



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica

TRABAJO DE DIPLOMA

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL EMPLEO DE MECANISMOS DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO MULTICANALES EN REDES SUBACUÁTICAS

Autora: Heidy Veitía Pérez

Tutor: MSc. Ing. Erik Ortiz Guerra

Santa Clara

2011

"Año 53 de la Revolución"



Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica



TRABAJO DE DIPLOMA

*ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL EMPLEO DE
MECANISMOS DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO
MULTICANALES EN REDES SUBACUÁTICAS*

Autora: Heidy Veitía Pérez

hveitia@uclv.edu.cu

Tutor: MSc. Ing. Erik Ortiz Guerra

erik@uclv.edu.cu

Santa Clara

2011

"Año 53 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

*“El pensamiento es la única cosa del Universo de la que
no se puede negar su existencia: negar es pensar.”*

José Ortega y Gasset

DEDICATORIA

*A mis padres y mi hermana, mis ángeles de la
guarda.*

Gracias por estar siempre a mi lado.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Margarita y Lázaro a quienes debo todo cuanto soy. Por su confianza, su amor sin límites y por fomentar mi educación por sobre todas las cosas.

A mi hermana Leidy a quien amo con todo mi corazón.

A Erik, mi tutor, por haberme guiado y apoyado incondicionalmente en este proceso, pero sobre todo: por su amistad.

A los profesores de la FIE por sus enseñanzas y su sabiduría.

A toda mi familia por su apoyo, en especial a mi abuelito Moya y a mis tíos Ana Mary, Hildeliza, Gertrudis, Irenia, Juan, Emilita, Milagros y Engracia.

A Dana, tía Corita y toda su familia, quienes me han brindado desinteresadamente su cariño.

A Mechi, Frank, Henry y Enrique quienes desde el inicio han sido uno más de la familia.

A Chadia, Yari, Lidiana, Yasleiny, Liseth y Dainel, por su amistad.

A Vane, Dayi, Beatriz, Araly y Ariagna, por compartir estos cinco años que han sido el inicio de una amistad que espero dure toda la vida.

A Alain, Maddiel, Carlos M, Leiber, Sergio, Tony, Yasiel, Dairon, Orlando y a todos mis demás compañeros de estudio, por los buenos y malos momentos de esta travesía.

A todos mis vecinos, por el aliento.

A la Revolución, por existir y por la oportunidad.

A los que aquí no menciono y forman parte de mi vida.

A todos, aunque parezca poco:

Gracias.

TAREA TÉCNICA

Con la intención de darle cumplimiento a los objetivos trazados para la realización de esta tesis, se tuvo en cuenta una serie de tareas técnicas de suma importancia para la confección del informe, ellas fueron:

- Realizar una revisión bibliográfica acerca de las peculiaridades de las comunicaciones subacuáticas.
- Determinar los principales rasgos o características que poseen los mecanismos de control de acceso al medio en las redes de sensores subacuáticas y de forma especial en aquellos que emplean múltiples canales para la comunicación.
- Resumir los aspectos esenciales correspondientes al protocolo RTS / CTS multicanal propuesto por Zhou, Peng, Cui y Shi.
- Establecer los parámetros que deben ser evaluados para comparar este protocolo y el mecanismo RTS / CTS tradicional.
- Implementar ambos protocolos en el lenguaje de programación Matlab, para realizar las simulaciones.
- Comprobar, mediante simulación, el funcionamiento de los protocolos implementados.
- Evaluar comparativamente ambos protocolos teniendo en cuenta debilidades y fortalezas.
- Elaborar un informe final.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En los últimos años el empleo de las redes de sensores subacuáticas ha aumentado considerablemente motivado en gran medida por la diversidad de aplicaciones en las que pueden ser desplegadas.

La gran y variable demora de propagación, la necesidad de consumir poca energía y el limitado ancho de banda con que se cuenta constituyen retos a superar bajo el agua, por lo que se hace necesario el desarrollo de protocolos de acceso al medio que tomando en consideración estas características del canal subacuático obtengan un buen desempeño y permitan establecer una comunicación confiable.

En el presente trabajo se describe el funcionamiento de un protocolo RTS / CTS multicanal y se compara con el protocolo RTS / CTS tradicional. El análisis comparativo de ambos protocolos toma en cuenta la evaluación del *throughput*, la eficiencia energética, la eficiencia en la comunicación y el consumo de energía.

Los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas muestran una ligera superioridad del mecanismo RTS / CTS tradicional en relación con el *throughput*, sin embargo el mecanismo RTS / CTS multicanal presenta los mejores resultados en cuanto a eficiencia en la comunicación, eficiencia energética y consumo de energía.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. RASGOS DISTINTIVOS DE LAS COMUNICACIONES SUBACUÁTICAS	4
1.1 Redes de sensores.	4
1.1.1 Características requeridas por las redes de sensores.	5
1.2 Redes de sensores subacuáticas.	6
1.2.1 Clasificación de las redes de sensores subacuáticas.	7
1.2.2 Establecimiento de la comunicación.	9
1.3 Particularidades de las redes de sensores acústicas subacuáticas.	12
1.4 Influencia de los MAC en las comunicaciones bajo el agua.	13
1.4.1 Demora de propagación.	14
1.4.2 Consumo de energía.	15
1.5 Diferencias y similitudes con las redes de sensores terrestres.	15
1.6 Conclusiones del capítulo.	17
CAPÍTULO 2. MECANISMOS DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO DESARROLLADOS PARA REDES DE SENSORES ACÚSTICAS SUBACUÁTICAS	18
2.1 Principales MAC para redes de sensores acústicas subacuáticas.	18
2.2 Protocolos MAC de múltiples canales de comunicación.	21
2.2.1 ALOHA.	22
2.2.2 División de fase.	23
2.3 Descripción de un protocolo RTS / CTS multicanal.	24
2.3.1 Comportamiento de las colisiones con RTS / CTS multicanal.	27
2.4 Conclusiones del capítulo.	28
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.	30

3.1 Entorno de simulación.....	31
3.2 Parámetros medidos.	31
3.2.1 <i>Throughput</i> (razón de paquetes por segundos).	32
3.2.2 Eficiencia en la comunicación.	33
3.2.3 Eficiencia energética.....	33
3.2.4 Consumo de energía.	37
3.3 Conclusiones del capítulo.....	39
CONCLUSIONES	41
RECOMENDACIONES	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	47
ANEXO I: Error en la estimación.....	48

INTRODUCCIÓN

Las redes de telecomunicaciones han transformado las comunicaciones humanas durante el último medio siglo permitiendo el desarrollo de tecnologías como redes de computadoras, transmisión de televisión y los teléfonos celulares. Los tipos y capacidades de estas redes continúan creciendo.

En los últimos años se ha experimentado un aumento en el estudio de las redes de sensores, de manera especial, debido a las disímiles prestaciones que estas presentan. Todas las redes de sensores poseen propiedades comunes, sin embargo en función de la labor a desempeñar encontramos diversas configuraciones y arquitecturas.

Esta clase de redes se caracterizan por ser auto configurables, pudiendo convertirse en todo momento en emisor, receptor y ofrecer servicios de encaminamiento entre nodos sin visión directa. Otra de sus características es su gestión eficiente de la energía, con la que se consigue una alta tasa de autonomía que las hacen plenamente operativas.

Las redes de sensores pueden ser empleadas tanto en ambientes subacuáticos como terrestres. Las redes de sensores subacuáticas difieren de las redes de sensores terrestres en muchos aspectos, entre los que se incluyen la compleja tecnología, la memoria, la potencia y el elevado costo.

Encuentran aplicación en la prevención de desastres naturales, monitoreo ambiental, sistemas de vigilancia marítimos, recolección de datos oceanográficos, navegación asistida y la operación de vehículos autónomos subacuáticos, en sentido general.

Las redes de sensores subacuáticas (UWSN, *underwater sensor networks*) están compuestas por múltiples nodos de sensores cooperantes sumergidos, con energía y capacidades de cómputo limitadas.

Diseñar estas redes conlleva al empleo de técnicas de eficiencia energética en procesamiento de red, comunicación multipunto así como técnicas de control de densidad para extender la vida útil de la red. Los diseños deben ser flexibles a las fallas por diversas razones, como la destrucción física y el agotamiento de la energía.

Varios desafíos todavía necesitan ser superados para tener un mayor despliegue de las redes de sensores subacuáticas, tales como: una topología dinámica, heterogeneidad del dispositivo, empleo eficiente de la energía, la calidad de servicio, el soporte de aplicaciones y problemas ecológicos. La comunicación eficaz entre unidades o nodos en una UWSN es uno de los problemas fundamentales y críticos en todo el diseño de sistemas de red.

La comunicación en un entorno subacuático se hace posible mediante la transmisión de información en forma de sonido, ondas electromagnéticas u ópticas, constituyendo la comunicación acústica la técnica más versátil y ampliamente usada en los ambientes subacuáticos debido a la baja atenuación del sonido en el agua. La alta y variable demora de propagación y el limitado ancho de banda, los efectos nocivos que sobre el canal subacuático provocan los fenómenos del multitrayecto y el desvanecimiento, forman parte de los factores que restringen la eficiencia de la comunicación y el desempeño de la red.

Para evitar colisiones y mantener una transmisión confiable entre nodos es necesario el manejo y control de los canales de comunicación, funciones que son provistas por la capa de control de acceso al medio (MAC).

El uso de mecanismos MAC se hace necesario entonces en las redes de sensores subacuáticas en las que el principal problema de la comunicación está vinculado precisamente al control de acceso al medio, ruteo y protocolos de transporte.

Objetivo General

Estudiar la influencia del empleo de protocolos de acceso al medio multicanales en redes de sensores subacuáticas.

Objetivos Específicos

- Definir las particularidades de la comunicación en las redes de sensores subacuáticas.
- Determinar las principales características que deben presentar los mecanismos de control de acceso al medio (MAC) para su funcionamiento óptimo en redes de sensores subacuáticas.
- Describir MAC en redes subacuáticas y de modo particular aquellos que emplean múltiples canales para el establecimiento de la comunicación.
- Establecer los parámetros que deben ser tomados en consideración para evaluar el desempeño de estos mecanismos.
- Comprobar, mediante simulación en diferentes escenarios, el comportamiento de los protocolos MAC desarrollados con el empleo de Matlab 7.0.

- Evaluar comparativamente los resultados alcanzados en la simulación con el objetivo de identificar sus fortalezas y debilidades.

El presente trabajo está estructurado en introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía, glosario de términos y anexos. En el primer capítulo se describen los principales rasgos de las redes de sensores subacuáticas así como las principales características de las comunicaciones en estos entornos. En el segundo capítulo se describen las características del protocolo RTS / CTS multicanal con canales separados para la transmisión de los paquetes de control y de datos con el objetivo de compararlo con el protocolo RTS / CTS tradicional que emplea un solo canal para enviar paquetes de control y de datos en el establecimiento de la comunicación. En el tercer capítulo se muestran los resultados de las simulaciones realizadas y la discusión de los mismos. En las conclusiones se destaca el cumplimiento de los objetivos previstos en esta investigación. Las recomendaciones están encaminadas a enriquecer futuras investigaciones sobre el tema.

CAPÍTULO 1. RASGOS DISTINTIVOS DE LAS COMUNICACIONES SUBACUÁTICAS

1.1 Redes de sensores.

Los sensores son dispositivos electrónicos autónomos con capacidades de sensado, cómputo, almacenamiento y comunicación inalámbrica, distribuidos geográficamente alrededor de un fenómeno. Una red de sensores es un sistema distribuido donde sus nodos son capaces de interactuar con el entorno físico y llevar a cabo una determinada misión por un período de tiempo establecido (Escolar Díaz, 2010, Holger and Andreas, 2005).

Las redes de sensores pueden ser desplegadas para la realización de múltiples tareas. A continuación se describen brevemente algunos usos de diversos dominios para dar un sentido del vasto alcance de este campo (Bhaskar, 2005, Holger and Andreas, 2005):

Monitoreo del hábitat ecológico: las redes de sensores permiten la supervisión del hábitat sin acercamientos peligrosos a los objetivos. Además debido a su escala potencialmente grande y alta densidad espacio-temporal, pueden proporcionar datos experimentales de una riqueza sin precedente.

Vigilancia militar: una red de sensores puede ser empleada en escenarios militares debido a que puede ser desplegada rápidamente para la vigilancia, ser utilizada para proporcionar la inteligencia del campo de batalla con respecto a la localización, los números, el movimiento, y a la identidad de tropas y de vehículos, así como para la detección de productos químico-biológicos y de armas nucleares.

Monitorización de infraestructuras: las redes de sensores tienen potencial para supervisar el desgaste a largo plazo de estructuras así como su condición después de acontecimientos destructivos. Mediante estructuras controlables pueden realizar la “eco-cancelación” en ondas sísmicas de modo que la estructura sea inafectada por cualquier disturbio externo.

Redes industriales y comerciales: en las industrias los sensores son utilizados para la supervisión y el control de procesos. Por su nivel de miniaturización los sensores pueden ser utilizados en complejos procesos de control de la calidad en los que se incluyen la medición de temperatura, presión, concentración, entre otros.

Entornos de alta seguridad: existen lugares que requieren altos niveles de seguridad para evitar ataques terroristas, tales como centrales nucleares, aeropuertos, edificios del gobierno de paso restringido. Aquí gracias a una red de sensores se pueden detectar situaciones que con una simple cámara sería imposible.

Las redes de sensores son empleadas además en el mantenimiento y vigilancia de maquinarias, telemática, medicina, logística y agricultura de precisión (Holger and Andreas, 2005).

1.1.1 Características requeridas por las redes de sensores.

La posibilidad de emplear las redes de sensores en las aplicaciones mencionadas en el epígrafe 1.1, requiere tener en cuenta en su diseño las siguientes características (Bhaskar, 2005):

Tiempo de vida: monitorizar y reemplazar las baterías de una red de sensores no es práctico y se hace potencialmente costoso. Una red de sensores debe operar al menos por el tiempo de misión dada o tanto como sea posible. Se hace necesario un método de operación eficiente energéticamente.

Sensibilidad: la red debe ser capaz de detectar y divulgar todos los acontecimientos a su alrededor, independientemente del estado en que se encuentre.

Robustez: en ocasiones son usados en las redes una gran cantidad de dispositivos baratos que pueden ser no fiables y propensos a las fallas. Los diseños deben por lo tanto tener mecanismos incorporados para proporcionar robustez.

Heterogeneidad: la combinación correcta de las capacidades de cómputo, comunicación y sensado de los dispositivos depende de la aplicación a que sea destinada la red por lo que constituye un desafío de importancia en el diseño.

Autoconfiguración: debido a su escala y la naturaleza de sus usos, las redes de sensores son sistemas intrínsecamente distribuidos. La operación autónoma de la red es por lo tanto un desafío dominante del diseño. Desde el inicio mismo, los nodos en una red de sensores tienen que poder configurar su propia topología de la red; localizar, sincronizar, y calibrarse; coordinar la comunicación entre nodos; y determinar otros parámetros de funcionamiento importantes.

Autooptimización y adaptación: una red de sensores debe constar con mecanismos autónomos que le permitan ante cualquier cambio drástico adaptarse de forma lineal a las condiciones del ambiente sin que se vea afectado su funcionamiento.

Diseños sistemáticos: metodologías de diseño sistemáticas, teniendo en cuenta la reutilización, la modularidad y la adaptación tiempo-extensión, son de importancia por consideraciones prácticas.

Privacidad y seguridad: la cantidad, el predominio y la sensibilidad de la información recogida por las redes de sensores así como su despliegue potencial en localizaciones hostiles dan lugar a la necesidad de asegurar aislamiento y seguridad.

1.2 Redes de sensores subacuáticas.

Más del 70% del planeta Tierra está cubierto por agua. Gran parte de las investigaciones en el mundo están dedicadas a desentrañar los misterios y las potencialidades que tan amplio territorio encierra.

El empleo de las redes de sensores en entornos subacuáticos se hace necesario por las aplicaciones que en tareas diversas estas cumplen, algunas de estas aplicaciones se describen a continuación (Zaihan, 2008):

Intercambio de información: una de las metas principales del diseño de una red en sentido general es el intercambio de información dentro y fuera del rango de la red. Las redes subacuáticas son diseñadas de forma tal que los nodos pueden intercambiar información entre ellos e incluso con vehículos autónomos y con submarinos.

Exploraciones oceánicas: a causa de las altas presiones oceánicas los seres humanos no pueden realizar exploraciones subacuáticas en toda su magnitud. Las redes de sensores subacuáticas son capaces de realizar exploraciones en busca de minerales valiosos, yacimientos petroleros y fallas oceánicas, en sentido general.

Prevención de desastres: ante actividades oceánicas como tsunamis las redes de sensores subacuáticas son capaces de informar en tiempo real a las áreas costeras cercanas.

Monitoreo medioambiental: pueden muestrear la contaminación - química, biológica o nuclear - con el objetivo de controlar bahías, lagos o ríos. Además de predecir el

impacto de la actividad humana sobre ecosistemas acuáticos, realizar el seguimiento biológico de peces y microorganismos de importancia para la industria y el desarrollo científico técnico.

Adicionalmente son utilizadas para proveer la asistencia a la navegación y permitir la recolección de datos científicos.

1.2.1 Clasificación de las redes de sensores subacuáticas.

Los elementos de una red subacuática están dispuestos de múltiples formas. Las redes de sensores subacuáticas han sido clasificadas atendiendo al período que son desplegadas para realizar una aplicación determinada y atendiendo a la arquitectura de comunicación que presentan (Dong, 2006).

De acuerdo con (Dong, 2006) las redes de sensores subacuáticas atendiendo al período en que son desplegadas para realizar una aplicación pueden ser clasificadas como *redes de monitorización acuática a largo plazo de tiempo no crítico* y en *redes de exploración acuática a corto plazo de tiempo crítico*.

- *Redes de monitorización acuática a largo plazo de tiempo no crítico:* estas redes trabajan durante largos períodos y los datos coleccionados por los sensores no son de tiempo real. El supervisado a largo tiempo es un elemento negativo en cuanto al ahorro de energía.
- *Redes de exploración acuática a corto plazo de tiempo crítico:* la supervisión a corto plazo proporciona el ahorro de energía. Los datos se recogen en tiempo real.

Las redes de sensores subacuáticas pueden dividirse en *redes de dos dimensiones* y en *redes de tres dimensiones* según el criterio de la arquitectura de comunicación de la red referido en (Dong, 2006, Akyildiz et al., 2004, Zhang et al., 2006).

Redes de dos dimensiones.

Generalmente, en las redes dispuestas en dos dimensiones, como la mostrada en la figura 1.1, todos los sensores se fijan al fondo de manera tal que estén a la misma profundidad. Los sensores pueden estar conectados a una o más estaciones encargadas de transmitir la información hacia la superficie a través de transceivers que se encargan de la comunicación con el exterior (comunicación vertical) y con los demás nodos

sensores (comunicación horizontal). El transceiver vertical debe ser capaz de enviar datos a largas distancias (Akyildiz et al., 2004).

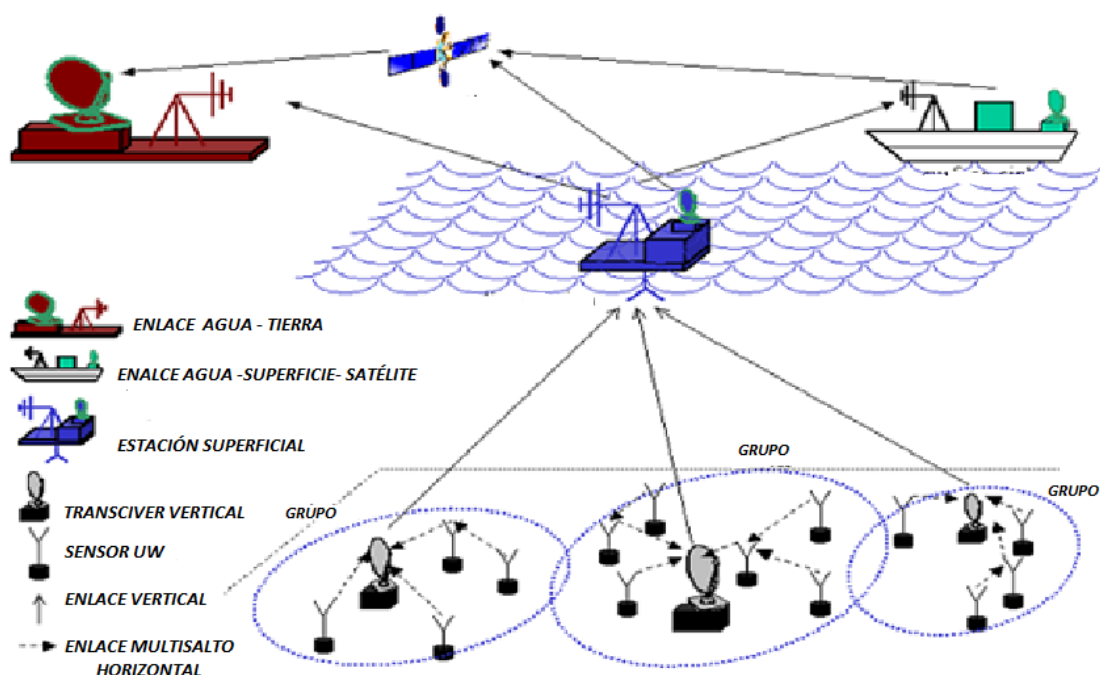


Figura 1.1: Arquitectura de comunicación de dos dimensiones. (Akyildiz et al., 2004).

La estación de la superficie tiene que estar equipada para establecer múltiples comunicaciones paralelas, con transceivers que le permitan manejar diálogos con las estaciones sumergidas y con estaciones terrestres, estas últimas, mediante comunicaciones satelitales y/o de radiofrecuencias.

Si se establece una conexión directa entre una estación y un sensor, la eficiencia energética y la cantidad de información por unidad de tiempo pueden verse disminuidas para largas distancias debido a que aumenta la potencia requerida de transmisión (Akyildiz et al., 2004).

Redes de tres dimensiones.

En la arquitectura de tres dimensiones, mostrada en la figura 1.2, los sensores son desplegados de forma tal que floten a diferentes profundidades en el océano, generalmente realizan un muestreo tridimensional cooperativo. Cada nodo puede ser fijado a una boya de la superficie o al fondo. La profundidad de cada nodo puede regularse estática o dinámicamente dependiendo de las funciones de la red (Akyildiz et al., 2004).

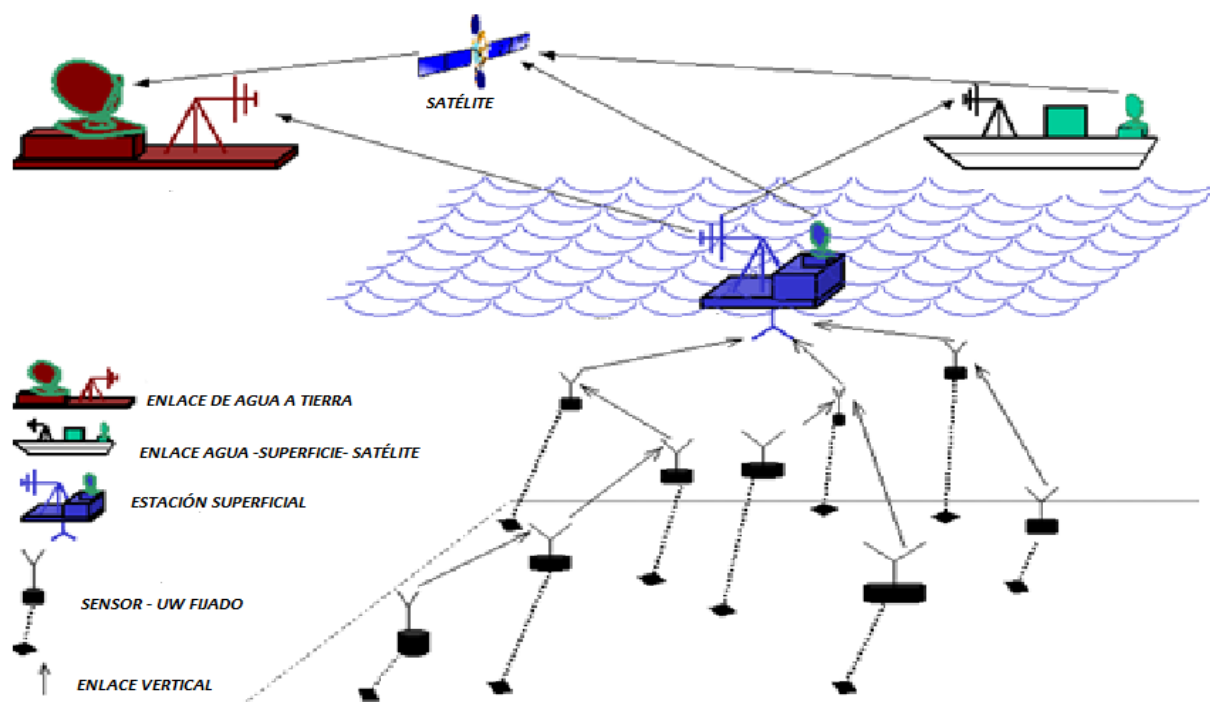


Figura 1.2: Arquitectura de comunicación de tres dimensiones. (Akyildiz et al., 2004).

Esta arquitectura afronta muchos retos. Primeramente, las profundidades de los nodos deben ser reguladas conjuntamente para maximizar la cobertura de toda la red según sus rangos y cobertura de comunicación. En segundo lugar, desde el inicio de la implementación de una red de sensores subacuática de tres dimensiones, se debe prever que toda la información sea transferida de un modo seguro hacia las estaciones en la superficie mediante múltiples saltos (Zhang et al., 2006).

1.2.2 Establecimiento de la comunicación.

El empleo de un canal de comunicación que sea capaz de brindar intercambio de información entre los dispositivos de la red a largas distancias, libre de interferencias, estable y con un ancho de banda suficiente, es necesario. Con este fin pudieran aprovecharse ondas de radiofrecuencia, señales ópticas o acústicas.

Señales de radiofrecuencia.

Utilizar ondas electromagnéticas de radiofrecuencia asegura, como se muestra en la figura 1.3, que la velocidad de propagación aumente con frecuencias más altas del espectro, permitiendo el manejo de un ancho de banda superior. Sin embargo, el empleo de estas señales en el agua trae consigo un conjunto de limitantes (Liu et al., 2008).

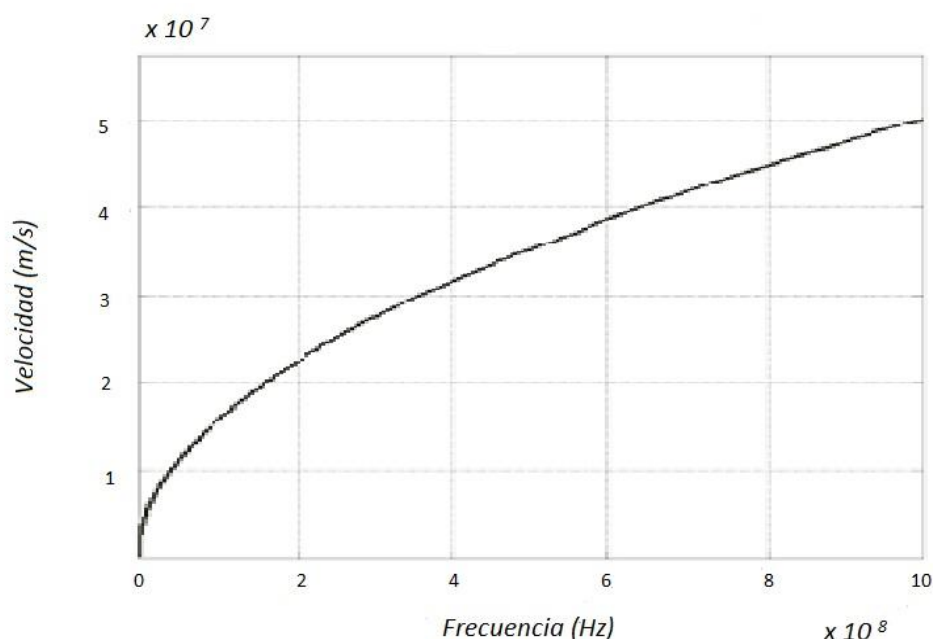


Figura 1.3: Velocidad de propagación de ondas de radiofrecuencias en el agua
(Liu et al., 2008).

En (Liu et al., 2008) luego de analizar las características del canal de comunicación subacuático tanto de agua dulce como de agua salada se concluye que: el problema crítico del empleo de ondas de radiofrecuencia en agua dulce radica en el gran tamaño y la alta potencia de transmisión de las antenas a utilizar, una antena de 1 a 2 metros sería necesaria para establecer una comunicación a 50 MHz aproximadamente. En agua salada la alta atenuación restringe este tipo de comunicación.

Además, las señales de radiofrecuencias son severamente afectadas por la interferencia intersímbolo y aunque se han logrado comunicaciones del orden de los Mbps las señales alcanzan distancias de unos pocos metros (Partan et al., 2006).

Señales ópticas.

Valerse de señales ópticas como medio de comunicación en el agua proporciona una elevada tasa de transferencia de datos, del orden de Gbps habitualmente. Se debe tener en cuenta la calidad del agua y las condiciones del entorno donde se van a propagar las señales ópticas debido a que constituyen factores que influyen en su aprovechamiento (Liu et al., 2008).

La rápida absorción de la señal óptica por el agua, la dispersión óptica provocada por la suspensión de partículas como el plancton y los elevados niveles de luz en la parte superior del agua constituyen factores adversos en la utilización de la comunicación óptica en redes de sensores subacuáticas (Liu et al., 2008).

En medios sumergidos la atenuación puede ser hasta 1000 veces más grande que en el aire, siendo esta otra de las causas principales que afronta la propagación óptica. A pesar de esto emplear longitudes de onda entre el azul y el verde, permite establecer comunicaciones entre 10 y 150 Mbps en distancias de hasta 100 metros (Liu et al., 2008).

Señales acústicas.

Las ondas o señales acústicas constituyen el medio de comunicación subacuático más diversificado y empleado en la actualidad. Las ondas acústicas se reproducen bien en el agua, permiten abarcar grandes distancias y su atenuación es baja respecto a las variantes analizadas, siendo este el motivo primordial de su utilización.

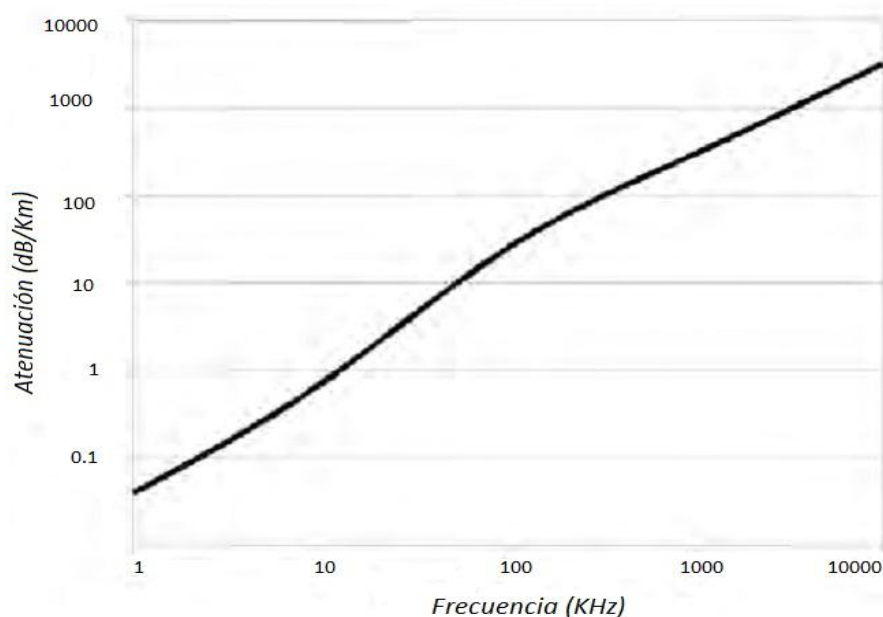


Figura 1.4: Atenuación de la señal acústica en agua salada en función de la frecuencia de operación (Lacovara, 2008).

La comunicación acústica está limitada en ancho de banda. Las frecuencias hasta 1 MHz han sido probadas en este campo y frecuencias próximas a 10 KHz han sido efectivas en actividades que requieren un gran radio de cobertura. Además en esta frecuencia se obtiene una atenuación menor, comparada con las señales de radiofrecuencias, (cerca de 10 dB/m para las ondas de radiofrecuencia y 10 dB/km para la señal acústica). La atenuación de la señal acústica en relación con la frecuencia de operación se ilustra en la figura 1.4 (Lacovara, 2008).

1.3 Particularidades de las redes de sensores acústicas subacuáticas.

Las Redes de Sensores Acústicas Subacuáticas consisten en vehículos y sensores organizados y desplegados bajo el agua en una red autónoma con capacidad de adaptación al entorno oceánico. La red se conecta a través de enlaces acústicos de una velocidad de propagación de aproximadamente 1500 m/s con el objetivo de ejecutar actividades de monitorización en un área dada (Akyildiz et al., 2005, Zaihan, 2008).

Las comunicaciones acústicas en ambientes subacuáticos pueden verse afectadas por fenómenos como la atenuación y la distorsión que provocan pérdidas en la señal transmitida, el ruido, la interferencia multicamino, el efecto Doppler y el limitado ancho de banda (Akyildiz et al., 2005, Stojanovic, 2007). Además, las características del canal subacuático y efectos como la demora de propagación influyen negativamente en el establecimiento de la comunicación. En el epígrafe 1.4.1 se discute cómo contrarrestar las consecuencias de la gran demora de propagación.

Las causas y el comportamiento que los originan se describen seguidamente:

Pérdidas de transmisión: la atenuación y la distorsión constituyen por lo general las principales causas de pérdidas de la transmisión en el canal acústico. Sin embargo son menores que para las ondas electromagnéticas (Zhang et al., 2006).

- La atenuación se refiere principalmente a la absorción de energía o conversión en calor. Distancias más grandes o mayores frecuencias serían un detonante de la atenuación de la señal, provocando pérdidas en la transmisión de la misma.
- La distorsión puede provocar una expansión de la energía de la señal acústica como consecuencia de la expansión del frente de onda. Este fenómeno puede verse acentuado por la distancia de propagación.

Ruido artificial y ambiental: propiciados artificialmente por las bombas de las maquinarias o por la transportación marítima. Fenómenos naturales de índole sísmica, biológica e hidrodinámica pueden causar ruido ambiental (Zhang et al., 2006).

Interferencia multicamino: la interferencia multicamino puede degradar severamente la señal causando selectividad de frecuencia en el canal (Akyildiz et al., 2005, Partan et al., 2006).

Efecto Doppler: la frecuencia Doppler extendida puede disminuir transmisiones y comunicaciones digitales, conduciendo a la interferencia de símbolos adyacentes en el extremo receptor. La traslación simple de frecuencias es en ocasiones consecuencia también del Doppler extendido (Akyildiz et al., 2005, Zhang et al., 2006).

Ancho de banda: bajo el agua la transferencia de datos se ve seriamente limitada si la comparamos con las comunicaciones inalámbricas terrestres. El rango de frecuencias allí oscila entre 100 KHz y 1 KHz para 0.1 Km y 1000 Km respectivamente (Zhang et al., 2006).

Características del canal: características extremas del canal acústico subacuático como la salinidad, densidad y variaciones de la temperatura pueden causar altas razones de error de bits (Zhang et al., 2006).

Los instrumentos y dispositivos bajo el agua son alimentados por baterías por lo cual los costos energéticos en las redes acústicas subacuáticas son elevados. La potencia de transmisión es superior a la consumida en el receptor. Valores típicos de consumo en el transmisor están cerca de los watts en contraste con la potencia consumida en el receptor que está cerca de los 100 mW aproximadamente (Stojanovic, 2007). El diseño de mecanismos de control de acceso al medio eficientes energéticamente es esencial.

1.4 Influencia de los MAC en las comunicaciones bajo el agua.

Las comunicaciones inalámbricas se caracterizan por emplear un medio compartido. El manejo y control del acceso al medio de los canales de comunicación, es una de las funciones de la capa de control de acceso al medio, de ahí la importancia de emplear estos mecanismos en las redes de sensores acústicas subacuáticas.

El control de acceso al medio en estas redes presenta retos originados por las características del canal de comunicación subacuático. En estos entornos el restringido

ancho de banda, la alta y variable demora de propagación y las limitaciones en cuanto al consumo de energía constituyen desafíos adicionales a los descritos en el epígrafe 1.3 que se deben tener en cuenta en el empleo de un mecanismo de control de acceso al medio.

1.4.1 Demora de propagación.

La demora de propagación se debe principalmente a las variaciones que ocurren en el canal causadas entre otros elementos por los movimientos relativos del transmisor y/o del receptor, el esparcimiento de la superficie o el movimiento de las plataformas donde se pueden encontrar algunos dispositivos de la red (Park and Rodoplu, 2007). Cada uno de estos factores atentan contra el buen desempeño de los mecanismos de control de acceso al medio. A pesar de ello su estimación puede predecirse y ser empleada para mejorar el desempeño de los MAC.

De acuerdo con (Rodoplu and Aminzadeh, 2008) la gran demora de propagación presentada en las redes subacuáticas puede contrarrestarse mediante dos soluciones: empleando mensajes de inicialización o saludo que permitan la estimación de la demora, o mediante marcas de tiempo relativo estampadas en los mensajes.

El primer método incluye el intercambio de dos señales entre los nodos, la señal *beacon* emitida por el transmisor y la de reconocimiento *ACK* enviada por el nodo receptor, a través de las que se estima la demora de propagación de la señal. El procedimiento de estimación de la demora de propagación por esta vía es explicada en (Rodoplu and Aminzadeh, 2008).

El segundo de los modos para enfrentar el problema de la gran demora de propagación parte de la hipótesis de que cada nodo de la red debe conocer el momento justo en que sus vecinos transmitirán y que a partir de ahí, cada uno de los nodos puede permanecer en estados de bajo consumo de energía y prepararse para la recepción en el momento indicado (Rodoplu and Aminzadeh, 2008).

La implementación de este mecanismo permite que los dispositivos de la red escuchen el canal solamente en el momento que esperan recibir las transmisiones independientemente de la demora de propagación.

1.4.2 Consumo de energía.

Diseñar protocolos eficientes energéticamente es una de las principales prioridades. Bajo el agua la gestión de la energía es un proceso complicado. La vida útil de las baterías se ve limitada por la imposibilidad de recargarlas o cambiarlas una vez puestas en marcha.

Además, el consumo de energía en una red de sensores acústica subacuática va a estar definido por tres puntos fundamentales: energía total consumida, fracción de la energía total consumida durante las transmisiones debido a las colisiones y fracción de la energía consumida durante la recepción debido a las colisiones.

En (Ye et al., 2002) es propuesto un protocolo en el cual el nodo posee un algoritmo efectivo para disminuir el consumo de energía. En ocasiones el nodo no está muestreando eventos que ocurren dentro de la red y en este tiempo se desperdicia parte de la energía del nodo. El algoritmo, mostrado en la figura 1.5, propone una secuencia de *escucha-silencio* en la que el nodo solo estaría trabajando (escucha) el tiempo requerido por la aplicación que en el escenario en cuestión se esté realizando y el período de mínimo consumo sería el de silencio.

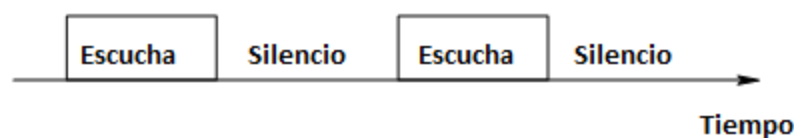


Figura 1.5: Períodos de escucha y silencio (Ye et al., 2002).

1.5 Diferencias y similitudes con las redes de sensores terrestres.

Las características únicas del canal de comunicación acústico subacuático hacen de este un medio complejo, sin embargo, no han impedido que gran parte de las investigaciones y de los avances tecnológicos aplicados a las redes de sensores terrestres sean evaluados en las redes de sensores acústicas subacuáticas.

Emplear mecanismos y técnicas desarrolladas en redes de sensores terrestres hace más de medio siglo, en ambientes subacuáticos, no garantiza los mismos resultados. Entre las diferencias fundamentales podemos citar las referentes a (Akyildiz et al., 2005, Dong, 2006) :

Método de comunicación: mientras las redes de sensores terrestres utilizan las ondas de radio, la comunicación subacuática se realiza mediante señales acústicas.

Costo: los dispositivos usados en las redes de sensores terrestres tienen precios asequibles en contraposición con los nodos sensores subacuáticos que, como consecuencias del aumento de la seguridad requerida por el hardware y de la complejidad de los transceptores de las redes de sensores acústicas subacuáticas, se hacen sumamente caros.

Relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida: tanto en las comunicaciones terrestres como en las subacuáticas la potencia que se emplea en la transmisión de las señales es elevada en comparación con la potencia consumida en la recepción. La diferencia en la utilización de estos medios de comunicación radica en que la relación entre potencia transmitida y recibida en entornos subacuáticos es más elevada que en redes inalámbricas terrestres.

Memoria: las conexiones establecidas a través de señales acústicas pueden ser dañadas o interferidas por situaciones especiales del canal subacuático como las llamadas zonas de silencio. La adquisición de un mayor número de datos se hace necesaria en las redes de sensores acústicas subacuáticas para prevenir la pérdida de datos. Este no es un problema para las redes de sensores inalámbricas terrestres.

Densidad: el despliegue de sensores es un factor determinante en ciertas aplicaciones para cualquier tipo de red. Desplegar densamente sensores en entornos subacuáticos es más caro debido al costo del dispositivo y a la complejidad de la instalación.

Según Kurtis Kredo en (Kredo, 2007) las comunicaciones inalámbricas terrestres se asemejan a las subacuáticas en varios puntos. En ambos regímenes la pérdida de paquetes es causada generalmente por las colisiones, no ocurre así si la relación señal a ruido (SNR) permanece lo suficientemente alta; la potencia necesaria para la transmisión de datos aumenta proporcionalmente con la distancia; los dispositivos causan interferencia en los rangos más largos debido a que ellos ejecutan la recepción de paquetes y los dispositivos típicamente tienen transceptores half-duplex empleados para establecer conexiones en toda la red y con el exterior.

1.6 Conclusiones del capítulo.

La diversidad de aplicaciones que en los últimos años han experimentado las redes subacuáticas ha propiciado su estudio y amplio desarrollo en gran parte del mundo. La comunicación en estos entornos puede establecerse mediante tres vías, las limitantes de la propagación de la señal mediante ondas de radiofrecuencias u ópticas han hecho de las señales acústicas el método de comunicación más empleado en estos entornos.

Las características del canal acústico subacuático aparejado a la atenuación, el desvanecimiento y la absorción de la señal implican retos adicionales en el establecimiento de las comunicaciones bajo el agua.

Una solución viable para las redes de sensores acústicas subacuáticas conlleva al empleo de un mecanismo de control de acceso al medio que tome en consideración la larga demora de propagación de la señal acústica, el restringido ancho de banda y el rendimiento energético de modo que se puedan establecer comunicaciones por largos períodos de tiempo, con un acceso por parte de los dispositivos “justo y ordenado” a la red.

CAPÍTULO 2. MECANISMOS DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO DESARROLLADOS PARA REDES DE SENSORES ACÚSTICAS SUBACUÁTICAS

El Control de Acceso al Medio es un método en el que se establecen reglas que indican como un nodo de red puede hacer uso del medio de comunicación para transmitir su información. Es en sí programación que apoyada en hardware determina en qué momento y cómo, un nodo de red accede al medio. Esto es, el método de acceso provee el control lógico del medio físico del que se dispone para la comunicación.

El acceso al medio es un problema no resuelto en las redes de sensores acústicas subacuáticas, sin embargo ha sido estudiado por décadas en las redes de radiofrecuencia terrestres.

Las investigaciones relacionadas con el empleo de protocolos de control de acceso al medio en redes de sensores subacuáticas que den solución a las limitaciones que acarrea la utilización de señales acústicas son aún incipientes.

2.1 Principales MAC para redes de sensores acústicas subacuáticas.

El control de la transmisión de los paquetes de datos y la cantidad de ocasiones en que estos se reciben correctamente puede ser llevado a cabo por un protocolo híbrido (Morns et al., 1997). Uno de los protocolos se basa en Acceso Múltiple por Detección de Portadora (CDMA), mientras que el otro se basa en Acceso Múltiple por División del Tiempo (TDMA). El empleo de ambos protocolos requiere sincronización del reloj entre todos los nodos. Adicionalmente, la asignación de la ranura de tiempo para nodos individuales se hace difícil de manejar cuando el número de nodos crece.

En (Xie and Gibson, 2001) se adopta un acercamiento centralizado de control, lo cual requiere que un nodo de la red actúe como máster y configure mediante programación los datos de la red para enviárselos como mensajes de control a los nodos esclavos. Se define además, una opción al parecer más atractiva, el acercamiento distribuido de control, en el cual cada nodo puede decidir sobre sus acciones como por ejemplo emitir un paquete.

Rodoplu y Park, en (Rodoplu and Park, 2005) proponen un mecanismo MAC que logra un alto rendimiento energético reduciendo el número de colisiones. Cada nodo programa el tiempo para transmitir el siguiente paquete y difunde esta información adjuntándola al paquete actual de datos. Al oír la emisión, los otros nodos sabrán cuando despertarse para el siguiente paquete. Sin embargo, para funcionar en una tasa baja de colisiones cada nodo requiere un ciclo de trabajo pequeño lo cual hace que el rendimiento específico de la red disminuya.

Un protocolo tolerante a la demora de propagación (PCAP), en el que se persigue evitar las colisiones y basado en un diálogo inicial es propuesto en (Guo et al., 2006). Requiere sincronización del reloj entre nodos y los requisitos de petición a enviar (RTS) y permiso para enviar (CTS) paquetes, permitiéndole al remitente realizar acciones durante la larga espera entre los mensajes RTS y CTS. Su rendimiento específico es 20 % más alto que el de los protocolos que emplean un diálogo inicial para iniciar la comunicación y solo es comparable con el rendimiento específico del protocolo ALOHA.

El protocolo ALOHA original se basa en el acceso aleatorio al medio por parte de los usuarios. Cuando un usuario tiene información para enviar, transmite inmediatamente, si el paquete se recibe sin errores por el receptor se le envía de vuelta un paquete de reconocimiento (ACK).

Debido a las transmisiones arbitrarias, ocurren colisiones y se pierden paquetes. Si esto pasa, el receptor no emite un ACK y después aleatoriamente selecciona un tiempo, y los remitentes retransmiten sus paquetes. Puesto que los tiempos se seleccionan independiente y aleatoriamente, las probabilidades de colisiones son bajas. Estas retransmisiones provocan que el tiempo promedio requerido para transmitir exitosamente un paquete a través del canal sea más grande que el mínimo requerido para una simple transmisión de un paquete.

La relación entre el tiempo útil (tiempo requerido para la transmisión de la información y el tiempo promedio total en el que el canal está ocupado en transmitir esta información) define el rendimiento del mecanismo de acceso al medio. Con el método ALOHA simple, el máximo rendimiento alcanzado es de un 18% (Chirdchoo et al., 2007).

Una versión mejorada del protocolo ALOHA, es el método ALOHA ranurado, propuesto por Roberts, en (Roberts, 1975). Con este método el rendimiento máximo alcanzado aumenta a un 36%. ALOHA se torna ineficiente en tráfico de ráfagas que ocurren en redes de información. También en el intento de evitar las colisiones retransmitiendo la información se incrementa el consumo de energía de la red y se reduce su tiempo de vida (Chirdchoo et al., 2007).

La comunicación en las redes de sensores acústicas subacuáticas puede establecerse mediante el manejo de protocolos basados en Acceso al Medio por Sensado de Portadora (CSMA), con el cual los recursos del canal subacuático se utilizan mejor si el usuario escuchara el canal antes de transmitir un paquete.

FAMA, en (Fullmer and García, 1995), extiende la duración de los paquetes RTS y CTS para prevenir colisiones con los paquetes de datos. La eficiencia de estos protocolos es severamente afectada por la demora de propagación.

Stojanovic y Molins en (Molins and Stojanovic, 2006) proponen un protocolo MAC de acceso aleatorio: FAMA ranurado que proporciona ahorro energético debido a que elimina los largos paquetes de datos y la naturaleza asíncrona del protocolo, pero, se requiere sincronización en el tiempo.

Este mecanismo está basado en un diálogo inicial y en él los mensajes RTS o CTS solo pueden ser transmitidos al inicio de una ranura de tiempo, lo cual unido a la larga demora de propagación, afecta el desempeño del sistema y lo torna inflexible para aplicaciones heterogéneas; a pesar de que se reduce el número de colisiones para sus paquetes de datos.

Para estas redes se han implementado protocolos que tienen como objetivo principal reducir el número de colisiones entre los mensajes de datos, conocidos como Acceso Múltiple evitando colisiones (MACA) y Acceso Múltiple evitando colisiones para redes inalámbricas (MACAW) el cual constituye una variación del anterior.

Una simulación usando MACA con un comando WAIT añadido para reducir colisiones y mejorar la eficiencia energética, se describe en (Sozer et al., 2000). Otra variante del protocolo MACA es propuesto en (Karn, 1990). Este protocolo utiliza paquetes

RTS/CTS/DATA para reducir el problema del terminal oculto¹, muy común en redes multisalto. Este protocolo se basa en la simetría del canal, esto es, un CTS puede ser escuchado por todos los nodos dentro del rango del nodo receptor. Puede ser usado como base de un protocolo de acceso al medio en redes de sensores subacuáticas. Provee información de algoritmos de control de potencia y tiene la habilidad de evitar colisiones antes que éstas ocurran.

Una de las adaptaciones del mecanismo MACA es el protocolo MACA con un tren de paquetes para múltiples vecinos (MACA-MN). El mismo mejora la utilización del canal mediante la formación de un tren de paquetes destinado a múltiples vecinos durante cada diálogo inicial, reduciendo proporcionalmente el tiempo desperdiciado durante la propagación de paquetes de control retardados (Chirdchoo et al., 2008). MACAW, en (Bharghavan et al., 1994), añade un ACK, el cual puede ser muy útil para el poco fiable canal subacuático.

Kebkal, en (Kebkal et al., 2005), propone un medio para reducir el impacto de la demora de propagación en protocolos basados en FAMA y MACAW, con paquetes ACK y DATA enviados simultáneamente. Se sugiere también una extensión del FAMA, usando CDMA para los paquetes RTS, para desarrollar un protocolo FAMA libre de colisiones.

2.2 Protocolos MAC de múltiples canales de comunicación.

Los estudios vinculados al control de acceso al medio se centran generalmente en redes que emplean un solo canal para la comunicación. A diferencia de los protocolos que utilizan un único canal, los mecanismos de acceso con múltiples canales emplean más de un canal de datos para la comunicación (Zhou et al., 2009).

En una red acústica subacuática los nodos requieren intercambio de mensajes de control para negociar los canales destinados a la transmisión ordenada de datos. Los protocolos multicanales dedican un único canal al control de los mensajes y cada nodo de la red debe supervisar continuamente este canal.

¹ Problema del terminal oculto: los paquetes colisionan porque los nodos remitentes no conocen de otras transmisiones en ejecución.

Dos de los mecanismos de acceso al medio mediante múltiples canales de comunicación, el protocolo ALOHA y el protocolo de acceso por División de fase, se describen en las secciones 2.2.1 y 2.2.2 respectivamente.

2.2.1 ALOHA.

Este es el protocolo de varios canales más sencillo (Zhou et al., 2009). Según lo mostrado en la figura 2.1, los canales de la red se dividen en un canal dedicado al control y los múltiples canales de datos.

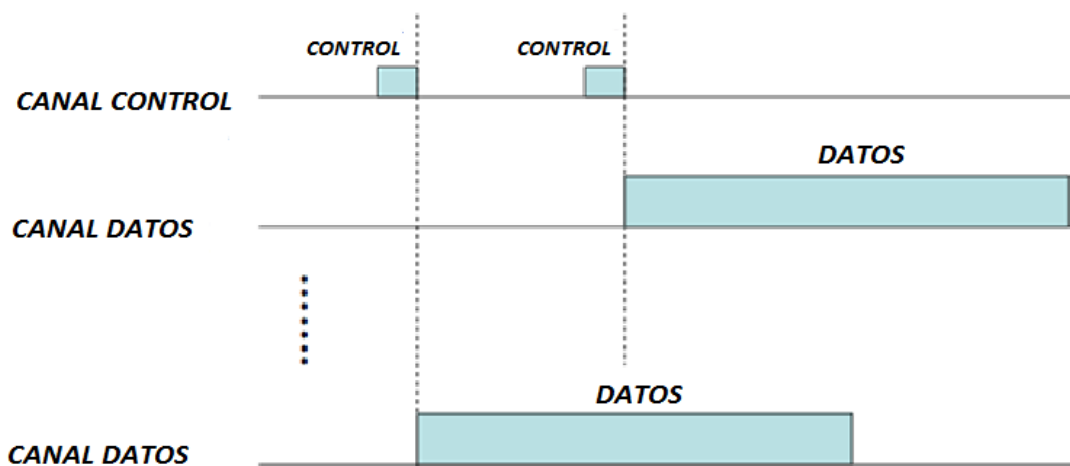


Figura 2.1: Protocolo de varios canales con Aloha (Zhou et al., 2009).

Cuando un nodo desea enviar un paquete de datos, primero selecciona aleatoriamente uno de los canales disponibles de datos. En el canal de control viajará entonces un paquete de control, informándole al receptor el canal seleccionado para la transmisión de datos. El paquete de datos va a ser enviado sin demora a través del canal de datos escogido. El intercambio de información descrito no requiere de procesos en los que el intercambio de mensajes es establecido a través de un diálogo inicial (handshaking). El canal de control emplea, esencialmente, el acercamiento al azar² de Aloha.

En (Zhou et al., 2009) se demuestra que el funcionamiento de este protocolo, en una red subacuática, no es afectado por la demora de propagación característica de los canales

² Un protocolo al azar: es un protocolo de acceso aleatorio cuyo funcionamiento no se afecta por la larga demora de propagación.

acústicos subyacentes y está determinado por el ancho de banda del canal de control así como el de los canales de datos.

2.2.2 División de fase.

La sincronización entre nodos para protocolos de múltiples canales es posible y puede lograrse con la utilización de protocolos sencillos de sincronización en redes subacuáticas de largas demoras de propagación (Zhou et al., 2008).

La figura 2.2 muestra, la división del tiempo en múltiples períodos nombrados *beacon*, a su vez divididos alternativamente en fases de control y de datos con duración T_C y T_D respectivamente.

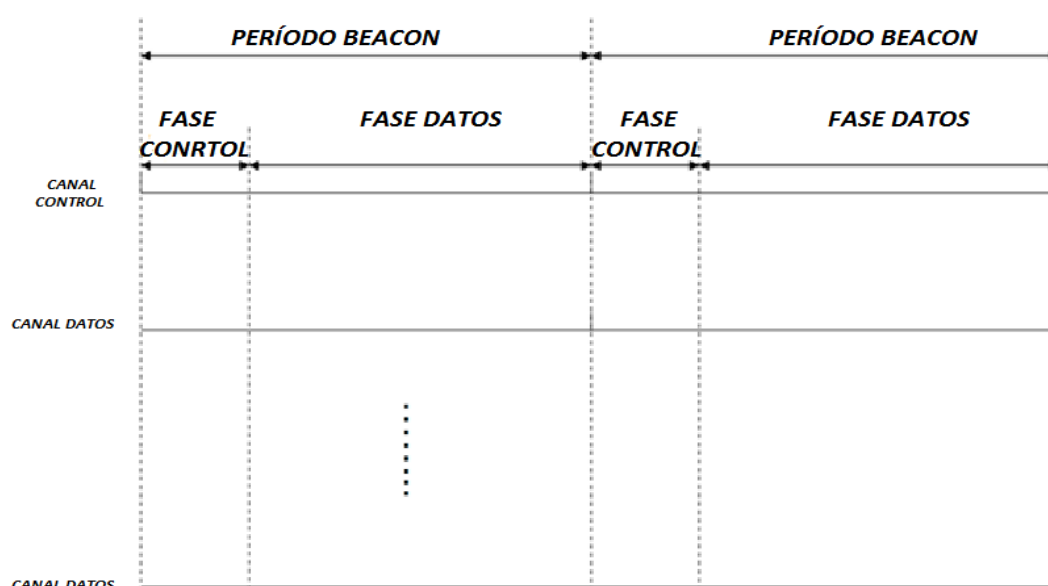


Figura 2.2: Esquema de división de fase para un protocolo multicanal (Zhou et al., 2009).

Durante la fase de control, cada nodo podrá elegir uno de los canales disponibles del sistema y deberá difundir a los nodos vecinos de su decisión a través de un mensaje de control. Es posible que los múltiples nodos elijan el mismo canal para la recepción lo cual conducirá sin dudas a una colisión. Para hacer que cada nodo dentro de la red tenga la misma probabilidad de acceder a un canal de transmisión, la fase de control debe ser lo suficientemente larga. De esta forma se asegura además, que cada paquete de control será escuchado por todos los nodos del sistema.

Este protocolo no necesita un canal dedicado al control y no es afectado por las variaciones de la demora de propagación. En redes de una demora de propagación variable la división de fase puede proveer una solución estable para aplicaciones de niveles superiores pero en términos de eficiencia energética y del rendimiento o throughput no ofrece buenos resultados (Zhou et al., 2008).

Uno de los protocolos de acceso al medio desarrollados para la comunicación mediante múltiples canales es el protocolo RTS / CTS multicanal (con un canal dedicado al control y múltiples canales de datos). El funcionamiento del mismo es descrito en (Zhou et al., 2009).

En este trabajo se exponen y analizan las características de este protocolo con el objetivo de evaluar la influencia de enviar por canales diferentes los mensajes de control y de datos. El empleo de este mecanismo supone ventajas sobre el protocolo de acceso al medio que por un mismo canal de comunicaciones envía los mensajes de control y de datos.

En el trabajo no se incluye la descripción del protocolo RTS / CTS tradicional (emplea un solo canal de comunicaciones) que se comparará con el RTS / CTS multicanal. Ambos protocolos presentan las mismas características y funcionan bajo las mismas condiciones, su única diferencia radica en la cantidad de canales utilizados en la comunicación debido a que en el protocolo multicanal los paquetes de datos y de control van por canales distintos.

2.3 Descripción de un protocolo RTS / CTS multicanal.

La idea básica de un esquema RTS / CTS radica en que un remitente tiene que capturar el canal a través del mecanismo del dialogo inicial antes del envío de cualquier dato. La demora de propagación característica de las redes de sensores acústicas subacuáticas conlleva a que los modelos tradicionalmente utilizados en las redes de radiofrecuencia terrestres sean modificados.

El protocolo, mostrado en la figura 2.3, es una combinación del acceso de varios canales y de la técnica extensamente usada de RTS / CTS. De modo similar al protocolo ALOHA cada nodo supervisa continuamente el canal de control. El nodo que tiene mensajes para enviar, transmite un mensaje RTS a través del canal de control. Este

mensaje debe incluir la identificación del transmisor / receptor, los canales disponibles en la red y la longitud del paquete.

Basado en la condición de la red y después de haber recibido correctamente un mensaje RTS, el receptor responderá con un mensaje CTS para informar al remitente que está libre para recibir los datos. Recibiendo este mensaje CTS, el remitente enviará su paquete de datos.

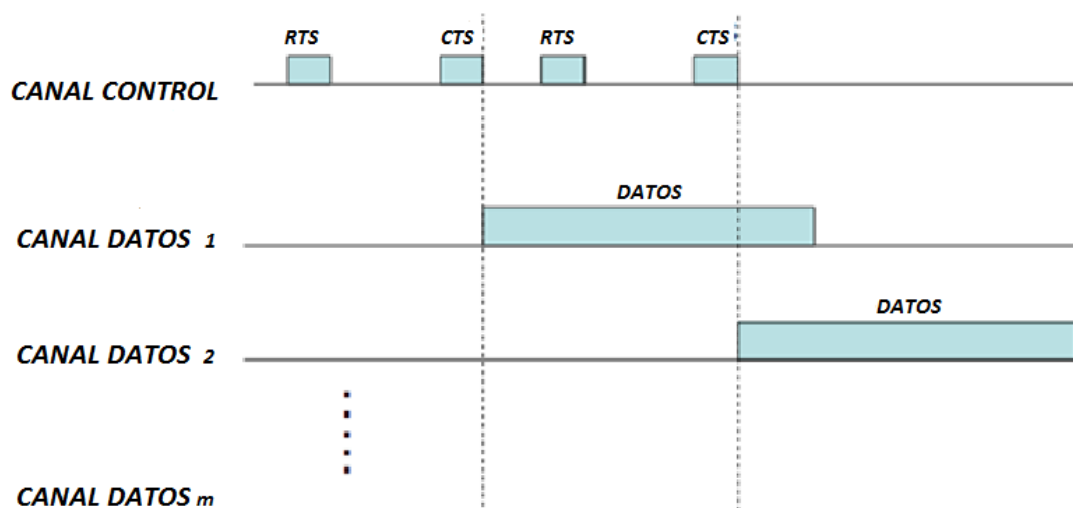


Figura 2.3: Protocolo de varios canales con técnicas RTS / CTS (Zhou et al., 2009).

En este proceso de intercambio de RTS / CTS los vecinos que oyen la transmisión conocen del canal elegido para el intercambio de mensajes por lo que no deberán interferir la comunicación.

La demora de propagación para este protocolo en redes de radiofrecuencia terrestres es insignificante, sin embargo el establecer la comunicación en un medio acústico hace que la demora de propagación en este escenario sea mayor.

En este mecanismo el canal de control no se ve afectado por la longitud de los paquetes de datos y constituye básicamente un canal al azar.

Garantizar que no existan colisiones en el canal de control no asegura que no se produzcan colisiones en los canales de datos. La demora de propagación puede conllevar a que varios nodos elijan el mismo canal de datos, de los disponibles en la red, en un instante de tiempo dado.

Como se muestra en la figura 2.4, el nodo *A* tiene paquetes para el nodo *B* y el nodo *C* tiene paquetes para el nodo *D*. Inicialmente, *C* envió un mensaje RTS a *D* quien después de recibir el mensaje RTS de *C*, elegirá uno de los canales de datos disponibles e enviará a *C* el mensaje CTS por el canal de control. Puede suceder que antes que el mensaje CTS llegue a *C*, el mensaje RTS de *A* llegue a *B* y este seleccionará uno de los canales disponibles en el sistema. Puesto que en este instante de tiempo, *B* no conoce qué canal ha seleccionado *D* para comunicarse con *C*, por lo que existe la posibilidad de que, *B* seleccione el mismo canal que *D*. En este caso puede ocurrir una colisión en el canal de datos.

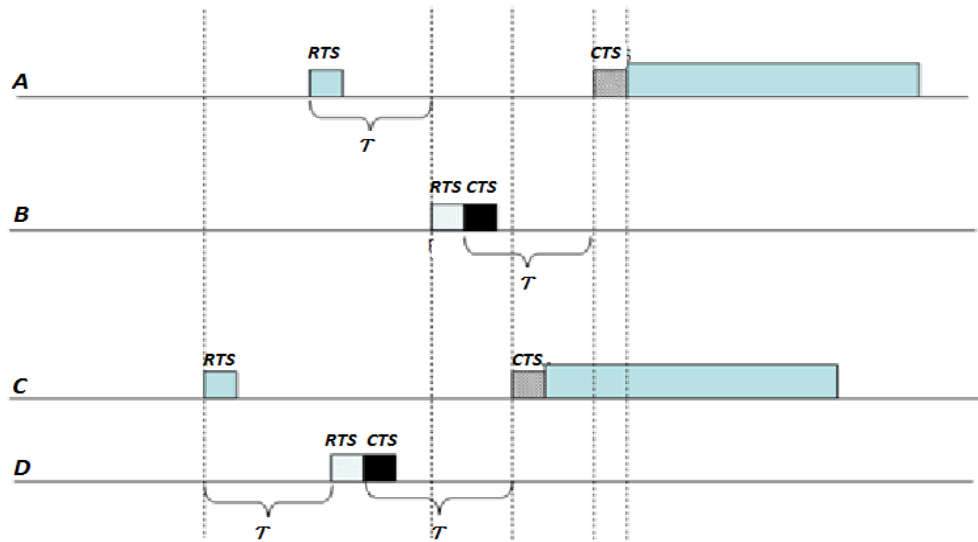


Figura 2.4: Interacción de los nodos en un protocolo multicanal con RTS / CTS (Zhou et al., 2009).

Así, un paquete de los datos en el tiempo t_1 , puede colisionar con paquetes que se encuentren en la gama de tiempo $(t_1 - \tau, t_1 + \tau)$. Siendo τ la demora de propagación entre dos nodos cualesquiera. La ventana de colisión de un paquete de los datos en este protocolo se convierte en 2τ .

En redes de radiofrecuencia terrestres, el proceso de análisis para varios canales con protocolo RTS / CTS se modela directamente el proceso de la transmisión de datos como una cadena de Markov (Tobagi and Kleinrock, 1976, Han et al., 2006).

En redes acústicas bajo el agua, la demora de propagación hace que la asignación del canal de los datos sea un proceso estocástico distribuido: la selección del canal por un

nodo basado en su propia percepción de la condición de la red puede no ser exacta. De hecho, el proceso de selección del canal de datos para redes de larga demoras no puede ser modelado por un proceso simple de Markov puesto que el estado futuro de la red se relaciona no solo con su estado actual, sino también se relaciona con el estado antes del tiempo τ .

Si el ancho de banda del sistema es fijo, la asignación entre el ancho de banda del canal de control y la de los canales de datos será óptima lográndose maximizar el funcionamiento de la red. Una solución exacta para la asignación óptima del ancho de banda no es posible debido a la complejidad del canal acústico.

En (Zhou et al., 2009) se propone un método numérico para la obtención del ancho de banda, dividiendo el sistema en bandas inferior y superior.

2.3.1 Comportamiento de las colisiones con RTS / CTS multicanal.

En sistemas con varios canales se espera que exista una disminución de las colisiones entre el canal de control y los múltiples canales de datos. La configuración del sistema propicia que entre los mensajes de datos y los mensajes de control la interacción sea mínima pero a pesar de ello las colisiones en estas redes es un factor a tener en cuenta. Un análisis del comportamiento de las colisiones con mecanismos RTS / CTS multicanales es llevado a término en (Zhou et al., 2009).

En sistemas que empleen este protocolo, los canales ya sean de datos o de control se dividen en ranuras de tiempo o regiones de colisión que coinciden con el intervalo de colisión de este protocolo: 2τ . Las colisiones del paquete se confinan a una ranura de tiempo solamente, es decir ningún paquete tiene conocimiento de otros paquetes en su propia ranura por lo que puede elegir igual canal que ellos. Cada paquete tiene conocimiento de los paquetes que se encuentran en otra ranura, por lo que las colisiones entre él y un paquete ubicado en otra ranura no deben suceder.

La figura 2.5 ilustra el comportamiento del protocolo cuando los canales se dividen en regiones de colisión. El paquete 1 selecciona el canal 1 para su transmisión mientras que el paquete 2 que está en su misma ranura probablemente seleccionará el mismo canal 1, conduciendo a una colisión dentro de este canal. El paquete 3 en la ranura siguiente conoce del canal escogido para la comunicación por los paquete 1 y 2, por lo que no seleccionará el mismo canal que ellos. En el caso que se describe, se elige el canal 2.

Dependiendo del tiempo en que sean liberados los canales, esto es, que ya el canal terminó de ser utilizado en la transmisión de un paquete, existirá o no un mayor número de colisiones en el sistema. Así, en un sistema en el que la liberación de los canales ocurre en el principio de una ranura y estos canales están disponibles para todos los paquetes en esta ranura, la probabilidad de colisiones es menor.

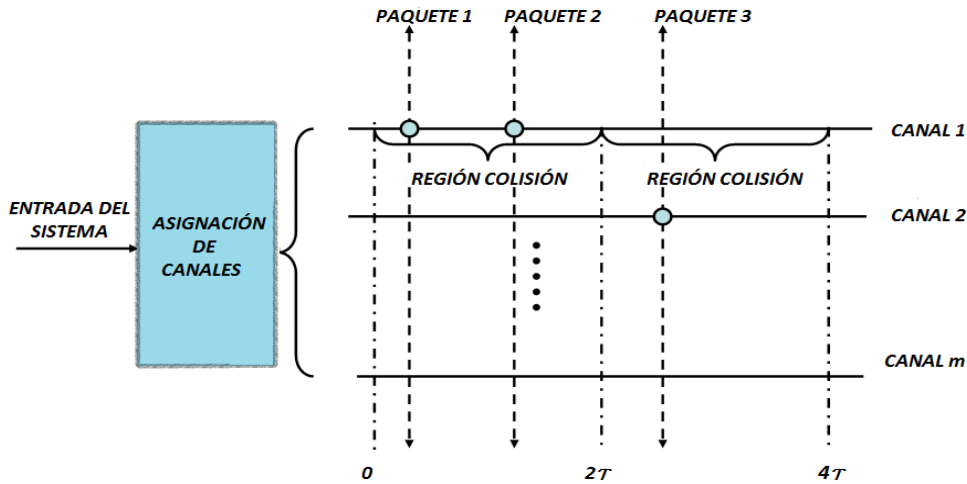


Figura 2.5: Comportamiento de la colisión del mecanismo RTS / CTS multicanal (Zhou et al., 2009).

En sistemas con una elevada probabilidad de colisiones, los canales no están disponibles para los paquetes en ranuras ya utilizadas, esto es: en sistemas confinados los canales solo estarán disponibles para los paquetes en la ranura siguiente por lo que el número de canales útiles disminuye (Zhou et al., 2009).

2.4 Conclusiones del capítulo.

Generalmente los protocolos empleados en redes inalámbricas se han implementado en redes subacuáticas. Las características propias del canal acústico han motivado la creación de protocolos de control de acceso al medio propios para las redes de sensores acústicas subacuáticas, en las que se puede emplear múltiples canales para el establecimiento de la comunicación y el mejoramiento de las limitaciones que el empleo de la señal acústica presupone.

Un mecanismo RTS / CTS multicanal en estas redes soporta paquetes de control y de datos de gran tamaño y puede lograr un rendimiento específico favorable. A pesar de ello en redes en donde se haga necesario grandes rangos de transmisiones no se recomienda implementar este protocolo, debido a que el tiempo desperdiciado en la propagación de un CTS en toda el área de transmisión degrada el funcionamiento de la red.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.

Una vía económica y factible de probar el comportamiento de diferentes experimentos es el empleo de simuladores. Con el objetivo de comparar el protocolo analizado en el epígrafe 2.3 (RTS / CTS multicanal) y el protocolo RTS / CTS tradicional se desarrollaron en Matlab 7.0 simuladores de eventos discretos que posibilitaron el análisis del desempeño de los protocolos MAC estudiados.

La simulación basada en eventos discretos permite capturar los cambios y sus consecuencias en el sistema en puntos separados en el tiempo, es decir, el estado del sistema va cambiando en determinados puntos en el tiempo; y la lógica de simulación solo se concentra en observar esos puntos para poder representar la situación modelada.

Con esta estrategia se identifican y planifican los puntos donde cambia el estado del sistema, para así poder saltar el reloj a través de esos puntos en el tiempo, ejecutando acciones que reflejan el cambio del sistema en dichos puntos (Wainer, 2005, Rivas, 2010).

Matlab 7.0, es un programa de cálculo técnico y científico, con un lenguaje de programación propio y en el que se pueden implementar funciones de eventos discretos. Permite realizar una amplia variedad de gráficos en dos y tres dimensiones, cálculos numéricos con vectores y matrices, trabajar con números escalares – tanto reales como complejos- y con cadenas de caracteres. El desarrollo de programas numéricos con Matlab puede requerir hasta un orden de magnitud menos de esfuerzo que con lenguajes de programación convencionales como Fortran, Pascal, C/C++, Java o Visual Basic (Jalón et al., 2005).

Constituye, por tanto, una herramienta confiable, fácil de utilizar en la implementación de aplicaciones de alto nivel, que aumenta la productividad de los programadores respecto a otros entornos de desarrollo.

3.1 Entorno de simulación.

De forma similar a los escenarios utilizados para las simulaciones en (Peleato and Stojanovic, 2007, Syed et al., 2008) el escenario de simulación consta de cinco nodos dispuestos pseudo - aleatoriamente, con un rango de cobertura de 4m en un área de 4m². La red implementada es *full connected* siendo todos los nodos vecinos: cada nodo puede comunicarse con todos los otros nodos de la red. La tabla 3.1 muestra los parámetros empleados en las simulaciones:

Tabla 3.1: Parámetros de diseño del sistema.

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Velocidad de propagación	1500 m/s
Razón de transmisión	10 Kbps
Tráfico generado por nodo	1 – 100 Kbps
Tiempo de simulación	100 s
Cantidad de nodos	5
Tamaño de paquetes de datos	20 bytes
Tamaño de paquetes de reservación (RTS, CTS)	5 bytes

Cada una de las simulaciones se realizó en cinco ocasiones y los resultados que se presentan en las secciones siguientes corresponden con la media de los resultados obtenidos por nodo, a excepción de la sección 3.2.1 donde se muestra la razón de paquetes enviados por segundo para toda la red. El error máximo cometido en la estimación de cada parámetro se recoge en el Anexo I.

3.2 Parámetros medidos.

Para comparar el desempeño de los protocolos RTS / CTS se midieron una serie de parámetros que dieran una medida de su comportamiento. Entre los parámetros seleccionados están: la razón de paquetes por segundo (*throughput*), la eficiencia en la

comunicación, la eficiencia energética y el consumo de energía, los que se presentan en las secciones 3.2.1; 3.2.2; 3.2.3 y 3.2.4 respectivamente.

3.2.1 *Throughput* (razón de paquetes por segundos).

El *throughput* se define como la relación entre la razón de paquetes de datos transmitidos en la red y el tiempo de operación de la red (Xie and Cui, 2006) y constituye uno de los parámetros de mayor importancia cuando se comparan redes de comunicaciones.

Como consecuencia de las limitaciones del entorno subacuáticos las razones de transmisión típicas que se logran oscilan entre 1 y 10 Kbps (Peleato and Stojanovic, 2007, Chirdchoo et al., 2007). La figura 3.1 ilustra el comportamiento de este parámetro en los protocolos analizados:

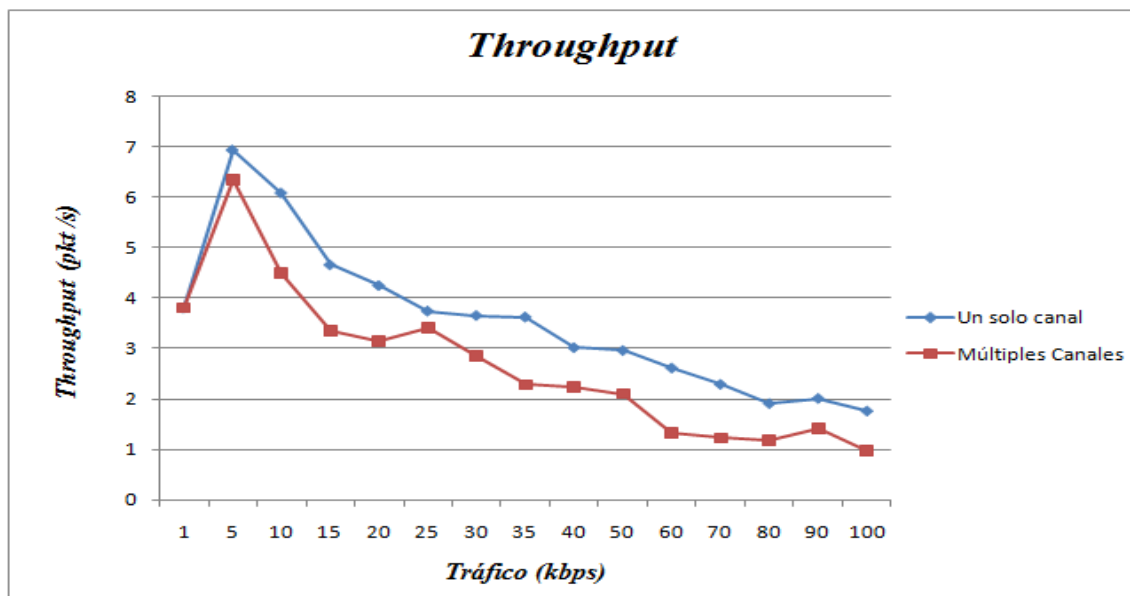


Figura 3.1: *Throughput*.

Ambos protocolos muestran un comportamiento similar desde el punto de vista de los valores alcanzados y de la estabilidad que presentan a medida que aumenta el tráfico en la red. Los mejores resultados se logran para tráficos entre 1 y 10 Kbps, evidenciando una vez más esta característica de las redes de sensores acústicas subacuáticas.

A pesar de la similitud en los resultados obtenidos, el protocolo RTS / CTS tradicional muestra una ligera superioridad en cuanto a los valores alcanzados.

3.2.2 Eficiencia en la comunicación.

Los protocolos MAC deben ofrecer no solo un alto *throughput* sino además una alta eficiencia en la comunicación. La eficiencia en la comunicación en redes bajo el agua constituye una medida de las potencialidades de los protocolos MAC para reservar el canal y garantizar comunicaciones libres de colisiones. Se representa como el porcentaje de paquetes enviados que son recibidos satisfactoriamente (sin colisiones). En la figura 3.2 se muestran los resultados de cada uno de los protocolos.

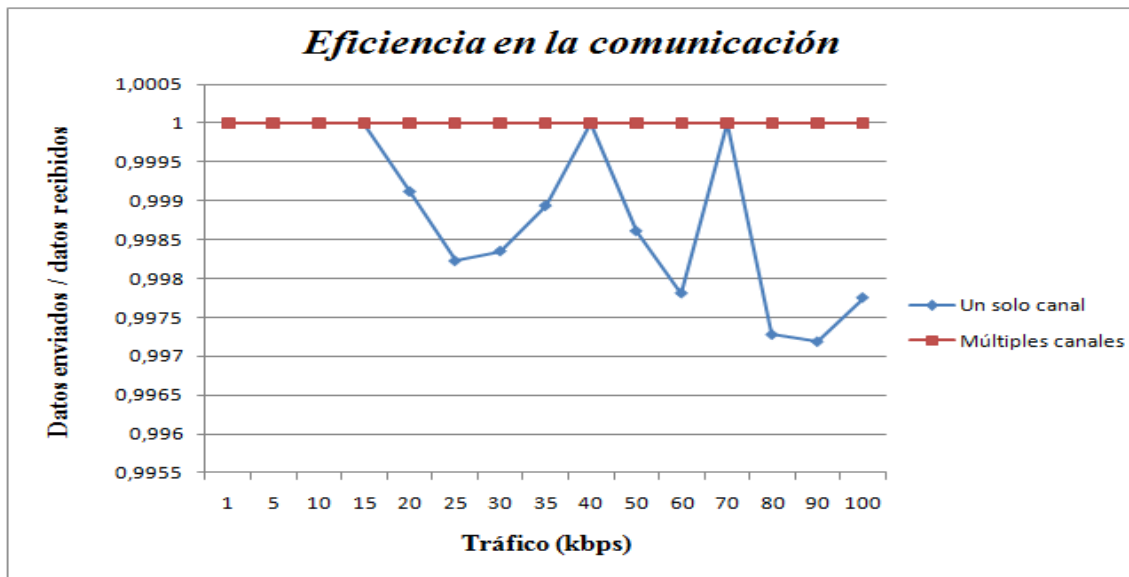


Figura 3.2: Eficiencia en la comunicación.

En este caso el RTS / CTS multicanal ofrece los mejores resultados garantizando que la totalidad de los paquetes transmitidos sean recibidos correctamente. Esto se debe a la utilización de canales separados para la transmisión de paquetes de control (RTS, CTS) y de paquetes de datos, lo cual garantiza que en el canal de datos no ocurran colisiones.

El intercambio de paquetes de control RTS y CTS limita la obtención de un mayor desempeño en cuanto al *throughput* para ambos protocolos, a pesar de la obtención de resultados satisfactorios en cuanto a la reservación del canal.

3.2.3 Eficiencia energética.

La eficiencia energética se define como la relación entre la energía consumida y el tiempo de trabajo y constituye uno de las principales metas en el momento de desarrollar mecanismos de control de acceso al medio en redes de sensores acústicas subacuáticas.

Entre los factores que contribuyen al gasto energético en estas redes encontramos la ocurrencia de colisiones, la necesidad de emplear mensajes de control para reservar el canal antes de transmitir los datos y los períodos en los cuales los nodos escuchan el canal a pesar de no existir actividad en el mismo. Estas características se describen a continuación:

- *Colisiones:* si dos nodos transmiten al mismo tiempo e interfieren sus transmisiones respectivamente, los paquetes se corrompen y la energía usada durante la transmisión y recepción se desperdicia.
- *Paquetes de Control:* la mayoría de los protocolos utilizan paquetes de control como por ejemplo: mecanismos (RTS/CTS en los casos analizados) con el objetivo de evitar colisiones. La energía utilizada para transmitir y recibir estos paquetes constituye energía de costo operacional.
- *Sobre-escucha:* debido a que el canal de comunicación en estos entornos es compartido los nodos pueden permanecer durante grandes períodos de tiempo escuchando el mismo sin que exista actividad. La implementación de mecanismos que permitan a los nodos pasar a estados de bajo consumo contribuye de manera significativa al ahorro de energía.

La cantidad de colisiones por nodo para los protocolos RTS / CTS se muestra en la figura 3.3.

Se observa que el protocolo RTS / CTS multicanal tiene los mejores resultados en cuanto al número de colisiones. El número de colisiones para este protocolo incluye las colisiones en el canal de control y en el canal de datos. En el canal de datos las colisiones son nulas lo que constituye una de las ventajas que supone la utilización de protocolos multicanales: la reducción del número de colisiones en la red.

El protocolo RTS / CTS tradicional se ve afectado por el empleo de mensajes de control en el mismo canal donde son enviados los datos.

El comportamiento de ambos protocolos con el aumento del tráfico es similar.

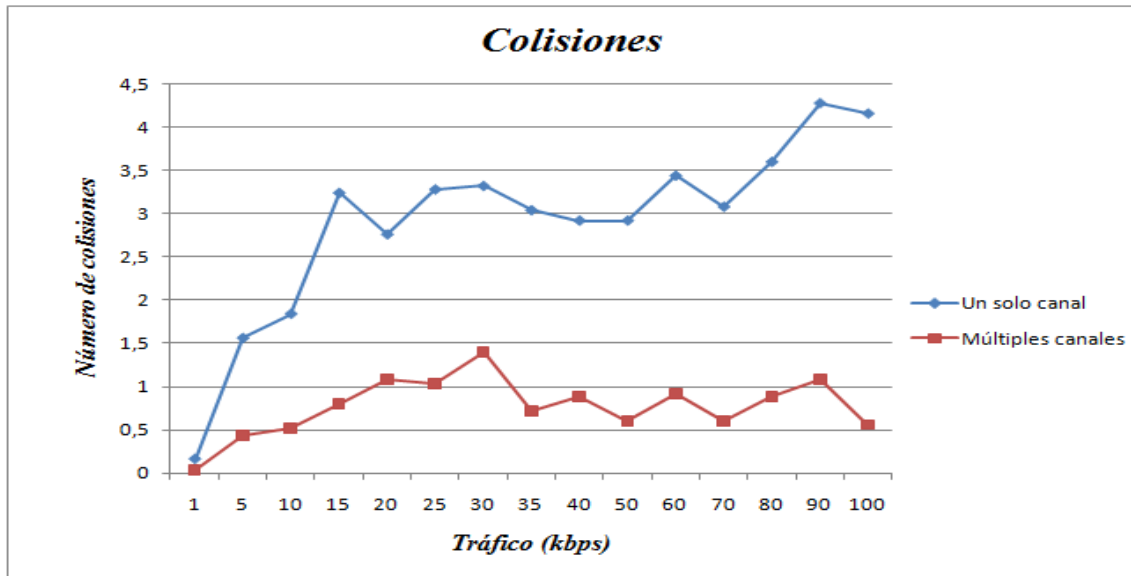


Figura 3.3: Número de colisiones.

El *costo operacional* se puede evaluar como la cantidad de paquetes de reservación intercambiados por cada paquete de datos enviados y se puede calcular para ambos protocolos empleando la ecuación 3.1:

$$\text{Costo_Operacion} = \frac{\text{RTS_enviados} + \text{CTS_recibidos}}{\text{Datos_enviados}} \quad (3.1)$$

Cuando se emplean protocolos RTS / CTS reservar el canal implica al menos el intercambio de dos paquetes de reservación (enviar un RTS y recibir un CTS), sin embargo se garantiza que el costo operacional cuando se aumenta el tráfico de la red varíe muy poco.

La figura 3.4 ilustra el comportamiento de este parámetro para los protocolos estudiados. Como se observa el comportamiento de ambos es semejante si se toman en cuenta los valores alcanzados y la estabilidad con el aumento del tráfico.

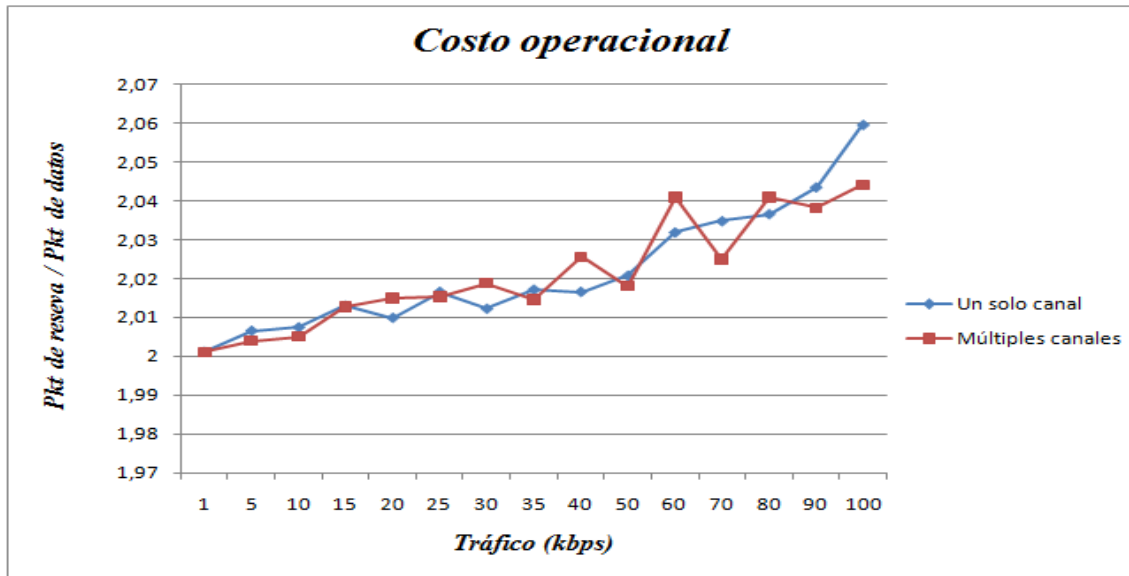


Figura 3.4: Costo operacional.

La *sobre escucha* constituye una de las ineficiencias de las redes bajo el agua. En algunos protocolos, si los dispositivos de la red no escuchan actividad en el canal pasan a un estado de bajo consumo de energía evitando así la sobre escucha.

Cuando se emplean protocolos RTS / CTS los nodos deben permanecer escuchando el canal debido a que no poseen conocimiento previo del momento en que sus vecinos efectuarán sus transmisiones y por tanto no pueden pasar a estados de bajo consumo.

Además los nodos deben permanecer en silencio al detectar comunicaciones entre sus vecinos, pero durante este tiempo también permanecen escuchando el canal ya que el protocolo no implementa mecanismos para predecir el final de la comunicación entre los vecinos. Todo esto implica largos períodos de escucha sin transmitir o recibir información.

Para determinar que parte del tiempo los nodos están escuchando el canal innecesariamente se emplea la ecuación 3.2:

$$\text{Sobre_escucha} = \frac{\text{Tiempo_escuchando_el_canal}}{\text{Tiempo_total}} \quad (3.2)$$

La figura 3.5 muestra los resultados obtenidos para este parámetro.

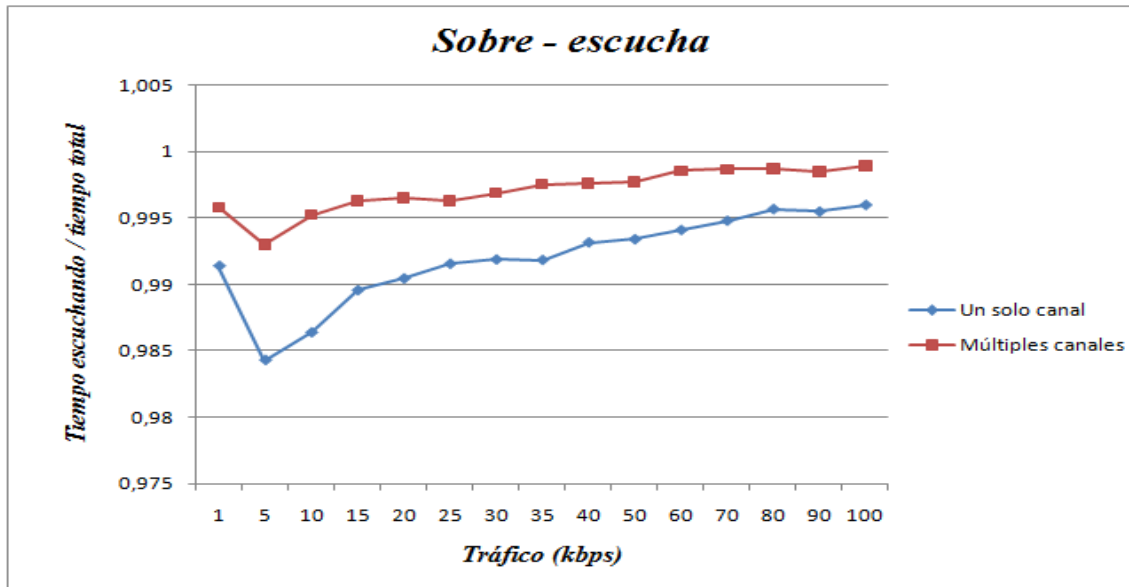


Figura 3.5: Sobre escucha.

Ambos protocolos escuchan el canal todo el tiempo siendo esta otra de las causas que su *throughput* no sea lo suficientemente elevado. El comportamiento con el aumento del tráfico es similar en los dos protocolos. En el caso del RTS / CTS multicanal los valores de la sobre escucha son ligeramente mayores por lo que su eficiencia energética en este aspecto se ve más afectada en comparación con el protocolo RTS / CTS tradicional.

3.2.4 Consumo de energía.

En la redes de sensores acústicas subacuáticas la relación entre la energía consumida para las transmisiones y la energía consumida para las recepciones es mucho mayor que en las redes terrestres. Además la potencia que se consume en el transmisor es mayor que la consumida en el receptor (epígrafe 1.5).

El consumo de energía (sección 1.4.2) en redes bajo el agua se eleva también por las deficiencias de los protocolos MAC descritas en la sección anterior. Los protocolos RTS / CTS analizados en este trabajo se ven afectados indistintamente por estas ineficiencias. Para valorar integralmente las implicaciones de cada una de ellas es necesario evaluar cuál es la energía consumida por nodo en cada uno de los protocolos.

Desde el punto de vista de la potencia consumida los nodos pueden encontrarse en diferentes estados que permiten evaluar el consumo de energía de la red. Estos estados son: transmitiendo, recibiendo o inactivo y durmiendo (*stand by*).

La potencia consumida durante las transmisiones (P) de los nodos es mucho mayor que en el resto de los estados mientras que durante el período que el nodo se encuentra durmiendo este consumo se reduce a su mínima expresión. En el caso de la recepción y los períodos de inactividad el consumo es similar debido a que en ambos casos los nodos permanecen escuchando el canal de comunicación. La relación entre el consumo en los diferentes estados se muestra en la tabla 3.2. El criterio que se siguió responde al planteado en (Harris III et al., 2006).

Tabla 3.2: Potencia consumida por estados

Estado	Descripción	Potencia consumida expresada en Watts (p)
1	Transmitiendo	P
2	Recibiendo o inactivo	$\frac{1}{10}P$
3	Durmiendo	$\frac{1}{30}P$

La expresión 3.3 define energía consumida en cada uno de los estados:

$$E_i = pt_i \quad (3.3)$$

Siendo E la energía consumida en el estado i y t el tiempo que el nodo permaneció en este estado.

La energía total consumida por cada nodo puede calcularse entonces como:

$$\sum_{i=0}^N E_i = pt_i \quad (3.4)$$

refiriéndose N a la cantidad de estados que, desde el punto de vista energético se pueden definir.

Empleando la ecuación 3.5 podemos calcular el consumo máximo de energía de cada nodo como:

$$E_{MAX} = PT \quad (3.5)$$

siendo T el tiempo total de operación de la red; esta ecuación puede ser interpretada como la energía que consume un nodo si permaneciera durante todo el tiempo de observación en el estado de mayor consumo (transmitiendo).

Los resultados que se muestran en la figura 3.6 han sido normalizados en función del consumo máximo.

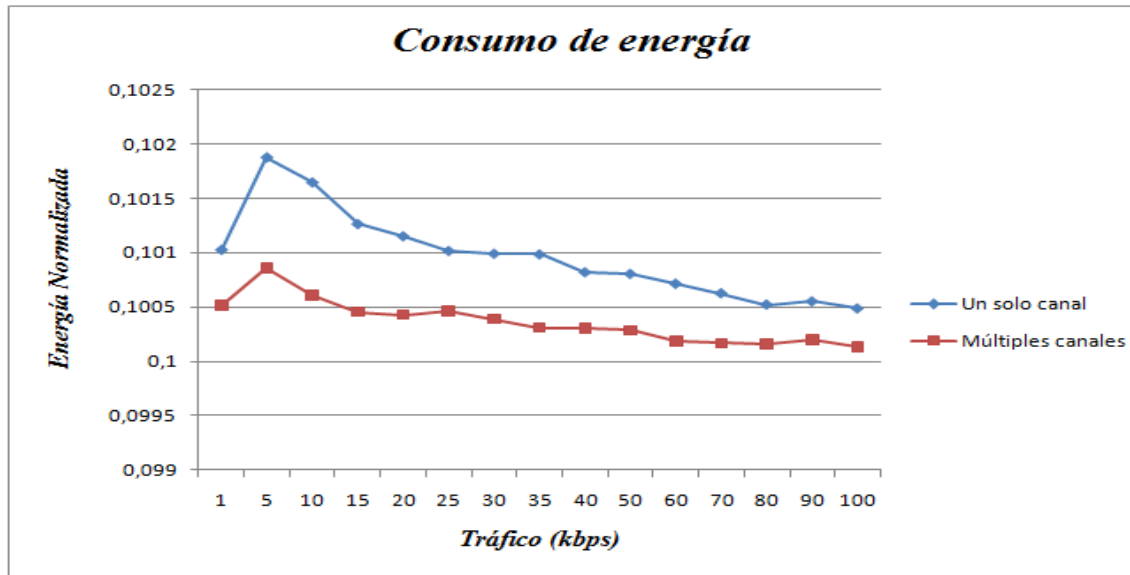


Figura 3.6: Consumo de energía normalizado.

Como se observa en la figura 3.6 el protocolo RTS / CTS multicanal presenta mejores resultados motivados en gran medida por la separación de los canales de control y de datos, lo cual propicia que el número de colisiones disminuya.

De manera general el comportamiento de los protocolos comparados es similar tanto en valores de energía alcanzados como en la estabilidad a medida que se aumenta el tráfico en la red; los picos máximos y mínimos de energía consumida se obtienen en los mismos intervalos de tráfico en la red.

3.3 Conclusiones del capítulo.

De forma general los resultados de las simulaciones muestran la superioridad del protocolo RTS / CTS multicanal y se corresponden con resultados similares a los de otros protocolos evaluados en redes subacuáticas.

A pesar que el protocolo RTS / CTS tradicional es ligeramente superior en cuanto al *throughput* este presenta resultados inferiores que el mecanismo de múltiples canales en cuanto a eficiencia en la comunicación, eficiencia energética y consumo de energía.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo son abordadas las características de mayor importancia de las redes de sensores subacuáticas. Son descritas las particularidades de la señal acústica, la cual constituye el método de comunicación más usado en estos entornos por brindar, entre otras ventajas, una atenuación menor que las señales de radiofrecuencia y que las ondas ópticas.

Son definidas la necesidad de ahorrar energía, de contrarrestar la larga y variable demora de propagación y de utilizar eficientemente el ancho de banda como los principales retos a tener en cuenta en el empleo de mecanismos de control de acceso al medio (MAC) con un buen desempeño en estos entornos.

Se describen una serie de protocolo MAC y de manera particular se detalla el protocolo RTS / CTS multicanal. Se evalúa comparativamente su funcionamiento con el del protocolo RTS / CTS tradicional, mediante la simulación, teniendo en cuenta el *throughput*, la eficiencia en la comunicación, la eficiencia energética y el consumo de energía.

Los protocolos estudiados presentan un comportamiento similar desde el punto de vista del *throughput* de la red, el cual es aún limitado por el mecanismos de reservación del canal que emplean ambos protocolos. El protocolo RTS / CTS tradicional muestra una ligera superioridad en cuanto a los valores que se alcanzaron motivado en gran medida por el empleo en las simulaciones del protocolo RTS / CTS multicanal de un solo canal de datos. Presumiblemente la utilización de más de un canal de datos conllevará a un aumento del *throughput* de la red.

La posibilidad de separar los canales por el que se transmiten mensajes de control y de datos hace del protocolo RTS / CTS multicanal un mecanismo de mayor eficiencia en la comunicación entre los protocolos presentados. Con este mecanismo se garantiza que el número de colisiones en el canal de datos sea nulo por lo que cada paquete de datos enviados será recibido sin problemas. Además, en el canal de control el número de colisiones disminuye considerablemente.

Aunque ambos protocolos están escuchando el canal en igual proporción de tiempo y tienen un costo operacional similar, la eficiencia energética del RTS / CTS tradicional

se ve disminuida como consecuencia del elevado número de colisiones que presenta en comparación con el RTS / CTS multicanal. El protocolo RTS / CTS tradicional se ve afectado en este aspecto por la utilización de un único canal para transmitir y recibir mensajes de datos y de control.

Ninguno de los protocolos analizados presenta un mecanismo que les permita ahorrar energía. Las simulaciones muestran que el consumo de energía por parte del protocolo RTS / CTS tradicional es mayor que en el protocolo RTS / CTS multicanal, sin embargo su comportamiento, si se tiene en cuenta estabilidad ante el aumento del tráfico generado y los valores alcanzados, es similar.

De forma general los resultados de las simulaciones muestran la superioridad del protocolo RTS / CTS multicanal en cuanto a eficiencia en la comunicación, eficiencia energética y consumo de energía y una pequeña ventaja del RTS / CTS tradicional en cuanto al *throughput*.

Las ventajas de emplear canales diferentes en la transmisión de mensajes de control y de datos es evidente pero la implementación en la práctica de este tipo de mecanismos es mucho más costosa y aquí radica una de las principales debilidades de los mecanismos multicanales.

Ninguno de los mecanismos estudiados en la investigación resuelve en su totalidad los desafíos presentes en las redes de sensores acústicas subacuáticas.

RECOMENDACIONES

Persiguiendo profundizar en el estudio de los protocolos MAC para las redes subacuáticas se considera pertinente:

1. Profundizar en el estudio de los mecanismos MAC de múltiples canales en el establecimiento de la comunicación por sus potencialidades para las redes subacuáticas.
2. Ampliar en las simulaciones realizadas el número de canales de datos del protocolo RTS / CTS multicanal para facilitar el aumento del throughput de la red.
3. Ampliar las simulaciones de los protocolos RTS / CTS para medir otros parámetros de interés.
4. Implementar mecanismos que permitan variar la demora de propagación y el número de nodos durante las simulaciones en estas redes.
5. Evaluar los protocolos estudiados teniendo en cuenta la demora de propagación.
6. Comprobar el desempeño de los protocolos estudiados en condiciones de movilidad de los nodos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKYILDIZ, I. F., POMPILI, D. & MELODIA, T. (2004). *Challenges for Efficient Communication in Underwater Acoustic Sensor Networks*. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- AKYILDIZ, I. F., POMPILI, D. & MELODIA, T. (2005). Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 3, 257 - 279.
- BHARGHAVAN, V., DEMERS, A., SHENKER, S. & ZHANG, L. (1994). MACAW: a media access protocol for wireless LAN's. *Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications*. London, United Kingdom: ACM.
- BHASKAR, K. (2005). *Networking Wireless Sensor*, New York, Cambridge University Press.
- CHIRDCHOO, N., SOH, W.-S. & CHAING, C. K. (2008). *MACA - MN: A MACA - based MAC Protocol for Underwater Acoustic Networks with Packet Train for Multiple Neighbors*. National University of Singapore.
- CHIRDCHOO, N., SOH, W.-S. & CHUA, K. C. (2007). Aloha-based MAC Protocols with Collision Avoidance for Underwater Acoustic Networks. *IEEE INFOCOM Minisymposium*. Anchorage, Alaska, USA.
- DONG, B. (2006). *A survey of Underwater Wireless Sensor Networks*. University Corpus Christi.
- ESCOLAR DÍAZ, S. (2010). *Wireless sensor networks: fundamento, estado del arte y desafíos*. Universidad Carlos III de Madrid.
- FULLMER, C. L. & GARCÍA, L. A. J. J. (1995). Floor acquisition multiple access (FAMA) for packet-radio networks. *Proceedings of the conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*. Cambridge, Massachusetts, United States: ACM.
- GUO, X., FRATER, M. R. & RYAN, M. J. (2006). A Propagation - delay - tolerant Collision Avoidance Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks.
- HAN, Y. S., DENG, J. & HAAS, Z. J. 2006. Analyzing multi -channel medium access control schemes with Aloha reservation. *IEEE Transaction on Wireless Communications*.
- HARRIS III, A. F., STOJANOVIC, M. & ZORZI, M. (2006). When Underwater Acoustic nodes should sleep with one eye open: idle - time power management in underwater sensor networks. *WUWNet'06*. Los Angeles, California, USA.
- HOLGER, K. & ANDREAS, W. (2005). *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*, John Wiley & Sons.
- JALÓN, J. G. D., RODRÍGUEZ, J. I. & VIDAL, J. (2005). *Aprenda Matlab 7.0 como si estuviera en primero*, Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid.
- KARN, P. (1990). MACA a new channel access method for packet radio. In: *Computer Networking Conference*, 1990. 134 -140.

- KEBKAL, K. G., KEBKAL, A. G. & KOMAR, M. (2005). Data-link protocol for underwater acoustic networks. *Proc. IEEE Oceans Europe 2005*, 1174–1180.
- KREDO, K. (2007). *Networking Support for Underwater Wireless Networks*. Doctor of Philosophy in Electrical and computer Engineering, University of California.
- LACOVARA, P. (2008). High - Bandwidth Underwater Communications. *Marine Technology Society Journal*, 42, 93 - 102.
- LIU, L., ZHOU, S. & CUI, J.-H. (2008). Prospect and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks. *In: Wiley WCMC special issue on Underwater Sensor Networks (invited)*, 2008.
- MOLINS, M. & STOJANOVIC, M. (2006). Slotted FAMA: a MAC protocol for underwater acoustic networks. *Proc. MTS/IEEE OCEAN' 06 Conference*.
- MORNS, P., HINTON, O. R., ADAMS, A. E. & SHARIF, B. S. (1997). Protocol for sus-sea communication networks. *MTS/IEEE OCEANS 1997 Conference*
- PARK, M. K. & RODOPLU, V. (2007). UWAN - MAC: An Energy - Efficient MAC Protocol for Underwater Acoustic Wireless Sensor Networks. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*.
- PARTAN, J., KUROSE, J. & LEVINE, B. N. (2006). *A Survey of Practical Issues in Underwater Networks*. Woods Hole Oceanographic Institution.
- PELEATO, B. & STOJANOVIC, M. (2007). Distance Aware Collision Avoidance Protocol for Ad - Hoc Acoustic Sensor Networks. *IEEE Communications Letters*, 11, 1025 - 1027.
- RIVAS, E. C. (2010). Estrategias de manejo del tiempo en Simulación Dinámica. Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela.
- ROBERTS, L. G. (1975). ALOHA packet system with and without slots and capture. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 5, 28 - 42.
- RODOPLU, V. & AMINZADEH, G. A. (2008). MAC Protocol Design for Underwater Networks: Challenges and New Directions. *World Scientific Review*
- RODOPLU, V. & PARK, M. K. (2005). An Energy-Efficient MAC Protocol for Underwater Wireless Acoustic Networks. *In: MTS/IEEE OCEAN'05*, 2005.
- SOZER, E. M., STOJANOVIC, M. & PROAKIS, J. G. (2000). Underwater Acoustic Networks. *IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING*, 25, 72- 83.
- STOJANOVIC, M. (2007). *Underwater Acoustic Communications: Design Considerations on the Physical Layer*. Institute of Technology
- SYED, A. A., YE, W. & HEIDEMANN, J. (2008). T - Lohi: A new class of MAC Protocols for Underwater Sensor Networks. Information Sciences Institute/USC.
- TANENBAUM, A. S. (2003). *Computer Networks*, Pearson Education, Inc.

- TOBAGI, F. A. & KLEINROCK, L. (1976). Packet switching in radio channels: Part III - polling and (dynamic) split - Channel reservation multiple access. *IEEE Transaction on Communications*, 24, 832 - 845.
- WAINER, G. A. (2005). Introducción a la simulación de sistemas de eventos discretos. Departamento de Computación - FCEN, Universidad de Buenos Aires.
- XIE, G. G. & GIBSON, J. H. (2001). A network layer protocol for UANs to address propagation delay induced performance limitations. *Proc. MTS/IEEE OCEANS'01 Conference*.
- XIE, P. & CUI, J.-H. (2006). Exploring random access and handshaking techniques in large - scale Underwater Wireless Acoustic Sensor Networks. Computer Science & Engineering Department, University of Connecticut, Storrs.
- YE, W., HEIDEMANN, J. & ESTRIN, D. (2002). An Energy - Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks.
- ZAIHAN, J. (2008). Underwater Acoustic Networks - Issues and Solutions. *International Journal of intelligent control and systems*, 13, 152 - 161.
- ZHANG, Y., XIAO, Y., MIN, C., PRAVEER, B. & MADHULIKA, K. (2006). Medium access control layer for Underwater Sensor Networks.
- ZHOU, Z., PENG, Z., CUI, J.-H. & SHI, Z. (2008). *Analyzing Multi - channel MAC Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks*. University of Connecticut, Storrs.
- ZHOU, Z., PENG, Z., CUI, J.-H. & SHI, Z. (2009). *Analyzing Multi - channel MAC Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks*. University of Connecticut, Storrs.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ACK	Reconocimiento (acknowledgment)
ALOHA	Protocolo de acceso aleatorio (Random Access Protocol)
AUVs	Vehículo autónomo subacuático (Autonomous Underwater Vehicles)
CDMA	Acceso múltiples por detección de portadora ()
CSMA	Acceso múltiple por sensado de portadora (Carrier Sense Multiple Access)
CTS	Permiso para enviar (Clear To Send)
MAC	Acceso al medio (Medium Access Control)
MACA	Acceso múltiple evitando colisiones (Multiple Access with Collision Avoidance)
MACAW	Acceso múltiple evitando colisiones para redes inalámbricas (Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless)
MACA - MN	Protocolo MAC para redes acústicas subacuáticas basado en MACA con un tren de paquetes para múltiples vecinos (MACA – based MAC protocol for Underwater Acoustic Networks with packet train for multiple neighbors)
PCAP	Protocolo que evita colisiones tolerante a la demora de propagación (Propagation delay tolerant Collision Avoidance Protocol)
RTS	Petición de permiso para transmitir (Request To Send)
TDMA	Acceso múltiple por división del tiempo (Time Division Multiple Access)

ANEXO I: Error en la estimación.

Los resultados mostrados responden a la media del parámetro estimado. Para su obtención se realizaron cinco simulaciones y se empleó la ecuación I.1 con el objetivo de determinar el error máximo en la estimación

$$E = t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (I.1)$$

donde $t_{\alpha/2}$ representa la distribución t con parámetro $v = n - 1$ y $(1 - \alpha)100\%$ la certeza de que el error sea menor que E , s la desviación estándar de la muestra y n el número de muestras.

Las siguientes tablas muestran al máximo error cometido en la estimación de cada parámetro con un 95 % de certeza.

Tabla I.1: Error máximo en la estimación del Throughput

Tráfico	Error máximo en la estimación (95 % de certeza)	
	RTS / CTS	
	Un canal	Múltiples canales
1	0,345767316	0,345766838
5	1,229348818	1,289318797
10	1,731668207	2,599289179
15	1,345175703	0,741349803
20	0,847373109	1,079551503
25	0,389542608	0,691677484
30	0,96165508	0,746844684
35	0,412085092	0,816706647
40	0,909842144	1,432337778
50	0,674060273	1,027747924
60	0,279812941	0,803122527
70	0,512337234	0,398559318
80	0,088528144	0,503881958
90	0,512199841	0,569433185
100	0,293896391	0,438341722

Tabla I.2: Error máximo en la estimación de la Eficiencia en la comunicación.

Tráfico	Error máximo en la estimación (95 % de certeza)	
	RTS / CTS	
	Un canal	Múltiples canales
1	0	0
5	0	0
10	0	0
15	0	0
20	0,002445815	0
25	0,004927811	0
30	0,002949599	0
35	0,002953191	0
40	0	0
50	0,002376894	0
60	0,006078832	0
70	0	0
80	0,003156993	0
90	0,005329068	0
100	0,003820987	0

Tabla I.3: Error máximo en la estimación del Número de colisiones.

Tráfico	Error máximo en la estimación (95 % de certeza)	
	RTS / CTS	
	Un canal	Múltiples canales
1	0,33312	0,11104
5	0,922367514	0,508849205
10	0,905503797	0,514871299
15	0,508849205	0,78517137
20	2,547878071	0,88832
25	1,143226771	0,642690465
30	1,32086269	1,325521832
35	2,449180965	0,715325161
40	1,473112067	0,796861909
50	0,693444578	0,656921499
60	1,23648911	0,796861909
70	1,355415936	0,392585685
80	1,795623579	1,062160142
90	1,923269217	1,032731697
100	2,426420916	0,753109921

Tabla I.4: Error máximo en la estimación del Costo operacional.

Tráfico	Error máximo en la estimación (95 % de certeza)	
	RTS / CTS	
	Un canal	Múltiples canales
1	0,002961067	0,002961067
5	0,005509551	0,005579188
10	0,0041404	0,004688385
15	0,003854307	0,010500861
20	0,013622502	0,012918937
25	0,011198967	0,006803727
30	0,00891717	0,010288044
35	0,012063298	0,012108709
40	0,008899619	0,040241129
50	0,013020937	0,016198774
60	0,015606417	0,037438653
70	0,022113419	0,017624733
80	0,020780826	0,044198163
90	0,013651906	0,023382748
100	0,037566191	0,044738761

Tabla I.5: Error máximo en la estimación de la Sobre escucha.

Tráfico	Error máximo en la estimación (95 % de certeza)	
	RTS / CTS	
	Un canal	Múltiples canales
1	0,00158405	0,000664832
5	0,003595152	0,00170897
10	0,003508371	0,002089779
15	0,003024346	0,000780084
20	0,002090817	0,001273256
25	0,000416241	0,000516757
30	0,001765544	0,000881605
35	0,000983236	0,000698935
40	0,00204477	0,001295425
50	0,001285623	0,000914315
60	0,000348533	0,00064372
70	0,001210976	0,000357386
80	0,000426174	0,000401615
90	0,000961953	0,000464775
100	0,000513935	0,000354374

Tabla I.6: Error máximo en la estimación del Consumo de energía.

Tráfico	Error máximo en la estimación (95 % de certeza)	
	RTS / CTS	
	Un canal	Múltiples canales
1	9,32416E-05	4,66207E-05
5	0,000335349	0,000175686
10	0,000467581	0,000352172
15	0,000365152	0,000100712
20	0,000228573	0,000146479
25	0,000103864	9,36615E-05
30	0,000258238	0,000100187
35	0,000111051	0,000110174
40	0,000249615	0,000193637
50	0,000182645	0,000139891
60	7,25272E-05	0,000108066
70	0,000140912	5,41643E-05
80	2,22982E-05	6,90905E-05
90	0,000138315	7,67583E-05
100	7,5094E-05	5,83368E-05

