

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Electrónica y Telecomunicaciones con
orientación en Telecomunicaciones**

**Diseño de un sistema de acceso al medio y modulación en
banda base utilizando radio definido por software para
comunicación de largo alcance entre boyas**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Guillermo González Martínez

Ensenada, Baja California, México

2016

Tesis defendida por

Guillermo González Martínez

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Salvador Villarreal Reyes
Codirector de tesis

Dr. Jorge Flores Troncoso
Codirector de tesis

Miembros del Comité

Dr. Miguel Ángel Alonso Arévalo

Dr. Humberto Lobato Morales

Dr. Leonel Soriano Equigua

Dr. Jorge Torres Rodríguez



Dr. Miguel Ángel Alonso Arévalo
Coordinador del Posgrado en Electrónica y Telecomunicaciones

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Guillermo González Martínez © 2016

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis de **Guillermo González Martínez**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones.

Diseño de un sistema de acceso al medio y modulación en banda base utilizando radio definido por software para comunicación de largo alcance entre boyas

Resumen aprobado por:

Dr. Salvador Villarreal Reyes

Codirector de Tesis

Dr. Jorge Flores Troncoso

Codirector de Tesis

En años recientes, la implementación de redes inalámbricas se ha convertido en un tópico de interés para una gran variedad de aplicaciones, dando lugar a soluciones eficientes para problemas de diversas áreas. Tal es el caso del monitoreo marítimo en donde se busca analizar variables de interés de manera continua, que eventualmente pueden integrarse a tecnologías como el internet de las cosas. En este contexto, existe un proyecto enfocado al monitoreo de aguas del Golfo de México mediante la colocación de sensores en boyas marinas. Generalmente, la recolección de datos de las boyas se realiza mediante el uso de enlaces satelitales, cuya mayor desventaja son sus altos costos. Por lo tanto, el proyecto involucra el diseño del equipo de transmisión para la comunicación de largo alcance entre boyas, buscando la manera de reducir costes en la recolección de la información. En este trabajo se propone una arquitectura de red en modalidad ad-hoc trabajando sobre la banda de HF, la cual permita conjuntar la información de varias boyas en una sola, de manera que únicamente esta última cuente con un enlace satelital en caso de requerirlo. Particularmente se propone el diseño de un protocolo de control de acceso al medio híbrido que permite la transmisión de dos tipos de información entre boyas separadas por largas distancias (aprox. 50 km). Asimismo, se lleva a cabo la evaluación del mismo mediante un modelador de red (OMNeT++) con la finalidad de observar el desempeño y comportamiento del protocolo sobre la arquitectura y topología sugeridas. A partir de esta evaluación se presentan las fortalezas y ventajas del protocolo MAC propuesto y se demuestra que éste puede cumplir con los requerimientos de la aplicación planteada. Además, se realiza la selección e implementación de un esquema de modulación en banda base sobre una plataforma de SDR en una arquitectura de procesadores ARM como parte del sistema del radio transmisor, la cual presenta ventajas en cuanto a costos y facilidad de programación. Se presentan los resultados de esta implementación que son tomados como entrada para el “*front-end*” analógico realizado en la tesis complemento de la presente, en donde se realiza el acondicionamiento de la señal para ser transmitida sobre la banda de HF.

Palabras clave: **monitoreo marítimo, sistema de acceso al medio, OMNeT++, modulación en banda base, radio definida por software, largo alcance, boyas, HF.**

Abstract of the thesis presented by **Guillermo González Martínez** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Telecommunications.

Design of a media access system and baseband modulation by using software defined radio for long-range communications between marine buoys

Abstract approved by:

Dr. Salvador Villarreal Reyes

Thesis Codirector

Dr. Jorge Flores Troncoso

Thesis Codirector

In recent years, the deployment of wireless networks has become a topic of interest for a variety of applications, resulting in efficient solutions to problems of different areas. One of these areas is the maritime monitoring, which pretends continuously analyze variables of interest, so it can eventually be part of technologies such as the Internet of Things (IoT). In this context, there is a project focused on monitoring the Gulf of Mexico through placing marine buoys equipped with sensors. Generally, data collection buoy is performed by using satellite links which its biggest disadvantage is its high cost. Therefore, the project involves the design of transmission equipment for long-range communications between buoys, looking for ways to reduce costs in collecting the information. In this work, an ad-hoc network architecture working in the HF band is proposed, so the information of several buoys can be gathered into one and only this latter buoy has a satellite link if required. Particularly, a hybrid media access control protocol is proposed which allows the transmission of two information types between buoys separated by long distances (approx. 50 km). The evaluation of the protocol is performed by simulation using a free software (OMNeT++) in order to observe the performance and behavior of the protocol on the suggested architecture and topology. This evaluation presents the strengths and advantages of the MAC protocol and demonstrates that it can meet the requirements of the considered application. In addition, the selection and implementation of baseband modulation scheme on a SDR platform in an ARM processor architecture is performed as part of the radio transmitter system, which has advantages in terms of costs and ease programming. The results of this implementation are presented, which are the input of the analogical front-end performed in the complementary thesis, where the signal conditioning is carried out to be transmitted on the HF band.

Keywords: **marine monitoring, media access system, OMNeT++, baseband modulation, software defined radio, long-range, buoys, HF.**

Dedicatoria

*A mi padre que aunque ya no está conmigo,
tendrá mi respeto y admiración por siempre;
a mi madre y hermanos por su motivación.
A todos ellos, mis logros son siempre suyos.*

Agradecimientos

Al CICESE por abrir las puertas y permitirme recibir una formación académica de calidad proporcionándome las herramientas necesarias para mi crecimiento académico y profesional.

Al CONACYT por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría con número de becario 338008.

A todos los profesores del Posgrado en Electrónica y Telecomunicaciones que compartieron su conocimiento para mi formación académica. Especialmente al Dr. Salvador Villareal Reyes y al Dr. Jorge Flores Troncoso por su asesoría, disposición, tiempo y amables recomendaciones durante el proceso de investigación.

A los miembros de mi comité de tesis: Dr. Miguel Ángel Alonso Arévalo, Dr. Humberto Lobato Morales, Dr. Leonel Soriano Equigua, Dr. Jorge Torres Rodríguez, y adicionalmente al Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda por sus consejos, comentarios y observaciones que ayudaron a sacar adelante este trabajo de investigación.

A los integrantes del grupo ARTS que con su apoyo y recomendaciones fortalecieron este trabajo de investigación.

A Dios por brindarme todo lo necesario para poder alcanzar mis objetivos.

A mis padres y hermanos, con quienes sé que siempre podré contar donde quiera que se encuentren. Gracias por su buen ejemplo y dedicación para que yo pueda alcanzar mis metas.

A Gaby, por estar siempre a mi lado aún en la distancia y acompañarme tanto en los triunfos como en los tropiezos.

A todos mis amigos, especialmente a Ramón, Andrea y Jairo, por los excelentes momentos de vida tanto en lo académico como en lo personal.

Tabla de contenido

Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	ix
Lista de tablas.....	xiii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.1.1 Comunicaciones inalámbricas ad-hoc	2
1.1.2 Radio definido por software.....	3
1.2 Planteamiento de problema.....	4
1.3 Objetivo general	5
1.4 Objetivos particulares.....	6
1.5 Metodología	6
1.6 Organización de la tesis.....	8
Capítulo 2. Redes inalámbricas y control de acceso al medio.....	9
2.1 Introducción	9
2.1.1 Clasificación de redes inalámbricas.....	10
2.1.2 Topologías	11
2.2 Control de acceso al medio para redes inalámbricas.....	13
2.2.1 Técnicas de control de acceso al medio.....	14
2.2.1.1 Técnicas basadas en contención	14
2.2.1.2 Técnicas libres de contención	17
2.2.2 Clasificación de protocolos de acceso al medio inalámbricos	18
2.2.2.1 Centralizados.....	19
2.2.2.2 Distribuidos	20
2.2.3 Retos para los protocolos de acceso al medio en redes inalámbricas.....	21
2.2.4 Métricas de rendimiento.....	22
2.3 Redes inalámbricas ad-hoc de larga distancia (RIALD).....	23
2.3.1 Control de acceso al medio para RIALD	24
2.3.1.1 WTRP (“Wireless Token Ring Protocol”).....	24
2.3.1.2 HFTP (“High Frequency Token Protocol”).....	26
2.3.1.3 HF Token-Passing	28
2.3.1.4 HF ALE (CSMA).....	29
2.3.1.5 SO-TDMA (“Self-Organizing TDMA”).....	30
2.3.1.6 CS-TDMA (“Carrier Sensing TDMA”).....	32
2.3.1.7 ASO-TDMA (“Ad-hoc Self-Organizing TDMA”)	32
2.3.1.8 Cognitive Mesh MAC.....	35
2.3.1.9 FD-MAC (“Flow Driven MAC”)	36
2.4 Redes inalámbricas de sensores.....	38
2.4.1 Control de acceso al medio para WSN	38
2.4.1.1 S-MAC (“Sensor MAC”).....	39
2.4.1.2 MS-MAC (“Mobility-aware S-MAC”)	40
2.4.1.3 MD-MAC (“Mobility-aware Delay-Sensitive MAC”)	40
2.4.1.4 T-MAC (“Timeout MAC”)	41

2.4.1.5	EMACs (“EYES MAC”)	41
2.4.1.6	LMAC (“Lightweight MAC”).....	42
2.4.1.7	DMAC (“Data-gathering MAC”)	43
2.5	Recopilación y comparación de los protocolos de acceso al medio	43
Capítulo 3.	Radio definido por software	47
3.1	Introducción	47
3.2	Inicios de SDR	48
3.2.1	Wireless Innovation Forum	48
3.3	Concepto y arquitectura.....	49
3.4	Limitaciones y capacidades	51
3.5	SDR sobre procesadores ARM	51
3.5.1	Clasificación de procesadores ARM Cortex.....	52
3.5.2	Soluciones tecnológicas de SDR basadas en procesadores ARM.....	55
3.6	Discusión del uso de procesadores ARM en plataformas de SDR.....	57
Capítulo 4.	Implementación del esquema de modulación en banda base sobre SDR	58
4.1	Introducción	58
4.2	Estándar MIL-STD-188-110C.....	58
4.3	Discusión sobre los esquemas de modulación	60
4.3.1	Perfil de tráfico.....	61
4.3.2	Esparcimiento.....	62
4.4	Equipo utilizado	64
4.4.1	STMicroelectronics STM32F429I-DISCO	64
4.5	Implementación del esquema de modulación en banda base.....	65
4.5.1	Descripción de la implementación.....	66
4.5.2	Resultados de la implementación	71
4.5.2.1	Modulación en banda base	71
4.5.2.2	Modulación pasa banda sobre IF	73
4.5.2.3	Demodulación	78
4.6	Conclusiones sobre la implementación del esquema de modulación en banda base.....	81
Capítulo 5.	Diseño del protocolo de control de acceso al medio (MAC)	82
5.1	Introducción	82
5.2	Arquitectura y topología propuesta	82
5.3	Protocolo MAC propuesto.....	83
5.3.1	Formato de paquete.....	85
5.3.2	Estructura de la supertrama.....	88
5.3.3	Descripción del protocolo	89
5.3.3.1	Consideraciones iniciales	89
5.3.3.2	Perfil de tráfico.....	89
5.3.3.3	Funcionamiento	90
5.4	Evaluación del protocolo MAC propuesto.....	99
5.4.1	OMNeT++	99
5.4.2	“Framework” MiXiM	100
5.4.3	Parámetros de simulación.....	100
5.4.4	Métricas.....	104
5.4.5	Resultados de simulación.....	105
5.4.5.1	Simulación del periodo basado en contención	106
5.4.5.2	Simulación del periodo libre de contención	115

5.5 Conclusiones sobre el diseño del protocolo MAC híbrido propuesto.....	119
Capítulo 6. Conclusiones y trabajo a futuro.....	121
6.1 Introducción	121
6.2 Conclusiones.....	121
6.2.1 Sobre la implementación del esquema de modulación en banda base en SDR	122
6.2.2 Sobre el diseño del protocolo de control de acceso al medio	123
6.3 Trabajo a futuro.....	124
Literatura citada	126

Lista de figuras

Figura		Página
1	Clasificación de redes informáticas de acuerdo a su alcance.....	11
2	Topologías en redes inalámbricas.....	12
3	Protocolo P-ALOHA.....	15
4	Protocolo S-ALOHA.....	15
5	Ejemplo de distribución de ranuras TDMA.....	17
6	Distribución de sub-bandas de frecuencia en FDMA.....	18
7	Ejemplo de establecimiento de acceso al medio en protocolos MAC centralizados.....	19
8	Ejemplo de establecimiento de acceso al medio en protocolos MAC distribuidos.....	20
9	Esquema de ilustración del problema del nodo oculto y nodo expuesto.....	22
10	Topología con pase de testigo del protocolo WTRP (E. Johnson & Tang, 2003).....	25
11	Diagrama de tiempo para WTRP (Ergen et al., 2002).....	25
12	Mecanismo de retransmisión del token en HFTP (E. Johnson & Tang, 2003).....	26
13	Mecanismo de fusión de anillos en HFTP (E. Johnson & Tang, 2003).....	27
14	Retransmisión de un mensaje en una red HF Token Mesh (Eric E Johnson, 2006).....	28
15	Retardo en HF Token-Passing para un solo anillo (Eric E Johnson, 2006).....	29
16	Red HF ALE con CSMA (Eric E Johnson, 2006).....	30
17	Descripción de la trama de SO-TDMA (Yun & Lim, 2012).....	31
18	Descripción de la trama de CS-TDMA (Yun & Lim, 2012).....	32
19	Arquitectura SANET considerada para ASO-TDMA (Yun & Lim, 2012).....	33
20	Descripción de la trama de ASO-TDMA (Yun & Lim, 2012).....	33
21	Estructura de la trama de IEEE 802.16d Mesh mejorada (Zhou & Harada, 2012).....	35

22	Escenario de comunicación para S-MAC (Demirkol, Ersoy, & Alagöz, 2006).....	39
23	Secciones de una ranura de tiempo en EMACs (Hoesel et al., 2004).....	42
24	Asignación de ranuras en un esquema de árbol para DMAC (Lu et al., 2004).....	43
25	Esquema básico de la arquitectura SDR (Domínguez Pinar & Fuentes Murillo, 2011).....	49
26	Evolución de procesadores Cortex-ARM.....	55
27	BER para distintos esquemas de modulación digital.....	59
28	Esparcimiento DSSS.....	63
29	Kit de desarrollo STM32F429I-DISCO utilizado para la implementación del esquema de modulación en banda base (STMicroelectronics, 2015).....	64
30	Diagrama básico de la implementación del esquema de modulación sobre la STM32F429I-DISCO.....	65
31	Diagrama de espacio de señales para un sistema QPSK coherente (Haykin, 2001).....	68
32	a) Secuencia binaria de entrada, b) Señal para datos de fase, c) Señal para datos de cuadratura, d) Señal temporal QPSK (Haykin, 2001).....	68
33	Diagrama a bloques de la implementación del esquema de modulación QPSK sobre la STM32F429I-DISCO.....	69
34	Resultados de la simulación del esquema de modulación en banda base QPSK.....	72
35	Resultados de la implementación física del esquema de modulación en banda base QPSK.....	73
36	Resultados de simulación de la señal QPSK modulada sobre una portadora de IF de 109.8901099 kHz.....	74
37	Resultados de la implementación física de la señal QPSK modulada sobre una portadora de IF de 109.8901099 kHz.....	74
38	Resultados de simulación de la señal QPSK modulada sobre una portadora de IF de 131.8681319 kHz.....	75
39	Resultados de la implementación física de la señal QPSK modulada sobre una portadora de IF de 131.8681319 kHz.....	76
40	Resultados de simulación de la señal QPSK modulada sobre una portadora de IF de 164.8351648 kHz.....	76

41	Resultados de la implementación física de la señal QPSK modulada sobre una portadora de IF de 164.8351648 kHz.....	77
42	Desviación de frecuencia para la portadora de IF de 164.8351648 kHz en la tarjeta STM32F429I-DISCO.....	78
43	Diagrama a bloques simplificado para la demodulación QPSK.....	79
44	Decodificación de parte de la señal recibida.....	80
45	Comparación de parte de la secuencia de datos transmitida y recibida.....	80
46	Arquitectura de red propuesta para el monitoreo de aguas marinas.....	83
47	Formato de paquete a utilizar en el periodo basado en contención.....	85
48	Formato de paquete a utilizar en el periodo libre de contención.....	85
49	Estructura de la supertrama general del protocolo MAC propuesto.....	88
50	Red de monitoreo con 9 boyas distribuidas en cuatro saltos con nodo SINK posicionado en el centro de la línea.....	91
51	Diagrama de flujo del algoritmo CSMA/CA empleado en el periodo basado en contención.....	92
52	Diagrama de bloques del procesado de un paquete recibido en el periodo basado en contención.....	94
53	División y distribución del periodo libre de contención ranurado.....	96
54	Asignación de ranuras a los nodos del primer salto cuando el nodo SINK no se encuentra en los extremos de la red.....	97
55	Diagrama de flujo del algoritmo TDMA empleado en el periodo libre de contención para combatir el desperdicio de energía.....	98
56	Entorno gráfico de ejecución para una simulación con 4 boyas convencionales y una boya SINK.....	101
57	Tasa de colisiones en una red con 4 nodos convencionales y un nodo SINK en la transmisión de paquetes de telemetría y comando.....	107
58	Porcentaje de pérdida de paquetes en una red con 4 nodos convencionales y un nodo SINK en la transmisión de paquetes de telemetría y comando.....	107
59	Latencia de paquetes en una red con 4 nodos convencionales y un nodo SINK en la transmisión de paquetes de telemetría y comando.....	109

60	Caudal eficaz en una red con 4 nodos convencionales y un nodo SINK en la transmisión de paquetes de telemetría y comando.....	109
61	Consumo promedio de potencia en una red con 4 nodos convencionales y un nodo SINK en la transmisión de paquetes de telemetría y comando.....	110
62	Tasa de colisiones en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes de telemetría y comando.....	111
63	Porcentaje de pérdida de paquetes en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes de telemetría y comando.....	112
64	Número de paquetes perdidos en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes de telemetría y comando.....	113
65	Latencia promedio en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes de telemetría y comando.....	114
66	Caudal eficaz general en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes de telemetría y comando.....	114
67	Consumo promedio de potencia en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes de telemetría y comando.....	115
68	Porcentaje de paquetes descartados en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes con información de los sensores de las boyas.....	116
69	Latencia promedio en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes con información de los sensores de las boyas.....	117
70	Caudal eficaz en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes con información de los sensores de las boyas.....	118
71	Consumo promedio de potencia en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes con información de los sensores de las boyas.....	118

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Clasificación de protocolos MAC en RIALD y WSNs.....	44
2	Tasas de datos en bps y esquemas de modulación empleados en el US MIL-STD-188-110C.....	59
3	Tráfico generado por una boya de monitoreo.....	62
4	Caracterización del espacio de señales de QPSK.....	67
5	Valores de los subcampos Tipo y Subtipo.....	86
6	Duración de los periodos que conforman la supertrama general.....	88
7	Número de ranuras en el periodo libre de contención sin reutilización de ranuras.....	96
8	Parámetros considerados para el esquema CSMA/CA del periodo basado en contención....	102
9	Corrientes consideradas para el consumo de potencia de la simulación.....	104

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

En las últimas décadas, el monitoreo marítimo se ha convertido en un campo de gran interés en el área científica (Albaladejo, Soto, Torres, Sánchez, & López, 2012). Aunado a ello en años recientes, la exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas es una actividad que ha llamado fuertemente la atención a nivel global (Instituto Mexicano del Petróleo, 2010). En este contexto, actualmente centros de investigación, universidades y la secretaria de energía (SENER) del gobierno mexicano se encuentran desarrollando un mega-proyecto que tiene como objetivo la implementación de redes de observaciones oceanográficas (físicas, geoquímicas, ecológicas) para la generación de escenarios ante posibles contingencias relacionadas con la exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas del Golfo de México. El proyecto permitirá modelar escenarios, principalmente mapas de riesgo, tiempos de arribo y estimaciones de impacto, que ayuden a la toma de decisiones más racionales en caso de ocurrir derrames de hidrocarburos en esta región.

Una parte fundamental del proyecto es la implementación de un sistema de monitoreo capaz de recolectar información generada por diversos tipos de sensores instalados en boyas meteorológicas y oceanográficas desplegadas sobre áreas geográficas extensas (alrededor de cientos de km²) en el Golfo de México y su costa. Para habilitar este sistema de monitoreo, es necesario el uso de comunicaciones marítimas de largo alcance. En este sentido, es importante mencionar que la comunicación marítima de largo alcance ha representado un reto tecnológico en el área de las comunicaciones inalámbricas, debido a la naturaleza del canal marítimo (Kim et al., 2009). Por tal motivo, es común encontrar sistemas de boyas que utilizan transceptores satelitales para enviar la información recolectada de los sensores oceanográficos hacia el usuario de interés. Sin embargo, este tipo de sistemas tienen un costo elevado debido a la renta del enlace satelital y el precio de los módems. Adicionalmente, este tipo de sistemas pueden provocar retrasos en el análisis de los datos debido a fallas en los enlaces satelitales, las cuales pueden ser causadas por malas condiciones climatológicas, entre otras cosas.

Considerando lo anteriormente mencionado, ha surgido un área de oportunidad en habilitar comunicaciones inalámbricas a más bajo costo que los enlaces satelitales para ambientes marítimos. En este sentido, un ejemplo de un desarrollo que considera enlaces de comunicación diferentes a los satelitales se desplegó en Singapur (Zhou & Harada, 2012). En particular, se desarrolló un sistema

denominado WISE-PORT (*“Wireless-broadband-access for SeaPORT”*), el cual utiliza el estándar IEEE 802.16e para comunicar boyas separadas de la costa por distancias de hasta 15 km. Esto limita la aplicabilidad de la tecnología en lugares alejados de la costa. En otro ejemplo, en Noruega se desarrolló una red digital que hace uso de la banda de muy altas frecuencias (VHF por sus siglas en inglés) con tasas de datos de 21 y 133 kbps (Zhou & Harada, 2012). Esta red se puso en marcha a lo largo de toda la costa de Noruega proporcionando una cobertura de hasta 130 km mar adentro. Sin embargo, una limitante de esta tecnología es que opera en un canal VHF con licencia y además requiere de una altura significativa de las antenas que se localizan en la costa.

Si bien se han hecho desarrollos para comunicaciones inalámbricas cerca de la costa, otra área de interés se encuentra en el desarrollo de sistemas de comunicaciones inalámbricos para aplicaciones de monitoreo remoto en el océano como los actualmente habilitados en boyas. Tradicionalmente estos sistemas han utilizado enlaces satelitales. Sin embargo, en años recientes han surgido una gran variedad de sistemas de comunicación inalámbricos de sensores (*“Wireless Sensor Networks” – WSN*) ad-hoc (Stankovic, 2008). Este trabajo de tesis trata con el desarrollo de sistemas de telecomunicaciones inalámbricos para el establecimiento de este tipo de redes en aplicaciones de monitoreo marítimo.

1.1.1 Comunicaciones inalámbricas ad-hoc

Las redes inalámbricas ad-hoc son aquellas que tienen la finalidad de mejorar la conectividad de la red permitiendo que los nodos puedan comunicarse con destinos lejanos usando nodos intermedios como repetidores, o comunicarse directamente con un destino cercano sin necesidad de pasar a través de un punto de acceso (Vikram Srinivasan, Pavan Nuggehalli, Chiasserini, & Rao, 2003). Una de las ventajas que tiene el establecer una red ad-hoc para aplicaciones de monitoreo marítimo es que no se estaría limitado a una topología estrella que limite el posicionamiento de las boyas (o sistemas de sensado) al rango de cobertura máximo de los radios. Adicionalmente, la comunicación inalámbrica entre boyas formando una red ad-hoc puede ofrecer ventajas en términos de costos de los enlaces de comunicaciones y gestión de la red. Por ejemplo, al habilitar la comunicación ad-hoc entre boyas es posible concentrar la información generada por dos o más boyas en una sola, la cual se encargaría de utilizar un solo enlace de larga distancia (hacia el satélite o una estación costera) para transmitir la información hacia su destino final.

Una de las partes fundamentales para el establecimiento de redes ad-hoc es el contar con una técnica de acceso al medio (*“Media Access Control” – MAC*) distribuido que no requiera que todos los nodos (p. ej.

las boyas) se puedan comunicar directamente entre sí. Ejemplos de técnicas de acceso al medio son CSMA, LMAC, S-MAC, S-ALOHA, entre otras. El diseñar un protocolo de este tipo para aplicaciones de monitoreo donde las distancias entre nodos pueden ser mayores a 20 km no es trivial, debido a que la altura máxima de las antenas es limitada (alrededor de 10 metros) y el canal marítimo puede causar fuertes degradaciones en el sistema de comunicaciones. Esto representa un reto para el diseño de un protocolo de control de acceso al medio. Aunque existen algunas soluciones que tratan de lidiar con estos retos, con el mejor de nuestro conocimiento, hasta la fecha no se ha reportado un protocolo de control de acceso al medio para comunicaciones entre boyas que se encuentran separadas por largas distancias.

1.1.2 Radio definido por software

Debido a las condiciones de propagación encontradas en la zona de despliegue de las boyas, no es factible la utilización de soluciones comerciales de comunicación para largas distancias en la banda ISM de 915 MHz como lo son: Zigbee Pro¹ o LoRa². Esto debido a la altura que pueden alcanzar las olas en alta mar y a la limitación en la altura de colocación de la antena en la boyas. Por esta razón la utilización de soluciones en el rango de HF y VHF es lo más recomendable debido a las características de propagación presentes en dichas bandas. Sin embargo, a pesar de que existen varias soluciones comunicaciones de grado militar en estas bandas, no se ha encontrado una solución comercial para la implementación de los transceptores requeridos. Por esta razón, en esta tesis se plantea que además del desarrollo del protocolo de control de acceso al medio, se desarrolle parte de una arquitectura de radio definido por software (*“Software Defined Radio”* – SDR) en procesadores digitales de bajo costo y consumo de energía moderado.

Básicamente un SDR es una arquitectura de radio basada en software que abarca una amplia gama de técnicas de diseño proporcionando flexibilidad y versatilidad. Dentro de esta arquitectura, el hardware de propósito general utilizado puede ser reprogramado o reconfigurado vía software, por lo que es posible ofrecer soluciones a problemas de compatibilidad, adaptación y estandarización de manera más sencilla (Kenington, 2005), (Rouphael, 2008). Además, esta plataforma reconfigurable puede también presentar ventajas en términos económicos ya que se pueden incluir diversas infraestructuras de comunicaciones (p. ej. varios esquemas de modulación) en una sólo radio. En años recientes, la capacidad de cálculo de los procesadores ARM ha ido creciendo a pasos agigantados (Wei, Qi, Xiao, Shi, & Huang, 2012). Muchas de las plataformas actuales de SDR se basan en FPGAs o en procesadores digitales de señales embebidos

¹ Más información disponible en <http://www.zigbee.org/zigbee-for-developers/network-specifications/zigbeepro/>

² Más información disponible en <https://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology>

(DSPs). Dichas soluciones cubren los requerimientos de procesamiento que demandan algunos protocolos inalámbricos de alta velocidad modernos. Sin embargo, tanto FPGAs como DSPs presentan inconvenientes en términos de costo y complejidad de programación y corrección de errores. Los procesadores ARM pueden proporcionar las mismas funciones que un procesador de propósito general (*“General-Purpose Processor”* – GPP), pero presentando ventajas en cuanto a costos y consumo de energía. En 2012, se presentó un estudio realizado a una arquitectura SDR montada sobre un procesador ARM Cortex-A9, mostrando con resultados experimentales que dicho procesador puede cumplir con los requerimientos de procesamiento en tiempo real de un sistema de comunicaciones de manera eficiente. Por lo que la arquitectura SDR sobre procesadores ARM se vuelve cada vez más común en los sistemas de comunicación inalámbricas (Wei et al., 2012).

Si bien las soluciones de SDR para alta velocidad utilizan una arquitectura basada en FPGA (Abidi, 2006), (Nunes, Mendonca, Nguyen, Obraczka, & Turletti, 2014), en el caso del presente tema de tesis, como se detallará en el Capítulo 4, el contar con una velocidad pico que vaya de los 2000 a los 9600 bps es suficiente para los alcances de la comunicación propuesta. Por este motivo se propone utilizar una arquitectura basada en procesadores ARM para la implementación en SDR de los esquemas de modulación en banda base. En particular en esta tesis se implementará un esquema de modulación básico como el de conmutación por corrimiento de fase cuaternaria (*“Quadrature Phase Shift Keying”* – QPSK). La implementación en la arquitectura SDR-ARM permitirá en un momento dado atender las funciones de acceso al medio y manejo de información. Es importante mencionar que en esta tesis no se abordarán aspectos relacionados con el *“front-end”* analógico, ni de implementación de un esquema de sincronización de trama simple.

1.2 Planteamiento de problema

En la actualidad el monitoreo marítimo ha cobrado gran relevancia en el área de la investigación científica debido a la vulnerabilidad que presentan los ecosistemas costeros y marinos ante los efectos provocados por la actividad humana (industrial, turismo, desarrollo urbano, etc.). Por tal motivo, resulta importante el estudio completo de las condiciones actuales y la evolución de estos ecosistemas para generar soluciones que en la medida de lo posible reduzcan el impacto negativo de dichas actividades.

Para poder realizar el monitoreo marítimo es necesario desplegar nodos (p. ej. boyas) que contengan los sensores necesarios para recolectar la información de las variables a medir. Una vez que la información es recolectada, esta debe ser almacenada o transmitida para procesarla. Realizar la transmisión de la

información para su procesado remoto ofrece grandes ventajas como respuestas prontas en caso de emergencias por: condiciones meteorológicas, accidentes ambientales, detección de valores inusuales en las variables monitoreadas, etc. En este sentido, debido a las grandes distancias entre los nodos y el centro de procesamiento, es común el uso de enlaces satelitales en estas aplicaciones, sin embargo su principal desventaja son los altos costos que involucran.

La comunicación inalámbrica entre boyas en modalidad de red ad-hoc es una opción que puede ofrecer una serie de ventajas en relación a los costos y gestión de la red. Se puede disminuir el número de enlaces satelitales requeridos al conjuntar la información recolectada de varias boyas en una que cuente con dicho enlace, evitando la necesidad de que cada boya cuente con su propio enlace satelital. Sin embargo, la distancia entre las boyas, así como las condiciones del canal marítimo pueden ocasionar inconvenientes en la comunicación si no se hace uso de un protocolo de control de acceso al medio adecuado. Aunque existen desarrollos tecnológicos relacionados al protocolo de control de acceso al medio en ambientes marítimos, no se ha registrado alguno enfocado a la comunicación específica entre boyas compartiendo información de monitoreo a larga distancia.

Por tal motivo es necesario realizar un estudio de las técnicas de acceso al medio, así como de los esquemas de modulación en banda base que permitan obtener una comunicación confiable con las tasas de datos requeridas. El desarrollar dicho protocolo de acceso al medio es uno de los primeros pasos que se deben cubrir con el objetivo de desarrollar una solución que permita el establecimiento de redes ad-hoc de larga distancia para aplicaciones de monitoreo marítimo. Además la implementación del sistema de modulación en banda base sobre una arquitectura de SDR en procesadores ARM presenta características atractivas en cuanto a desempeño, costos y ahorro de energía.

1.3 Objetivo general

El objetivo de este proyecto de tesis consiste en implementar un modulador en banda base utilizando radio definido por software (*“Software Defined Radio”* – SDR) y en adaptar y evaluar un protocolo de control de acceso al medio para comunicación de largo alcance entre boyas. Se busca que el modulador en banda base permita obtener al menos una tasa de datos pico mínima de 2000 bps y que el protocolo de control de acceso al medio permita la transmisión de información típica recolectada en sistemas de monitoreo marítimo que realizan un muestreo cada quince minutos.

1.4 Objetivos particulares

- Estudiar los diversos esquemas de modulación en banda base que permitan reunir los requerimientos de la aplicación propuesta en esta investigación.
- Estudiar las características de los protocolos MAC de redes inalámbricas ad-hoc tanto en ambientes marítimos como en ambientes terrestres. Esto con la finalidad de tener los conocimientos necesarios para el diseño o adaptación de un protocolo MAC apropiado.
- Seleccionar un esquema de modulación en banda base e implementarlo utilizando radio definido por software sobre un procesador ARM, de manera que permita obtener una tasa de transmisión pico mínima de 2000 bps.
- Realizar la evaluación experimental de la implementación del esquema de modulación en banda base haciendo uso de un osciloscopio digitalizador de alta tasa de muestreo.
- Diseñar un esquema de control de acceso al medio para comunicaciones de largo alcance en ambientes marítimos.
- Realizar la evaluación del esquema de control de acceso al medio propuesto en términos de caudal eficaz, latencia y consumo de potencia a través de simulación.

1.5 Metodología

1. Estudio bibliográfico de los esquemas de control de acceso al medio y esquemas de modulación en banda base

En esta parte se realizó un estudio de distintas técnicas de acceso al medio y de modulación en banda base que pudieran ser incorporadas para comunicaciones de largo alcance a baja velocidad en ambientes marítimos. Lo anterior con la finalidad de obtener los elementos suficientes para realizar un diseño adecuado del sistema a implementar.

2. Estudio bibliográfico de las plataformas de SDR

Se realizó un estudio de la bibliografía relacionada con las plataformas de SDR que se han implementado sobre procesadores ARM para obtener los conocimientos básicos relacionados con el paradigma del desarrollo de estas plataformas.

3. Selección de las herramientas de programación y familiarización con la programación de procesadores ARM

Se seleccionó una herramienta de programación adecuada para la implementación del esquema de modulación sobre procesadores ARM. Además, debido a que no se contaba con un previo conocimiento de la programación de estos procesadores, también se realizó un estudio y entrenamiento de la programación de procesadores ARM.

4. Diseño e implementación del esquema de modulación en banda base sobre una arquitectura de SDR

Se diseñó el modulador en banda base tomando como referencia un esquema de modulación por corrimiento de fase cuaternaria (QPSK por siglas en inglés). Luego de ello se llevó a cabo su simulación y posteriormente se procedió a realizar la programación del mismo en los procesadores ARM, cuya señal resultante fue pasada a la etapa del “*front-end*” analógico realizado en el trabajo de tesis complementario.

5. Prueba y evaluación del desempeño del modulador implementado

Luego de realizar la implementación del esquema de modulación, se realizó la evaluación experimental del desempeño del modulador, para lo cual se realizó el procesamiento de recepción de las señales captadas con el osciloscopio digitalizador de alta frecuencia haciendo uso del software MATLAB®.

6. Diseño del protocolo de control de acceso al medio

De acuerdo al análisis de las diversas técnicas de acceso al medio estudiadas, se realizó el diseño de un protocolo que controla el acceso al canal por parte de los miembros de la red en modalidad ad-hoc, tomando en cuenta la información a transmitir y la separación entre los nodos.

7. Evaluación del protocolo de control de acceso al medio propuesto

Se realizó la implementación del protocolo de control de acceso al medio propuesto dentro de un entorno de simulación. Una vez establecido todo el escenario de la simulación, se procedió a correr la simulación del protocolo propuesto para posteriormente extraer las métricas que sirvan como base para evaluar el comportamiento del esquema propuesto.

1.6 Organización de la tesis

En el Capítulo 2 se muestran las características principales de las redes inalámbricas, incluyendo clasificación, topologías, modos de operación, etc. Además se muestran las propiedades y características de la capa de control de acceso al medio, así como la revisión bibliográfica de los protocolos MAC empleados en redes inalámbricas de larga distancia y en redes inalámbricas de sensores, tanto en ambientes terrestres como marítimos. Esta recopilación de protocolos MAC sirvió como base esencial para llegar al protocolo propuesto en el presente trabajo de tesis.

En el Capítulo 3 se muestra la revisión de literatura para el concepto de SDR. Se investigó acerca de características como la arquitectura, capacidades, alcances y limitaciones que puede llegar a tener esta tecnología. Además se muestra la aplicación de SDR sobre procesadores ARM y las soluciones tecnológicas que existen dentro de la literatura, mostrando con ello las ventajas y desventajas del uso de esta plataforma.

En el Capítulo 4 se muestra la selección del esquema de modulación en banda base y se describe la implementación del mismo sobre un procesador ARM Cortex M4. Además se muestran los resultados obtenidos de dicha implementación, incluyendo la modulación pasa banda sobre la banda de frecuencia intermedia (*“Intermediate Frequency”* – IF) dentro de la misma plataforma de SDR.

En el Capítulo 5 se describe el protocolo MAC propuesto, así como la arquitectura y topología para la que está pensado. Además se presenta la discusión de los resultados de la evaluación del desempeño del mismo dentro de diferentes escenarios variando el número de nodos en la red y la carga de tráfico dentro de ésta.

Finalmente, en el Capítulo 6 se muestran las conclusiones y trabajo a futuro que surgen de este trabajo de investigación.

Capítulo 2. Redes inalámbricas y control de acceso al medio

2.1 Introducción

Desde su aparición en el siglo XIX (Íñigo Griera et al., 2008), las redes de comunicaciones han ido evolucionando gracias a las innovaciones tecnológicas que se han ido presentando. En la actualidad las redes de comunicaciones permiten realizar intercambio de información, como video, voz y datos, ya sea de manera alámbrica o inalámbrica. Estas redes están constituidas por sistemas que hacen uso de técnicas y protocolos que permiten ofrecer una comunicación fiable para los usuarios.

Las redes cableadas han sido muy utilizadas debido a las características que presentan, tales como, altas velocidades para la transferencia de datos, seguridad de la información, estabilidad de conexión, entre otras. Sin embargo, existen situaciones o entornos en los que establecer este tipo de redes resulta inviable o poco efectivo, y en las cuales las redes inalámbricas resultan ser una mejor opción. Por ejemplo en escenarios donde los dispositivos de los usuarios requieran libertad de movimiento o en los que no existe la posibilidad tirar cables hasta la ubicación de los diversos destinos. En este sentido, las redes inalámbricas constituyen un sistema de comunicación flexible que además presenta ventajas como, movilidad, escalabilidad, accesibilidad, reducción de costos y fácil configuración.

Las características de las redes inalámbricas permiten que puedan ser desplegadas en una gran variedad de entornos, pudiéndose adaptar a diversas necesidades. En particular ha surgido la aplicación de utilizar redes inalámbricas para recolectar información de la zona en la cual son desplegadas (p. ej., temperatura, humedad, etc.), apareciendo de este modo las denominadas redes inalámbricas de sensores.

Una red de sensores está compuesta por dispositivos autónomos denominados nodos de sensores, en donde estos nodos almacenan, procesan y comunican datos en modalidad de red ad-hoc de manera inalámbrica. Este tipo de redes inalámbricas requieren también de nuevas técnicas y protocolos para que el sistema de comunicación pueda cumplir con sus funciones. Tal es el caso del control de acceso al medio, lo cual requiere implementar nuevas técnicas de acceso para que los dispositivos de los usuarios puedan funcionar correctamente en un medio inalámbrico.

Una parte de esta tesis se enfoca en el desarrollo de una técnica de control de acceso al medio para redes inalámbricas de sensores de larga distancia, contemplando los requerimientos de una aplicación de monitoreo marítimo. Debido a que las redes inalámbricas pueden presentar diversas frecuencias de

operación, potencias de transmisión y topologías, es importante conocer el alcance y distribución de las tecnologías de redes existentes.

2.1.1 Clasificación de redes inalámbricas

En las últimas décadas ha surgido una gran variedad tecnologías de comunicaciones inalámbricas, que varían en diversos aspectos como el tipo de modulación o el mecanismo de acceso al medio. En este sentido, uno de los aspectos más relevantes es el área de cobertura de la red. Específicamente, parámetros fundamentales como la potencia de transmisión o la frecuencia de operación, dependen del área de cobertura. Por ello, comúnmente las redes inalámbricas son clasificadas de acuerdo a este parámetro. A continuación, se da una descripción breve de las principales clasificaciones de red de acuerdo al área de cobertura.

PAN (“*Personal Area Network*”) y BAN (“*Body Area Network*”)

Las redes PAN y BAN tienen una cobertura limitada, ya que sólo designa la interconexión de equipos dentro de unos cuantos metros entorno al usuario para el caso de las PAN, y con alcance únicamente corporal para el caso de las BAN. En la actualidad, implementaciones de WPANs, como IEEE 802.15 y Bluetooth operan en la banda de frecuencia ISM (“*Industrial, Scientific and Medical*”) de 2.4 GHz. Sin embargo, se espera que en el futuro, existan sistemas que operen en las bandas de 5 GHz o superiores, en las cuales no se requiere licencia (Villarreal Reyes, 2015).

LAN (“*Local Area Network*”)

Esta red presenta un alcance mayor que la PAN (Atelin & Dordoigne, 2006) que va aproximadamente de 10 metros hasta unos cuantos kilómetros, y es un sistema constituido por hardware (cables, terminales, servidores, etc.), y un software que permite la administración y gestión de recursos de acceso al medio, intercomunicación, etc. Por lo general la transmisión utiliza el estándar IEEE 802.11 para facilitar la movilidad, en el cual se tienen las especificaciones de la capa de control de acceso al medio y de la capa física operando en las bandas ISM a 2.4 GHz y 5 GHz en las que se permite hasta 1 W de potencia de transmisión por equipo (Corral Ignoto & Egea Lopez, 2005).

Redes de área amplia

En estas redes se tiene un alcance mayor que las LANs mediante el uso de diversas técnicas, que permiten obtener grandes coberturas que van desde unos cuantos kilómetros hasta inclusive, en conjunto, un área mundial como la red pública de Internet (Huidobro Moya et al., 2008), (Íñigo Grieria et al., 2008). Existen varias tecnologías que abocan dentro de este grupo de redes como los enlaces punto a punto basados en microondas y las redes inalámbricas de bucle local como WiMAX definida por el estándar IEEE 802.16 o las redes de área regional definidas por estándar IEEE 802.22. Otras tecnologías que abocan dentro de este conjunto, son las redes celulares con estándares tales como GSM (*“Global System for Mobile Communications”*), GPRS (*“General Packet Radio Service”*), UMTS (*“Universal Mobile Telecommunications System”*) o LTE (*“Long Term Evolution”*). En la Figura 1 se ilustra la clasificación general de las redes de acuerdo a su alcance.

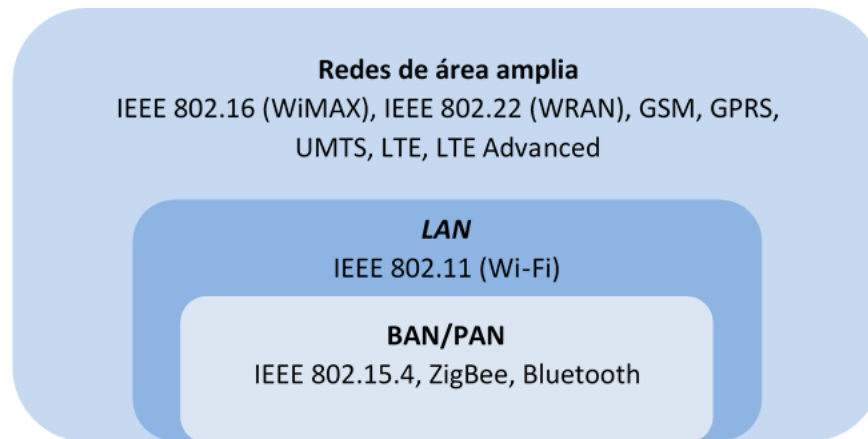


Figura 1. Clasificación de redes informáticas de acuerdo a su alcance.

2.1.2 Topologías

La topología de una red se refiere a la colocación y configuración de los diversos nodos que estén presentes en ella (Ilyas & Ahmed, 2011). Dicho de otra manera, es la manera geométrica en que los nodos de una red se comunican entre sí, ya sea estableciendo conexiones físicas o inalámbricas entre ellos. La topología de una red puede ser descrita de dos maneras: física o lógica. La primera se refiere a la configuración de cables, antenas, computadoras, etc., mientras que la última tiene que ver más con el método y flujo de la información transmitida entre los nodos (Buettrich & Escudero, 2007).

Cada una de las distintas topologías existentes posee sus ventajas y desventajas, las cuales deben ser tomadas en cuenta a la hora de diseñar una red. Algunas de las topologías más comunes en redes inalámbricas se muestran en la Figura 2.

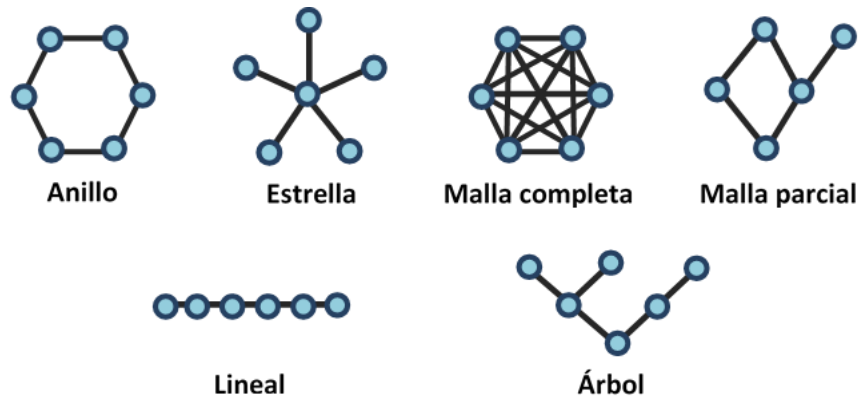


Figura 2. Topologías en redes inalámbricas.

Topología de anillo: En esta topología todos los miembros de la red están conectados formando un circuito cerrado en forma de anillo. Cada nodo se conecta a otros dos dispositivos, de tal manera que la información viaja a través del anillo dispositivo a dispositivo en una sola dirección. Con esta topología se permite aumentar o disminuir sin dificultad el número de nodos, sin embargo, cualquier fallo de comunicación entre sus miembros deja imposibilitada la red entera (Zuñiga López, 2005).

Topología de estrella: Es una de las topologías más comunes, en la cual cada nodo se conecta a una entidad central (Buettrich & Escudero, 2007). Todo el flujo de información debe pasar a través del dispositivo central antes de llegar a su destino. Esta configuración presenta flexibilidad para incrementar o disminuir el número de nodos. Un fallo en la comunicación con alguno de sus miembros (diferente a la entidad central) no afecta a la red entera.

Topología de malla: Existen dos tipos de topología de malla: completa y parcial. En la completa, cada nodo de la red tiene conectividad con absolutamente todos los demás miembros de la misma. Por otro lado, en la malla parcial, algunos nodos tienen conectividad con todos, sin embargo, otros sólo tienen conexión con algunos miembros de la red. Una red con malla completa tiene la ventaja de ser muy confiable, es por ello, que tiene lugar en aplicaciones militares (Buettrich & Escudero, 2007).

Topología lineal: En esta topología, los nodos de la red están conectados en una sola línea, de tal manera que cada miembro de la red, tiene conectividad con otros dos nodos, a excepción de aquellos nodos que

se encuentran en los extremos. Esta topología también presenta flexibilidad en la expansión de miembros en la red, sin embargo, si un nodo intermedio pierde conectividad puede causar el fallo de la red en su totalidad.

Topología de árbol: Una topología de árbol conecta varias redes con topología de estrella a través de una dorsal (Buettrich & Escudero, 2007). Si uno de los nodos perteneciente a la dorsal se pierde, puede ocasionar la pérdida de toda la sección superior conectada a él.

2.2 Control de acceso al medio para redes inalámbricas

En el modelo OSI (Zimmermann, 1980), la capa de enlace de datos codifica y decodifica los datos en tramas de bits. Además proporciona el conocimiento y gestión del protocolo de transmisión, detecta y corrige errores de ser posible, controla el flujo de información y sincronización de trama (Ilyas & Ahmed, 2011). Esta capa a su vez es dividida en dos contrapartes, la subcapa de acceso al medio ("*Media Access Control*" - MAC) y la subcapa de control de enlace lógico ("*Logical Link Control*" - LLC).

Subcapa MAC: Esta subcapa controla la manera en que los nodos de la red ganan el acceso a recibir y transmitir información. Provee direccionamiento físico, así como técnicas de control de acceso que permiten que varios nodos de una red puedan comunicarse entre sí, evitando, o en su defecto disminuyendo la probabilidad de que su información colisione. Por otro lado, esta subcapa también sirve como interface entre la subcapa LLC y la capa PHY y emula un canal lógico de comunicación *full-duplex* en una red multipunto. Este canal puede proveer servicio de comunicación *unicast*, *broadcast* o *multicast* (Ilyas & Ahmed, 2011).

Subcapa LLC: Esta subcapa es la encargada del control de flujo, la detección y corrección de errores y la sincronización a nivel trama. La subcapa LLC es prácticamente la responsable de que exista una comunicación confiable a través del enlace físico (Ilyas & Ahmed, 2011).

Ahora bien, tomando en cuenta el medio de transmisión, las comunicaciones inalámbricas difieren en algunos requerimientos comparadas con las redes cableadas. El protocolo de control de acceso al medio (protocolo MAC) es el encargado de administrar la utilización del medio de transmisión entre una red de varios usuarios (Corral Ignoto & Egea Lopez, 2005). De tal manera que si este protocolo MAC no está bien definido, o no cumple con los requerimientos de la red inalámbrica se pueden generar problemas como colisiones al momento de que más de un usuario requiera transmitir su información.

Debido a que el protocolo MAC juega un papel fundamental en la utilización óptima del medio de transmisión, y por lo tanto tiene un impacto directo en el rendimiento y desempeño de la red entera (Hussain, Sarma, & Saikia, 2014), es necesario diseñar nuevos protocolos o adaptar los ya existentes de manera que puedan cubrir las necesidades de este tipo de redes.

Particularmente el control de acceso al medio en redes inalámbricas presenta diversos retos que deben ser abordados cuidadosamente. Por ejemplo, los mecanismos de detección de colisiones y la resolución de pérdida de paquetes. En la siguiente subsección se detallan los restos más relevantes para los protocolos MAC de redes inalámbricas.

2.2.1 Técnicas de control de acceso al medio

Las técnicas o protocolos de control de acceso al medio pueden estar basados en contención o bien ser libres de contención. A continuación se describen brevemente algunas de las técnicas básicas más comunes.

2.2.1.1 Técnicas basadas en contención

P-ALOHA (“Pure ALOHA”)

Este protocolo de acceso al medio es uno de los pioneros desarrollado en la Universidad de Hawái (Ilyas & Ahmed, 2011), y aunque ya no es muy utilizado es el más simple y fue la base de algunos protocolos existentes. En P-ALOHA, no se requiere de sincronización alguna, en el momento en el que una estación requiere transmitir, simplemente realiza su transmisión. Se puede implementar un procedimiento de retransmisiones en el que si ocurre una colisión y no se recibe un ACK, el nodo espera por un tiempo aleatorio y retransmite su información (S. Chen, 2010). En la Figura 3 se puede observar el comportamiento de P-ALOHA con tres estaciones en la red.

Este protocolo es sencillo de implementar, no requiere de algún tipo de sincronización y su naturaleza le permite ser utilizado para redes de comunicaciones de corta y larga distancia con una topología aleatoria. Sin embargo a medida que se incrementa el número de nodos en la red su rendimiento es disminuido considerablemente debido a su alta probabilidad de colisiones lo cual impacta directamente sobre la eficiencia energética del protocolo.

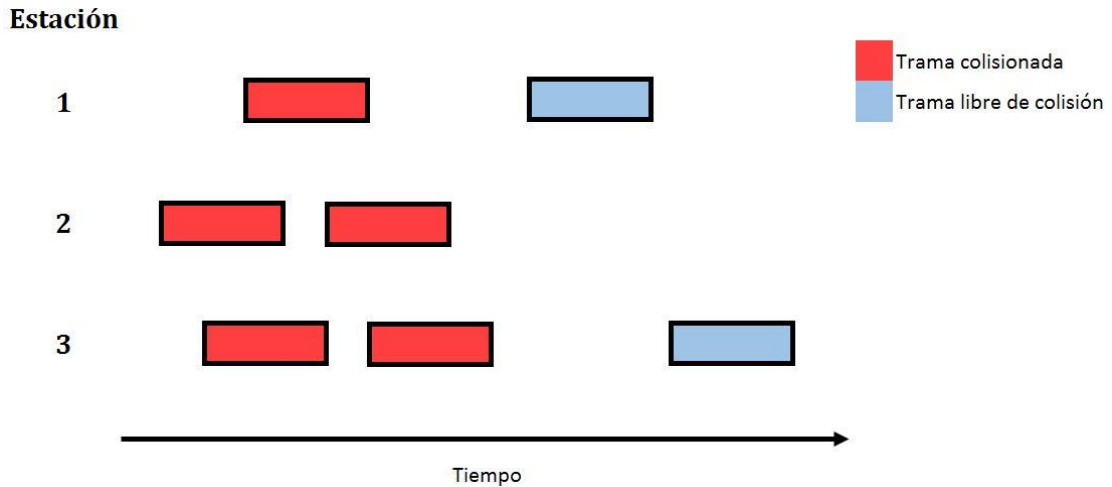


Figura 3. Protocolo P-ALOHA.

S-ALOHA (“Slotted ALOHA”)

Este protocolo es un derivado del P-ALOHA en el que se añaden algunas modificaciones para mejorar su rendimiento. Al igual que P-ALOHA tiene aplicación en sistemas de comunicación satelital. En S-ALOHA, a diferencia de P-ALOHA, el tiempo es dividido en ranuras de igual longitud, la cual corresponde a la duración de un paquete. Dentro de las suposiciones iniciales, se tiene que todos los paquetes tienen el mismo tamaño y los nodos están sincronizados. Las transmisiones sólo se pueden realizar al inicio de las ranuras, de tal manera que si un nodo requiere transmitir a la mitad de una ranura, éste debe esperar hasta la próxima ranura para realizar su transmisión. Debido a ello se reduce la probabilidad de colisión, con lo cual se logra mejorar en un 50% el rendimiento de P-ALOHA (Sánchez García, 2015). En la Figura 4 se ilustra el comportamiento de S-ALOHA en una red con tres estaciones.

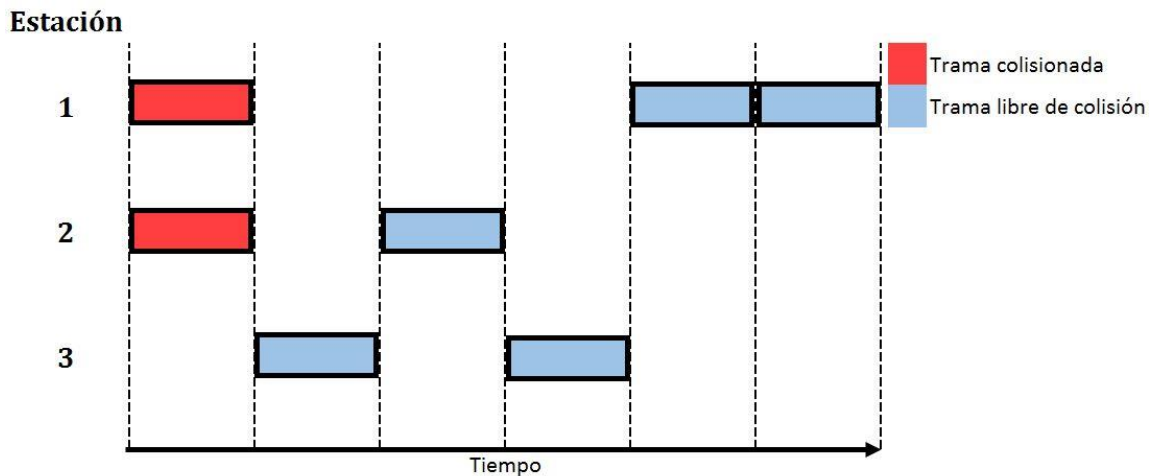


Figura 4. Protocolo S-ALOHA.

En comparación con P-ALOHA, este protocolo presenta un mejor rendimiento y capacidad para que un nodo transmita continuamente a la máxima velocidad del canal (Sánchez García, 2015).

R-ALOHA (“Reservation ALOHA”)

Este protocolo es muy parecido a S-ALOHA pero con la diferencia de que incorpora un esquema de reservación basado en contención con la finalidad de mejorar la eficiencia total del sistema. En R-ALOHA, cuando un nodo transmite exitosamente a través de una ranura se adueña temporalmente de ella. De tal manera que puede transmitir a través de esa ranura todos los paquetes que tenga y al terminar sólo deja de enviar sus datos. Esto deja la ranura que utilizaba como desocupada, de manera que dicha ranura queda disponible para ser reservada por las demás estaciones (Ilyas & Ahmed, 2011).

CSMA/CA (“Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance”)

En esta técnica de acceso se realiza un sensado o detección de portadora junto con un mecanismo de evasión de colisiones. A través del sensado de portadora las estaciones escuchan el medio, es decir, determinan si en el momento en el que requieren transmitir existe alguna otra transmisión en proceso dentro de su alcance, con lo cual se reducen las colisiones dentro de la red. De manera que un nodo únicamente transmite su información cuando detecta libre el canal, de lo contrario espera un periodo aleatorio (determinado por el algoritmo de “*backoff*” utilizado) para volver a intentar realizar una transmisión (Ilyas & Ahmed, 2011).

El sensado del canal es llevado a cabo mediante un procedimiento de evaluación de canal libre (“*Clear Channel Assessment*” – CCA). Este procedimiento puede ser realizado en tres diferentes maneras (Bertocco, Gamba, & Sona, 2008):

- Se asume que el medio está ocupado si el nivel de potencia detectado (“*Received Signal Strength Indicator*” - RSSI) es más alto que un umbral predefinido.
- Se asume que el medio está ocupado si se detecta al menos una señal con características de modulación y esparcimiento.
- Se asume que el medio está ocupado si las dos condiciones anteriores son detectadas.

2.2.1.2 Técnicas libres de contención

TDMA (“Time Division Multiple Access”)

En este método de acceso al canal el tiempo es dividido en un número determinado de ranuras de igual tamaño. Estas ranuras son distribuidas entre los usuarios o nodos de la red, de manera que todos son acomodados en un mismo canal de frecuencia. Cada usuario tiene acceso a todo el ancho de banda disponible durante sus ranuras asignadas. Por lo tanto este esquema asegura una porción de tiempo a cada uno de los miembros de la red para que puedan realizar sus transmisiones (Ilyas & Ahmed, 2011). La Figura 5 ilustra un ejemplo de este esquema en donde se distribuyen las ranuras para 3 usuarios.

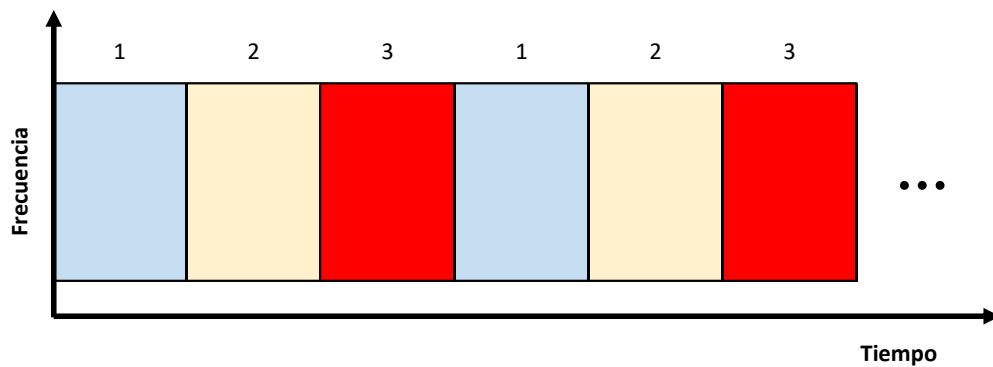


Figura 5. Ejemplo de distribución de ranuras en TDMA.

Por su naturaleza temporal, esta técnica requiere de una fuente de sincronización precisa y de una administración que gestione la asignación y distribución de las ranuras, ya sea que ésta sea dictada por una entidad central o por algún mecanismo autónomo entre los miembros de la red.

FDMA (“Frequency Division Multiple Access”)

En este esquema múltiples usuarios pueden acceder al canal de comunicaciones simultáneamente. El ancho de banda total es dividido en sub-bandas de frecuencia y cada una de ellas es utilizada por un único usuario. De tal manera que cada usuario utiliza la sub-banda para transmitir y/o recibir asignando una porción de ésta para la transmisión y otra para la recepción de información. Con ello se logra tener comunicaciones *full dúplex*. El esquema FDMA permite establecer comunicaciones con una sincronización y coordinación simple y sin interferencias entre usuarios (Ilyas & Ahmed, 2011). En la Figura 6 se muestran las sub-bandas asignadas a tres usuarios utilizando el esquema FDMA.

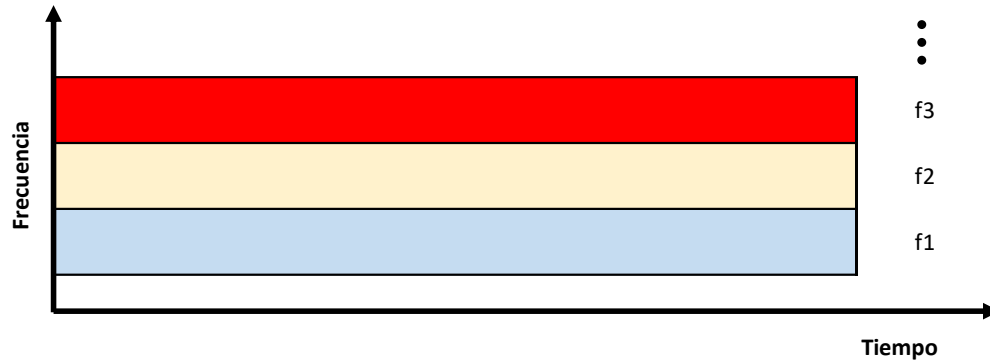


Figura 6. Distribución de sub-bandas de frecuencia en FDMA.

Por otro lado, este esquema presenta un desperdicio de ancho de banda debido que si un usuario está desocupado, su sub-banda asignada no puede ser utilizada por otros usuarios.

Pase de testigo (“Token Passing”)

En un esquema de acceso de pase de testigo o de turno (*token*) cada usuario debe esperar la llegada del *token* para poder realizar sus transmisiones. El poseedor del *token* tiene los permisos para transmitir su información durante todo el tiempo que éste permanezca con él. Usualmente este tiempo es limitado y previamente definido. Luego de realizar sus transmisiones o bien, una vez vencido el tiempo máximo de posesión del *token*, el usuario que lo posee debe enviar un paquete de control que representa el *token* al siguiente usuario. Cuando un usuario que no tiene información por transmitir recibe el *token*, éste debe pasarlo inmediatamente a su sucesor. El *token* es pasado a través de los usuarios de la red formando un anillo virtual.

Aunque cada usuario tiene una porción de tiempo garantizada para transmitir, en el momento en que se tiene información para ser enviada el usuario debe esperar hasta recibir el *token*, lo cual tiene un impacto directo en la latencia de los paquetes. Este tiempo de espera por el *token* depende de diversos factores como el tamaño de la red y de los tiempos de rotación y posesión del mismo.

2.2.2 Clasificación de protocolos de acceso al medio inalámbricos

La clasificación de protocolos MAC a su vez puede realizarse con base en diversos criterios, y dividirse en distintos grupos. De acuerdo a la arquitectura de la red y dependiendo del tipo de control que tenga, los

protocolos MAC se pueden clasificar principalmente en dos grupos: centralizados y distribuidos (Corral Ignoto & Egea Lopez, 2005).

2.2.2.1 Centralizados

En este tipo de arquitectura, existe una entidad central o estación base dentro la red, la cual controla la mayoría de las acciones en cuanto a la repartición del medio se refiere. De tal manera que los problemas relacionados al acceso al medio se concentran en la entidad central. En la Figura 7, se muestra un ejemplo de este tipo de arquitectura en donde la entidad central hace llegar señalización acerca de su acceso al medio a todos los miembros de la red. Generalmente, los nodos tienen acceso de manera ordenada, donde dicho orden es dictado por la estación central, y el acceso es usado con una configuración maestro-esclavo o utilizando turnos (*Tokens*).

Dentro del grupo de protocolos centralizados se pueden encontrar protocolos MAC basados en TDMA, FDMA, CDMA, entre otros.

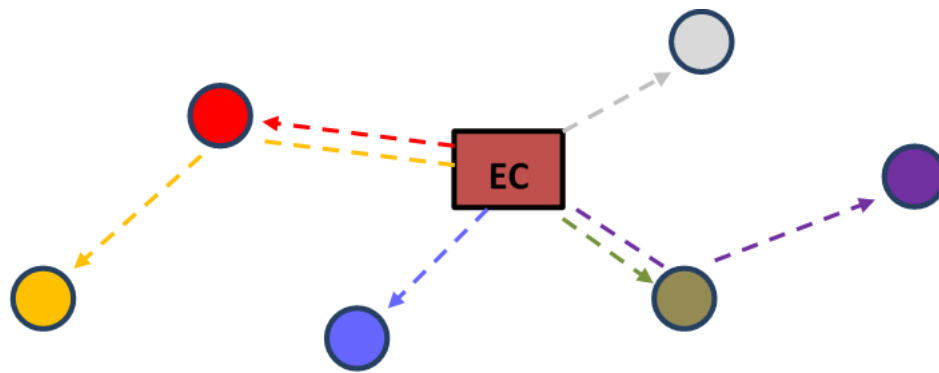


Figura 7. Ejemplo de establecimiento de acceso al medio en protocolos MAC centralizados.

Esta clase de protocolos centralizados es preferible en aquellas aplicaciones que requieran ahorro de energía en las estaciones o nodos de la red (Hernández Ontiveros, 2007). Sin embargo, la entidad central tiene un consumo mayor de energía. Por ejemplo en TDMA, se requiere alta sincronización entre los nodos, lo cual infiere mecanismos más complejos y un consumo extra de energía. Mientras que en FDMA, tiene la desventaja de requerir de un ancho de banda amplio para asignar frecuencias a cada nodo. Por lo que el uso de uno u otro protocolo es específico de la aplicación requerida.

2.2.2.2 Distribuidos

En la arquitectura de red distribuida (descentralizada) no existe una entidad central que controle la manera de acceder al medio de transmisión. Debido a ello en este tipo de arquitectura los protocolos MAC presentan una mayor facilidad de implementación en términos de despliegue de los nodos; además presentan flexibilidad y escalabilidad (Hernández Ontiveros, 2007). En la Figura 8 se muestra un ejemplo de esta arquitectura en donde los nodos, mediante diversos mecanismos implementados por los protocolos MAC, pueden determinar su acceso al medio de manera autónoma.

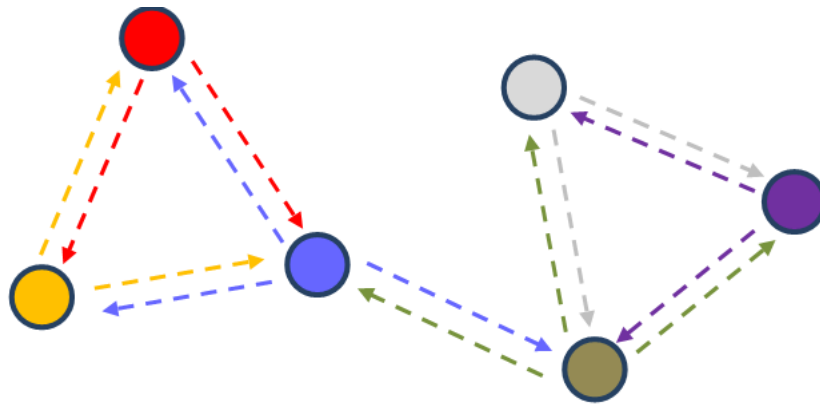


Figura 8. Ejemplo de establecimiento de acceso al medio en protocolos MAC distribuidos.

Uno de los protocolos MAC más populares es el esquema CSMA/CA. En este esquema, los protocolos incorporan el sensado o detección de portadora y la evasión de colisiones. Sin embargo, los protocolos basados en CSMA/CA no son eficientes energéticamente (Gilani, Sarrafi, & Abbaspour, 2013). Esto debido a que son susceptibles a problemas comunes de desperdicio de energía como colisiones, sobre-escucha, sobre-encabezado de control y escucha innecesaria (explicados más adelante en la sección 2.4.1). No obstante se han desarrollado protocolos (basados en CSMA/CA) que abordan el problema del desperdicio de energía.

Por otro lado, además de los protocolos basados en CSMA/CA, dentro de la categoría de protocolos con arquitectura distribuida, se pueden encontrar protocolos MAC auto-organizables basados en TDMA, en los cuales debido a su naturaleza no caen en el desperdicio de energía causado por colisiones.

2.2.3 Retos para los protocolos de acceso al medio en redes inalámbricas

En los sistemas de comunicación inalámbrica existe una serie de condiciones propias del canal que, entre otras afectaciones, provocan variaciones de potencia en las señales. Esto hace que en el medio inalámbrico se tengan tasas de error de bit ("*Bit Error Rate*" – BER) con valores de 10^{-3} o superiores (Corral Ignoto & Egea Lopez, 2005). De tal manera que los protocolos añaden herramientas que ayuden a solventar los errores en ráfaga y pérdida de paquetes, tal es el caso de códigos FEC ("*Forward Error Correction*") y métodos de retransmisión de paquetes ("*Acknowledgment*" – ACK).

Aunado a lo anteriormente mencionado, debido a las particularidades de las redes inalámbricas, se puede presentar una serie de problemáticas relacionadas a la repartición del uso del medio de transmisión. Dentro de los problemas más habituales se encuentran los de *nodo oculto* y el *nodo expuesto*.

Problema del nodo oculto: En este problema una estación cree que el canal está libre, sin embargo se encuentra ocupado por otro nodo que no está dentro de su cobertura. En la Figura 9 se puede observar que tanto la estación A como la estación C no tienen manera de saber la existencia una de la otra tomando en cuenta el alcance de sus radios. De tal manera que en un acceso al medio basado en contención, si la estación A desea transmitir datos hacia la estación B al mismo tiempo que la estación C y la estación B no está transmitiendo, tanto A como C encuentran libre el canal, lo que ocasiona la colisión de la información en el receptor (estación B). Un mecanismo que ayuda a solventar este problema hasta cierto punto, es el intercambio de mensajes RTC/CTS ("*Request to Send/ Clear to Send*"), en el cual una estación primero pregunta a su estación receptora si puede iniciar una transmisión, y debe esperar la respuesta afirmativa antes de proceder.

Problema del nodo expuesto: En este problema una estación cree que el canal está ocupado, pero en realidad se encuentra libre, ya que la estación a la que escucha no le interferiría. En este caso, en la Figura 9, suponiendo que la estación B está transmitiendo información hacia la estación C, la estación A al escuchar la transmisión de B, establece el canal como ocupado. Sin embargo, la estación A pudiera transmitir información hacia la estación D sin causar ni sufrir interferencias, y de esta manera no desaprovechar el canal de transmisión.

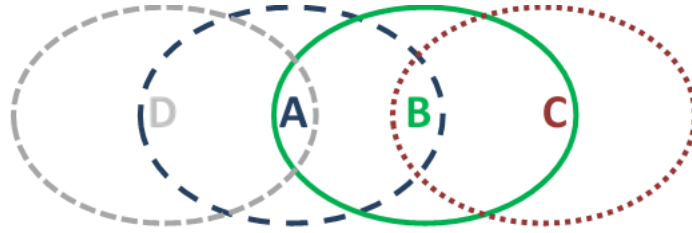


Figura 9. Esquema de ilustración del problema del nodo oculto y nodo expuesto.

2.2.4 Métricas de rendimiento

Como se ha mencionado anteriormente, existen varios inconvenientes presentes en las redes inalámbricas que deben ser solventados por los protocolos del sistema de comunicación. Para el caso específico del protocolo MAC, que es en el que centra el presente proyecto, existen una serie de métricas o parámetros que permiten determinar la eficacia de un protocolo MAC ante las diversas problemáticas que pudiera enfrentar. Sin embargo, estos parámetros no son un estándar definido, ya que la medida del rendimiento de cierto protocolo depende también de la aplicación específica en cuestión.

A continuación se mencionan algunas de las métricas más destacables por su uso en diversas aplicaciones (Corral Ignoto & Egea Lopez, 2005):

Equidad: Este parámetro refleja la habilidad de las estaciones o nodos de compartir el canal de transmisión equitativamente. De tal manera que si no existen prioridades de transmisión, un protocolo equitativo logra que todos los miembros de la red tengan la misma probabilidad de ocupar el canal.

Estabilidad: Un protocolo debe tratar que el funcionamiento de la red en general prevalezca lo más estable posible manteniendo parámetros de calidad en buenos niveles, aun cuando existan muchas o pocas estaciones transmisoras.

Escalabilidad: Este parámetro señala la habilidad del protocolo para reaccionar y adaptarse sin perder calidad conforme el número de usuarios crece.

Retardo de acceso al medio: Esta métrica proporciona el tiempo que transcurre desde que el paquete de datos accede a la capa de enlace de datos hasta que se transmite completamente. Este tiempo está ligado directamente con la carga de tráfico y el tipo de protocolo MAC utilizado.

Caudal eficaz (“Throughput”): Este parámetro indica la cantidad de datos transmitidos de manera exitosa entre un transmisor y un receptor en un tiempo determinado. Aunque depende de la aplicación, en la mayoría de los casos, uno de los objetivos del protocolo MAC es maximizar este parámetro.

Consumo de potencia: Los protocolos MAC deben tener muy en cuenta este parámetro, ya que en la mayoría de los casos, los dispositivos inalámbricos de una red se caracterizan por disponer de baterías limitadas.

Latencia: Existen varias definiciones para este parámetro, pudiéndose referir a cualquier tipo de periodos de inactividad y retrasos producidos durante la transmisión de paquetes de datos (Anónimo, 2016), demora en la entrega de información punto a punto (Ferrer-Roca, 2001), retardo promedio desde el instante en que llega un paquete a la capa MAC hasta que dicho paquete es transmitido (E E Johnson & Balakrishnan, 2003), cantidad de tiempo que tarda un paquete en viajar desde el origen hasta el destino (“Latency, Delay, Tiempo de Latencia”, 2016), entre otras. Para efectos del presente trabajo, se referirá a la latencia de acuerdo a la última definición.

Debido a la aplicación que aborda el presente trabajo de tesis, en la que se pretende una comunicación de largo alcance entre boyas, se realiza un estudio enfocado especialmente a los protocolos de las redes inalámbricas de larga distancia en modalidad ad-hoc. Además, los protocolos de redes inalámbricas de sensores (“Wireless Sensor Network” – WSN) también caben dentro de la investigación, ya que la red de boyas pretendida presenta características de las WSN pero con un mayor alcance por parte de los nodos de la red.

2.3 Redes inalámbricas ad-hoc de larga distancia (RIALD)

Como se mencionó anteriormente, las redes inalámbricas están clasificadas de acuerdo a su alcance. Generalmente, una red inalámbrica local puede ser más que suficiente para las aplicaciones más comunes de los usuarios, ya sea para la casa, la oficina, la cafetería, un hotel, etc. Sin embargo, existen aplicaciones en donde se requiere escalar el alcance de la comunicación, como es el caso de la aplicación que se busca en el actual proyecto de tesis.

En una parte del proyecto, como se mencionó en el Capítulo 1, se pretende realizar un diseño de un protocolo MAC para una red de boyas separadas por largas distancias en modalidad de red ad-hoc. Por lo

tanto, resulta necesario hacer una recopilación e investigación de los diversos protocolos MAC utilizados actualmente para comunicaciones terrestres y marítimas de larga distancia.

2.3.1 Control de acceso al medio para RIALD

Existe una gran variedad de protocolos de acceso al medio desarrollados para diversas aplicaciones. Para el caso de comunicaciones a larga distancia, en (Hussain et al., 2014) se menciona que varios resultados de investigación muestran que la utilización de WiFi bajo el estándar IEEE 802.11 b/g es viable para comunicaciones a larga distancia, además de ser atractivo y económicamente factible debido a su operación sobre la bandas libres de la ISM y a la existencia de hardware IEEE 802.11 a bajo costo. En las redes propuestas se menciona un alcance de decenas de kilómetros haciendo uso de protocolos MAC basados en TDMA. Sin embargo, se manejan enlaces WiFi punto a punto (P2P) establecidos con antenas directivas de alta ganancia. Lo cual no resulta viable para la red de boyas pretendida en el presente proyecto de tesis, debido al movimiento del mar y a otros factores que imposibilitan el uso de antenas directivas sobre las boyas.

Por otro lado, los sistemas de comunicación marítima suelen utilizar radios con antenas omnidireccionales sobre la banda de alta frecuencia (*“High Frequency”* – HF) y muy alta frecuencia (*“Very High Frequency”*) debido a que las señales se pueden propagar potencialmente sobre muy largas distancias dependiendo de la estrategia de propagación utilizada (*skywave, surface wave* o *Near-Vertical incidence*). Para estos sistemas de comunicación con estas tecnologías, también existen diversas técnicas de acceso al medio desarrolladas. A continuación se muestra la investigación realizada sobre protocolos MAC aplicados en sistemas de comunicaciones a larga distancia tanto sobre la superficie del mar como en zonas terrestres.

2.3.1.1 WTRP (*“Wireless Token Ring Protocol”*)

En (Ergen, Lee, Puri, Varaiya, & Tripakis, 2002) se menciona que es un protocolo derivado del estándar IEEE 802.4 (*Token Bus*) y desarrollado para aplicaciones móviles inalámbricas como vehículos aéreos o grupos navales. Se maneja una topología *token ring* en modalidad de red ad-hoc como se muestra en la Figura 10. Todos los miembros de la red tienen una tabla de conectividad, la cual contiene a todos los nodos de la red y el orden en el que el *token* los visita, tomando en cuenta que dicho *token* viaja en una sola dirección a lo largo del anillo.

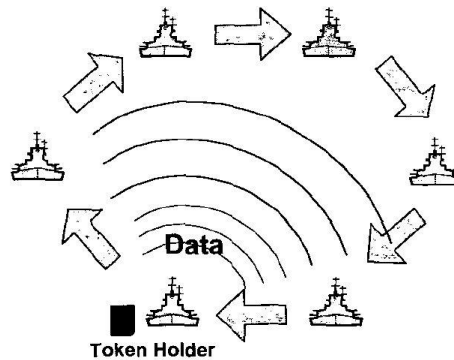


Figura 10. Topología con pase de testigo del protocolo WTRP (E. Johnson & Tang, 2003).

Un nodo puede realizar transmisiones únicamente cuando ha recibido el *token*, y debe pasarlo cuando haya terminado dicha transmisión. Cada nodo conoce la dirección de su predecesor y de su sucesor, para los nodos que abandonan el anillo WTRP hace uso de paquetes *SET_SUCCESOR*, mientras que para añadir nuevos nodos se usan los *SOLICIT_SUCCESOR*. En el caso de que se falle la comunicación entre dos nodos debido a la caída del enlace, uno de los nodos busca en la tabla al sucesor del nodo fallido y envía un paquete *SET_PREDECESSOR* hacia el nuevo sucesor. En la Figura 11 se observan los tiempos de transmisión para una red con N nodos (PROP es el tiempo de propagación de la señal). El nodo o estación 1 transmite durante el tiempo T_1 al recibir el token, y si le sobra tiempo envía paquetes de invitación para la adición de nuevos nodos a la red, luego de ello pasa el token a la estación 2.

En este tipo de redes en las que se utiliza un *token*, éste se puede perder en su transcurso a través de la red debido a diversas razones como la caída de enlaces. Para este problema de “pérdida de *token*”, WTRP implementa temporizadores en los nodos, con lo que cada miembro de la red tiene un tiempo límite de espera del *token* (“*Maximum Token Rotation Time*” - MTRT). De tal manera que si la estación detecta que se sobrepasa este límite, realiza la creación de un nuevo *token*. Sin embargo esta solución puede llevar a la existencia de *token* duplicados, para lo cual WTRP añade la prioridad del *token*, la cual es calculada en base a la dirección del anillo al que pertenece y al campo de generación de número de secuencia del *token*. De tal manera que cada nodo almacena la prioridad del *token* que más recientemente ha creado o aceptado, y elimina cualquier *token* que reciba debajo de esta prioridad.

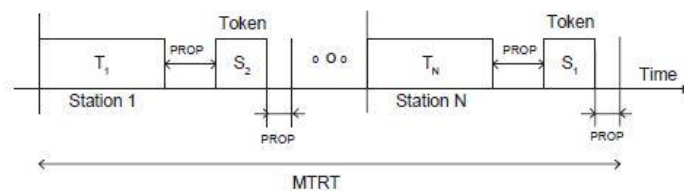


Figura 11. Diagrama de tiempo para WTRP (Ergen et al., 2002).

Dentro de las ventajas que tiene este protocolo se encuentran el compartimiento justo del ancho de banda entre los miembros de la red, tiene pronta recuperación ante fallas de conexión, permite la entrada y salida de nodos y presenta un retardo de paquetes limitado. Por otro lado, si se pierde un enlace se podría generar la falla de toda la red, se presenta interferencia entre anillos usando el mismo canal y además si un nodo es excluido, debe esperar un tiempo ilimitado para reintegrarse a la red.

2.3.1.2 HFTP (“High Frequency Token Protocol”)

En (E. Johnson & Tang, 2003) se define que HFTP es un protocolo basado en WTRP, diseñado para aplicaciones de red navales de HF sobre la superficie del mar en donde se requiere alto rendimiento, justicia entre los nodos y tiempos de acceso limitado. Al igual que WTRP se maneja dentro de una topología de anillo con pase de testigo en la modalidad de red ad-hoc, sin embargo, en HFTP se añaden dos nuevos mecanismos: retransmisión del *token* (“Token Relying”) y fusión de anillos (“Merging Rings”).

El mecanismo de retransmisión del *token* se muestra en la Figura 12. A diferencia de WTRP, un nodo A en lugar de excluir a su sucesor (nodo B) con el que ha perdido conectividad, busca otro camino para llegar hacia él. Inicialmente, se realiza una búsqueda de un nodo que si tenga conectividad con el sucesor fallido, de tal manera que éste pueda retransmitir el *token* por parte del nodo A. Para ello el nodo A envía un paquete *SOLICIT_RELAY*, el cual contiene la lista de los nodos de la red copiada de su tabla de conectividad. Los nodos que escuchan dicha transmisión responden con un indicador que informa si ha escuchado al nodo fallido en la última rotación del *token*. El nodo A selecciona como nodo retransmisor a aquel con la primera respuesta positiva (nodo C). Posteriormente, el nodo A transmite un *RELAY_TOKEN* hacia el nodo C, quien a su vez envía un *token* normal al nodo B para luego seguir con el funcionamiento normal de la red.

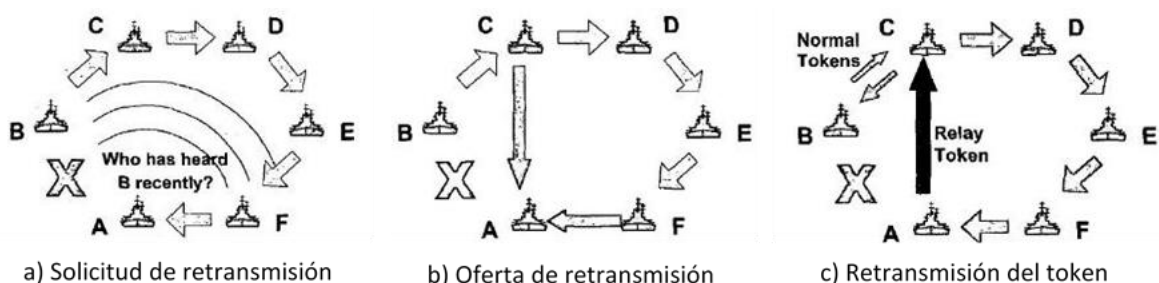


Figura 12. Mecanismo de retransmisión del token en HFTP (E. Johnson & Tang, 2003).

El mecanismo de fusión de anillos se añade para atacar el problema de interferencia entre anillos cercanos operando en el mismo canal de frecuencia. Para este mecanismo, cualquier nodo que escuche una transmisión proveniente de un anillo extranjero cuya prioridad de *token* sea más alta que la del *token* de su anillo, entra en un estado denominado “fusión requerida”. En la Figura 13 se ilustra el procedimiento de fusión de anillos. Cuando el nodo F recibe el *token* de su anillo comienza a transmitir paquetes *MERGE_RING* al nodo extranjero A, hasta que éste reconozca la fusión. Los paquetes *MERGE_RING* contienen información de identificación del sucesor (nodo D) de quien envía la petición de fusión (nodo F). De tal manera que el nodo A acepta la fusión y establece como predecesor al nodo F y envía un paquete *SET_SUCCESOR* a su antiguo predecesor indicándole su nuevo sucesor, en este caso el nodo D.

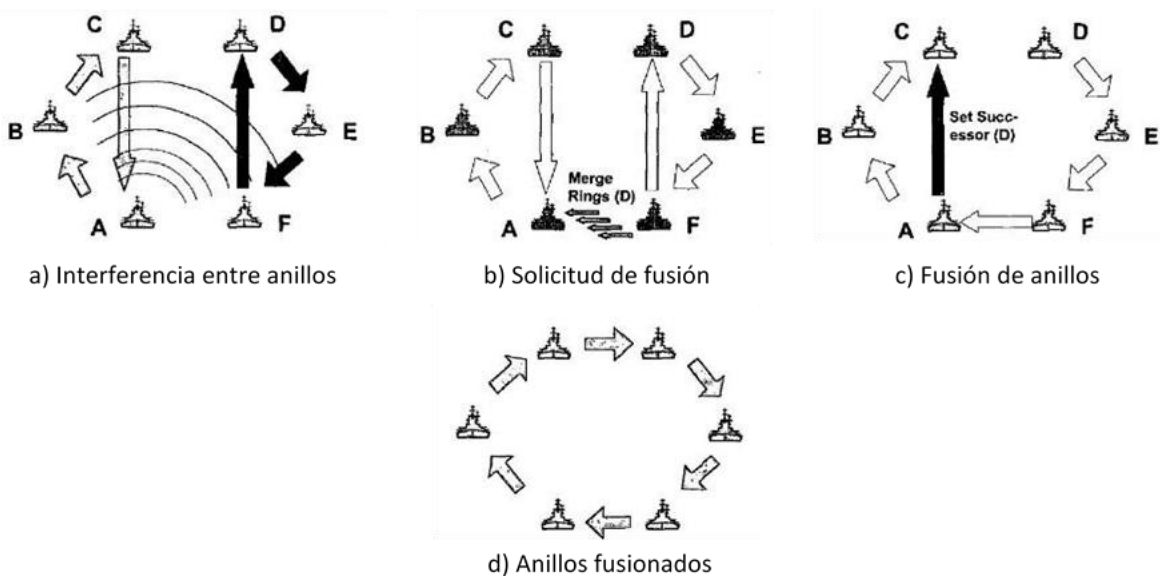


Figura 13. Mecanismo de fusión de anillos en HFTP (E. Johnson & Tang, 2003).

Finalmente, cuando el nodo F recibe el reconocimiento de fusión de anillos envía un paquete especial *DOUBLE_TIME_TOKEN* a su actual sucesor (nodo A). Este paquete desautoriza la transmisión de datos y debe ser pasada rápidamente entre todos los nodos. Cuando el *DOUBLE_TIME_TOKEN* da la vuelta y regresa al nodo que lo creó, se convierte en un *token* normal.

Las ventajas que presenta este protocolo, en adición a las de WTRP, son las soluciones que proporciona para los problemas de interferencia entre anillos y la inclusión en retener a todos los nodos alcanzables. Sin embargo, el mecanismo de fusión de anillos provoca el incremento de los tiempos de rotación del *token*, lo cual a su vez eleva el retardo de las transmisiones. Aunado a ello, la localización de un nodo retransmisor del *token* implica de igual manera un tiempo extra.

2.3.1.3 HF Token-Passing

Este protocolo es definido por (Eric E Johnson, 2006) y tiene la misma aplicación que HFTP, sin embargo la topología que adquieren los nodos dentro de la red es distinta. En *HF Token-Passing* los miembros de la red se encuentran bajo una topología de malla inalámbrica de anillos con pase de testigo (*HF Token Mesh*) tal y como se muestra en la Figura 14. El funcionamiento del protocolo es igual al de HFTP siguiendo las mismas reglas de los protocolos con pase de testigo en donde un nodo sólo puede transmitir cuando tiene el *token* y únicamente por un tiempo máximo predefinido. La diferencia de *HF Token-Passing*, además de la topología, radica en que se considera que todos los nodos de un anillo tienen alcance entre ellos, por lo que las retransmisiones ("*relaying*") sólo se da entre anillos. Para evitar la interferencia entre anillos adyacentes, cada uno opera en una frecuencia distinta. Por lo tanto se asume que cada nodo perteneciente a más de un anillo, tiene un radio por separado para cada uno de esos anillos.

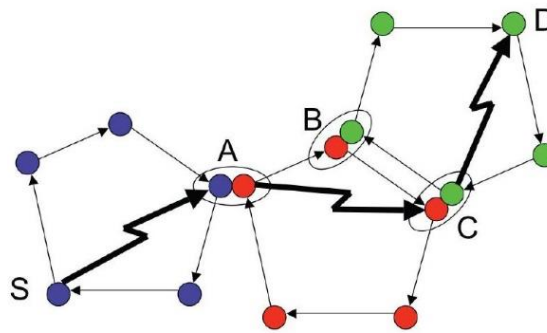


Figura 14. Retransmisión de un mensaje en una red HF Token Mesh (Eric E Johnson, 2006).

En la Figura 14 se muestra la manera en que se realiza la retransmisión entre anillos. El nodo S requiere hacer una transmisión que tiene como destino el nodo D, por lo que cada que recibe el *token* del anillo azul, transmite hacia el nodo A (nodo enlace entre anillos azul y rojo). El nodo A almacena en búffer dicho tráfico, para posteriormente transmitirlo al nodo C al recibir el *token* del anillo rojo. Finalmente, el nodo C retransmite el tráfico hacia su destino al recibir el *token* del anillo verde.

Tomando en cuenta una transmisión de flujo constante, el retardo desde el primer bit que se entrega a la fuente hasta que llega a su destino es ilustrado en la Figura 15. El último bit transmitido es producido en la fuente justo antes de que termine el tiempo máximo de transmisión para el nodo, y llega a su destino después de un tiempo de procesado en el transmisor y receptor (*turnaround time*) más el retardo de propagación. El máximo rendimiento disponible para un único flujo de tráfico que se transmite a través de

varios anillos está en función del número de nodos y de la tasa del anillo con el cuello de botella, es decir, del anillo que maneje la menor tasa de transmisión.

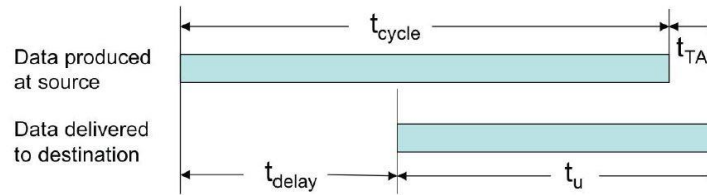


Figura 15. Retardo en HF Token-Passing para un solo anillo (Eric E Johnson, 2006).

En comparación con HFTP, este protocolo presenta la ventaja de que se tiene menor probabilidad de falla en la red, debido a que todos los nodos dentro de un anillo tienen alcance con todos los demás miembros del anillo. Además no se tiene interferencia entre anillos adyacentes debido al uso de diferentes frecuencias en cada uno de ellos. Sin embargo, esto implica que se requiere del uso de múltiples radios en aquellos nodos que pertenezcan a más de un anillo. Por otro lado, el hecho de que todos los nodos de un anillo tengan alcance entre ellos, implica una reducción del área que puede cubrir un anillo en aplicaciones de monitoreo.

2.3.1.4 HF ALE (CSMA)

HF ALE (*HF Automatic Link Establishment*) implementa un protocolo descrito en (Eric E Johnson, 2006) basado en contienda bajo la premisa de escuchar antes de transmitir. Cada nodo debe realizar una detección de energía o de portadora antes de realizar una transmisión para determinar si el canal está libre, además tiene implementado un procedimiento de retransmisión, por lo que se hace uso de ACK's (*Acknowledgments*).

ALE es un método que permite encontrar y usar las mejores frecuencias para un enlace punto a punto en comunicaciones que utilizan la ionosfera para refractar las ondas de radio de nuevo hacia la tierra. Esto debido a que existe una ventana de frecuencias específica utilizable para este tipo de comunicaciones, la cual varía dependiendo de la situación climatológica del día, la temporada del año, la ubicación del enlace, entre otras.

Las redes HF ALE tienen aplicación en redes navales superficiales en donde se requieren comunicaciones de largo alcance que van desde las decenas hasta los miles de kilómetros. Debido a ello, no se presenta una topología definida dando la oportunidad a los nodos de posicionarse libremente como se muestra en la Figura 16.

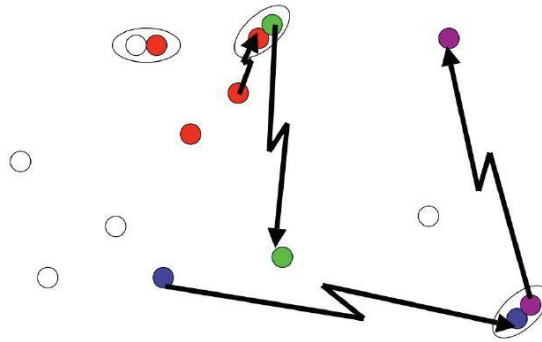


Figura 16. Red HF ALE con CSMA (Eric E Johnson, 2006).

En este tipo de redes se tiene la ventaja de que los nodos no se encuentran en una topología tan rígida y pueden obtener comunicaciones de muy larga distancia. Sin embargo esto requiere de la implementación de la tecnología ALE, la cual realiza variaciones en las frecuencias de transmisión. Esto último implica que cada radio transmisor debe poseer un radio que tenga capacidades que le permitan mudar la frecuencia de operación y el modo de transmisión en un momento dado.

2.3.1.5 SO-TDMA (*“Self-Organizing TDMA”*)

En (Yun & Lim, 2012) se menciona que este protocolo fue diseñado para usarse en sistemas de comunicación sobre la banda de VHF para los sistemas de identificación Automática (*“Automatic Identification System”* - AIS). No se establece una topología específica para el despliegue de la red, ya que está pensado para la comunicación de naves marinas móviles cerca de la costa. En cuanto a su funcionamiento, en SO-TDMA el tiempo se divide en tramas de 1 minuto de duración, y cada una de ellas es dividida a su vez en 2,250 ranuras. La trama es globalmente fija, y los barcos u otras entidades marinas se sincronizan a ella mediante el uso de su GPS (*“Global Positioning System”*).

El protocolo está conformado en 4 fases: fase inicial, fase de entrada a la red, fase de primera-trama y fase de operación continua. En su fase inicial, el nodo escucha el canal durante una trama completa para determinar las ranuras que se encuentran desocupadas. Entre las ranuras desocupadas, se seleccionan las ranuras nominales de transmisión (*“Nominal Transmission Slots”* - NTSs), a través de las cuales el nodo

realizará sus transmisiones. En la segunda fase, después de haber determinado las NTSs, el nodo es capaz de unirse a la red mediante la transmisión de sus datos a través de la primera NTS. A estas ranuras iniciales se les denomina ranuras de inicio nominales (“Nominal Start Slots” – NSSs) y son seleccionadas aleatoriamente. La selección de las ranuras posteriores a la NSS se realiza en base a otros parámetros, al incremento nominal (“Nominal Increment” – NIs) y a los intervalos de selección (“Selection Intervals” – SIs). El NI se refiere a los periodos específicos entre las NTSs disponibles, y son obtenidos dividiendo el número de ranuras de cada trama entre el número de NTSs por trama deseadas (*report rate*). Los SIs son los intervalos entre los cuales se puede seleccionar una ranura nominal para transmitir (“Nominal Slot” – NS), y son calculados como $0.2 \times NI$.

En la fase de primera-trama, el nodo selecciona el resto de las NSs para posteriormente elegir otra NTS de las ranuras desocupadas que se encuentren dentro del SI, y transmitir datos en dicha ranura. Las NTSs restantes dentro de la trama son determinadas por el “*report rate*”, y de existir algún cambio en éste durante cualquier fase, el nodo regresa a la fase de entrada a la red. Finalmente, en la fase de operación continua, los nodos mantienen sus transmisiones en las NTSs determinadas en las fases previas. Con la finalidad de evitar colisiones en el receptor debido a la movilidad de los nodos, durante la fase de primera-trama se selecciona un entero aleatorio, el cual corresponderá al número de tramas en las que una NTS puede ser usada en la fase de operación continua. Por lo que luego de dicho número de tramas, se debe seleccionar otra NTS dentro del mismo SI. En la Figura 17 se ilustra la descripción de la trama para este protocolo.

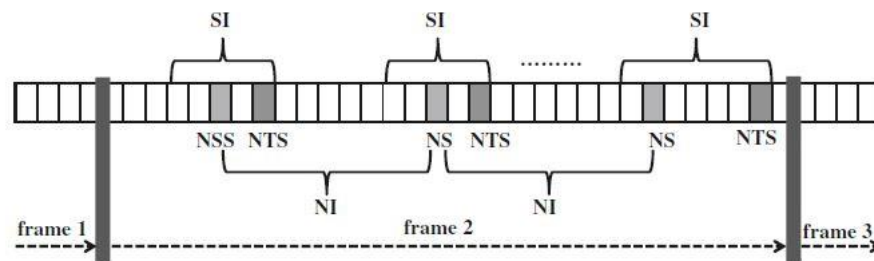


Figura 17. Descripción de la trama de SO-TDMA (Yun & Lim, 2012).

SO-TDMA tiene la ventaja de ser un protocolo diseñado para ambientes marítimos sacando provecho de las bondades del esquema de acceso múltiple por división de tiempo. Por otro lado, fue diseñado para comunicaciones que involucran un solo salto entre un barco y una estación base colocada en la costa. No se considera la modalidad ad-hoc para la red en la que se implemente, lo cual implica que no se pueden establecer comunicaciones multisalto que permitan un mayor alcance por parte de los nodos de la red. Además presenta el problema del nodo oculto sin resolver.

2.3.1.6 CS-TDMA (“Carrier Sensing TDMA”)

Este protocolo es una variante de SO-TDMA también mencionado en (Yun & Lim, 2012), y de igual manera trabaja sobre la banda de VHF y comparte la misma aplicación de comunicación marítima para el envío de poca información. El funcionamiento de CS-TDMA es muy similar al de SO-TDMA, sin embargo difieren en la reservación de ranuras y los intervalos de reporte. En la Figura 18 se muestra la descripción de la trama de este protocolo, en donde los periodos candidatos (“Candidate Periods” - CPs) corresponden a las NTSs de SO-TDMA, los intervalos de reporte (“Report Intervals” - RIs) son el “report rate”, los tiempos nominales de transmisión (“Nominal Transmission Times” – NTTs) corresponden a los NSSs y los intervalos de transmisión (“Transmission Intervals” – TIs) son los SIs, pero obtenidos como $RI/3$.

En la fase inicial, el nodo determina las ranuras desocupadas mediante el chequeo del umbral de detección de portadora (*Carrier Sensing*). Si la potencia de la señal excede el umbral, el nodo considera la ranura como ocupada. En la fase de entrada a la red, el barco selecciona de manera aleatoria los NTTs y define el TI alrededor de cada NTT. Durante estos intervalos se debe elegir un CP y transmitir datos a través de él. Posteriormente en la fase de primera trama, a diferencia de SO-TDMA que únicamente selecciona una NTS, en CS-TDMA se seleccionan 10 CPs y se envía información a través de ellos, con lo que se logra un mayor uso de la trama en comparación con SO-TDMA. En la fase de operación continua, ambos protocolos funcionan prácticamente con la misma metodología.

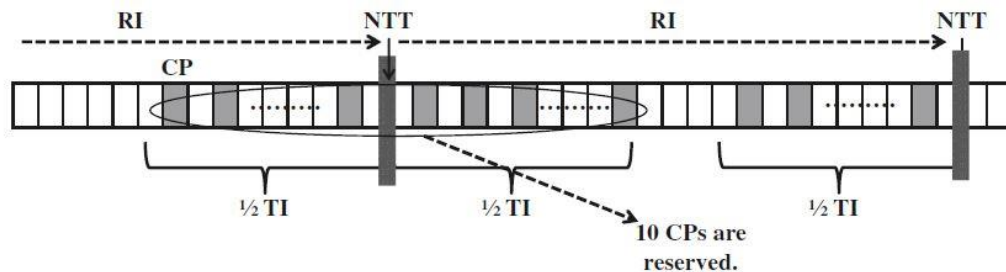


Figura 18. Descripción de la trama de CS-TDMA (Yun & Lim, 2012).

Este protocolo comparte las ventajas de SO-TDMA, y añade una mejor utilización de la trama con lo que habilita la posibilidad de incrementar las tasas de transmisión. Al igual que SO-TDMA, este protocolo está definido únicamente para comunicaciones de un solo salto hacia una estación costera.

2.3.1.7 ASO-TDMA (“Ad-hoc Self-Organizing TDMA”)

Este protocolo fue diseñado por (Yun & Lim, 2012) para ser implementado en sistemas de comunicación marítimos sobre la banda de VHF con la finalidad de proveer de servicios multimedia a entidades o naves

marítimas. El despliegue de la red se especifica en la modalidad ad-hoc y sobre una topología no fija, es decir, considerando movilidad para los miembros de misma. En la Figura 19 se ilustra la arquitectura de una SANET ("Shipborne Ad-hoc Network") en la cual está pensado el funcionamiento de este protocolo.

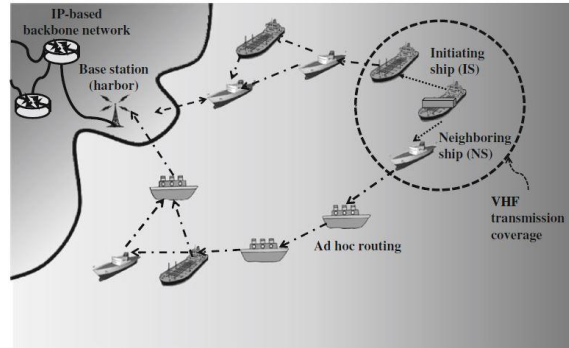


Figura 19. Arquitectura SANET considerada para ASO-TDMA (Yun & Lim, 2012).

En ASO-TDMA se define un esquema de acuerdo a la localización de cada nave, de tal manera que el espacio en el que se encuentran los miembros de la red se divide en áreas más pequeñas denominadas saltos. Esta división se realiza a partir de la estación base ubicada en la costa, por lo que el salto 1 es el más cercano a ella. Al igual que en los protocolos SO-TDMA y CS-TDMA, se define una trama globalmente fija, a la cual todos los nodos se sincronizan con ayuda de su GPS. Cada trama es dividida en subtramas, y el número de subtramas corresponde el número de saltos en la red. El número de ranuras en una trama (NAf) depende directamente del ambiente en el que la red se encuentre tomando en cuenta factores como la densidad regional de barcos y las rutas de navegación. El número total de ranuras en una trama se divide para cada una de las subtramas, de manera que a la subtrama que corresponde al salto más cercano a la costa se le asigna un mayor número de ranuras. Esto debido a que los barcos generalmente se encuentran cerca de la costa. En la Figura 20 se muestra el formato de la trama para ASO-TDMA.

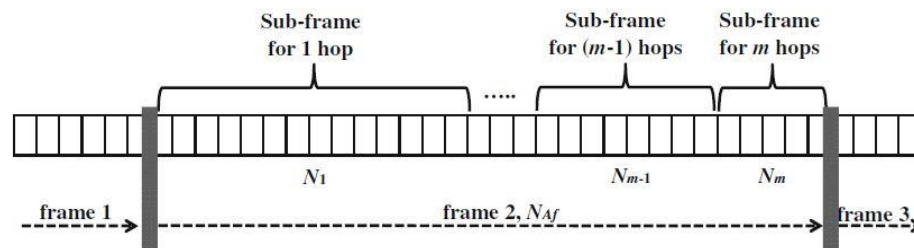


Figura 20. Descripción de la trama de ASO-TDMA (Yun & Lim, 2012).

El protocolo está conformado de varias fases, la fase de inicialización, la fase de entrada a la red y la fase de transmisión de datos. En la primera de ellas, el barco determina el salto en el que se encuentra con

respecto a la estación base ubicada en la costa. Posteriormente, escanea una trama completa para localizar las ranuras que se encuentran desocupadas y checar si existen nodos vecinos. De tal manera que si no se encuentra un nodo vecino en la trama que se escanea actualmente, el barco reinicia esta fase en la próxima trama. Por el contrario, si lo encuentra determina las ranuras disponibles (*“Available Time Slots”* – ATs) para transmitir datos (como las NTs en SO-TDMA). La selección de las ATs para un barco sigue un conjunto de reglas con el que se combaten las colisiones. Estas reglas especifican que los nodos sólo pueden transmitir datos a través de las ranuras asignadas a la subtrama de su salto correspondiente. Sin embargo, con la finalidad de obtener un mejor aprovechamiento de la trama, ASO-TDMA incluye un procedimiento en el cual varios nodos pueden transmitir a través del mismo conjunto de ranuras, siempre y cuando se encuentren lo suficientemente distanciados como para que su información no colisione. Las subtramas en las que un nodo podría transmitir de acuerdo a su salto se definen en la ecuación (1).

$$SF = \begin{cases} k \\ k - 3l, & 0 < l \leq \left\lfloor \frac{k}{3} \right\rfloor \\ k + 3l, & 0 < l \leq \left\lfloor \frac{m-k}{3} \right\rfloor \end{cases} \quad (1)$$

Donde m es el número de subtramas, k es el salto en el que el nodo se encuentra y l es un entero positivo.

En la fase de entrada a la red, un barco se une a la red mediante la transmisión de cualquier paquete a través de todas las ATs. Finalmente en la fase de transmisión de datos, prácticamente se repiten las acciones de las dos fases anteriores. Esto debido a la movilidad que experimentan los barcos a lo largo de la red, por lo que deben estar continuamente determinando su salto y las ATs disponibles. Si el barco ya no requiere de realizar transmisiones, éste informa a sus nodos vecinos de la liberación de sus ATs.

Este protocolo presenta la ventaja de tener soporte para comunicaciones multisalto en redes en modalidad ad-hoc. Además brinda servicios multimedia, video *streaming* o incluso acceso a internet, y reduce la tasa de colisiones en el receptor. Sin embargo, estos servicios resultan sobrados para aplicaciones de monitoreo marítimo en donde se requiere transmitir una baja tasa de datos. Por otro lado, debido a que el protocolo fue diseñado para ser utilizado principalmente por barcos, no se hace hincapié en implementar técnicas de ahorro de energía.

2.3.1.8 Cognitive Mesh MAC

Este protocolo es definido en (Zhou & Harada, 2012) en donde se menciona que tiene aplicación en redes inalámbricas marítimas cognitivas prestando servicios de alta velocidad a bajo costo. La topología de red para la que está pensado este protocolo es una malla en modalidad ad-hoc. Cognitive Mesh MAC está basado en el protocolo de acceso al medio del estándar IEEE 802.16d Mesh, al cual le añade funciones de radio cognitivo. En este caso el radio cognitivo se refiere a la tecnología que permite utilizar oportunísticamente las frecuencias licenciadas que no son utilizadas en el mar.

La trama original de IEEE 802.16d Mesh está conformada por una subtrama de control y una de datos. Para Cognitive Mesh MAC la subtrama de control se mantiene igual, pero para la subtrama de datos se inserta un periodo de sensado cada K subtramas. Lo anterior con la finalidad de obtener un mejor desempeño de la red mediante el incremento de la probabilidad de detección y del periodo de sensado. La estructura de la trama de Cognitive Mesh MAC se muestra en la Figura 21.

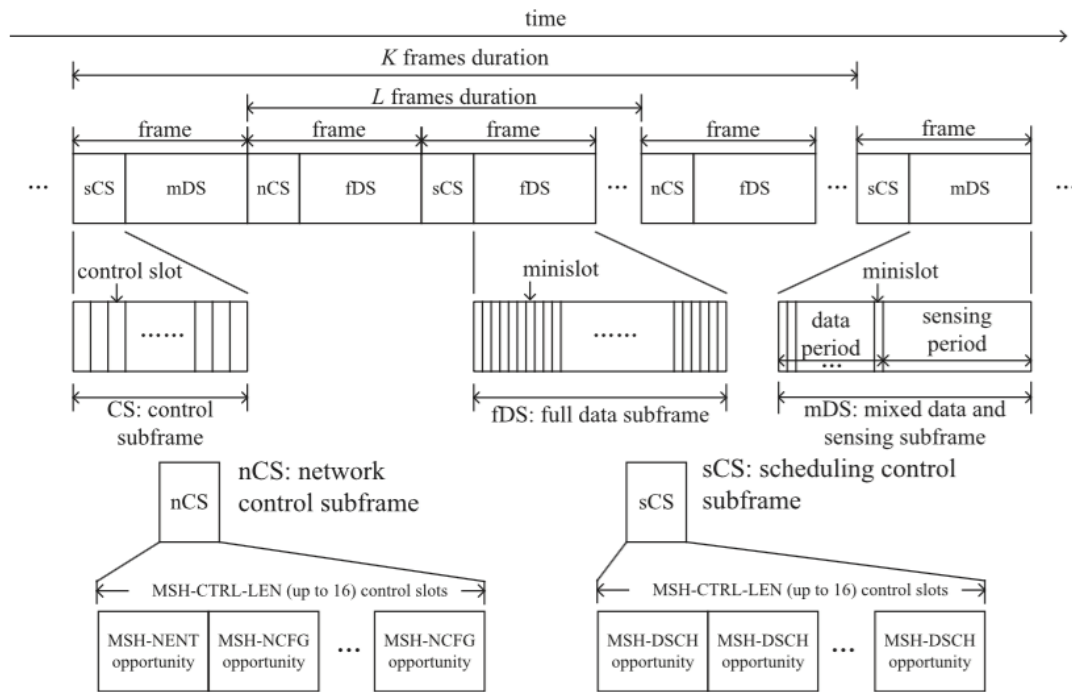


Figura 21. Estructura de la trama de IEEE 802.16d Mesh mejorada (Zhou & Harada, 2012).

Para la operación de una red malla en modalidad ad-hoc, los mensajes de control resultan ser críticos, debido a que contienen información como los faros (“beacon”), entrada a la red, tiempos, recursos de otorgamiento y aplicación, entre otros. Además en este tipo de redes que agregan funciones cognitivas,

los canales de frecuencia disponibles pueden cambiar frecuentemente, lo cual hace necesario un algoritmo que permita acceder a los canales de manera dinámica para poder transmitir los mensajes de control.

Cognitive Mesh MAC añade un algoritmo en el que el acceso al canal en cada ranura de control está sincronizado, con lo cual, para una determinada ranura todos los nodos de la red tratan de acceder a un mismo canal de frecuencia. Los mensajes de control de configuración (*MSH-NCGF*) y los mensajes de control de entrada a la red (*MSH-NENT*) se pueden difundir de manera justa sobre todos los canales de frecuencia disponibles, por lo que los nodos tienen las mismas oportunidades para entrar a la red. Los mensajes de control para la asignación de recursos (*MSH-DSCH*) pueden ser recibidos por la mayor cantidad de nodos vecinos posibles con lo que las colisiones durante la asignación de ranuras de datos puede ser minimizado.

Al igual que ASO-TDMA, este protocolo tiene la ventaja de soportar comunicaciones multisalto en redes en modalidad ad-hoc. Además presenta una red dinámica de entrada y salida de nodos brindando también servicios de alta velocidad a bajo costo. Esto debido al aprovechamiento del espacio blanco (*“White Space”* – WS) que corresponde a las bandas de frecuencia con licencia no utilizadas en el mar. Sin embargo, en las redes implementadas con Cognitive Mesh MAC se menciona el uso de antenas de hasta 27 metros de altura, lo cual puede ser una limitante para entidades marítimas pequeñas como una boya.

2.3.1.9 FD-MAC (*“Flow Driven MAC”*)

En (C. Chen, Cui, Tan, Leung, & Wang, 2012) se menciona que este protocolo fue diseñado para aplicaciones que requieren de comunicaciones de larga distancia para realizar rescates de emergencia en zonas de desastre. Debido a la naturaleza de la aplicación para la que fue diseñado, FD-MAC prevé una topología aleatoria en redes móviles en modalidad ad-hoc. Al igual que algunos de los protocolos mencionados anteriormente, FD-MAC está basado en una estructura de ranuras de tiempo en donde la sincronización se lleva a cabo con ayuda de un GPS.

FD-MAC incorpora un esquema de asignación de recursos de flujo controlado, es decir, un esquema en el que se asigna recursos a los flujos de larga duración de manera dinámica con la finalidad de reducir la tasa de colisiones. El tiempo se divide en tramas de N ranuras de longitud fija. Cada una de las ranuras puede ser utilizada para diversas tareas, y además pueden ser definidas para acceso por contienda o asignadas para nodos específicos. El rol de cada ranura se repite en cada trama hasta que éste sea modificado y

depende del estado en el que se encuentre. Los estados pueden ser: *IDLE*, *FORBIDDEN*, *SENDING*, *RECVING*, *CANSEND* y *CANRECV*.

Los nodos dentro de la red intercambian información acerca del estado de las ranuras, por lo que todos los miembros de la red conocen su propio estado de ranuras en la trama así como el de sus vecinos a un salto de distancia. En el momento en que un nodo requiera realizar una transmisión, éste debe entrar a contienda por una ranura que se encuentre en el estado *IDLE* o *CANSEND*. Durante la transmisión el nodo almacena información de identidad del flujo del paquete, ya que en FD-MAC los flujos se clasifican en flujo elefante (FE) o flujo ratón (FR). Esta clasificación tiene como finalidad reservar ranuras de tiempo a aquellos flujos de información que mantienen ocupado el canal por un largo periodo y proveen a la red de una gran cantidad de tráfico (FE). Por el contrario, a los flujos de información moderada no se les asignan ranuras especiales, por lo que deben contender por el resto de las ranuras no asignadas para poder transmitir.

Los flujos de cada nodo son monitoreados constantemente, y de acuerdo a un mecanismo de umbrales de clasificación de flujo, un flujo ratón puede ser determinado como flujo elefante, en donde se inicia el proceso de reservación de ranuras. Los nodos vecinos de aquellos nodos que vayan a transmitir o estén transmitiendo flujo elefante, escuchan el proceso de reservación o la transmisión de dichos paquetes, por lo que marcan las ranuras correspondientes como *FORBIDDEN* para evitar enviar algún paquete a través de esas ranuras.

La asignación de prioridad a los flujos que requieren de un mayor espacio temporal para realizar sus transmisiones es una de las ventajas que presenta FD-MAC, ya que con ello se mejora el rendimiento final evitando que los flujos elefante entren a contienda. Por otro lado, no es un protocolo que especifique su uso en ambientes marítimos, lo cual es uno de los requerimientos del presente proyecto de tesis. Al no ser un protocolo diseñado para este tipo de ambientes, puede presentar deficiencias al tratar con inconvenientes causados por la comunicación a través del canal marítimo como por ejemplo en la propagación de las señales, en el retardo, etc. Sin embargo es un protocolo aplicado para redes en modalidad ad-hoc estableciendo comunicaciones de larga distancia.

2.4 Redes inalámbricas de sensores

Como se ha mencionado anteriormente, en las últimas décadas la incursión en el desarrollo de las redes inalámbricas ha sido exhaustiva. Esto ha llevado a que hoy en día se pueda encontrar una gran variedad de tecnologías que abordan diversas aplicaciones. Tal es el caso de las redes inalámbricas de sensores que de acuerdo a (Paulo, Oliveira, & Angelina, 2005) son una gran cantidad de pequeños dispositivos autónomos denominados nodos de sensores, los cuales se encuentran distribuidos físicamente alrededor de un fenómeno que se requiere monitorear. En donde estos nodos tienen la capacidad de almacenar y comunicar datos en modalidad de red ad-hoc de manera inalámbrica.

De tal manera que las WSNs son la clave para la recolección de información requerida para aplicaciones de diversos sectores como industria, agricultura, seguridad, medicina, medio ambiente, etc. En donde los nodos obtienen información de su entorno, la procesan y la envían de forma inalámbrica hasta un nodo central que recaba todos los datos, conocido generalmente como nodo sumidero (SINK).

2.4.1 Control de acceso al medio para WSN

Uno de los parámetros que no se toma en cuenta en los protocolos MAC para RIALD es el consumo de energía, el cual es uno de los factores principales en WSN. En (Ye, Heidemann, & Estrin, 2002) se describen los principales problemas de desperdicio de energía: *colisiones*, *sobre-escucha (overhearing)*, *sobreencabezado de control (control packet overhead)* y *escucha innecesaria (idle listening)*.

Las colisiones ocasionan desperdicio de energía debido a que cuando se pierde un paquete, éste debe ser retransmitido. Además de incrementar el consumo de energía, las colisiones también provocan el incremento de la latencia de paquetes. El *overhearing* ocurre cuando un nodo escucha y recibe paquetes que no van dirigidos hacia él. El *overhead* también propicia mayor consumo debido a que se requiere energía para transmitir y recibir los paquetes de control. Por último, la principal causa del desperdicio de energía de acuerdo a (Ye et al., 2002) es el *idle listening* que ocurre cuando un nodo se encuentra encendido a la espera de paquetes que simplemente no están siendo enviados.

El presente proyecto de tesis tiene como aplicación un red de boyas de monitoreo marítimo, en la que se pretende que la información de varias boyas sea recabada en una boya central. Esta aplicación reúne varias de las características de una WSN, por lo que de igual manera resulta importante analizar los protocolos MAC utilizados en ellas.

2.4.1.1 S-MAC (“Sensor MAC”)

En (Ye et al., 2002) se presenta el protocolo S-MAC, diseñado específicamente para WSNs estáticas y cuyo principal objetivo es reducir el consumo de energía. Esta especificado para aplicaciones que requieran comunicaciones multisalto de corto alcance. Es uno de los protocolos MAC para WSNs más populares y estudiados debido a que combate la mayoría de los problemas de desperdicio de energía (Hameed, Shaaban, Faheem, & Ghoniemy, 2009).

S-MAC está conformado de un periodo inactivo (*sleep period*) y un periodo de escucha (*listen period*). Durante el periodo inactivo los nodos mantienen apagado su radio, y al momento en que dicho periodo termina, los nodos encienden su radio ya sea para determinar si existe alguien que quiera comunicarse o para iniciar comunicación por sí mismos. El periodo de escucha es dividido en tres partes como se ilustra en la Figura 22, la primera para detectar paquetes de sincronización, la segunda para realizar peticiones de transmisión (“*Request to Send*” – RTS) y la tercera para realizar transmisiones en caso de recibir la respuesta a su petición (“*Clear to Send*” – CTS).

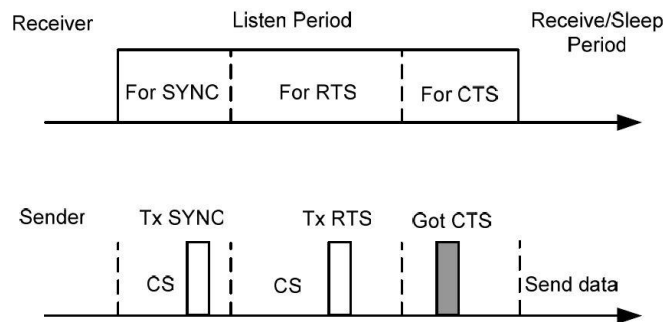


Figura 22. Escenario de comunicación para S-MAC (Demirkol, Ersoy, & Alagöz, 2006).

Tanto el periodo inactivo como el periodo de escucha son periodos coordinados localmente, es decir, estos periodos están sincronizados para cada vecindad de nodos. El protocolo implementa un mecanismo para determinar la calendarización que adquirirá un conjunto de nodos y para mantener la sincronización, cada nodo transmite paquetes SYNC cada determinado tiempo, de manera que los nodos a su alrededor puedan estar actualizando su tabla de calendarización.

S-MAC tiene la ventaja de que además de combatir los principales problemas de desperdicio de energía, también presenta escalabilidad, capacidad de evasión de colisiones y simplicidad de implementación. Por otro lado, la principal desventaja que presenta es que no está diseñado para cargas de tráfico variable, por

lo que no podría ser aplicado directamente sobre aplicaciones que requieran transmitir diferentes cargas de tráfico. Aunado a ello, los periodos inactivos periódicos resultan en una mayor latencia, especialmente en redes multisalto.

2.4.1.2 MS-MAC (“*Mobility-aware S-MAC*”)

Este protocolo presentado en (Pham & Jha, 2004) se basa en S-MAC para añadirle soporte de movilidad a los nodos, de manera que los miembros de la red pueden ser estacionarios y móviles. Para las funciones de movilidad MS-MAC utiliza como indicador los cambios de potencia en la señal recibida. De manera que cuando es necesario se ejecutan los mecanismos de soporte de movilidad. Para mantener la sincronización de un nodo móvil de acuerdo al clúster o vecindario virtual en el que se vaya encontrando, el protocolo disminuye los tiempos de envío de paquetes SYNC a medida que detecta el incremento de velocidad.

Aunque MS-MAC tiene la ventaja de soportar movilidad para los nodos y puede mantener la eficiencia de S-MAC para redes estacionarias, ésta se ve afectada al volverse una red móvil.

2.4.1.3 MD-MAC (“*Mobility-aware Delay-Sensitive MAC*”)

MD-MAC es un protocolo presentado en (Hameed et al., 2009) como alternativa para WSNs cuya aplicación requiere de pronta respuesta, es decir, que no tienen tolerancia a grandes latencias. Además de ofrecer capacidad de sensibilidad al retardo, este protocolo al igual que MS-MAC ofrece soporte para redes móviles y estacionarias sin dejar de lado la eficiencia energética.

A diferencia de S-MAC, este protocolo permite la variación de los ciclos de trabajo para los periodos de escucha e inactividad, de manera que se puede incrementar el primero para reducir las latencias. Para lidiar con la eficiencia energética, en MD-MAC se definen umbrales para el consumo de energía, por lo que los incrementos del periodo de escucha se pueden realizar sólo si el consumo está por debajo de dicho umbral. Aunado a ello, MD-MAC realiza modificaciones a MS-MAC entorno a la manera de manejar la movilidad de los nodos haciéndola más eficiente en términos de consumo de energía.

MD-MAC aborda el consumo de energía, la movilidad de los nodos y la reducción del retardo para aplicaciones que así lo requieren como asistencia médica a distancia, campos de batalla o zonas de desastre. Sin embargo, el protocolo añade sobre-encabezado de almacenamiento y procesamiento, lo

cual impacta en la eficiencia energética y cobra relevancia considerando también la tasa de datos de 2 kbps pensada para este proyecto.

2.4.1.4 T-MAC (“Timeout MAC”)

T-MAC es un protocolo propuesto en (Van Dam & Langendoen, 2003) que a diferencia de MD-MAC, hace hincapié en las aplicaciones que no son sensibles a la latencia y además manejan una baja tasa de datos. Introduce la variación dinámica del ciclo de trabajo para cargas de tráfico variables en espacio y tiempo, lo cual reduce el desperdicio de energía producido por el *idle listening*. El periodo de escucha finaliza cuando no ocurre un evento de activación en un tiempo determinado (umbral de tiempo). Al momento de una transmisión, los nodos envían sus mensajes en ráfagas de longitud variable a través de los periodos de actividad dinámicos.

Este protocolo mejora el rendimiento de S-MAC bajo cargas de tráfico variable y combate de mejor manera el problema del *idle listening*. Por otro lado, la principal desventaja de T-MAC es el problema *early sleeping*, en donde los nodos pueden entrar al periodo de inactividad provocando la pérdida de datos cuando los mensajes de información son muy largos.

2.4.1.5 EMACs (“EYES MAC”)

EMACs es un protocolo MAC propuesto en (Hoesel, Nieberg, Kip, & Havinga, 2004) para WSNs que consiste de un esquema TDMA totalmente distribuido y auto-organizable. La idea básica se basa en que cada nodo activo escucha el canal de manera periódica, y transmite pequeños mensajes de control *broadcast*. En EMACs un nodo puede estar en tres diferentes estados: activo, pasivo o latente. Cuando un nodo se encuentra en estado activo, retransmite información de los nodos pasivos manteniendo la ruta definida hacia el destino de los paquetes. Por otro lado, cuando un nodo se encuentra en estado pasivo, conserva energía enfocándose únicamente en mantener a la vista a un nodo activo que pueda retransmitir sus datos o que le pueda brindar información acerca de la red. Y finalmente, si un nodo entra en estado latente, adquiere un modo de bajo consumo de energía por un tiempo determinado, de manera que pueda ser recargado.

Como se muestra en la Figura 23, en EMACs cada ranura de tiempo se divide en tres secciones: petición de comunicación (“*Communication Request*” – CR), control de tráfico (“*Traffic Control*” – TC) y datos. La sección CR sirve para que otros nodos puedan realizar peticiones al nodo que en ese momento controla

dicha ranura. Dentro de esta sección los nodos que realizan peticiones escogen un tiempo aleatorio para mandarlas, por lo que no se garantiza un ambiente libre de colisiones. La sección TC la usan los nodos que controlan la ranura para mandar mensajes e indicar que comunicación realizará en la sección de datos, como pudiera ser un mensaje *omnicast*. Finalmente en la sección de datos se realiza la transmisión de los mismos.

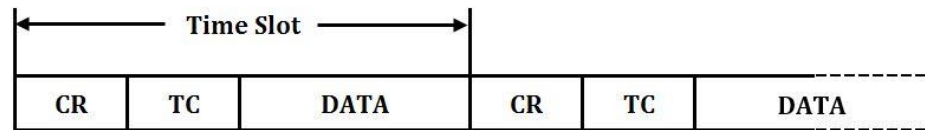


Figura 23. Secciones de una ranura de tiempo en EMACs (Hoesel et al., 2004).

Este protocolo es más eficiente en términos de consumo de energía comparado con S-MAC, por lo que podría lograr extender la vida útil de los nodos de una WSN; además soporta la movilidad de los mismos. Por otro lado, a pesar de ser un protocolo basado únicamente en TDMA, tiene secciones en las que la comunicación entre los nodos pasivos y activos no garantiza ser libre de colisiones.

2.4.1.6 LMAC (*“Lightweight MAC”*)

En (Van, Havinga, & Hoesel, 2004) se propone el protocolo LMAC para WSNs que presenta mejoras para combatir el desperdicio de energía. LMAC utiliza un esquema basado en TDMA auto-organizable cuyo principal objetivo es el de reducir el *overhead* de la capa física. El esquema TDMA se adopta para que cada nodo pueda transmitir su información en ranuras específicas libres de colisiones. En LMAC a cada nodo se le asigna el control únicamente de una ranura de tiempo, y para no incrementar indefinidamente el tamaño de la trama, se hace uso de la reutilización de ranuras para nodos en los que no exista interferencia.

Los nodos además de sus datos, transmiten paquetes de control, lo cuales tienen varios objetivos dentro de los cuales se encuentra el de mantener la sincronización. Todos los miembros de la red tratan de escuchar los paquetes de control de sus vecinos, y si un nodo no es el destino del paquete que escucha, éste apaga su radio y vuelve a encender sólo en la ranura en la que tendrá actividad. LMAC se enfoca en reducir los cambios del radio del estado de transmisión al estado de recepción y viceversa, con lo cual se logra reducir el consumo de energía para las transmisiones de los preámbulos de capa física.

Este protocolo toma ventaja en cuanto a la eficiencia energética en comparación con los protocolos S-MAC y EMACs. Sin embargo su implementación es más compleja en donde se tiene un mayor intercambio de mensajes de control y se requiere además de una mayor administración autónoma constante por parte de los nodos de la red.

2.4.1.7 DMAC (“Data-gathering MAC”)

En (Lu, Krishnamachari, & Raghavendra, 2004) se presenta DMAC como un protocolo para WSNs en las que generalmente se recolecta la información siguiendo un esquema de árbol, es decir, de una gran cantidad de nodos ramificados hasta un nodo central. Se considera que los datos siguen trayectorias unidireccionales hacia el sumidero de información. El protocolo tiene la finalidad de ofrecer bajas latencias sin perder eficiencia energética.

DMAC puede ser visto como el protocolo S-ALOHA con la diferencia de que las ranuras son asignadas a un conjunto de nodos de un mismo nivel en un esquema de árbol como se muestra en la Figura 24.

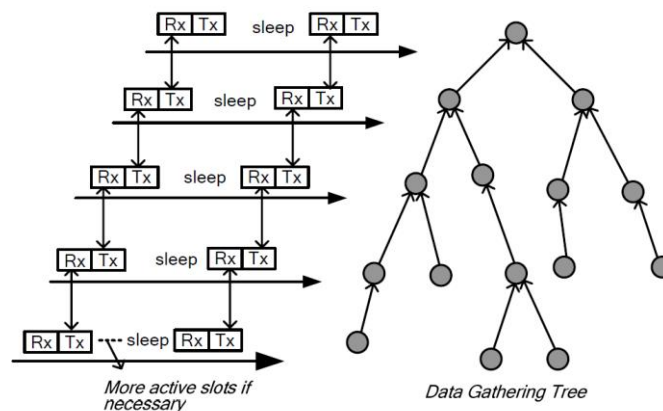


Figura 24. Asignación de ranuras en un esquema de árbol para DMAC (Lu et al., 2004).

Este protocolo tiene la desventaja de no contar con un método de evasión de colisiones, por lo que cuando un número de nodos pertenecientes al mismo nivel desea transmitir hacia el mismo nodo, ocurre la colisión de la información.

2.5 Recopilación y comparación de los protocolos de acceso al medio

Como se ha podido observar, existe una gran variedad de diseños de protocolos de acceso al medio con diversas tecnologías. Sin embargo no existe alguno que sea tomado como estándar para una determinada

red, ni para las RIALD ni para las WSNs. De tal manera que la elección, adaptación o diseño de un protocolo MAC depende directamente de la aplicación que vaya a abordar, además de las tecnologías de hardware que el sistema incorpore para las capas inferiores (PHY).

En la Tabla 1 se realiza una recopilación y clasificación de todos los protocolos MAC mencionados anteriormente, tanto para las RIALD como para las WSNs. Inicialmente los protocolos son divididos de acuerdo al sistema de acceso que manejen, ya sea libre de contención o basado en contención. Posteriormente cada uno se divide en aquellos protocolos que operan bajo los esquemas de pase de testigo y TDMA para el caso de los libres de contención, y bajo los esquemas CSMA/CA y ALOHA para el caso de los basados en contención.

Tabla 1. Clasificación de protocolos MAC en RIALD y WSNs.

<i>Libres de contención</i>				<i>Basados en contención</i>			
Token		TDMA		CSMA/CA		ALOHA	
Larga distancia	WSN	Larga distancia	WSN	Larga distancia	WSN	Larga distancia	WSN
WTRP	----	SO-TDMA	LMAC	HF ALE	S-MAC	P-ALOHA	DMAC
HFTP		CS-TDMA			MS-MAC	S-ALOHA	
HF "Token Passing"		Cognitive Mesh MAC	EMACs		MD-MAC	R-ALOHA	
		FD-MAC			FD-MAC		

Protocolos usados en ambientes marítimos

Cada esquema presenta ventajas y desventajas, que como se mencionó anteriormente, deben ser evaluadas de acuerdo a la aplicación que se requiera. Enseguida se mencionan algunas de las bondades y problemáticas de cada uno de los esquemas de la clasificación realizada en la Tabla 1.

Los protocolos basados en *token* presentan ventajas como, asignación garantizada de una porción de tiempo para realizar transmisiones libres de contención, asignación dinámica de la capacidad del canal a los nodos que así la requieran y comunicación confiable en términos temporales, ya que el tiempo de respuesta es determinista debido a que depende directamente de las características de diseño. Además, en comparación con TDMA, las ranuras sufren de menor desperdicio en caso de que algún nodo no requiera utilizar el canal, ya que el *token* es pasado inmediatamente. Por otro lado, las desventajas de este esquema se presentan en términos de latencias, ya que aunque se experimenten cargas de tráfico ligeras,

un nodo debe esperar el *token* para poder transmitir. Además se consume capacidad del canal con las transmisiones del *token*, lo que perjudica comunicaciones que requieren de alta velocidad.

El esquema TDMA debido a que asigna ranuras específicas a cada miembro de la red, ofrece acceso al medio libre de colisiones lo cual lo hace eficiente energéticamente. Además los nodos hacen uso de todo el ancho de banda en el espacio de tiempo que les toca transmitir. Sin embargo, estos protocolos requieren de alta sincronización ya que un desfase podría incurrir en el malfuncionamiento de la red entera. Otra desventaja de TDMA es que el rendimiento o caudal eficaz ("*throughput*") se ve afectado para cargas de tráfico ligeras, debido a las ranuras de tiempo que quedan desocupadas.

Los protocolos basados en CSMA/CA comparten con TDMA el hecho de que los miembros de la red hacen uso de todo el ancho de banda disponible para sus transmisiones, lo cual es una gran ventaja cuando se comparan con otros esquemas como FDMA. Además, CSMA/CA presenta bajo retardo y un mejor rendimiento que TDMA para cargas de tráfico ligeras. Sin embargo, no ofrece comunicaciones libres de colisiones y requiere de la implementación de un mecanismo de retransmisiones.

Por otro lado, los esquemas ALOHA presentan la ventaja de ser muy sencillos de implementar y gestionar, además de soportar tráfico variable. Aunque existen protocolos que mejoran el rendimiento como S-ALOHA y R-ALOHA, la probabilidad de colisiones es mayor que los otros esquemas cuya principal desventaja es la ineficiencia energética que propicia.

Como se puede observar, de acuerdo a su naturaleza los diversos protocolos mencionados ofrecen características que pueden resultar en ventajas o desventajas para la aplicación que busca el presente proyecto de tesis. Es por ello que para poder llegar a una propuesta óptima se debieron considerar aspectos como el consumo de energía, sincronización, escalabilidad, adaptabilidad, soporte de comunicaciones multisalto, tráfico soportado, arquitectura, entre otros. De tal manera que para la red de boyas con sensores en modalidad ad-hoc separadas por largas distancias (hasta 50 km) de este proyecto fue necesario tomar en cuenta aspectos tanto de los protocolos MAC para RIALD como los diseñados para WSNs.

Una solución atractiva puede ser el diseño de un protocolo MAC híbrido que aproveche las características ventajosas de diversos esquemas y protocolos. De acuerdo al análisis realizado en el presente capítulo, la combinación de protocolos que emplean los esquemas CSMA/CA y TDMA puede resultar en una de las mejores opciones, y que además puede cumplir con los requerimientos de la red de boyas de monitoreo.

Si bien se mencionó que una de las grandes desventajas de los esquemas TDMA es que requiere de una sincronización precisa, la solución puede ser una fuente de sincronización externa como lo es un GPS incluido en las boyas pensadas para este proyecto de investigación. Aunque un protocolo híbrido puede presentar una serie de ventajas, su diseño e implementación no es una tarea trivial. La propuesta de diseño del protocolo de control de acceso al medio para la red de boyas de este trabajo de tesis es desarrollada y presentada en el Capítulo 5.

No obstante, el protocolo de acceso al medio en un sistema de comunicaciones debe ser complementado por la capa física que, entre otras cosas, establece el esquema de modulación. Como se ha mencionado anteriormente, otro de los objetivos del presente de trabajo de tesis es la implementación del esquema de modulación en banda base sobre una arquitectura de SDR, es por ello que en el siguiente capítulo se describe esta tecnología, así como sus limitantes y capacidades.

Capítulo 3. Radio definido por software

3.1 Introducción

En la mayoría de los sistemas de comunicación, el radio está compuesto por una serie de elementos de hardware diseñados para trabajar con una configuración predefinida. Es decir, el radio especifica el esquema de modulación, la frecuencia de operación, forma de onda, codificación, etc. Sin embargo, la constante evolución de los sistemas de comunicación, en conjunto con los avances tecnológicos de los últimos años, han ido reemplazando los sistemas de comunicación basados en radios pre-configurados por sistemas de radio digital reconfigurables. Lo cual resulta atractivo para aplicaciones industriales, militares y civiles.

Este concepto de sistemas reconfigurables es posible gracias a la radio definido por software o SDR (por sus siglas en inglés) a partir de la cual es viable realizar el diseño de sistemas de radiocomunicación con un mínimo requerimiento de hardware mediante la ejecución del procesamiento en una unidad externa o embebida. De manera que es posible implementar diversos sistemas de comunicación en un mismo equipo, obteniendo capacidades de rediseño vía software. De acuerdo con (Domínguez Pinar & Fuentes Murillo, 2011) un sistema SDR es un sistema de radiocomunicación donde la mayor parte de los componentes necesarios se implementan en software en lugar de en hardware. Con ello se obtiene la capacidad de reconfiguración de parámetros que permiten diseñar distintos componentes como mezcladores, filtros, amplificadores, moduladores y demoduladores, e incluso sistemas completos como transmisores, receptores, osciloscopios, analizadores de espectros, entre otros.

En el esquema SDR existe un ordenador o sistema embebido que genera y recibe las muestras de la señal en banda base, que posteriormente son pasadas a la etapa correspondiente del sistema de comunicación. Todo esto con parámetros dinámicamente configurables, lo que aporta gran flexibilidad al sistema (Domínguez Pinar & Fuentes Murillo, 2011).

En este trabajo se propone hacer uso de la arquitectura de SDR, de manera que se pueda realizar la implementación de un esquema de modulación en banda base (como QPSK o BPSK) en un sistema embebido con procesador ARM (*“Advanced RISC Machine”*). Posteriormente se pretende pasar esta señal a la etapa de un *“front-end”* analógico realizado en la tesis complementaria del presente proyecto. Es por ello que resulta necesario entender y revisar las características de un sistema SDR, así como las soluciones tecnológicas que se han implementado sobre procesadores ARM. Por lo tanto la finalidad de este capítulo

es proveer los elementos necesarios para entender el concepto de radio definido por software dando a conocer sus características. Adicionalmente se revisan las particularidades de esta tecnología implementada en procesadores ARM.

3.2 Inicios de SDR

En primera instancia el radio definido por software surge para solventar problemas de compatibilidad e interoperabilidad entre diversas tecnologías, ya que muchas de ellas presentan inconvenientes al momento de reutilizar equipos o prestar determinados servicios. Para lo cual SDR define una serie de procedimientos y técnicas dirigidas al procesamiento de señales a través de un dispositivo de propósito general. En donde este dispositivo puede ser reconfigurable vía software permitiendo realizar cambios automáticos y dinámicos de manera eficiente. El primer trabajo importante realizado bajo SDR fue parte de un proyecto militar estadounidense denominado “SpeakEasy” desarrollado entre 1991 y 1995, en donde el objetivo fue implementar más de diez tipos de tecnologías de comunicaciones inalámbricas en un equipo programable operando sobre distintas bandas de frecuencia (Domínguez Pinar & Fuentes Murillo, 2011).

De tal manera que las nuevas exigencias tecnológicas fueron requiriendo de dispositivos con funcionalidades multimodales, y que además soportarán diversos estándares. Por lo que SDR fue el concepto que se ofreció como una solución atractiva a esta compleja problemática (Rouphael, 2008) y desde entonces se han diseñado diferentes dispositivos SDR que han ido marcando un importante avance en este campo.

3.2.1 Wireless Innovation Forum

Aunque no existe un estándar para SDR, existe un grupo de trabajo dedicado conducir la innovación tecnológica de este campo a través del desarrollo de estándares y especificaciones. Este grupo denominado “*Wireless Innovatin Forum*” fue fundado en 1996 y está conformado de desarrolladores de software, desarrolladores de tecnología, proveedores de servicios de comunicación, usuarios gubernamentales y regulatorios que comparten el interés por los avances tecnológicos dando soporte al desarrollo de comunicaciones inalámbricas y a la innovación en la utilización del espectro (“Wireless Innovation Forum - working toward SDR, CR and DSA innovation”, 2016). Este grupo cuenta con el apoyo

de más de 100 empresas, instituciones y organizaciones como Altera, Xilinx, NASA, Toshiba, Samsung, Motorola, QUALCOMM, entre otras (Domínguez Pinar & Fuentes Murillo, 2011).

3.3 Concepto y arquitectura

En (Kenington, 2005) se define a SDR como una arquitectura de radio emergente que abarca una amplia gama de técnicas de diseño con la finalidad de realizar un sistema transceptor flexible y potencialmente aplicable al futuro de las tecnologías. Por otro lado en (Rouphael, 2008) se menciona que SDR es una arquitectura flexible y versátil que hace uso de hardware de propósito general que puede ser programado o configurado en software.

El esquema básico de SDR está conformado por tres bloques: sección de Radio Frecuencia (*“Radio Frequency”* - RF), sección de Frecuencia Intermedia (*“Intermediate Frequency”* - IF) y sección de banda base. Este esquema básico se muestra en la Figura 25.

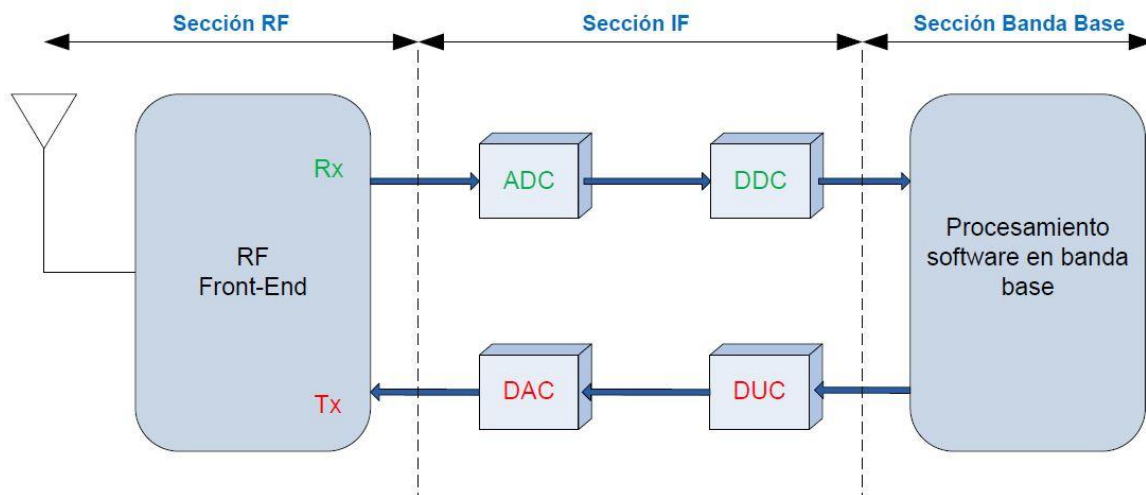


Figura 25. Esquema básico de la arquitectura SDR (Domínguez Pinar & Fuentes Murillo, 2011).

Generalmente, tanto la parte de RF como la parte de IF se implementan en hardware, mientras que la implementación de la sección de banda base se realiza en software. Al momento de transmitir, el bloque de RF (*“front-end”* analógico) tiene la funcionalidad de amplificar y modular las señales de IF, mientras que para el caso de la recepción se encarga de adecuarlas aplicando filtrados y posteriormente convertirlas en frecuencia intermedia. El bloque de IF es el encargado de pasar la señal de IF a banda base y convertirla en una señal digital para el caso de la recepción, mientras que para la transmisión realiza el proceso inverso pasando la señal en banda base a IF para luego realizarle una conversión de digital a analógico. El bloque

de banda base, como su nombre lo indica tiene el objetivo de procesar la señal en banda base, es decir, lo relacionado a la modulación y demodulación, análisis espectral, etc., y todo vía software (Domínguez Pinar & Fuentes Murillo, 2011).

Existen algunos conceptos que deben ser esclarecidos para entender a detalle el esquema básico de la arquitectura SDR presentado en la Figura 25, por lo que en seguida se define brevemente cada uno de ellos.

DDC/DUC: Los módulos DDC (*“Digital Down Converter”*) y DUC (*“Digital Up Converter”*) son añadidos con la finalidad de bajar y subir, respectivamente, la tasa de muestreo ya sea para la transmisión o recepción de las señales a través de la interfaz entre IF y banda base.

ADC: El módulo conversor analógico a digital (*“Analog-to-Digital Converter”*) se encarga de pasar las señales analógicas a digitales con la finalidad de proveer una señal adecuada al sistema de procesamiento en software. De los parámetros más relevantes de un ADC se encuentra la frecuencia de muestreo, el tiempo de conversión, rango dinámico y número de niveles.

DAC: El módulo conversor digital a analógico (*“Digital-to-Analog Converter”*) es el encargado de proveer de una señal analógica a partir de una señal digital en forma de una palabra de determinado número de bits. Los parámetros de un DAC son muy similares a la de un ADC, sin embargo para este módulo también se debe tomar en cuenta el uso de un filtro reconstructor para obtener una mejor respuesta.

Otro concepto que va muy relacionado a la arquitectura de SDR, sobre todo en la sección de IF, es el que presenta el teorema de Nyquist utilizado en el procesamiento de señales, en donde se determina que para evitar el efecto de *“aliasing”*³ en la conversión analógico a digital se debe seleccionar una frecuencia de muestreo (f_s) lo suficientemente alta (Morales Mendoza, n.d.). De manera que para poder realizar una buena reconstrucción de la señal analógica f_s debe ser de al menos el doble del ancho de banda de la señal procesada (f_{max}).

$$f_s \geq 2 f_{max} \quad (2)$$

³ El *“aliasing”* es el efecto que causa que señales continuas distintas se tornen indistinguibles cuando se muestrean digitalmente.

3.4 Limitaciones y capacidades

Como se ha mencionado, SDR presenta una arquitectura flexible que puede ofrecer soluciones a problemas de compatibilidad y estandarización. No obstante, esta tecnología se enfrenta a algunos retos que limitan su alcance y sus capacidades. Uno de estos retos se encuentra en el diseño de antenas con gran ancho de banda, ya que un SDR ideal no tiene limitación en cuanto la frecuencia portadora y ancho de banda, lo cual a su vez supone una mayor exigencia para la etapa del “*front-end*” y el ADC. Si se omitiera la etapa del “*front-end*”, el ancho de banda entero debería ser digitalizado, por lo que tomando en cuenta el teorema de Nyquist, las capacidades tanto de los DACs como de los ADCs deberían permitir frecuencias de muestreo muy altas (del orden de los GHz) lo cual por el momento aún es un área de investigación abierta (Grayver, 2013).

Por otro lado, el procesamiento en tiempo real que requeriría una señal digital muestreada a muy alta frecuencia está por encima de las capacidades de los procesadores modernos. Además debido a que las no-linealidades son causantes de intermodulación entre las señales de la banda digitalizada, los módulos digitalizadores deben ser altamente lineales ya que un componente de intermodulación puede opacar una señal de interés (Grayver, 2013).

De tal manera que la arquitectura de SDR a pesar de contar con grandes capacidades tecnológicas, sigue presentando ciertas limitaciones, que de momento la imposibilitan ser una tecnología ideal. Sin embargo, aún y con estas limitaciones, SDR sigue presentando avances y soluciones a problemáticas de diversos campos de interés en el ámbito militar, comercial y civil. Tal es el caso de la aplicación que busca esta tesis, en donde se requiere de la implementación de un radio basado en software, incorporando básicamente el procesado de la modulación en banda base, que represente una solución viable en términos económicos y de flexibilidad y versatilidad del sistema.

3.5 SDR sobre procesadores ARM

Como se mencionó anteriormente, el procesamiento digital de la señales es configurado y programado de manera que ayude a desempeñar varias de las funcionalidades del radio. Estas funcionalidades pueden estar relacionadas con el manejo de varias formas de onda empleando distintas tasas de datos y a su vez diversos esquemas de modulación. Para lograr este objetivo, en la mayoría de las aplicaciones se hace uso de dispositivos con capacidades específicas denominados “*Field Programable Gate Array*” (FPGA). De manera que el uso de FPGAs le proporciona al radio la capacidad de reconfiguración y reprogramación en

tiempo real (Rouphael, 2008). En este caso, el tiempo real se refiere a obtener una respuesta a un cambio de reconfiguración o reprogramación rápidamente por parte del sistema.

Muchas de las plataformas de SDR están basadas en FPGAs y en procesadores de señales digitales embebidos (*“Digital Signal Processor”* – DSP), de manera que uno o más FPGAs en conjunto con uno o más DSPs son usados para soportar múltiples aplicaciones de manera simultánea. Estas plataformas pueden reunir los requerimientos de procesamiento que demandan los protocolos para comunicaciones inalámbricas de alta velocidad.

Una de las desventajas que presentan los FPGAs y algunos DSPs especializados es su difícil programación y depuración (*“debugging”*). Es por ello que SDR también se desarrolla sobre GPPs como los CPU con arquitectura X86 en proyectos como Sora⁴, Iris⁵ o GNU Radio⁶ por mencionar algunos de los más famosos. Por otro lado, la capacidad de cómputo de procesadores ARM ha ido en aumento en los últimos años, llegando a presentar procesadores de cuatro núcleos con velocidades de reloj de 1.5 GHz en cada uno de ellos. En comparación con los GPPs, los procesadores ARM son más económicos y eficientes en términos de consumo de potencia, por lo que su uso en los sistemas de comunicación inalámbrica se vuelve cada vez más popular (Wei et al., 2012). Es por ello, que tomando en consideración estos aspectos para este trabajo de tesis en el que se busca una solución para una aplicación de monitoreo en donde no se requiere manejar una alta tasa de datos y que además sea viable en términos económicos, la utilización de una plataforma de SDR sobre procesadores ARM representa la mejor opción.

Existen diversas familias de procesadores ARM, y cada una de ellas ofrece diferentes características en los procesadores de acuerdo a los requerimientos de diversas aplicaciones. De manera que estas familias de procesadores se dividen de acuerdo a su capacidad de procesamiento y costos. Es por ello que a continuación se muestra la clasificación de las familias más populares y utilizadas de los procesadores ARM.

3.5.1 Clasificación de procesadores ARM Cortex

Los procesadores ARM tienen una arquitectura RISC (*“Reduced Instruction Set Computer”*) que permite implementaciones de alto rendimiento y un tamaño reducido con un bajo consumo de energía. Estos

⁴ Más información disponible en <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/microsoft-research-software-radio-sora/>

⁵ Más información disponible en <http://www.crew-project.eu/portal/IRISdoc>

⁶ Más información disponible en <http://gnuradio.org/>

procesadores se encuentran divididos en diferentes arquitecturas ofreciendo una amplia gama de núcleos de microprocesadores para satisfacer los requisitos de rendimiento, potencia y costo de una gran cantidad de aplicaciones. Enseguida se muestran las características más relevantes y las aplicaciones de las familias de procesadores ARM Cortex⁷.

- **Familia Cortex-M:** Esta familia es la que tiene los procesadores Cortex más pequeños y de menor consumo de energía. Estos procesadores ofrecen un mayor número de funciones en menos tiempo comparados a menor costo. Los procesadores Cortex-M emplean la tecnología ARM Thumb[®]-2 para ofrecer una densidad de código superior a las arquitecturas fijas de 32 bits, lo que reduce los requisitos de memoria para maximizar el uso de la memoria Flash integrada. De tal manera que estos procesadores proporcionan alto rendimiento y eficiencia energética y además presentan un desarrollo sencillo de software debido a que todos los procesadores Cortex-M son totalmente programables en lenguaje C. Dentro de la familia de Cortex-M se encuentran:
 - **Cortex-M0, Cortex-M0+ y Cortex-M23**, que corresponden a los procesadores más baratos siendo los Cortex más pequeños y con el menor consumo de potencia.
 - **Cortex-M3, Cortex-M4 y Cortex-M33**, que proporcionan eficiencia de rendimiento para aplicaciones en las que se desea un balance entre un buen rendimiento (arquitectura de 32 bits) y la eficiencia energética.
 - **Cortex-M7**, que corresponde al procesador Cortex-M de más alto rendimiento diseñado para aplicaciones integradas (*“embedded applications”*).

La familia de Cortex-M está optimizada para aplicaciones de bajo costo sensibles al consumo de energía. Son usados en aplicaciones de monitoreo ambiental, instrumentos médicos de cuidado de salud, ropa inteligente, relojes inteligentes, ciudades inteligentes, etc.

- **Familia Cortex-R:** Esta familia de procesadores ofrece soluciones de alto rendimiento para sistemas embebidos que requieren de fiabilidad, alta disponibilidad, tolerancia a fallos y/o respuestas deterministas en tiempo real. Generalmente son usados en soluciones que deben cumplir con requerimientos de rendimiento y que son sensibles al retardo. Los procesadores

⁷ Información disponible en <http://www.arm.com/products/processors>

Cortex-R ofrecen características como frecuencia de reloj alta, configuraciones de multiprocesamiento, respuesta de interrupción rápida, limitada y determinista y detección de errores. Dentro de la familia de Cortex-R se encuentran:

- **Cortex-R4, Cortex-R5 y Cortex-R52**, que corresponden a los procesadores diseñados para aplicaciones funcionales de seguridad proporcionando soluciones eficientes en términos de tamaño y energía y soporte de virtualización.
- **Cortex-R7 y Cortex-R8**, que ofrecen el rendimiento más alto de los Cortex-R para satisfacer las necesidades de aplicaciones en módems 4G y 5G.

De tal manera que estos procesadores están diseñados para la implementación de procesos avanzados en los que se requiere de un procesamiento de alto rendimiento, seguro, rentable y en tiempo real. Son usados en aplicaciones industriales, teléfonos celulares, dispositivos de almacenamiento, cámaras, etc.

- **Familia Cortex-A:** Esta familia de procesadores proporciona el más alto rendimiento de los procesadores ARM Cortex y soportan un conjunto de instrucciones de 32 bits y una ruta de datos de hasta 64 bits. Este tipo de procesadores se encuentra en los productos tecnológicos más potentes como son dispositivos móviles, domésticos, infraestructura de redes, sistemas de información y entretenimiento, sistemas automotrices y sistemas autónomos. Además estos procesadores ofrecen soporte para una gama completa de sistemas operativos como Linux, Android, Chrome y MontaVista. Dentro de la familia de Cortex-A se encuentran:
 - **Cortex-A5, Cortex-A7, Cortex-A32 y Cortex-A35**, que corresponden a los procesadores Cortex-A enfocados en proporcionar ultra-alta eficiencia energética.
 - **Cortex-A8, Cortex-A9 y Cortex-A53**, que corresponden a los procesadores Cortex-A enfocados en proporcionar en balance entre alta eficiencia energética y alto rendimiento.
 - **Cortex-A15, Cortex-A17, Cortex-A57, Cortex-A72 y Cortex-A73**, que corresponden a los procesadores Cortex-A enfocados en proporcionar el más alto rendimiento.

Los procesadores Cortex-A están desplegados en un gran mercado con aplicaciones en celulares, tabletas, sistemas satelitales, sistemas de automatización en vehículos, redes informáticas y en el campo de la robótica.

En la Figura 26 se muestra la evolución de los procesadores ARM Cortex de acuerdo su capacidad y rendimiento conforme a lo mencionado anteriormente.

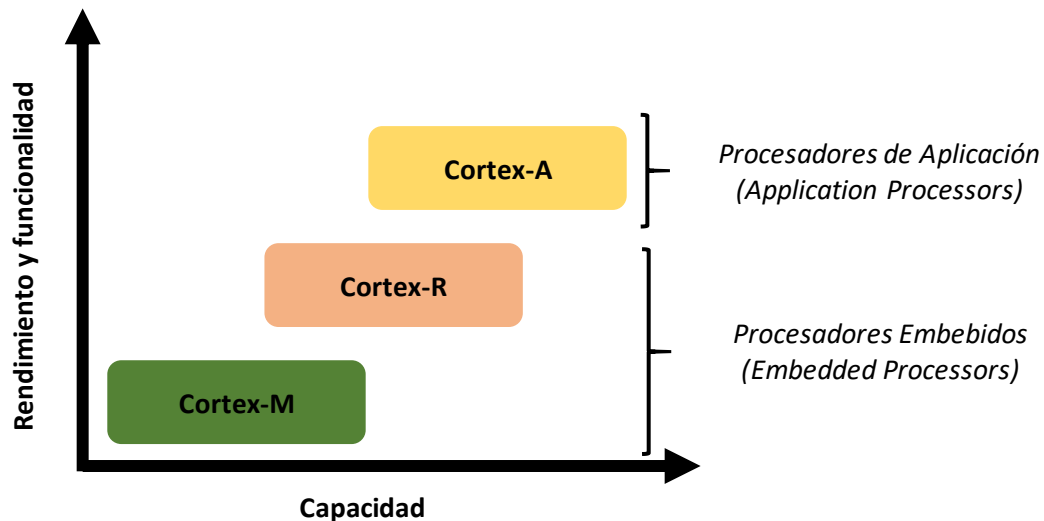


Figura 26. Evolución de procesadores Cortex-ARM.

3.5.2 Soluciones tecnológicas de SDR basadas en procesadores ARM

Debido a la popularidad que han adquirido los procesadores ARM y a las ventajas que proporcionan en términos de costos y consumo de potencia, diversas implementaciones de la arquitectura de SDR han optado por usar estos procesadores. A continuación se mencionan algunos trabajos y soluciones de SDR que se han presentado haciendo uso de la tecnología de procesadores ARM.

El proyecto CalRADIO 1 de ("UCSD", 2007) es un trabajo que propone una plataforma de desarrollo general del estándar IEEE 802.11b. La capa física es fija e implementada en un chip denominado "Intersil (Conexant) Prism". De ahí en más, el proyecto es montado sobre un procesador de alto rendimiento que contiene un TI TMS320VC5471 ARM y un DSP C5471 de Texas Instruments. El procesador ARM es ejecuta sobre uLinux para facilitar el desarrollo del software y el acceso al medio del estándar 802.11b se implementa en el DSP bajo el lenguaje de programación C. El proyecto CalRADIO 1 pretende que se puedan probar todos los "sueños y visiones" respecto a una red inalámbrica sobre una plataforma que es reconfigurable vía software. Cabe mencionar que en este caso el procesador ARM no genera directamente

la señal temporal a transmitir, es decir, no es utilizado específicamente para realizar las tareas de procesamiento de la señal de la capa física, sino que se enfoca en el procesamiento de más alto nivel.

Por otro lado, en (Ramacher et al., 2011) se propone una arquitectura SDR híbrida que soporta los estándares de telefonía móvil GSM, GPRS, EDGE, UMTS, HSUPA, HSDPA, LTE (5 MHz) y el estándar satelital GMR1-3G. Esta arquitectura híbrida se basa en los procesadores de banda base X-GOLD™ los cuales combinan un subsistema de multiprocesadores para el procesamiento de capa física y un subsistema con un procesador de propósito general basado en ARM (ARM 1176 core) para manejar las capas superiores del *stack*. En adición a lo anterior, también se prevé una unidad de administración de potencia que regula y maneja los voltajes dentro del chip. Al igual que el trabajo anterior, en este caso el procesador ARM no es empleado para generar la señal de banda base, sino que se utiliza para llevar a cabo tareas relacionadas con las capas superiores de la pila de protocolos.

En (Wei et al., 2012) se menciona la implementación de una plataforma de SDR para algunos esquemas de modulación (16 QAM y 64 QAM) utilizando la tecnología NEON aplicada sobre un procesador ARM Cortex-A9. Con esta arquitectura se optimiza la implementación del procesamiento de la señal específicamente para los algoritmos complejos de una demodulación suave. Dado que el sistema operativo de la mayoría de los procesadores ARM es Linux, en este caso es utilizado para observar su comportamiento en aplicaciones que requieren de un rápido procesamiento. Las conclusiones de (Wei et al., 2012) muestran que otros sistemas operativos basados en el kernel de Linux como Xenomai pueden cumplir de mejor manera con los requerimientos de procesamiento que los sistemas de comunicación generales exigen. De manera que la plataforma de SDR sobre el procesador ARM Cortex-A9 de alta gama es suficiente para cumplir las demandas de tiempo real y eficiencia de procesamiento de los sistemas de comunicación.

En (Y. Chen et al., 2016) se presenta una arquitectura de SDR en banda base configurable con aplicación en el área del internet de las cosas (*"Internet of Things"* – IoT). La plataforma de IoT con procesamiento de banda base sobre SDR propuesta por Chen et al. soporta un ancho de bit flexible, reducción de operaciones vectoriales y transmisiones en *"streaming"* más eficientes, y es evaluada con los sistemas 802.15.4-OQPSK y BLE-GFSK. La implementación de la plataforma es llevada a cabo por el trabajo en conjunto de un MCU (*"Micro Controller Unit"*) y una micro-arquitectura SDR. Ésta última a su vez es conformada por dos unidades computacionales, una SIMD (*"Single Instruction Multiple Data"*) y una escalar. En este caso se hace uso de un procesador ARM M0+ (como parte del MCU), pero sólo para llevar

a cabo tareas de configuración y ruteo de datos dentro de la plataforma, así como el manejo de cálculos relacionados a las tareas de control.

3.6 Discusión del uso de procesadores ARM en plataformas de SDR

Como se puede observar de los trabajos encontrados en la literatura, existen varias aplicaciones desarrolladas bajo la arquitectura de SDR ya sea implementadas sobre procesadores ARM, o al menos incluyendo parte del procesamiento en ellos. Esto debido principalmente a las ventajas que presenta en términos de costes y consumo de potencia con respecto a otras soluciones montadas, por ejemplo, en FPGAs. A ello se le suman las ventajas propias de una plataforma SDR con respecto a sistemas de comunicación fijos, que a pesar de no exhibir los grandes retardos que añade un SDR (debido al procesamiento en línea de las formas de onda), están quedando desplazados para una gran diversidad de aplicaciones.

La mayoría de las implementaciones realizadas sobre procesadores ARM se enfocan en utilizarlos para el procesamiento de capas superiores o bien para llevar a cabo tareas de configuración y control de datos. Y si bien existen soluciones como la mostrada por (Wei et al., 2012) en la que se emplea un procesador ARM para el procesamiento en banda base, se especifica el uso de un procesador ARM de alta gama que puede llegar a tener altos costos y que además sus capacidades y rendimiento pueden resultar sobrados para la aplicación pretendida en esta tesis. Debido a la finalidad de este proyecto, en la cual se pretende tener un radio que ofrezca ventajas tanto en flexibilidad, versatilidad y en costos, se realiza la implementación del esquema de modulación en banda base utilizando la arquitectura de SDR montada sobre un procesador ARM Cortex-M4. Este procesador representa una de las mejores opciones siendo de los procesadores ARM de bajo costo que presenta desarrollo sencillo de software y que ofrece un balance entre rendimiento y consumo de energía. En el siguiente capítulo se describe la implementación del esquema de modulación en banda base realizada sobre este procesador ARM de la familia de los Cortex-M.

Capítulo 4. Implementación del esquema de modulación en banda base sobre SDR

4.1 Introducción

Un sistema de comunicaciones está compuesto de varias etapas, y cada una de ellas tiene un rol específico dentro del mismo que ayuda a lograr que la información sea transmitida y recibida de la mejor manera posible. Una de estas etapas es la modulación, la cual tiene como objetivo adecuar los datos de la fuente para su transmisión de forma adecuada a través de un canal de comunicaciones, ya sean voz, video, imágenes, etc. Los datos a transmitir modulan un parámetro (p. ej. amplitud) de una señal portadora de radio frecuencia. Esto significa que de acuerdo a los datos, se hace variar una o más propiedades de una forma de onda.

El proceso de modulación puede ser dividido en modulación en banda base y modulación pasa banda. En este capítulo se aborda la primera de ellas realizando una breve exploración sobre algunos esquemas de modulación con la finalidad de definir el adecuado para la aplicación que busca el presente proyecto de tesis. Existen algunos estándares que han servido como referencia en la mayoría de los sistemas de comunicación de largo alcance, principalmente en la banda de HF. Uno de ellos es el estándar MIL-STD-188-110C el cual sirvió como referencia para la selección de esquema de modulación en banda base implementado en este proyecto de tesis. En este estándar se definen algunas formas de onda con sus respectivas tasas de datos, por lo que en este capítulo se conduce una breve descripción del mismo.

Posteriormente se muestra la implementación del esquema de modulación en banda base como parte del sistema de comunicación del radio de cada boya. Debido a las características y conveniencias mencionadas en el Capítulo 3, esta implementación se realiza con base en una arquitectura de radio definido por software sobre una tarjeta de desarrollo que cuenta con un procesador ARM. Los resultados de esta implementación servirán como parámetros de entrada para la modulación pasa banda desarrollada en el trabajo realizado en el proyecto de tesis que es complemento del presente, en el cual se realiza el diseño de un “*front-end*” analógico sobre la banda de HF.

4.2 Estándar MIL-STD-188-110C

Este estándar militar estadounidense establece los objetivos de diseño necesarios para garantizar la interoperabilidad y fomentar el rendimiento entre los módems que se emplean en la banda de las

frecuencias de voz para los sistemas de comunicación táctica de largo alcance. En su apéndice D, el estándar MIL-STD-188-110C especifica un conjunto de formas de onda de banda ancha que ocupan anchos de banda desde los 3 kHz hasta los 24 kHz en incrementos de 3 kHz proporcionando tasas de datos para el usuario de entre 75 y 120,000 bps. El estándar plantea ocho diferentes anchos de banda, donde cada uno ofrece hasta 13 distintas tasas de datos utilizando distintos esquemas de modulación en fase y cuadratura tal y como se muestra en la Tabla 2 (Nieto & Furman, 2012).

Tabla 2. Tasas de datos en bps y esquemas de modulación empleados en el US MIL-STD-188-110C.

Waveform Number	0 Walsh	1 BPSK	2 BPSK	3 BPSK	4 BPSK	5 BPSK	6 QPSK	7 8PSK	8 16QAM	9 32QAM	10 64QAM	11 64QAM	12 256QAM	13 QPSK
Bandwidth (kHz)														
3	75	150	300	600	1200	1600	3200	4800	6400	8000	9600	12000	16000	2400
6	150	300	600	1200	2400	3200	6400	9600	12800	16000	19200	24000	32000	
9	300	600	1200	2400	-	4800	9600	14400	19200	24000	28800	36000	48000	
12	300	600	1200	2400	4800	6400	12800	19200	25600	32000	38400	48000	64000	
15	300	600	1200	2400	4800	8000	16000	24000	32000	40000	48000	57600	76800	
18	600	1200	2400	4800	-	9600	19200	28800	38400	48000	57600	72000	90000	
21	300	600	1200	2400	4800	9600	19200	28800	38400	48000	57600	76800	115200	
24	600	1200	2400	4800	9600	12800	25600	38400	51200	64000	76800	96000	120000	

Como se puede observar en la Tabla 2, las formas de onda utilizadas por el estándar corresponden a modulaciones M-arias tanto de variación de fase como de amplitud. Estos esquemas de modulación, además de poder ofrecer distintas tasas de datos, también ofrecen diferentes prestaciones en términos de E_b/N_0 ⁸ como se puede observar en la Figura 27.

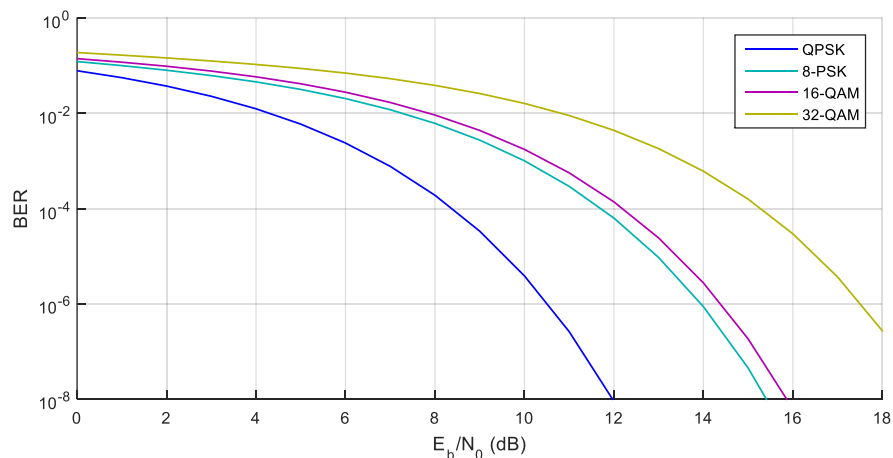


Figura 27. BER para distintos esquemas de modulación digital.

⁸ La relación E_b/N_0 (energía por bit/densidad espectral de potencia de ruido) es un parámetro que mide el rendimiento de la tasa de error de bit (BER) en esquemas de modulación digital.

4.3 Discusión sobre los esquemas de modulación

Existe una gran variedad de esquemas de modulación basados en diferentes principios, en donde cada uno pretende mejorar ciertos parámetros de acuerdo a la aplicación en la que se desee implementar. Cada uno de estos esquemas representa la base de muchas otras modulaciones más complejas desarrolladas a lo largo de la trayectoria de los sistemas de comunicación. No obstante, para elegir un esquema de modulación se debe considerar las ventajas y desventajas que cada uno de ellos presenta. Como se ha mencionado, previamente se han desarrollado estándares de comunicación para enlaces de larga distancia sobre la banda de HF, lo cual corresponde a las características de la aplicación del presente trabajo de tesis. Debido a esto, se ha tomado como referencia el estándar MIL-STD-188-110C que especifica distintas formas de onda (Ver Tabla 2).

En el estándar mencionado, se especifica la posibilidad de hacer uso de la modulación QAM (*“Quadrature Amplitude Modulation”*) en la que se permite a los componentes en fase y cuadratura ser independientes, por lo que se puede tener variación tanto en fase como en amplitud (Haykin, 2001). No obstante, el receptor se vuelve más complejo y requiere de mayor sincronización. Por otro lado, también se especifica el uso de esquemas de modulación PSK que tiene como ventaja presentar una potencia uniforme para todos los símbolos, lo que resulta en la simplificación del diseño de amplificadores y etapas de recepción. En este contexto, un esquema PSK presenta mayor simplicidad en comparación con esquemas híbridos como QAM en los que la potencia de los símbolos no es la misma. Además, esquemas como QPSK (*“Quadrature Phase Shift Keying”*) ofrecen mejores prestaciones en cuanto a la relación energía por bit y densidad espectral de potencia del ruido en comparación con otras modulaciones como las presentadas en la Figura 27.

Otros aspectos importantes son la probabilidad de error y la eficiencia en la utilización del ancho de banda disponible, ya que generalmente el radio espectro disponible es muy limitado. En el esquema PSK, el incremento del número de fases resulta en la posibilidad de transmitir una mayor cantidad de información sobre el mismo ancho de banda. Sin embargo con ello también se incrementa la sensibilidad ante ruido e interferencia. Ahora bien, en comparación con BPSK, el esquema QPSK puede ofrecer una mayor eficiencia espectral con la misma probabilidad de error.

Debido a todo lo mencionado anteriormente se elige QPSK como esquema de modulación en banda base, que además de haber sido trabajado ampliamente por el estándar MIL-STD-188-110C en comunicaciones de largo alcance, se adapta a la baja tasa de datos de la aplicación de esta tesis. Cabe mencionar que se

pretende que eventualmente este sistema pueda funcionar para comunicaciones subacuáticas las cuales operan dentro del rango acústico. Por este motivo se restringió el ancho de banda a 22 kHz, y de esta manera dejar abierta la posibilidad de realizar un esquema de modulación para módems subacuáticos comunicados a través de transductores acústicos. Este ancho de banda limita la tasa de datos del radio, sin embargo resulta más que suficiente para la aplicación de monitoreo mediante el uso de boyas que se considera de acuerdo al perfil de tráfico mostrado enseguida (sección 4.3.1).

4.3.1 Perfil de tráfico

Un aspecto importante que debe ser tomado en cuenta es la cantidad de tráfico que se manejará dentro de la red. El tráfico generado corresponde a los datos generados por los sensores incluidos en cada una de las boyas. Estos sensores recolectan información acerca de diversas variables de interés, lo cual permite realizar el monitoreo de determinadas regiones marinas. En la Tabla 3 se muestra el tráfico a generar por cada boya considerada para este proyecto de tesis, el cual incluye los datos de los diversos sensores, así como datos de identificación, fecha y hora.

Estos 243 caracteres (de 8 bits cada uno) son generados cada 15 minutos en cada boya, lo que representa una tasa de bits de información proveniente de los sensores (R_{Sensores}) de:

$$R_{\text{Sensores}} = \left(243 \frac{\text{caracteres}}{15 \text{ min}}\right) \left(\frac{8 \text{ bits}}{1 \text{ caracter}}\right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}}\right) = 2.16 \text{ bps} \quad (3)$$

De tal manera que considerando esta baja tasa de datos, el ancho de banda de 22 kHz previsto anteriormente para la modulación y eventualmente un mecanismo de acceso al medio (descrito en el Capítulo 5), es suficiente para transmitir la información.

Tabla 3. Tráfico generado por una boya de monitoreo.

Sensor	Variable	Valor	No. Caracteres
	ID	A	1
	Año	2015	4
	Mes	10	2
	Día	13	2
	Hora	10	2
	Min	10	2
	Seg	10	2
	Voltaje (Banco de baterías)	14.95	5
RBRConcerto (CTD+pH+O2)	C (mS/cm)	84.999	6
	T (°C)	34.999	6
	D (dBar)	1999.99	7
	pH	12.99	5
	O2 Disuelto (%)	99.99	5
	Voltaje (externo)	14.95	5
AIRMAR	Velocidad del viento (m/s)	39.9	4
	Dirección del viento (°)	359.9	5
	Cabeceo (°)	+49.9	5
	Balanceo (°)	+49.9	5
	Orientación (°)	360	3
	Temperatura del aire (°C)	54.9	4
	Sensación térmica (°C)	54.9	4
	Presión barométrica (mBar)	1099.9	6
	GPS (Latitud °)	+31.855	7
GPS (Longitud °)	+116.655	8	
Pro-Oceanus	[agua] CO2 (ppm)	699.999	7
	[agua] IRGA T (°C)	20.1	4
	[agua] Humedad? (mbar)	99.999	6
	[agua] HT (°C)	30.1111	7
	[agua] GSP (mBar)	1000	4
	[agua] IDT (°C)	21.1	4
	[agua] IST (°C)	22.2	4
	[aire] CO2 (ppm)	699.999	7
	[aire] IRGA T (°C)	20.1	4
	[aire] Humedad? (mbar)	99.999	6
	[aire] HT (°C)	30.1111	7
	[aire] GSP (mBar)	1000	4
	[aire] IDT (°C)	21.1	4
	[aire] IST (°C)	22.2	4
SAMI CO2	Día de año	365.00014	9
	pCO2 (ppm)	699.1111111	12
	T (°C)	39.9	4
	Voltaje (Batería Interna)	11.17	5
Cantidad total de caracteres			243

4.3.2 Esparcimiento

Por otra parte, debido a que el esquema de modulación debe ser lo suficientemente robusto para combatir los efectos del ruido y mitigar las interferencias presentes en el canal de comunicación, se considera también el uso de una técnica de espectro esparcido. Si bien existen diversas formas de onda de esparcimiento empleadas en tecnologías como ZigBee⁹ o Bluetooth¹⁰, luego de realizar una evaluación se

⁹ Más información disponible en <http://www.zigbee.org/>

¹⁰ Más información disponible en <https://www.bluetooth.com/>

decidió seguir un esquema DSSS (*“Direct-Sequence Spread Spectrum”*) utilizando secuencias Barker pseudo-aleatorias (mostrada en la sección 4.5.1) que son ampliamente utilizadas en el estándar IEEE 802.11 y que resultaron suficientes al considerar también el sistema de acceso al medio que se describe en el Capítulo 5. La implementación de este esquema de esparcimiento (Ver Figura 28) permite que la señal en banda base cuente con resistencia frente a ruido e interferencias ya que la técnica de DSSS permite mejorar la relación señal a ruido (SNR por sus siglas en inglés) ofreciendo también una ganancia de procesamiento de acuerdo a la ecuación (4).

$$\text{Ganancia de procesamiento} = 10 \log_{10} \left(\frac{R_c}{R_b} \right) \quad (4)$$

Donde R_c corresponde a la tasa de chips (chips por segundo) y R_b a la tasa de datos (bits por segundo) de la señal a transmitir.

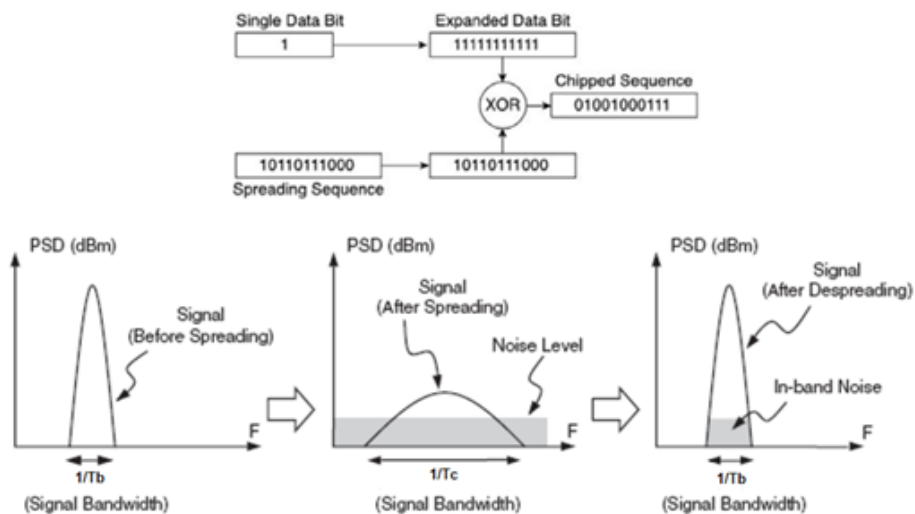


Figura 28. Esparcimiento DSSS.

A continuación se describe brevemente el equipo utilizado para la implementación de dicho esquema de modulación sobre una arquitectura SDR y se describe también la metodología del trabajo realizado para lograr esta finalidad.

4.4 Equipo utilizado

La implementación del esquema de modulación sobre una plataforma de SDR se realizó en un kit de desarrollo de STMicroelectronics el cual se describe brevemente a continuación.

4.4.1 STMicroelectronics STM32F429I-DISCO

El kit de desarrollo STM32F429I-DISCO (Ver Figura 29) es un dispositivo de bajo costo basado en un procesador ARM[®] Cortex[™] – M4 RISC de 32 bits de alto rendimiento que trabaja a una frecuencia de operación máxima de 180 MHz. Las características de su núcleo Cortex – M4 presentan precisión simple para el tratamiento de datos e instrucciones. Entre otros componentes, la tarjeta tiene habilitados puertos I²C, I²S, SPI, USB, UARTs, una pantalla LCD, tres ADCs de 12 bits, dos DACs y doce temporizadores de 16 bits de propósito general. Además esta tarjeta cuenta con 2 Mbytes de memoria FLASH, 256 Kbytes de memoria RAM y una unidad de protección de memoria que mejora la seguridad del conjunto de instrucciones de DSP que se llevan a cabo para la aplicación requerida.

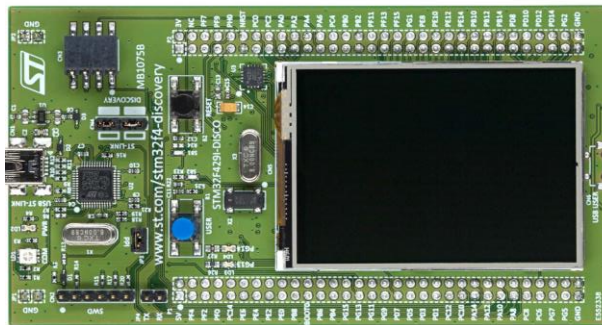


Figura 29. Kit de desarrollo STM32F429I-DISCO utilizado para la implementación del esquema de modulación en banda base (STMicroelectronics, 2015).

Para la programación de esta tarjeta se hace uso de STM32CubeMX en conjunto con *IAR Embedded Workbench* (Lenguaje C). El primero es un software que facilita el desarrollo de la plataforma inicial del proyecto reduciendo tiempo y esfuerzo. El segundo permite el contacto directo con la programación de la tarjeta para realizar una tarea específica, en este caso la implementación del esquema de modulación QPSK en banda base.

4.5 Implementación del esquema de modulación en banda base

A continuación se muestra la metodología seguida para la implementación física del esquema de modulación. A grandes rasgos, la idea de esta implementación se basa en definir previamente las muestras de cada una de las señales base de la forma de onda temporal, para posteriormente realizar el mapeo y procesamiento correspondiente de cada símbolo de información usando dichas señales base. Luego de ello, las muestras resultantes son pasadas a un convertidor digital a analógico que finalmente se encarga de proporcionar la señal modulada en banda base. En la Figura 30 se muestra un diagrama esquemático de la implementación realizada.

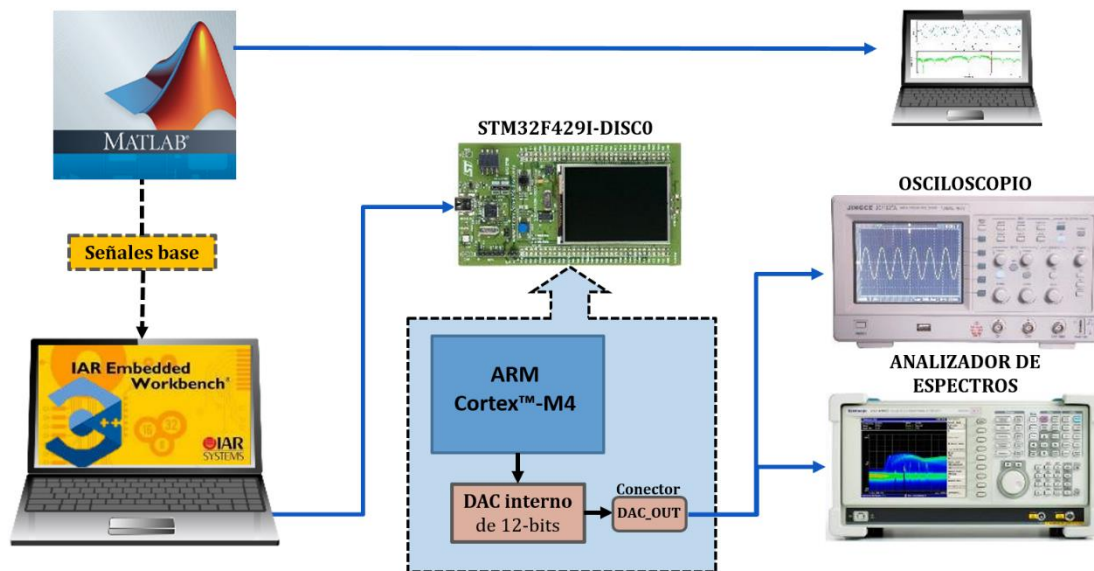


Figura 30. Diagrama básico de la implementación del esquema de modulación sobre la STM32F429I-DISCO.

Las señales base se realizaron haciendo uso del software MATLAB®, en donde de igual manera se corrieron simulaciones del sistema propuesto para comparar los resultados tanto de simulación como de implementación física. Las señales base generadas se ingresaron al programa realizado en *IAR Embedded Workbench* en donde se definen las tareas necesarias para el acondicionamiento de la señal modulada. Posteriormente el programa se cargó a la STM32F429I-DISCO y los resultados fueron analizados con ayuda de un osciloscopio digitalizador de alta tasa de muestreo y un analizador de espectros. Para la obtención de la señal modulada en tiempo se optó por hacer uso de uno de los DACs internos del kit de desarrollo empleado, el cual maneja palabras de 12 bits.

4.5.1 Descripción de la implementación

En primera instancia se establecieron las configuraciones iniciales de la STM32F429I-DISCO mediante el software STM32CubeMx, en donde se definen aspectos como los puertos a utilizar, configuraciones de reloj, habilitación de temporizadores, ADCs, DACs, entre otros. Además de las configuraciones básicas, en este caso se definieron todos los requerimientos necesarios para el uso de un temporizador y un DAC.

La frecuencia de muestreo para esta implementación se controló mediante interrupciones en el programa, en las cuales se manda escribir una muestra sobre el DAC cada determinado tiempo. Por lo cual, en un inicio fue necesario determinar la frecuencia máxima de interrupción soportada por la tarjeta. Estas pruebas fueron realizadas escribiendo en el DAC sin hacer cálculo alguno en el programa, lo cual arrojó que la frecuencia máxima de interrupción (f_{\max_IT}) es de:

$$f_{\max_IT} = 830 \text{ kHz} \quad (5)$$

Es importante mencionar que la f_{\max_IT} no es equivalente a la máxima frecuencia de muestreo proporcionada por el procesador. Esto debido a que no se puede utilizar la frecuencia máxima ya que es necesario considerar el tiempo que requiere el procesador para obtener los valores de las muestras correspondientes a la modulación digital. Sin embargo, esta frecuencia resulta muy sobrada para las señales en banda base de aproximadamente 11 kHz (ocupando un ancho de banda total de 22 kHz) que se manejan en este proyecto.

Otro de los aspectos en los que se trabajó en el presente proyecto de tesis fue en incluir la etapa de IF dentro de la arquitectura digital de SDR. Es decir, incluir la modulación pasa banda de la señal en banda base montada sobre IF. Por lo tanto, el conocer la frecuencia máxima de interrupción fue fundamental para poder establecer una frecuencia de muestreo máxima para la portadora de IF tomando en cuenta el teorema de Nyquist mencionado anteriormente en la ecuación (2).

Con la finalidad de tener una frecuencia de muestreo estable en la tarjeta considerando el procesamiento de la modulación y un múltiplo entero de la frecuencia de la portadora en banda base ($f_b = 11 \text{ kHz}$), se estableció una frecuencia de muestreo máxima ($f_{s_{\max}}$) de:

$$f_{s_{\max}} = 660 \text{ kHz} \quad (6)$$

Además, debido a que esta implementación está pensada para una aplicación que no requiere de una alta tasa de datos, la velocidad de transmisión (R_b) se estableció en:

$$R_b = 2 \text{ kbps} \quad (7)$$

Tomando en cuenta estos parámetros, en seguida se provee una explicación más detallada de dicha implementación.

En la modulación QPSK los símbolos se conforman de dos bits (*dibits*). Se pueden considerar funciones base, las cuales son ortogonales entre sí y están definidas como:

$$\begin{cases} \varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{Tb}} \cos(2\pi f_c t) \\ \varphi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{Tb}} \text{sen}(2\pi f_c t) \end{cases} \quad (8)$$

Por lo que la expresión para las señales QPSK queda definida de la siguiente manera:

$$S_i(t) = \sqrt{Eb} \left\{ \cos \left[(2i - 1) \frac{\pi}{4} \right] \varphi_1(t) - \text{sen} \left[(2i - 1) \frac{\pi}{4} \right] \varphi_2(t) \right\}, i = 1, \dots, 4 \quad (9)$$

En donde la parte del coseno corresponde al componente en fase y la parte del seno corresponde al componente en cuadratura. De manera que para cada uno de los cuatro símbolos se transmite una señal sinusoidal que representa la suma de ambos componentes. Las fases de cada una de las señales correspondientes a cada símbolo se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Caracterización del espacio de señales de QPSK.

i	Fase de la señal	Dibit con codificación Gray	S_{i1}	S_{i2}
1	$\pi/4$	10	\sqrt{Eb}	$-\sqrt{Eb}$
2	$3\pi/4$	00	$-\sqrt{Eb}$	$-\sqrt{Eb}$
3	$5\pi/4$	01	$-\sqrt{Eb}$	\sqrt{Eb}
4	$7\pi/4$	11	\sqrt{Eb}	\sqrt{Eb}

En tabla anterior, S_{i1} y S_{i2} representan las coordenadas de los puntos de mensaje del diagrama de espacio de señales de la Figura 31.

La señal temporal producida por una modulación QPSK puede ser vista como la suma de dos señales BSPK ortogonales entre sí, tal y como se muestra en la Figura 32. La ortogonalidad entre estas dos señales (fase y cuadratura) permite que puedan ser recuperadas en el receptor después de su transmisión.

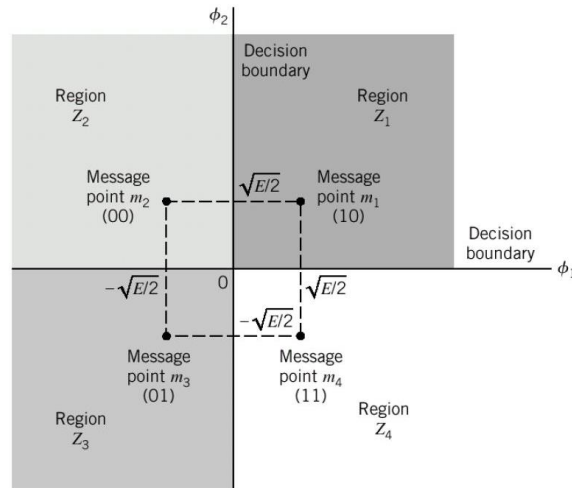


Figura 31. Diagrama de espacio de señales para un sistema QPSK coherente (Haykin, 2001).

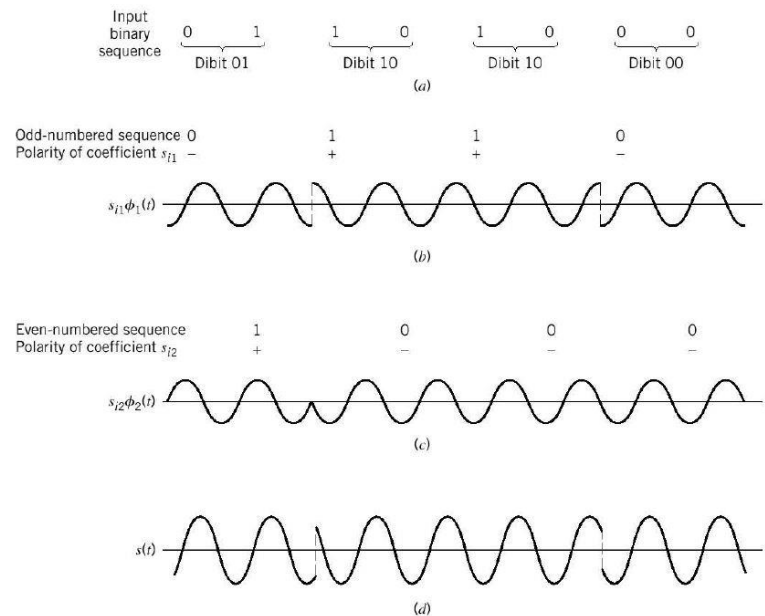


Figura 32. a) Secuencia binaria de entrada, b) Señal para datos de fase, c) Señal para datos de cuadratura, d) Señal temporal QPSK (Haykin, 2001).

En la Figura 33 se puede observar un diagrama a bloques con cada una de las principales tareas programadas en la tarjeta para realizar la implementación del esquema modulación QPSK.

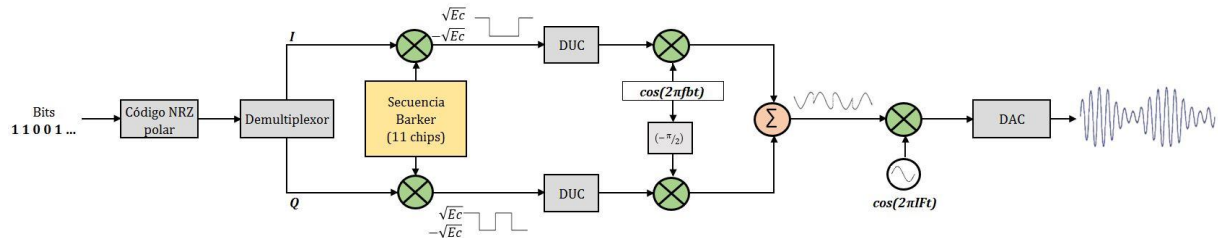


Figura 33. Diagrama a bloques de la implementación del esquema de modulación QPSK sobre la STM32F429I-DISCO.

En un principio se realiza una codificación de no retorno a cero (*“Non Return to Zero”* - NRZ) polar, en la cual los bits de información provenientes de la fuente en configuración de ceros y unos, se trasladan a un formato de unos negativos y unos positivos respectivamente. Posteriormente estos bits ya codificados son pasados a un demultiplexor en donde se dividen los elementos de fase (I) y los elementos de cuadratura (Q), de manera que los elementos impares corresponden a los de cuadratura y los elementos pares corresponden a los de fase.

Cada dato tanto de fase como de cuadratura es esparcido haciendo uso de una secuencia Barker pseudo-aleatoria con longitud de 11 chips. Como se mencionó anteriormente, en este caso se utiliza la técnica de espectro esparcido como método de protección contra interferencias, haciendo que la transmisión sea más robusta frente errores. Esta secuencia está diseñada para que aproximadamente aparezcan la misma cantidad de unos negativos y unos positivos, e introduce una redundancia que permite la recuperación del bit aunque gran parte de este se haya perdido. Además, de acuerdo a la ecuación (4) proporciona una ganancia de procesamiento de 10.41 dB. La secuencia Barker utilizada es la siguiente (Golomb & Scholtz, 1965):

$$SB_{11} = [+1, +1, +1, -1, -1, -1, +1, -1, -1, +1, -1] \quad (10)$$

Luego del esparcimiento cada chip es mapeado con su respectiva señal base, la cual tiene duración de un símbolo. Como se mencionó anteriormente, estas señales base son definidas previamente y corresponden a una onda cosenoidal para los datos de fase y a una onda senoidal para los datos de cuadratura, las cuales posteriormente son sumadas para formar la señal temporal de la modulación QPSK. Estas señales correspondientes a la modulación en banda base idealmente se encontrarían muestreadas de acuerdo a

lo establecido en (4). No obstante, esta frecuencia de muestreo controlada por interrupciones en la tarjeta, se define mediante el establecimiento de las variables *Counter Period* y *Prescaler*, las cuales sólo pueden adquirir valores enteros de 0 a 65535. De manera que la frecuencia de muestreo (f_s) en la tarjeta se define como:

$$f_s = \frac{180 \text{ MHz}}{(\text{Prescaler}+1)(\text{CounterPeriod}+1)} \quad (11)$$

Por lo que de acuerdo a esta expresión la frecuencia más cercana a lo establecido en (4) es de 659.3406593 kHz. Por otro lado, tomando en cuenta que los símbolos son formados con dos chips para el esquema de modulación QPSK, la tasa de bits definida en (5) corresponde a una tasa de símbolo (R_s) de 11 *ksp/s*. La relación entre la frecuencia de muestreo y la tasa de símbolo está dada por:

$$R_s = \frac{f_s}{M_{porSim}} \quad (12)$$

En donde *MporSim* representa el número de muestras por símbolo. Por lo tanto, con base en la ecuación (12) y con la finalidad de asegurar un número entero de muestras considerando la f_s calculada con la ecuación (11), la tasa de símbolo (R_s) queda definida en 10.98901099 *ksp/s* para un total de 60 muestras por símbolo. La señal en tiempo de esta modulación QPSK y su respectivo espectro en frecuencia se muestran en la primera parte de la sección de resultados de la implementación del esquema de modulación.

Para el caso de la señales en banda base, la f_s establecida representa un factor de sobremuestreo muy por encima de lo necesario. Sin embargo dicho muestreo tiene la finalidad de solventar los requerimientos de la modulación pasa banda con la portadora de IF. Por lo que luego de tener la señal modulada en banda base, ésta es trasladada a la frecuencia intermedia requerida mediante un procedimiento similar al realizado para la modulación en banda base haciendo uso de señales base predefinidas. Finalmente las muestras resultantes de dicha modulación son pasadas al DAC, el cual proporciona la señal temporal de la modulación QPSK pasa banda.

Con la finalidad de ahorrar tiempo y procesamiento en el acondicionamiento de la señal modulada, en la versión final de la implementación se realiza el mapeo de símbolos conformados por dos chips, directamente con señales base ya moduladas a la frecuencia de IF. La amplitud de estas señales base está definida de acuerdo las palabras de 12 bits (de 0 a 4095 niveles de amplitud) que acepta el DAC utilizado.

Dentro de la plataforma de SDR definida en este trabajo se dejaron establecidos tres posibles valores de IF. Cada una de estas frecuencias representa un factor de muestreo diferente tomando en cuenta la frecuencia de muestreo definida previamente. De tal manera que de acuerdo con el factor de muestreo la frecuencia intermedia (IF) se define como:

$$IF = \frac{f_s}{FactorM} \quad (13)$$

Tomando en cuenta el teorema de Nyquist de la ecuación (2), el factor de muestreo de cada IF se estableció en 4, 5 y 6. Por lo que conforme a la ecuación (13), para este caso las IFs se definieron en 164.8351648 kHz, 131.8681319 kHz y 109.8901099 kHz respectivamente. Los resultados de la modulación pasa banda para estas tres IFs se muestran en la sección 4.5.2.2 de la implementación del esquema de modulación.

4.5.2 Resultados de la implementación

Para la evaluación del esquema de modulación en banda base montado sobre una arquitectura SDR, se llevaron a cabo simulaciones del sistema propuesto, para luego compararlas con el producto de la implementación física tal y como se muestra en la Figura 30. Cabe mencionar que para estos experimentos se definió una secuencia pseudo-aleatoria de bits de información como entrada del modulador digital. A continuación se muestran tanto los resultados de simulación como los resultados de la implementación física descrita en la sección 4.5.1, ambos para la etapa de modulación en banda base y para el montaje de dicha señal sobre una portadora de IF.

4.5.2.1 Modulación en banda base

Con la finalidad de corroborar el funcionamiento del sistema, se realizaron simulaciones siguiendo el mismo esquema propuesto en la implementación física. En la Figura 34 se muestran los resultados de la simulación realizada hasta la etapa de modulación en banda base, considerando todos los parámetros definidos en la sección 4.5.1.

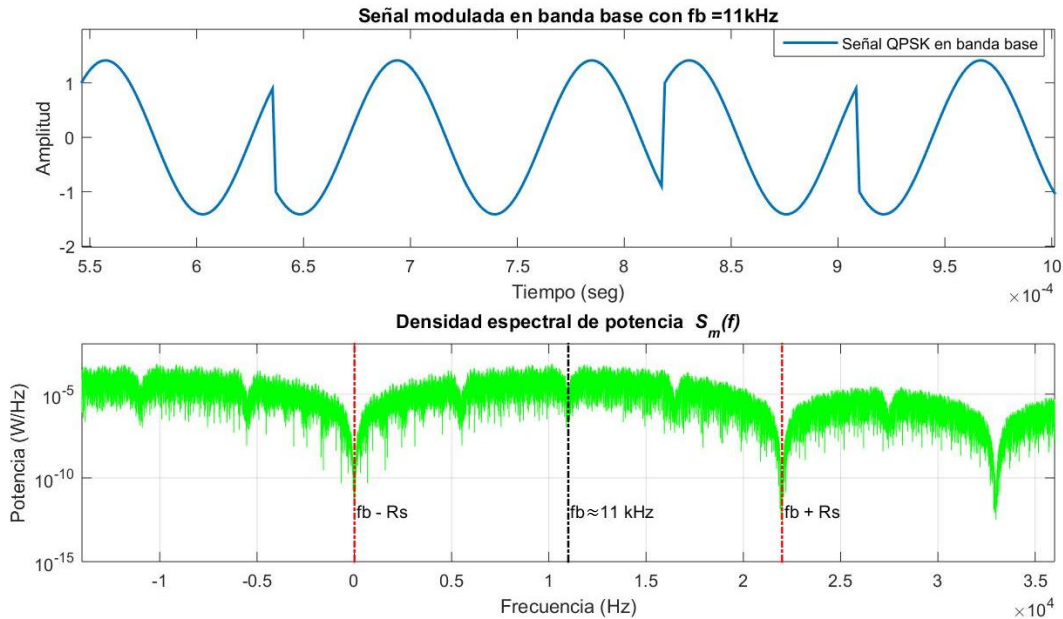


Figura 34. Resultados de la simulación del esquema de modulación en banda base QPSK.

En la Figura 34 se muestra tanto la señal en tiempo obtenida de la modulación de los datos, así como su densidad espectral de potencia ($S_m(f)$). En la Figura 34a se ilustran únicamente cinco símbolos, los cuales equivalen a aproximadamente $455\ \mu\text{seg}$ de la señal en el tiempo. Se puede observar la modulación de los chips contenida en la fase de la onda sinusoidal, en la cual debido a que es una modulación QPSK, cada símbolo contiene la información de dos chips (En la Figura 34a sólo se observan dos fases distintas). Por otro lado, en la Figura 34b se muestra la distribución de energía de dicha señal en el dominio de la frecuencia. En esta figura, se puede observar que una mayor parte de energía se encuentra contenida en el lóbulo principal centrado a la frecuencia de la portadora en banda base de aproximadamente 11 kHz. Los cortes de cada lóbulo se encuentran situados en múltiplos de la tasa de símbolo a partir de la frecuencia de la portadora, que para el caso del lóbulo principal se encuentran en 0 kHz ($f_b - R_s$) y en aproximadamente 22 kHz ($f_b + R_s$) tal y como se observa en la Figura 34b.

Los resultados de simulación fueron comparados con los de la implementación realizada sobre la STM32F429I-DISCO, los cuales son mostrados en la Figura 35. En esta figura se puede observar que la señal en tiempo obtenida con ayuda de un osciloscopio digitalizador de alta frecuencia, va acorde con la señal obtenida en la simulación, sin embargo ésta se encuentra un poco más deformada debido a las capacidades del DAC y a las distorsiones ocasionadas durante la medición. No obstante, esta ligera deformidad de la señal no impide identificar los cambios de fase que contienen la información a transmitir. La señal en banda base ilustrada fue muestreada a una tasa de 1 Megamuestras/segundo.

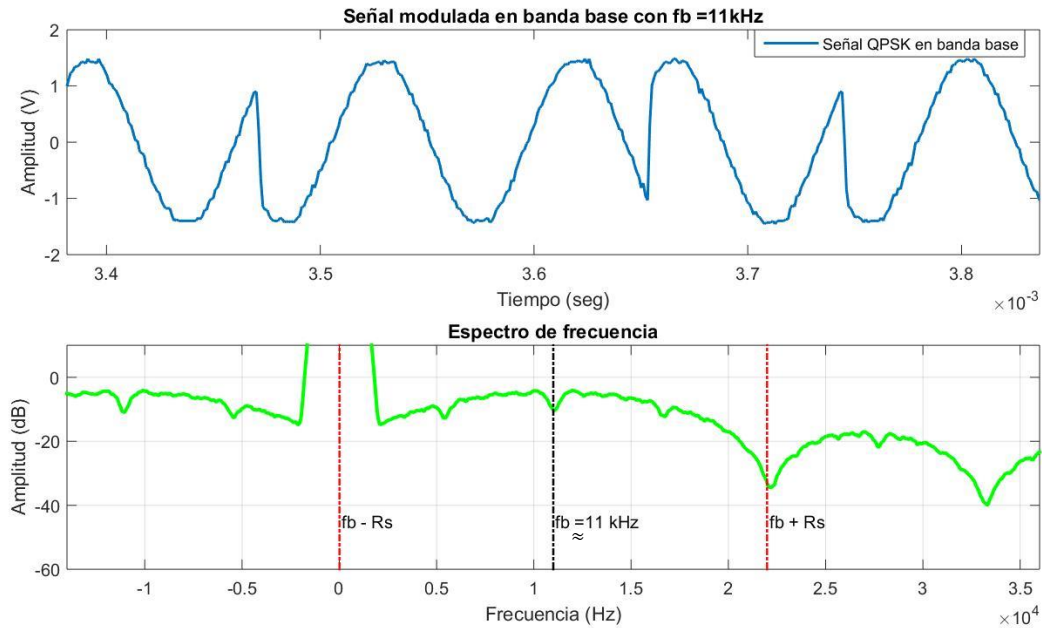


Figura 35. Resultados de la implementación física del esquema de modulación en banda base QPSK.

Para el caso del análisis en frecuencia de la transmisión en banda base, al igual que para la señal en el dominio del tiempo se obtuvieron los resultados esperados. Sin embargo, a diferencia de la densidad espectral de potencia obtenida para las simulaciones medida en W/Hz , en este caso se obtiene un trazo promedio de la potencia de la señal medida en decibeles (dB). Este espectro de frecuencia se muestra en la Figura 35b y fue obtenido haciendo uso de un analizador de espectros convencional. En este espectro se observa que para las frecuencias muy cercanas a 0 Hz existe un pico de potencia muy elevado, lo cual se debe a los componentes de corriente directa presentes durante la medición. Por otro lado, se puede observar que tanto en la simulación como en la implementación física, para el análisis de frecuencia se tienen unas ligeras caídas de potencia simétricas en los lóbulos del espectro, esto es debido al uso de las secuencias Barker en el esparcimiento de los bits de información.

4.5.2.2 Modulación pasa banda sobre IF

Luego de la etapa de modulación en banda base se realizó una modulación pasa banda trasladando la señal en banda base hacia la IF, para lo cual de igual manera se realizaron simulaciones para corroborar los resultados de la implementación realizada en SDR. Como se mencionó en la sección 4.5.1, en este trabajo se dejaron establecidas tres posibles IFs cada una representando distintos factores de muestreo con respecto a la f_s definida. En la Figura 36 y en la Figura 37 se muestran los resultados de simulación e implementación física para la frecuencia intermedia de 109.8901099 kHz, *respectivamente*. La señales

obtenidas de la implementación en el osciloscopio digitalizador para esta etapa fueron muestreadas a una tasa de 2.5 Megamuestras/segundo.

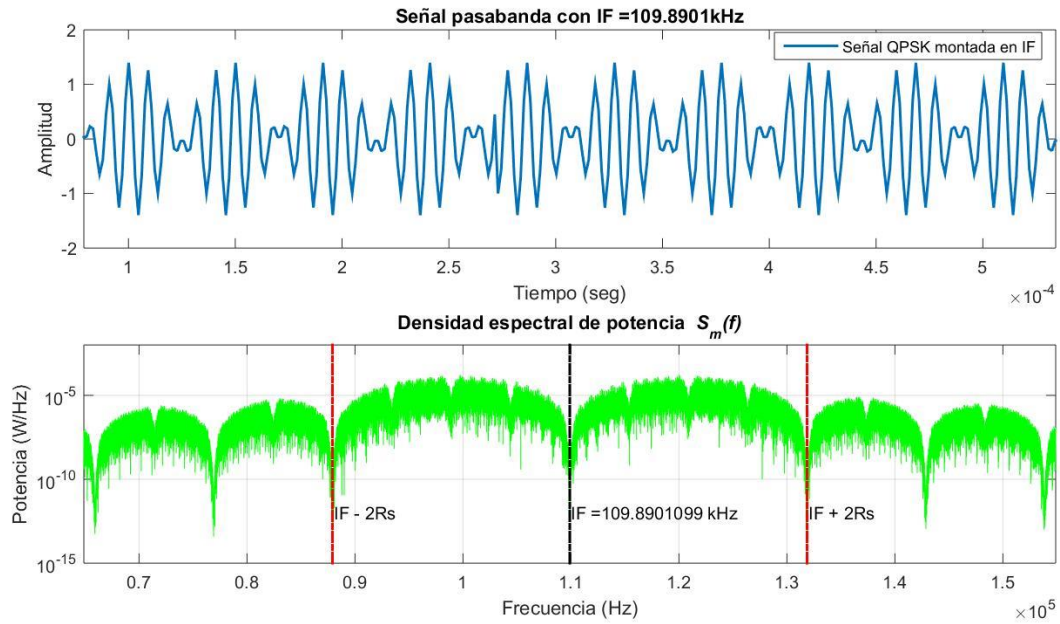


Figura 36. Resultados de simulación de la señal QPSK modulada sobre una portadora de IF de 109.8901099 kHz.

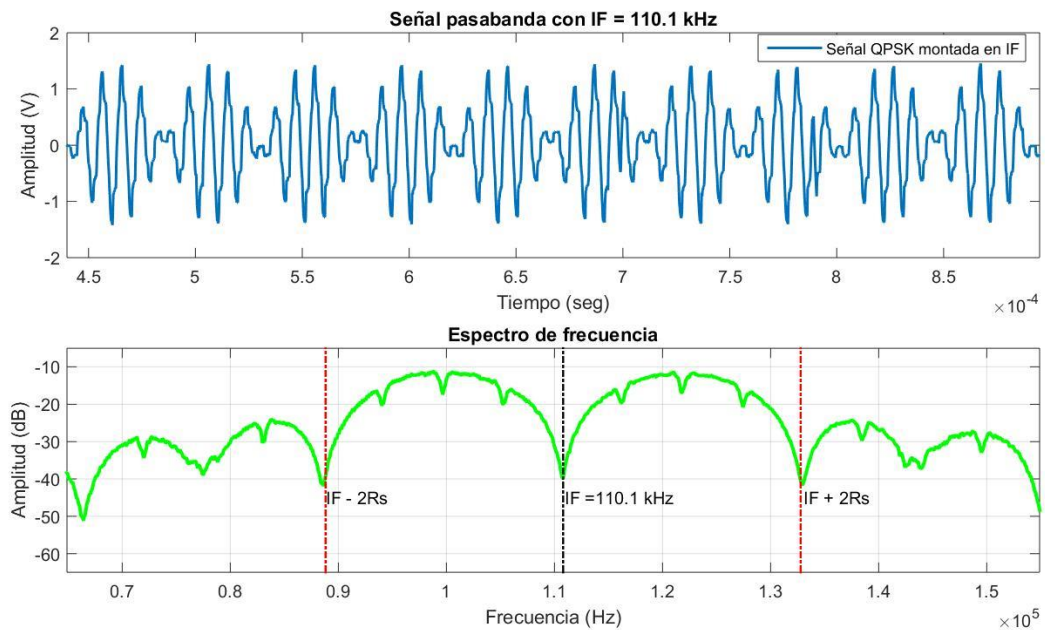


Figura 37. Resultados de la implementación física de la señal QPSK modulada sobre una portadora de IF de 109.8901099 kHz.

En la Figura 36 se pueden observar los resultados de simulación de la señal pasa banda tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. Para el caso de la señal en tiempo se puede observar que los cambios de fase en la señal son menos evidentes que para el caso de la señal modulada en banda base, sin embargo la información sigue estando contenida en la fase de esta señal. En el análisis en frecuencia de la señal se puede observar el traslado del espectro de banda base hacia la portadora de IF, en este caso 109.8901099 kHz. Debido a este traslado en frecuencia se tienen dos lóbulos principales requiriendo un mayor ancho de banda, por lo que en etapas posteriores esta señal debe ser filtrada. En la Figura 37, se observa que los resultados de la implementación son los esperados, sin embargo debido a la inexactitud de la medición, existe un ligero desfasamiento de la IF, obteniendo una frecuencia intermedia de aproximadamente 110.1 kHz. En seguida se muestran los resultados de simulación e implementación para las dos IFs restantes.

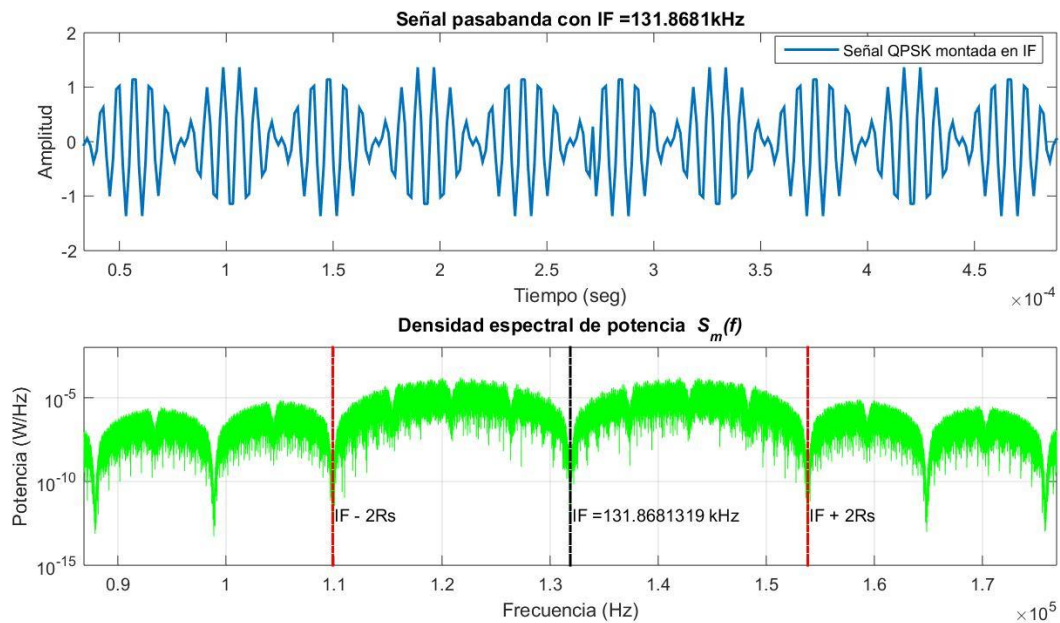


Figura 38. Resultados de simulación de la señal QPSK modulada sobre una portadora de IF de 131.8681319 kHz.

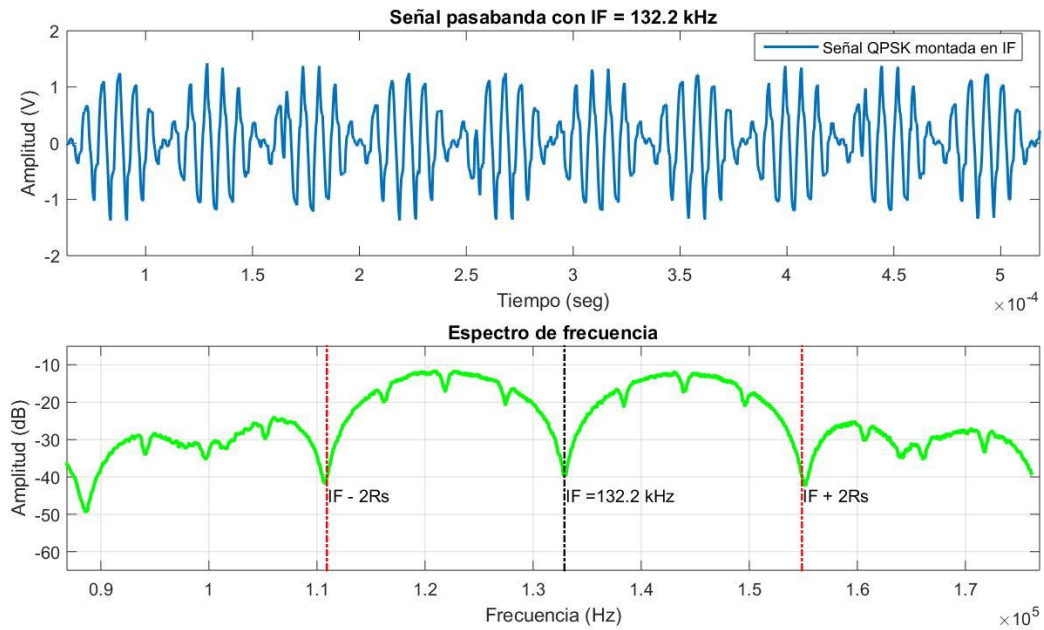


Figura 39. Resultados de la implementación física de la señal QPSK modulada sobre una portadora de IF de 131.8681319 kHz.

Al igual que para el caso anterior y debido a las razones ya mencionadas, en los resultados de la implementación física con las frecuencias intermedias de 131.8681319 kHz y 164.8351648 kHz mostrados en la Figura 39 y Figura 41, se obtiene un ligero desfasamiento de frecuencia obteniendo aproximadamente 132.2 kHz y 165.3 kHz respectivamente. Sin embargo, más allá de ello los resultados tienen el comportamiento esperado, el cual es corroborado con los resultados de simulación observados en la Figura 38 y Figura 40 para cada una de estas IFs.

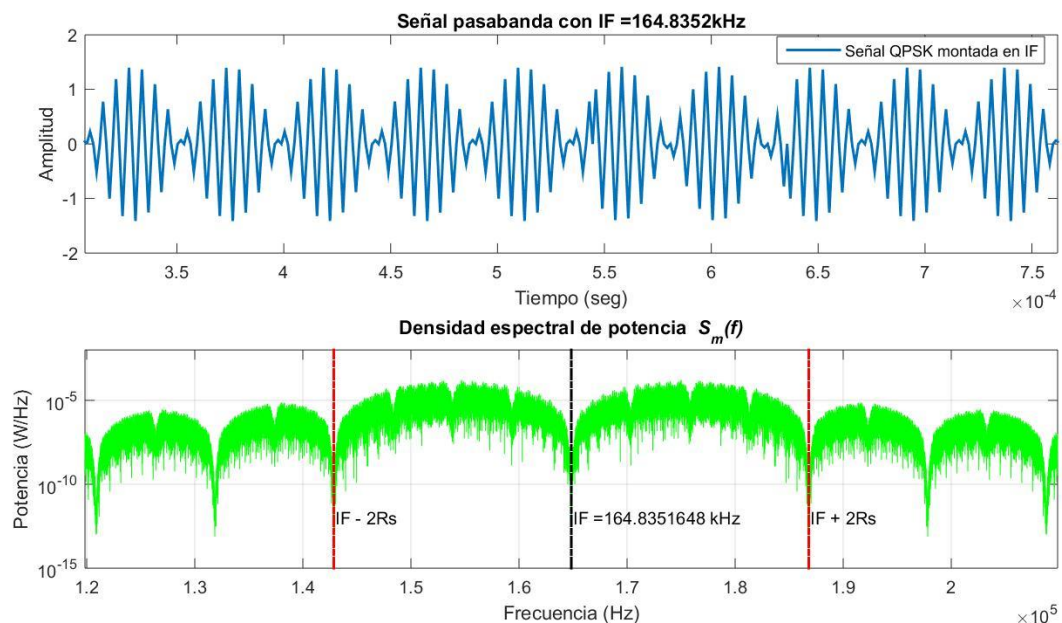


Figura 40. Resultados de simulación de la señal QPSK modulada sobre una portadora de IF de 164.8351648 kHz.

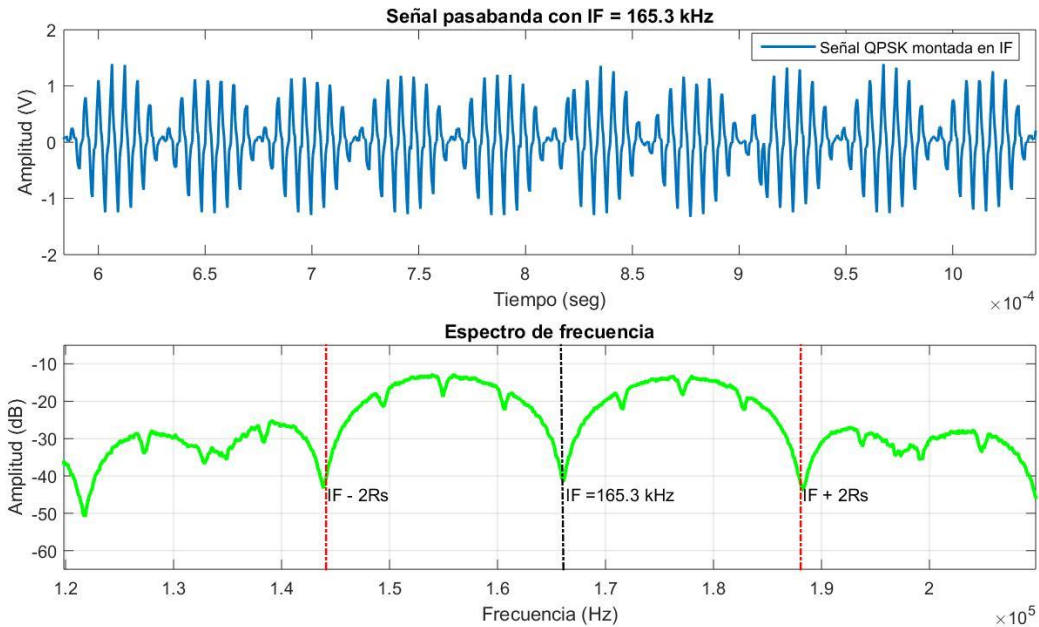


Figura 41. Resultados de la implementación física de la señal QPSK modulada sobre una portadora de IF de 164.8351648 kHz.

Como se mencionó anteriormente, los resultados mostrados fueron obtenidos estableciendo una frecuencia de muestreo de 659.3406593 kHz, la cual representó aproximadamente una frecuencia máxima estable para el procesamiento requerido. Esta frecuencia además es adecuada para obtener un número entero de muestras por símbolo considerando la tasa de símbolo, tal y como se enuncia en la ecuación (12). En las señales tanto de la simulación como de la implementación física realizadas mostradas de la Figura 36 a la Figura 41, cada una de las tres frecuencias intermedias son múltiplos enteros de la tasa de símbolo, con lo cual se prevé un menor número de errores en la transmisión, ya que en estas condiciones se tiene una tasa de bit erróneo (BER) mínima para los esquemas PSK (Rouphael, 2008).

Se puede observar que cuando se tiene un mayor factor de muestreo ($IF = 109.8901099$ kHz) la señal en tiempo tiene una forma más suavizada, es decir una señal sinusoidal más definida en comparación con aquellas que presentan un menor número de muestras por ciclo. Conforme se reduce este factor de muestreo se obtiene una IF más alta pero también se tiene una señal sinusoidal menos distinguible. Sin embargo, de acuerdo a (2) una señal puede ser reconstruida siempre y cuando se realice un muestreo a más del doble de la frecuencia de la señal original, por lo cual aunque no se tenga una señal temporal distinguible, es posible recuperar la información contenida en ella. En el presente trabajo no se llegó a tal límite debido a que sólo se pretendió mostrar que es posible realizar la modulación pasa banda de la etapa de IF dentro de la arquitectura de SDR.

Por otro lado, cabe mencionar que pensando en la sincronización, se añadieron dos secuencias Barker de 13 bits al inicio de cada secuencia pseudo-aleatoria de datos modulada. Esto con la finalidad de poder identificar el principio de los datos de información en una señal de datos recibida. Además se añadió un preámbulo de 16 bits (compuesto de unos binarios) que tiene la finalidad de facilitar la compensación de DC. La secuencia Barker implementada con este objetivo se muestra a continuación:

$$SB_{13} = [+1, +1, +1, +1, +1, -1, -1, +1, +1, -1, +1, -1, +1] \quad (14)$$

4.5.2.3 Demodulación

Como se ha mencionado anteriormente, la señal banda resultante de esta implementación es dirigida hacia el “*front-end*” analógico, realizado en el trabajo de tesis complementario al presente, para su posterior transmisión sobre la banda de HF. Luego de ello, otro de los aspectos que se pretendía cubrir en este trabajo, era realizar una demodulación y decodificación fuera de línea a partir de la señal capturada con el osciloscopio digitalizador de alta frecuencia. Sin embargo, debido a desviaciones de frecuencia inducidas por el microprocesador utilizado, no fue posible realizar esta demodulación y decodificación de manera automatizada para las diversas señales obtenidas. En la Figura 42 se muestra la gráfica de desviación de frecuencia con respecto al tiempo que se midió para el caso de la portadora de IF de 164.8351648 kHz.

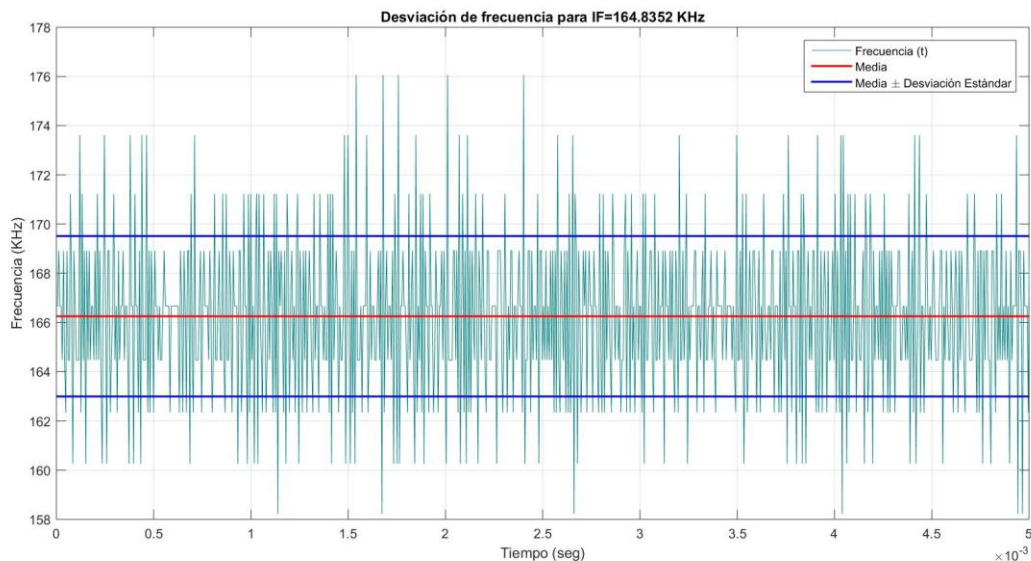


Figura 42. Desviación de frecuencia para la portadora de IF de 164.8351648 kHz en la tarjeta STM32F429I-DISCO.

De la Figura 42 se puede observar que las variaciones de frecuencia fluctúan por encima y por debajo de la media, en un rango máximo de alrededor de 18 kHz. Por otro lado, la media de estas variaciones de frecuencias se sitúa en 166.3 kHz con una desviación estándar de aproximadamente 3.26 kHz, lo cual también se encuentra un poco por encima de la frecuencia intermedia calculada para la implementación. Como se mencionó antes, esto es debido a la falta de precisión por parte de la arquitectura del microprocesador integrado en el kit de desarrollo utilizado para realizar la implementación de estas modulaciones.

Por lo tanto, para llevar a cabo una decodificación automatizada se requeriría adecuar las señales moduladas mediante la compensación de estas desviaciones, lo cual queda fuera del alcance de este proyecto. Sin embargo, se realizó una decodificación manual haciendo un procesamiento con ayuda del software MATLAB®, esto con la finalidad de corroborar parte de la señal recibida. Para ello se capturó la señal modulada en la banda de HF sobre 28.85 MHz, la cual posteriormente se demoduló para trasladarla a la frecuencia intermedia de aproximadamente 165 kHz. A partir de este punto, se realizó una segmentación manual para cada símbolo, lo que permitió trasladar a banda base cada uno de ellos. Una vez que se tuvieron los símbolos en banda base, se realizó la decodificación de los mismos para obtener tanto los chips de fase como los chips de cuadratura y de esta manera recuperar la señal de información. En la Figura 43 se ilustra el diagrama a bloques del procedimiento seguido para realizar la demodulación de una señal QPSK, mientras que en la Figura 44 se muestra una parte de la señal decodificada.

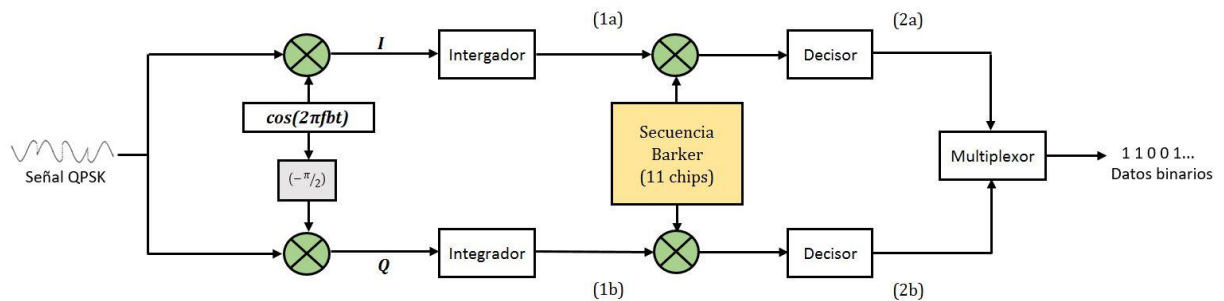


Figura 43. Diagrama a bloques simplificado para la demodulación QPSK.

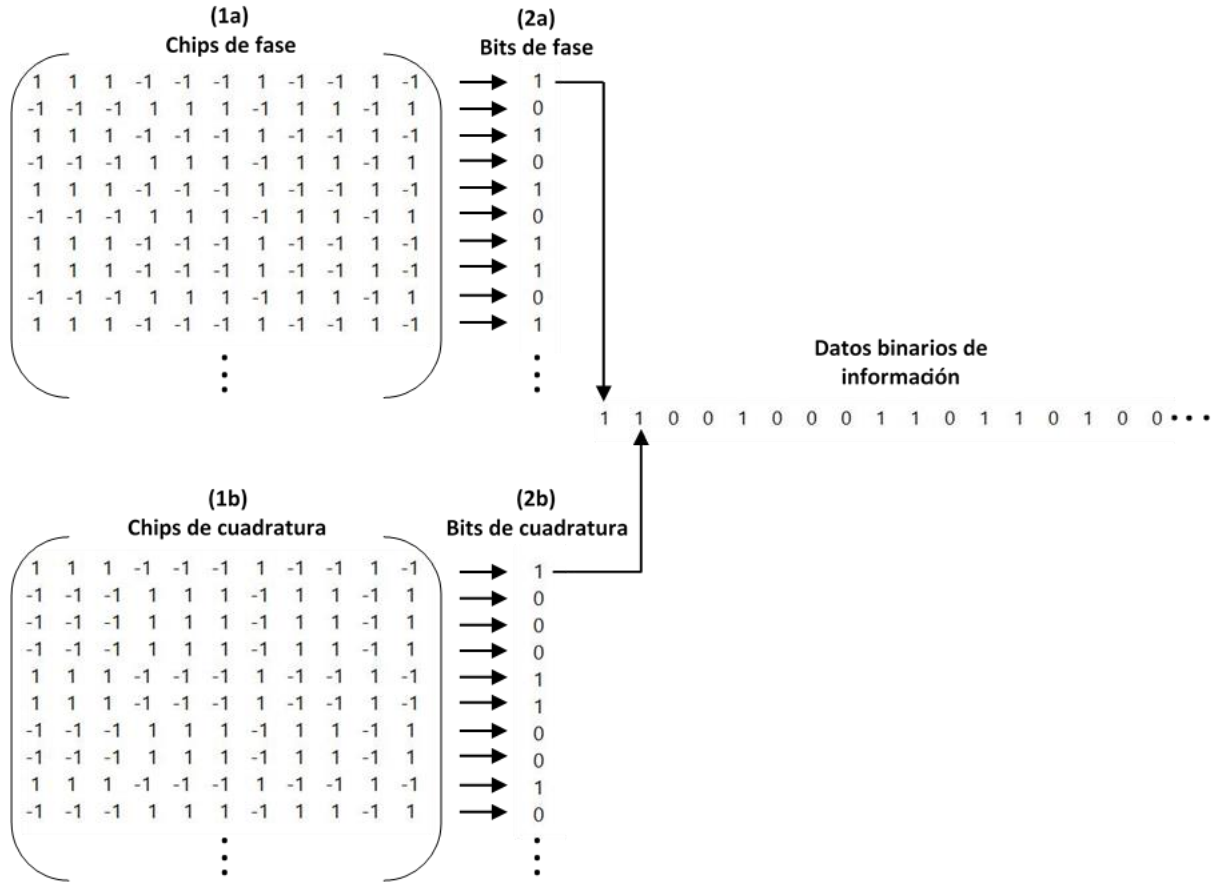


Figura 44. Decodificación de parte de la señal recibida.

Los datos decodificados de la Figura 44 fueron tomados después de encontrar el inicio de los bits de información mediante la detección de las secuencias Barker (de 13 elementos) utilizadas para la sincronización, lo que permitió realizar una comparación con la secuencia pseudo-aleatoria insertada como bits de información. En este caso, debido a que las pruebas se realizaron en un ambiente controlado en donde la señal no se vio muy afectada, se pudo recuperar de manera totalmente satisfactoria la secuencia pseudo-aleatoria insertada como entrada al modulador implementado. En la Figura 45 se muestra la comparación de una parte de las secuencias transmitidas y recibidas.

Secuencia transmitida	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	...
Secuencia recibida	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	...

Figura 45. Comparación de parte de la secuencia de datos transmitida y recibida.

4.6 Conclusiones sobre la implementación del esquema de modulación en banda base

Los resultados obtenidos en la sección 4.5.2 permiten comprobar que se llevó a cabo la implementación del esquema de modulación propuesto sobre una arquitectura de SDR de manera exitosa. Una de las ventajas de SDR es su capacidad de reconfiguración, la cual fue utilizada para el caso de la etapa de IF implementada, en donde es posible cambiar de frecuencia de manera muy sencilla a través de software.

Por otro lado, uno de los objetivos de tener una etapa de IF es el de evitar un salto o traslado en frecuencia abrupto entre la modulación en banda base y la modulación pasa banda sobre HF en este caso. Debido a que la frecuencia estipulada para la etapa del *“front-end”* analógico realizada en el trabajo de tesis complementario al presente es de 28.85 MHz, para la etapa de IF sería más conveniente utilizar frecuencias más altas a las establecidas en la sección 4.5. Sin embargo, las limitaciones de la tarjeta STM32F429I-DISCO no permiten llevar más lejos las frecuencias de la etapa de IF manteniendo la calidad y estabilidad de la señal. Además, otro de los aspectos importantes que resultaron de la implementación realizada es el hecho de que las señales moduladas presentaron una desviación de frecuencia significativa debido a la falta de precisión por parte de la tarjeta utilizada, lo cual se volvió crucial para no poder llevar a cabo una demodulación y decodificación automatizada.

No obstante, debido a la flexibilidad de los sistemas SDR sería posible mudar la plataforma de software propuesta hacia otra tarjeta con mayores capacidades que permita en un momento dado alcanzar los requerimientos de un sistema en particular. Además de una mayor frecuencia de operación, otro de estos requerimientos es una arquitectura de microprocesadores que ofrezca mayor precisión a la hora de arrojar las muestras de una señal en tiempo. Cabe mencionar que en esta primera instancia, se implementó únicamente una de las formas de onda (QPSK) especificadas en el estándar MIL-STD-188-110C, sin embargo, gracias a las ventajas de la plataforma de SDR propuesta, se pretende que eventualmente se pueda implementar este estándar en su totalidad sobre dicha plataforma.

Capítulo 5. Diseño del protocolo de control de acceso al medio (MAC)

5.1 Introducción

Un sistema de comunicaciones está regido por diversos protocolos que permiten la comunicación fiable entre dos o más entidades. Los protocolos de red son una serie de reglas que dictan la manera en que se procesa, transmite y recibe información a través de determinado medio físico. Como se mostró en el Capítulo 2, estos protocolos están distribuidos en una serie de capas pertenecientes a un modelo de referencia, lo que permite tener estandarización para las diversas redes informáticas existentes. Dentro de este modelo de referencia existe un protocolo encargado de regular el acceso al canal de transmisión por parte de los miembros de una red. Es decir, asigna “turnos” a los nodos para que puedan transmitir o recibir información tratando de evitar que ésta colisione. Este protocolo pertenece a la capa de enlace de datos y es denominado protocolo de control de acceso al medio (MAC).

En este capítulo se muestra la arquitectura y topología propuesta, el diseño del protocolo MAC y su evaluación a través del modelador de red OMNeT++. Para el diseño se considera la necesidad de una red configurada en modo ad-hoc, en donde los miembros de la red (boyas con sensores) requieren comunicar su información a un nodo resumidero (SINK) en una red multi-salto. La cantidad de información generada por cada boya fue determina en base al perfil de tráfico de una boya costera común mostrado en las siguientes secciones. Para esta propuesta se examinó el estudio y análisis de protocolos MAC para RIALD y WSN realizado en el Capítulo 2, en donde se exploraron las ventajas y desventajas de los diversos esquemas que utiliza cada uno de ellos. Finalmente se presenta la evaluación del diseño propuesto a través de simulaciones, las cuales muestran el desempeño del protocolo en términos de caudal eficaz (“*throughput*”), pérdida de paquetes, tasa de colisiones, latencias y consumo de potencia.

5.2 Arquitectura y topología propuesta

Considerando la aplicación que busca atender en esta tesis, se propone una topología en la que las boyas de la red tengan movilidad casi nula (ancladas) y estén distribuidas en una línea. La separación entre las boyas se estableció de acuerdo al máximo alcance de los radios HF, aproximadamente 50 km. De acuerdo a la información proporcionada para este proyecto, esta configuración es representativa de la manera en que generalmente son colocadas este tipo de boyas con sensores. Por otro lado, debido a que se requiere flexibilidad y escalabilidad en la red, se propone también una arquitectura distribuida en la que el acceso al medio no esté redigo por una entidad central. En cada línea de boyas, cada una debe transmitir su

información a una boya resumidero (SINK), la cual puede estar posicionada en cualquier parte de la línea. Esta boya SINK es la única que cuenta con un enlace satelital, y a su vez hace llegar toda la información de las demás boyas a la estación base. Para aquellos conjuntos de boyas que se encuentren cerca de la costa, el SINK será la propia estación base (EB) posicionada en la costa. En la Figura 46 se muestra la arquitectura de red propuesta.

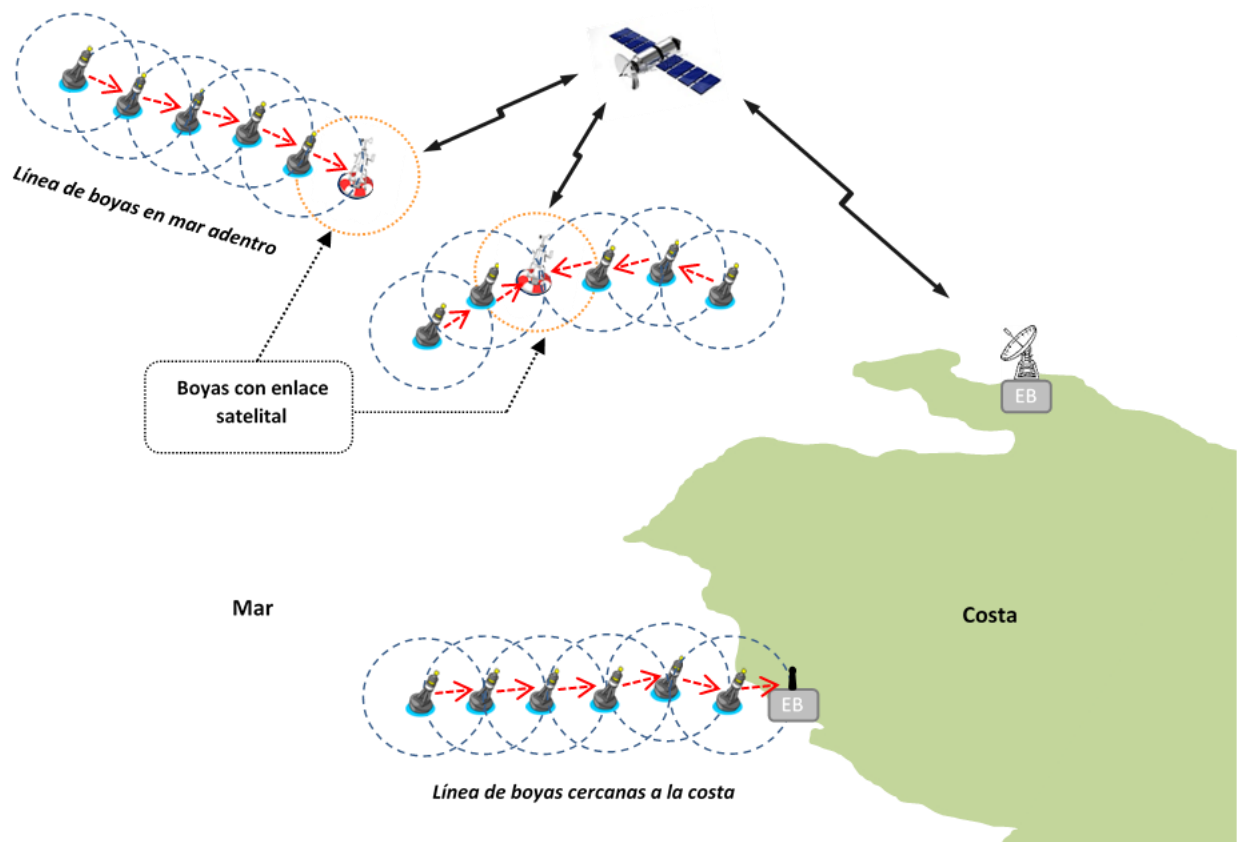


Figura 46. Arquitectura de red propuesta para el monitoreo de aguas marinas.

Cada boya recolecta información y la transmite hacia un nodo que pueda retransmitirla a su vez en dirección del SINK, de manera que entre más cerca se encuentre una boya del SINK, ésta deberá retransmitir una mayor cantidad de tráfico.

5.3 Protocolo MAC propuesto

Como se ha mencionado anteriormente, el protocolo MAC propuesto está basado en el estudio de protocolos realizado en el Capítulo 2, en donde se analizaron protocolos (Ver Tabla 1) tanto para RIALD como para WSN debido a que ambas reúnen características que busca la aplicación del presente proyecto de tesis. Derivado del análisis de las ventajas y desventajas analizadas para cada uno de los protocolos

discutidos en el Capítulo 2 de esta tesis, se propone un protocolo MAC híbrido que representa una solución para redes inalámbricas de larga distancia (aprox. 50 km entre nodos) aplicadas en ambientes marítimos y que además incorpora medidas para el ahorro del consumo de energía.

El protocolo MAC híbrido propuesto fue diseñado para una red en la que se manejan dos tipos de tráfico, los datos provenientes de los sensores de cada boya y datos de telemetría y comando. Estos últimos presentan una carga de tráfico ligera para la red, sin embargo son fundamentales para el buen funcionamiento de la misma. Por lo tanto, para este tipo de tráfico se eligió utilizar un esquema basado en el algoritmo de CSMA/CA no ranurado utilizado en el estándar IEEE 802.15.4 junto con un esquema de reconocimiento de paquetes recibidos (ACKs) y un sistema de retransmisiones. Esta propuesta presenta sencillez de implementación y buen rendimiento para cargas de tráfico ligeras, lo cual se adapta al tráfico de telemetría y comando en donde la generación de paquetes es relativamente esporádica.

Por otro lado, para el caso de los datos provenientes de los sensores que generan una mayor carga de tráfico, se adaptó un esquema basado en TDMA en el cual se asigna una porción de tiempo específica a cada boya para que realice sus transmisiones. Para definir el tamaño de las ranuras se consideran tanto el retardo de propagación, el cual no es despreciable en comunicaciones de larga distancia, como la baja tasa de transmisión especificada en el Capítulo 4 (2Kbps). Esta parte del protocolo propuesto está basada en ASO-TDMA propuesto en (Yun & Lim, 2012), al cual se le añadieron modificaciones para adaptarlo a las necesidades de la red de boyas pensada para este trabajo. ASO-TDMA fue elegido como referencia para el diseño del protocolo aquí propuesto debido principalmente a que es un protocolo distribuido auto-organizable, opera en redes multi-salto y además está diseñado para ambientes marítimos. Asimismo reúne los atributos de los esquemas TDMA analizados en la sección 2.5, los cuales se adecuan a los requerimientos de la aplicación planteada en esta tesis.

Debido a los dos tipos de tráfico considerados y a la asignación de un esquema diferente a cada uno de ellos, se define una supertrama general dividida en varias secciones. Dentro de esta supertrama general, se añade también un periodo en el que los radios no tienen actividad, esto con la finalidad de ahorrar energía. En las siguientes secciones se describe el formato de paquete para cada sector de la supertrama, se describe la estructura de la misma y se detallan las particularidades del protocolo MAC propuesto.

5.3.1 Formato de paquete

Como se indicó en la sección previa, en el protocolo propuesto, para cada tipo de tráfico se considera la utilización de un esquema de acceso diferente. De tal manera que para el tráfico de telemetría y comando se define un esquema de acceso basado en contención (CSMA/CA) mientras que para los datos provenientes de los sensores de las boyas se define un esquema libre de contención (TDMA). Debido a la naturaleza de cada uno, es necesario definir dos formatos de paquetes: uno para el esquema basado en contención y otro para el esquema libre de contención. En la Figura 47 y Figura 48 se muestran los campos que conforman cada formato de paquete.

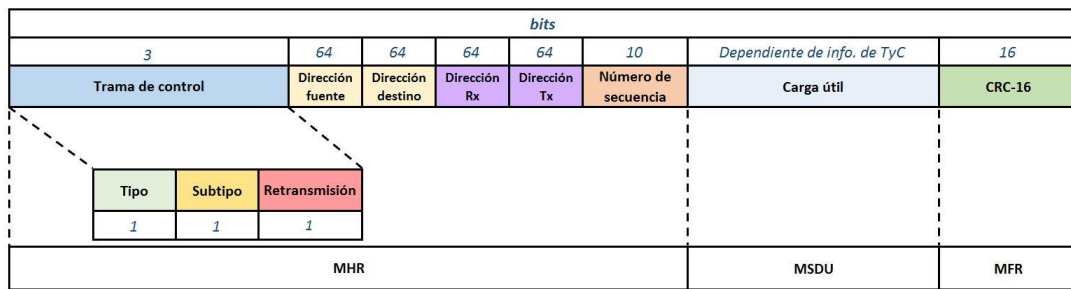


Figura 47. Formato de paquete a utilizar en el periodo basado en contención.

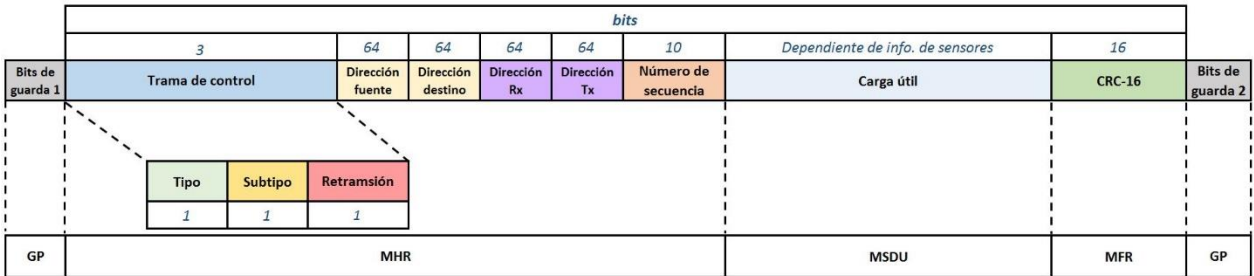


Figura 48. Formato de paquete a utilizar en el periodo libre de contención.

Como se puede observar, el formato para ambos periodos es similar, únicamente varían en cuanto a la carga útil que se empaqueta en cada uno de ellos y en que para el periodo libre de contención se añaden bits de guarda debido a la naturaleza del esquema basado en TDMA. En seguida se describe la función de cada uno de los campos que conforman el formato de los paquetes.

Trama de control: Este campo de trama de control contiene información acerca del tipo de paquete y otras banderas de control. Está compuesto por los subcampos *Tipo*, *Subtipo* y *Retransmisión*.

- **Tipo y Subtipo:** Entre estos dos campos se define el tipo de paquete de acuerdo a lo definido en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores de los subcampos Tipo y Subtipo.

Tipo	Subtipo	Descripción de paquete
0	0	Control
0	1	T y C
1	0	Datos Sensores
1	1	Reservado

- **Retransmisión:** Este subcampo es utilizado para indicar si se trata de un paquete proveniente de una retransmisión.

Dirección fuente: Este campo especifica la dirección fuente del paquete, es decir, la dirección del nodo donde se originó dicho paquete.

Dirección destino: Este campo especifica la dirección del destino final del paquete, es decir, la dirección de nodo resumidero de información (nodo SINK).

Dirección Rx: Para el caso en el que un paquete tiene que realizar varios saltos antes de llegar a su destino final, este campo especifica la dirección del próximo salto del paquete. Es decir, la dirección del nodo que debe recibir el paquete para retransmitirlo hacia el SINK.

Dirección Tx: Para el caso en el que un paquete tiene que realizar varios saltos antes de llegar a su destino final, este campo especifica la dirección del salto anterior del paquete. Es decir, la dirección del nodo que está retransmitiendo el paquete proveniente de sus predecesores.

Número de secuencia: Este campo especifica el número de secuencia de cada trama, se incrementa en uno cada vez que se transmite un nuevo paquete hasta llegar a 1024, luego se reinicia en 0.

Carga útil: Este campo contiene la información o carga útil a transmitir dependiendo del tipo de paquete del que se trate de acuerdo a lo descrito en la Tabla 5.

CRC-16: Este campo contiene un código de verificación por redundancia cíclica (Cyclic Redundancy Check -CRC) ITU-T de 16 bits basado en el descrito en (IEEE Computer Society, 2011). La verificación es aplicada sobre todos los campos del encabezado MAC (MAC Header – MHR) y de la unidad de servicios de datos MAC (MAC Service Data Unit - MSDU).

Bits de guarda 1 y 2: Estos campos correspondientes al periodo de guarda (Guard Period – GP) son incluidos sólo para el paquete a utilizar en el periodo libre de contención y sirven para evitar el solapamiento entre ranuras. Entre otros factores, en ellos se puede considerar el retardo de propagación y el tiempo de la conmutación entre estados de transmisión y recepción.

- **Bits de guarda 1:** Corresponden al periodo de guarda al inicio del paquete que en este caso se define como:

$$t_{\text{Bits de guarda 1}} = R_p + t_{Tx/Rx} \quad (15)$$

Donde R_p es el retardo de propagación dependiente de la distancia entre el nodo receptor y nodo transmisor, y $t_{Tx/Rx}$ es el tiempo de conmutación del radio entre el estado de transmisión y el estado de recepción, el cual depende del radio utilizado.

- **Bits de guarda 2:** Corresponden al periodo de guarda al final del paquete, y sólo concierne al retardo de propagación:

$$t_{\text{Bits de guarda 2}} = R_p \quad (16)$$

De tal manera que el número de bits de los campos correspondientes a estos periodos de guarda se define como:

$$\text{Bits de guarda 1,2} = (t_{\text{Bits de guarda 1,2}})(R_b) \quad (17)$$

Donde R_b es la tasa de bit de 2 kbps definida en (5) en el Capítulo 4 para la PHY que se utiliza en el presente proyecto de tesis.

5.3.2 Estructura de la supertrama

Como se mencionó anteriormente, existe una supertrama general a la que todos los miembros de la red deben sincronizarse. Esta supertrama está dividida en tres secciones, la primera corresponde al periodo basado en contención, la segunda al periodo libre de contención y la última al periodo de inactividad, tal y como se muestra en la Figura 49.

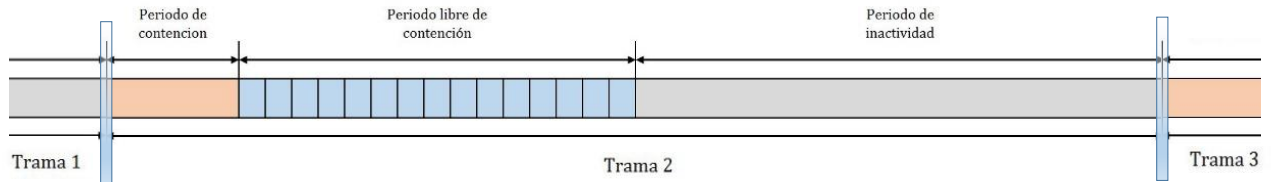


Figura 49. Estructura de la supertrama general del protocolo MAC propuesto.

Debido a que la aplicación para la que está pensada este trabajo es una red de monitoreo que no requiere de una respuesta inmediata por parte del sistema, se propone una duración total de supertrama (t_{ST}) de 2 minutos. Esta duración de supertrama representa el doble de tiempo de las supertramas utilizadas en protocolos como CS-TDMA, SO-TDMA y ASO-TDMA. Sin embargo, dada la diferencia de los escenarios de aplicación se toma ventaja de ello para incrementar el ahorro de energía dejando la posibilidad de asignar gran parte del tiempo de la supertrama al periodo de inactividad. La distribución del tiempo de la supertrama para cada una de sus divisiones es mostrada en la Tabla 6.

Tabla 6. Duración de los periodos que conforman la supertrama general.

Período	Duración
Libre de contención	$t_{LC} = NR * t_{ranura}$
Basado en contención	$t_{BC} = \frac{1}{3} t_{LC}$
Inactividad	$t_{inactividad} = t_{ST} - (t_{LC} + t_{BC})$

La duración de cada periodo dependerá directamente del número de ranuras (NR) en el periodo libre de contención y del tamaño de éstas (t_{ranura}). A su vez, este número de ranuras depende del número de miembros en la línea de nodos (detallado de manera más amplia en la sección 5.3.3). De acuerdo a lo

establecido en la Tabla 6, se puede inferir que existe un número máximo de miembros en la red y que además el periodo de inactividad se reduce conforme sus contrapartes se incrementan, lo cual impacta en el consumo de energía por parte de cada nodo. En la siguiente sección se especifica la operación del protocolo MAC propuesto considerando los formatos de paquete y la estructura de la supertrama previamente definida.

5.3.3 Descripción del protocolo

En esta sección se detalla el funcionamiento del protocolo MAC propuesto en el presente trabajo de tesis, primero se muestran las consideraciones iniciales en las que está basado el diseño, el perfil de tráfico a considerar para la red y finalmente se describe la forma de operar del protocolo.

5.3.3.1 Consideraciones iniciales

A continuación se mencionan los argumentos que se tomaron como punto de partida para la explicación de funcionamiento del protocolo:

- Se considera que todos los nodos miembros de la red tienen el conocimiento de la posición exacta del nodo resumidero de información (SINK), el cual corresponde a la boya que cuenta con el enlace satelital.
- Se considera que por ser dispositivos marítimos, todos los nodos miembros de la red cuentan con un sistema de posicionamiento global ("*Global Positioning System*" – GPS).
- Con ayuda de su GPS cada nodo se sincroniza a la supertrama general, ya que como se menciona en (Garroppo, Giordano, Iacono, & Tavanti, 2011), (Yun & Lim, 2012), (E E Johnson & Balakrishnan, 2003) y (C. Chen et al., 2012) el GPS sirve como fuente precisa de sincronización.

5.3.3.2 Perfil de tráfico

Como se ha mencionado anteriormente se prevén dos tipos de tráfico en cada boya, uno corresponde a datos de telemetría y comando, mientras que otro corresponde a los datos generados por los sensores incluidos en cada una de las boyas. Los sensores recolectan información acerca de diversas variables de

interés como las mostradas en la Tabla 3 (Capítulo 4). La tasa de bits de información proveniente de los sensores ($R_{Sensores}$) fue definida en la ecuación (3) en la sección 4.3.1 del Capítulo 4.

Por otro lado, para el caso de los datos de telemetría y comando se considera que la tasa de generación es aproximadamente la tercera parte de la tasa prevista para los sensores ($R_{Sensores}$) definida en la ecuación (3). Por lo que la tasa de bit para el caso de los datos de telemetría y comando (R_{TyC}) queda definida de la siguiente manera:

$$R_{TyC} = 0.72 \text{ bps} \quad (18)$$

Estas tasas de generación de tráfico fueron tomadas en cuenta para la evaluación del protocolo realizada en la sección 5.4. Se consideró tanto la tasa de sensores como la tasa de telemetría y comando a la hora de establecer el empaquetamiento para la simulación de evaluación realizada.

5.3.3.3 Funcionamiento

En este apartado se detalla en su totalidad el funcionamiento del protocolo MAC propuesto para la red de boyas de monitoreo en aguas marinas. Tomando en cuenta las consideraciones iniciales mencionadas, enseguida se describe el funcionamiento del protocolo mediante la explicación de su forma de operar tanto en el periodo basado en contención como en el periodo libre de contención.

Inicialización

En un inicio cada uno de los nodos miembros de la red determina el salto en el que se encuentran con respecto al nodo SINK, esto con base en su posición geográfica obtenida con ayuda de su GPS. Para ello se define previamente una distancia para cada salto basada en el alcance de transmisión de los radios, el cual como se ha mencionado anteriormente fue establecido en aproximadamente 50 km. De tal manera que cada nodo calcula la distancia en línea recta (d) desde su posición hasta la ubicación del nodo SINK, y posteriormente calcula el salto en el que se encuentra mediante la siguiente operación:

$$\text{Salto} = \left\lceil \frac{d}{50 \text{ km}} \right\rceil \quad (19)$$

Una vez que el nodo conoce su salto correspondiente de acuerdo a su posición, éste se sincroniza a la supertrama general para comenzar operaciones. En la Figura 50 se muestra un ejemplo de una red de nueve boyas distribuidas en cuatro saltos diferentes, con el nodo SINK ubicado en el centro de la línea de boyas.

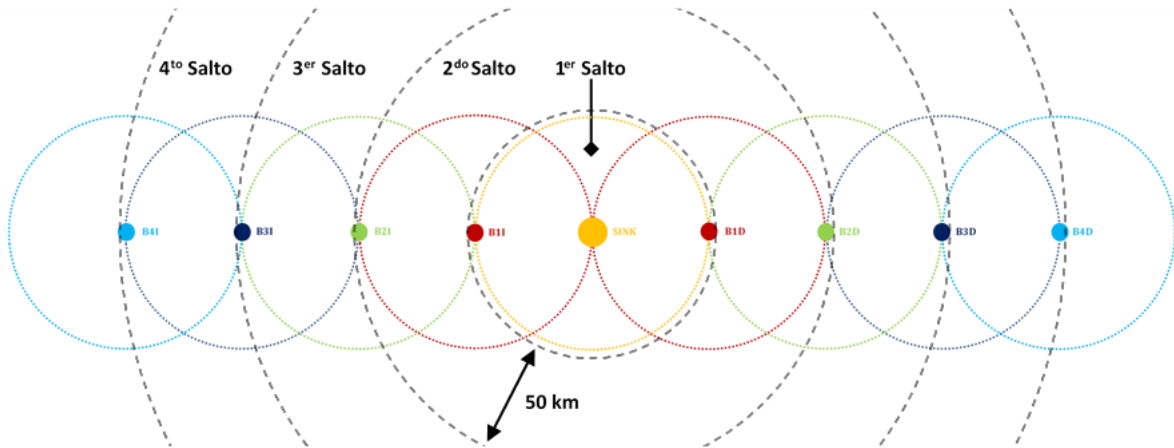


Figura 50. Red de monitoreo con 9 boyas distribuidas en cuatro saltos con nodo SINK posicionado en el centro de la línea.

Periodo basado en contención

En el periodo basado en contención los nodos intercambian información de identificación, así como el salto en el que se encuentran. Esto se realiza mediante la transmisión de paquetes *broadcast* utilizando una técnica de acceso al medio basada en CSMA/CA. Esta información sólo se comparte una vez en la inicialización o entrada a la red, para que todos los nodos conozcan a su predecesor y sucesor dentro de la línea de boyas hacia el SINK. Por otra parte, además de esta información de identificación y control, durante este periodo basado en contención también se transmite la información de los paquetes de telemetría y comando. Como se ha mencionado, los paquetes de telemetría y comando son esporádicos y con relativamente poca información en comparación con los datos generados por los sensores de las boyas. En la Figura 51 se muestra un diagrama de flujo del algoritmo de acceso al medio CSMA/CA pretendido para este periodo basado en contención.

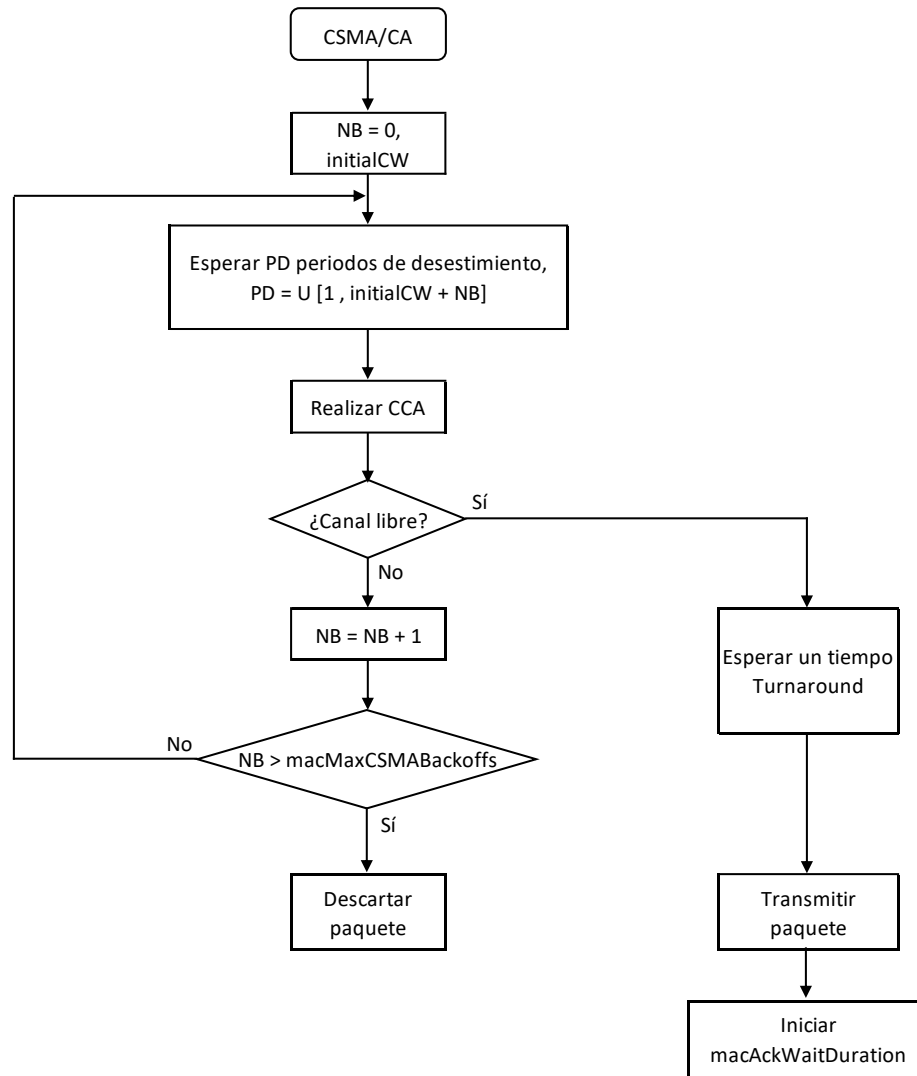


Figura 51. Diagrama de flujo del algoritmo CSMA/CA empleado en el periodo basado en contención.

Para la implementación de este algoritmo CSMA/CA se hace uso de unidades de tiempo denominadas periodos de desistimiento ("*backoff periods*"), donde cada uno equivale a un *aUnitBackoffPeriod* determinado como parámetro de entrada inicial. Además, también se definen las siguientes variables:

- **NB:** Indica el número de veces que el nodo tuvo que desistir al intentar realizar una transmisión y pasar a la siguiente etapa de desistimiento. Este parámetro se inicializa en 0 para cada intento de transmisión, y en cada uno de ellos tiene establecido como máximo *macMaxCSMABackoff*.
- **InitialCW:** Indica la longitud de la ventana de contención inicial, dada en número de periodos de desistimiento. Determina el tiempo en el que el canal debe estar libre de actividad antes de que el nodo pueda realizar su primer intento de transmisión como parte de la evasión de colisiones.

De tal manera que en el momento en que un nodo desea realizar una transmisión, en primera instancia estas dos variables son inicializadas. Luego de ello, se debe esperar por un número aleatorio de periodos de desistimiento uniformemente distribuido en el intervalo $[1, \text{initialCW} + \text{NB}]$. En este caso, se tiene establecido un método de desistimiento lineal, por lo que el intervalo para la ventana de contención incrementa linealmente conforme incrementan los intentos de transmisión. Luego del tiempo de espera, la capa física realiza una evaluación del canal para determinar si se encuentra libre ("*Clear Channel Assessment*" – CCA). Si se encuentra libre, se espera un tiempo *Turnaround* para permitir que el radio cambie al modo de transmisión y posteriormente se realiza la transmisión del paquete y se comienza el tiempo de espera por un ACK ("*macAckWaitDuration*"). Si el canal se encuentra ocupado se incrementa el valor de NB en una unidad, para posteriormente compararlo con el número máximo de intentos permitido *macMaxCSMABackoff*. Si NB es mayor que este máximo, el paquete se descartará, de otra manera el algoritmo regresa a la etapa de espera con un nuevo intervalo para la selección de los periodos de desistimiento.

Por otro lado, debido a que por el momento no se considera un algoritmo de enrutamiento y el objetivo del presente trabajo de tesis se centra en la capa MAC, el direccionamiento del tráfico de los nodos miembros de la red hacia el nodo SINK se realiza siguiendo el algoritmo mostrado en la Figura 52. Este algoritmo expone la manera que un paquete es tratado al momento de ser recibido durante el periodo basado en contención.

En el momento en el que un nodo recibe un paquete durante este periodo se identifica la dirección destino del mismo. Si esta dirección coincide con la dirección del nodo o si se trata de una transmisión *broadcast*, el nodo lee el paquete para determinar si se trata de un ACK o de un paquete de datos. En caso de que se trate de un ACK, el nodo debe determinar si proviene de su sucesor a quien anteriormente había transmitido un paquete de datos, de ser así se cancela el tiempo de espera por un ACK ("*macAckWaitDuration*") y se registra la transmisión exitosa del paquete. Por el contrario, si el ACK no proviene de su sucesor esperado, el paquete es descartado.

Por otro lado, si se trata de un paquete de datos, se registra y almacena la recepción del mismo para posteriormente esperar un tiempo de espacio inter-trama corto ("*Short Inter-Frame Space*" – SIFS) y transmitir el ACK correspondiente. El SIFS es necesario para que la sub-capa MAC tenga tiempo para procesar los datos obtenidos de la PHY.

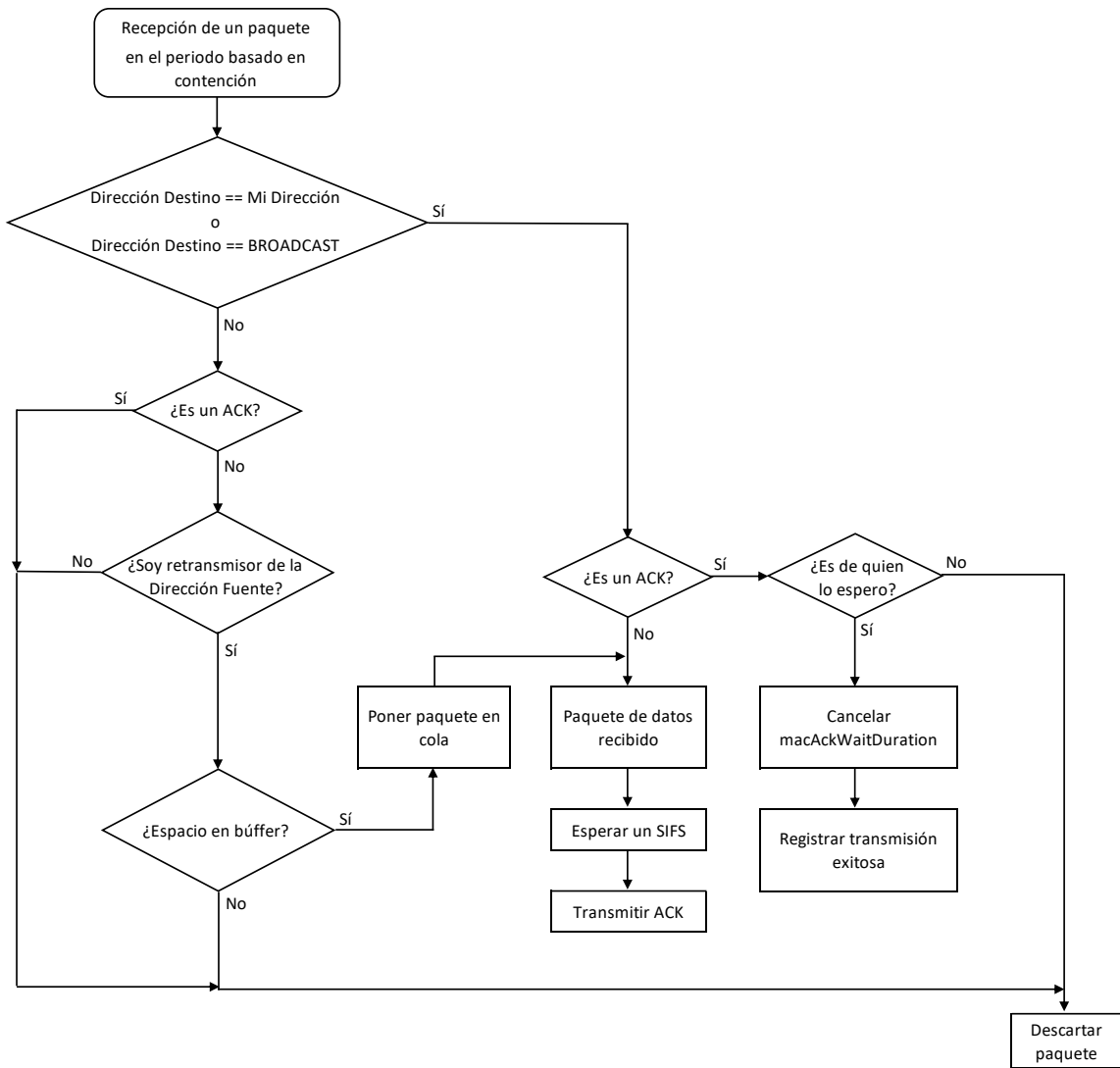


Figura 52. Diagrama de bloques del procesado de un paquete recibido en el periodo basado en contención.

En el caso en el que la dirección destino no coincida con la dirección del nodo, ni tampoco sea una dirección *broadcast*, se debe determinar si se trata de un ACK. De tratarse de un ACK el paquete es descartado, de otra manera el nodo receptor debe identificar la dirección fuente del paquete para determinar si debe almacenar para su posterior retransmisión en dirección del nodo SINK. De ser así se debe verificar si existe espacio para su almacenamiento, si no lo hay el paquete es descartado, y si lo hay el paquete se coloca en cola para su posterior retransmisión. De igual manera, se transmite un ACK dirigido al nodo transmisor del paquete. Por el contrario, si el nodo no es el retransmisor del paquete, el paquete también es descartado. De esta manera, la información de cada boya irá brincando dentro de la red hasta llegar al nodo SINK.

Debido a que se establecen tiempos determinados para cada periodo dentro de una supertrama, existen ciertas situaciones que deben ser consideradas en el periodo basado en contención cuando llega el

momento de cambiar al periodo libre de contención. Estas situaciones junto con su respectiva acción se describen a continuación:

- Si el cambio al periodo libre de contención llega cuando se está procesando el algoritmo de los periodos de desistimiento, se cancela el temporizador de periodos y se reinicia al volver nuevamente al periodo basado en contención.
- Si el cambio al periodo libre de contención llega cuando se está realizando el CCA, éste se cancela y el paquete que pretendía transmitir vuelve a entrar a contención al reanudarse el periodo basado en contención.
- Si el cambio al periodo libre de contención llega cuando se está esperando un ACK, el temporizador con el *macAckWaitDuration* se cancela y se reinicia al volver nuevamente al periodo de contención.
- Si el cambio al periodo libre de contención llega durante un periodo SIFS, éste se cancela y se reinicia al volver nuevamente al periodo de contención.

Periodo libre de contención

En el periodo libre de contención los nodos transmiten la información recabada de los sensores colocados en cada uno de ellos. Como se mencionó anteriormente en este periodo se especifica la utilización de un esquema TDMA auto-organizable. Este periodo se divide en NR ranuras, donde NR depende del número de boyas (M), de la posición del SINK y de si hay o no reutilización de ranuras. A su vez, el tamaño de cada ranura depende de la tasa de datos, del retardo de propagación, de la longitud de los paquetes a transmitir y del tiempo de conmutación del radio entre modo transmisor y modo receptor. En la Tabla 7 se muestran las ecuaciones con las que el número de ranuras para el periodo libre de contención puede ser calculado dependiendo de las condiciones antes mencionadas. Aunque la idea básica de la propuesta del protocolo MAC pretende la reutilización de ranuras para optimizar el rendimiento de la red, en este caso sólo se realizó un análisis para las configuraciones más sencillas en las cuales no se considera la reutilización de ranuras.

Tabla 7. Número de ranuras en el periodo libre de contención sin reutilización de ranuras.

Configuración	Número de ranuras
Para una línea de boyas con nodo SINK al centro y sin reutilización de ranuras.	$NR = M + \sum_{i=1}^{\frac{M}{2}-1} \left(\frac{M}{2} - i\right)$
Para una línea de boyas con nodo SINK en un extremo y sin reutilización de ranuras.	$NR = \sum_{i=1}^M i$

Donde M es el número de boyas en la línea.

Las NR ranuras se dividen en NS grupos de ranuras, donde el número de grupos NS es el número de saltos en la red, de tal manera que al salto i le corresponde el grupo de ranuras i . Cada grupo i contiene N_i ranuras, y debido a que los nodos más cercanos al nodo SINK deben retransmitir más tráfico, estos nodos reciben mayor número de ranuras. A medida que se incrementa el número de salto, el número de ranuras correspondientes a un nodo disminuye, de tal manera que al nodo más alejado del nodo SINK, le corresponde un menor número de ranuras para transmitir. En la Figura 53 se ilustra la división y distribución ranurada del periodo libre de contención.

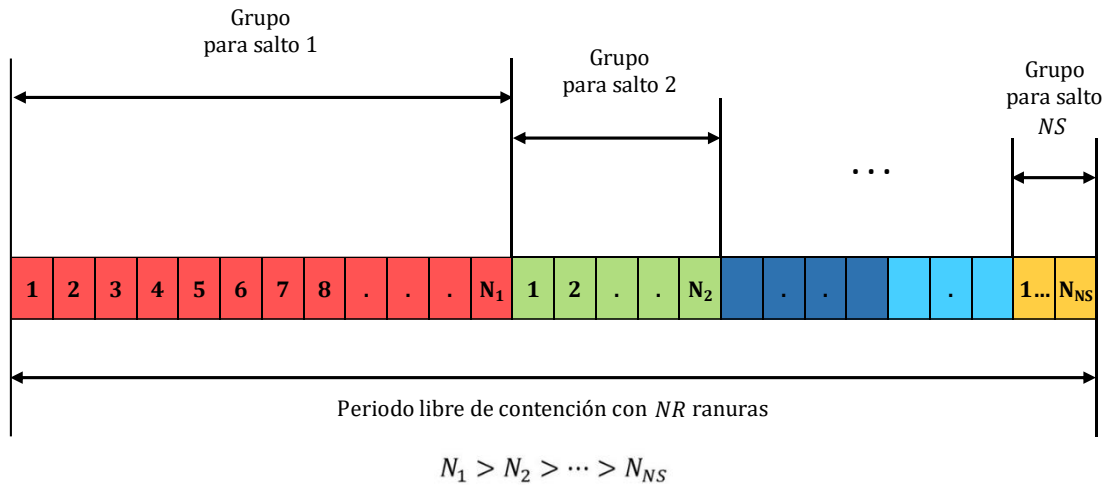


Figura 53. División y distribución del periodo libre de contención ranurado.

El número de ranuras N_i de cada grupo depende del número de paquetes generados por trama. Por otro lado, de acuerdo a la posición que posee cada nodo con respecto al nodo SINK, es decir, dependiendo del salto en el que se encuentre, el nodo puede transmitir sus datos únicamente en las ranuras que le corresponden a su respectivo salto. El nodo transmite sus datos a su nodo sucesor en dirección al nodo SINK, el cual a su vez y durante sus correspondientes ranuras, transmite su propia información además de los datos de su predecesor. Este proceso se repite hasta que todos los datos llegan al nodo SINK. La división

del periodo libre de contención en grupos de ranuras con respecto a la posición y número de saltos en la red, tiene la finalidad de evitar colisiones en los nodos receptores dentro de un esquema auto-organizable de repartición de ranuras.

Para el caso en el que el nodo SINK no se encuentre en las orillas o extremos de la red, éste debe fungir como coordinador para los nodos en el primer salto. Estos nodos corresponden a aquellos que están dentro del rango de alcance del nodo SINK, a los cuales este último les asigna un grupo de ranuras N_{1I} y N_{1D} a cada uno tal y como se muestra en la Figura 54.

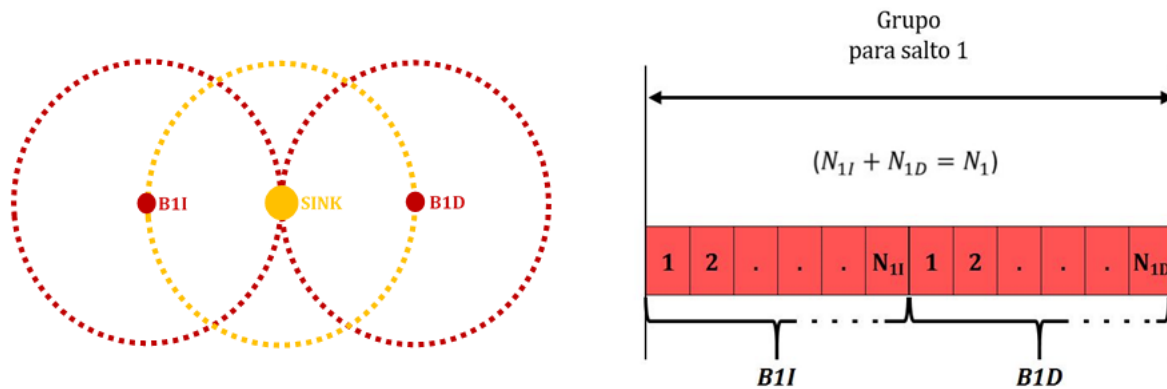


Figura 54. Asignación de ranuras a los nodos del primer salto cuando el nodo SINK no se encuentra en los extremos de la red.

Una vez que cada nodo determinó las ranuras en las cuales estará activo, ya sea para transmisión o recepción durante el periodo libre de contención, se sigue el algoritmo especificado en el diagrama de flujo de la Figura 55. En primera instancia se inicializa un variable auxiliar en el conteo de ranuras inactivas para cada nodo (i). Posteriormente el nodo determina si la ranura actual es una de sus ranuras de transmisión o de recepción, de ser así lleva a cabo la tarea correspondiente, ya sea realizar una transmisión o esperar una transmisión proveniente de otros nodos en modo de recepción. Por el contrario, si la ranura actual no corresponde con ninguna de las mencionadas, el nodo revisa la próxima ranura dentro de la tabla de distribución de ranuras que almacena, y si ésta corresponde a una ranura activa, mantiene encendido su radio esperando realizar la acción correspondiente en la siguiente ranura.

De lo contrario, si la siguiente ranura en la tabla no es una ranura activa para el nodo, éste entra en un bucle para determinar el número de ranuras en las que apagará su radio debido a que no tendrá actividad alguna. Este proceso tiene la finalidad de ahorrar energía y está basado en un procedimiento similar al que usa el protocolo LMAC propuesto en (Van et al., 2004). Cuando un nodo determina cierto número de

ranuras en las que apagará su radio, éste también toma en cuenta los tiempos del periodo de inactividad y del periodo basado en contención donde así se requiera. Para el caso de la recepción de paquetes durante este periodo, se lleva a cabo un procedimiento similar al expuesto para el caso del periodo basado en contención mostrado en la Figura 52, pero en este caso sin el uso de ACK's.

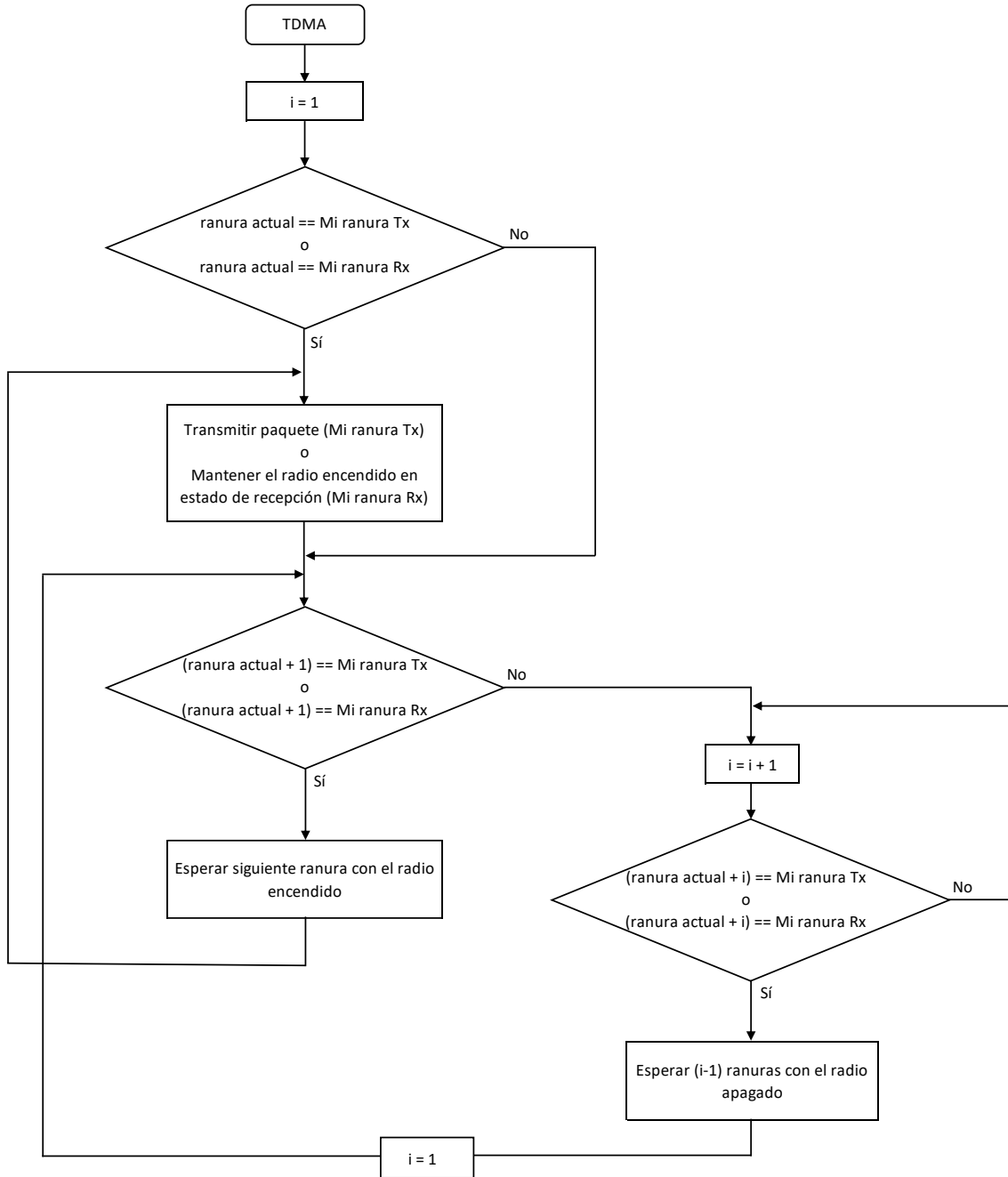


Figura 55. Diagrama de flujo del algoritmo TDMA empleado en el periodo libre de contención para combatir el desperdicio de energía.

Periodo de inactividad

Con el objetivo de alargar más la vida útil de los miembros de la red, además del procedimiento de ahorro de energía implementado en el periodo libre de contención, cada trama contiene un periodo de inactividad al final de la misma, tal y como se describió en la sección 5.3.2. Durante este periodo, todos los nodos apagan sus radios volviéndolos a encender al llegar el periodo basado en contención.

5.4 Evaluación del protocolo MAC propuesto

Se realizó la evaluación del protocolo MAC descrito en la sección anterior en términos de rendimiento o caudal eficaz (“*throughput*”), pérdida de paquetes, tasa de colisiones, latencias y consumo de potencia bajo un entorno de simulación. Las simulaciones para el periodo basado en contención y para el periodo libre de contención fueron llevadas a cabo por separado, considerando en cada una de ellas su contraparte y el periodo de inactividad que conforman la supertrama. Esto permitió reducir la complejidad de la implementación de la simulación realizada. Las simulaciones se realizaron haciendo uso del *framework* MiXiM versión 2.3 del simulador de código abierto OMNeT++ versión 4.5 bajo el sistema operativo de Linux con distribución Ubuntu 14.04 LTS. En seguida se da una breve descripción de estas herramientas de simulación utilizadas para evaluar el desempeño del protocolo MAC propuesto.

5.4.1 OMNeT++

OMNeT++ (“*Objective Modular Network Testbed in C++*”) es una plataforma de simulación de eventos discretos, modular y orientado a objetos, para el modelado de redes de comunicación, multiprocesadores y otros sistemas distribuidos o paralelos. OMNeT++ está compuesto de librerías escritas en lenguaje C++ y se caracteriza por poseer una interfaz gráfica muy potente en la que se pueden realizar simulaciones para el estudio de protocolos de redes alámbricas e inalámbricas, redes en chip, modelado de colas, etc. Además es un software de código abierto y puede ser utilizado ya sea bajo una licencia pública general de GNU o bajo su propia licencia sin fines de lucro (Varga, 2001).

El soporte para redes de sensores, redes ad-hoc, protocolos de internet, redes fotónicas, entre otras, es proporcionado por modelos de marcos o “*frameworks*” desarrollados como proyectos independientes. Dentro de estos “*frameworks*” se encuentran proyectos como INET, INETMANET, Veins o MiXiM, y cada uno de ellos se enfoca en ofrecer librerías y modelos básicos para determinadas aplicaciones o áreas de

estudio. De tal manera que se pueden crear simulaciones personalizadas tomando como base uno o varios de estos “*frameworks*”.

5.4.2 “*Framework*” MiXiM

MiXiM (Mixed Simulator) es un “*framework*” que combina varias plataformas de simulación desarrolladas para la simulación de redes inalámbricas tanto móviles como fijas utilizando OMNeT++. Representa la fusión de las plataformas *ChSim*, *Mac Simulator*, *Mobility Framework* y *Positif Framework*. Este marco se centra en las capas inferiores del modelo de referencia OSI ofreciendo modelos detallados de la propagación de las ondas de radio, estimación de interferencia, consumo de potencia de radio-transceptores y protocolos inalámbricos MAC (“MiXiM project”, 2011). Por lo tanto, debido a que el protocolo propuesto pertenece a la subcapa MAC se hace uso de este “*framework*” para realizar la evaluación del mismo. En la siguiente sección se detallan los parámetros y condiciones consideradas en el entorno de simulación.

5.4.3 Parámetros de simulación

A continuación se muestran los parámetros establecidos para la simulación implementada, se especifican las configuraciones básicas de la red y los parámetros utilizados tanto para el periodo basado en contención como para el periodo libre de contención del protocolo de la subcapa MAC propuesto. Asimismo se especifican los parámetros considerados para la capa PHY empleada en la simulación.

Configuraciones generales

La distribución de las boyas dentro de la red se realizó con base en la arquitectura y topología propuesta en la sección 5.2. Se considera una línea de boyas convencionales y una boya fungiendo como SINK posicionada en uno de los extremos, todos espaciados a una distancia de 50 km uno del otro y operando en la frecuencia de 28.85 MHz de la banda de HF. La tasa de transmisión se establece en 2 kbps de acuerdo a lo estipulado en el capítulo 4. Los escenarios de simulación se llevaron a cabo haciendo un barrido desde 3 hasta 9 boyas transmitiendo hacia el nodo SINK. En la Figura 56 se observa un ejemplo del entorno gráfico de ejecución para una simulación con 4 boyas convencionales y una boya SINK.

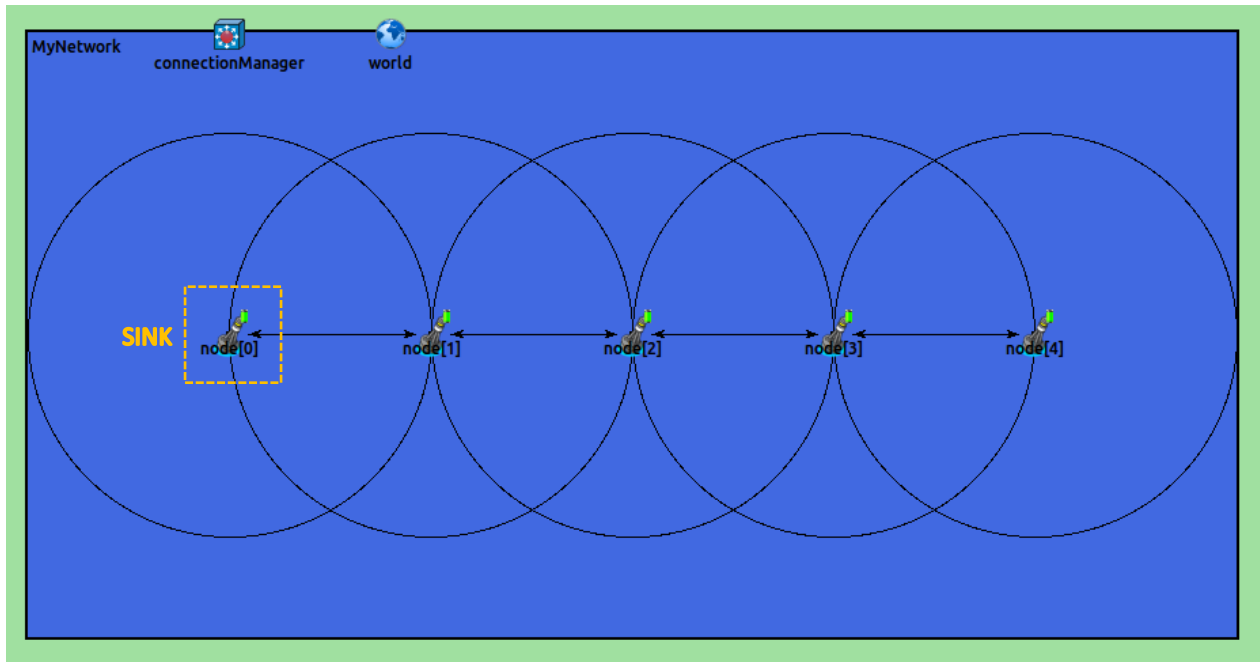


Figura 56. Entorno gráfico de ejecución para una simulación con 4 boyas convencionales y una boya SINK.

Para este primer acercamiento se considera un modelo de propagación simple de pérdidas por trayectoria en el espacio libre (exponente de pérdidas por trayectoria, $n = 2$) y un decisor basado en la definición de un umbral para la relación señal a ruido (SNR). Además se tomó en cuenta el retardo de propagación de acuerdo a la separación entre las boyas resultando en un retardo de $R_p = (50 \times 10^3 \text{ m})(1/3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 166.667 \mu\text{seg}$.

Configuraciones del periodo basado en contención de la subcapa MAC

Los parámetros de simulación considerados para la evaluación del esquema CSMA/CA utilizado en el periodo basado en contención se muestran en la Tabla 8. Estos parámetros fueron calculados con base en lo especificado en el estándar IEEE 802.15.4 de (IEEE Computer Society, 2011) tomando en cuenta la tasa de transmisión establecida.

Para el caso de la generación de tráfico durante este periodo, se considera que se produce un paquete de 345 bits de manera periódica. Para la evaluación se establecieron distintos periodos o intervalos de generación que van desde 480 hasta 60 segundos entre paquetes para cada uno de los escenarios, lo cual equivale a una tasa de generación de aproximadamente 0.72 y 5.75 bps respectivamente. Con ello se evalúa el desempeño del protocolo para el perfil de tráfico especificado para este periodo en la sección

5.3.3, y adicionalmente se evalúa para una mayor carga de tráfico con la finalidad de observar su comportamiento.

Tabla 8. Parámetros considerados para el esquema CSMA/CA del periodo basado en contención.

Parámetro	Valor
Tiempo de CCA	8 mseg
Tiempo Turnaround	12 mseg
SIFS	12 mseg
Duración de un periodo de desistimiento (<i>"aUnitBackoffPeriod"</i>)	20 mseg
Número de periodos de desistimiento en la ventana inicial (<i>"InitialCW"</i>)	U [2 , 15]
Número máx. de periodos de desistimiento extras a los de la ventana inicial (<i>"macMaxCSMABackoff"</i>)	5
Tiempo máx. de espera por un ACK (<i>"macAckWaitDuration"</i>)	56 mseg
Número máx. de retransmisiones	3

Configuraciones del periodo libre de contención de la subcapa MAC

Para el caso del esquema TDMA distribuido utilizado durante el periodo libre de contención se establece una duración de 0.743 segundos para cada ranura. Esta duración de ranura es determinada de acuerdo a la tasa de transmisión (R_p) y el tamaño de paquete a transmitir, en el cual viene considerado el retardo de propagación (R_p) y el tiempo de conmutación del radio entre el modo Tx y Rx ($t_{Tx/Rx}$) como se especificó en la sección 5.3.1 para el formato de paquete del periodo libre de contención. Para la simulación se estableció $t_{Tx/Rx} = 120 \mu seg$. El número de ranuras dentro de este periodo queda definido de acuerdo a lo estipulado en la Tabla 7 para una línea de boyas con nodo SINK en uno de los extremos y sin reutilización de ranuras.

Para el caso de la generación de tráfico durante este periodo, se considera que se produce un paquete de 1200 bits de manera periódica. Al igual que para el periodo basado en contención, la evaluación se realizó con distintos periodos o intervalos de generación que en este caso van desde 120 hasta 40 segundos entre paquetes para cada uno de los escenarios, lo cual equivale a una tasa de generación de 10 y 30 bps respectivamente. Para este periodo, la evaluación se hace considerando tasas de generación mayores a la calculada en el perfil de tráfico generado por los sensores de las boyas, esto con la finalidad de observar el desempeño del protocolo bajo mayores cargas de tráfico que pudieran ser generadas por un tipo de boyas más grandes.

Configuraciones la capa PHY

Debido a que la plataforma de simulación empleada no cuenta con mucha variedad de modelos que tengan la capacidad de especificar completamente la capa física a utilizar, y a que el objetivo de las simulaciones realizadas se centra en evaluar el protocolo de la subcapa MAC, se eligió uno de los modelos básicos de capa física que proporciona MiXiM. Este modelo, entre otros aspectos, permite especificar parámetros de consumo de potencia y de la batería de los nodos.

Para los radios de las boyas se considera una sensibilidad de -110 dBm , la cual representa un valor típico en los transceptores comerciales de HF. Por otro lado, para el caso del consumo de potencia el voltaje de la batería se estableció en 13.8 VCD con una capacidad nominal de 100 Ah lo cual corresponde a los valores comunes de una batería utilizada en estos escenarios. Además, para las corrientes consumidas por los radios se consideran valores típicos en transceptores comerciales que trabajan en la banda de HF de 25 a 30 MHz, los cuales son mostrados en la Tabla 9.

Todos los parámetros y configuraciones mostrados en esta sección son iguales para todos los nodos a excepción del nodo SINK, el cual se configura de tal manera que sólo lleve a cabo tareas de recolección y registro de información, sin generar ni transmitir sus propios datos.

Tabla 9. Corrientes consideradas para el consumo de potencia de la simulación.

Corrientes	Valores típicos de transceptores comerciales HF @ 25 – 30 MHz
Corriente de inactividad	0.2 mA
Corriente de recepción (Rx)	1 A
Corriente de trasmisión (Tx)	6 A
Corriente de establecimiento de modo Rx	9.6 mA
Corriente de establecimiento de modo Tx	9.6 mA
Corriente de conmutación de Rx a Tx	20 mA
Corriente de conmutación de Tx a Rx	20 mA

5.4.4 Métricas

Las métricas de desempeño consideradas en este trabajo de tesis son:

- **Tasa de colisiones:** La tasa de colisiones se refiere a la cantidad de paquetes colisionados por unidad de tiempo (cps). Para este trabajo de tesis corresponde a las colisiones de paquetes que se generan a un salto durante el periodo basado en contención.
- **Pérdida de paquetes:** En este caso, se considera que un paquete perdido es aquel que no llega al SINK después de haber sido transmitido en cualquier salto de la red.
- **Paquetes descartados:** En este trabajo de tesis, estos paquetes son aquellos que son generados y se descartan debido a que no hay espacio en el buffer para almacenarlos mientras esperan ser transmitidos. Esta métrica es únicamente considerada para el periodo libre de contención.
- **Latencia promedio:** En este trabajo de tesis se considera la latencia promedio de la red entera. Se calcula el tiempo transcurrido desde que un paquete es generado hasta que éste llega a su destino (SINK). Posteriormente se obtiene el promedio de las latencias experimentadas por todos los nodos de cada escenario.

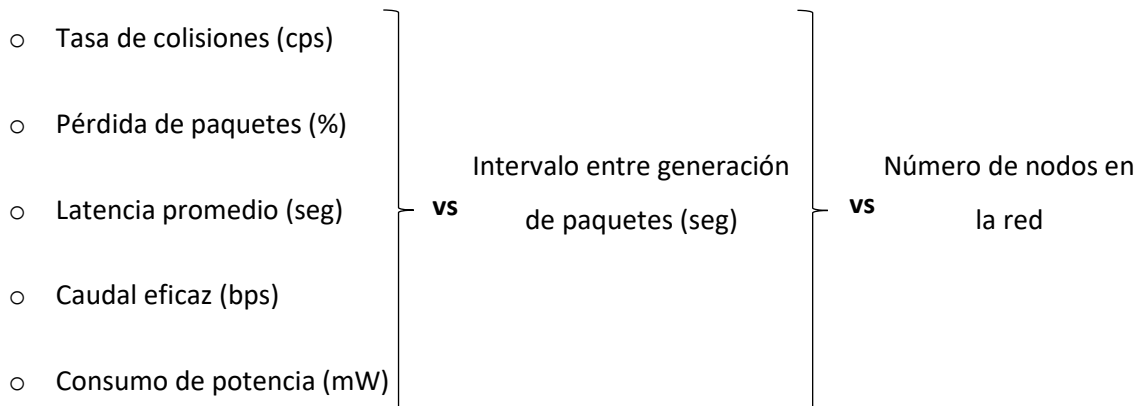
- **Caudal eficaz (“Throughput”)**: Es una medida que indica la cantidad de tráfico que es recibido exitosamente por unidad de tiempo (bps). Con base en esta métrica es posible determinar la eficiencia de la red durante un determinado periodo.
- **Consumo de potencia**: Debido a la aplicación planteada para esta tesis, la medición del consumo de potencia por parte de los nodos es importante. Este consumo es obtenido con base en el tiempo en el que los nodos están encendidos y se calcula a partir del voltaje nominal de la batería y de las corrientes de consumo que presenta cada nodo de acuerdo a la acción que realice (Ver Tabla 9).

5.4.5 Resultados de simulación

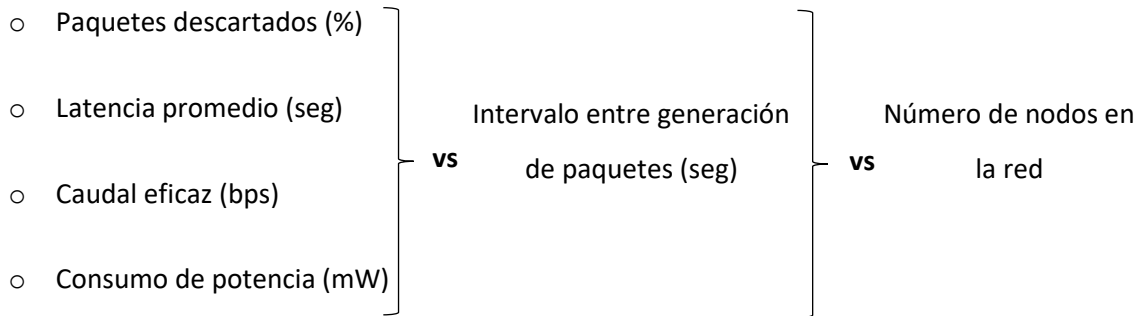
Como se mencionó anteriormente, la simulación se realizó en dos etapas. La primera etapa, está centrada en el análisis del periodo basado en contención y la segunda está centrada en el periodo libre de contención. Ambas simulaciones tuvieron una duración de 15,000 segundos equivalentes a la simulación de 125 tramas de 120 segundos cada una. Para la validación de resultados, en cada uno de los experimentos se realizaron 100 iteraciones lo que equivale a una generación promedio total mínima de 10,000 paquetes por simulación.

Se obtuvieron gráficas de acuerdo a las métricas mencionadas anteriormente. Se realizó un análisis para cada periodo obteniendo las métricas con respecto al nodo SINK, es decir, únicamente tomando en cuenta los paquetes transmitidos originados en cada nodo y la recepción de estos paquetes en el nodo SINK. A continuación se muestra el análisis realizado para cada periodo.

- **Periodo basado en contención (CSMA/CA)**



- **Periodo libre de contención (TDMA Distribuido)**



Enseguida se muestran las gráficas de los resultados obtenidos para los 2 esquemas de control de acceso al medio empleados en los periodos del protocolo MAC propuesto y descrito anteriormente.

5.4.5.1 Simulación del periodo basado en contención

Los resultados son divididos en dos conjuntos, en primera instancia se muestran los resultados correspondientes a una red con 4 nodos convencionales y un nodo SINK, ilustrando el comportamiento de cada uno de los nodos a medida que se incrementa el tráfico inyectado a la red. Posteriormente se muestran los resultados para todas las configuraciones que van desde 3 hasta 9 nodos en la red, agrupando estos resultados en una misma gráfica que muestra el comportamiento de la red cuando se varía el tráfico inyectado a la red, así como cuando se varía el número de nodos en ella.

En la Figura 57 y Figura 58 se muestra la tasa de colisiones y el porcentaje de pérdida de paquetes (PPP) que presenta cada uno de los 4 nodos convencionales cuando se utiliza el esquema de CSMA/CA durante el periodo basado en contención para la transmisión de paquetes de telemetría y comando. Además se muestran las métricas promedio considerando la red entera. El nodo más cercano al SINK es el nodo 1, posteriormente el nodo 2 y así sucesivamente, tal y como se muestra en el entorno de simulación presentado en la Figura 56.

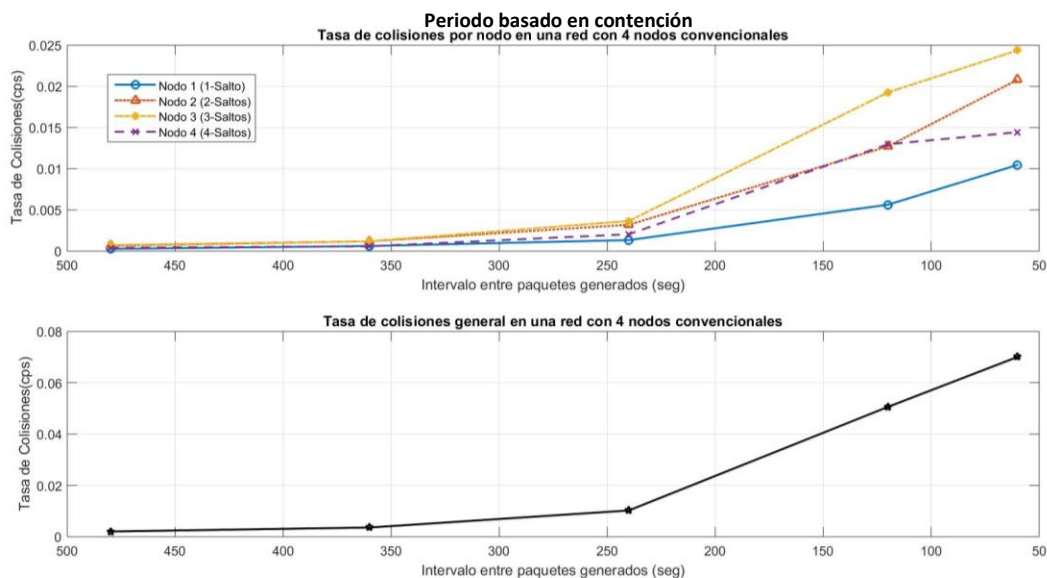


Figura 57. Tasa de colisiones en una red con 4 nodos convencionales y un nodo SINK en la transmisión de paquetes de telemetría y comando.

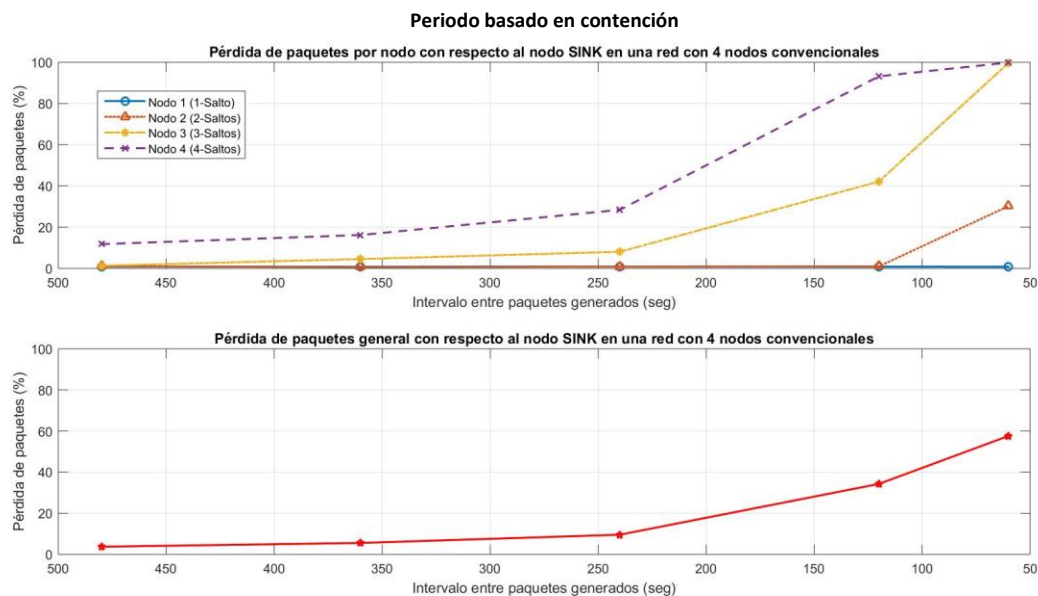


Figura 58. Porcentaje de pérdida de paquetes en una red con 4 nodos convencionales y un nodo SINK en la transmisión de paquetes de telemetría y comando.

En las gráficas de la Figura 57 se puede observar que conforme se incrementa el tráfico inyectado a la red (menor intervalo de generación entre paquetes) la tasa de colisiones se incrementa para todos los nodos. Se puede notar también que para los intervalos entre 480 y 240 segundos, la tasa de colisiones para todos los nodos se mantiene relativamente baja. Sin embargo, para los últimos intervalos (después de 240 segundos), la tasa de colisiones se incrementa abruptamente en comparación con los anteriores. Esto se

debe a que con el incremento de tráfico en cada uno de los nodos, éstos requieren de realizar una mayor cantidad de transmisiones lo que ocasiona una mayor contienda por el canal. El nodo 1, que representa el primer salto con respecto al SINK, y el nodo 4 que representa el cuarto y último salto para este caso, presentan una menor tasa de colisiones. Esto es debido a que ambos compiten por el canal con un solo nodo, con el nodo 2 (ya que el SINK no transmite información) y con el nodo 3, respectivamente. Mientras que los nodos centrales, el nodo 2 y nodo 3 deben someterse a una mayor contienda, lo cual se ve reflejado en una mayor tasa de colisiones.

Por otro lado, en las gráficas de la Figura 58 se puede observar que el PPP para cada nodo se incrementa a medida que aumenta el tráfico de la red. Este comportamiento va acorde con la tasas de colisiones de la Figura 57, de manera que conforme se incrementa la tasa de colisiones existe un mayor PPP. Se observa que después del intervalo de 240 segundos, la curva del PPP de casi todos los nodos despegue de manera sustancial. Para el último intervalo que representa la mayor cantidad de tráfico inyectado en las simulaciones, el nodo SINK prácticamente no recibe ningún paquete proveniente de los nodos 2 y 4, lo cual es esperado para el nodo 2, ya que es el nodo cuya información se colisiona en mayor medida. Sin embargo, no ocurre lo mismo con el nodo 4, quien a pesar de ser uno de los nodos que menor tasa de colisiones presenta, también es el nodo que exhibe el mayor PPP. Esto es debido a la cantidad de saltos que su información debe de dar antes de llegar a su destino, por lo que si bien en su primer salto, el nodo 4 presenta una de las menores tasas de colisiones, también es el nodo que más alejado se encuentra del nodo SINK, lo que implica que sus paquetes tengan mayor oportunidad de perderse.

En la Figura 59 y Figura 60 se muestran las gráficas correspondientes a la latencia que experimentan los paquetes dentro de la red y el caudal eficaz de la misma cuando varía la cantidad de tráfico inyectado. En la primera de ellas se muestra la latencia que experimentan los paquetes correspondientes a cada uno de los nodos, así como la latencia promedio de los paquetes dentro de la red de manera general. Similarmente, en la segunda se muestra el caudal eficaz para cada uno de los 4 nodos convencionales y además el caudal eficaz total de la red para esta configuración.

De la Figura 59 se puede observar que la latencia de paquetes en la red se mantiene relativamente estable hasta el intervalo entre paquetes de 240 segundos, posteriormente ésta da brinco significativos para los últimos intervalos de generación que representan la mayor carga de tráfico inyectada a la red. Este comportamiento es esperado luego de observar que para estos dos últimos intervalos, la tasa de colisiones se incrementó en gran medida con respecto a los anteriores (ver Figura 57). Ahora bien, analizando el caso para la mayor cantidad de tráfico en la red, las transmisiones del nodo 2 son las que más colisionan, lo que

supondría una mayor latencia de sus paquetes, sin embargo se observa que el que presenta mayor latencia es el nodo 3. Esto se debe a que a diferencia del nodo 3, el nodo 2 presenta un mayor PPP lo que indica que aunque están llegando pocos paquetes, lo están haciendo de manera más rápida. Es decir, que para el nodo 2, las retransmisiones no logran resolver las colisiones mientras que para el nodo 3 sí. Por el contrario, los paquetes del nodo 3 exhiben una alta latencia, es decir, están tardando más en llegar a su destino debido a la alta tasa de colisiones que también presenta este nodo, pero lo están haciendo en mayor medida.

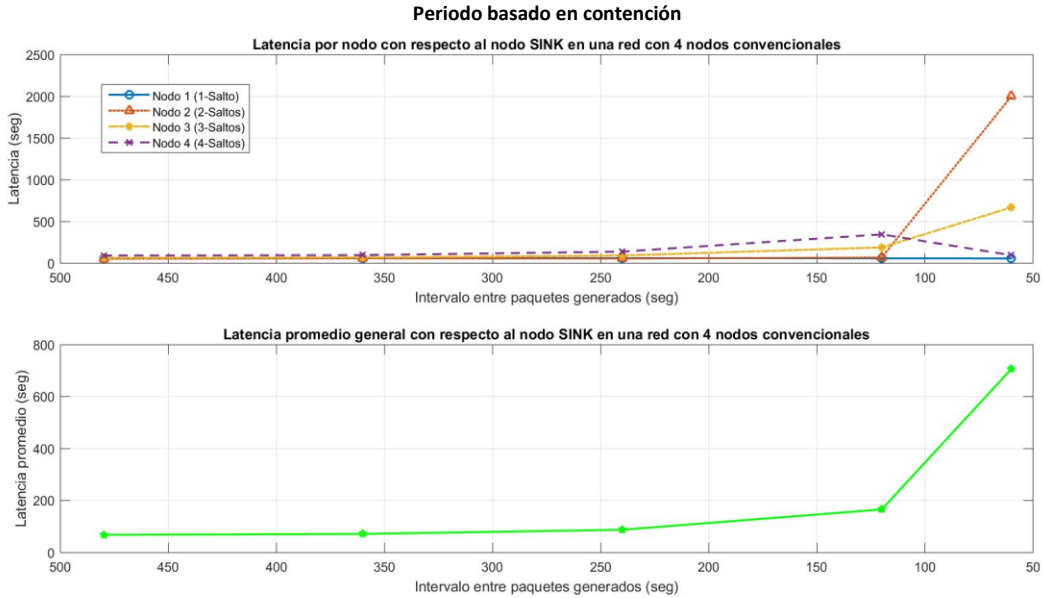


Figura 59. Latencia de paquetes en una red con 4 nodos convencionales y un nodo SINK en la transmisión de paquetes de telemetría y comando.

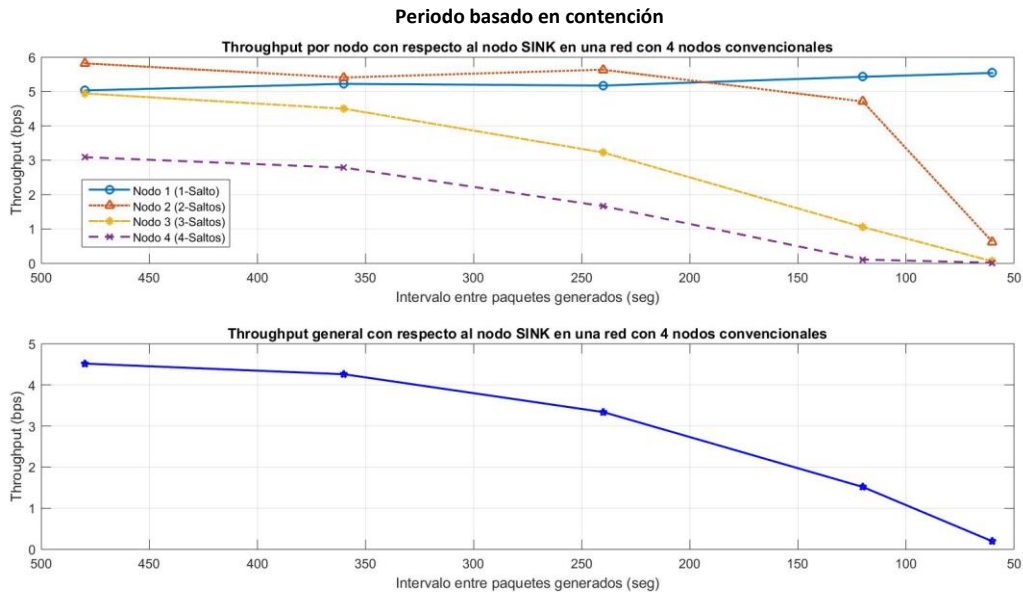


Figura 60. Caudal eficaz en una red con 4 nodos convencionales y un nodo SINK en la transmisión de paquetes de telemetría y comando.

En las gráficas de la Figura 60 se observa que, en general, el caudal eficaz decrece a medida que se incrementa el tráfico dentro de la red. El nodo que presenta mayor caudal eficaz hasta el intervalo de los 240 segundos, es el nodo ubicado a 3 saltos del SINK, y es debido a que para dichos intervalos este nodo también es uno de los que exhibe menores tasas de colisiones, PPP y latencias, por las razones antes mencionadas. Sin embargo, se puede notar que debido principalmente al incremento en la tasa de colisiones y latencia de paquetes que presenta este nodo para los últimos intervalos, su caudal eficaz se ve muy disminuido, ya que entre más tarde un paquete en llegar exitosamente a su destino, menor será el caudal eficaz registrado. Esto sucede así para todos los nodos, a excepción del nodo 1, quien incluso presenta ligeros incrementos de caudal eficaz para los intervalos de generación de paquetes más cortos. Este comportamiento es esperado, ya que va acorde con la baja tasa de colisiones que exhibe este nodo, que en conjunto con su baja latencia y bajo PPP deriva en el caudal eficaz mostrado para ese caso. Por otro lado, para los nodos 2 y 4 se observa que para la mayor carga de tráfico, el caudal eficaz es prácticamente nulo, debido a que se está registrando casi el 100% de paquetes perdidos.

A continuación, en la Figura 61 se ilustra el consumo promedio de potencia que tienen cada uno de los nodos miembros de la red para las diferentes cargas de tráfico simuladas. Al igual que las gráficas anteriores, se muestra el desglose del consumo de cada uno de los nodos y además el consumo promedio de la red entera.

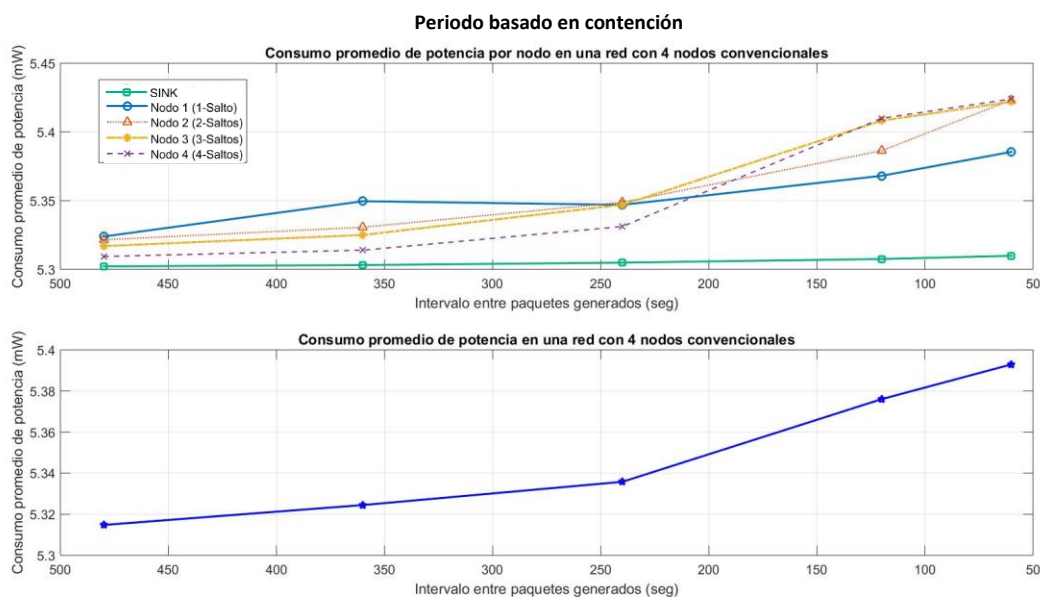


Figura 61. Consumo promedio de potencia en una red con 4 nodos convencionales y un nodo SINK en la transmisión de paquetes de telemetría y comando.

Se puede observar que el consumo de potencia general de la red incrementa conforme se incrementa el tráfico inyectado. Se puede notar también que el consumo del nodo SINK se mantiene relativamente constante y es menor que el de los nodos convencionales, debido principalmente a que sólo lleva tareas de recepción en este caso. Por otro lado, para los nodos convencionales se observa que para los intervalos mayores a 240 segundos, el orden de los nodos de acuerdo al consumo de potencia que presentan es: nodo 1, nodo 2, nodo 3 y nodo 4, enlistándolos del mayor al menor consumo. Este comportamiento es esperado, ya que el nodo que presenta un mayor consumo de potencia, es también el nodo que debe retransmitir mayor cantidad de tráfico debido a que es el más cercano al SINK (primer salto). A medida que los nodos se encuentran más alejados del SINK, éstos presentan un menor consumo de potencia debido a que deben retransmitir menor cantidad de tráfico. De las gráficas de la Figura 61, se puede notar que esto sucede así cuando el protocolo trabaja con cargas de tráfico ligeras, sin embargo, después del intervalo de 240 segundos los nodos 2,3 y 4 elevan en mayor medida su consumo de potencia. Esto sucede debido a que para dichas cargas de tráfico en la red, las tasas de colisiones para estos nodos se incrementan de igual manera (Ver Figura 57).

Los resultados mostrados anteriormente ilustran el comportamiento de cada uno de los nodos dentro una red con determinado número de miembros. Enseguida se ilustran los resultados obtenidos para el barrido de 3 a 9 nodos en la red, es decir, cuando se incrementa tanto el número de nodos en la red como el tráfico dentro de la misma. En la Figura 62, Figura 63 y Figura 64 se muestran estos resultados para el caso de la tasa de colisiones, PPP y número de paquetes perdidos, respectivamente.

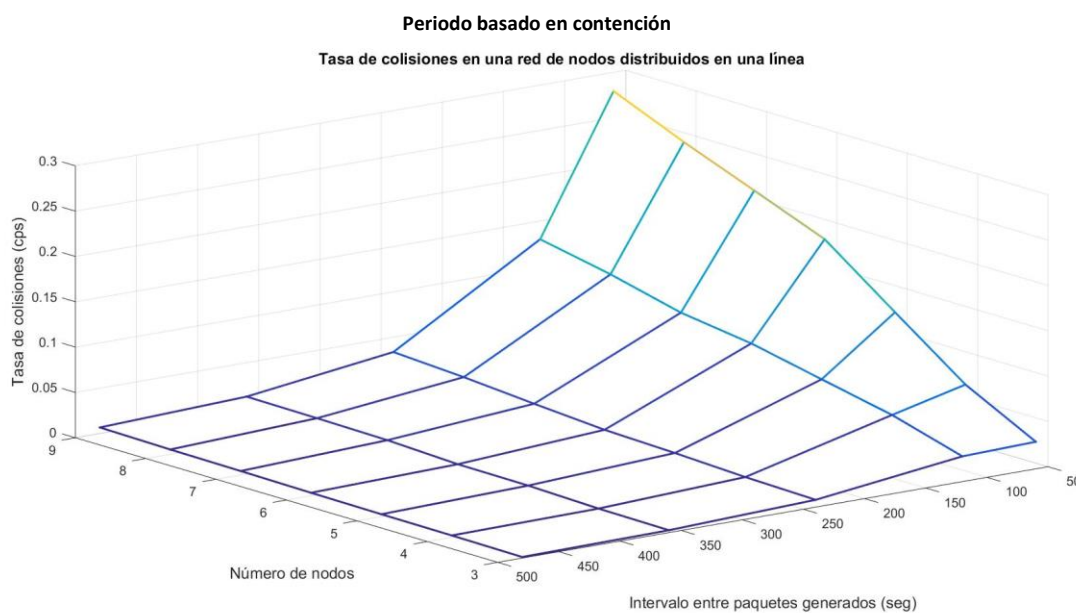


Figura 62. Tasa de colisiones en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes de telemetría y comando.

De las gráficas de la Figura 62 se puede observar que en general a medida que aumenta el número de nodos en la red, aumenta la tasa de colisiones para todas las cargas de tráfico. Sin embargo, también se puede notar que para los últimos intervalos (menores a 240 segundos) esta tasa de colisiones se incrementa de manera más severa para las configuraciones de 5 a 9 nodos en la red. Por otro lado, para los intervalos mayores o iguales a 240 segundos, la tasa de colisiones se mantiene relativamente baja para todas las configuraciones de 3 a 9 nodos. Este comportamiento es esperado, ya que al tener tanto una mayor cantidad de nodos en la red como una mayor cantidad de tráfico, el aumento en la tasa de colisiones es evidente debido a que existe una mayor contención para acceder al canal.

Las tasas de colisiones presentadas en la Figura 62, se ven reflejada en términos de pérdida de paquetes en las gráficas de la Figura 63 y Figura 64. El objetivo de mostrar una gráfica del porcentaje de pérdida de paquetes y otra del número de paquetes perdidos, es poder realizar una comparación entre las diversas configuraciones. La gráfica de la Figura 63 muestra el PPP de toda la red con respecto a los paquetes transmitidos en cada configuración, sin embargo, es importante tener en cuenta que aunque se puede tener un mismo PPP para diversas configuraciones, la diferencia de la cantidad de paquetes perdidos puede ser sustancial. De las gráficas de la Figura 63 se puede observar que conforme se incrementa el tráfico en la red, aumenta el PPP para cada configuración. No obstante, al incrementar el número de nodos este porcentaje se mantiene relativamente constante, lo cual insinúa que el incrementar el número de nodos en la red no tiene tanto impacto en el PPP de la red entera, como lo tiene el aumentar el tráfico dentro de ella.

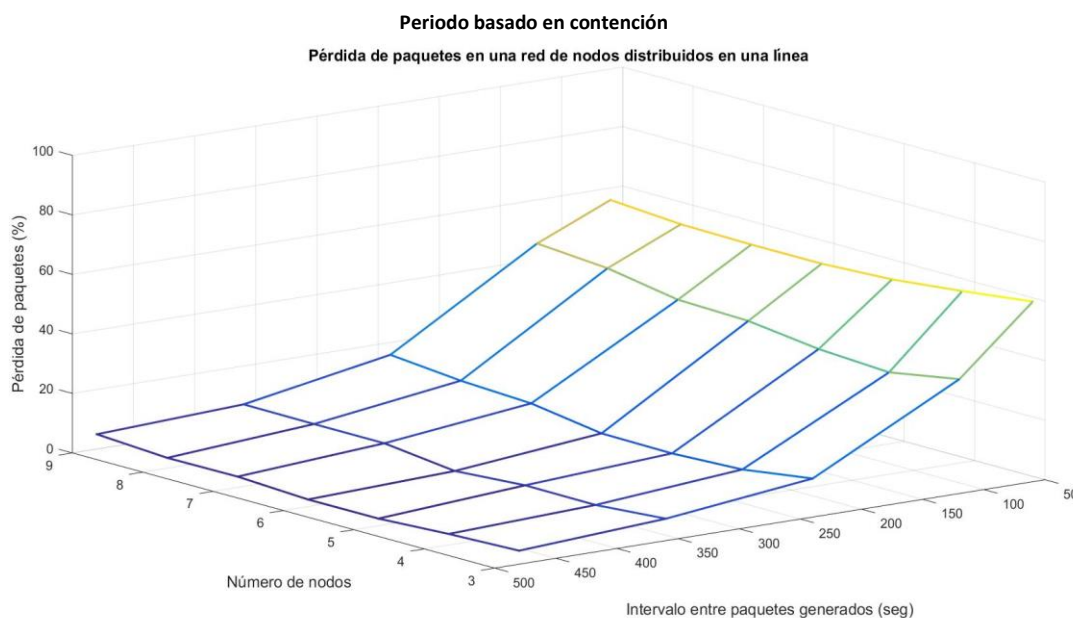


Figura 63. Porcentaje de pérdida de paquetes en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes de telemetría y comando.

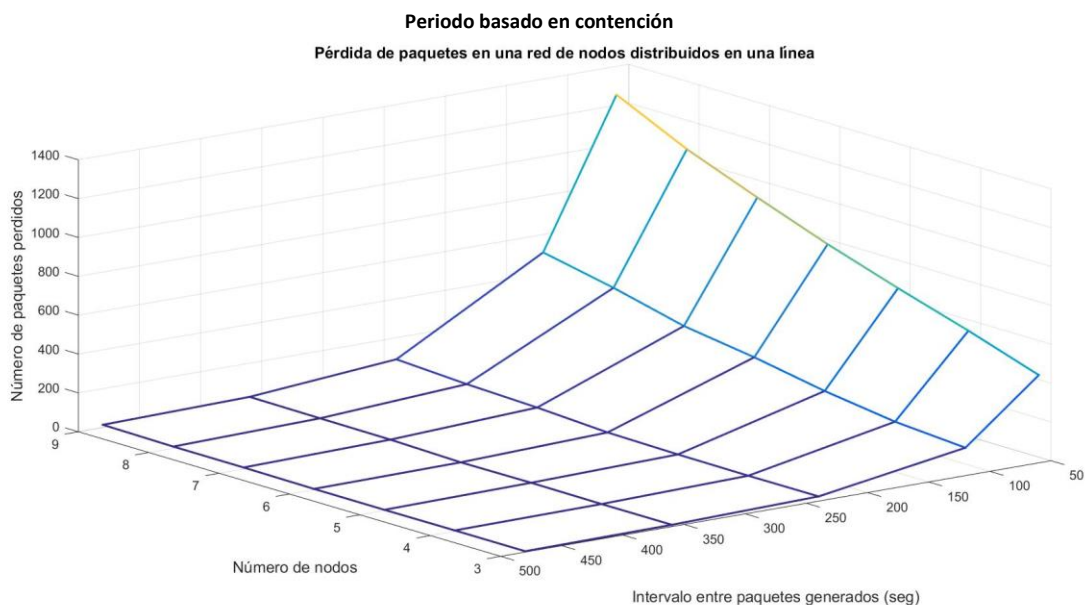


Figura 64. Número de paquetes perdidos en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes de telemetría y comando.

Por otro lado, las gráficas de la Figura 64 van acorde con la tasa de colisiones presentada, en donde para los intervalos de mayor generación de tráfico y para la mayor cantidad de nodos en la red, el número de paquetes perdidos se eleva debido a la alta tasa de colisiones que se tiene para esos casos. Ahora bien, en la Figura 63 y la Figura 64, también se observa que para los intervalos de generación entre paquetes mayores o iguales a 240 segundos la pérdida de paquetes es relativamente muy baja, lo cual indica que para dichas cargas de tráfico los nodos tienen acceso al canal de manera más estable.

A continuación, en la Figura 65, Figura 66 y Figura 67 se muestra la latencia promedio, el caudal eficaz general y el consumo promedio de potencia que presenta toda la red para cada una de las configuraciones. En la gráfica de la Figura 65 se puede observar que casi de manera general, la latencia promedio oscila alrededor de los 60 segundos presentando ligeros incrementos conforme se disminuye el número de nodos en la red. Esto sucede así para casi todos los casos, a excepción de las configuraciones con 3, 4 y 5 nodos en la red, en donde para los intervalos de generación más cortos se registran picos de latencia muy altos en comparación con los mencionados llegando a latencias de hasta casi 1000 segundos. Ahora bien, si se analiza este comportamiento con respecto a los resultados observados para la pérdida de paquetes, se puede notar que a medida que se exhibe una mayor pérdida, la latencia promedio de los paquetes tiende a disminuir. Esto indica que para una configuración determinada, sin bien están llegando pocos paquetes, lo están haciendo de manera más rápida que para aquellas configuraciones que registran una mayor llegada los mismos.

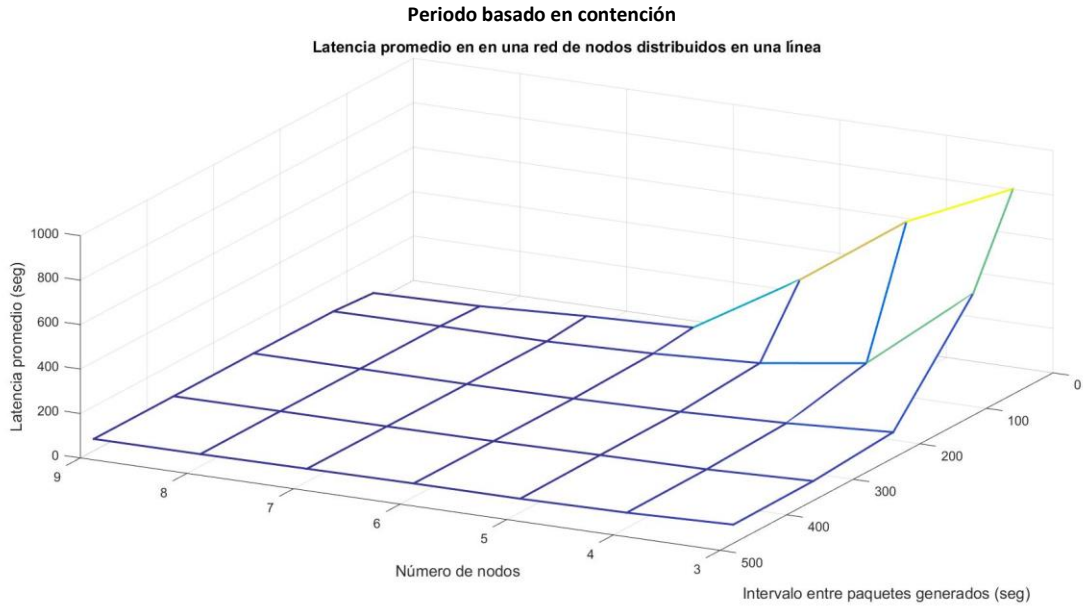


Figura 65. Latencia promedio en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes de telemetría y comando.

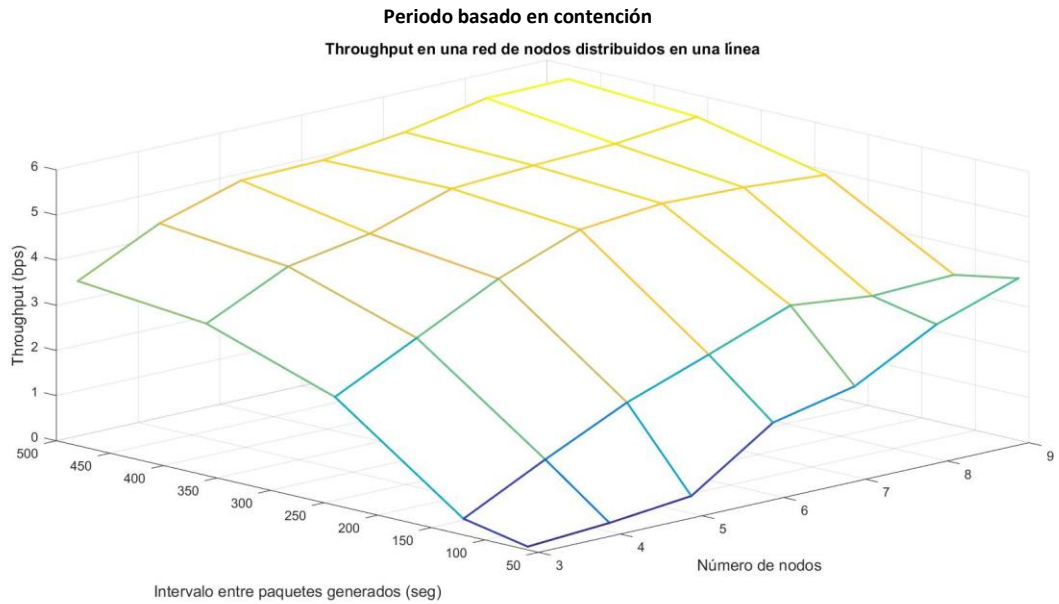


Figura 66. Caudal eficaz general en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes de telemetría y comando.

Por otro lado, de la Figura 66 se puede observar que en general el caudal eficaz de la red aumenta conforme el número de nodos de la misma se incrementa, registrando un máximo de aproximadamente 5.7 bps. Esto sucede de esta manera debido a que al existir más nodos dentro de la red, también existe una mayor cantidad de paquetes circulando a través de ella. Por lo tanto, el caudal eficaz se eleva para los

casos en los que la tasa de colisiones y el PPP se mantengan relativamente bajos. En contraste, se observa que el caudal eficaz se ve afectado por el aumento de carga de tráfico en la red, siendo la configuración con 3 nodos la más perjudicada. El comportamiento registrado para el caudal eficaz de todas las configuraciones, se respalda con los resultados de la latencia promedio que exhiben los paquetes en cada una de ellas (Ver Figura 65), obteniendo que para las configuraciones con más altas latencias se tiene el caudal eficaz más bajo registrado.

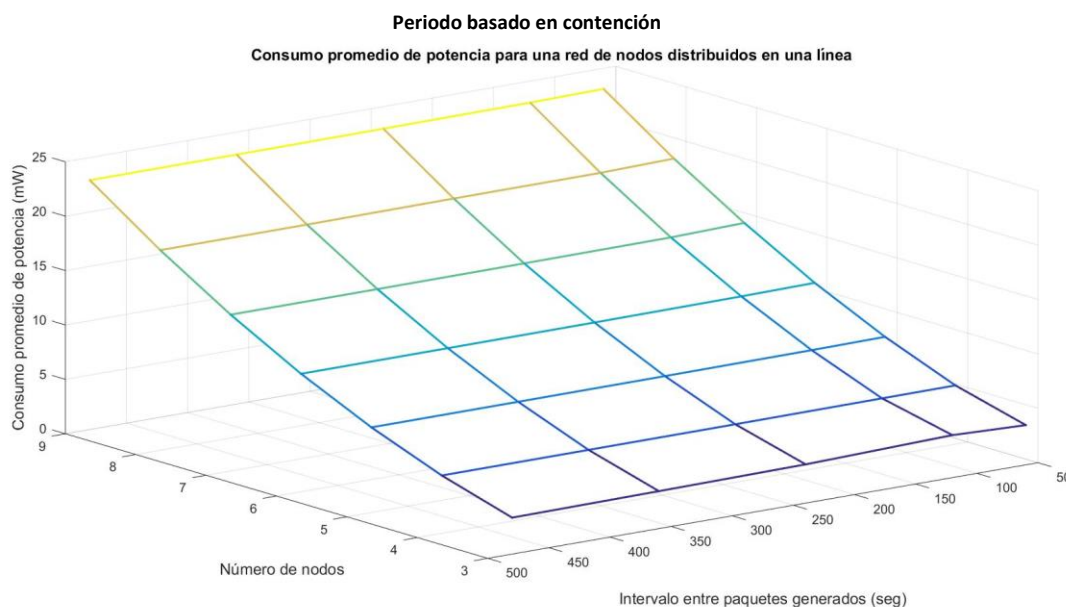


Figura 67. Consumo promedio de potencia en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes de telemetría y comando.

De la Figura 67 se puede observar que para todas las configuraciones, el consumo de potencia promedio se incrementa muy ligeramente conforme se aumenta el tráfico dentro de ella. Por otro lado, este consumo se incrementa de manera importante al aumentarse el número de nodos dentro de la red. Si se realiza una comparación de esta gráfica de consumo con la gráfica de tasa de colisiones, se puede notar que con mayores tasas de colisión se tiene un mayor consumo de potencia, sin embargo, el incremento de este consumo es mínimo.

5.4.5.2 Simulación del periodo libre de contención

Para el caso de la simulaciones realizadas para el periodo libre de contención en donde se emplea un sistema MAC basado en un esquema TDMA distribuido auto-organizable, únicamente se muestran los resultados correspondientes a la evaluación llevada a cabo para el barrido de 3 a 9 nodos variando de igual manera el tráfico inyectado a la red. No se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los nodos

dentro de una determinada red, ya que éstos siguen una pauta esperada que deriva en el análisis anteriormente realizado para el periodo basado en contención, pero con un comportamiento más ordenado debido a la naturaleza del esquema TDMA.

En la Figura 68 y la Figura 69 se muestra el porcentaje de paquetes descartados (PPD) durante este periodo y la latencia promedio que experimentan los paquetes recibidos, respectivamente. El PPD se refiere a aquellos paquetes que son descartados debido a que cuando son recibidos no hay espacio en el buffer para su almacenamiento, ya sea que vengan de un nodo predecesor o de su propia capa de aplicación.

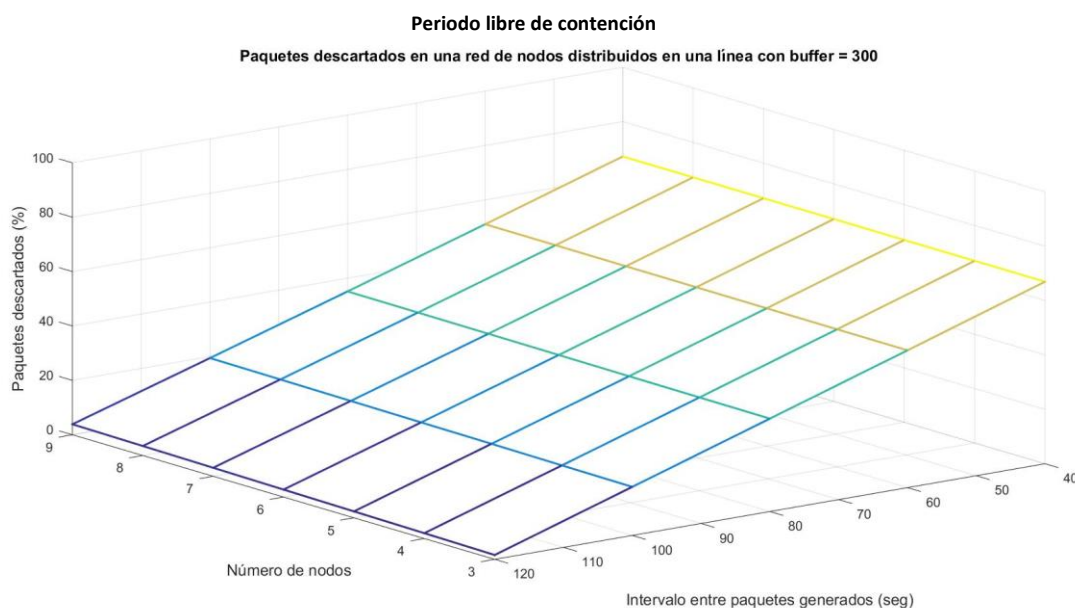


Figura 68. Porcentaje de paquetes descartados en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes con información de los sensores de las boyas.

En la gráfica de la Figura 68 se puede observar que el PPD tiene un incremento lineal tanto para cuando se aumenta el número de nodos como para cuando se aumenta la carga de tráfico en la red. Sin embargo, el incremento más sustancial para cada configuración, se da para el caso del aumento de tráfico. Se puede observar que en cada uno de los intervalos, el PPD varía muy poco respecto al número de nodos en la red, teniendo en promedio un porcentaje de aproximadamente 2.7% de paquetes descartados para el intervalo de 120 segundos y alrededor de 67% para el intervalo de 40 segundos.

Por otro lado, en la Figura 69 se puede observar que la latencia promedio de los paquetes sigue un comportamiento muy similar al exhibido por el PPD, en donde la latencia presenta ligeros incrementos al aumentarse el número de nodos en la red e incrementos importantes al aumentar la carga de tráfico. Los primeros se deben a que evidentemente al tener una línea de nodos más larga, los paquetes deben dar un

mayor número de saltos antes de alcanzar su destino, lo que incrementa el promedio general de la latencia que experimentan los paquetes. Y los segundos se deben a que como cada nodo debe esperar un tiempo determinado dentro de la trama para realizar sus transmisiones y además sólo puede ocupar el canal por un tiempo predefinido, al aumentar la llegada de paquetes, éste los va almacenando para su posterior transmisión. Por lo tanto, conforme la tasa de llegada de paquetes vaya superando la tasa de salida, los paquetes deben esperar mayor tiempo antes de ser transmitidos. De la gráfica de latencias (Figura 69), se puede observar que para el mayor de los intervalos (120 segundos), las latencias promedio para las diversas configuraciones se encuentran por debajo de los 1000 segundos, mientras que para el intervalo menor (40 segundos) éstas se disparan por encima de los 5000 segundos.

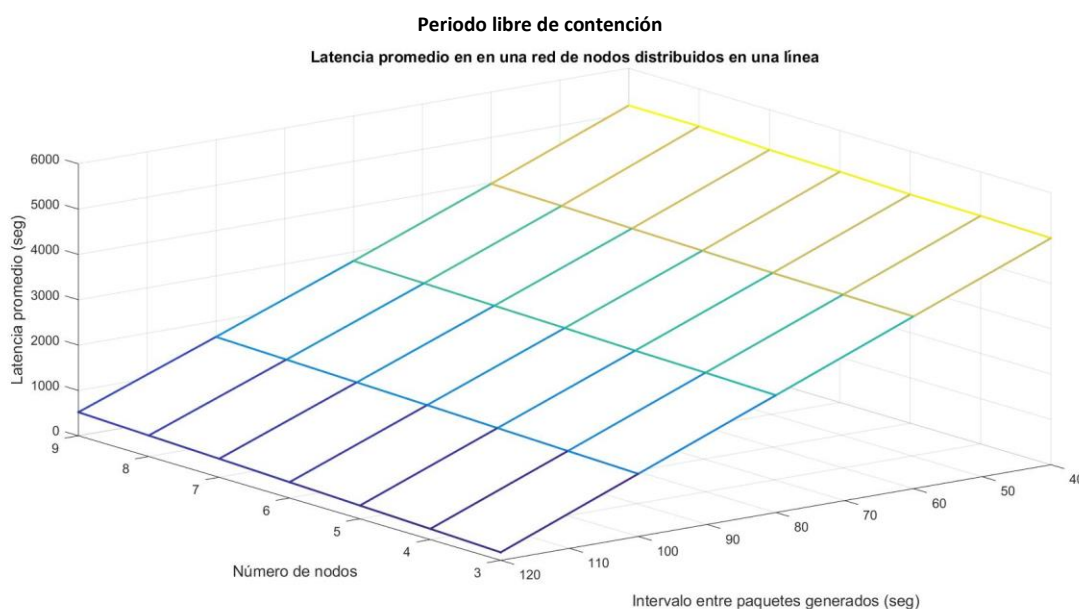


Figura 69. Latencia promedio en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes con información de los sensores de las boyas.

En la Figura 70 se muestra el caudal eficaz registrado durante este periodo para cada una de las configuraciones. De la gráfica mostrada se puede notar que para la mayoría de los casos, a medida que se aumenta tanto la carga de tráfico como el número de nodos se tiene un decremento exponencial del caudal eficaz. También se puede observar que para los intervalos de 40 y 60 segundos en las configuraciones de 8 y 9 nodos, el caudal eficaz registrado por la red no supera los 2 bps. Por otra parte, la mejor curva de caudal eficaz se obtiene para el intervalo de 120 segundos registrando un máximo de aproximadamente 6.7 bps.

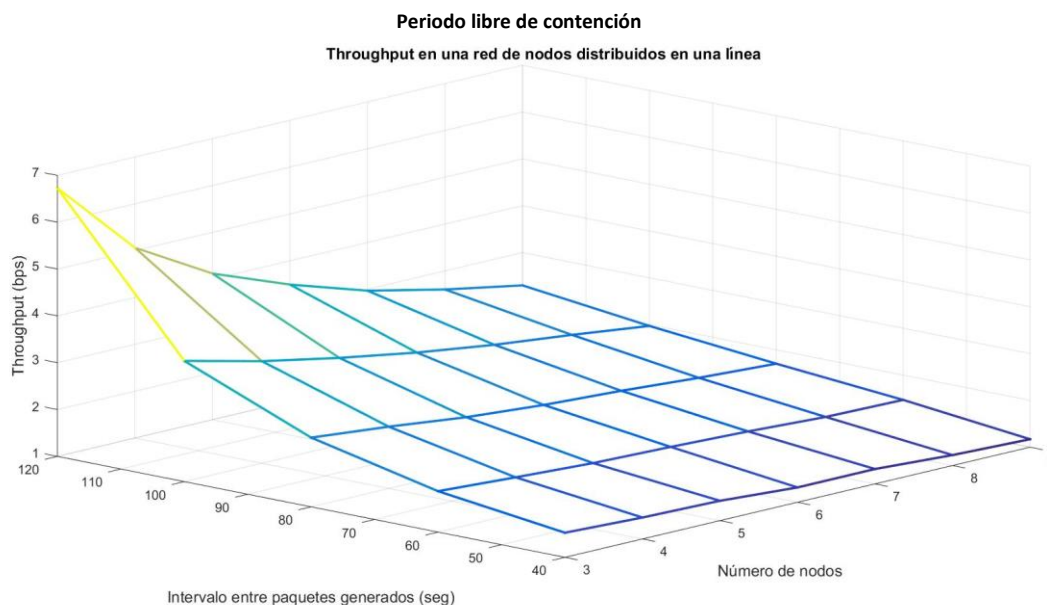


Figura 70. Caudal eficaz en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes con información de los sensores de las boyas.

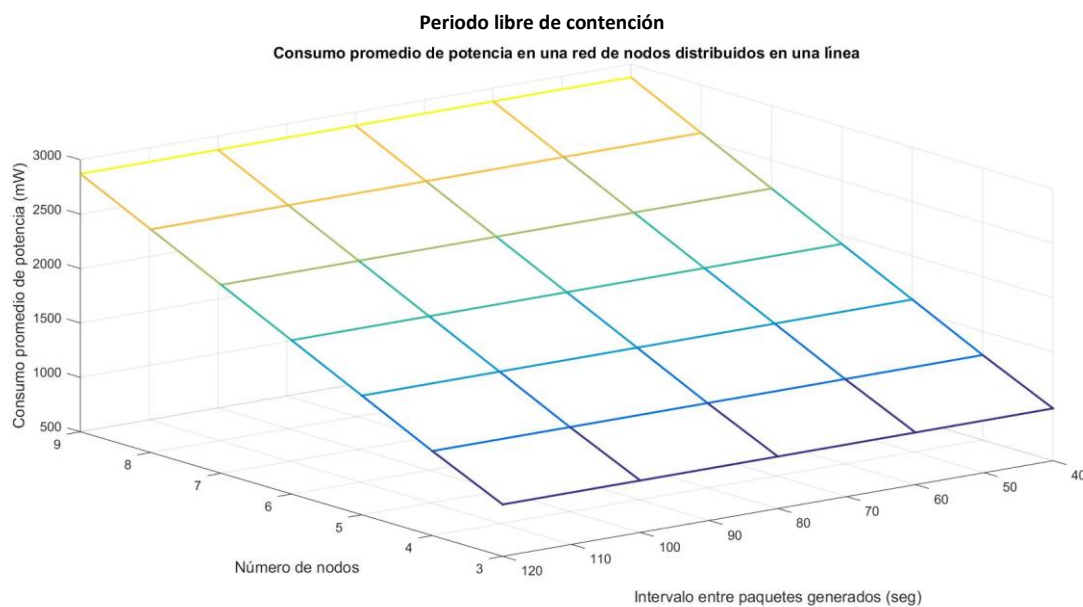


Figura 71. Consumo promedio de potencia en una red de nodos distribuidos en una línea para la transmisión de paquetes con información de los sensores de las boyas.

En la Figura 71, se muestra el consumo de potencia que exhibe cada configuración dentro del periodo libre de contención. Se puede observar que este consumo tiene un comportamiento muy parecido al explicado en el consumo de potencia exhibido en el periodo basado en contención (Ver Figura 67). Sin embargo, para este periodo libre de contención se tiene un consumo mucho mayor llegando a registrar hasta 2880 mW para el caso máximo (configuración con 9 nodos) y 976 mW para el caso mínimo (configuración con 3 nodos).

De los resultados para el periodo libre de contención mostrados anteriormente, se puede observar que el mejor desempeño de la red se obtiene para la carga de tráfico generada con el intervalo de 120 segundos. Esto se debe a que dicho intervalo corresponde a la generación de un paquete en cada supertrama, para lo cual fueron adaptados los diversos parámetros del esquema TDMA, como la duración de cada ranura (especificada en la sección 5.4.3). De tal manera que como se pudo observar, el aumentar la carga de tráfico en la red sin adaptar estos parámetros, resulta en una considerable caída de desempeño de la red entera.

5.5 Conclusiones sobre el diseño del protocolo MAC híbrido propuesto

Los resultados de la simulación del periodo de contención que utiliza un esquema MAC basado en CSMA/CA muestran que para todas las evaluaciones realizadas, se obtiene un buen desempeño y relativamente estable para cargas de tráfico que involucran intervalos entre generación de paquetes mayores o iguales a 240 segundos. Por lo tanto, de acuerdo al perfil de tráfico estimado para este periodo (intervalo de 480 segundos), se podría manejar hasta el doble de la carga de tráfico prevista obteniendo un comportamiento estable por parte de la red. Lo anterior dependiendo de las cotas o umbrales que se determinen para ciertas métricas de interés. Por ejemplo, para los intervalos mencionados se podría establecer una red de hasta 9 nodos obteniendo una baja tasa de colisiones y un PPP general por debajo del 15 % con latencias menores a los 120 segundos. En estos casos el mejor caudal eficaz general se obtiene para la red que tiene mayor número de nodos, debido a que naturalmente existe un mayor tránsito de información dentro de la misma. Sin embargo, este caudal eficaz se ve severamente afectado para las cargas de tráfico que representan intervalos menores a los 240 segundos, por lo que de igual manera esto sugiere que con los parámetros establecidos para el periodo basado en contención, en un momento dado el protocolo no soportaría cargas de tráfico que superen los 1.44 bps aproximadamente. No obstante, este límite de tráfico resulta suficiente para la aplicación del monitoreo marítimo planteada en este trabajo de tesis.

Por otro lado, los resultados obtenidos para el periodo basado en contención también permiten deducir que de manera particular, para una red con determinado número de nodos, aquellos que se encuentran posicionados entre los extremos de la red son los que presentan mayor tasa de colisiones. Sin embargo, estas colisiones repercuten mayormente en la pérdida de paquetes de los nodos más alejados al nodo SINK, lo cual se ve reflejado en el caudal eficaz que exhiben.

Los resultados de la simulación del periodo libre de contención basado en un esquema TDMA indican que de manera general, el incremento de la carga de tráfico tiene un mayor impacto sobre el desempeño de toda la red en comparación con el incremento del número de nodos dentro de la misma. Para el caso del caudal eficaz, los resultados señalan que para cargas de tráfico mayores a las previstas a la hora de establecer la duración y distribución de ranuras, éste decae rápidamente. Por lo tanto, para este esquema es importante tener en consideración el tráfico que estarán generando los nodos y el tamaño de paquete definido, de manera que se pueda establecer adecuadamente la duración de cada ranura y la distribución de las mismas entre los nodos de la red, para obtener con ello el mejor rendimiento posible. Como método opcional se podría dejar un margen de tolerancia ya sea prolongando la duración de las ranuras o asignando un mayor número de éstas a cada nodo y además reduciendo el periodo de inactividad, sin embargo, también se tendría que establecer un compromiso entre rendimiento y consumo de potencia.

En términos de consumo de potencia, de los resultados obtenidos para ambos periodos se puede notar que el uso del esquema MAC CSMA/CA del periodo de contención exhibe un consumo promedio menor en comparación con el uso del esquema MAC TDMA empleado en el periodo libre de contención. En este caso y con las condiciones establecidas, se obtiene que el esquema TDMA puede llegar a presentar aproximadamente hasta un consumo promedio de potencia 125 veces mayor que el del esquema CSMA/CA del periodo basado en contención. Sin embargo, no se puede hacer una comparación directa entre ambos periodos debido a que en la propuesta del presente proyecto de tesis, el periodo libre de contención dura el triple del periodo basado en contención (ya que durante el periodo libre de contención se prevé una mayor carga de tráfico). No obstante, eventualmente se puede variar la relación entre la duración del periodo basado en contención y el periodo libre de contención, teniendo en cuenta los compromisos que ello conlleva.

Por otro lado, también se observó que de manera general y en condiciones estables, para una red con determinado número de nodos, el que presenta un mayor consumo de potencia es aquel que está ubicado a un salto de distancia del nodo SINK. Mientras que el que presenta el menor consumo (sin contar al nodo SINK que no realiza transmisiones) es el nodo ubicado en el extremo opuesto al nodo SINK. Esto debido a que el nodo más cercano al SINK corresponde al nodo que debe retransmitir la mayor cantidad de tráfico, de manera que conforme se van alejando el número de retransmisiones que deben realizar se va disminuyendo. Por lo tanto, además de los factores antes mencionados, se debe considerar que la vida útil de los nodos depende de la ubicación que estos posean dentro de la red.

Capítulo 6. Conclusiones y trabajo a futuro

6.1 Introducción

En el presente trabajo de investigación se trabajó en parte de la propuesta del radio de comunicaciones que va montado en cada una de las boyas de monitoreo pensadas para la aplicación que se busca en este proyecto. Se trabajó específicamente en el protocolo de la subcapa de control de acceso al medio y en el esquema de modulación en banda base que forma parte de la capa física. Durante el proceso surgieron inconvenientes a los cuales se les trató de dar la mejor solución posible, adquiriendo con ello nuevos conocimientos y herramientas. A lo largo de este capítulo se dan a conocer las conclusiones a las que se llegaron a partir de los resultados obtenidos en el trabajo realizado. Además se presentan propuestas de trabajo a futuro que permitirían llevar a cabo una serie de mejoras al trabajo de investigación aquí realizado.

La aportación principal de este proyecto de tesis radicó en proponer un subsistema de comunicaciones para comunicación de largo alcance entre boyas marinas, el cual ofrece ventajas en cuanto a costos y gestión de red al conjuntar la información de varias boyas en una sola, evitando la necesidad de que cada una cuente con un enlace satelital. Para lograr esto se realizó el diseño, adaptación y evaluación de un protocolo de control de acceso al medio para la comunicación de largo alcance entre boyas marinas, así como la implementación del esquema de modulación en banda base sobre una arquitectura de bajo costo, flexible y reconfigurable de SDR. Por lo tanto, con esto se logra cumplir plenamente con objetivo principal de esta tesis. Además de las aportaciones mencionadas, se produjeron otras que no fueron planteadas en un inicio, como la inclusión de la etapa de IF dentro de la arquitectura de SDR.

6.2 Conclusiones

A continuación se muestra la discusión de las conclusiones y de las aportaciones desarrolladas durante este proyecto de investigación. Se presentan cada una de ellas divididas en la implementación del esquema de modulación en banda base sobre una plataforma de SDR y el diseño del protocolo de control de acceso al medio.

6.2.1 Sobre la implementación del esquema de modulación en banda base en SDR

Para esta implementación, inicialmente se estudiaron las características y propiedades de diversos esquemas de modulación dentro de la literatura. Con base en este estudio se eligió un esquema de modulación que presentara sencillez y robustez cumpliendo con la tasa de datos requerida para la aplicación. Luego de la implementación de este esquema sobre una arquitectura de SDR se realizaron pruebas del sistema con ayuda de un osciloscopio digitalizador de alta tasa de muestreo. Enseguida se presentan las principales conclusiones que se generaron del trabajo realizado en esta etapa.

- La metodología de implementación (basada en el concepto de SDR) del esquema de modulación desarrollada conduce a una solución sencilla y reconfigurable basada en una arquitectura montada sobre procesadores ARM de relativo bajo costo.
- Se incluyó la etapa de IF dentro de la arquitectura de SDR propuesta, realizando pruebas con diferentes frecuencias para esta etapa. En base a ello se pudo determinar que a medida que se establece una frecuencia más alta para dicha etapa, la señal resultante presenta mayor distorsión causada por variaciones de la frecuencia de muestreo del DAC del procesador utilizado para la implementación. Por lo tanto, el establecimiento de la frecuencia portadora utilizada para la etapa de IF depende directamente de la frecuencia máxima de operación de la arquitectura de microprocesadores empleada, la cual dictaminará la máxima frecuencia de muestreo alcanzable. No obstante, es importante dejar un margen entre la frecuencia máxima de muestreo y la frecuencia máxima de operación de la arquitectura SDR utilizada con el fin de reducir los efectos de posibles variaciones en la frecuencia de muestreo del DAC.
- La demodulación y decodificación fuera de línea resultó no ser una tarea trivial, debido a la desviación de frecuencia presentada en la señal modulada (Ver Figura 42). Por esta razón, no fue posible realizar una decodificación automatizada para las señales captadas con el osciloscopio digitalizador. Esta desviación de frecuencia es causada por la falta de precisión por parte de los componentes de la tarjeta utilizada. Sin embargo, gracias a la flexibilidad de los sistemas de SDR sería posible mudar la plataforma de software propuesta hacia una arquitectura de microprocesadores que proporcione una mayor precisión, de manera que se satisfagan las necesidades de la aplicación en cuestión.

6.2.2 Sobre el diseño del protocolo de control de acceso al medio

Se realizó una revisión bibliográfica de los diversos protocolos de control de acceso al medio cuya aplicación estuviera relacionada con la que se pretende en este trabajo de investigación. Se analizaron sus características y propiedades más importantes examinando también sus ventajas y desventajas. A partir de este estudio se diseñó una técnica de control de acceso al medio para redes de sensores de larga distancia. Con el objetivo de evaluar el desempeño de la técnica de acceso al medio propuesta, se implementó un escenario de simulación en el modelador de red OMNeT++. A continuación se presentan las conclusiones más relevantes obtenidas para esta etapa.

- OMNeT++ es una herramienta de simulación de código abierto con una potente interfaz gráfica que ha ganado gran popularidad dentro de la comunidad científica, ofreciendo diversas librerías y modelos de simulación que pueden ser integrados o adaptados a diferentes aplicaciones. Sin embargo, la curva de aprendizaje que se requiere tanto en términos de programación como de la tecnología a evaluar debe considerarse.
- De acuerdo al estudio de protocolos MAC realizado y la aplicación que se planteó en este trabajo de tesis en la cual se considera el manejo de dos tipos de tráfico en las boyas de monitoreo, diseñar un protocolo MAC híbrido capaz de adecuarse al perfil de tráfico de la aplicación resultó ser la mejor opción. Gracias a este esquema híbrido es posible atender las necesidades del tráfico de telemetría y comando y del tráfico generado por los sensores de las boyas por separado aprovechando las ventajas de los esquemas CSMA/CA y TDMA respectivamente.
- Los resultados obtenidos al evaluar el funcionamiento del protocolo considerando diversas cargas de tráfico en la red permitieron demostrar que el protocolo puede cumplir con los requerimientos marcados por el perfil de tráfico previsto. Incluso, de los resultados obtenidos se puede establecer que la técnica MAC propuesta tiene amplios márgenes de tolerancia en términos de carga de tráfico soportada. Específicamente, la técnica propuesta mantiene un comportamiento estable (con un PPP inferior al 10 %) para el doble del tráfico previsto para la información de telemetría y comando y para aproximadamente 5 veces el tráfico previsto para la información proveniente de los sensores de las boyas.

- Para el caso del periodo libre de contención en donde se emplea un esquema basado en TDMA, los resultados permiten inferir que el tamaño de paquete establecido juega un papel importante en términos de caudal eficaz y consumo de potencia. Esto debido a que la distribución y duración de ranuras dependen directamente del tamaño de paquete especificado. Por lo tanto, una mayor generación de paquetes por cada supertrama implica asignar un mayor número de ranuras a cada nodo o en su defecto incrementar la duración de las mismas, lo que impacta indirectamente sobre el consumo de potencia de la red entera.
- Incrementar la duración del periodo basado en contención podría mejorar el desempeño del esquema MAC CSMA/CA para mayores cargas de tráfico. No obstante, esto también implica un aumento del consumo de potencia debido a que el incremento del periodo basado en contención sería a costa de disminuir el periodo de inactividad. Por lo tanto variar la relación entre las duraciones de los periodos del protocolo propuesto implica establecer compromisos entre rendimiento y consumo de potencia.
- Tanto para el esquema basado en CSMA/CA como para el esquema basado en TDMA, los resultados de la evaluación muestran que de manera general, el incrementar el número de nodos en la red no tiene tanto impacto sobre el desempeño de la misma como lo tiene aumentar la carga de tráfico.
- En las condiciones establecidas y de manera general, los resultados muestran que el consumo promedio de potencia de la red durante el periodo basado en contención es menor que el registrado durante el periodo libre de contención. Por lo tanto la mayor parte de la energía se consume durante el uso de esquema basado en TDMA para la transmisión de la información de las boyas, aún y cuando se le implementó un sistema de detección de ranuras inactivas para combatir el desperdicio de energía.

6.3 Trabajo a futuro

Aunque se cumplieron los objetivos de este proyecto de investigación, el trabajo realizado representa un primer acercamiento al subsistema de comunicaciones a incluir en las boyas de monitoreo, por lo que aún queda desarrollo e investigación por hacer. Enseguida se presentan las recomendaciones para trabajo a futuro que pueden llevarse a cabo a partir de este trabajo de tesis.

- Portar la implementación del esquema de modulación hacia otra arquitectura de microprocesadores más potente y evaluar el desempeño de la misma.
- Añadir un filtro conformador para el etapa de transmisión (p. ej. filtro gaussiano, filtro coseno alzado, etc.) que permita concentrar la mayor parte de energía dentro de un ancho de banda establecido logrando a su vez una mayor eficiencia espectral.
- Diseñar, implementar y evaluar un receptor que permita realizar las compensaciones de las posibles desviaciones de frecuencia obtenidas en las señales recibidas.
- Implementar y evaluar la reutilización de ranuras para el esquema TDMA distribuido auto-organizable utilizado en el periodo libre de contención.
- Realizar una comparación del protocolo de control de acceso al medio propuesto variando los periodos de contención y libre de contención con el fin de encontrar un punto de operación óptimo para la aplicación.

Literatura citada

- Abidi, A. A. (2006). Evolution of a software-defined radio receiver's RF Front-End. *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium, 2006*, 17–20.
- Albaladejo, C., Soto, F., Torres, R., Sánchez, P., & López, J. A. (2012). A low-cost sensor buoy system for monitoring shallow marine environments. *Sensors (Switzerland)*, *12*(7), 9613–9634. h
- Anónimo. (2016) ¿Qué es la latencia? - www.speed-test.es. Speed-test.es. Recuperado en Julio de 2016, de http://www.speed-test.es/qu_es_la_latencia
- Atelin, P., & Dordoigne J. (2006). *Redes informáticas*. Ed. ENI.
- Bertocco, M., Gamba, G., & Sona, A. (2008). Is CSMA/CA really efficient against interference in a wireless control system? an experimental answer. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*, 885–892.
- Buettrich, S., & Escudero, P. (2007). Topología e infraestructura básica de redes inalámbricas. Tshwane, Sudafrica: TRICALCAR.
- Chen, C., Cui, L., Tan, S., Leung, V. C. M., & Wang, H. (2012). Flow-driven media access control protocols over mobile long-distance ad hoc networks. *IET Networks*, *1*(1), 34–45.
- Chen, S. (2010). ALOHA class of multiple access protocols. *Electronics and Computer Science*, *3030*, 71–82.
- Chen, Y., Lu, S., Kim, H. S., Blaauw, D., Dreslinski, R. G., & Mudge, T. (2016). A low power software-defined-radio baseband processor for the Internet of Things. *2016 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA)*, 40–51.
- Corral Ignoto, A. B., & Egea Lopez, E. (2005). Diseño e implementación de un entorno de simulación para redes de sensores inalámbricos. *Interfaces*.
- Demirkol, I., Ersoy, C., & Alagöz, F. (2006). MAC Protocols for Wireless Sensor Networks : a Survey. *IEEE Communications Magazine*, 1–6.
- Domínguez Pinar, I., & Fuentes Murillo, J. J. (2011). *Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software*. (U. de Sevilla, Ed.) (1a Edición).
- Ergen, M., Lee, D., Puri, A., Varaiya, P., & Tripakis, S. (2002). Wireless Token Ring Protocol, 1–6.
- Garroppo, R. G., Giordano, S., Iacono, D., & Tavanti, L. (2011). Experimental and simulation analysis of a WiMAX system in an emergency marine scenario. *Computer Communications*, *34*(7), 847–861.
- Gilani, M. H. S., Sarrafi, I., & Abbaspour, M. (2013). An adaptive CSMA/TDMA hybrid MAC for energy and throughput improvement of wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, *11*(4), 1297–1304.
- Golomb, S. W., & Scholtz, R. A. (1965). Generalized barker sequences. *IEEE Transactions on Information Theory*, *11*(4), 533–537.

- Grayver, E. (2013). *Implementing software defined radio*. New York, NY: Springer.
- Hameed, S. A., Shaaban, E. M., Faheem, H. M., & Ghoniemy, M. S. (2009). Mobility-Aware MAC protocol for delay-sensitive wireless sensor networks. *IEEE*.
- Haykin, S. (2001). *Communication Systems. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data* (4Th Editio, Vol. 103). Wiley. Recuperado en Septiembre de 2016, de http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=11136974
- Hernández Ontiveros, J.M. (2007). Protocolo de control de acceso al medio (mac) basado en csma/ca que toma en cuenta requerimientos de calidad de servicio y que es eficiente en el consumo de energía, aplicable a redes de sensores. Tesis pregradual de Maestría. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Ensenada, B.C. 136pp.
- Hoesel, L. F. W. Van, Nieberg, T., Kip, H. J., & Havinga, P. J. M. (2004). Advantages of a TDMA based, energy-efficient, self-organizing MAC protocol for WSNs. *2004 IEEE 59th Vehicular Technology Conference. VTC 2004-Spring (IEEE Cat. No.04CH37514)*, 3, 1598–1602.
- Huidobro Moya, J., Blanco Solsona, A., & Calero, J. (2008). *Redes de área local*. Madrid, España: Paraninfo.
- Hussain, I., Sarma, N., & Saikia, D. K. (2014). TDMA MAC protocols for wifi-based long distance networks: a survey. *International Journal of Computer Applications*, 94(19), 1–8.
- IEEE Computer Society. (2011). *IEEE Std 802.15.4™-2011 — Part 15 . 4 : Low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs)* (Vol. 2011).
- Ilyas, M., & Ahmed, S. (2011). MAC protocol for wireless network on chip. *Electrical Engineering*, (February), 54.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (2010). Estado del arte y prospectiva de la tecnología para la explotación de campos petroleros en aguas profundas. Programa de explotación de campos en aguas profundas. Recuperado de <http://www.observatoriodelaingenieria.org.mx/docs/pdf/3ra.%20Etapa/18.Aguas%20Profundas.pdf>
- Íñigo Griera, J. et al. (2008). *Estructura de redes de computadores*. Barcelona: Editorial UOC.
- Johnson, E. E. (2006). HF radio mesh networks. *IEEE Military Communications Conference, 2006. MILCOM 2006*.
- Johnson, E. E., & Balakrishnan, M. (2003). Impact of turnaround time on wireless mac protocols. *IEEE Military Communications Conference, 2003. MILCOM 2003.*, 1(C), 375–381.
- Johnson, E., & Tang, Z. (2003). Robust token management for unreliable networks. ... , 2003. *Milcom'03*. ..., (section 1), 1–6.
- Kenington, P. B. (2005). *RF and baseband techniques for software defined radio. Mobile Communications Series*. Recuperado de <http://www.artechhouse.com/Main/Books/RF-and-Baseband-Techniques-for-Software-Defined-Ra-1049.aspx>

- Kim, Y. K. Y., Kim, J. K. J., Wang, Y. W. Y., Chang, K. C. K., Park, J. W. P. J. W., & Lim, Y. L. Y. (2009). Application scenarios of nautical ad-hoc network for maritime communications. *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges*, 1–4.
- Latency, Delay, Tiempo de Latencia. (2016). Telefonivozip.com. Recuperado en Julio de 2016, de <http://www.telefonivozip.com/glosario-voip/l/latency.htm>
- Lu, G., Krishnamachari, B., & Raghavendra, C. S. (2004). An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in wireless sensor networks. *18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004. Proceedings., 0(C)*, 224–231.
- MiXiM project. (2011). Mixim.sourceforge.net. Recuperado en Agosto de 2016, de <http://mixim.sourceforge.net/index.html>
- Morales Mendoza, L. J. (n.d.). Teorema del muestreo. Recuperado en Agosto de 2016, de <http://www.dicis.ugto.mx/profesores/ljavier/documentos/Lec01 - Teorema de Muestreo.pdf>
- Nieto, J. W., & Furman, W. N. (2012). Improved data rate robustness of US MIL-STD-188-110C appendix D wideband HF waveforms. In *Ionospheric Radio Systems and Techniques (IRST 2012)*, 12th IET International Conference on (pp. 1-5). IET.
- Nunes, B. A. A., Mendonca, M., Nguyen, X. N., Obraczka, K., & Turletti, T. (2014). A survey of software-defined networking: past, present, and future of programmable networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(3), 1617–1634.
- Paulo, A., Oliveira, D., & Angelina, R. (2005). Redes de Sensores. *Computer*.
- Pham, H., & Jha, S. (2004). An adaptive mobility-aware mac protocol for sensor networks (MS-MAC). *IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*, 558–560.
- Ramacher, U., Raab, W., Hachmann, U., Langen, D., Berthold, J., Kramer, R., ... Harrington, J. (2011). Architecture and implementation of a software-defined radio baseband processor. *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2193–2196.
- Rouphael, T. J. (2008). *RF and digital signal processing for software-defined radio - a multi-standard multi-mode approach*.
- Sánchez García, J. (2015). Comunicaciones móviles celulares. Notas de clase. *CICESE*, 1–18.
- Stankovic, J. A. (2008). Wireless sensor networks. *IEEE Computer*, 2008, 41(10), 92–95.
- STMicroelectronics. (2015). Data brief: 32F429IDISCOVERY - Discovery kit with STM32F429ZI MCU. Recuperado de www.st.com/resource/en/data_brief/32f429idiscovery.pdf
- Van, L. F. W. H., Havinga, P. J. M., & Hoesel, L. F. W. Van. (2004). A lightweight medium access protocol (LMAC) for wireless sensor networks: reducing preamble transmissions and transceiver state switches. *1st International Workshop on Networked Sensing Systems, INSS 2004*, 205–208.
- Van Dam, T., & Langendoen, K. (2003). An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. *Proc. 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '03)*, 171–180.

- Varga, A. (2001). The OMNeT++ discrete event simulation system. *Proceedings of the European Simulation Multiconference*, 319–324. Recuperado de <http://doi.org/10.1109/ICIT.2008.28>
- Vikram Srinivasan, Pavan Nuggehalli, Chiasserini, C. F., & Rao, R. R. (2003). Cooperation in wireless ad hoc networks. *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No.03CH37428)*, 2, 808–817.
- Villarreal Reyes, S. (2015). Sistemas de redes inalámbricas de área personal (WPAN) y área corporal (WBAN). *Lectura de redes WPAN y WBAN, CICESE*. 1-30.
- Wei, X., Qi, X., Xiao, L., Shi, Z., & Huang, L. (2012). Software-defined radio based On Cortex-A9. *Communications and Networking in China (CHINACOM), 2012 7th International ICST Conference on*, 1, 758–761.
- Ye, W., Heidemann, J., & Estrin, D. (2002). An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. *IEEE INFOCOM 2002*, 0(c), 1567–1576.
- Yun, C., & Lim, Y. (2012). ASO-TDMA: ad-hoc self-organizing TDMA protocol for shipborne ad-hoc networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012(1), 320.
- Zhou, M. T., & Harada, H. (2012). Cognitive maritime wireless mesh/ad hoc networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(2), 518–526.
- Zimmermann, H. (1980). OSI reference model the ISO model of architecture for open systems interconnection. *IEEE Transactions on Communications*, 28(4), 425–432.
- Zuñiga López, V. (2005). Redes de transmisión de datos. Tesis de ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo. 76 pp.