

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

**Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica**



**Análisis comparativo de mecanismos de control de
acceso al medio para redes subacuáticas**

**Tesis presentada en opción del Título Académico de Máster en
Telemática**

Autor: Ing. Erik Ortiz Guerra

Tutor: Dr. Vitalio Alfonso Reguera

Santa Clara

2011

“Año 53 de la Revolución”

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

**Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica**



**Análisis comparativo de mecanismos de control de
acceso al medio para redes subacuáticas**

**Tesis presentada en opción del Título Académico de Máster en
Telemática**

Autor: Ing. Erik Ortiz Guerra

E-mail: erik@uclv.edu.cu

Tutor: Dr. Vitalio Alfonso Reguera

E-mail: vitalio@uclv.edu.cu

Santa Clara

2011

“Año 53 de la Revolución”



Hago constar que la presente Tesis en Opción al Título Académico de Máster en Ciencias Telemáticas fue realizada en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de Maestría en Telemática, 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 Tutor

Firma del Jefe de Departamento

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

DEDICATORIA

*A mis padres, por poner siempre mi educación
por encima de todo.*

AGRADECIMIENTOS

A MI FAMILIA, por estar siempre al tanto de mis estudios, en especial a mis padres y tíos.

A MI TUTOR, Vitalio Alfonso Reguera por su ayuda y cooperación en este trabajo el cual sin su ayuda y dedicación hubiese sido imposible.

A LOS PROFESORES DE LA MAESTRÍA EN TELEMÁTICA, por los conocimientos aportados durante este período.

A MIS COMPAÑEROS DE TRABAJO, por compartir conmigo los buenos y malos momentos.

MUCHAS GRACIAS

RESUMEN

Las redes subacuáticas pueden emplearse en gran cantidad de aplicaciones, desde el monitoreo medioambiental hasta la prevención de desastres, sin embargo, su desarrollo presenta grandes desafíos, relacionados con las complejidades del canal de comunicación subacuático. La baja y variable velocidad de propagación, el limitado ancho de banda y la baja disponibilidad de energía constituyen los principales retos en dichas redes. Estas complejidades hacen necesario el desarrollo de nuevos protocolos de comunicación capaces de obtener un alto desempeño minimizando el consumo de energía.

En este trabajo se realiza un estudio comparativo entre cuatro protocolos de acceso al medio y sus variantes: CSMA {}, MACAW (*Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless*), T_Lohi (*Tone Lohi*¹) y UWAN-MAC (*Underwater Wireless Acoustic Networks-Medium Access Control*). El primero constituye un protocolo de acceso aleatorio y el resto emplean mensajes para reservar el canal de comunicación. El estudio está centrado en la evaluación del *throughput*, la eficiencia en la comunicación, la eficiencia energética y el consumo de energía.

Los resultados obtenidos muestran la ineficiencia del CSMA en estos entornos, la validez de los mecanismos de reservación del canal del MACAW y sus limitaciones en cuanto al *throughput* de la red. El T_Lohi muestra el mejor desempeño en este aspecto y el UWAN-MAC obtiene los mejores resultados en cuanto a la eficiencia en la comunicación y el consumo de energía.

¹ Lohi en hawaiano significa lento y fue el nombre elegido por los desarrolladores del protocolo como referencia a la baja velocidad de propagación del sonido en el agua.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1: PARTICULARIDADES DE LAS COMUNICACIONES SUBACUÁTICAS 3

 1.1 Redes de sensores subacuáticas 3

 1.2 Arquitectura de comunicación 4

 1.2.1 Redes de dos dimensiones 4

 1.2.2 Redes de tres dimensiones 6

 1.3 Métodos de comunicación bajo el agua 7

 1.3.1 Ondas de radio frecuencia 7

 1.3.2 Señales ópticas 8

 1.3.3 Señales acústicas 9

 1.4 Características de las comunicaciones acústicas bajo el agua 10

 1.5 Comparación con las redes terrestres 11

 1.6 Retos en los mecanismos de control de acceso al medio 12

 1.6.1 Demora de propagación 13

 1.6.2 Consumo de energía 15

 1.7 Consideraciones finales 16

CAPÍTULO 2: MECANISMOS DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO EN REDES SUBACUÁTICAS 17

 2.1 Protocolos MAC desarrollados recientemente 17

 2.2 Descripción del protocolo CSMA 18

 2.2.1 Problema del nodo oculto y nodo expuesto 20

2.3 Descripción del protocolo MACAW	21
2.4 Descripción del protocolo T_Lohi	23
2.4.1 T_Lohi sincrónico (ST_Lohi).....	24
2.4.2 T_Lohi asincrónico (UT_Lohi).....	26
2.5 Descripción del protocolo UWAN-MAC	27
2.5.1 Principio de funcionamiento del protocolo	27
2.5.2 Fase de inicialización	28
2.5.3 Fase de transmisión de datos	29
2.6 Consideraciones finales.....	30
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS PROTOCOLOS ESTUDIADOS.	31
3.1 Entorno de simulación.....	31
3.2 Parámetros medidos	32
3.2.1 Razón de paquetes por segundo (<i>throughput</i>).....	32
3.2.2 Eficiencia en la comunicación.....	33
3.2.3 Eficiencia energética	34
3.2.4 Consumo de energía	39
3.3 Consideraciones finales.....	41
CONCLUSIONES	43
RECOMENDACIONES	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
GLOSARIO DE TÉRMINOS	51
ANEXO I: ERROR EN LA ESTIMACIÓN	53

INTRODUCCIÓN

Las potencialidades de las redes sensores han despertado el interés de los investigadores en las últimas décadas debido a la gran cantidad de aplicaciones que pueden ser desarrolladas y a la favorable relación costo-beneficio que presentan.

Particularmente, las redes de sensores subacuáticas pueden ser empleadas en la prevención de desastres, exploraciones subacuáticas, monitoreo ambiental, vigilancia y recolección de información de entornos sumergidos, entre otras.

El canal de comunicación subacuático impone retos adicionales a las comunicaciones: la alta y variable demora de propagación, la atenuación, el consumo de energía, así como el limitado ancho de banda constituyen los principales obstáculos a vencer en estos entornos. El empleo de un canal compartido unido a las características mencionadas, hacen que el uso de mecanismos de control de acceso al medio (MAC de sus siglas en inglés) adecuados constituya una de las áreas de atención más importantes en estas redes.

Los principales requisitos que deben cumplir los protocolos MAC en estas redes se resumen en lograr el máximo número de transmisiones, minimizando el consumo de energía y garantizando el reparto “justo” del ancho de banda disponible entre todos los componentes de la red.

Para cumplir con estos propósitos han sido desarrollados protocolos MAC que logran, en una u otra medida, vencer algunos de los retos impuestos a las comunicaciones en estos entornos. Sin embargo, no ha sido desarrollado un protocolo MAC que presente resultados óptimos en todos los indicadores de desempeño para un amplio grupo de escenarios.

El objetivo general de este trabajo es realizar un estudio comparativo del desempeño de mecanismos de control de acceso al medio para ser empleados en redes de sensores subacuáticas. Este estudio se centra en los protocolos CSMA, MACAW, T_Lohi y UWAN-MAC, para dar cumplimiento al objetivo general fueron trazados los siguientes objetivos específicos:

- Determinar las particularidades del canal de comunicaciones subacuático.
- Caracterizar los mecanismos de control de acceso al medio (MAC) para su óptimo funcionamiento en redes de sensores subacuáticas.
- Describir protocolos MAC desarrollados para las redes de sensores subacuáticas.
- Confeccionar, con ayuda de MatLab, los simuladores apropiados para el estudio del comportamiento de los protocolos MAC desarrollados para redes de sensores subacuáticas.
- Comparar el desempeño de los protocolos MAC con el objetivo de identificar sus fortalezas y limitaciones.

Los métodos científicos sobre los cuales se desarrolla esta investigación son:

- Métodos teóricos inductivo deductivo y análisis síntesis, los cuales fueron empleados para la generalización de los resultados obtenidos.
- La simulación fue empleada como método empírico para evaluar y comparar el desempeño de los protocolos estudiados en diferentes escenarios.

La memoria escrita está estructurada en introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía, glosario de términos y anexos. En el primer capítulo se recogen las principales características de las redes de sensores subacuáticas así como los principales retos de las comunicaciones en estos entornos. En el segundo capítulo se describen los protocolos CSMA, MACAW, T_Lohi y UWAN-MAC así como las variantes de cada uno. 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: PARTICULARIDADES DE LAS COMUNICACIONES SUBACUÁTICAS

1.1 Redes de sensores subacuáticas

Las redes de sensores son ampliamente empleadas en la actualidad para diferentes propósitos. Están constituidas, en la generalidad de los casos, por un conjunto de sensores convenientemente distribuidos los cuales realizan tareas de monitoreo y recolección de información, que es enviada, empleando medios físicos o inalámbricos, para su procesamiento y análisis (Karl and Willig 2005; Krishnamachari 2005).

Las redes de sensores terrestres son las más difundidas y existen gran variedad de ellas que son empleadas en numerosas aplicaciones como: control medio ambiental, construcciones inteligentes, logística o prevención de desastres.

A pesar de que las comunicaciones bajo el agua han sido probadas desde la Segunda Guerra Mundial cuando en 1945 fue desarrollado un teléfono subacuático para comunicarse con los submarinos (Akyildiz, Pompili et al. 2005; Akyildiz, Pompili et al. 2006), no ha sido hasta las últimas décadas que han captado la atención de investigadores y desarrolladores, este interés ha estado motivado en gran medida por la gran cantidad de aplicaciones que poseen.

De la misma manera que las terrestres, las redes de sensores subacuáticas pueden ser empleadas en gran cantidad de aplicaciones que van desde pequeñas redes para el monitoreo hasta amplias y complejas redes para el desarrollo de investigaciones científicas. Algunas de las aplicaciones más destacadas son (Akyildiz, pompili et al. 2004; Akyildiz, Pompili et al. 2005; Jiang 2008):

Monitoreo medio ambiental: Pueden muestrear la contaminación (química, biológica o nuclear) con el objetivo de controlar ríos, lagos o bahías. Además del seguimiento de corrientes oceánicas, que pueden emplearse para detectar cambios climáticos o predecir el impacto de la actividad humana sobre ecosistemas acuáticos.

Exploraciones submarinas: Estas redes pueden contribuir de manera significativa a la detección de yacimientos de minerales vitales para la actividad humana, así como exploraciones que permitan conocer las particularidades de los entornos sumergidos.

Prevención de desastres: A través de la medición de la actividad sísmica desde localizaciones remotas se pueden proveer alarmas de tsunami a zonas costeras o estudiar el efecto de terremotos submarinos.

Navegación asistida: Los sensores pueden utilizarse para identificar peligros en los fondos marinos, localización de rocas peligrosas o bancos de arena en aguas poco profundas así como para ubicar restos de barcos sumergidos o para realizar estudios de profundidad.

Vigilancia táctica distribuida: Sensores fijos y vehículos autónomos subacuáticos (AUVs) pueden ser empleados de manera conjunta en sistemas de vigilancia, navegación y detección de intrusos.

1.2 Arquitectura de comunicación

En (Akyildiz, Pompili et al. 2004; Zhang, Xiao et al. 2006) son discutidas las arquitecturas de comunicación en estas redes, las mismas pueden ser divididas en: redes de sensores subacuáticas de dos dimensiones o redes de sensores subacuáticas de tres dimensiones. La elección de una u otra debe realizarse en función de las necesidades de la aplicación a implementar.

1.2.1 Redes de dos dimensiones

Esta arquitectura, mostrada en la figura 1.1, está compuesta por un grupo de sensores que son anclados al fondo marino de manera tal que todos estén ubicados a la misma profundidad.

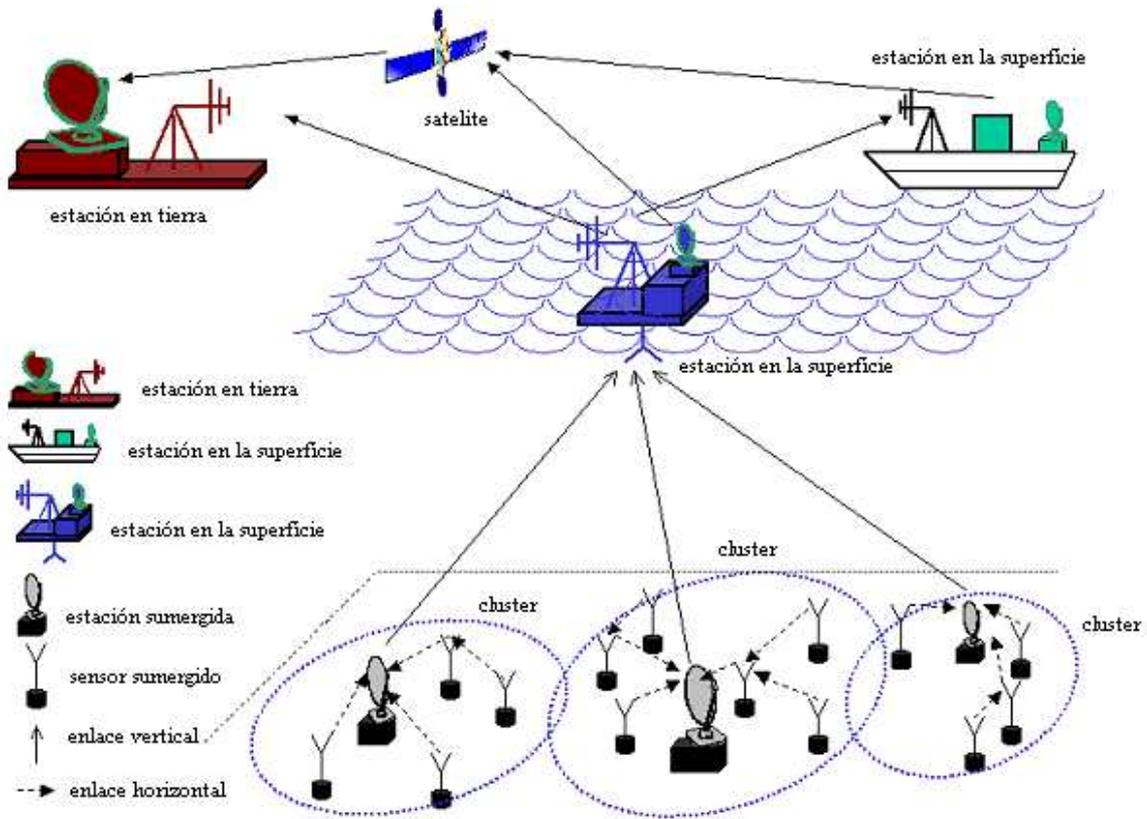


Figura 1.1: Arquitectura de comunicación de dos dimensiones.

Cada uno de los sensores puede estar conectado a una o varias estaciones que son los componentes de la red encargados de transmitir la información de los sensores hacia la superficie, para lograr este objetivo las estaciones deben estar provistas de dos transceivers, uno para las comunicaciones con los sensores (comunicaciones horizontales) y otro para las comunicaciones con la superficie (comunicaciones verticales).

La estación situada en la superficie necesita estar equipada con transceivers que permitan manejar múltiples comunicaciones paralelas con las estaciones situadas bajo el agua y transceivers para establecer enlaces de radiofrecuencia y/o satelitales para reenviar la información recolectada a estaciones en tierra para su análisis y procesamiento.

Los sensores pueden establecer conexiones directamente con la estación pero desde el punto de vista de la eficiencia energética esta variante no es la más adecuada debido a que

si la distancia entre el sensor y la estación es considerable la potencia necesaria para la transmisión es mayor ya que esta aumenta con la distancia. Además de ello la cantidad de información por unidad de tiempo se hace menor debido a las interferencias que se producen al emplear una mayor potencia de transmisión (Akyildiz, pompili et al. 2004).

En el caso de emplear múltiples saltos, la información es reenviada por cada sensor de la red hasta llegar a la estación y con ello se logra una mejor eficiencia energética y se logra aumentar la capacidad de la red pero este procedimiento añade complejidades adicionales ya que se necesitan protocolos de ruteo que garanticen la comunicación hasta su destino final.

1.2.2 Redes de tres dimensiones

La figura 1.2 muestra un ejemplo de esta arquitectura, en ella los sensores se encuentran flotando a diferentes niveles y la profundidad de cada uno puede regularse de manera estática o dinámica en función de las necesidades de la red.

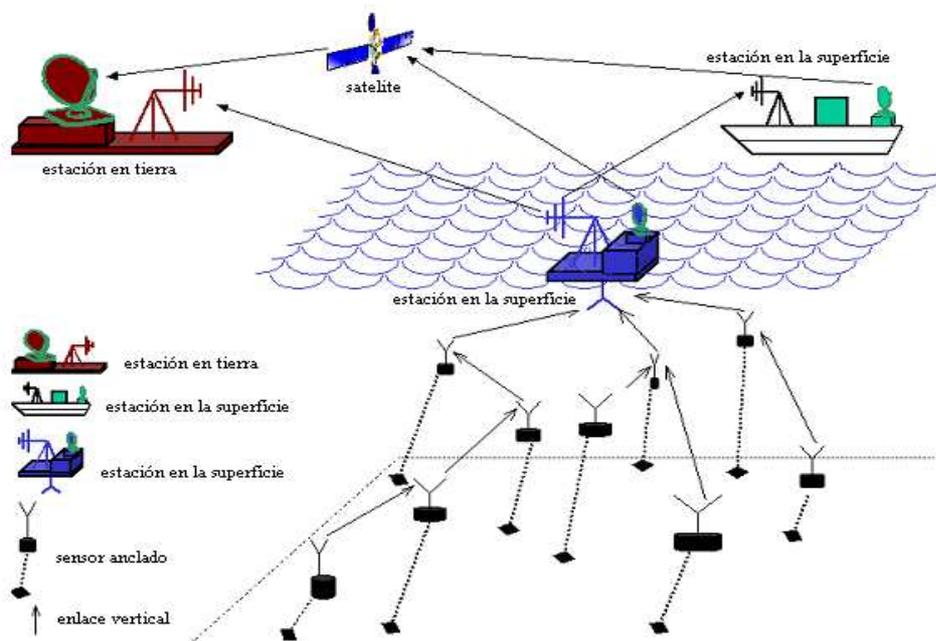


Figura 1.2: Arquitectura de comunicación de tres dimensiones.

Para garantizar un correcto censado es necesario que los nodos se mantengan fijos en su posición, para ello pueden emplearse bollas que empleen cables para regular la profundidad de cada sensor. A pesar de ser esta una solución sencilla y de fácil implementación, la presencia de múltiples bollas flotantes puede obstruir la navegación, además para el caso de aplicaciones militares pueden ser detectados y desactivados fácilmente. Por estas razones es recomendable que los sensores sean anclados al fondo y estén equipados con una bolla que los mantenga en dirección vertical hacia la superficie.

1.3 Métodos de comunicación bajo el agua

Para establecer la comunicación entre los dispositivos de la red es necesario el empleo de un canal de comunicación que garantice la comunicación a largas distancias, un ancho de banda suficiente y un buen desempeño ante interferencias o efectos no deseados en la comunicación. Para este propósito pudieran emplearse ondas de radio frecuencia, señales ópticas o señales acústicas.

1.3.1 Ondas de radio frecuencia

De la misma manera que la atmósfera, el agua en su estado natural es un medio eléctricamente conductor con una conductividad de 4.3 S/m para el caso de agua salada y 2 o 3 órdenes de magnitud menor cuando se trata de agua dulce (Lacovarca 2008). Este parámetro tiene una profunda incidencia en la propagación de señales de radio frecuencia en estos entornos. La figura 1.3 muestra la atenuación en función de la frecuencia de trabajo para el caso de agua salada.

Además de la atenuación, esta tecnología es severamente afectada por la interferencia intersímbolo y aunque se pueden establecer comunicaciones del orden de Mbps, estas velocidades se logran a distancias muy pequeñas (pocos metros). Un ejemplo de ello lo demuestran los experimentos realizados en la Universidad de California del Sur por Robotic Embedded System Laboratory (RESL) en los cuales se lograron velocidades de 1-8 kbps para rangos de 6-10 m. Cuando la comunicación se produce a altas frecuencias las distancias a las que se puede transmitir son muy cortas. Experimentos en este sentido han

demostrado que a 433MHz se logra un rango de aproximadamente 120 cm (Partan, Kurose et al. 2006).

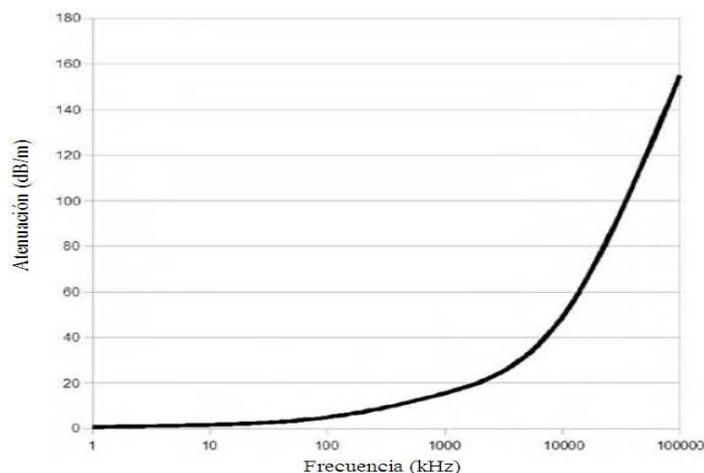


Figura 1.3: Atenuación de las señales de RF en agua salada (Lacovarca 2008).

1.3.2 Señales ópticas

La comunicación por fibra óptica emplea transmisiones de luz a muy alta frecuencia garantizando comunicaciones a altas velocidades, del orden de Tbps (Mukherjee 1997). Esto hace que sea una solución ideal para comunicaciones que necesiten un gran ancho de banda y grandes distancias de comunicación. Sin embargo para el caso de las comunicaciones bajo el agua, la necesidad de establecer cables de fibra óptica para la comunicación, limitaría la movilidad de la red por tanto su empleo en estos entornos está limitado a redes estáticas.

Con el objetivo de evitar las limitaciones impuestas por el empleo de cables de fibra óptica pudiera utilizarse la transmisión de señales de luz empleando como medio de propagación el agua, de la misma manera que ha sido empleado el aire para comunicaciones ópticas en gran cantidad de aplicaciones (Lacovarca 2008).

Las características de propagación de la luz en el agua difieren considerablemente de la propagación en entornos terrestres. Primeramente el empleo de altas frecuencias para la transmisión hace que el efecto de la conductividad iónica del agua sea despreciable. Sin

embargo, se producen grandes pérdidas de energía debido a diferentes mecanismos producidos por el agua y los compuestos disueltos en ella (Lacovarca 2008), fenómenos como la absorción intrínseca y el esparcimiento molecular son sus principales causas.

La atenuación es uno de los principales problemas que enfrenta la propagación óptica en medios sumergidos y en el agua puede ser hasta 1000 veces más grande que en el aire (Liu, Zhou et al. 2008). A pesar de estos inconvenientes, empleando longitudes de onda entre el azul y el verde se pueden lograr comunicaciones entre 10 y 150 Mbps en cortas distancias (10-100 metros) (Lacovarca 2008; Liu, Zhou et al. 2008). Estos sistemas ópticos pueden emplearse en aplicaciones como: mantenimiento en instalaciones petrolíferas o para el anclaje de submarinos a tierra.

1.3.3 Señales acústicas

Las comunicaciones acústicas constituyen la tecnología más versátil y ampliamente usada en las comunicaciones bajo el agua (Lacovarca 2008; Liu, Zhou et al. 2008). Esto se debe a la baja atenuación que sufren las ondas acústicas respecto a las variantes antes discutidas, fundamentalmente, en ambientes estables térmicamente y a profundidades considerables (Liu, Zhou et al. 2008).

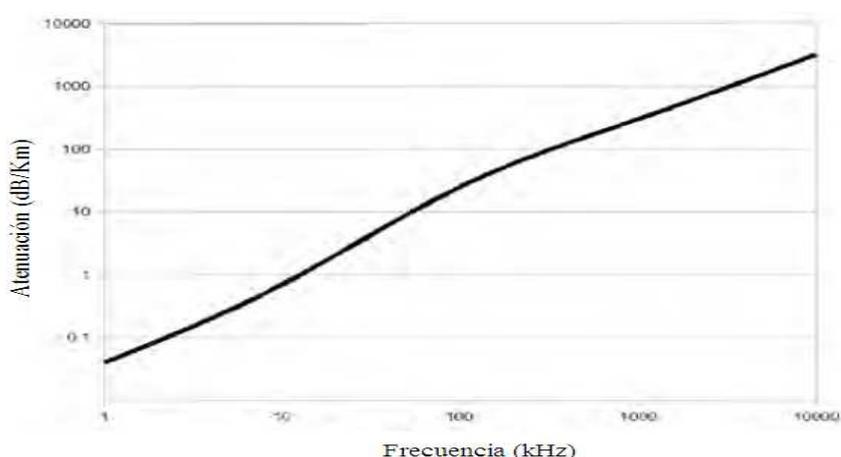


Figura 1.4: Atenuación de las señales acústicas en agua salada (Lacovarca 2008).

A bajas frecuencias la atenuación es producida por la absorción molecular de componentes disueltos en el agua como por ejemplo: ácido bórico y carbonato de magnesio (Lacovarca

2008). La figura 1.4 muestra la atenuación de estas señales en función de la frecuencia de operación, la cual evidencia que la atenuación para frecuencias en el orden de 10 kHz, comparada con las señales de radio frecuencia, es considerablemente menor (aproximadamente 10 dB/km para las señales acústicas respecto a 10dB/m para las de radio frecuencia). Lo que hace posible las comunicaciones a largas distancias.

1.4 Características de las comunicaciones acústicas bajo el agua

Las pérdidas de absorción y dispersión de las ondas acústicas bajo el agua son mucho menores que para las ondas electromagnéticas y esta ha sido la razón principal para su empleo en las comunicaciones subacuáticas (Raichel 2006). Estas unidas a las pérdidas de propagación constituyen las tres principales causas de atenuación en estos entornos (Preisig 2005).

Las pérdidas de propagación son causadas por el esparcimiento de la energía de la señal acústica cuando se propaga en grandes áreas, disminuyendo a razón de R^{-2} para comunicaciones horizontales y R^{-1} para las verticales, donde R constituye la distancia de propagación (Preisig 2005).

La absorción ocurre debido a la conversión de la energía en calor (Preisig 2005) y en el agua del mar esta absorción es extremadamente dependiente de la frecuencia de operación, la temperatura y la salinidad. Un estudio detallado de este fenómeno puede ser encontrado en (Preisig 2005; Jiang 2008).

La absorción y las pérdidas de propagación poseen dos implicaciones importantes que limitan las comunicaciones en estos entornos. En primer lugar para distancias cortas las pérdidas de propagación dominan sobre las de absorción y en segundo lugar la dependencia entre la absorción y la frecuencia de operación hace que para 100 kHz la absorción sea 15 dB más grande que para comunicaciones a 25 kHz (Preisig 2005; Jiang 2008). Esta dependencia hace que el ancho de banda disponible disminuya en la medida que aumenta la distancia de comunicación. Ambas características poseen un impacto significativo en la elección del tipo de modulación y en los mecanismos de control de acceso al medio a emplear.

La velocidad del sonido en el agua constituye otra de las particularidades del canal subacuático, y depende de factores como: temperatura, salinidad y presión; este último estrechamente relacionado con la profundidad. Un estudio detallado de cada uno de estos factores puede ser encontrado en (Raichel 2006; Liu, Zhou et al. 2008). La velocidad típica de propagación de las señales acústicas en el agua es de 1500 m/s aproximadamente (Akyildiz, Pompili et al. 2004; Preisig 2005; Raichel 2006; Stojanovic 2007), siendo 4 veces más rápida que en el aire pero considerablemente más pequeña que la velocidad de la luz. En el epígrafe 1.6.1 se discute como contrarrestar los efectos de la baja velocidad de propagación.

1.5 Comparación con las redes terrestres

Las comunicaciones bajo agua coinciden con las comunicaciones inalámbricas terrestres en muchos sentidos. En ambas: las colisiones a menudo provocan pérdida de paquetes, y la potencia de transmisión requerida crece con la distancia. Estas similitudes permiten a los investigadores, en el campo de las redes de sensores subacuáticas, usar muchos de los conceptos y teorías básicas desarrolladas hace más de 50 años en las comunicaciones inalámbricas terrestres (Kredo 2007).

Desde el punto de vista de las particularidades del canal de comunicación las principales diferencias están referidas a (Jiang 2008):

Limitado ancho de banda de las comunicaciones acústicas bajo el agua debido a la dependencia entre la frecuencia de operación y las pérdidas de absorción.

Mayor demora de propagación, motivado por la significativa diferencia entre la velocidad de la luz (300 000 000 m/s) y la velocidad de propagación del sonido en el agua (1500 m/s) lo cual limita la sincronización temporal y la ubicación de los dispositivos en las redes subacuáticas.

Las características del canal varían en el tiempo y dependen de la ubicación del transmisor y el receptor, estas fluctuaciones provocan la fácil distorsión de las señales y condicionan la

interferencia inter-símbolos siendo mucho más crítica en los entornos subacuáticos (Stojanovic 2007).

Alta probabilidad de error de bit y en algunos casos pérdida de conectividad momentánea debido a la presencia de zonas de silencio (Syed, Ye et al. 2007).

Teniendo en cuenta las consideraciones de implementación las diferencias más notables pueden expresarse por (Akyildiz, Pompili et al. 2006):

Costo: Mientras que las redes de sensores se espera que sean cada vez más baratas, los sensores subacuáticos son dispositivos caros. Esto se debe especialmente a la mayor complejidad de los transmisores subacuáticos y a la protección de hardware necesaria en el hostil ambiente subacuático.

Despliegue: Mientras que las redes terrestres de sensores están densamente desplegadas; bajo agua, el despliegue se considera que será escaso, debido al costo involucrado y a los retos asociados a la ubicación de los dispositivos.

Potencia: La potencia que necesitan las comunicaciones subacuáticas es mayor que en las radiocomunicaciones terrestres, debido a las largas distancias y el procesamiento de señal más complejo en los receptores para compensar los defectos del canal subacuático.

Memoria: Mientras que los nodos terrestres tienen la capacidad de almacenamiento muy limitada, es posible que los sensores subacuáticos tengan que ser capaces de almacenar algunos datos debido a que en determinados momentos el canal subacuático puede tornarse intermitente.

1.6 Retos en los mecanismos de control de acceso al medio

Una característica esencial de las comunicaciones inalámbricas es que emplean un medio inherentemente compartido. Para controlar y ordenar el acceso al canal es necesario el empleo de mecanismos de control de acceso al medio (MAC) que garanticen de manera correcta las comunicaciones.

Las principales características de los protocolos de acceso al medio tienen como objetivos fundamentales garantizar una eficiente utilización del ancho de banda disponible así como

un acceso justo al canal de comunicaciones (Tanenbaum 2003). En el caso de las redes de sensores subacuáticas el control de acceso al canal posee retos adicionales debido a las peculiaridades del canal subacuático. En particular, el ancho de banda limitado, la alta y variable demora de propagación y las limitaciones en cuanto al consumo de energía, constituyen los principales retos a vencer en estos entornos.

1.6.1 Demora de propagación

La alta demora de propagación así como su dependencia de la ubicación de los dispositivos atenta contra el buen desempeño de los protocolos de acceso al medio. Sin embargo, su estimación puede utilizarse por los protocolos que emplean mecanismos de reserva del canal para minimizar los tiempos de espera contribuyendo de esta manera al aumento de la cantidad de paquetes enviados por unidad de tiempo (Chen and Wang 2007; Chirdchoo, Soh et al. 2007).

Los retos que impone la gran demora de propagación en estas redes pueden enfrentarse de dos maneras: empleando mensajes de inicialización o saludo que permitan la estimación de la demora, o mediante marcas de tiempo relativo estampadas en los mensajes (Rodoplu and Gohari 2008).

La primera variante de enfrentar la demora de propagación se ilustra en la figura 1.5. Con este procedimiento el nodo A necesita estimar la demora de propagación hasta el nodo B y para ello emite una señal (*beacon*), dejando registrado el instante de tiempo en el cual fue emitida. El nodo B al recibirla inmediatamente emite una señal de reconocimiento (ACK). Al detectar esta señal el nodo A divide entre dos (suponiendo que la demora es simétrica) la diferencia entre el momento en que fue transmitida la señal inicial y el momento de arribo del ACK con lo cual obtiene la demora de propagación hasta el nodo B. De la misma manera el nodo B puede estimar la demora hasta el nodo A y para ello A debe responder con un ACK al recibir el ACK de B.

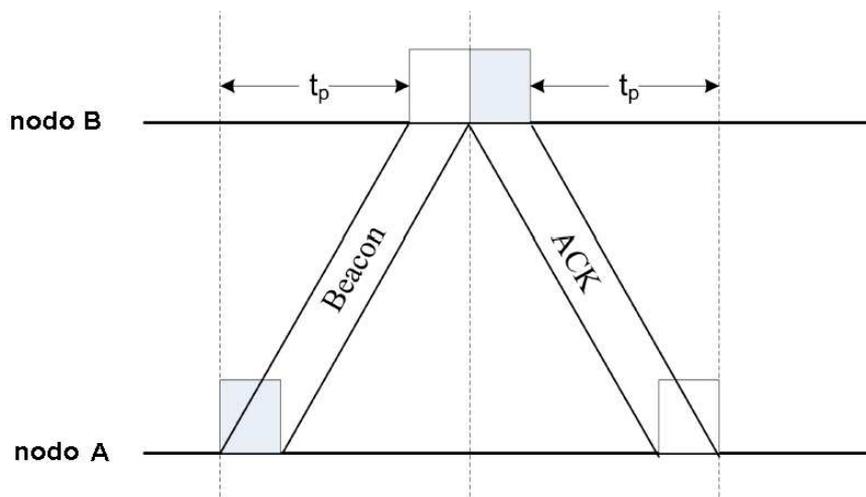


Figura 1.5: Mecanismo para la estimación de la demora de propagación.

El mecanismo antes descrito es refinado en (Guo, Frater et al. 2006; Xie and Cui 2007) para evitar una inadecuada estimación cuando el nodo B al recibir el mensaje inicial no puede responder de manera inmediata por estar, por ejemplo atendiendo una comunicación con otro nodo. Este refinamiento propone incluir en los paquetes ACK el tiempo transcurrido entre al arribo del mensaje y la transmisión del ACK con lo cual el nodo A puede fácilmente calcular la demora.

La segunda manera de enfrentar la demora de propagación parte del conocimiento de cada nodo de la red del momento exacto en que transmitirán cada uno de sus vecinos y a partir de esto los nodos pueden permanecer en estados de bajo consumo de energía y prepararse para la recepción en el momento indicado.

Con el objetivo de que cada nodo de la red conozca el momento en que se producirán las transmisiones es necesario que, antes de transmitir sus datos, cada uno de ellos anuncie su período de transmisión (T_0) el cual constituye el tiempo que transcurrirá hasta que el nodo envíe datos nuevamente. De esta manera al recibir T_0 los nodos vecinos conocen el momento de la próxima transmisión, la figura 1.6 muestra este mecanismo.

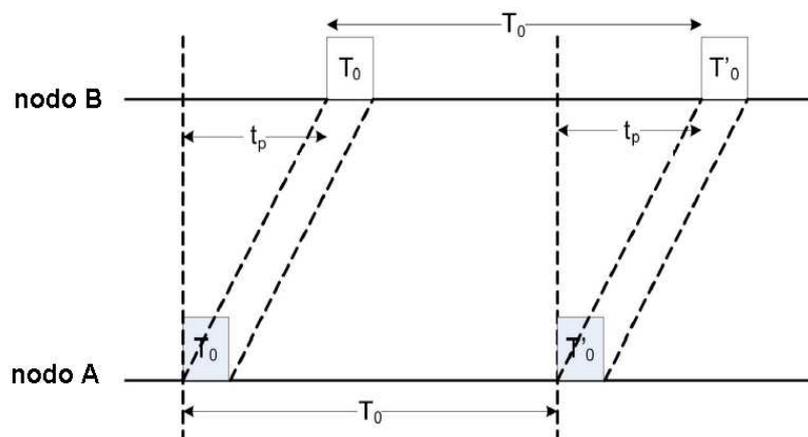


Figura 1.6: Anuncio de la próxima transmisión (Rodoplu and Gohari 2008).

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. En la sección 2.5 se describe un protocolo que implementa estos mecanismos con el objetivo de conseguir un ahorro significativo de energía.

1.6.2 Consumo de energía

La imposibilidad de emplear la energía solar así como la complejidad para realizar actividades de mantenimiento una vez instalados los dispositivos de la red hacen que el consumo de energía sea un aspecto de vital importancia a tener en cuenta para el diseño de los protocolos MAC.

Una solución común para disminuir el consumo de energía es el empleo de períodos donde los nodos pasen a un estado de consumo mínimo (*sleep*). Empleando para ello aquellos momentos donde los dispositivos no necesiten transmitir o recibir información. Esta idea fue inicialmente planteada en (Ye, Heidemann et al. 2002) y esta solución es adoptada en (Park and Rodoplu 2007) considerando demoras de propagación grandes y desconocidas. En la sección 3.2.3 son discutidas las principales causas de ineficiencia energética.

1.7 Consideraciones finales

Muchos son los retos de las comunicaciones acústicas subacuáticas. Factores como la distorsión y la absorción constituyen las principales causas que limitan el alcance de las comunicaciones.

El empleo de un canal de comunicación compartido impone retos adicionales y para lograr un acceso “ordenado y justo” de todos los dispositivos de la red al canal deben implementarse protocolos MAC capaces de garantizar las comunicaciones entre los dispositivos de la red. La alta y variable demora de propagación, el limitado ancho de banda y la baja disponibilidad de energía hacen que los protocolos MAC posean vital importancia para el desarrollo de estas redes.

CAPÍTULO 2: MECANISMOS DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO EN REDES SUBACUÁTICAS

2.1 Protocolos MAC desarrollados recientemente

El mecanismo de control de acceso al medio más apropiado para redes de sensores subacuáticos es un problema aún sin resolver. En los últimos años han sido desarrollados diferentes protocolos MAC con el objetivo de lograr un alto desempeño en la comunicación minimizando el consumo de energía.

Muchos de los protocolos MAC desarrollados están inspirados o presentan similitudes con protocolos empleados en redes de sensores terrestres. Los más referenciados son: ALOHA, MACA y MACAW. Muchos autores han propuesto variantes para obtener con ellos un ahorro considerable de energía a partir de evitar colisiones en las transmisiones.

En (Park and Rodoplu 2007) se propone un protocolo MAC para aplicaciones tolerantes a demoras que prioriza el ahorro del consumo de energía con el cual se logra que sólo el 3% de la energía empleada en las transmisiones se pierda a causa de las colisiones.

En (Chirdchoo, Soh et al. 2007) se presentan dos mejoras al protocolo ALOHA original: ALOHA-CA (*collision avoidance*) y ALOHA-AN (*advance notification*). El primero es más simple y escalable, no necesita grandes capacidades de memoria y no emplea mensajes de control; el segundo propone un refinamiento que necesita mayor procesamiento de información y requiere el empleo de mensajes adicionales con el objetivo de evitar las colisiones. Estas complejidades hacen que el ALOHA-AN logre un mejor desempeño y menores colisiones que el ALOHA-CA.

El PCAP (*propagation delay tolerant collision avoidance protocol*) (Yongxin, Jianguo et al. 2009) toma en cuenta la demora de propagación y logra un mayor desempeño que los protocolos tradicionales. Una solución similar es propuesta en (Peleato and Stojanovic 2007) bajo el nombre DACAP (*distance aware collision avoidance protocol*) y emplea diferentes tamaños de mensajes de control con el objetivo de minimizar la duración promedio de estos.

En (Pompili, Melodia et al. 2009) se sugiere el empleo de técnicas basadas en CDMA para lograr tres objetivos fundamentales: alto desempeño, rápido acceso al canal y bajo consumo de energía. Una propuesta similar, también basada en CDMA es planteada en (Hwee-Xian and Winston 2007).

En (Chirdchoo, Soh et al. 2008) se propone un MAC basado en MACA que forma series de paquetes destinados a múltiples destinos durante la fase reservación con lo cual se logra reducir grandemente el tiempo empleado en la transmisión de mensajes de control.

En otros trabajos (Shahabudeen, Chitre et al. 2007; Leonard and Sumit 2008; Zhou, Peng et al. 2008) se plantea como solución al problema de las colisiones, que el canal se divida en: canal de control empleado para la reservación y canal de transmisión utilizado para el intercambio de datos. Con esta propuesta se logran disminuir considerablemente las colisiones pero se añaden nuevos retos al diseño de los sensores ya que los mismos deben ser capaces de procesar y transmitir información en canales diferentes.

En las secciones siguientes serán descritos cuatro protocolos MAC el CSMA y el MACAW que han sido tradicionalmente empleados en redes terrestres así como el T_Lohi y el UWAN-MAC desarrollados específicamente para redes subacuáticas.

El primero de los protocolos diseñado para redes subacuáticas emplea tonos de corta duración para reservar el canal que pueden ser detectados simultáneamente, con lo que se logra aumentar la cantidad de paquetes enviados por unidad de tiempo. Mientras que el otro prioriza el ahorro del consumo de energía y los nodos pasan a un estado de bajo consumo cuando no hay actividad en el canal de comunicación.

2.2 Descripción del protocolo CSMA

El CSMA es un protocolo considerablemente sencillo en el que cada dispositivo de la red antes de comenzar a transmitir sus datos escucha el canal con el objetivo de detectar si el mismo está inactivo. En caso de estarlo el dispositivo asume que el canal se encuentra desocupado y comienza a transmitir sus datos. Con este mecanismo cada dispositivo de la red transmite con probabilidad 1 al escuchar el canal desocupado; esta variante del protocolo se denomina CSMA persistente.

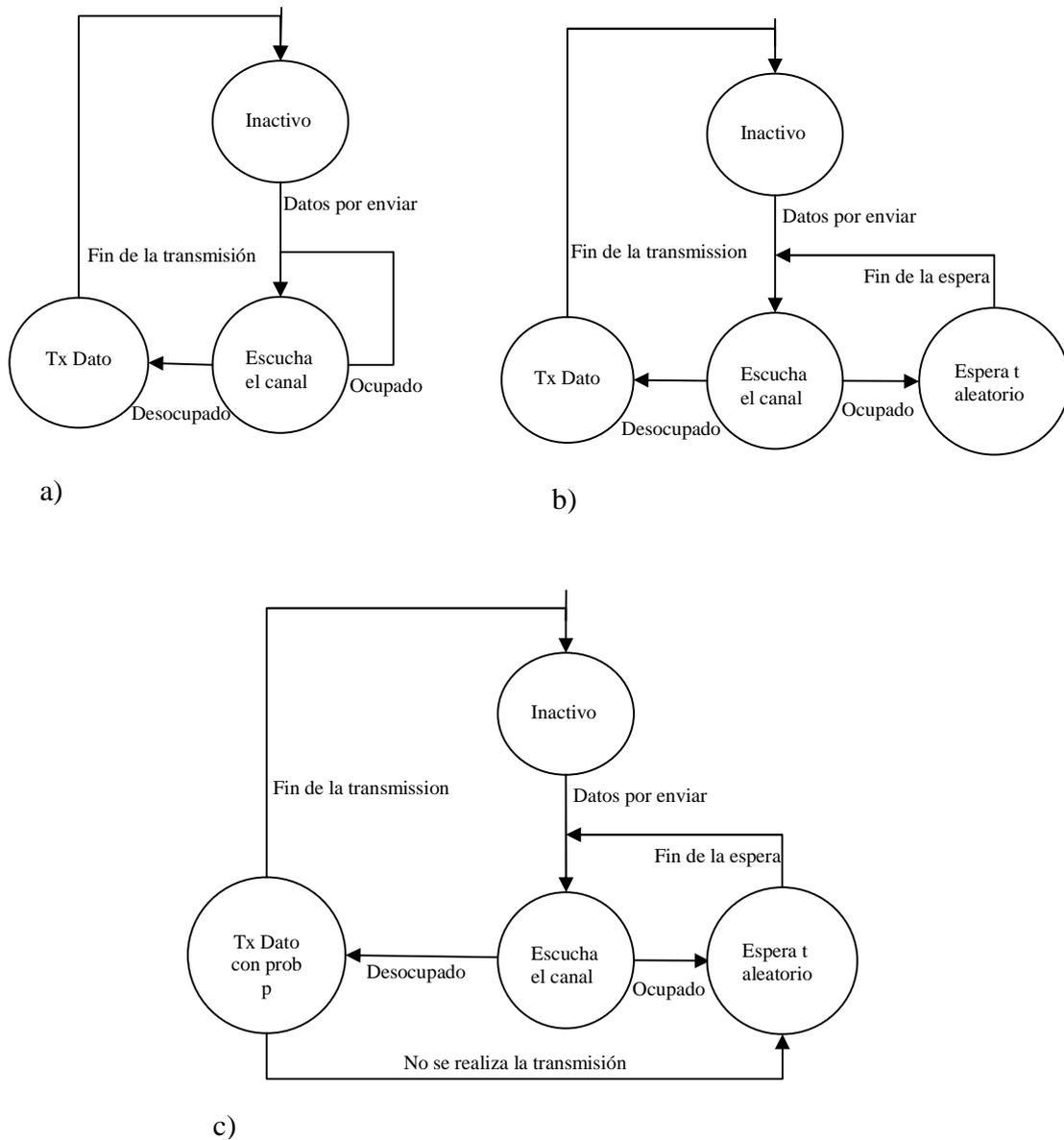


Figura 2.1: Protocolo CSMA a) persistente, b) no persistente y c) persistente p.

En el caso de que el nodo detecte que el canal está ocupado, se mantiene escuchándolo y cuando se desocupa transmite sus datos. Existe la posibilidad de que en el mismo instante en que un nodo comienza a transmitir exista otro nodo listo para enviar sus datos pero que, debido a la demora de propagación, aún no haya recibido la señal del primero y por tanto el resultado será una colisión. Mientras mayor sea la demora de propagación, mayor será este efecto.

En el CSMA persistente (PerCSMA) los nodos de la red se comportan de manera “agresiva” para obtener el acceso al canal, lo cual limita considerablemente su desempeño (Tanenbaum 2003).

El CSMA no persistente (NPCSMA) tiene como objetivo que los nodos se comporten de una manera menos “egoísta” y con esta variación, a diferencia del persistente, cuando el nodo detecta el canal ocupado no se mantiene escuchando el mismo con el objetivo de enviar sus datos una vez detectado el fin de la transmisión, sino que espera un tiempo aleatorio y repite algoritmo. Con este algoritmo se logra mejorar la utilización del canal pero conduce a mayores retardos que el CSMA persistente.

El CSMA persistente p constituye un caso general del CSMA persistente mediante el cual los nodos al detectar el canal inactivo transmiten con probabilidad p y esperan para realizar la transmisión con probabilidad $q=1-p$. Con esta variante se logra ajustar el desempeño del protocolo obteniendo resultados que oscilan entre los obtenidos por el persistente y no persistente (Tanenbaum 2003). La figura 2.1 muestra el protocolo y sus variantes.

El retardo de propagación tiene un efecto importante en el desempeño del protocolo. Si un nodo de la red intenta acceder al canal inmediatamente después de que otro comenzó a transmitir, al escuchar el canal interpreta erróneamente que el canal está desocupado y el resultado es la ocurrencia de una colisión. Aun si el retardo de propagación fuera cero si dos o más nodos intentan acceder al canal en el mismo instante de tiempo se produce una colisión. Este efecto deteriora considerablemente el desempeño del protocolo en la medida en que el retardo de propagación es mayor (Tanenbaum 2003).

2.2.1 Problema del nodo oculto y nodo expuesto

De la misma manera que para las redes inalámbricas terrestres, en las redes de sensores subacuáticas el problema de las colisiones es inherente al receptor no al transmisor, de tal manera que aun cuando un transmisor detecta un colisión en los datos que está enviando estos datos pueden ser recibidos sin interferencia por otro nodo de la red. En la figura 2.2 se muestra la naturaleza de este problema.

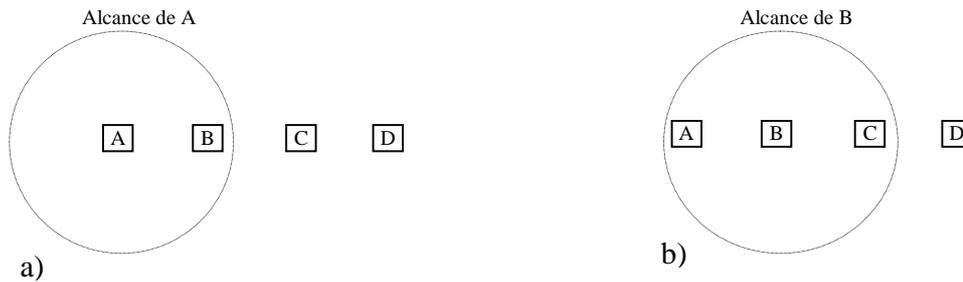


Figura 2.2: a) nodo oculto, b) nodo expuesto.

En el primer caso cuando A está transmitiendo a B, figura 2.2 a), si C escucha el medio no detecta la transmisión debido a que no se encuentra en el rango de cobertura de A. Por tanto, si C comienza a transmitir se produciría una colisión con la transmisión de A en el nodo B. En este caso la estación C no puede detectar que existe un competidor debido a que el mismo se encuentra suficientemente lejos. Esto se denomina el problema del nodo oculto.

Para el caso contrario, figura 2.2 b), en el cual B se encuentra transmitiendo al nodo A, si C escucha el medio detecta esta transmisión y concluye erróneamente que no puede enviar datos a D lo cual sólo produciría interferencia en el nodo B y no afectaría ninguna de las dos recepciones. Esto se conoce como problema del nodo expuesto.

Para contrarrestar tanto el problema del nodo oculto como el expuesto no es suficiente con que el nodo que va a transmitir determine si el canal se encuentra inactivo. Sino también conocer si existe actividad alrededor del nodo receptor y para ello se pueden implementar mecanismos como los descritos en la siguiente sección.

2.3 Descripción del protocolo MACAW

El protocolo MACAW fue propuesto en (Bharghavan, Demers et al. 1994) y constituye una variación del MACA presentado por Karn (Karn 1990). La figura 2.3 muestra el principio básico de funcionamiento de este protocolo (Tanenbaum 2003).

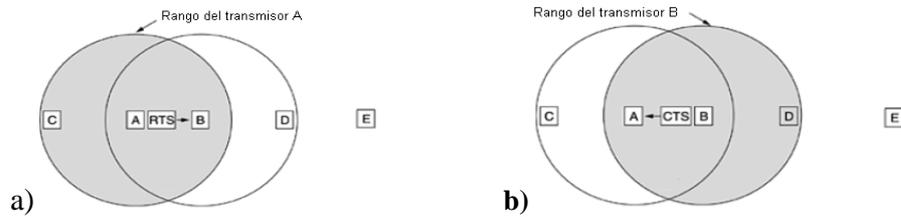


Figura 2.3: Funcionamiento del protocolo MACAW.

Cuando el nodo A debe enviar datos al B, comienza transmitiendo un mensaje de corta duración RTS (*Request to send*). Al recibir el mismo el nodo B responde con un CTS (*clear to send*) y al recibir esta respuesta el nodo A comienza la transmisión de los datos. Una vez terminada la transmisión el nodo A espera un mensaje de confirmación indicando si el paquete se ha recibido correctamente (ACK).

Cualquier nodo de la red que escuche el RTS enviado por A debe permanecer en silencio el tiempo suficiente para garantizar que la respuesta (CTS) llegue correctamente y cualquier nodo que escuche el CTS enviado por B debe permanecer en silencio el tiempo necesario para evitar colisiones con los paquetes de datos. El empleo de estos mensajes para reservar el canal contribuyen a evitar el los problemas del nodo oculto y el nodo expuesto descritos en la sección 1.2.1. El algoritmo implementado en cada nodo de la red es mostrado en la figura 2.4.

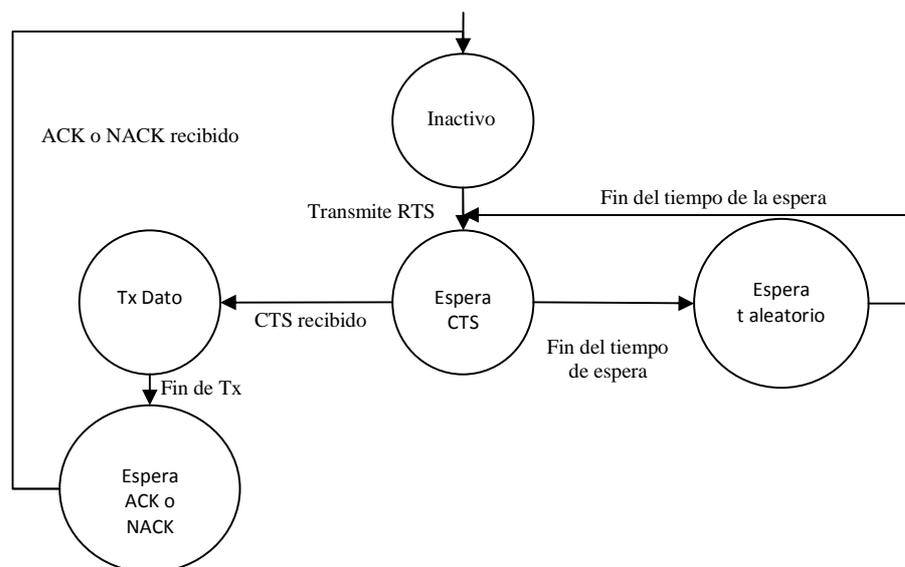


Figura 2.4: Algoritmo MACAW.

próxima trama para volver a competir. La figura 2.6 muestra el diagrama de transiciones del T_Lohi.

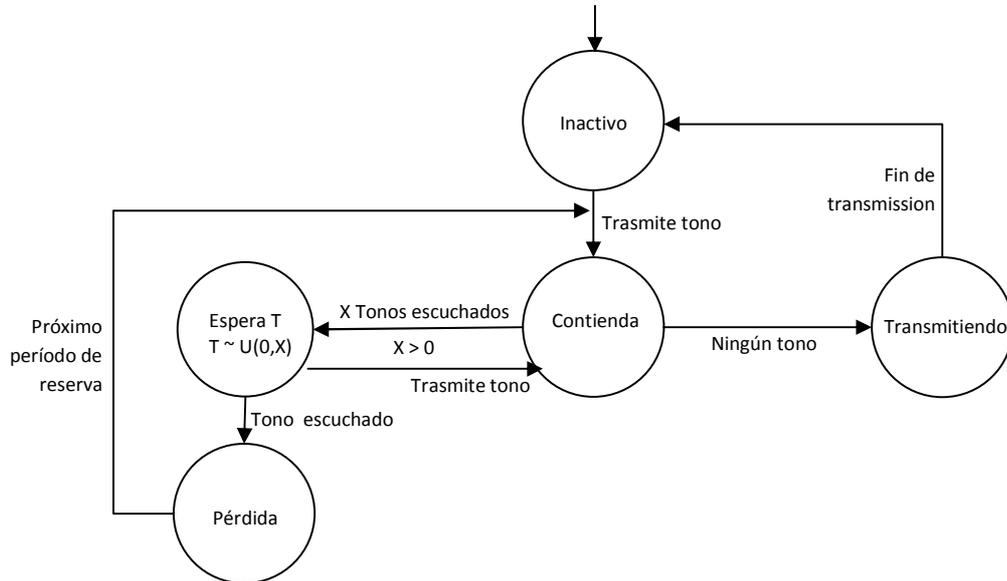


Figura 2.6: Algoritmo T_Lohi.

La efectividad de este algoritmo radica en la posibilidad de que cada nodo pueda conocer la cantidad de competidores aún cuando varios tonos sean recibidos simultáneamente y para ello en (Wills, Ye et al. 2006) se propone el diseño de un modem que permite además de detectar, contar la cantidad de tonos aún cuando estos se solapan en el tiempo.

Existen tres variantes del T_Lohi, cada una de ellas con requerimientos de implementación y resultados diferentes, en las secciones siguientes son presentadas las particularidades de cada una de ellas.

2.4.1 T_Lohi sincrónico (ST_Lohi)

El T_Lohi sincrónico, parte de la sincronización en el tiempo de todos los nodos, con lo cual todos comienzan a competir en el mismo instante de tiempo y por tanto el tiempo del período de competencia debe ser:

$$CR_{ST} = t_{max} + T_{tone} \quad (2.1)$$

Siendo t_{max} el tiempo máximo que demora el tono en llegar al destino más lejano y T_{tone} el tiempo de detección de un tono.

Debido a la sincronización, el período de competencia comienza en el mismo instante de tiempo en todos los nodos de la red como se observa en la figura 2.7 a). Por tanto, con el tiempo de espera representado por la ecuación 1 se garantiza que todos puedan detectar los competidores y con ello evitar las colisiones en las transmisiones de datos.

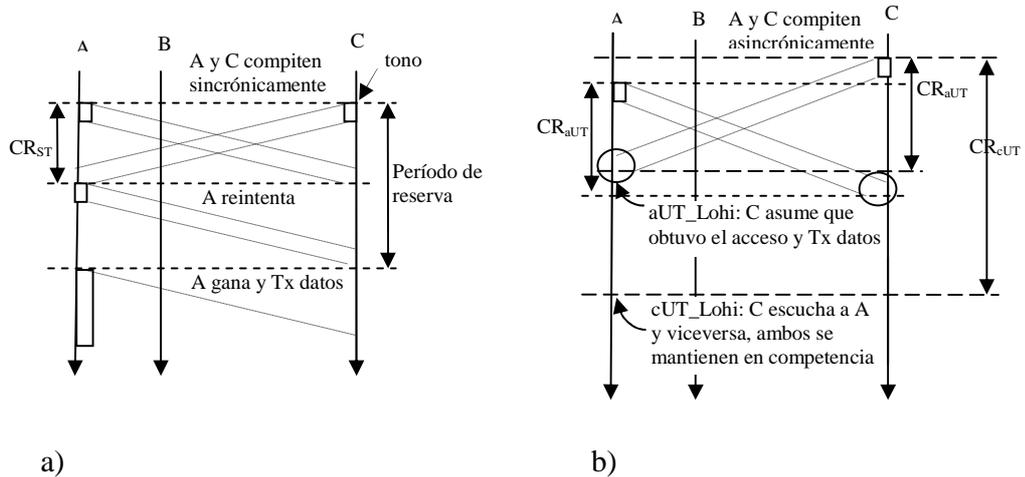


Figura 2.7: a) ST_Lohi, b) UT_Lohi.

La sincronización ofrece beneficios adicionales que permiten el reparto “justo” del canal de comunicaciones. Con este objetivo es implementado en esta variante del protocolo un mecanismo de espera al finalizar cada trama. Este mecanismo emplea dos variables que son calculadas por cada nodo: FCC (*first contender count*) y SAI (*spatial advantage index*).

La variable FCC permite a cada nodo conocer el número aproximado de nodo con datos por enviar. Esta es decrementada cada vez que finaliza una trama e incrementada en los períodos de competencia donde el número de competidores contados supere el valor FCC actual.

Por otra parte cada nodo puede estimar la distancia a la que se encuentra el transmisor a partir de medir el tiempo transcurrido desde el inicio del período de competencia hasta el arribo del paquete (Δt) y a partir de este estimar SAI como:

$$SAI = 1 - \frac{\Delta t}{CR_{st}} \quad (2.2)$$

Además de estas variables cada nodo mantiene la variable *didcontend* la cual constituye una variable lógica que recoge si el nodo compitió en la trama anterior o no. A partir de estas variables cada nodo implementa un algoritmo de espera cuyo pseudo código se muestra en la figura 2.8.

```
if didcontend = true
    return [(random[0,1]+SAI)*FCC]
else
    return [(random[0,1]+SAI)*2FCC]
end
```

Figura 2.8: Algoritmo de espera en el ST_Lohi.

Mantener sincronizados todos los nodos de la red no es simple y añade complejidades adicionales a las planteadas en las secciones anteriores por lo que resulta poco práctica la implementación de esta variante.

2.4.2 T_Lohi asincrónico (UT_Lohi)

En el T_Lohi asincrónico los nodos pueden comenzar a competir en cualquier instante de tiempo, ver figura 2.7 b). Para lograr que todos puedan detectar los competidores es necesario duplicar la duración del período de competencia calculado en la ecuación 1.

$$CR_{ST} = 2*t_{max} + 2*T_{tone} \quad (2.3)$$

Esta constituye la principal característica del T_Lohi asincrónico conservador (cUT_Lohi).

Debido al carácter asincrónico de esta variante, no puede emplearse el algoritmo de espera descrito mostrado en la figura 2.8. En su lugar es implementado un mecanismo de espera mediante el cual el tiempo de espera luego de finalizada una trama está uniformemente distribuido dentro de un intervalo mayor que T_{tone} . Siguiendo la recomendación de los autores en (Syed, Ye et al. 2007) en los resultados mostrados en el siguiente capítulo el valor de T_{tone} fue fijado en $3* T_{tone}$

El aumento de la duración del período de competencia implica que el tiempo necesario para enviar un paquete de datos aumenta y por tanto el desempeño del protocolo se afecta considerablemente.

La tercera variante del protocolo, el T_Lohi asincrónico agresivo (aUT_Lohi) propone mantener la duración del período de competencia invariante con respecto al caso sincrónico, lo cual implica que puedan ocurrir mayor cantidad de colisiones entre paquetes de datos y entre tonos y paquetes de datos.

2.5 Descripción del protocolo UWAN-MAC

Este protocolo MAC es presentado en (Park and Rodoplu 2007) y tiene como objetivo lograr alta eficiencia energética operando bajo largas demoras de propagación en aplicaciones de recolección de información y monitoreo de la ecología subacuática. Se concentra en una red de cientos de sensores con pequeño espaciamiento entre nodos (alrededor de 100 metros). Estas pequeñas distancias extienden la vida de la batería por el uso de bajas potencias de transmisión. Para lograr un ahorro considerable de energía durante el tiempo en que cada nodo no está transmitiendo o recibiendo el mismo pasa a un “modo durmiente” (*sleep mode*) donde consume menor cantidad de energía.

Este protocolo consta de dos fases.

La primera se denomina fase de inicialización, donde los nodos consiguen la sincronización mediante el envío del paquete SYNC, en el cual está estampado el tiempo en el que cada nodo transmitirá sus datos. La segunda fase es la de transmisión de datos, en la cual los nodos envían sus datos, manteniendo la sincronización mediante un encabezado de control que forma parte del paquete de datos. Estos paquetes tienen dos campos adicionales: SYNC, donde se informa al resto de los nodos de la red si cambiará el tiempo en el que los nodos transmitirán de nuevo, y PERDIDOS, donde se colocan los nodos vecinos que no transmitieron en el momento que estaba programado.

2.5.1 Principio de funcionamiento del protocolo

La idea básica, como se ilustra en la figura 2.9, consiste en que un nodo A transmite una señal de sincronismo donde viene estampado el período (T) de su ciclo de transmisión. Este paquete es recibido por un nodo B que decodifica el período (T) de la señal y enlista al nodo A en su itinerario. Así, B conoce cuando despertarse para escuchar a A. De la misma forma B envía su señal de sincronismo; de manera tal que, una vez finalizada la fase de

inicialización todos los nodos de la red conocen el momento en que deben despertarse para recibir las transmisiones correspondientes.

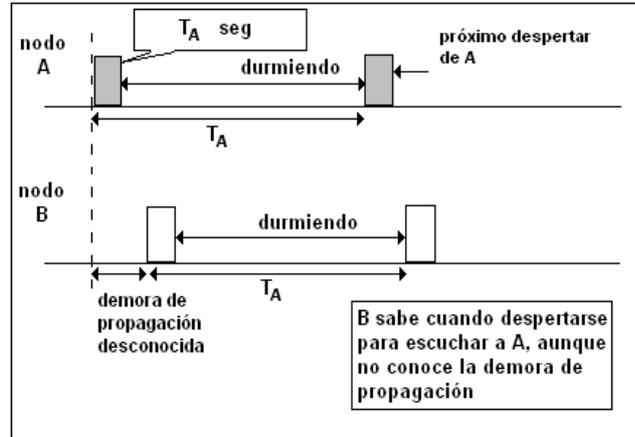


Figura 2.9: Principio de funcionamiento del protocolo UWAN-MAC.

2.5.2 Fase de inicialización

En esta fase cada nodo transmite para todos los nodos vecinos su paquete SYNC, y permanece despierto hasta el inicio del próximo ciclo con el objetivo de recibir los paquetes SYNC de sus vecinos. El paquete SYNC contiene el período del ciclo de transmisión, T_i , del nodo, el cual es interpretado por sus vecinos como el tiempo que transcurrirá hasta que el nodo transmita sus datos nuevamente. El período del ciclo T_i es inicialmente fijado a un valor T_0 para todos los nodos en orden de inicializar para ellos su itinerario transmisión/escucha.

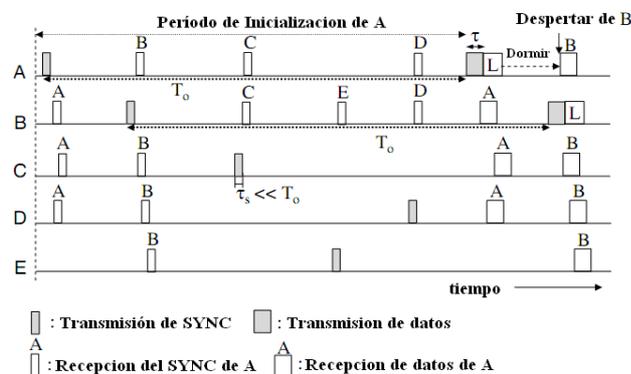


Figura 2.10: Esquema de transmisión de paquetes de control.

Cada nodo selecciona su tiempo de comienzo de transmisión aleatoriamente en el intervalo de $[0, T_0)$ y transmite su paquete SYNC a sus vecinos. Asumiendo que el tiempo de inicio de la transmisión ocurre primero en el nodo A, como se ilustra en la Figura 2.10, el mismo transmite su paquete SYNC primero. Luego, los vecinos de A (B, C y D), reciben el paquete SYNC lo cual les permite programar sus tiempos de despertar para recibir las transmisiones de A, que tomarán lugar después del período de inicialización. De la misma manera el nodo A, al recibir los paquetes SYNC de sus vecinos, programa los tiempos en que debe despertarse para recibir sus transmisiones.

2.5.3 Fase de transmisión de datos

Después que la fase de inicialización está completa, cada nodo conoce cuando necesita despertarse para recibir datos de sus vecinos. Después de la inicialización los nodos siguen su itinerario establecido y comienzan a enviar datos. La figura 2.11 muestra la estructura del paquete de datos y el período de escucha para detectar recién llegados potenciales durante la fase de transmisión de datos, la duración de la transmisión está sombreada y le sigue la duración de la escucha. La trama de transmisión está compuesta por tres campos: “Perdido”, “SYNC” y “Datos Tx”. El campo “Datos Tx” corresponde a la parte donde los datos actuales serán enviados. En este protocolo cada nodo compara la lista de sus vecinos con la lista de nodos de donde está recibiendo señales exitosamente y luego de esta comparación, el nodo genera la “lista de nodos perdidos” y la envía en el encabezado “Perdido” del paquete de datos en el próximo ciclo.



Figura 2.11: Estructura del paquete de datos.

Durante la operación regular de la red, cada nodo mantiene el envío del período del ciclo de transmisión en el encabezado SYNC del paquete de datos, el cual puede ser distinto del anteriormente enviado (T_0) en el período de inicialización.

Después de la transmisión de datos, el nodo entra en un modo inactivo de escucha (diferente del “modo dormido”). En el modo de escucha, el nodo permanece despierto pero opera a baja potencia. Si detecta una transmisión entra en modo de recepción. Este tiempo de escucha adicional es usado para detectar recién llegados y mejora la robustez del protocolo.

Para lograr una mejor escalabilidad de la red el protocolo implementa mecanismos que le permiten adaptarse a variaciones en la topología de la red, estas pueden ocurrir de dos formas: (i) el arribo a la red de un nuevo nodo, (ii) la falla en uno de los nodos que componen la red. Para contrarrestar sus efectos el protocolo implementa mecanismos para el manejo de recién llegados y el manejo de fallas que son descritos detalladamente en (Park and Rodoplu 2007).

2.6 Consideraciones finales

Algunas de las potencialidades de los protocolos MAC utilizados en redes terrestres pueden ser empleadas en las comunicaciones bajo el agua. Sin embargo, para elevar su desempeño se requiere de ajustes específicos.

El primero de los protocolos estudiados, el CSMA, muestra dificultades debido al problema del nodo oculto y el nodo expuesto ya que el transmisor no tiene conocimiento del estado del canal en el extremo receptor. Con el objetivo de minimizar estas dificultades en el protocolo MACAW se emplean mensajes RTS y CTS para garantizar que los nodos puedan reservar el canal antes de transmitir sus datos.

Finalmente los protocolos T_Lohi y UWAN-MAC están enfocados en lograr un alto rendimiento y minimizar el consumo de energía respectivamente. Fueron desarrollados específicamente para su empleo en estos entornos subacuáticos. Logrando que, factores como la variable y alta demora de propagación, no afecten significativamente su desempeño.

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS PROTOCOLOS ESTUDIADOS

3.1 Entorno de simulación

Con el objetivo de realizar un estudio comparativo de los protocolos descritos en las secciones 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5 (CSMA, MACAW, T_Lohi y UWAN-MAC respectivamente) fueron desarrollados en MatLab 7.0 los simuladores de eventos discretos necesarios para simular y evaluar el desempeño de cada uno de los protocolos MAC estudiados.

El escenario empleado en las simulaciones coincide con los empleados en (Peleato and Stojanovic 2007; Syed, Ye et al. 2007; Pompili, Melodia et al. 2009) y fueron dispuestos de manera pseudo-aleatoria cinco nodos con un rango de cobertura de 4m en un área de 4m² de manera tal que: cada nodo puede comunicarse con todos los otros dispositivos de la red. La tabla 3.1 muestra los parámetros empleados en las simulaciones.

Tabla 3.1: Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
Velocidad de propagación	1500m/s
Razón de transmisión	1-101Kbs (10Kbs de resolución)
Tiempo de simulación	100s
Cantidad de nodos	5
Tamaño paquetes de datos	20 bytes
Tamaño paquetes de reservación (RTS, CTS, ACK, Tone, SYNC)	5 bytes

Cada simulación fue realizada en cinco ocasiones y los resultados presentados en las secciones siguientes representan la media de los resultados obtenidos por nodo, excepto en la sección 3.2.1 donde se muestra la razón de paquetes enviados por segundo para toda la red; en el Anexo I se recoge el error cometido en la estimación de cada parámetro.

3.2 Parámetros medidos

3.2.1 Razón de paquetes por segundo (*throughput*)

La razón de paquetes de datos enviados por unidad de tiempo (*throughput*) constituye uno de los parámetros de mayor relevancia para comparar redes de comunicaciones. En el caso de las redes subacuáticas, de la misma manera que en las redes terrestres, un alto *throughput* permite el desarrollo de aplicaciones de tiempo real. En entornos subacuáticos el monitoreo en tiempo real constituye una de las aplicaciones más atractivas.

Debido a las limitaciones que impone el canal de comunicación, en el entorno subacuático las razones de transmisión que pueden lograrse oscilan entre 1 y 10kbps (Guo, Frater et al. 2006; Chirdchoo, Soh et al. 2007; Peleato and Stojanovic 2007). Para el análisis y discusión de los resultados obtenidos en las secciones siguientes se toma en consideración este aspecto para de evaluar de manera objetiva cada uno de los protocolos estudiados.

La figura 3.1 muestra el *throughput* en función de la razón de transmisión para los protocolos estudiados y sus variantes.

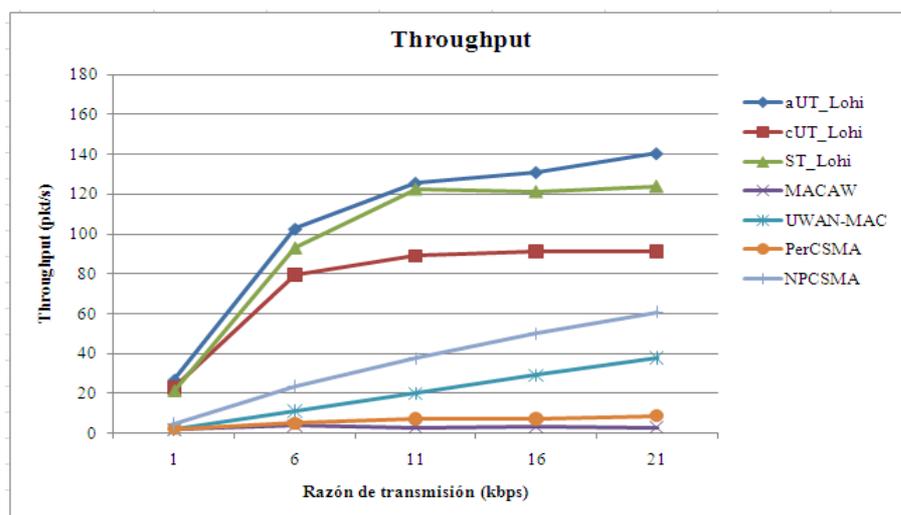


Figura 3.1: Paquetes por segundo.

Entre todas las variantes estudiadas se puede observar que la variante del T_Lohi aUT_Lohi es la que presenta mejores resultados desde el punto de vista de los valores alcanzados y de la estabilidad que presenta al aumentar la razón de transmisión. En este aspecto el resto de los protocolos estudiados muestran resultados discretos.

La disminución del tiempo de contención (CR) con respecto a las variantes cUT_Lohi y ST_Lohi así como la posibilidad de estimar el número de competidores en cada momento constituyen las causas fundamentales de los resultados mostrados por el aUT_Lohi. Mientras que para el caso del UWAN-MAC la principal fortaleza radica en el ordenamiento, en la fase de inicialización, de las transmisiones de cada uno de los nodos; sin embargo en este último caso a pesar de los nodos poder estimar la cantidad de vecinos, esta información no es empleada para seleccionar el período de transmisión (T) y por tanto la elección de T no es óptima.

3.2.2 Eficiencia en la comunicación

La eficiencia en la comunicación constituye el porcentaje de paquetes enviados que son recibidos satisfactoriamente (sin colisiones) y constituye una medida de las potencialidades de los protocolos MAC para reservar el canal y garantizar comunicaciones libres de colisiones. La figura 3.2 muestra los resultados obtenidos por cada protocolo.

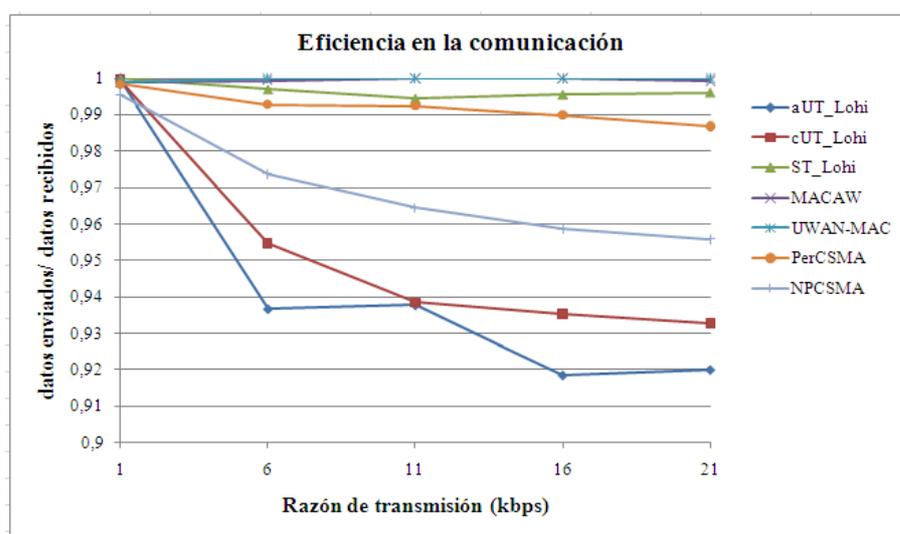


Figura 3.2: Eficiencia en la comunicación.

A pesar de que la modificación del período de competencia en el caso del aUT_Lohi ofrece resultados satisfactorios desde el punto de vista del throughput, esta disminución, como se explica en la sección 2.4.2 atenta contra el número de colisiones entre paquetes de datos. El razonamiento anterior muestra la importancia de que los protocolos ofrezcan no solo un alto *throughput* sino también alta eficiencia en la comunicación.

En este caso el UWAN-MAC ofrece los mejores resultados garantizando que la totalidad de los paquetes transmitidos sean recibidos correctamente, estos resultados se deben a la implementación de la fase de inicialización en la cual los nodos organizan sus transmisiones de manera tal que las mismas no interfieran con las de sus vecinos.

Resultados similares muestran el ST_Lohi y el MACAW demostrando la efectividad de sus mecanismos de reservación, siendo la sincronización de los nodos la principal fortaleza del primero. Para el caso del MACAW, a pesar de obtener excelentes resultados en la reservación del canal, muestra un desempeño discreto en cuanto al throughput constituyendo el intercambio de paquetes RTS, CTS y ACK la principal limitación para lograr mayores tasas de razón de datos por unidad de tiempo.

Las variantes del CSMA tampoco muestran resultados satisfactorios. En el caso de la variante persistente el comportamiento agresivo de los nodos (descrito en el epígrafe 2.2) para obtener el acceso al canal reduce considerablemente el throughput de la red y a su vez garantiza una mejor eficiencia en la comunicación. Mientras que el comportamiento del no persistente resulta lo opuesto. En ambos casos los discretos resultados mostrados son una causa directa de que el CSMA constituye un protocolo de acceso aleatorio y en el momento de acceder al canal de comunicaciones los dispositivos de la red no poseen conocimiento del estado del canal en el extremo receptor. Esta situación unida a la alta demora de propagación hace que el CSMA no sea idóneo para entornos subacuáticos.

3.2.3 Eficiencia energética

El consumo de energía (sección 1.6.2) constituye uno de los retos a vencer por los mecanismos de control de acceso al medio en las redes subacuáticas. 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, constituyen las principales ineficiencias que conspiran contra el ahorro de energía (Ye, Heidemann et al. 2002). A continuación son detalladas cada una de ellas:

- *Colisiones*: Si dos nodos transmiten al mismo tiempo e interfieren sus transmisiones respectivamente, los paquetes se corrompen. Por tanto 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 el caso del MACAW y Tone en el caso del T_Lohi) 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 figura 3.3 muestra la cantidad de colisiones por nodo para los protocolos T_Lohi, MACAW y UWAN-MAC.

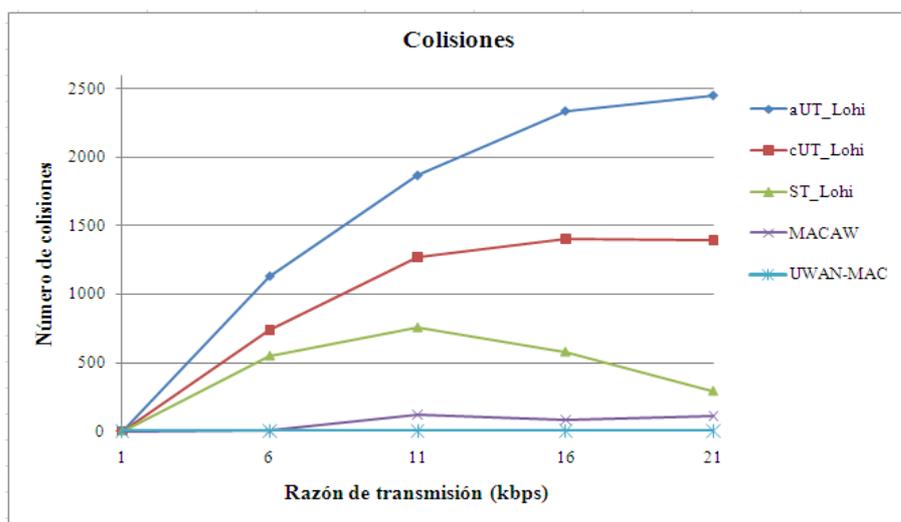


Figura 3.3: Número de colisiones.

Los mejores resultados en cuanto al número de colisiones lo presentan el ST_Lohi, el MACAW y el UWAN-MAC. Este último luego de la fase de inicialización constituye un protocolo libre de colisiones. Estos resultados satisfactorios son una muestra de la efectividad de los mecanismos de reservación del canal implementados por estos protocolos.

El costo operacional puede ser modelado como la cantidad de paquetes de reservación intercambiados por cada paquete de datos enviados y puede ser calculado para cada uno de los protocolos empleando las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3:

Para el T_Lohi

$$\text{Costo}_{\text{Operacional}} = \frac{\text{Tonos}_{\text{enviados}}}{\text{Datos}_{\text{enviados}}} \quad (3.1)$$

Para el MACAW

$$\text{Costo}_{\text{Operacional}} = \frac{\text{RTS}_{\text{enviados}} + \text{CTS}_{\text{recibidos}}}{\text{Datos}_{\text{enviados}}} \quad (3.2)$$

Para el UWAN-MAC

$$\text{Costo}_{\text{Operacional}} = \frac{\text{SYNC}_{\text{enviados}}}{\text{Datos}_{\text{enviados}}} \quad (3.3)$$

En el caso del UWAN-MAC los paquetes SYNC solo se intercambian durante la fase de inicialización y el costo operacional que esto implica no es significativo, siendo inversamente proporcional al tiempo de operación de la red.

Para las variantes del T_Lohi la posibilidad de detectar y contar tonos de manera simultánea y el empleo de esta información para determinar los ciclos de espera hacen que el período de reserva se minimice considerablemente. Sin embargo, la figura 3.4 muestra que el costo operacional de las variantes aUT_Lohi y cUT_Lohi es considerablemente mayor que para el MACAW. Por lo que, a pesar de que para este último la reserva del canal implica el intercambio de al menos dos paquetes (enviar un RTS y recibir un CTS) el mecanismo empleado garantiza que el costo operacional se mantenga con poca variación en

la medida que aumenta el tráfico en la red, este resultado es similar al ST_Lohi y solo superado por el UWAN-MAC.

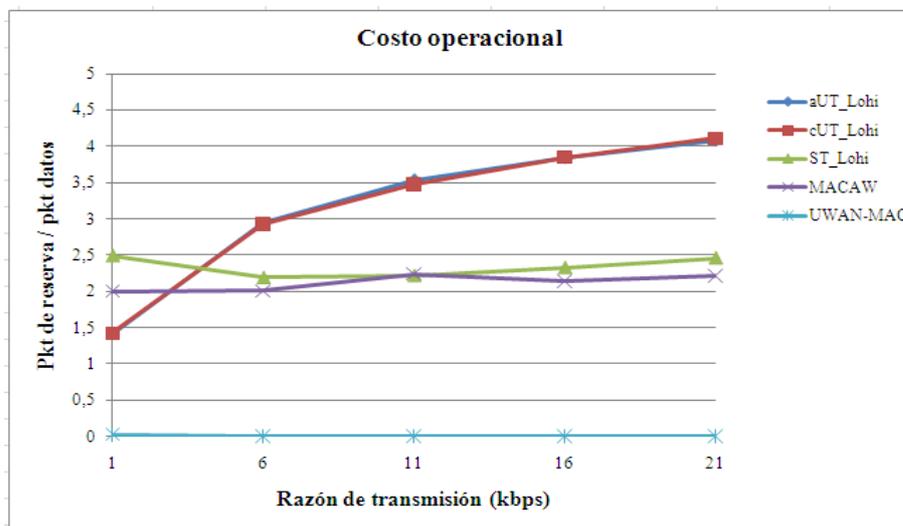


Figura 3.4: Costo operacional.

La sobre escucha constituye otra de las causas de imperfecciones que desde el punto de vista energético pueden presentar los protocolos MAC. Este problema ha sido considerado en el diseño de algunos de los protocolos. En el caso del T_Lohi el empleo del modem apropiado, descrito en (Wills, Ye et al. 2006), para detectar los tonos transmitidos hace que cuando los nodos no detectan actividad en el canal pasen a un estado de bajo consumo en el cual son capaces de detectar y recepcionar los tonos transmitidos por sus vecinos y por tanto no existen períodos de sobre escucha.

En el MACAW los nodos no pueden pasar a estados de bajo consumo y deben permanecer escuchando el canal debido a que no poseen conocimiento previo del momento en que sus vecinos efectuarán sus transmisiones. Unido a lo anterior 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 de períodos de escucha sin transmitir o recibir información.

El UWAN-MAC implementa el “modo durmiente” (sección 2.5) lo que le permite durante los períodos de inactividad del canal pasar a estados de bajo de consumo. A pesar de esto

debido a las variaciones en la demora de propagación y para garantizar la correcta recepción de los datos los nodos deben “despertarse” antes del momento en el cual esperan recibir la transmisión. Además, una vez transmitidos los datos deben permanecer escuchando el canal para detectar recién llegados y garantizar la escalabilidad de la red. Ambos factores hacen que, durante cortos períodos de tiempo, los nodos empleen energía en escuchar el canal aún cuando pueden o no recibir datos de sus vecinos.

El empleo de la ecuación 3.4 permite determinar qué parte del tiempo los nodos escuchan el canal innecesariamente.

$$Sobre_escucha = \frac{Tiempo_escuchando_el_canal}{Tiempo_total} \quad (3.4)$$

La figura 3.5 muestra los resultados obtenidos por el MACAW y el UWAN-MAC

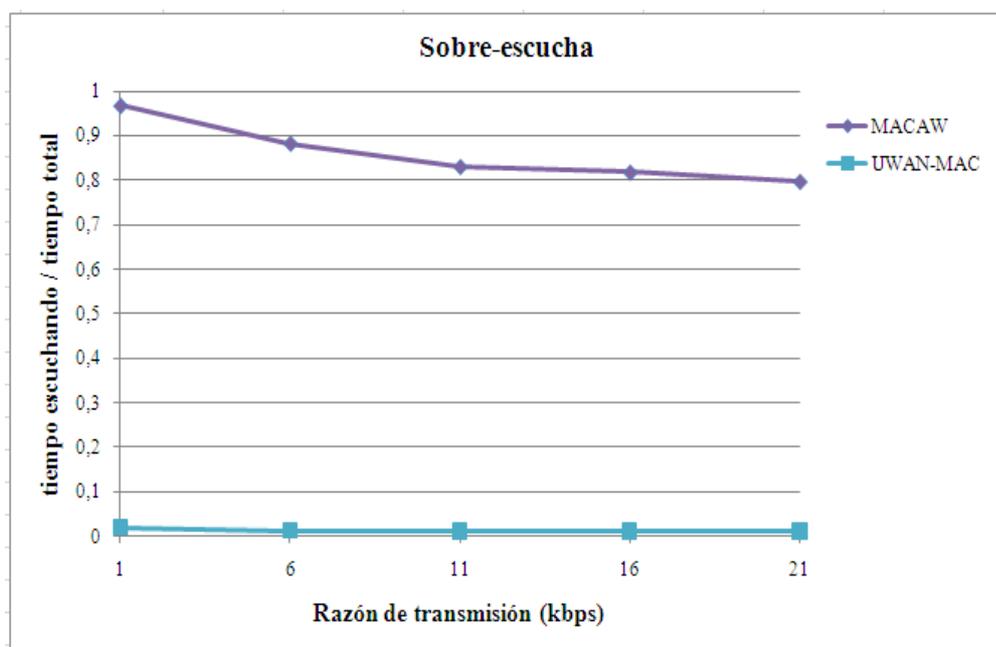


Figura 3.4: Sobre escucha.

En el MACAW los nodos permanecen escuchando el canal un alto por ciento del tiempo y esta constituye una de las causas fundamentales de su bajo throughput. Sin embargo, el protocolo UWAN-MAC presenta excelentes resultados que se mantienen constantes independientemente de la razón de transmisión.

3.2.4 Consumo de energía

Las ineficiencias descritas en la sección anterior constituyen imperfecciones de los protocolos MAC que provocan un aumento en el consumo de energía, en algunos casos como en el UWAN-MAC este sobre consumo se justifica debido a que la implementación de períodos de escucha contribuye a incrementar la escalabilidad de la red.

Estas ineficiencias afectan en mayor o menor medida cada uno de los protocolos estudiados, con el objetivo de evaluar de manera conjunta las implicaciones de cada una de ellas es necesario evaluar cuál es la energía consumida por nodo para los distintos protocolos estudiados. En las redes 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.

En función del modem empleado en las comunicaciones la energía necesaria para las transmisiones oscila entre 10 y 50W y para la recepción entre 1 y 3W (Harris, Stojanovic et al. 2006; Kredo and Mohapatra 2007). En sentido general la relación entre ellas oscila entre 10 y 20.

Para evaluar el consumo de energía de los protocolos estudiados es necesario definir los diferentes estados en los cuales, desde el punto de vista de la potencia consumida, pueden encontrarse los nodos de la red. Estos estados son: transmitiendo, recibiendo, 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. En la tabla 3.2 se muestra la relación entre el consumo en los diferentes estados. para lo cual se empleó el criterio planteado en (Harris, Stojanovic 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 3.5 define energía consumida en cada uno de de los estados:

$$E_i = pt_i \quad (3.5)$$

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:

$$\sum_{i=0}^N E_i = pt_i \quad (3.6)$$

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

Empleando la ecuación 3.6 podemos calcular el consumo máximo de energía de cada nodo como:

$$E_{MAX} = PT \quad (3.7)$$

donde T constituye 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 mostrados en la figura 3.5 han sido normalizados en función del consumo máximo.

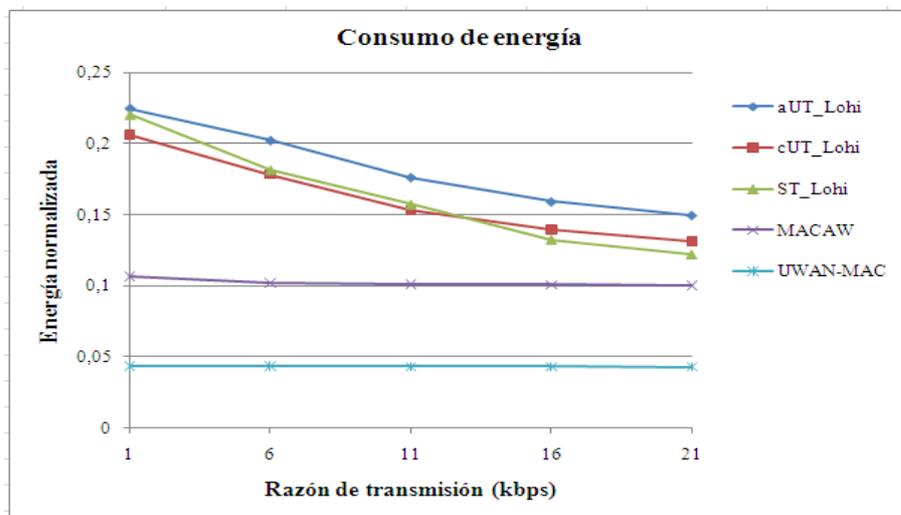


Figura 3.5: Consumo de energía normalizado.

La implementación del modo durmiente así como el conocimiento por los nodos de la red del momento en que se efectuarán las transmisiones hacen que el UWAN-MAC presente los mejores resultados desde el punto de vista energético, lo cual puede ser considerado como la principal fortaleza de este protocolo.

El MACAW muestra resultados satisfactorios los cuales están motivados en gran medida por la efectividad de los mecanismos empleados para la reservación del canal de comunicación. Mientras que para el caso de las variantes del T_Lohi el consumo de energía decrece ligeramente debido a que al mantenerse constante el *throughput* de la red partir de una razón de 6kbps la cantidad de paquetes enviados permanece constante pero el tiempo de transmisión decrece ligeramente debido a que el período de competencia se hace mayor.

3.3 Consideraciones finales

Los resultados obtenidos en las simulaciones demuestran la ineficiencia del CSMA y sus variantes para entornos subacuáticos siendo el T_Lohi y el UWAN-MAC los que, en sentido general muestran, los mejores resultados.

Los mecanismos de reservación del MACAW logran una alta eficiencia en la comunicación pero el costo desde el punto de vista del resto de los parámetros es alto, logrando un limitado *throughput*.

El T_Lohi y sus variantes logran un alto y estable *throughput* debido en gran medida a la posibilidad de detectar y contar competidores cuyos mensajes de reservación arriban simultáneos al receptor lo cual hace que el período de competencia converja rápidamente. En el caso del UWAN-MAC los mejores resultados se obtienen desde el punto de vista energético y la eficiencia en la comunicación. En el caso del UWAN-MAC los mejores resultados se obtienen desde el punto de vista del consumo de energía y la eficiencia en la comunicación, la creación del itinerario de transmisión de cada nodo posee vital importancia en la obtención de estos resultados.

CONCLUSIONES

En este trabajo son presentadas las principales características del canal de comunicaciones subacuático así como los principales retos a vencer por los protocolos MAC empleados en estos entornos. Son descritos los protocolos CSMA, MACAW, T_Lohi y UWAN-MAC como variantes de solución para redes subacuáticas. Se realiza su evaluación y comparación teniendo en cuenta el *throughput*, la eficiencia en la comunicación, la eficiencia energética y el consumo de energía con el objetivo de identificar las ventajas y limitaciones de cada uno de ellos.

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran la ineffectividad del CSMA y sus variantes, persistente y no persistente, para su empleo en estos entornos. El desconocimiento por el nodo transmisor del estado del canal en el extremo receptor constituye la principal limitación de este protocolo MAC.

La eficiencia en la comunicación así como el bajo número de colisiones, obtenidos por el protocolo MACAW, demuestran la validez del mecanismo de reservación del canal empleado por este protocolo y a su vez esta constituye la principal causa de los discretos resultados obtenidos desde el punto de vista del *throughput* de la red.

La posibilidad de detectar y contar la cantidad de competidores aún cuando los tonos se reciban de manera simultánea constituye una importante ventaja para el T_Lohi. Esto se ve reflejado en la estabilidad del desempeño en la medida que aumenta el tráfico generado por nodo y la disminución del número de colisiones, lo cual demuestra la rápida convergencia del período de competencia.

De las variantes de T_Lohi estudiadas el ST_Lohi presenta los mejores resultados. Sin embargo, mantener sincronizados los nodos no es práctico y los resultados mostrados por él pueden ser alcanzados parcialmente empleando algunas de las dos variantes asincrónicas presentadas. La variante cUT_Lohi alcanza un *throughput* discreto que puede ser mejorado empleando la variante aUT_Lohi a expensas de degradar el desempeño ante colisiones.

No obstante las ventajas de las variantes del T_Lohi el hecho de detectar y contar tonos simultáneos añade complejidad adicional, haciéndolo más costoso y limitando las

posibilidades de su empleo, ya que necesita un hardware específico para su correcto funcionamiento.

El UWAN-MAC muestra excelentes resultados en cuanto al consumo de energía, la eficiencia en la comunicación y el número de colisiones. Estos beneficios son causa directa del ordenamiento de las transmisiones de cada nodo, haciendo posible que los nodos pasen a estados de bajo consumo durante los períodos de inactividad del canal. A pesar de que con este protocolo los nodos de la red tienen conocimiento de la cantidad de vecinos en su rango de cobertura esta información no es empleada para determinar el período de transmisión (T), lo cual constituye una ineficiencia del protocolo provocando discretos resultados desde el punto de vista del *throughput* de la red.

Cada uno de los protocolos MAC estudiados en este trabajo logra obtener resultados satisfactorios en algunos de los aspectos evaluados. Sin embargo, ninguno de ellos resuelve la totalidad de los retos presentes en las redes de comunicaciones subacuáticas.

RECOMENDACIONES

Con el objetivo de enriquecer esta investigación y continuar profundizando en las particularidades de los protocolos MAC para las redes subacuáticas se considera oportuno:

- Profundizar en el estudio de la fase de inicialización del protocolo UWAN-MAC con el objetivo de lograr la rápida convergencia de la misma.
- Particularizar en el mecanismo de espera del ST_Lohi para su empleo en la determinación del período de transmisión del UWAN-MAC.
- Desarrollar mecanismos que permitan simular la variabilidad de la demora de propagación en estos entornos.
- Evaluar los protocolos estudiados teniendo en cuenta las variaciones en la demora de propagación.
- Evaluar los protocolos estudiados bajo condiciones de movilidad de los nodos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akyildiz, I., D. Pompili, et al. (2004) Challenges for Efficient Communication in underwater acoustic sensor networks. **Volume**, DOI:

Akyildiz, I., D. Pompili, et al. (2005). Underwater acoustic sensor networks: research challenges. Ad Hoc Networks, Elseiver. **3**.

Akyildiz, I. F., D. Pompili, et al. (2006). State-of-the-art in protocol research for underwater acoustic sensor networks. Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks. , Los Angeles, ACM.

Bharghavan, V., A. Demers, et al. (1994). MACAW: a media access protocol for wireless LAN's. Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications. London, United Kingdom, ACM.

Chen, Y. and H. Wang (2007). Ordered CSMA: A collision free MAC protocol for underwater acoustic networks. Proc of MTS/IEEE Oceans 2007.

Chirdchoo, N., W.-S. Soh, et al. (2007). Aloha-based MAC Protocols with Collision Avoidance for Underwater Acoustic Networks. IEEE INFOCOM Minisymposium. Anchorage, Alaska, USA: 2271--2275.

Chirdchoo, N., W.-S. Soh, et al. (2008). MACA-MN: A MACA-based MAC Protocol for Underwater Acoustic Networks with Packet Train for Multiple Neighbors. Department of Electrical & Computer Engineering, National University of Singapore,.

Guo, X., M. Frater, et al. (2006) A propagation delay tolerant collision avoidance protocol for underwater acoustic sensor networks. **Volume**, DOI:

Harris, A., M. Stojanovic, et al. (2006). When underwater acoustic nodes should sleep with one eye open: idle-time power management in underwater sensor networks. WUWNet'06. California.

Hwee-Xian, T. and K. G. S. Winston (2007). Distributed CDMA-based MAC Protocol for Underwater Sensor Networks. Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks, IEEE Computer Society.

Jiang, Z. (2008). Underwater Acoustic Networks. Issues and Solutions International Journal of intelligent control and systems. **13**: 9.

Karl, H. and A. Willig (2005). Protocols and Architectures for wireless sensor networks J. W. Sons, John Wiley & Sons

Karn (1990). MACA - a new channel access method for packet radio. ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conference: 134-140.

Kredo, K. (2007). Networking support for underwater wireless networks. Electrical and computer engineering, Universidad de California. **Doctor:** 60.

Kredo, K. and P. Mohapatra (2007). A hibriyd medium access control protocol for underwater wireless networks. WUWNet'07. Canada.

Krishnamachari, B. (2005). Networking wireless sensors, Cambridge University Press.

Lacovarca, P. (2008). "High Bandwidth Underwater Communications." Marine Technology Society **42(1):** 9.

Leonard, T. T. and R. Sumit (2008). A reservation mac protocol for ad-hoc underwater acoustic sensor networks. Proceedings of the third ACM international workshop on Underwater Networks. San Francisco, California, USA, ACM.

Liu, L., S. Zhou, et al. (2008) `Prospects and Problems of _Wireless Communication for underwater sensor networks. **Volume**, DOI:

Mukherjee, B. (1997). Optical Communication Networks. New York.

Park, M. K. and V. Rodoplu (2007). "UWAN-MAC: An energy efficient MAC protocol for underwater acoustic wireless sensor networks." IEEE Journal of oceanic engineering.

Partan, J., J. Kurose, et al. (2006) A survey of practical issues in underwater networks. **Volume**, DOI:

Peleato, B. and M. Stojanovic (2007). Distance Aware Collision Avoidance Protocol for Ad-Hoc Underwater Acoustic Sensor Networks. IEEE communications letters. **11**.

Pompili, D., T. Melodia, et al. (2009). A Distributed CDMA Medium Access Control for Underwater Acoustic Sensor Networks. IEEE Transactions on Wireless Communications. **8**: 1899-1909.

Preisig, J. (2005) Acoustic propagation considerations for underwater acoustic communications network development. **Volume**, DOI:

Raichel, D. (2006). The science and applications of acoustics. Springer.

Rodoplu, V. and A. A. Gohari (2008). MAC protocol desing for underwater networks: Challenges and new directions. World Scientific Review

Shahabudeen, S., M. Chitre, et al. (2007). A multi-channel MAC protocol for AUV networks. Oceans 2007- Europe, IEEE.

Stojanovic, M. (2007). Underwater acoustic communication. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics engineering.

Stojanovic, M. (2007) Underwater acoustic communications: design considerations on the physical layer. **Volume**, DOI:

Syed, A., W. Ye, et al. (2007). T-Lohi: A new class of MAC protocols for underwater acoustic sensor networks. USC/ISI. I. S. Institute. California, University of Southern California.

Syed, A. A., W. Ye, et al. (2008). "Comparison and Evaluation of the T-Lohi MAC for Underwater Acoustic Sensor Networks."

Tanenbaum, A. (2003). Computer Networks. P. Education. New Jersey, Prentice Hall.

Wills, J., W. Ye, et al. (2006). Low-power acoustic modem for dense underwater sensor networks. Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks. Los Angeles, CA, USA, ACM.

Xie, P. and J.-H. Cui (2007). R-MAC: An Energy efficient MAC protocol for underwater sensor networks. International conference on wireless algorithms, systems and applications WASA 2007. Chicago.

Ye, W., J. Heidemann, et al. (2002) An energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks. **Volume**, DOI:

Yongxin, Z., H. Jianguo, et al. (2009). A delay-tolerant MAC protocol with collision avoidance for underwater acoustic networks. Proceedings of the 5th International Conference on Wireless communications, networking and mobile computing. Beijing, China, IEEE Press.

Zhang, Y., Y. Xiao, et al. (2006) Medium access control layer for underwater sensor networks. **Volume**, DOI:

Zhou, Z., Z. Peng, et al. (2008). Multi-channel MAC Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks. Computer Science & Engineering, University of Connecticut.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ACK	Reconocimiento (acknowledgment)
aUT_Lohi	T_Lohi asincrónico agresivo (Aggressive Unsynchronized T_Lohi)
AUVs	Vehículo subacuático autónomo (Autonomous Underwater Vehicles)
CSMA	Acceso múltiple por sensado de portadora (Carrier Sense Multiple Access)
CTS	Permiso para enviar (Clear To Send)
cUT_Lohi	T_Lohi asincrónico conservador (Conservative Unsynchronized T_Lohi)

FCC	Conteo del primer competidor (Fist Contender Count)
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 (Múltiple Access with Collision Avoidance for Wireless)
NPCSMA	CSMA no persistente
PCAP	Protocolo que evita colisiones tolerante a la demora de propagación (Propagation delay tolerant Collision Avoidance Protocol)
PerCSMA	CSMA persistente
RESL	Laboratorio de sistemas robóticos empotrados (Robotic Embedded System Laboratory)
RF	Radio Frecuencia
RTS	Petición de permiso para transmitir (Request To Send)
SAI	Índice de ventaja espacial (Spatial Advantage Index)
ST_Lohi	T_Lohi sincrónico (Synchronized T_Lohi)
UT_Lohi	T_Lohi asincrónico (Unsynchronized T_Lohi)
UWAN-MAC	Mecanismo de acceso el medio para redes acústicas subacuáticas (Underwater Wireless Acoustic Networks-Medium Access Control)

ANEXO I: ERROR EN LA ESTIMACIÓN

Los resultados mostrados constituyen la media del parámetro estimado y para ello fueron realizadas cinco simulaciones, para determinar el error máximo en la estimación empleamos la ecuación I.1

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

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

Las tablas siguientes 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

Razón de Tx	Error máximo en la estimación (95% de certeza)						
	ST_Lohi	aUT_Lohi	cUT_Lohi	MACAW	UWAN-MAC	PerCSMA	NPCSMA
1	0.39978	0.572207	0.13809	0.291116	0.19524	0.314018	0.24576
6	7.69788	14.41629	8.391396	0.723358	0.37505	1.114588	0.5661315
11	16.4281	23.42597	13.63528	1.438536	0.74226	0.711174	0.9465667
16	20.5606	17.95799	9.440538	1.66099	0.94622	0.837369	1.6491968
21	15.0038	15.19848	8.699262	1.400273	0.82214	1.518984	0.9526562
31	18.6453	16.67997	4.754054	1.395995	1.64999	0.490455	1.3336664
41	17.5578	18.39676	5.220141	0.853536	1.48601	1.198717	3.3123134
51	11.7822	16.42048	6.272312	1.223807	1.92904	1.051507	3.0946834
61	8.94369	12.55016	5.08444	1.524175	1.94531	1.51075	3.5114806
71	8.6852	12.35956	4.119135	0.808068	2.59789	1.185383	3.676903
81	7.94564	12.19267	3.646091	1.01602	3.73127	2.211385	2.6898604
91	8.09095	9.680682	3.712324	0.446434	4.84641	2.846026	3.0944619
101	7.77595	9.411693	2.138988	1.003187	5.70208	2.593377	3.6973495

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

Razón de Tx	Error máximo en la estimación (95% de certeza)						
	ST_Lohi	aUT_Lohi	cUT_Lohi	MACAW	UWAN-MAC	PerCSMA	NPCSMA
1	0.00026	0	0.0002965	0.003067	0.00307	0.004304	0.005525
6	0.003154	0.04733	0.0218033	0.001442	0	0.004545	0.00859
11	0.002456	0.013828	0.0093401	0	0	0.004789	0.011565
16	0.001348	0.021801	0.0070763	0	0	0.00867	0.008829
21	0.002052	0.017446	0.0091562	0.001746	0	0.004259	0.007516
31	0.001379	0.005521	0.0125002	0.004811	0	0.00429	0.003733
41	0.000605	0.005137	0.0122738	0.003325	5.6E-05	0.006188	0.008045
51	0.000187	0.008062	0.0111628	0.001832	0	0.003666	0.00575
61	3.9E-05	0.0071	0.0089332	0.0054	0	0.010882	0.007467
71	0.00033	0.011029	0.0112912	0.01007	1.1E-05	0.007312	0.003632
81	0.000198	0.010149	0.007864	0.054579	0	0.008699	0.005607
91	0.000166	0.008459	0.0093465	0.003857	3.6E-05	0.005073	0.00277
101	0.000121	0.007768	0.0094765	0.011974	3.4E-05	0.006697	0.002638

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

Razón de Tx	Error máximo en la estimación (95% de certeza)						
	ST_Lohi	aUT_Lohi	cUT_Lohi	MACAW	UWAN-MAC	PerCSMA	NPCSMA
1	0	0	0	0.5552	0	0.33312	0.815974
6	485.787	701.3043	373.035	1.43065	0	1.2587255	7.15756
11	427.238	347.7446	278.6598	138.218	0	1.702211	16.1991
16	496.353	491.2561	424.3081	98.0823	0	2.4302291	17.45537
21	177.771	508.2508	479.3041	126.449	0	1.7521816	19.13339
31	100.546	495.6173	337.6967	134.065	0	1.8860464	10.82369
41	19.8844	518.4694	366.9682	34.5813	0	2.9346929	25.0004
51	7.67904	390.1907	312.4568	88.3849	0	1.5937238	21.80205
61	2.93469	279.6732	233.6242	88.844	0	3.8768706	29.95334
71	4.79983	268.666	206.6326	48.7968	0	2.918895	22.04543
81	5.28287	268.5992	160.6237	52.628	0	4.5567006	29.43838
91	7.69828	221.0179	171.6058	73.0738	0	5.0275498	21.39171
101	7.3257	208.1447	153.0744	57.4487	0	3.4017046	18.12488

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

Razón de Tx	Error máximo en la estimación (95% de certeza)			
	ST_Lohi	aUT_Lohi	cUT_Lohi	MACAW
1	0.0735575	0.17886674	0.154462425	0.003067403
6	0.04584328	0.3384275	0.344185301	0.00734005
11	0.08957746	0.33531492	0.264129981	0.395585759
16	0.34299738	0.28643678	0.284102839	0.166931438
21	0.26657713	0.2457123	0.261940198	0.231167729
31	0.29767073	0.24729065	0.24596017	0.525327597
41	0.30812668	0.19272478	0.189632407	0.602758489
51	0.23238553	0.15885647	0.177962012	0.543254242
61	0.24869323	0.14894721	0.14544131	1.005587246
71	0.22361998	0.15735793	0.155572287	0.439091909
81	0.18431524	0.52193817	0.175944534	3.583599275
91	0.20288874	0.14638543	0.178990657	0.321658301
101	0.16331544	0.15846081	0.164298426	0.525926617

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

Razón de Tx	Error máximo (95% de certeza)	
	MACAW	UWAN-MAC
1	0.006044675	0.002361787
6	0.002671544	0.000345442
11	0.25875495	0.000291346
16	0.215684385	0.000266334
21	0.262504918	0.000229172
31	0.280654507	0.000298293
41	0.227937466	0.000196426
51	0.245664541	0.000199316
61	0.309596851	0.000169989
71	0.267057706	0.000194721
81	0.375223555	0.000259549
91	0.189191875	0.000291116
101	0.377428001	0.000311668

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

Razón de Tx	Error máximo en la estimación (95% de certeza)				
	ST_Lohi	aUT_Lohi	cUT_Lohi	MACAW	UWAN-MAC
1	0.004038	0.0015122	0.002416	0.001048	0.000947
6	0.011021	0.007253	0.003782	0.000435	0.000313
11	0.013572	0.008999	0.005488	0.000424	0.000348
16	0.006632	0.0048771	0.003403	0.000354	0.000307
21	0.004235	0.0031602	0.002378	0.000228	0.000206
31	0.005673	0.0016602	0.000792	0.000385	0.000282
41	0.004323	0.0013602	0.00062	0.003933	0.000191
51	0.002681	0.0010217	0.000702	8.42E-05	0.0002
61	0.00117	0.000821	0.000527	0.003948	0.000168
71	0.001088	0.0005994	0.000343	0.000448	0.000193
81	0.001214	0.0006107	0.000246	4.46E-05	0.000244
91	0.00086	0.0004066	0.000167	0.000888	0.000282
101	0.001477	0.000398	8.36E-05	0.000334	0.000299