

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# **“Comunicaciones inalámbricas subacuáticas a 2,4 GHz para la transmisión de datos con altas tasas de transferencia”**

***TRABAJO FINAL DE GRADO***

Autor/a:

**Dña. Sandra Sendra Compte**

Tutor/a:

**D. Jaime Lloret Mauri**

**D. Miguel Ardid Ramírez**

***GANDIA, 2011***





## Índice General

Índice General	2
Índice de tablas	3
Índice de figuras	4
Agradecimientos	5
Resumen en Inglés	6
Resumen en Castellano	6
Capítulo 1: Introducción y Estado del Arte	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos	8
1.3 Estado del arte	8
1.4 Estructura del proyecto	9
Capítulo 2: Características físicas del medio y técnicas de transmisión subacuáticas.	11
2.1 Comunicaciones subacuáticas basadas en ondas electromagnéticas	11
2.1.1 Ondas EM en agua dulce	11
2.1.2 Ondas EM en el agua de mar	12
2.2 Comunicaciones subacuáticas basadas en señales ópticas	14
2.3 Comunicaciones subacuáticas basadas en ondas acústicas	15
Capítulo 3: Modulaciones	20
3.1 Fundamentos teóricos del proceso de modulación de Fase	20
3.2 Transmisión por desplazamiento de fase binaria (BPSK)	21
3.3 Transmisión de desplazamiento de fase cuaternaria (QPSK)	21
3.4 Complementary Code Keying (CCK)	22
Capítulo 4: Escenario, hardware utilizado y estrategias de medición	24
4.1 Lugar de la medición	24
4.2 Elementos utilizados en las pruebas	24
4.3 Estrategias de medida y preparación del escenario	25



Capítulo 5: Medidas obtenidas	26
5.1 Medidas realizadas para 2,412 GHz	26
5.2 Medidas realizadas para 2,437 GHz	29
5.3 Medidas realizadas para 2,472 GHz	32
Capítulo 6: Diseño de un nodo multisensor	36
6.1 Implementación de la propuesta	37
Capítulo 7: Conclusiones	40
7.1 Conclusión del trabajo realizado y ámbito de aplicación	40
7.2 Valoración personal	40
7.3 Futuras líneas de investigación	41
Referencias	42



## Índice de tablas

TABLA I.	Valor de las constantes	16
TABLA II.	Modulaciones para IEEE 802.11 b	23
TABLA III.	Modulaciones para IEEE 802.11 g	23



## Índice de figuras

Figura 1.	Velocidad de propagación	13
Figura 2.	Coefficiente de absorción	13
Figura 3.	Efecto de dispersión	15
Figura 4.	Velocidad del sonido en función de la profundidad	17
Figura 5.	Esquema de modulación	20
Figura 6.	Modulación PSK	21
Figura 7.	Diagrama fasorial de la modulación BPSK	21
Figura 8.	Diagrama fasorial de la modulación QPSK	22
Figura 9.	Diagrama de radiación horizontal y vertical de un monopolo	24
Figura 10.	Topología montada para la toma de medidas	25
Figura 11.	RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 1 Mbps a 2.412 GHz	26
Figura 12.	RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 2 Mbps a 2.412 GHz	27
Figura 13.	RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 5.5 Mbps a 2.412 GHz	27
Figura 14.	RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 11 Mbps a 2.412 GHz	28
Figura 15.	Paquetes recibidos a 2.412 GHz	28
Figura 16.	RTT medio del ping a 2.412 GHz	29
Figura 17.	RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 1 Mbps a 2.437 GHz	29
Figura 18.	RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 2 Mbps a 2.437 GHz	30
Figura 19.	RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 5,5 Mbps a 2.437 GHz	30
Figura 20.	RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 11 Mbps a 2.437 GHz	31
Figura 21.	Paquetes recibidos para 2.437 GHz	31
Figura 22.	RTT medio del ping a 2.437 GHz	32
Figura 23.	RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 1 Mbps a 2.472 GHz.	32
Figura 24.	RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 2 Mbps a 2.472 GHz	33
Figura 25.	RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 5,5 Mbps a 2.472 GHz	33
Figura 26.	RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 11 Mbps a 2.472 GHz	34
Figura 27.	Paquetes recibidos a 2.472 GHz	34
Figura 28.	RTT medio del ping a 2.472 GHz	35
Figura 29.	Diagrama de bloques típico de un nodo sensor inalámbrico	36
Figura 30.	Conversión TTL-RS232	38
Figura 31.	Consumo del nodo sensor subacuático inalámbrico	38
Figura 32.	Circuito de alimentación basado en el integrado LM2676	39
Figura 33.	Nodo sensor subacuático inalámbrico	39



## **Agradecimientos**

En primer lugar quería agradecer a mis tutores, Jaime Lloret y Miguel Ardid, por la ayuda prestada, en la realización de este proyecto.

En especial, me gustaría agradecer a Jaime, su apoyo y la paciencia que ha tenido, estos últimos meses, tanto durante este curso, como en la elaboración del proyecto. Muchas gracias, por animarme a seguir con el curso y mantenerte a mi lado y no dejar que me rindiese, en aquellos momentos donde los días, resultaban demasiado cortos para poder acabar todo lo que teníamos pendiente.

Y por último, agradecer el apoyo incondicional de mi familia y mis amigos y en especial, la ayuda y colaboración de mi padre en la preparación de todas las pruebas llevadas a cabo a lo largo de todo el proyecto.

Gracias a todos.



## Resumen en Inglés:

Underwater communication networks have become an important field of research for many research groups in the recent years. These types of networks are envisioned to enable applications for oceanographic data collection, ocean sampling, environmental and pollution monitoring, in other.

In order to communicate us through the underwater networks, we can use acoustic links, links based on electromagnetic waves and optical signals. Currently, the applications are based in acoustic systems because the sound waves are better adapted to the aquatic environment, although the characteristics of these waves have important limitations. The main problem when using low frequencies is the lack of bandwidth to transmit high data rate. Sometimes wireless sensors must be placed quite close in order to obtain accurate measures from the water, so higher frequency bands could be used in special cases.

In this Project of final grade, we measure the maximum coverage distance of underwater wireless sensors when they are placed at about 15 cm underneath the water surface, without having wireless coverage from the air side. In order to characterize the behavior of this communication method, we measure, the number of lost packets and round trip time of pings, for transfer rates of 1 Mbps, 2, 5.5 and 11, working with different modulations at different frequencies for different distances.

## Resumen en castellano:

Las redes subacuáticas de comunicación se han convertido, en los últimos años, en un importante campo de investigación para muchos grupos de investigación. Este tipo de redes se prevén que sean utilizadas, para posibilitar el desarrollo de aplicaciones para la recolección de datos oceanográficos, toma de muestras del océano, la monitorización de contaminación ambiental, en otros.

Para poder comunicarnos a través de las redes subacuáticas, podemos utilizar, enlaces acústicos, enlaces, basados en ondas electromagnéticas y señales ópticas. Actualmente, las aplicaciones se basan en sistemas acústicos debido a que las ondas acústicas se adaptan mejor al medio acuático, aunque por las características de este tipo de ondas, presenta limitaciones importantes. El principal problema al utilizar las frecuencias bajas es la falta de ancho de banda para transmitir datos a alta velocidad. Pero, existen casos, donde los sensores inalámbricos ser colocado muy cerca con el fin de obtener medidas exactas del agua, por lo que se podría utilizar las bandas de frecuencia más alta, en casos especiales.

En este trabajo final de grado, se mide la distancia de cobertura máxima de sensores inalámbricos subacuáticos cuando se colocan a unos 15 cm por debajo de la superficie del agua, sin la necesidad de tener cobertura inalámbrica desde el lado del aire. Caracterizaremos en comportamiento de este método de comunicación, midiendo, número de paquetes perdidos y el tiempo de ida y vuelta de los pings, instantáneos y medios), para tasas de transferencia de 1 Mbps, 2, 5,5 y 11, que trabajan con distintas modulaciones, en diferentes frecuencias para diferentes distancias.





## Capítulo 1: Introducción

### 1.1 Introducción

Una red inalámbrica Ad-hoc está formada por un grupo de nodos de comunicación que puede establecer y mantener una red ellos mismos sí, sin la necesidad de una estación base o un nodo central (infraestructura), que realice el control de la red. Las redes inalámbricas terrestres, basada en radiofrecuencia (RF), son ampliamente usadas en muchos ámbitos. Desde hace unos años, las redes locales inalámbricas (WLAN) basadas en el estándar IEEE 802.11a/b/g/n han experimentado un crecimiento de mercado espectacular, por la mejora en las prestaciones que ofrecen y por el bajo coste que han adquirido los equipos de transmisión. Sin embargo, cuando nos disponemos a trasladar este estudio al ámbito subacuático, observamos que la mayor parte de estudios que encontramos, están relacionadas con las comunicaciones subacuáticas acústicas.

Hoy en día, existe una gran actividad de investigación relacionadas con las comunicaciones subacuáticas y las redes de sensores subacuáticas. La principal línea de investigación se basa en el aumento de la distancia y el ancho de banda, y, en algunos casos, se intenta reducir el consumo energético de los dispositivos subacuáticos, con el objetivo de aumentar el tiempo de vida útil de la red [1]. Los estudios sobre comunicaciones subacuáticas se centra principalmente en el uso de señales ópticas, señales electromagnéticas y en la propagación de señales acústicas y ultrasonidos. Cada técnica presenta una serie de características particulares, con sus ventajas y desventajas, debido principalmente a las características fisicoquímicas del medio [2]. Sin embargo, los problemas con la propagación de cierto tipo de señales a través del agua, hace que en la actualidad, el método más utilizado es el método de la comunicación acústica, ya que es capaz de alcanzar grandes distancias, más de 20 km [3]. Aunque las comunicaciones subacuáticas, basadas en la propagación de señales acústicas es una tecnología ampliamente investigada y probada, sigue presentando una serie de inconvenientes bastante complicados de mejorar. Por una parte, los anchos de banda máximos con los que podemos trabajar están en torno a los 20 Kbps. Además el hecho de trabajar cerca de la superficie del agua, se producen muchas reflexiones que pueden enmascarar las señales recibidas. Otros factores como la turbidez, la salinidad, temperatura, etc., también pueden hacer variar tanto la velocidad de propagación del sonido en el agua, como la propia trayectoria de la onda.

Cuando necesitamos transmitir mayor ancho de banda, por ejemplo, para la transmisión de video, debemos recurrir al uso de métodos de propagación basados en señales de radiofrecuencia (RF), que son capaces de alcanzar tasas de transmisión de datos de hasta 100 Mbps a distancias cortas. Además, por su naturaleza, este tipo de señales presentan excelente inmunidad a las imperfecciones del medio, aunque pueden verse afectadas por interferencias electromagnéticas, procedentes de otras fuentes, como motores. Para trabajar con anchos de banda mayores a los 100 Mbps, la mejor técnica sería utilizar señales ópticas, para establecer la comunicación entre los nodos. Este método de comunicación, nos permitiría alcanzar velocidades de transferencia de hasta Gbps. Sin embargo, se deben considerar varios factores muy limitantes. El principal problema que presenta este método es las distancias máximas entre nodos, además de ser una tecnología muy sensible a la turbidez y a la presencia de partículas en suspensión. Las comunicaciones ópticas se utilizan en las zonas costeras, donde los métodos acústicos, debido a las reflexiones por la poca profundidad, reducen aún más la velocidad y llegan a perder la característica de una comunicación de larga distancia [4].

En este trabajo final de grado, se va a realizar un estudio práctico del comportamiento de las señales EM basadas en la frecuencia de 2,4 GHz. Estas pruebas, se realizan en una piscina grande, de agua dulce. Se establecerá un enlace subacuático, punto a punto, entre las antenas de 2,4GHz de un ordenador y un punto de acceso, debidamente preparadas, para poder ser sumergidas en el agua. Una vez demostrada la viabilidad de las comunicaciones, propondremos el diseño de un nodo multisensor sensor subacuático, que cumpla los requisitos establecidos, en cuanto a tamaño, consumo de



energía, etc. [5], planteando nuevas líneas de investigación relacionadas con las comunicaciones inalámbricas subacuáticas.

Desde el punto de vista de las aplicaciones actuales, conseguir resultados coherentes y válidos sobre las comunicaciones subacuáticas usando ondas EM, puede suponer un gran avance y mejora sobre las redes subacuáticas desarrolladas hasta el momento. Además, este tipo de redes, pueden ser aplicadas en aplicaciones militares, monitorización de ecosistemas marinos e incluso en aplicaciones de actividades industriales como la acuicultura en granjas marinas [6], para reducir las deposiciones de residuos orgánicos, sobre el lecho marino y combatir la contaminación del medio.

El rendimiento de los sistemas se evalúa en términos de medidas de conectividad, velocidad de transmisión, retardo medio y el consumo de energía. Estas serán básicamente nuestras medidas, en nuestro sistema.

## 1.2 Objetivos

En la presente memoria se muestra el proceso llevado a cabo durante estos 3 meses. En este TFG, se pretendía estudiar el comportamiento y tasas de transferencia máximas que pueden ofrecer las señales electromagnéticas a 2,4 GHz para la transmisión de información, a altas tasas de transferencia, bajo el agua. Para realizar este trabajo nos hemos marcado una serie de pautas a seguir.

El primer paso, será estudiar las características del medio, en este caso el agua, por donde se quiere transmitir la información. Más concretamente, deberemos estudiar las características de las ondas electromagnéticas en las comunicaciones subacuáticas.

En paso siguiente será realizar las pruebas, con el objetivo de analizar el rendimiento de las distintas modulaciones empleadas a 2,4 GHz que las comunicaciones inalámbricas subacuáticas pueden ofrecer. Veremos, las pérdidas de paquetes registradas y retardos en la comunicación y analizaremos las tasas de transferencia de datos en función de la distancia entre el transmisor y el receptor.

Una vez analizados nuestros resultados, compararemos los resultados obtenidos, con sistemas ya existentes, para las comunicaciones subacuáticas y veremos casos reales donde la aplicación de estos resultados, mejoraría el funcionamiento de sistema.

Finalmente propondremos el diseño de un nodo subacuático, para ser utilizado como nodo sensor, en redes de sensores inalámbricas subacuáticas (UWSN).

## 1.3 Estado del arte

Cuando nos disponemos a buscar información sobre estudios e investigaciones relacionados con las comunicaciones inalámbricas subacuáticas, observamos varios hechos significativos. El primero de ellos es que la mayor cantidad de publicaciones van referidas a comunicaciones subacuáticas, basadas en ondas acústicas. Esto se debe a que es el método más utilizado, para estos fines. Los estudios sobre la emisión de ondas EM y señales ópticas a través del agua, son bastante escasos. Este hecho propicia que sea poca la información que disponemos para empezar nuestras investigaciones.

Dentro de los estudios sobre las redes inalámbricas subacuáticas, podemos hacer varias distinciones. Por una parte, encontramos algunos trabajos donde los autores utilizan señales de RF de baja frecuencia y señales acústicas, con el objetivo de conseguir mayores distancias y prevenir las pérdidas de potencia que se registran en las altas frecuencias. También encontramos sistemas y aplicaciones prácticas, que son usadas en la actualidad.

Existen diversos trabajos donde los autores explican varias cuestiones acerca de las comunicaciones subacuáticas, en los. Por ejemplo, en [7], los autores discuten varios aspectos



fundamentales clave de la comunicación acústica bajo el agua. Describen la arquitectura de las redes de sensores subacuáticas y los factores que influyen en el diseño de este tipo de redes, etc. Mientras, Akyildiz et al. en [8] analizar en detalle las soluciones actuales para el control de acceso al medio, la red y los protocolos de la capa de transporte. Los autores muestran algunos de los temas que están siendo investigados actualmente. Por otra parte, se analizan las arquitecturas de las dos dimensiones y tres dimensiones, las redes de sensores bajo el agua. J. Partan et al. [9] realizan una comparativa de la propagación de las ondas acústicas en las redes de sensores subacuáticas y las redes terrestres basadas en señales de radio. También muestran las principales características de las redes submarinas y sus limitaciones. También Chakraborty et al. presenta una descripción detallada de la relación entre las características de propagación de las ondas electromagnéticas [10]. Los autores estudiaron la profundidad de la capa de agua, las pérdidas debidas a la ruta y la frecuencia para diferentes valores de la distancia y la conductividad del agua con el propósito de conseguir establecer un canal de comunicación bajo el agua. Como podemos ver la propagación de ondas electromagnéticas que se caracteriza fundamentalmente por cuatro parámetros, la permeabilidad, la permisividad, la conductividad y la densidad de carga de volumen.

Se han realizado algunos trabajos en las comunicaciones subacuáticas, basadas en RF. En estos casos, los autores trabajan con muy baja frecuencia (VLF), disminuyendo la frecuencia a un rango de frecuencias, más eficaz. En concreto, algunos investigadores de la Universidad Metropolitana de Swansea, Reino Unido [11] trabajaron con simulaciones basadas en la frecuencia de 3 KHz y distancias entre los nodos de 40 metros. Frater et al. [12] hizo una comparación de la diferencia entre RF y la comunicación acústica, incluso para establecer las distancias máximas disponibles con RF. Se determinaron los rangos máximos de las frecuencias, la obtención de unos 6 m de 100 KHz, 16 m a 10 KHz, y 22 m a 1 KHz. Llegaron a la conclusión de que la comunicación RF ofrecen un mayor rendimiento que la comunicación acústica en ciertos rangos. Finalmente Anguita et al. rechazó el método de radiofrecuencia para la comunicación bajo el agua porque está fuertemente atenuada, tomando como válida la frecuencia de 2.4GHz [13]. De todos los trabajos consultados, podemos concluir que las señales electromagnéticas ofrecen mayores rendimientos que las señales acústicas de hasta un orden de magnitud, tal y como muestra Nowsheen et al. [14] [15], que han desarrollado un módem basado en FPGA, que utiliza el rango de frecuencias 100 KHz a 1 MHz y la modulación BPSK, con envíos de paquetes de datos de una duración de 1 ms, con un tiempo de espera de 20 ms. con el fin de evitar los efectos de las reflexiones en el tanque. Finalmente, I. Vasilescu et al. presentan en [16] una novedosa plataforma para redes de sensores subacuáticas utilizadas para la monitorización a largo plazo de los arrecifes de coral. La red de sensores se compone de nodos de sensores estáticos y móviles y se comunican entre ellos mediante enlaces punto a punto utilizando un sistema basado en las comunicaciones ópticas de alta velocidad, que transmiten mediante un protocolo acústico.

Por último, destacar algunos trabajos donde se estudian las comunicaciones subacuáticas, desde otro punto de vista. En estos casos se analizan las comunicaciones, desde el punto de vista del protocolo de comunicación utilizado para la interconexión de nodos. Por ejemplo, en [17] B. Peleato et al. proponen un protocolo de compartición de canal para redes ad-hoc bajo el agua, con el objetivo de ahorrar energía al evitar las colisiones, al mismo tiempo que se pretende maximizar el rendimiento. Se basa en la minimización de la duración del hand-shake, aprovechando la tolerancia a las interferencias del receptor cuando los dos nodos están más cerca de la distancia de transmisión máxima. Finalmente citar el trabajo presentado por M. Garcia et al. [18] donde se realiza un estudio de los protocolos más utilizados en las comunicaciones subacuáticas. También podemos ver una comparativa entre el comportamiento de las ondas acústicas, EM y ópticas tanto en agua dulce como en el agua del mar, finalizando el artículo con una recopilación de distintas aplicaciones subacuáticas, donde se está utilizando las redes de sensores subacuáticas.

## 1.4 Estructura del proyecto

Para la realización de este trabajo final de grado, necesitábamos un punto de partida. Para ello, se realizó una primera fase de investigación en la que se ha buscado y analizado diferente documentación



relacionada con las comunicaciones inalámbricas subacuáticas. La realización de este trabajo se ha dividido en diversas fases. En cada capítulo explicaremos las tareas realizadas en cada fase y conclusiones a las que nos ha llevado cada tarea.

El segundo capítulo, analiza y compara las principales formas de comunicación subacuática. Los actuales sistemas de comunicación subacuática utilizan principalmente en tres métodos. Estos métodos se basan en la propagación de ondas acústicas, ondas electromagnéticas (EM) y señales ópticas. Cada uno de estos métodos, presenta una serie de ventajas y desventajas, que dependen principalmente de su comportamiento físico.

Llegados al capítulo tres, analizaremos y compararemos cada una de las modulaciones empleadas en las distintas pruebas. Veremos las tasas de transferencia máxima que define el estándar IEEE 802.11 [19], en función de cada modulación.

La realización de las pruebas ha sido en una piscina y hemos usado dispositivos comerciales, compatibles con el estándar IEEE 802.11. El capítulo cuatro, recoge las características de los dispositivos utilizados y del escenario donde se ha trabajado.

Debido a que la mayor cantidad de pruebas relacionadas con las comunicaciones subacuáticas, se realizan con ondas acústicas, desconocíamos el mejor modo de proceder para la correcta obtención de las medidas. El capítulo cinco muestra los resultados obtenidos. Hemos realizado distintas baterías de medidas, con distintas condiciones, con el objetivo de caracterizar de la manera más fidedigna el comportamiento de las ondas EM en el agua.

En el capítulo seis, mostramos un posible diseño de un nodo multisensor subacuático, que funciona a 2,4GHz. Analizaremos su consumo y las características que nos permitirá. Posteriormente, comprobaremos su funcionamiento en el agua, para verificar que los resultados anteriormente obtenidos, son válidos.

En el último capítulo, expondremos nuestras conclusiones sobre el trabajo realizado. En ellas se resumirán los principales aspectos extraídos de las distintas gráficas y valoraciones personales sobre el propio trabajo. Finalmente utilizaremos los conocimientos adquiridos para perfilar nuevas líneas de investigación, para seguir investigando y trabajando en este tema.



## Capítulo 2: Características físicas del medio y técnicas de transmisión subacuáticas.

Los sistemas actuales de comunicación subacuática utilizan esencialmente tres métodos de transmisión de información. Estos métodos se basan en ondas sonoras, en ondas electromagnética (EM) y las señales ópticas. Cada una de estas técnicas tiene ventajas y desventajas, principalmente debido a las limitaciones físicas [20,21].

Las señales se propagan a través del agua gracias a las propiedades fisicoquímicas del agua y las propiedades físicas de la luz. Los factores físico-químicos que influyen en las propiedades de la luz son la transparencia, es decir, la cantidad de luz transmitida en el agua de mar, la absorción, la cantidad de radiación que se retiene y la turbidez, lo que reduce la claridad del agua por la presencia de materia en suspensión.

En cuanto a las propiedades físicas de la luz, distinguimos la reflexión, refracción y extinción, que mide el grado de la luz que puede penetrar en el medio marino. Además, los dos factores más importantes en el mar son la temperatura y la salinidad, que determinan la densidad del agua. En el océano, la densidad tiende a aumentar con la profundidad, por lo que las capas superiores del agua siempre tienen una densidad más alta. Todos estos factores son muy importantes para conocer la forma de difundir la luz y el sonido en el océano.

En esta sección veremos las principales características y los factores que pueden causar dificultades en la propagación de las señales, cuando trabajamos con los tres tipos de ondas y algunas de las principales expresiones que caracterizan el comportamiento de los tres tipos de ondas en el medio.

### 2.1 Comunicaciones subacuáticas basadas en ondas electromagnéticas

El uso de ondas electromagnéticas en el agua, para transmitir señales entre los nodos de la red, se caracteriza por ser una comunicación rápida y eficiente.

Además, las ondas electromagnéticas en la banda de frecuencias de radiofrecuencia (RF) presentan varias ventajas sobre las ondas acústicas, sobre todo porque es más rápido y se puede utilizar en las frecuencias de trabajo más altas (lo que se traduce en un mayor ancho de banda). Sin embargo, hay varios factores que limitan el uso de ondas EM en el agua.

#### 2.1.1 Ondas EM en agua dulce.

El agua dulce es un medio que tiene de baja pérdida. La velocidad de propagación  $c$  de las señales puede ser expresada por la siguiente aproximación (véase la ecuación 1) [22].

$$c \approx \frac{1}{\sqrt{\mu}} \quad (1)$$

Donde  $\epsilon$  representa la constante dieléctrica y  $\mu$  se refiere a la permeabilidad magnética del material (en este caso agua). Su valor no tiene ningún cambio significativo para la mayoría de medios no magnéticos.

La constante dieléctrica de un material se expresa generalmente en relación con la permitividad del vacío, que se denomina permitividad relativa (también llamada constante dieléctrica). La permitividad absoluta se calcula multiplicando la permitividad relativa por la permitividad del vacío (ver ecuación 2):

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 = (1 + \chi_e) \epsilon_0 \quad (2)$$

Donde  $\chi_e$  representa la susceptibilidad eléctrica de un material.



Por otro lado, la permeabilidad magnética de una sustancia es el producto de la permeabilidad magnética relativa y la permeabilidad magnética de los materiales en el espacio libre (ver ecuación 3).

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (3)$$

La permeabilidad magnética en el espacio libre viene dada por la ecuación 4:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{N/A}^2 \quad (4)$$

A pesar de que la constante dieléctrica del agua es de aproximadamente 81, la velocidad de propagación de las señales se reduce en un factor de 9 con respecto a la velocidad de la luz en el vacío. Sin embargo, esta velocidad es mucho mayor que la velocidad de las ondas acústicas (más de 4 órdenes de magnitud).

El coeficiente de absorción  $\alpha$  para la propagación de EM en el agua dulce se puede aproximar por la expresión 5 [22]:

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (5)$$

Donde  $\sigma$  es la conductividad eléctrica,  $\epsilon$  es, de nuevo, la permitividad material y  $\mu$  la permitividad magnética del material. Como se puede ver en las expresiones 1 y 5, la velocidad de propagación y coeficiente de absorción de agua dulce son independientes de la frecuencia de trabajo de las señales transmitidas.

### 2.1.2 Ondas EM en el agua de mar

A diferencia de agua dulce, agua de mar es un medio muy dispersivo, que presenta grandes pérdidas. La conductividad del agua de mar se debe principalmente a la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) en el agua. La concentración de estos sólidos, o salinidad media del agua de mar en los océanos es de 34 partes por mil (ppm).

La conductividad eléctrica del agua de mar es aproximadamente dos órdenes de magnitud superior a la del agua dulce, donde la conductividad eléctrica viene marcada en función del contenido de sal (salinidad) y la temperatura. Su valor viene dado por la expresión 6:

$$\sigma = 0,18 \cdot C \cdot 0,93[1 + 0,02(T - 20)] \text{ (S/m)} \quad (6)$$

Donde C es el contenido de sal en partes por mil y T es la temperatura en grados Celsius.

A 20 ° C, el agua de mar tiene un valor medio de 5 S/m, mientras que las características de conductividad en agua dulce están en torno al S 0,005 a 0,05 S/m.

La constante dieléctrica del agua de mar es también una función de la salinidad y la temperatura. A menudo se utiliza un valor de 80 para la permitividad relativa del agua de mar a 20 ° C, aunque el valor real, trabajando a baja frecuencia es de 70. Sin embargo, en las frecuencias por debajo de 100 MHz,  $\epsilon_r$  es mucho menor que 60.

En medios con alta conductividad eléctrica para la transmisión de señales, la velocidad de propagación y las pérdidas por absorción de las ondas EM son directamente proporcionales a la frecuencia de la portadora. La velocidad de propagación de ondas EM en el agua de mar puede ser expresada por la aproximación 7 [22]:

$$c \approx \sqrt{\frac{4\pi f}{\sigma}} \quad (7)$$



Donde  $\mu$  es la permitividad magnética del material,  $f$  es la frecuencia de la señal portadora y  $\sigma$  representa la conductividad del material. Por otra parte, las pérdidas por absorción de agua de mar se puede aproximar por (ver ecuación 8) [22]:

$$\alpha \approx \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (8)$$

Donde  $\mu$  es la permitividad magnética del material,  $f$  la frecuencia de la señal portadora y  $\sigma$  representa la conductividad eléctrica del material.

Figuras 1 y 2 muestran la evolución de la velocidad de propagación y coeficiente de absorción en el caso de agua dulce y salada, dependiendo de la frecuencia.

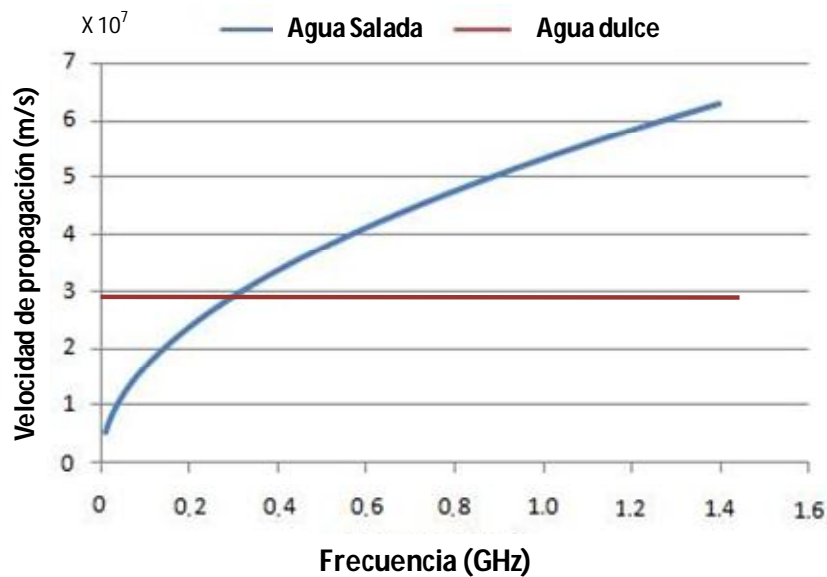


Figura 1. Velocidad de propagación

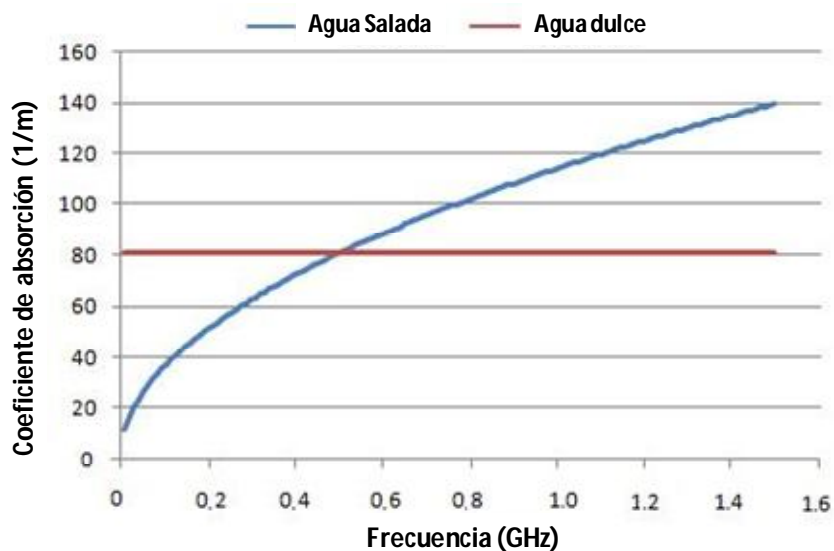


Figura 2. Coeficiente de absorción

Como podemos ver en estos gráficos, en las frecuencias altas, hay un mayor coeficiente de absorción, por lo que sería mejor para trabajar a bajas frecuencias, mientras que a las frecuencias más altas muestra una velocidad de propagación más elevada. Sin embargo, debido a la alta absorción de



agua de mar, no se puede propagar ondas EM en el agua de mar. Esta es la principal motivación para trabajar una menor frecuencia en los medios de alta conductividad. El agua de mar es un buen ejemplo de este tipo de medio. Por lo tanto, la comunicación en agua de mar es poco práctica utilizando métodos clásicos basados en la propagación de ondas.

## 2.2 Comunicaciones subacuáticas basadas en señales ópticas

La luz es una mezcla de radiación de diferentes frecuencias. Las señales ópticas utilizadas para las comunicaciones inalámbricas se limitan generalmente a distancias cortas, porque el agua tiene un factor de absorción muy alta en la banda de frecuencias ópticas.

No todas las frecuencias dentro del espectro de la luz se ven afectadas de la misma manera. Cada color es una radiación de frecuencia particular. Por esta razón, los colores rojos son los primeros en desaparecer, mientras que los últimos son los colores azul y verde. Las longitudes de onda de colores azul-verde, ofrece un buen rendimiento para comunicaciones de banda ancha (10 Mbps a 150 Mbps) a distancias moderadas entre 10 y 100 metros. En teoría, mediante el uso de señales ópticas para la comunicación bajo el agua, puede alcanzar velocidades de 1 Gbps. Sin embargo, las señales ópticas tienen dos desventajas principales. Por una parte, las partículas en suspensión causan la dispersión de la luz y por otra, debido a las propiedades físicas del agua, las señales ópticas se absorben rápidamente.

La propagación de la luz depende del medio atravesado. Por esta razón, la luz no viaja a la misma velocidad en el aire que en el agua. Cuando la luz se propaga en un medio acuoso, su intensidad disminuye exponencialmente, debido principalmente a la atenuación que se produce por dos causas principales:

- **Absorción:** la energía lumínica se convierte en otro tipo de energía, generalmente el calor o energía química. Esta absorción se produce por:
  - Algas, que utilizan la luz como fuente de energía.
  - Partículas y materia orgánicas e inorgánicas en suspensión.
  - Compuestos inorgánicos disueltos.
  - La propia agua.
- **Dispersión:** Este fenómeno es el resultado de la colisión del haz de luz, con las partículas en suspensión, produciendo múltiples reflexiones. A mayor grado de turbidez en el agua, mayor efecto de dispersión se genera, lo que dificulta la penetración de la luz. La Figura 3 muestra un diagrama sobre el efecto de dispersión de un rayo, cuando el rayo de luz incidente choca contra las partículas en suspensión.

En la figura 3 se muestra un diagrama del efecto de dispersión de la luz en el agua, que contiene partículas en suspensión. Como podemos ver, la luz no siempre sigue el camino más corto para iluminar un objeto y muchos rayos llegan a su destino, reflejados en las distintas partículas, siendo desviados de su ruta original. La cantidad de materia orgánica en suspensión contenida en el agua de mar, causa que la intensidad de luz disminuya en la dirección de propagación, ya que es absorbida por estas partículas. Este parámetro se llama coeficiente de absorción o el factor de extinción de la luz, y proporciona el valor de la transparencia del agua. Se han realizado muchos estudios relacionados con las propiedades físicas del mar, utilizando un disco blanco de 30 cm de diámetro llamado disco Secchi [23].



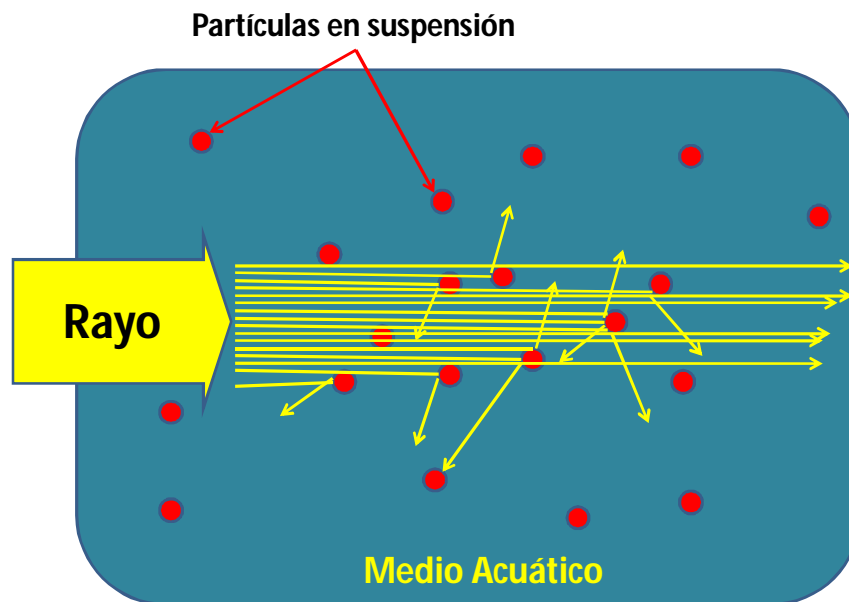


Figura 3. Efecto de dispersión

Es posible calcular la energía total dispersada por una partícula a través de cálculos muy complicados [24], y el uso de las expresiones de la teoría de la dispersión de Mie [25], que es válido para todas las relaciones posibles del diámetro de las partículas y la longitud de onda de la señal. De acuerdo con la teoría de Mie, cuando la longitud de onda de la luz es similar al diámetro de la partícula, la luz interactúa con las partículas en un área transversal mayor que la sección transversal geométrica de la partícula. Esto nos permite expresar el total de energía dispersada por una partícula en todas las direcciones (véase la ecuación 9) [25].

$$C_{SCA} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{SCA} r^2 \sin\phi d\phi d\theta}{I_0} \quad (9)$$

Donde  $I_{sca}$  es la intensidad de la luz dispersada,  $I_0$  es la intensidad de la luz incidente,  $r$  es el radio de la partícula y  $\sin\phi d\phi d\theta$  representa el ángulo sólido para el cálculo de toda la superficie de la esfera. Con esta expresión se puede calcular la cantidad de energía del haz de luz que se pierde debido a las colisiones del haz con las partículas en suspensión. Si existe un número elevado de partículas o elevado grado de turbidez en el agua, se registrará mayor absorción del haz de luz en el medio.

### 2.3 Comunicaciones subacuáticas basadas en señales acústicas

El sonido se produce por la vibración de las moléculas en una sustancia elástica. La propagación de la energía mecánica del sonido es absorbida por el medio a través del cual se propaga. En el agua, el sonido se propaga más rápido y tiene menores pérdidas de energía que en el aire. Los sonidos y las ondas sonoras ultrasónicas se transmiten en el mar a una velocidad entre 1400 y 1600 m/s, mientras que en el aire la velocidad de propagación es de 340 m/s. Esto es porque el agua de mar no está comprimida, es decir, no se puede reducir a un menor volumen, por lo que la absorción de las ondas de sonido es mínima, al contrario de que ocurre en la atmósfera, donde los sonidos son absorbidos a distancias muy cortas.

Hay varios factores que influyen en la distancia que el sonido puede viajar bajo el agua. Por un lado, las partículas de agua de mar puede reflejar, dispersar y absorber ciertas frecuencias de sonido, de la misma manera que ciertas partículas en la atmósfera puede reflejar, dispersar y absorber ciertas longitudes de onda de la luz. El agua de mar absorbe 30 veces la cantidad de sonido absorbido por el agua destilada, atenuando ciertas frecuencias. Los sonidos de baja frecuencia son capaces de pasar a



través de pequeñas partículas que pueden viajar a mayores distancias sin sufrir ninguna pérdida por absorción o dispersión. Los estudios han demostrado que factores como los cambios de salinidad, temperatura y presión pueden causar cambios bastante acusados en la velocidad de propagación del sonido bajo el agua.

En general podemos decir que el océano se divide en capas horizontales en las que la velocidad del sonido depende en gran medida de la temperatura en las regiones altas y la presión en las regiones más bajas. La capa superior del agua se calienta por el efecto del sol, cuya temperatura varía dependiendo de la temporada. En latitudes medias, el agua se mezcla perfectamente por la acción de las olas y las corrientes. Pero también podemos distinguir capas de transición llamada termoclina, donde las temperaturas caen continuamente con la profundidad. A medida que baja la temperatura, la velocidad del sonido disminuye. Sin embargo, hay un punto, que va desde 600 metros hasta el Km. por debajo de la superficie, donde los cambios de temperatura son mínimas. En este caso, la presión, es el factor que más influye en la velocidad del sonido, que a medida que aumenta, también lo hace la velocidad del sonido.

La expresión 10 calcula la velocidad de propagación del sonido en el agua, teniendo en cuenta la temperatura ( $T$ ) en grados Celsius, la salinidad ( $S$ ) expresada en partes por mil y la profundidad ( $z$ ) en m [26].

$$c(T, S, z) = a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3 + a_5(S - 35) + a_6z + a_7z^2 + a_8T(S - 35) + a_9Tz^3 \quad (10)$$

Donde  $a_1.. a_9$  representan las constantes, cuyos valores se muestran en la tabla 1.

TABLA I. VALOR DE LAS CONSTANTES

Constante	Valor	Constante	Valor	Constante	Valor
$a_1$	1448.96	$a_4$	$2.374 \times 10^{-4}$	$a_7$	$1.675 \times 10^{-7}$
$a_2$	4.591	$a_5$	1.340	$a_8$	$-1.025 \times 10^{-2}$
$a_3$	$-5.304 \times 10^{-2}$	$a_6$	$1.630 \times 10^{-2}$	$a_9$	$-7.139 \times 10^{-13}$

Si tomamos la expresión 10 y la representarla, obtenemos la figura 4, que muestra los valores adquiridos por la velocidad de propagación del sonido, teniendo en cuenta el efecto de la temperatura y la variación de presión según la profundidad.

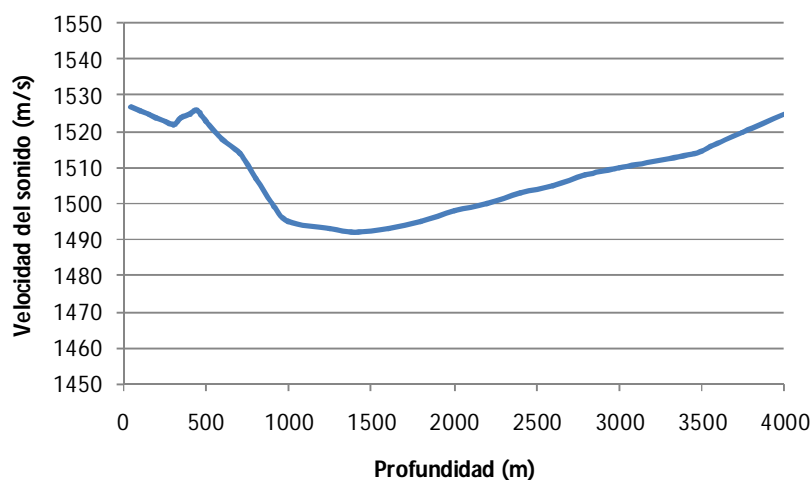


Figura 4. Velocidad del sonido en función de la profundidad.



Las comunicaciones acústicas, bajo el agua, son afectadas principalmente por las propiedades físicas y el comportamiento de las ondas, cuando viajan dentro del medio. Los principales efectos que podemos ver presentes son la absorción, atenuación, expansión geométrica, el ruido, variaciones de retardo y efecto multicamino, entre otros.

- **Velocidad de propagación.** La velocidad de propagación del sonido a través del agua es mucho menor que la propagación de las señales electromagnéticas. La velocidad del sonido en el agua depende de las propiedades del agua como la temperatura, la salinidad y la presión, como se ve en la Figura 4. Una velocidad de propagación del sonido típica, cerca de la superficie del océano, es de unos 1525 m/s, que es de aproximadamente 4 veces más rápido que la velocidad del sonido en el aire, pero de 5 órdenes de magnitud más lento que la velocidad de la luz. En términos aproximados, la velocidad del sonido aumenta 4,0 m/s por cada grado Celsius de aumento de la temperatura del agua. Cuando la salinidad aumenta una unidad práctica de salinidad (PSU), la velocidad del sonido en el agua aumenta 1,4 m/s, mientras que cada km de profundidad, la velocidad del sonido aumenta a unos 17 m/s.
- **Absorción.** Cuando el mar está agitado la energía de las olas es absorbida por el medio, debido a sus características intrínsecas. Cuando las señales acústicas se propagan a través del agua de mar, sufren el mismo efecto, reduciendo su energía inicial. El fenómeno de absorción es más pronunciado en un rango de frecuencias que en otro. Así, por ejemplo, las frecuencias altas (por encima de 100 KHz) son más sensibles a este fenómeno, por lo que podemos asegurar que la absorción es dependiente de la frecuencia.

Podemos expresar este comportamiento mediante la expresión 11, que tiene la contribución de las principales sales contenidas en el agua de mar [27]:

$$\alpha = 0,106 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} e^{\frac{(pH-8)}{0,56}} + 0,52 \left(1 + \frac{T}{43}\right) \left(\frac{S}{35}\right) \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} e^{-z/6} + 0,00049 f^2 e^{-(T/27+z/17)} \quad (11)$$

Donde  $\alpha$  es la atenuación en dB/km,  $f$  la frecuencia en KHz,  $z$  la profundidad en km,  $T$  la temperatura en ° C y  $S$  la salinidad en partes por mil. El primer término es la contribución del ácido bórico, el segundo término es la contribución del sulfato de magnesio, y el último término es la contribución del agua pura

Cuando una señal se transmite a través de un medio que puede generar pérdidas se deben tener en cuenta varios factores. Los principales mecanismos de pérdidas de energía son la dispersión geométrica, las pérdidas por absorción y dispersión de las pérdidas.

- **Atenuación.** Es causada principalmente por la absorción, cuando la energía acústica se convierte en energía térmica. La atenuación es causada por la dispersión y la reverberación (en la profundidad), la refracción y la dispersión (en las zonas superficiales). La atenuación también se incrementa con la distancia y la frecuencia, tal y como se puede ver en las figuras 1 y 2.
- **Expansión geométrica.** La expansión geométrica es la pérdida de energía de la onda acústica se está propagando, debido a la conservación de la energía. Esto se refiere a la difusión de la energía del sonido como resultado de la expansión de los frentes de onda, es decir, cuando un pulso de una onda acústica se propaga, como el frente de onda se aleja del origen, cubre un área mayor, por tanto, la energía de las olas por unidad de superficie se hace más pequeño. Este fenómeno es independiente de la frecuencia, se pueden distinguir dos expansión geométrica:
  - **Esférica** donde la fuente se extiende de modo omnidireccional y es característico en comunicaciones en aguas profundas. Las pérdidas de energía, causado por la expansión geométrica, son proporcionales al cuadrado de la distancia.



- **Cilíndrica.** Tiene en cuenta la radiación horizontal y sólo se presentan en las comunicaciones en aguas poco profundas. Las pérdidas de energía en este efecto, son proporcionales a la distancia.

Otros factores como el ruido ambiente, la dispersión o el efecto multicamino también pueden dificultar la comunicación bajo el agua.

- **Ruido.** Ruido acústico de comunicación se define como cualquier sonido no deseado que interfiere con la comunicación entre los sistemas de comunicación. Básicamente se pueden distinguir dos tipos de ruido.
  - **El ruido generado.** Es el ruido causado por maquinaria, como motores y la actividad natural del medio, como la vida animal.
  - **El ruido ambiental.** Se relaciona con los movimientos del agua, mareas y corrientes, tormentas, burbujas de agua cuando las olas chocan con la costa, etc., que pueden generar pérdidas de hasta 26 dB/m. También los fenómenos sísmicos y biológicos pueden considerarse dentro de este grupo. Todos estos fenómenos se conocen como hidrodinámica [28].
- **Retardo y variación de retardo.** Debido a la naturaleza del medio, la variación de retardo de la señal puede ser muy alto y puede llegar a ser muy perjudicial para el diseño eficiente de un protocolo, ya que se complica la estimación del tiempo de ida y vuelta (RTT), un parámetro importante para muchos protocolos de comunicación comunes.
- **Propagación y dispersión Doppler.** La dispersión es el fenómeno por el cual un conjunto de partículas que se mueven en una dirección puede rebotar con las partículas en el medio, y su trayectoria puede desviarse de una línea recta de movimientos predefinidos [28]. Por otra parte, si el mar está en calma, las señales cerca de la superficie, se reflejan casi a la perfección, pudiendo generar diferencias de fase. Sin embargo, cuando el mar está agitado, las olas pueden mover el punto de reflexión de la onda acústica causando pérdidas de energía por dispersión. Estos dos fenómenos pueden provocar la pérdida de intensidad de la señal debido al efecto de trayectoria múltiple.
- **Efecto multicamino.** El efecto multicamino puede causar la degradación de las señales acústica, debido principalmente a la generación de la interferencia entre símbolos (ISI) y la destrucción de la información. La generación de múltiples caminos entre el transmisor y el receptor depende de la configuración del enlace. Si la comunicación se realiza a través de canales verticales, no se registra una pérdida por dispersión muy alta, debido principalmente a que las señales no encuentran obstáculos para reflexionar, mientras que los canales horizontales, debido al efecto de la superficie, pueden sufrir mayores pérdidas. El nivel de dispersión y deterioro de la señal es función de la profundidad y la distancia entre el transmisor y el receptor.



## Capítulo 3: Modulaciones

Una modulación, es una operación o transformación mediante la cual ciertas características de una onda (amplitud, frecuencia, fase) de una señal (portadora), se modifican en función de otra denominada moduladora, que contiene información, para que esta última pueda ser transmitida. También podemos decir, que modular es aplicar técnicas para modificar una señal con la finalidad de posibilitar el transporte de informaciones a través de un canal de comunicación y recuperar la señal en su forma original en la otra extremidad. La señal que finalmente se transmite, recibe el nombre de señal modulada. La Figura 5 muestra un esquema típico de modulación.

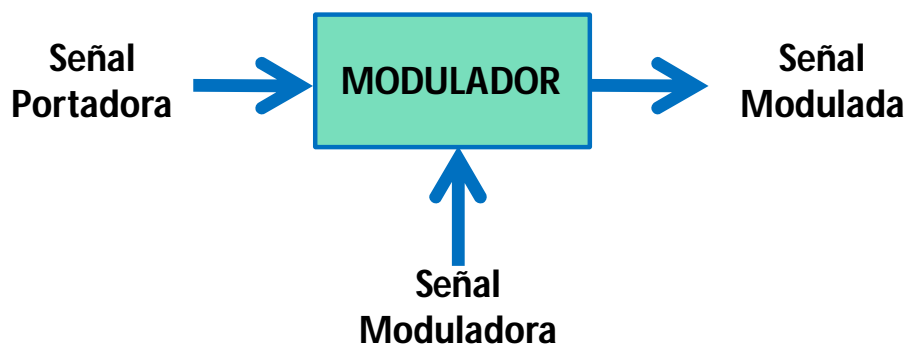


Figura 5. Esquema de modulación

En función del tipo de modulación que empleemos, distinguimos modulaciones por pulsos y modulación por onda continua. Además, la señal portadora puede ser de tipo analógico o tipo digital. En nuestros experimentos, utilizaremos las modulaciones por onda continua. En concreto, vamos a emplear las modulaciones con desplazamiento de fase (PSK) [34] y código de codificación complementaria (CCK) [35].

En esta sección veremos los fundamentos teóricos en los que se basan las modulaciones por desplazamiento en fase. Analizaremos las principales características de cada una de las modulaciones que usaremos en las pruebas. Finalmente, y debido a que vamos a usar dispositivos comerciales que funcionan bajo el estándar IEEE 802.11 b/g, analizaremos el estándar y identificaremos cada tipo de modulación, con las distintas velocidades que especifica dicho estándar [19].

### 3.1 Fundamentos teóricos del proceso de modulación de Fase

En una modulación por desplazamiento de fase, el parámetro de la señal senoidal de la portadora que se va a variar, es la fase, mientras que la amplitud de la portadora permanece constante. En la Figura 6 se puede observar las discontinuidades de fase que parecen al comienzo y al final de cada intervalo  $T$ , cuando hay una transición de 0 a 1 o de 1 a 0 producida por una señal modulante digital.

En este tipo de modulaciones, podemos distinguir dos alternativas:

- **PSK convencional**, donde la variación de la fase se refiere a la fase de la portadora sin modular.
- **PSK diferencial**. En este tipo de modulación, las variaciones de la fase se refieren a la fase de la portadora del estado inmediatamente anterior al considerado.

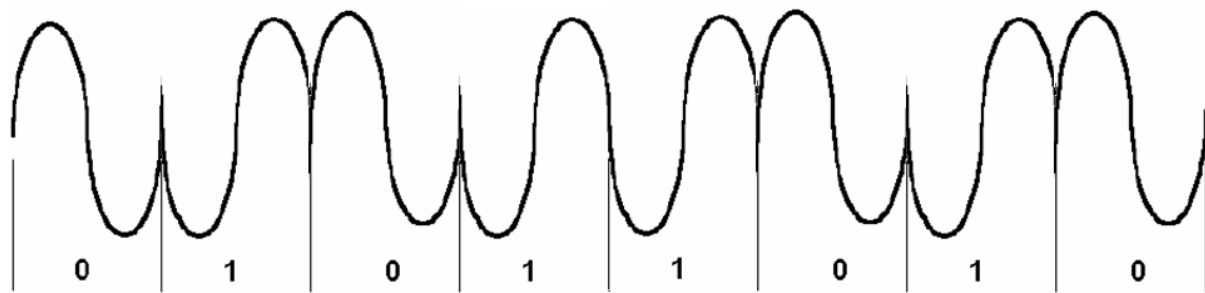


Figura 6. Modulación PSK

Este tipo de modulación, es la más usada para modular señales digitales mediante el uso de módems de datos.

### 3.2 Transmisión por desplazamiento de fase binaria (BPSK)

En este tipo de modulación son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia de portadora. Una de las fases representa el “1” y la otra es para el “0”. A medida que la señal digital de entrada cambia, la fase de la salida varía entre 0 y 180°. La Figura 7 representa en diagrama fasorial de la modulación BPSK.

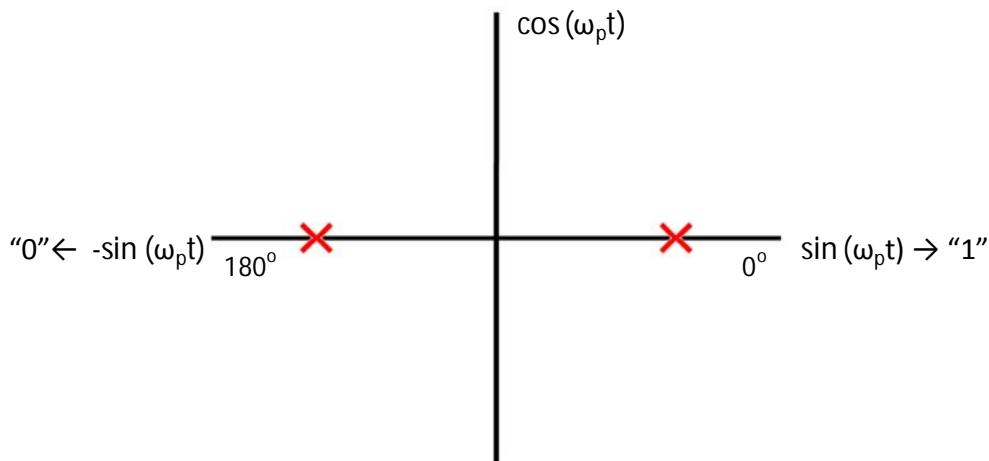


Figura 7. Diagrama fasorial de la modulación BPSK

### 3.3 Transmisión de desplazamiento de fase cuaternaria (QPSK)

QPSK es una forma de modulación angular o constante. QPSK es una técnica de modulación donde  $M=4$ , es decir, se presentan 4 fases de salida para una sola frecuencia portadora. Debido a que hay 4 fases de salida diferentes, tiene que haber cuatro condiciones de entrada diferentes. Para ello, se necesitan 2 bits a la entrada del modulador para producir 4 posibles condiciones. Éstas son, “00”, “01”, “10” y “11”. La Figura 8 muestra el diagrama fasorial de la modulación QPSK.

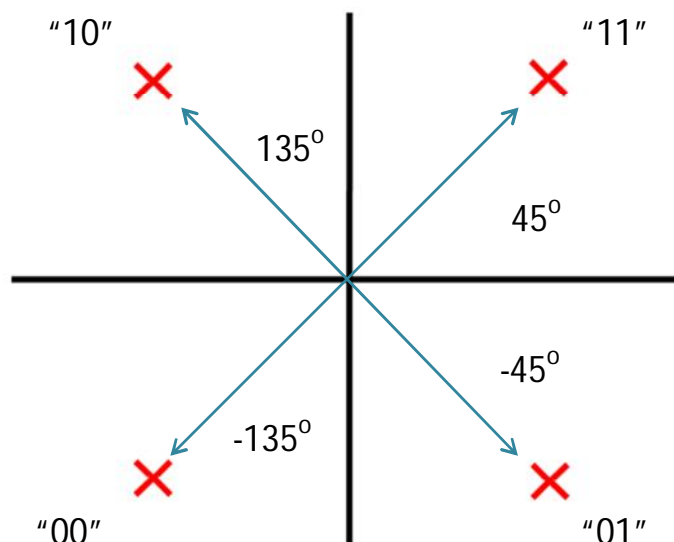


Figura 8. Diagrama fasorial de la modulación QPSK

### 3.4 Complementary Code Keying (CCK)

Complementary Code Keying (CCK) es un esquema de modulación utilizado en las redes inalámbricas (WLAN) que emplean las especificaciones IEEE 802.11b. En 1999, se adoptó esta modulación, para sustituir el código de Barker en redes inalámbricas digitales. Un código complementario contiene un par de secuencias de bits finitos de igual longitud, de tal manera que el número de pares de elementos idénticos (1 o 0) con una separación dada en una secuencia es igual al número de pares de diferencia de elementos que tienen la misma separación en la otra secuencia. Una red que utiliza CCK puede transferir más datos por unidad de tiempo para un ancho de banda dado, que una red que utiliza el código de Barker, porque CCK hace un uso más eficiente de las secuencias de bits.

Las redes inalámbricas que utilizan la especificación IEEE 802.11b emplean CCK para operar a velocidades de datos de hasta un máximo teórico de 11 Mbps en RF, en la banda de 2,400 GHz a 2,4835 GHz. Las redes que utilizan la especificación IEEE 802.11g emplean CCK cuando se opera a velocidades de 802.11b. A velocidades más altas (hasta un máximo teórico de 54 Mbps), IEEE 802.11g utiliza un esquema de modulación más sofisticado llamado Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM).

El estándar IEEE 802.11, define el uso de distintos tipos de modulación, en función de las velocidades de transmisión. Su elección se hace en función de la aplicación del sistema. Las modulaciones BPSK y QPSK son óptimas desde el punto de vista de la protección de error. BPSK se utiliza para transmisores de bajo costo que no requieren de altas velocidades. La modulación CCK permite codificar varios bits de datos directamente en un solo chip de 64 bits con ocho secuencias. Por lo tanto, el método CCK puede alcanzar una velocidad máxima de 5.5 Mbps mediante la codificación de 4 bits a la vez o hasta 11 Mbps mediante la codificación de 8 bits de datos.

Las redes de área local que funcionan bajo las variantes IEEE 802.11b y IEEE 802.11g, permite una gran variedad de modulaciones. La tabla 2 identifica las modulaciones y las tasas máximas de transferencia que utiliza la variante IEEE 802.11b, mientras que la tabla 3 muestra las modulaciones y las tasas máximas de transferencia para IEEE 802.11g.



TABLA II. MODULACIONES PARA IEEE 802.11 B

<b>Velocidad</b>	1 Mbps	2 Mbps	5.5 Mbps	11 Mbps
<b>Modulación</b>	BPSK	QPSK	CCK	CCK
<b>IEEE 802.11 b</b>				

TABLA III. MODULACIONES PARA IEEE 802.11 G

<b>Velocidad</b>	1 Mbps	2 Mbps	5.5 Mbps	6 Mbps	9 Mbps	11 Mbps	12 Mbps	18 Mbps	24 Mbps	36 Mbps	48 Mbps	54 Mbps
<b>Modulación</b>	BPSK	QPSK	CCK	OFDM	OFDM	CCK	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM
<b>IEEE 802.11 g</b>												





## Capítulo 4: Escenario, hardware utilizado y estrategias de medición.

En esta sección, describimos el escenario donde se han realizado la toma de medidas y el hardware y el software utilizado para realizar nuestras pruebas. También explicaremos las pruebas preliminares que se realizaron, para poder empezar a tomar medidas.

### 4.1 Lugar de la medición

Con el fin de hacer las medidas, hemos utilizado una piscina de 32 m<sup>2</sup> superficie, con una longitud de 8 metros y 4 metros de ancho. Se trata de una piscina de obra cuyas paredes están cubiertas por pequeños azulejos de gresite. La profundidad de la piscina oscila entre 1,5 m y 1,80 m. Hemos elegido esta estructura con el fin de evitar cualquier tipo de reflexión en las paredes, suelo y superficie del agua, debido al cambio de medio.

Las mediciones se realizan en agua dulce, cuya temperatura es de 27° C. Además, el valor de pH es de 7,2 y la cantidad de cloro y bromo disuelta en el agua es 0,3 mg / l.

### 4.2 Elementos utilizados en las pruebas

Para realizar las pruebas hemos utilizado un punto de acceso (AP) inalámbrico Dlink DWL-2100AP, con una antena, de tipo monopolo. Este AP puede trabajar bajo las variantes IEEE 802.11b/g. Puede ser configurado para trabajar como AP inalámbrico, como bridge, con conexión punto a punto, con otro AP, como bridge inalámbrico, con conexión punto-multipunto o como cliente inalámbrico. Su potencia de salida, está entorno a los 16 dBm.

Por otro lado, el monopolo vertical o antena vertical es una antena constituida de un solo brazo rectilíneo irradiante en posición vertical. Como se considera que un monopolo no es una antena completa, necesita ser completada por un plano de masa para poder funcionar correctamente. Ese plano de masa puede ser natural (por ejemplo, una superficie de agua que facilite la conducción de electrones), o bien artificial (una serie de conductores que se unen en la base del monopolo). La figura 9 muestra los diagramas de radiación típicos, tanto en el plano horizontal, como en el vertical, de un monopolo.

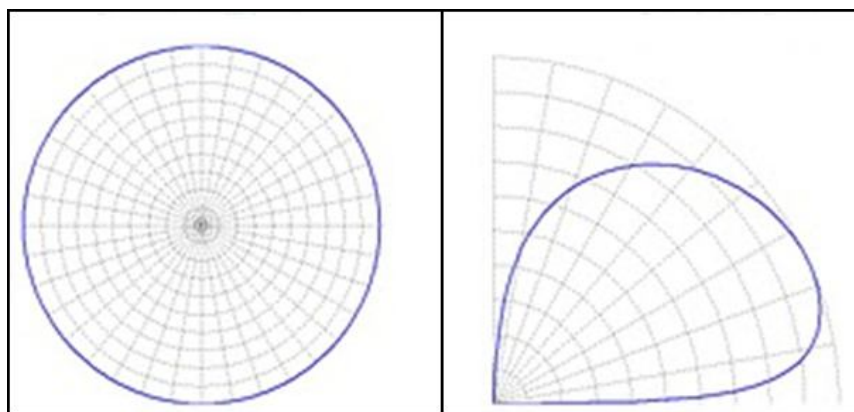


Figura 9. Diagrama de radiación horizontal y vertical de un monopolo.

También utilizamos un portátil, que usaremos, como segundo dispositivo en la red. Lo utilizaremos como sistema de monitorización de la red, desde fuera del agua. Para la conexión de las



antenas, desde dentro del agua, hasta los dispositivos, que están fuera, utilizamos 2 pigtaills de 3 metros.

La Figura 10 muestra la topología montada, con el AP, el ordenador y las dos antenas sumergidas dentro del agua.

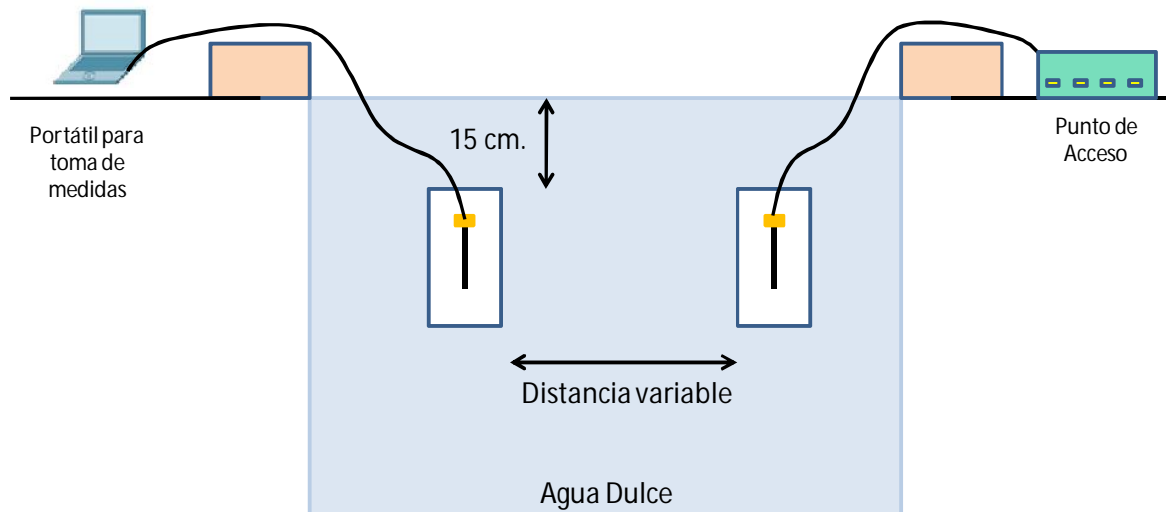


Figura 10. Topología montada para la toma de medidas.

Como software, hemos utilizado los comandos MS-DOS. La consola de MS-DOS presenta algunas utilidades y comandos, que nos permiten comprobar el estado de la conexión de una red.

### 4.3 Estrategias de medida y preparación del escenario.

En primer lugar debemos asegurarnos que las medidas son válidas y que la señal no se propaga fuera del agua. El primer paso es determinar la profundidad mínima a la que debemos tener la red. Para ello, hemos introducido la parte de la red del AP en el agua. Desde fuera, mediante la antena conectada al portátil, intentamos asociarnos a la red. Ambas antenas son orientadas, de manera que sus diagramas de radiación en el plano vertical están hacia abajo. Perdemos la conectividad, a partir de los 15cm de profundidad.

Con esta pequeña prueba, nos estamos asegurando, que la única señal que vamos a captar desde el portátil, será la proporcionada por la red, cuando esté totalmente sumergida en el agua.

La segunda prueba preliminar que realizamos, es comprobar cuando la antena, está directamente en contacto con el agua, emite de forma normal. Hicimos hermética las antenas y las sumergimos en el agua. Pudimos comprobar que de esta manera, no es posible emitir. Por tanto decidimos ponerla dentro de un recipiente hermético, que contuviese aire, para que así, la antena pudiese empezar a emitir dentro del aire y posteriormente la señal se propagase por el agua.

Realizamos distintas pruebas para el rango de frecuencias, comprendido entre los 2.412 GHz y 2.472 GHz. Estos valores, se corresponden con el espectro usado por los dispositivos que trabajan bajo el estándar IEEE 802.11b/g. Estas pruebas, nos permitirán caracterizar el comportamiento de una red subacuática, basada en ondas EM, que nos permitirá las altas tasas de transferencia que buscamos.



## Capítulo 5: Medidas obtenidas

En este capítulo, mostramos los resultados obtenidos, tras realizar todas las pruebas. Se han realizado pruebas para las frecuencias de 2.412 GHz, 2.437 GHz y 2.472 GHz, correspondiente a los canales 1, 6 y 13, del espectro frecuencial que expone el estándar IEEE 802.11. Analizamos la variación del tiempo de ida y vuelta del ping (round trip time – RTT), entre ambos dispositivos, haciendo variaciones de la distancia entre las antenas. También hemos medido la cantidad de paquetes perdidos, el comportamiento de la red y las tasas máximas de transferencia que puede ofrecer la red, en función de la modulación empleada. Cada prueba, ha tenido una duración de 3 minutos, donde hemos considerado como paquete erróneo, todos aquellos, que presentar un RTT igual o mayor de 3 segundos. Hemos medido el comportamiento de las modulaciones BPSK, QPSK y CCK, con tasas de transferencia máxima de 1 Mbps, 2 Mbps, 5.5 Mbps y 11 Mbps. [36]

### 5.1 Medidas realizadas para 2,412 GHz

En la Figura 11 vemos el valor de ida y vuelta del ping para 1 Mbps. Como podemos ver, a los 15 cm el valor promedio es de 16 ms, presentando un máximo de 894 ms en la muestra 55. En 15,5 cm, observamos un valor medio de 14 ms (en las muestras recibidas) y un máximo de 42 ms. A los 16 cm, no se reciben paquetes.

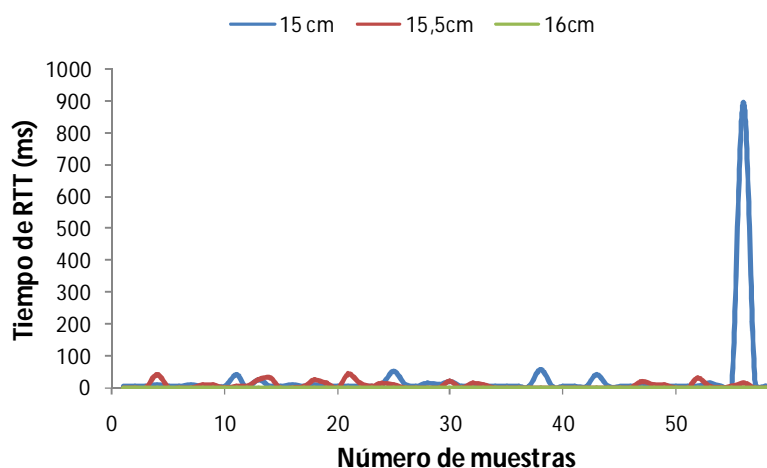


Figura 11. RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 1 Mbps a 2.412 GHz.

La Figura 12 se muestra el valor RTT de ping para 2 Mbps. Como podemos ver, para una distancia de 15 cm el valor medio de ping es de unos 13 ms, con un máximo de 629 ms en la muestra 28. Para 15,5 cm, el sistema presenta un valor medio de 26 ms (calculado a partir de las muestras recibidas) y un máximo de 74 ms en la muestra 8. A los 16 cm, registramos muy pocas muestras recibidas, presentando un valor de medio RTT de unos 21 ms.

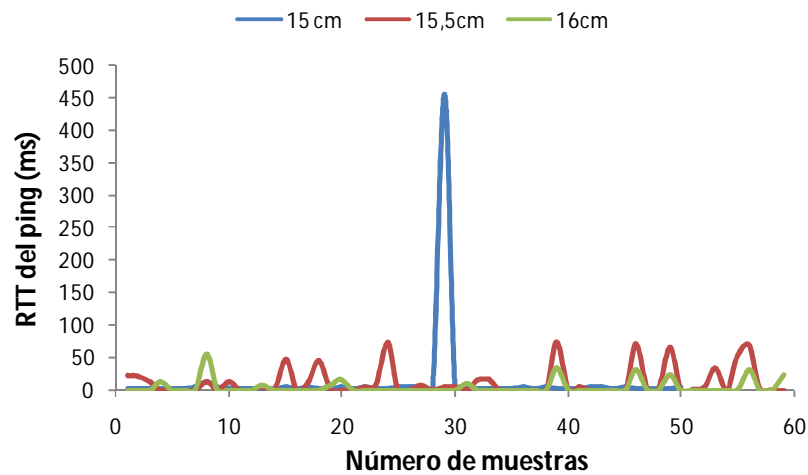


Figura 12. RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 2 Mbps a 2.412 GHz.

Cuando trabajamos con 5.5 Mbps, los valores de RTT obtenidos, son los mostrados en la Figure 13. Como podemos ver, el valor de tiempo de Ida y vuelta medio, cuando los dispositivos se encuentran a 15cm está en torno a los 17ms. No obstante, vemos un pico de 450 ms en la muestra 58. En 15,5 cm, el sistema presenta un valor medio de 19 ms, presentando varios picos de valores cercanos a los 100 ms. Por último a distancias de 16 cm, se reciben muy pocas muestras. El valor de RTT es de unos 23ms.

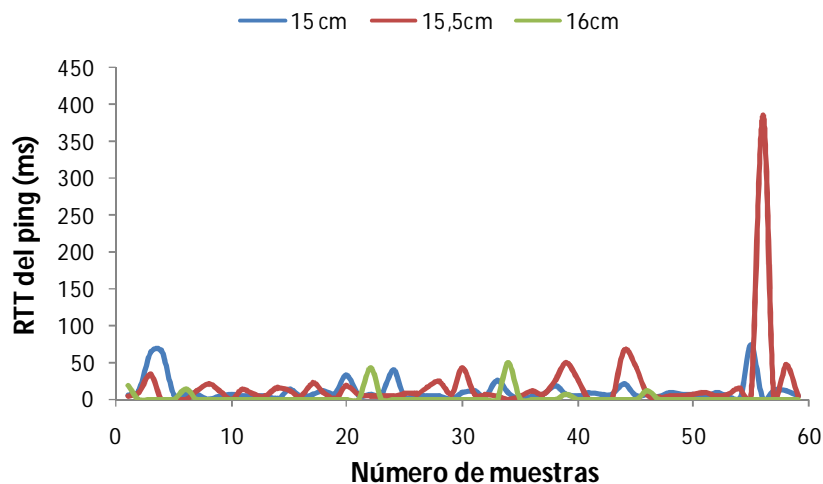


Figura 13. RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 5.5 Mbps a 2.412 GHz.

Figura 14 muestra los valores de RTT del ping trabajando a 11 Mbps. A distancias de 15 cm el sistema tiene un valor máximo de 70 ms en la muestra de tercera, mientras que presenta un valor medio de 11 ms. En 15,5 cm, el sistema ofrece un valor medio de 48 ms y un máximo de 598 ms, en las últimas muestras mostradas, mientras que a los 16 cm, las muestras recibidas tienen un valor medio de 38 ms.

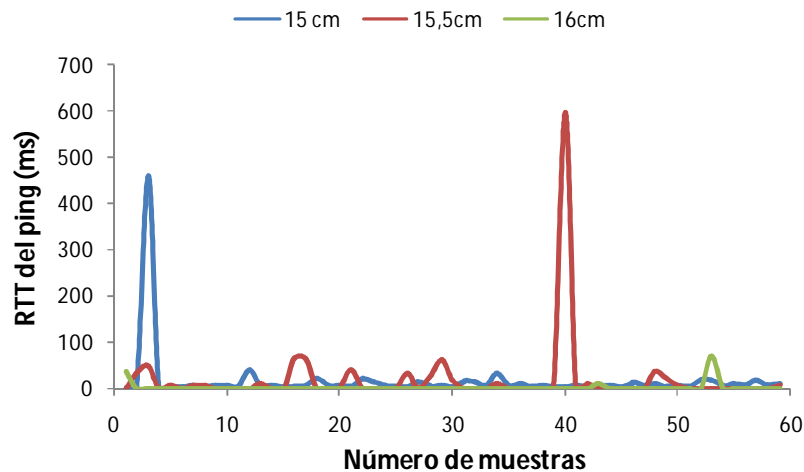


Figura 14. RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 11 Mbps a 2.412 GHz.

La Figura 15 muestra la comparación del número de paquetes entregados cuando el sensor está transmitiendo a 2,412 GHz. Podemos observar que el peor comportamiento lo registramos para los 2Mbps, mientras que el resto de tasas, tienen un comportamiento similar, aunque a 5,5 Mbps, la cantidad de paquetes entregados, se mantiene cercana al 90%, prácticamente hasta los 16cm.

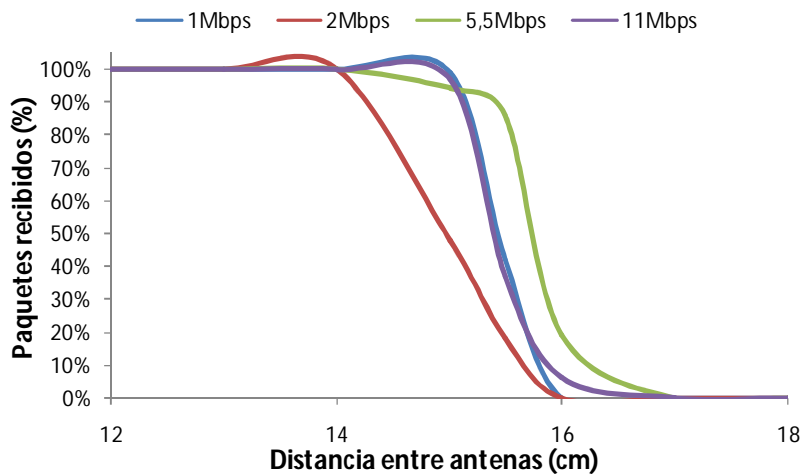


Figura 15. Paquetes recibidos a 2.412 GHz.

La Figura 16 muestra la comparación del valor promedio de RTT del ping cuando el sensor está transmitiendo a 2,412 GHz. Vemos que la tasa de bits de datos con un menor retraso es de 11 Mbps, ya que la pendiente presentada es menor que en los otros casos, mientras que el peor de los casos se muestra para 1 y 2 Mbps.

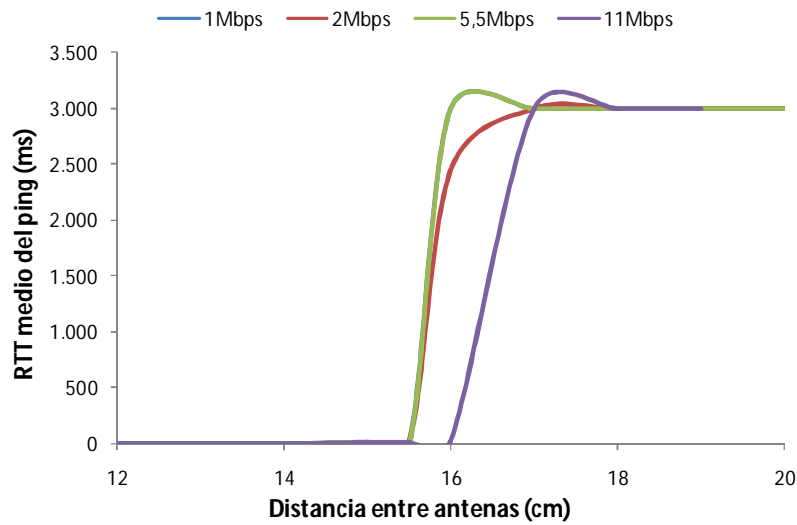


Figura 16. RTT medio del ping a 2.412 GHz

## 5.2 Medidas realizadas para 2,437 GHz

La Figura 17 muestra RTT del ping para 1Mbps. Como podemos ver, a los 15 cm el valor de RTT promedio es de 17 ms, presentando un máximo de 800ms en la muestra 30. En 15,5 cm, hay un pico de 308 ms en la muestra 50, con un valor medio de 9 ms (en las muestras recibidas), mientras que a los 16 cm, se reciben muy pocos paquetes, con un valor medio de RTT de 13 ms.

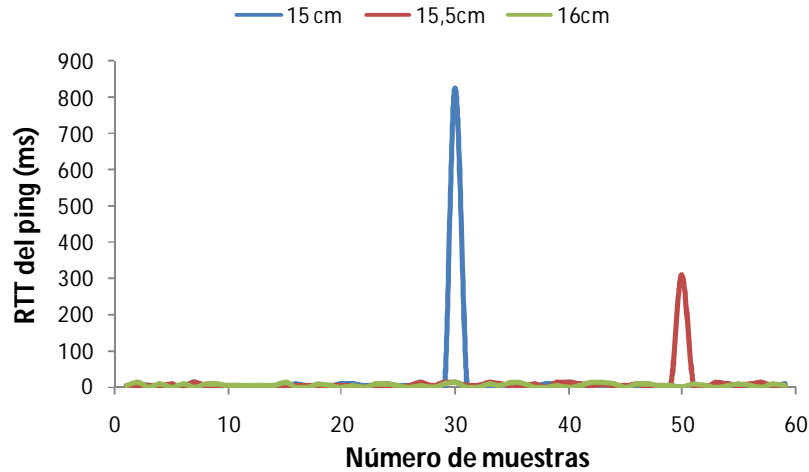


Figura 17. RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 1 Mbps a 2.437 GHz.

La Figura 18 muestra el tiempo de ida y vuelta del ping para 2 Mbps. A una distancia de 15 cm, el valor medio calculado es de 7 ms. En 15,5 cm el sistema presenta varios picos alrededor de 50 ms, mientras que a los 16 cm se observa un promedio de alrededor de 16 ms, con pérdidas de bastantes muestras.

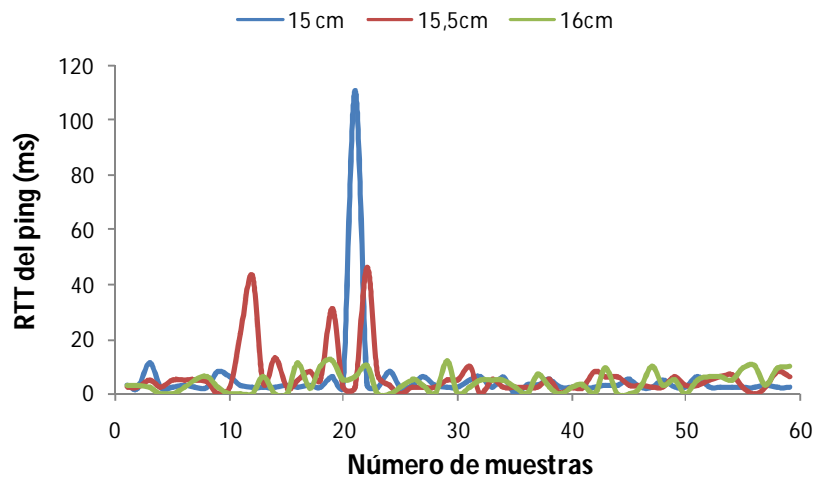


Figura 18. RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 2 Mbps a 2.437 GHz.

La Figura 19 muestra el valor de tiempo de RTT para 5.5 Mbps. A una distancia de 15 cm, su promedio es de 11 ms. con un pico, cercano a los 600 ms. en la muestra 4. Para 15,5 cm el sistema tiene un pico de 495 ms, mientras que el resto de muestras recibidas, presenta un valor medio de 23 ms. A los 16 cm, no hay ningún paquete registrado.

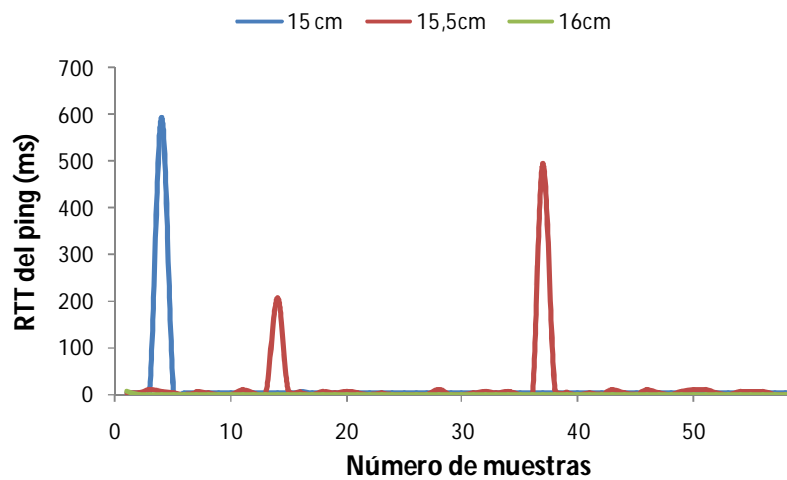


Figura 19. RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 5,5 Mbps a 2.437 GHz.

La Figura 20 muestra el valor de RTT cuando trabajamos a 11 Mbps. A los 15 cm el sistema presenta un valor promedio de 5 ms. En 15,5 cm, el promedio es de 10 ms. A los 16 cm, hay pocos paquetes recibidos, con un valor medio calculado de unos 10 ms.

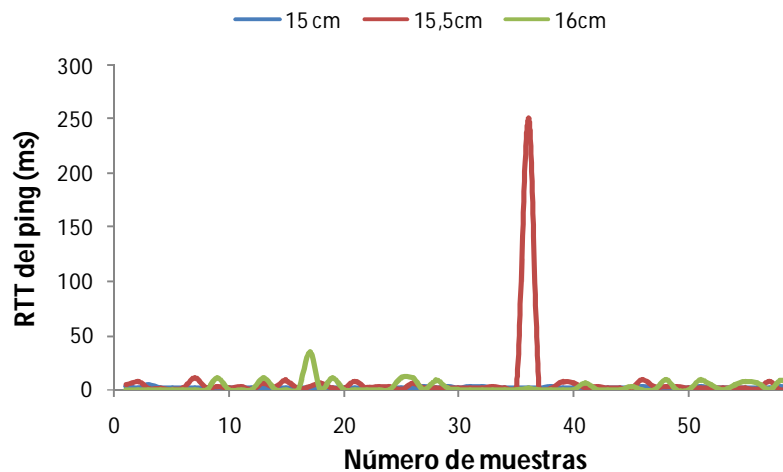


Figura 20. RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 11 Mbps a 2.437 GHz.

La figura 21 muestra la comparación del número de paquetes entregados cuando el sistema está transmitiendo a 2,437 GHz. Vemos que el mejor comportamiento se muestra para las tasas de transferencia de 1 Mbps, mientras que la peor muestra es para tasas de 11Mbps.

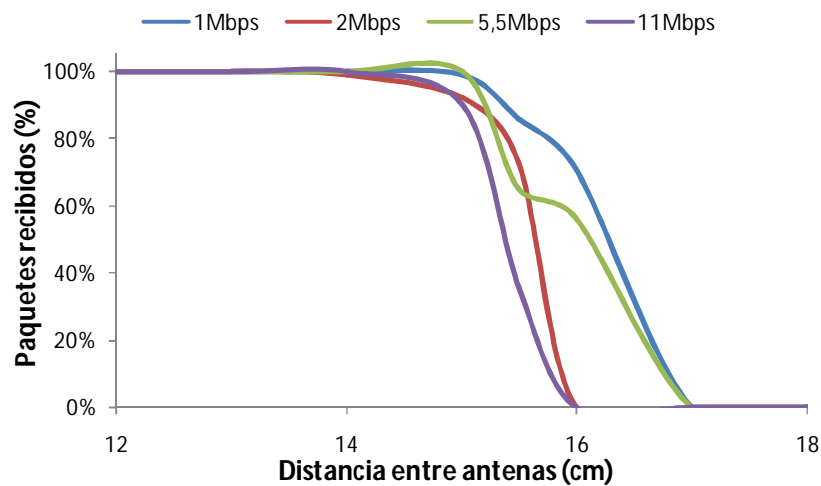


Figura 21. Paquetes recibidos para 2.437 GHz.

En la Figura 22 mostramos la comparación del valor promedio de RTT del ping, cuando el sistema está transmitiendo a 2,437 GHz. Podemos ver que los valores más bajos de tiempos, se registran para las tasas de transferencia de 1 y 2 Mbps, mientras que el peor de los casos se muestra para 5.5 Mbps.



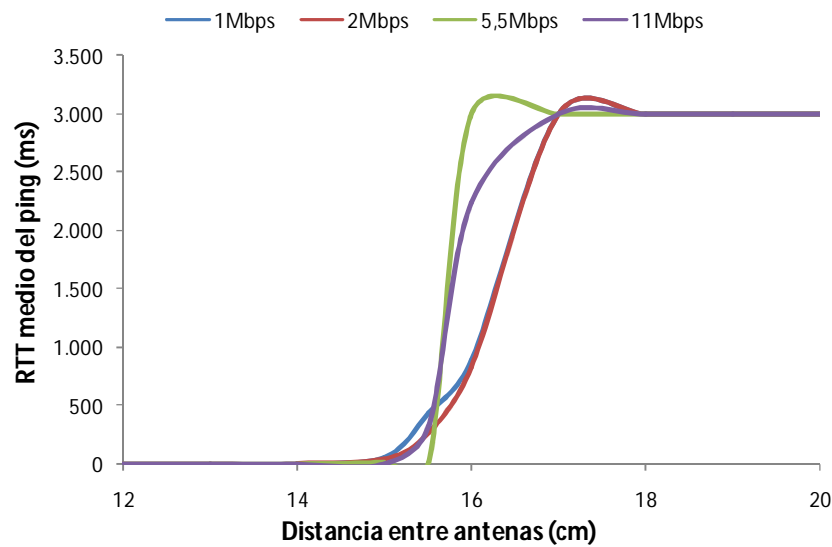


Figura 22. RTT medio del ping a 2.437 GHz.

### 5.3 Medidas realizadas para 2,472 GHz

La Figura 23 muestra el valor de RTT para 1 Mbps cuando transmitimos a 2,472 GHz. A los 15 cm el valor medio de ida y vuelta del ping es de 24 ms. Para distancias de 15,5 cm, calculamos un valor medio de RTT, a partir de las muestras recibidas, de 45 ms., mientras que a los 16 cm, las pocas muestras recibidas tienen un valor medio de 58 ms.

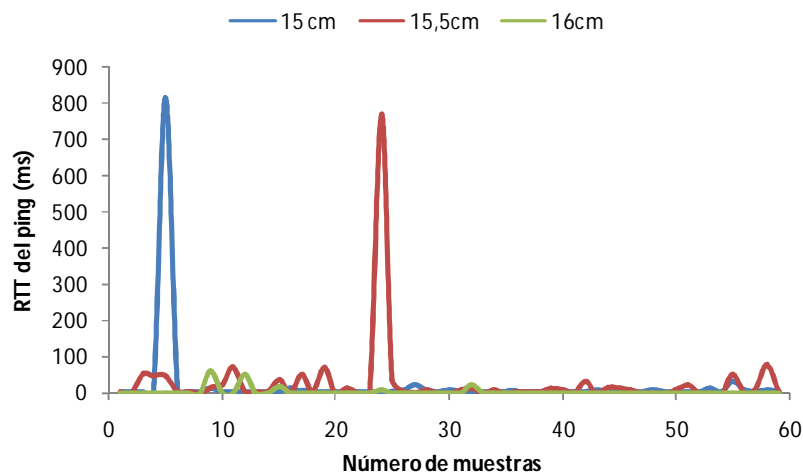


Figura 23. RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 1 Mbps a 2.472 GHz.

La Figura 24 muestra el RTT para tasas de transferencia de 2 Mbps. Como podemos ver, para distancias de 15 cm, el valor promedio es de 16 ms., manteniéndose bastante estable durante todo el periodo de simulación. En 15,5 cm, el sistema presenta varios picos cercanos a los 40 ms., mientras que a los 16 cm, apenas se registraron muestras, aunque su valor de RTT, estuvo cercano a los 26 ms.

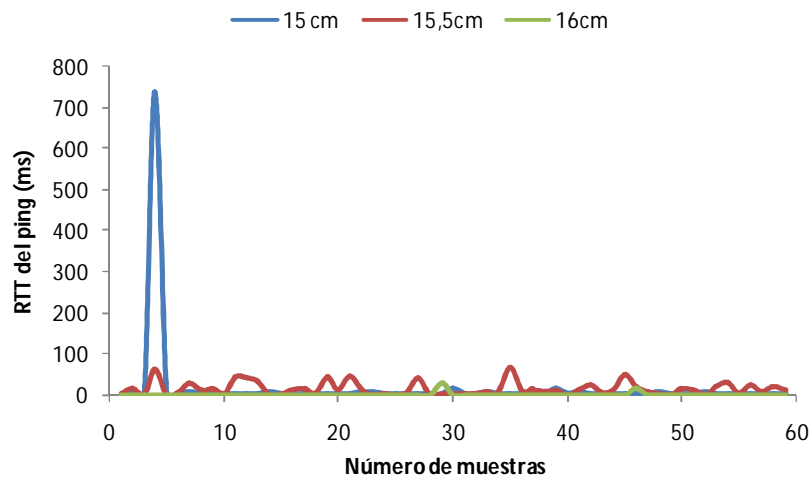


Figura 24. RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 2 Mbps a 2.472 GHz.

La Figura 25 muestra el valor de tiempo de ida y vuelta del ping para 5.5 Mbps. A simple vista, observamos que se tratan de los peores resultados, que hemos recogido, mostrando un comportamiento, poco estable. Por una parte, tenemos que para distancias entre dispositivos, de 15 cm, obtenemos un valor medio de aproximadamente 50 ms. Para distancias de 15,5 cm, el valor promedio es de 167 ms., mientras que para los 16 cm, las pocas muestras recibidas, presentan retardos medios de 200ms.

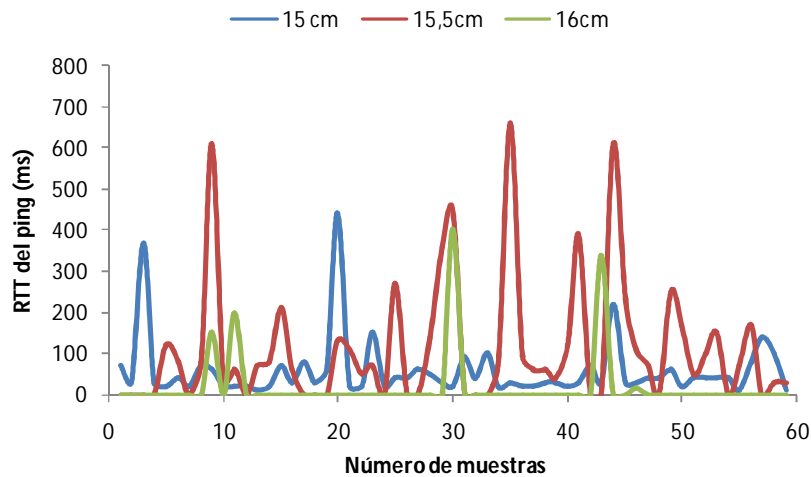


Figura 25. RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 5,5 Mbps a 2.472 GHz.

La Figura 26 muestra el valor de RTT para 11 Mbps. A 15 cm del sistema tiene un pico de 474 ms. en la muestra 58, mientras que su valor medio se sitúa en 14 ms. En 15,5 cm, el valor promedio está alrededor de los 20 ms., con algunos picos, que superan los 50ms. Por último, a los 16 cm, las muestras recibidas tienen un valor medio de 29 ms.

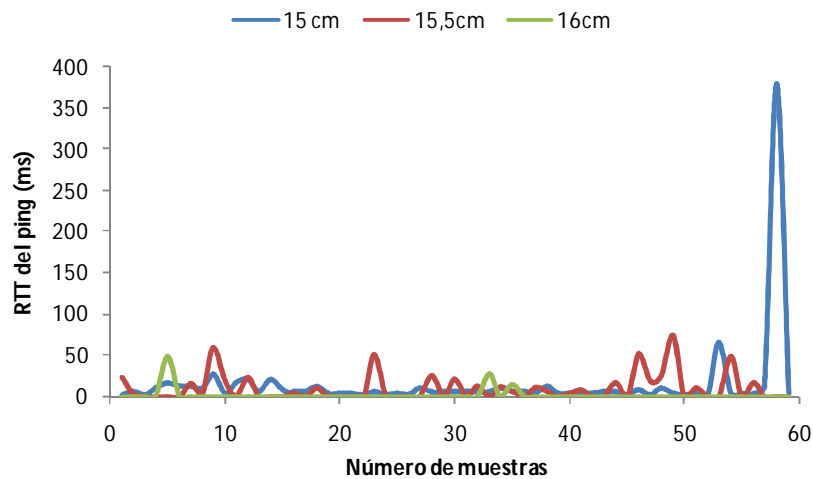


Figura 26. RTT a 15, 15.5 and 16 cm para 11 Mbps a 2.472 GHz.

La figura 27 muestra una comparación de la cantidad de paquetes recibidos cuando el sistema está trabajando a 2,472 GHz. A diferencia del caso anterior, ahora, las tasas de transferencias de 11 Mbps, muestran un comportamiento ligeramente mejor, que el resto de velocidades, aunque la velocidad de 1Mbps, sigue mostrándose más estable en todo el dominio de la prueba. El peor resultado se obtiene de 2 Mbps.

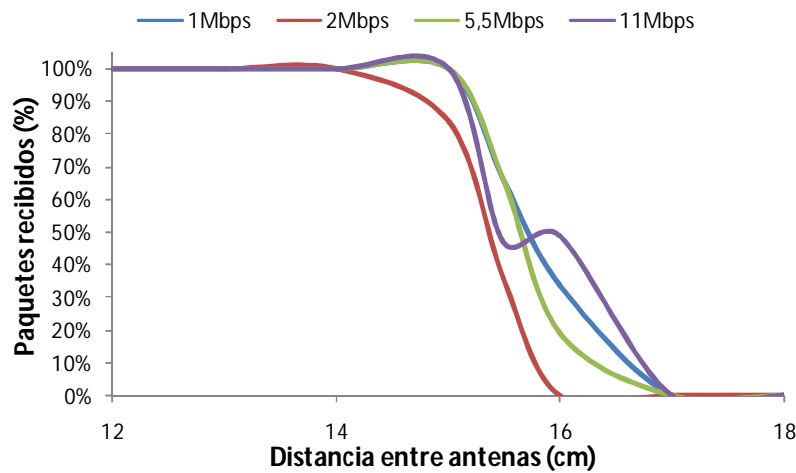


Figura 27. Paquetes recibidos a 2.472 GHz.

La figura 28 muestra la comparación del valor medio del RTT del ping cuando el sistema transmite a 2,472 GHz. En este caso, el comportamiento es idéntico para los tres casos.

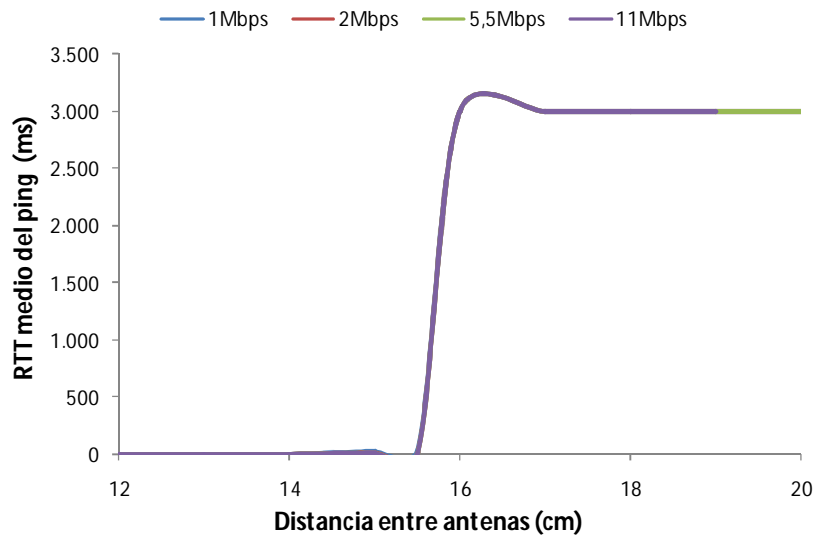


Figura 28. RTT medio del ping a 2.472 GHz.

Como hemos visto en las anteriores imágenes, cuando aumentamos la frecuencia, el número de paquetes recibidos, tiende a reducirse. Por los resultados, parece que la modulación más perjudicada, por el aumento de la frecuencia es CCK. Por otra parte, la modulación BPSK, que se utiliza para tasas de transferencia de 1 Mbps, resulta ser bastante estable en todas las pruebas, mientras que si analizamos los valores de RTT, podemos ver, que existe una ligera tendencia a unificar los valores de las tres modulaciones, tal y como hemos podido ver en la Figura 28.

Por otra parte y contrariamente a lo que pensábamos inicialmente, parece que el funcionamiento global, mejora ligeramente, cuando trabajamos a 2.437 GHz que a 2.412 GHz, pues ganamos 1 cm.



## Capítulo 6: Diseño de un nodo multisensor

Hasta ahora, hemos podido comprobar, mediante las baterías de medidas realizadas, que es viable implementar una red subacuática basada en enlaces electromagnéticos. Como uno de los requisitos que debe cumplir un nodo sensor inalámbrico, es que sea pequeño y que además, sea alimentado con baterías o fuentes de energía alternativa, en este capítulo, proponemos el diseño de un nodo subacuático multisensor, que pueda ser utilizado, en una red como la que hemos estado probando.

Cuando hablamos de nodos sensores, solemos tener en cuenta una serie de características [5]. Un nodo sensor es un dispositivo electrónico que se utiliza como una interfaz entre las magnitudes físicas que se pueden detectar dentro de un medio y una red inalámbrica de datos [37, 38]. Un nodo se compone de cuatro partes principales: (1) fuente de alimentación, que consiste en una batería y una serie de convertidores DC/DC, (2) unidad de procesamiento, que por lo general consiste de un pequeño procesador y memoria, (3) los sensores físicos y (4) el circuito de transmisor-receptor, es decir, un sistema de radio que debe estar formado por un transmisor y un receptor o un sistema dual que sea capaz de realizar ambas funciones. La Figura 29 muestra el diagrama de bloques de un nodo sensor inalámbrico típico.

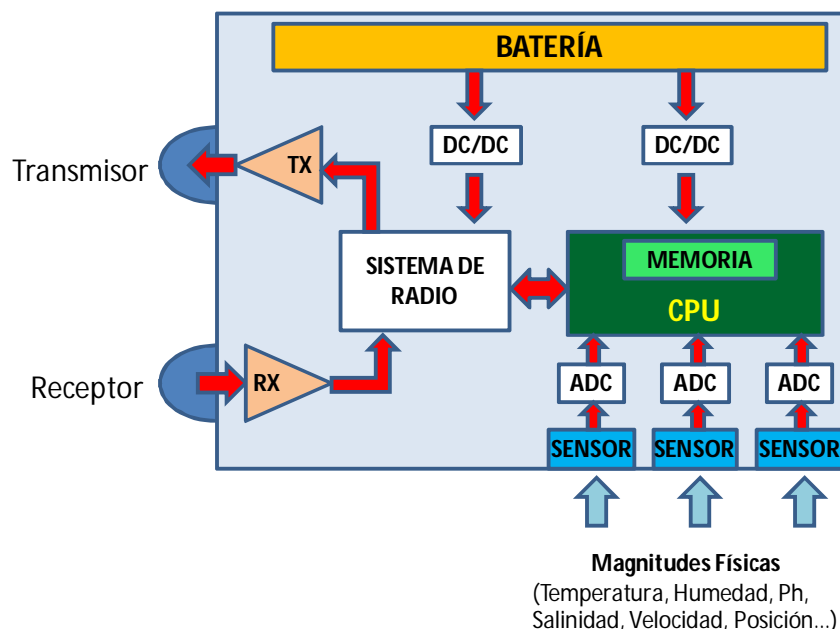


Figura 29. Diagrama de bloques típico de un nodo sensor inalámbrico.

- **La Unidad Central de Procesamiento (CPU).** Es responsable de la lectura de los sensores físicos y de extraer información relevante. También se encarga de la digitalización de los datos y de la aplicación de los protocolos de red. La CPU de un nodo sensor inalámbrico determina tanto la energía, como las capacidades de cómputo de un nodo sensor.
- **El sistema de radio.** Permite la comunicación inalámbrica entre los nodos de la red y con el mundo exterior. Factores tales como esquema de modulación, transmisión de datos en la red, potencia de transmisión y ciclo de trabajo puede afectar directamente a las características de consumo de energía del sistema global. En general, un nodo puede trabajar básicamente en tres modos de funcionamiento diferentes: activo (ya sea transmitir o recibir), reposo y el sueño. Algunos estudios sobre los protocolos de enrutamiento y WSN muestran que, contrariamente a la creencia popular, el consumo de energía en modo de espera es bastante alto, comparable a la energía que se consume en el modo activo [39]. Por esta razón, se recomienda apagar completamente el receptor de radio cuando no se va a utilizar. Por otra parte, algunas



cuestiones relacionadas con el periodo de transición entre los distintos estados y la cantidad de energía disipada, en esos instantes, debe ser considerada.

- **Sensores.** Son transductores que se encargan de transformar una magnitud física o química (variable instrumental) en una señal eléctrica útil. Algunos ejemplos de variables de instrumentación son la temperatura, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, humedad y pH. La señal eléctrica se puede reflejar como un cambio de magnitud en el propio sensor, como la resistencia o la capacidad [40].
- **Baterías.** Son elementos complejos cuyo funcionamiento depende de muchos factores incluyendo el tamaño de la batería, el material del electrodo y la velocidad de difusión de los materiales activos en el electrolito. Hay muchos tipos de baterías recargables y no recargables que se pueden utilizar en aplicaciones de WSN. De acuerdo con su composición electroquímica, que determina la eficiencia energética, podemos distinguir entre Ni-Cd, Ni-Zn, Ag Zn, Ni-MH y las baterías de iones de litio, entre otros. Hay algunos efectos importantes a considerar, al igual que el efecto de la relajación y el efecto de la capacidad nominal [37], que determinan en gran medida la duración de la batería. Es posible recargar la batería del nodo sensor con la energía extraída del medio ambiente, como la luz, el viento, las vibraciones [41] y de campos electromagnéticos.
- **Convertidores DC/DC.** También llamados reguladores de voltaje, son responsables de proporcionar los voltajes apropiados para los diferentes circuitos en el nodo sensor. Los reguladores lineales tienen más pérdidas de energía, que los reguladores conmutados (pérdida de energía típicos entre el 5-15%).

## 6.1 Implementación de la propuesta

Las características que buscamos en nuestro nodo sensor inalámbrico subacuático son, por una parte, que tenga un tamaño reducido y que su consumo sea tan bajo como sea posible. Además, queremos que permita conectar diversos tipos de sensores, con distintas interfaces. Y por último que permita la compatibilidad entre dispositivos. Para ello, hemos seleccionado una serie de componentes, las características de los cuales, iremos viendo.

Para la implementación de nuestro nodo sensor inalámbrico utilizaremos el MatchPort [42]. El MatchPort b/g de Lantronix, es un sistema embebido que actúa como una pasarela entre una red inalámbrica basada en los estándares IEEE 802.11 b/g y una red de datos cableada conectada a él mediante un puerto Ethernet. Lleva también incorporados dos juegos de pines para implementar dos puertos RS-232 y 8 GPIO configurables desde su interfaz gráfica, para controlar otros tipos de sensores, que se basa su funcionamiento en sistemas ON/OFF. Sus terminales son basados en la tecnología CMOS con niveles lógicos de 3.3V, con velocidades de trabajo que pueden oscilar entre los 300bps y los 921Kbps. Las tramas pueden ser de 7 u 8 bits con 1-2 bits de parada. Además puede configurarse con paridad par/impar o simplemente sin paridad e incluso decidir entre el empleo de control flujo, empleando las señales (CTS/RTS) o no, y simplemente se emplean las señales TX y RX. Funciona con un procesador tipo SoC con 256KB de memoria SRAM y 2MB de memoria Flash para almacenar páginas web y el propio firmware del dispositivo. La antena que se utiliza tiene una ganancia de 2 dBi.

Mediante el Integrado Max233CPP, convertimos las señales procedentes del MatchPort, con niveles lógicos TTL a señales con niveles lógicos acordes con lo estipulado en el estándar RS-232. Existen diversos integrados con la misma función, con distintos valores de alimentación y otras configuraciones. Nosotros hemos optado por esta, puesto, que es de las pocas que admite ser alimentado a 3,3 V y porque es la que menos componentes pasivos presenta y consecuentemente, la que menor consumo tendrá. La configuración elegida, es la mostrada en la Figura 30.

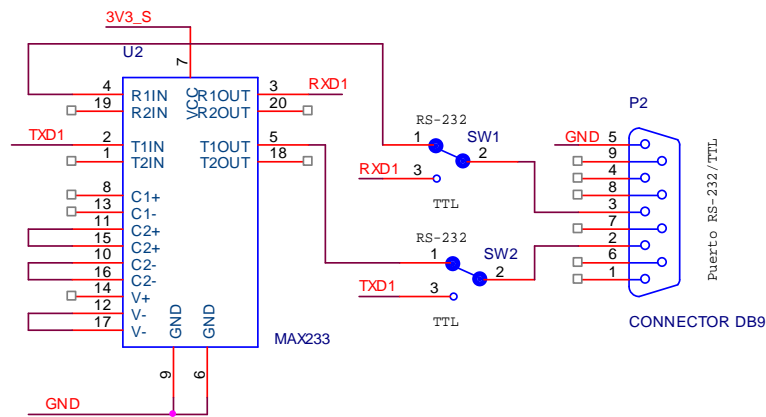


Figura 30. Conversión TTL-RS232

Con los interruptores, podemos conmutar entre el tipo de salida que se desea, RS-232 o TTL. En la primera de las opciones, la señal procedente del MatchPort, pasa a través del Max233cpp hasta llegar al conector DB9; La opción TTL, lleva las señales procedentes del MatchPort directamente al puerto.

Otro requisito que buscamos para nuestro nodo es que su consumo sea lo más reducido posible, con el único objetivo de prolongar la vida útil de la red. Para las pruebas preliminares, hemos realizado un sencillo montaje con el fin de alimentar el dispositivo con baterías. Ya que el sistema se alimenta a 3,3 V, hemos empleado un regulador de tensión LDO 98AGL52B y un pequeño condensador para filtrar la tensión de salida y evitar las fluctuaciones de voltaje. La Figura 31 muestra la evolución del consumo de energía, en función del tiempo y el consumo medio del dispositivo. Como podemos ver, el dispositivo presenta un consumo medio de energía en modo activo de 460 mW. Al transmitir o recibir datos, el consumo de energía aumenta a 594 mW, mientras que el dispositivo consume alrededor del 1,1 W en su fase de inicialización, que dura aproximadamente 10 segundos. El comportamiento del dispositivo se ha sido objeto de seguimiento durante 2,5 minutos, y tras haber iniciado el sistema, se han realizado envíos cada 30 segundos.

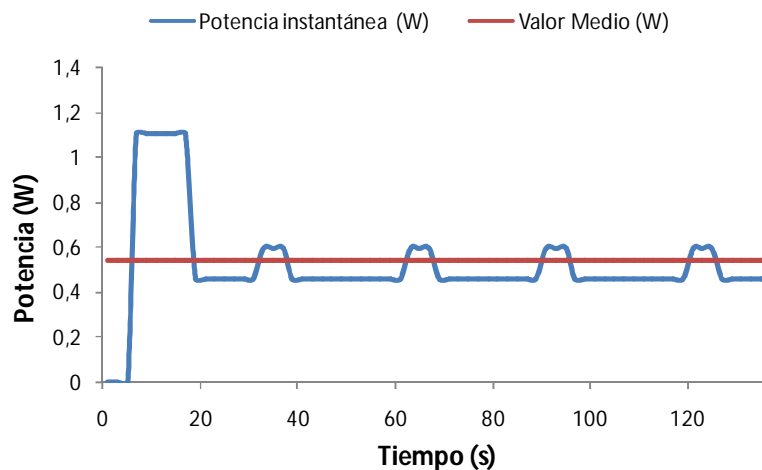


Figura 31. Consumo del nodo sensor subacuático inalámbrico.

En realidad, la idea final que perseguimos, para la parte de alimentación es emplear un regulador de corriente como por ejemplo el LM2676, que nos permita alimentar al nodo con baterías de mayor tamaño y desde el propio circuito, extraer los 3.3V o 5 V que requieran los integrados. El diagrama del circuito que podemos utilizar es el mostrado en la Figura 32.

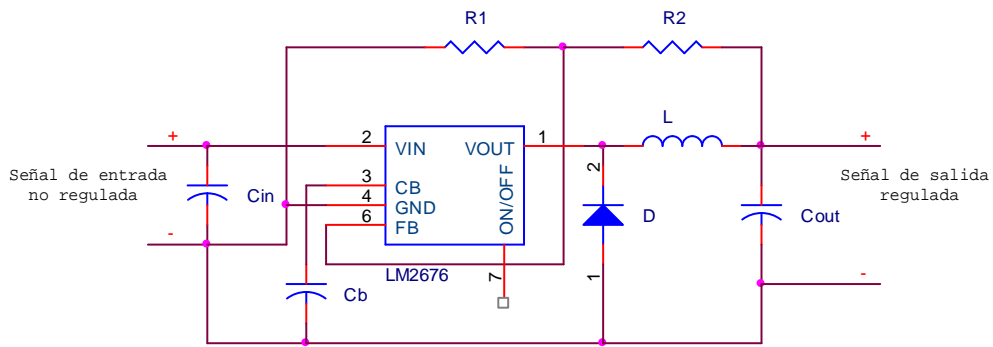


Figura 32. Circuito de alimentación basado en el integrado LM2676.

La función principal de este dispositivo es tomar la señal de alimentación de entrada y convertirla a la tensión de salida que nosotros deseamos. La energía que no es utilizada por el circuito de carga será almacenada en los condensadores que lleva conectados. Con ello nos aseguramos que en el caso de que el circuito que tenemos conectado a la salida, tenga consumos puntuales superior a los 1,2 W, el suministro no quedará entrecortado.

La Figura 33 muestra el modelo en sus primeras fases de desarrollo para realizar nuestras pruebas.



Figura 33. Nodo sensor subacuático inalámbrico.

Con el fin de realizar las pruebas, se colocó el dispositivo en una caja sellada para que sea resistente al agua y la variación de la presión atmosférica. Se realizaron de nuevo las pruebas llevadas a cabo con el punto de acceso y el portátil, pero en este caso, con el nodo implementado y el portátil. Los resultados obtenidos han sido prácticamente idénticos.





## Capítulo 7: Conclusiones

Para llevar a cabo este proyecto se han empleado aproximadamente unos 3 meses y medio. Durante este tiempo hemos estado investigando sobre el comportamiento de las señales electromagnéticas bajo el agua. Nuestro objetivo inicial en este trabajo, ha sido comprobar la viabilidad de implementar enlaces inalámbricos subacuáticos, utilizando señales electromagnéticas. Para ello, hemos empleado dispositivos comerciales, compatibles con el estándar IEEE 802.11b, que permitiesen configurar diferentes tasas de transferencia y modulaciones.

Para ello, hemos realizado una serie de medidas, con el objetivo de caracterizar el comportamiento de un nodo de sensor subacuático inalámbricos. Una vez comprobado la posibilidad de establecer enlaces subacuáticos, hemos propuesto e implementado el diseño de un prototipo de un nodo multisensor, capaz de transmitir a altas tasas de transferencia. Finalmente, hemos comprobado el funcionamiento del nodo implementado.

### 7.1 Conclusión del trabajo realizado y ámbito de aplicación

Hemos realizado varias pruebas con diferentes frecuencias y modulaciones con el objetivo de comprobar varios parámetros como la profundidad mínima, la distancia entre los dispositivos y características de la señal de transmisión.

El primer factor que observamos, es que contrariamente a lo que pensábamos inicialmente, ya que en principio, al aumentar la frecuencia, también lo hacía la atenuación, parece que el funcionamiento global del sistema, mejora ligeramente, cuando trabajamos a 2.437 GHz que a 2.412 GHz, pues ganamos 1 cm., de distancia, entre los dispositivos.

Además, como hemos podido ver, parece que la modulación BPSK presenta mayor estabilidad que el resto de modulaciones analizadas, aunque cuando se aumenta la frecuencia, también vemos aumentar el valor del tiempo de ida y vuelta del ping. Sin embargo, y a pesar de este hecho, la cantidad de paquetes recibidos es todavía mejor que en el resto de casos. Es posible que BPSK pueda parecer mejor, en comparación con otras modulaciones, ya que esta modulación utiliza sólo dos símbolos, de modo que la probabilidad de errores que tiene, es menor.

Este tipo de redes pueden utilizarse para controlar el agua superficial con suficiente precisión, especialmente en los estanques donde hay algunas plantas venenosas que pueden contaminar el agua. Hay otros casos en los pantanos, donde la calidad del agua de la superficie es diferente dependiendo de la temporada. En verano, cuando hace más calor y hay más horas de sol, el agua superficial puede contener material orgánico. El pH es diferente y la contaminación que puede provenir de industrias y carreteras cercanas puede resultar complicada de eliminar. Estas aguas superficiales de baja calidad, no son óptimas para el consumo humano, pero pueden ser utilizadas por las industrias para hacer funcionar sus plantas y proveer de agua el sistema de refrigeración de las mismas. Como último ejemplo, esta red puede utilizarse, en aplicaciones del proyecto del telescopio de neutrinos, sistema que se ubica a 3000m de profundidad [43]. A estas profundidades, cualquier pieza de material empleada para sellar las esferas tiene un precio bastante elevado. Con este tipo de redes, podría realizarse dicha comunicación, sin la necesidad de realizar orificios en la esfera.

### 7.2 Valoración personal

De la realización de este trabajo, como del resto de trabajos finales de titulación que he podido realizar, creo que aparte de lo meramente material, extraído del trabajo, como son las publicaciones y las conclusiones y conocimientos adquiridos, que nos pueden abrir nuevas líneas de investigación, para proseguir con mis estudios de doctorado, debemos considerar otro tipo de aprendizajes.



Cuando te mueves, dentro de un grupo de investigación tan activo, como en el que, por suerte me encuentro en estos momentos, resulta de vital importancia, seguir innovando y buscando nuevas ideas, para abrir líneas de investigación, con las que poder seguir trabajando. Es importante, saber cuándo debes trabajar en grupo y a partir de qué punto, debes emprender tu propio camino. Cada vez, que realizo un trabajo de este estilo, un artículo o cualquier otro tipo de trabajo, relacionado con la investigación, creo que se establece un antes y un después. Cada nuevo trabajo, me permite rectificar errores cometidos y mejorar respecto al anterior. Para mí, esto es aprender y evolucionar y además de hacerlo a nivel personal, también me permite mejorar mis cualidades, para poder ayudar a otros compañeros, que lleguen al grupo.

Como resultado del trabajo realizado y mostrado en esta memoria, se han obtenido diferentes publicaciones en forma de artículos presentados a un congreso, una revista y un capítulo de libro. Todos ellos han sido aceptados y están a la espera de ser presentados, en el caso del artículo y a la espera de publicación en el resto. Las referencias de los documentos, son las siguientes:

- S. Sendra, J. Lamparero, J. Lloret, M. Ardid, "Underwater Communications in Wireless Sensor Networks using WLAN at 2.4 GHz", In proceedings of International Workshop on Marine Sensors and Systems (MarSS 2011), 17-22 October 2011, Valencia, Spain.
- S. Sendra, J. Lloret, M. Garcia and Jose F. Toledo, "Power saving and energy optimization techniques for Wireless Sensor Networks", Journal of Communications, Academy Publisher. 2011. En Edición
- M. Garcia, S. Sendra, M. Atenas, and J. Lloret, "Underwater Wireless Ad-hoc Networks: a Survey". Book: Mobile Ad hoc Networks: Current Status and Future Trends, CRC Press. Pp. 379-411. 2011

### 7.3 Futuras líneas de investigación

En este trabajo hemos realizado una serie de medidas situadas a una profundidad de 15cm, y una distancia entre dispositivos de unos 16 cm. Este tipo de redes nos permitiría extender una red para realizar monitorizaciones de medios con una elevada exactitud.

La idea principal que tenemos, para proseguir con esta línea, es aumentar la distancia entre dispositivos, con el principal objetivo de cubrir amplias zonas, disminuyendo el número de nodos utilizados. Para ello, queremos establecer nuevas pautas de actuación. La primera, es que, para calcular las pérdidas de un enlace inalámbrico, cuando nos encontramos en el aire, se toma como valor de referencia la potencia entregada por el dispositivo emisor, a una distancia de 1 metro. Queremos comprobar si este hecho se cumple también con otros medios, distintos al aire.

Como hemos observado que parece existir una pequeña tendencia a la mejora los parámetros medidos para 2.437 GHz que para 2.412 GHz., otro factor que queremos medir con mayor exactitud es el comportamiento de nuestro sistema, en función de las variaciones de frecuencia que nos permiten los dispositivos que trabajan bajo el estándar IEEE 802.11.

También nos gustaría probar, a aumentar la ganancia de la antena, o incluso a variar el tipo de antena, para comprobar si mejora la eficiencia del enlace.

Por último, nos gustaría trasladar todas estas pruebas, al agua del mar, para aplicaciones en granjas marinas y monitorización de flora y fauna en peligro de destrucción.



## Referencias

- [1] I. F. Akyildiz, D. Pompili and T. Melodia, “Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks”. *ACM Sigbed Review*, vol. 1, no. 2, Jul. 2004.
- [2] M. Garcia, S. Sendra, M. Atenas, and J. Lloret, "Underwater Wireless Ad-hoc Networks: a Survey". Book: *Mobile Ad hoc Networks: Current Status and Future Trends*, CRC Press. Pp. 379-411. 2011.
- [3] X. Che, I. Wells, G. Dickers, P. Kear, and X. Gong, “Re-Evaluation of RF Electromagnetic Communication in Underwater Sensor Networks”. *IEEE Communications Magazine*, Dec. 2010, Vol. 48, Issue 12, pp 143-151.
- [4] J.H. Smart, “Underwater optical communications systems part 1: Variability of water optical parameters”. *Military Communications Conference, 2005. (MILCOM 2005) Oct. 2005*, pp. 1140–1146.
- [5] Sandra Sendra, Jaime Lloret, Miguel Garcia and Jose F. Toledo, “Power saving and energy optimization techniques for Wireless Sensor Networks”, *Journal of Communications*, Academy Publisher. 2011 En Edición
- [6] Miguel Garcia, Sandra Sendra, Gines Lloret y Jaime Lloret, “Monitoring and Control Sensor System for Fish Feeding in Marine Fish Farms”, *IET Communications*, The Institution of Engineering and Technology. 2011. Pp1751-8636. En edición
- [7] I. F. Akyildiz, D. Pompili, T. Melodia. “Underwater acoustic sensor networks: research challenges”. *Ad Hoc Networks*, Volume 3, Issue 3, May 2005, pp. 257-279.
- [8] I. F. Akyildiz, D. Pompili, T. Melodia, “State-of-the-art in protocol research for underwater acoustic sensor networks”. In *Proceedings of the 1st ACM international Workshop on Underwater Networks. WUWNet '06*. Los Angeles, CA, USA, September 25 - 25, 2006. Pp. 7-16.
- [9] J. Partan, J. Kurose, B. Levine, “A survey of practical issues in underwater networks”, *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.* 11, 4. Oct. 2007, pp. 23-33.
- [10] U. Chakraborty, T. Tewary and R.P. Chatterjee, “Exploiting the Loss-Frequency Relationship using RF Communication in Underwater Communication Networks”. *4<sup>th</sup> Int.l Conf. on Computers and Devices for Communication (CODEC 2009)*, Dec. 2009, pp. 1-4.
- [11] I. Wells, A. Davies, X. Che, P. Kear, G. Dickers, X. Gong and M. Rhodes, “Node Pattern Simulation of an Undersea Sensor Network using RF Electromagnetic Communications”. *Ultra Modern Telecommunications & Workshops*, Oct. 2009, pp 1-4.
- [12] D. Anguita, D. Brizzolara and G. Parodi “Optical Communication for Underwater Wireless Sensor Networks: a VHDL-implementation of a Physical Layer 802.15.4 Compatible”, *IEEE OCEANS 2009 – Europe*, May. 2009, pp. 1-2.
- [13] M.R.Frater, M.J.Ryan, and R.M.Dunbar. *Electromagnetic Communications within Swarms of Autonomous Underwater Vehicles*. In *Proc. ACM WUWNet 2006*, pages 64–70.
- [14] N. Newshean, C. Benson and M. Frater, “A High Data-Rate, Software-Defined Underwater Acoustic Modem”, *IEEE OCEANS 2010*, Sept. 2010, pp 1-5.
- [15] N. Newshean, C. Benson and M. Frater, “Design of a high frequency FPGA acoustic modem for underwater communication”, *IEEE OCEANS 2010 – Sydney*, May. 2010, pp. 1-6.
- [16] I. Vasilescu, K. Kotay, D. Rus, M. Dunbabin, P. Corke, “Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network”. In *Proceedings of the 3rd international Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '05)*, San Diego, California, USA, November 02 - 04, 2005.
- [17] B. Peleato, M. Stojanovic, “A MAC protocol for Ad-hoc underwater acoustic sensor networks”. In *Proceedings of the 1st ACM international Workshop on Underwater Networks. WUWNet '06*. Los Angeles, CA, USA, September 25 - 25, 2006, pp. 113-115.



- [18] M. Garcia, S. Sendra, M. Atenas, J. Lloret, "Underwater Wireless Ad-hoc Networks: a Survey", *Mobile Ad hoc Networks: Current Status and Future Trends*, CRC Press, Taylor and Francis capítulo 14, Pp.379-411 (2011). En edición.
- [19] IEEE Std 802.11 (2007) IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Pp.1-1184. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, USA.
- [20] L. Liu, S. Zhou, J-H Cui. "Prospects and problems of wireless communications for underwater sensor networks". *Wireless Communications and Mobile Computing - Special Issue on Underwater Sensor Networks*. Vol. 8, no. 8, pp. 977–994, 2008.
- [21] M. Stojanovic, "Underwater acoustic communication," *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, John Wiley & Sons, pp. 688–698, 1998.
- [22] C. A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics". John Wiley & Sons, New York, NY, 1989.
- [23] D. G. Borkman, T. J. Smayda, "Long-term trends in water clarity revealed by Secchi-disk measurements in lower Narragansett Bay", *ICES Journal of Marine Science*, vol.55, Pp. 668–679, 1998.
- [24] M. I. Mishchenko, L. D. Travis, A. A. Lacis, "Scattering, absorption, and emission of light by small particles", Cambridge University, New York, 2002.
- [25] R. G. Newton, "Scattering theory of waves and particles", 2<sup>nd</sup> edition, Springer-Verlag, New York, 2002.
- [26] M.J. Buckingham, "Ocean-acoustic propagation models", *J. Acoustique*, 3, pp. 223-287, June 1992.
- [27] M. A. Ainslie, J. G. McCole, "A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 103, no. 3, pp. 1671–1672, 1998.
- [28] J. Preisig, "Acoustic propagation considerations for underwater acoustic communications network development," in *Proceedings of First ACM International Workshop on Underwater Networks (WUWNet)*, Los Angeles, CA, Sep. 2006.
- [29] T. Reed IV, D. Hussong, "Digital image processing techniques for enhancement and classification of SeaMARC II sidescan sonar imagery", *J. Geophysical Research*, vol. 94, no B6, pp. 7469–7490, 1989.
- [30] X. Lurton, "An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications", Springer Verlag 2003.
- [31] E. Sozer, M. Stojanovic, and J. Proakis. "Underwater Acoustic Networks". *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 25(1):72–83, Jan. 2000.
- [32] M. Stojanovic. "Acoustic (underwater) Communications". In J. G. Proakis, editor, *Encyclopedia of Telecommunications*. John Wiley and Sons, 2003.
- [33] D. G. Borkman, T. J. Smayda, "Long-term trends in water clarity revealed by Secchi-disk measurements in lower Narragansett Bay", *ICES Journal of Marine Science*, vol.55, Pp. 668–679, 1998.
- [34] J. S. Chitode, "Digital Communications", Technical Publications Pune. First edition: 2007-2008.
- [35] C. Andren and M. Webster, "CCK Modulation Delivers 11Mbps for High Rate 802.11 Extension," in *Wireless Symposium/Portable By Design Conference Proceedings*, Spring 1999.
- [36] S. Sendra, J. Lamparero, J. Lloret, M. Ardid, "Underwater Communications in Wireless Sensor Networks using WLAN at 2.4 GHz", In *proceedings of International Workshop on Marine Sensors and Systems (MarSS 2011)*, 17-22 October 2011, Valencia, Spain.
- [37] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park and M.B. Srivastava, "Energy-aware wireless microsensor networks," *Journal of IEEE Signal Processing Magazine*, , vol.19, no.2, pp.40-50, Mar 2002
- [38] M.A.M. Vieira, C.N. Coelho, D.C. da Silva, J.M. da Mata, "Survey on wireless sensor network devices," *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA '03)*. Vol.1, no., pp. 537- 544, 16-19 Sept. 2003
- [39] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin, "Geography-informed energy conservation for ad hoc routing". 7th annual international conference on Mobile computing and networking, July 16-21, 2001, Rome, Italy. pp. 70-84



- [40] J. Tomas, J. Lloret, D. Bri and S. Sendra, “Sensors and their Application for Disabled and Elderly People”, Handbook of Research on Personal Autonomy Technologies and Disability Informatics, IGI Global. Pp. 311-330. 2011.
- [41] R. Amirtharajah, S. Meringer, J. O. Mur-Miranda, A. Chandrakasan and J. Lang, “A Micropower Programmable DSP Powered using a MEMSbased Vibration-to-Electric Energy Converter,” 5th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2000). Vol. 43, pp. 362-363, February, 2000.
- [42] MatchPort features. In Lantroinix web site. Available at: <http://www.lantronix.com/device-networking/embedded-device-servers/matchport.html>.
- [43] M. Ardid, “ANTARES: An Underwater Network of Sensors for Neutrino Astronomy and Deep-Sea Research”, Ad Hoc & Sensor Wireless Networks. 8, pp. 21-34. (2009).