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57(7), 1326–1329. NRC Research Press. Retrieved from <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/f00-110>
- Santamaria, P., Aguzzi, J., Sbragaglia, V., del Río, J., Nogueras, M., Manuel, A., & Sardà, J. (2013). Long term monitoring of day-night fish assemblage at OBSEA. SARTI. Retrieved February 5, 2014, from <http://upcommons.upc.edu/revistes/handle/2099/13907>

- Schochet, T., Kelley, A., & Landry, C. (2004). Differential behavioral effects of nicotine exposure in adolescent and adult rats. *Psychopharmacology*, *175*(3), 265–273. Springer-Verlag. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/s00213-004-1831-9>
- Schofield, G., Bishop, C. M., MacLean, G., Brown, P., Baker, M., Katselidis, K. a., Dimopoulos, P., et al. (2007). Novel GPS tracking of sea turtles as a tool for conservation management. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *347*(1-2), 58–68. Retrieved January 29, 2014, from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002209810700158X>
- Star-Oddi. (2014). Temperature data loggers & other sensors for research. Retrieved February 6, 2014, from <http://www.star-oddi.com/>
- Stewart, R. H. (2008). Introduction To Physical Oceanography, (September).
- Stojanovic, M. (2008). OFDM for underwater acoustic communications: Adaptive synchronization and sparse channel estimation. *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008. ICASSP 2008. IEEE International Conference on* (pp. 5288–5291).
- Stojanovic, Milica. (n.d.). Underwater Acoustic Communication.
- Stream. (2013). Naxys. Retrieved February 3, 2014, from <http://www.stream.no/Global/Naxys/Produkter/Ethernethydrofone/Datablad/PDF-700021000-003-B.pdf>
- Tang, S., Dong, Y., & Zhang, X. (2012). On Link Misalignment for Underwater Wireless Optical Communications. *IEEE Communications Letters*, *16*(10), 1688–1690. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6287490>
- Taylor, P., Memichael, G. A., Eppard, M. B., Carlson, T. J., Carter, J. A., Ebberts, B. D., Brown, R. S., et al. (2012). The Juvenile Salmon Acoustic Telemetry System : A New Tool Feature : Fisheries Research The Juvenile Salmon Acoustic Telemetry System : A New Tool El Sistema de Telemetría Acústica para Juveniles de Salmón : una nueva herramienta, (December 2012), 37–41.
- Thurman, H., & Burton, E. (2010). *Introductory Oceanography*. Pearson Prentice Hall. Retrieved from <http://books.google.es/books?id=CxHZAAAACAAJ>
- Tong, F., Benson, B., Li, Y., & Kastner, R. (2010). Channel Equalization Based on Data Reuse LMS Algorithm for Shallow Water Acoustic Communication. *Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC), 2010 IEEE International Conference on* (pp. 95–98).

Bibliografia

- Tundi Agardy, M. (1994). Advances in marine conservation: the role of marine protected areas. *Trends in ecology & evolution*, 9(7), 267–70. Retrieved February 10, 2014, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0169534794902976>
- Unep. (2014). UNEP / MAP - United Nations Environment Programme - Mediterranean Action Plan. Retrieved February 12, 2014, from <http://www.unepmap.org/>
- Vadde, V., Indushree, G., & Sequeira, C. (2011). Channel estimation and BER studies for an underwater acoustic OFDM system using time reversal mirror in shallow waters. *Ocean Electronics (SYMPOL), 2011 International Symposium on* (pp. 241–247).
- Vemco. (2007). Acoustic telemetry - An overview. *AATAMS Workshop*. Sydney.
- Vemco. (2013). *VR2W User Manual* (p. 54). Retrieved from http://vemco.com/wp-content/uploads/2013/10/vr2w_manual.pdf
- Vemco. (2014). Products | Vemco. Retrieved February 3, 2014, from <http://vemco.com/products/>
- Vierod, A. D. T., Guinotte, J. M., & Davies, A. J. (2013). Predicting the distribution of vulnerable marine ecosystems in the deep sea using presence-background models. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 99, 6–18. Retrieved January 22, 2014, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967064513002403>
- Weiss, H. M., Lozano-Álvarez, E., Briones-Fourzán, P., & Negrete-Soto, F. (2006). Using Red Light with Fixed-site Video Cameras to Study the Behavior of the Spiny Lobster, *Panulirus argus*, and Associated Animals at Night and Inside Their Shelters. *Marine Technology Society Journal*, 40(3), 86–95.
- WhoI. (2014). Home : Woods Hole Oceanographic Institution. Retrieved February 7, 2014, from <http://www.whoi.edu/>
- William Shieh, I. D. (2009). OFDM Principles. *OFDM for Optical Communications* (pp. 31–52).
- Yan, H., Zhou, S., Shi, Z., Cui, J.-H., Wan, L., Huang, J., & Zhou, H. (2010). DSP implementation of SISO and MIMO OFDM acoustic modems. *OCEANS 2010 IEEE - Sydney* (pp. 1–6).
- Zabaco, O. (2011). *Contribution to long term telemetry in small laboratory animals*. Universitat Politècnica de Catalunya. Enginyeria Biomèdica. Retrieved February 5, 2014, from http://cataleg.upc.edu/record=b1394335~S1*cat

