



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

PLATAFORMA DE EVALUACIÓN DE MECANISMOS DE LOCALIZACIÓN DE NODOS EN REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS BAJO EL AGUA (UWSN)

GISELA ELIZABETH CUJILEMA DAGA

Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAGÍSTER EN SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES

RIOBAMBA - ECUADOR

JUNIO 2019



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

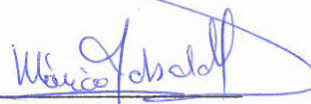
El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado “PLATAFORMA DE EVALUACIÓN DE MECANISMOS DE LOCALIZACIÓN DE NODOS, EN REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS BAJO EL AGUA (UWSN)”, de responsabilidad de la Srta. Gisela Elizabeth Cujilema Daga, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

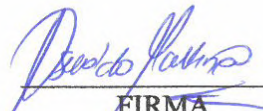
Dr. Juan Vargas Guambo Msc.
PRESIDENTE


FIRMA

Ing. Mónica Zabala Haro Msc.
DIRECTOR


FIRMA

Ing. Oswaldo Martínez Guashima Msc.
MIEMBRO


FIRMA

Ing. Alberto Arellano Aucancela Msc.
MIEMBRO


FIRMA

Riobamba, Junio 2019

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Gisela Elizabeth Cujilema Daga, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Gisela Elizabeth Cujilema Daga

0604442483

DECLARACION DE AUTENTICIDAD

Yo, Gisela Elizabeth Cujilema Daga, declaro que el presente **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría.

Riobamba, 17 de Junio de 2019.

Gisela Elizabeth Cujilema Daga

0604442483

DEDICATORIA

Con mucha humildad y todo el cariño de mi corazón, dedico este esfuerzo a mis queridos padres, hermanos y sobrinos quienes representan el soporte de mi vida y cada una de sus personalidades me llenan de entusiasmo para alcanzar grandes metas.

¡ESTE LOGRO ES NUESTRO!

AGRADECIMIENTO

A mi Dios Bendito quien se ha manifestado en todas las personas que han apoyado este proceso y porque me ha regalado la enorme bendición de poder cruzar esta etapa hasta el final.

A mis padres quienes con su infinito amor siempre me han apoyado, confiado en mí y nunca me han dejado sola.

A toda mi familia por su preocupación constante y sus buenos deseos.

Un agradecimiento especial a los Ingenieros: Mónica Zabala, Alberto Arellano y Oswaldo Martínez por su amistad, tiempo y apoyo recibido para el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos, por su apoyo y a todas las personas que han formado parte de mi vida profesional y personal. Gracias por su confianza y sobre todo porque se convirtieron en la familia que me faltó cuando estuve lejos de casa.

Seguramente Dios y la vida compensarán todo el cariño y buena voluntad que me brindaron...

¡INFINITAS GRACIAS!

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	¡Error! Marcador no definido.
ABSTRACT.....	¡Error! Marcador no definido.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
1 Planteamiento del Problema.....	2
1.1. Situación Problemática.....	2
1.2. Formulación del Problema	3
1.3. Sistematización de Problema	3
1.4. Justificación de la investigación.....	3
1.5. Objetivos	4
1.5.1. Objetivo General	4
1.5.2. Objetivos Específicos.....	4
1.6. Hipótesis.....	5
CAPÍTULO II	6
2 Marco Teórico.....	6
2.1 Red de Sensores Inalámbricos Submarinos (UWSN)	6
2.2.1 Descripción de las Redes de Sensores Inalámbricos Submarinos (UWSN)	6
2.2.2 Características de las UWSN	7
2.2.3 Arquitecturas de Comunicación UWSN	8
2.2.3.1 UWSN Bidimensional.....	8
2.2.3.2 UWSN Tridimensional.....	10
2.2.3.3 Red con Vehículos Autónomos Bajo el Agua (AUVs).....	10
2.2.4 Elementos de una Red UWSN	11
2.2.4.1 Nodos Sensores.	11
2.2.4.2 Nodo SINK.	12

2.2.4.3	Canal Físico.....	12
2.2.4.4	Red.....	12
2.2.5	Aplicaciones de Redes de Sensores Submarinos	13
2.3	Protocolos de Enrutamiento para UWSN.....	15
2.3.1	Reenvío Basado en Vectores (VBF)	15
2.3.2	Reenvío Basado en Vectores Salto a Salto (HH-VBF)	21
2.3.3	Protocolo de Enrutamiento de Haz Enfocado (FBR).....	24
2.3.4	Enrutamiento Sectorial con Predicción de Localización de Destino (SBR-DLP)	30
2.4	Herramientas de Simulación.....	35
2.4.1	Aqua-Sim	35
2.4.2	Shawn.....	36
2.4.3	UWSim.....	37
2.4.4	VisualSense.....	38
CAPÍTULO III.....		40
3	Metodología de la Investigación	40
3.1	Introducción	40
3.2	Selección de la Herramienta de Simulación.....	40
3.3	Esquema de Red UWSN.....	42
3.3.1	Elementos de la Red UWSN.....	43
3.4	Ambiente de Simulación.....	44
3.4.1	Parámetros de Simulación.....	47
3.5	Software Utilizado.....	50
3.5.1	Instalación de Aqua-Sim	50
3.5.2	Configuración de los parámetros de simulación.....	51
3.5.3	Ejecución de la Simulación en Aqua-Sim.....	52
CAPÍTULO IV.....		58
4	Resultados y Discusión.....	58

4.1	Análisis de Resultados	58
4.1.1	Análisis de los Parámetros de Rendimiento.....	59
4.1.1.1	Análisis de los Promedios End and End Delay	59
4.1.1.2	Análisis de los Promedios del Energy Consumption.	61
4.1.1.3	Análisis de los Promedios del Throughput.	62
4.2	Comprobación de la Hipótesis	64
4.2.1	Comprobación de Hipótesis para las Redes Densas Móviles.....	64
4.2.1.1	Prueba Shapiro-Wilk para la Normalidad.	64
4.2.1.2	Prueba de Anova de un Factor y Prueba Post Hoc de Comparaciones Múltiples HSD de Tukey para las Muestras RDeM con $v=0,1m/s$	65
4.2.1.3	Prueba de Anova de un Factor y Prueba Post Hoc de Comparaciones Múltiples HSD de Tukey para las Muestras RDeM con $v=1,2m/s$	68
4.2.2	Comprobación de Hipótesis para las Redes Dispersas Móviles.....	71
4.2.2.1	Prueba Shapiro-Wilk para la Normalidad.	71
4.2.2.2	Prueba de Anova de un factor y Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey para las muestras RDiM con $v=0,1m/s$	72
4.2.2.3	Prueba de Anova de un Factor y Prueba Post Hoc de Comparaciones Múltiples HSD de Tukey para las Muestras RDiM con $v=1,2m/s$	75
	CONCLUSIONES	80
	RECOMENDACIONES	81
	GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	82
	BIBLIOGRAFÍA	1

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Comparación entre Medios de Comunicación UWSN	7
Tabla 2-2: Proceso como el nodo S selecciona el siguiente nodo de retransmisión	33
Tabla 1-3: Escala de Likert de las Características de los Protocolos	41
Tabla 2-3: Ponderación de las características de los Simuladores para UWSN	41
Tabla 3-3: Resultado Final de la Ponderación de los Simuladores	42
Tabla 4-3: Parámetros de Simulación.	44
Tabla 5-3: Velocidad de las Corrientes Marinas en las islas Galápagos.....	49
Tabla 1-4: Promedios del End and End Delay	59
Tabla 2-4: Promedios del Energy Consumption.	61
Tabla 3-4: Promedios del Throughput.	62
Tabla 4-4: Prueba Shapiro-Wilk de las muestras de las RDeM.....	64
Tabla 5-4: Prueba de Anova del End and End Delay en RDeM con $v=0,1$ m/s	65
Tabla 6-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey del End and End Delay en RDeM con $v=0,1$ m/s.	66
Tabla 7-4: Prueba de Anova de un factor para Energy Consumption en RDeM con $v=0,1$ m/s.	66
Tabla 8-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Energy Consumption en RDeM con $v=0,1$ m/s.....	67
Tabla 9-4: Prueba de Anova de un factor para Throughput en RDeM con $v=0,1$ m/s	67
Tabla 10-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Throughput en RDeM con $v=0,1$ m/s.....	68
Tabla 11-4: Prueba de Anova de un factor para End and End Delay en RDeM con $v=1,2$ m/s	68
Tabla 12-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para End and End Delay en RDeM con $v=1,2$ m/s.....	69
Tabla 13-4: Prueba de Anova de un factor para Energy Consumption en RDeM con $v=1,2$ m/s ...	69
Tabla 14-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Energy Consumption en RDeM con $v=1,2$ m/s.....	70
Tabla 15-4: Prueba de Anova de un factor para Throughput en RDeM con $v=1,2$ m/s.....	70
Tabla 16-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Throughput en RDeM con $v=1,2$ m/s.....	71
Tabla 17-4: Prueba Shapiro-Wilk de las muestras de las RDiM.	71
Tabla 18-4: Prueba de Anova de un factor para End and End Delay en RDiM con $v=0,1$ m/s.....	72

Tabla 19-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para End and End Delay en RDiM con $v=0,1$ m/s.....	73
Tabla 20-4: Prueba de Anova de un factor para Energy Consumption en RDiM con $v=0,1$ m/s.....	73
Tabla 21-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Energy Consumption en RDiM con $v=0,1$ m/s.....	74
Tabla 22-4: Prueba de Anova de un factor para Throughput en RDiM con $v=0,1$ m/s.....	74
Tabla 23-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Throughput en RDiM con $v=0,1$ m/s.....	75
Tabla 24-4: Prueba de Anova de un factor para End and End Delay en RDiM con $v=1,2$ m/s.....	75
Tabla 25-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para End and End Delay en RDiM con $v=1,2$ m/s.....	76
Tabla 26-4: Prueba de Anova de un factor para Energy Consumption en RDiM con $v=1,2$ m/s.....	76
Tabla 27-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Energy Consumption en RDiM con $v=1,2$ m/s.....	77
Tabla 28-4: Prueba de Anova de un factor para Throughput en RDiM con $v=1,2$ m/s.....	77
Tabla 29-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Throughput en RDiM con $v=1,2$ m/s.....	78
Tabla 30-4: Resumen de la asignación de la posición de los protocolos.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: UWSN Bidimensional	9
Figura 2-2: UWSN Tridimensional	10
Figura 3-2: Red de Sensores con AUV's	11
Figura 4-2: Red de Sensores Inalámbricos Submarinos	13
Figura 5-2: Visión a alto nivel de VBF para UWSNs	16
Figura 6-2: Factor de Deseabilidad.....	19
Figura 7-2: Gráfico de los vectores por saltos en HH-VBF.....	23
Figura 8-2: Gráfico de los vectores por saltos en VBF.....	24
Figura 9-2: Ilustración del protocolo de enrutamiento FBR.	25
Figura 10-2: Región de las posiciones de los retransmisores candidatos	29
Figura 11-2: Selección del reenvío al transmisor	32
Figura 12-2: Simulación en Aqua-Sim	36
Figura 13-2: Arquitectura del Shawn.....	37
Figura 14-2: Ejemplo de Simulador UWSim.....	38
Figura 15-2: Representación de una red en VisualSense.....	39
Figura 1-3: Modelo esquemático de la red UWSN.....	43
Figura 2-3: Fauna de las Islas Galápagos	45
Figura 3-3: Vehículo autónomo empleado en el proyecto ROGER.	47
Figura 4-3: Ubicación de la Red UWSN situada entre las Islas Baltra y Santa Cruz (Islas Galápagos).	48
Figura 5-3: Ubicación del Esquema de Simulación dentro de las Islas Galápagos	49
Figura 6-3: Redes UWSN utilizadas en el escenario de pruebas.....	50
Figura 7-3: Instalación correcta de Aqua-Sim.	51
Figura 8-3: Configuración del área de simulación.....	51
Figura 9-3: Configuración de movilidad de los nodos.....	52
Figura 10-3: Configuración del número de nodos.	52
Figura 11-3: Archivos nam y tr generados por el simulador.	53
Figura 12-3: Parámetros arrojados por el Simulador.....	54
Figura 13-3: Archivo .data generado por el simulador.	55
Figura 14-3: NAM - Distribución de nodos visualizados en 2D.	56
Figura 15-3: Aqua3D - Distribución de nodos visualizados en 3D.	56

Figura 16-3: Animaciones en Aqua3D.....	57
Figura 17-3: Aqua3D –Interconexión de Nodos.....	57

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4: Promedios del End and End Delay en Redes Densas.....	60
Gráfico 2-4: Promedios del End and End Delay en Redes Dispersas.....	60
Gráfico 3-4: Promedios del Energy Consumption dentro de las Redes Densas.....	61
Gráfico 4-4: Promedios del Energy Consumption dentro de las Redes Dispersas.....	62
Gráfico 5-4: Promedios del Throughput dentro de las Redes Densas.....	63
Gráfico 6-4: Promedios del Throughput dentro de las Redes Dispersas.....	63

RESUMEN

En la presente investigación, se realizó la evaluación de los mecanismos de localización de nodos en Redes de Sensores Inalámbricos Bajo el Agua (UWSN) empleando una metodología experimental basada en la medición de variables específicas tales como: retardo, consumo de energía y throughput, mismas que determinan el rendimiento de la red con cada uno de los métodos de enrutamiento analizados: Reenvío Basado en Vectores (VBF), Reenvío Basado en Vectores Salto a Salto (HH-VBF), Protocolo de Enrutamiento de Haz Enfocado (FBR) y Enrutamiento Sectorial con Predicción de Localización de Destino (SBR-DLP). Para la ejecución de las pruebas de funcionamiento se estableció un ambiente de simulación con características de un entorno real y con el fin de aportar a la preservación de la flora, fauna y su frágil ecosistema, se ha seleccionado a las Islas Galápagos como posible escenario de aplicación que plantea un esquema de red compuesto por 99 nodos sensores y un nodo sink fluctuando a diferentes profundidades y velocidades, cubriendo una extensa área de 1000m x 1000m x 500m (largo, ancho, profundidad). Mediante el simulador Aqua Sim, el método de varianza ANOVA de un factor y la prueba Post hoc HSD Tukey se obtiene como resultado que para una Red Densa Móvil con corrientes marinas de velocidad (0,1 y 1,2) m/s, el protocolo que destaca su rendimiento y ahorro de energía frente a los demás evaluados es VBF obteniendo un retardo de 154,48ms, throughput de 38,02 bps y consumo de energía de 1,154W/s. Basándose en el presente estudio, entidades como el INOCAR (Instituto Oceanográfico de la Armada) podrían implementar una plataforma tecnológica con reducido consumo energético, velocidad de transmisión adecuada y mínimo retardo que a través del control remoto de parámetros subacuáticos permita la preservación del Ambiente Marino.

Palabras Claves: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERIA>, <REDES>, <REDES DE SENSORES INALAMBRICOS SUBMARINOS>, <COMUNICACIÓN ACUSTICA>, <PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN BAJO EL AGUA>.



ABSTRACT

In the present investigation, the evaluation of the mechanisms of localization of nodes in Networks of Wireless Sensors Under Water (UWSN) was carried out using an experimental methodology based on the measurement of specific variables such as: delay, energy consumption and throughput, that determine the performance of the network with each of the routing methods analyzed: Vector-Based Forwarding (VBF), Jump to Hop Vector-Based Forwarding (HH-VBF), Focused Beam Routing Protocol (FBR) and Sectoral Routing with Destination Location Prediction (SBR-DLP). For the execution of the performance tests, a simulation environment with characteristics of a real environment was established and in order to contribute to the preservation of the flora, fauna and its fragile ecosystem, the Galapagos Islands have been selected as a possible scenario for application that proposes a network scheme composed of 99 sensor nodes and a sink node fluctuating at different depths and speeds, covering an extensive area of 1000m x 1000m x 500m (length, width, depth). Using the Aqua Sim simulator, the one-way ANOVA variance method and the Post hoc HSD Tukey test results in the fact that for a Mobile Dense Network with marine currents of speed (0.1 and 1.2) m/s, the protocol that highlights its performance and energy savings compared to the others evaluated is VBF obtaining a delay of 154.48ms, throughput of 38.02 bps and energy consumption of 1, 154W / s. Based on the present study, entities such as the INOCAR (Navy Oceanographic Institute) could implement a technological platform with reduced energy consumption, adequate transmission speed and minimum delay that through the remote control of underwater parameters allows the preservation of the Marine Environment.

Key words: <ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCE><NETWORKS>, <SUBMARINE WIRELESS SENSORS NETWORKS>, ACOUSTIC COMMUNICATION>, <COMMUNICATION PROTOCOLS UNDER WATER>.



INTRODUCCIÓN

Sabiendo que casi el 75% de la superficie terrestre está cubierta de agua en forma de ríos, mares y océanos, grandes esfuerzos investigativos se han realizado con el fin de explorar, explotar y proteger nuestro vasto ambiente acuático. Por lo que la transmisión inalámbrica de información a través del agua representa una tecnología prometedora para el desarrollo de futuros sistemas de observación oceánica.

Debido a la importancia de sus aplicaciones, las Redes de Sensores Inalámbricos Submarinas UWSN (Underwater Wireless Sensor Networks) han despertado un creciente interés, sin embargo, las características específicas de este tipo de redes imponen requisitos especiales y tareas desafiantes sobre sus algoritmos y protocolos.

Por tal motivo, se ha considerado realizar el presente trabajo de investigación donde se propone el análisis de los métodos de enrutamiento para redes inalámbricas de sensores submarinos (UWSN) con el objetivo de identificar aquel que presente las mejores características de rendimiento y bajo consumo energético. Dicho objetivo se ha llevado a cabo a través de simulaciones computacionales que ejecutadas sobre diferentes escenarios de red, permiten la evaluación estadística de sus resultados.

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera:

En el Capítulo I, se expone el planteamiento del problema, su formulación y sistematización, así como los objetivos, justificación e hipótesis de la investigación.

En el Capítulo II, se presenta conceptos y parámetros que definen a las redes inalámbricas de sensores submarinos UWSN, sus características, arquitectura, aplicaciones, métodos de enrutamiento y simuladores existentes para este tipo de redes.

En el Capítulo III, se muestra la metodología de selección de la herramienta de simulación, planteamiento del escenario para las diferentes pruebas funcionales y ejecución de la simulación.

En el Capítulo IV, se detalla el análisis de los resultados arrojados por la herramienta de simulación y mediante métodos estadísticos, la comprobación de la hipótesis planteada.

CAPÍTULO I

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación Problemática

Debido a la relevancia de sus aplicaciones oceánicas tales como la recopilación de datos oceanográficos, monitoreo de ondas sísmicas, vigilancia de la contaminación de agua, apoyo a misiones robóticas bajo el agua y la seguridad; las Redes de Sensores Inalámbricos Submarinos UWSN han despertado un creciente interés por su gran número de posibles aplicaciones y su importancia en la transmisión de datos.

En el mundo industrial el uso de UWSN es limitado, tal es el caso de las plantas de tratamiento de aguas residuales donde los grandes tanques o lagunas contienen lodo y considerando que uno de los problemas ambientales críticos en nuestro país es la contaminación del agua, su control debe ser desde su origen en esteros, manglares, ríos y océanos.

Por las características físicas propias de las señales acústicas, los canales de comunicación bajo el agua presentan grandes retardos de propagación, limitado ancho de banda, duración limitada de sus baterías y recepción de mensajes múltiples debido a la reflexión de los paquetes en la superficie del agua. (Gkikopouli, A., Nikolakopoulos, G & Manesis, S., 2012).

En redes de sensores inalámbricos donde los nodos generalmente funcionan con baterías que difícilmente pueden ser cambiadas o recargadas, la restricción de energía es una limitante. Además del ahorro energético, los métodos de enrutamiento o localización de nodos deberían estar posibilitados de manejar la movilidad de los nodos de una manera muy eficiente por lo que, es necesario realizar un estudio comparativo de dichos métodos para determinar el de mejor rendimiento y menor consumo energético.

1.2. Formulación del Problema

¿Permitirá la evaluación de mecanismos de localización de nodos, determinar el mecanismo que relacione mayor rendimiento contra menor consumo de recursos energéticos?

1.3. Sistematización de Problema

- ¿Qué son y cómo funcionan las Redes de Sensores Inalámbricos Bajo el Agua?
- ¿Cuáles son los métodos de localización de nodos existentes para redes UWSN?
- ¿Cuál es la herramienta más adecuada para simular Redes UWSN?
- ¿Cómo determinar la eficiencia del método de localización de nodos?

1.4. Justificación de la investigación

Desde que las comunicaciones submarinas se comenzaron a experimentar durante la Segunda Guerra Mundial en 1945 y con la invención de los Estados Unidos de un teléfono para comunicarse con los submarinos, este tipo de redes comenzaron a ser utilizadas en diferentes áreas y para diversos propósitos.

Su vasta variedad de importantes aplicaciones científicas, industriales, militares y procesos geológicos, tales como: Prevención y Vigilancia de los niveles de contaminación, estudio de la vida marina, detección de actividades navales y la necesidad de percibir información del mundo submarino, impulsa la investigación de las redes UWSN.

Básicamente, una UWSN es una red consistente de un conjunto de nodos sensores autónomos que se distribuyen espacialmente bajo el agua para recolectar valiosa información utilizando canales acústicos.

A pesar que las Redes de Sensores Inalámbricos Submarinos UWSN comparten algunas propiedades comunes con las tradicionales redes de sensores terrestres WSN, tales como: recursos limitados en los nodos; en comunicaciones bajo la superficie marina se utilizan ondas acústicas en lugar de ondas electromagnéticas como medio de propagación de la información, el cual tiene problemas de retardo, ancho de banda limitado e interferencia.

Debido a las corrientes marinas, ondas superficiales u otros efectos, las UWSN presentan una topología muy dinámica donde sus sensores se mueven pasivamente con las corrientes del agua,

característica que resulta de utilidad para maximizar la cobertura con hardware limitado (Heidemann, Stojanovic, & Zorzi, 2012).

La localización de nodos sensores es indispensable en UWSN ya que algunas aplicaciones como el monitoreo ambiental acuático demandan alta precisión de localización, mientras que otras aplicaciones como la red de vigilancia marina requieren una solución de localización que puede demandar la utilización de un número alto de dispositivos (nodos).

Las características de propagación acústica bajo el agua, la movilidad de los sensores y la preocupación energética, plantean grandes retos de localización y enrutamiento que necesitan de una precisión exacta y una escalabilidad funcional, para tener una red totalmente accesible.

La importancia de sus aplicaciones más todos los inconvenientes expuestos motivan la necesidad de estudiar las redes UWSN, sus características, funcionamiento, aplicaciones y principales mecanismos de localización de nodos para su posterior implementación en un simulador, evaluación y determinación de aquel mecanismo que enfrente dichos inconvenientes y presente el mejor rendimiento y menor consumo energético en un medio acuático.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Evaluar los Mecanismos de Localización de Nodos en Redes de Sensores Inalámbricos UWSN para determinar el de mayor rendimiento y menor consumo energético.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar el estado del arte de la Redes de Sensores Inalámbricos Bajo el Agua UWSN y sus mecanismos de localización de nodos.
- Determinar la herramienta de simulación de eventos discretos idónea para redes UWSN.
- Evaluar parámetros de throughput, retardo y consumo de energía en los mecanismos de localización de nodos propuestos, utilizando diferentes escenarios de red bajo el agua.
- Determinar el rendimiento y consumo de energía de los mecanismos de localización evaluados.

1.6. Hipótesis

La evaluación de los mecanismos de localización de nodos en Redes UWSN permitio determinar el protocolo que presente mayor rendimiento y menor consumo energético.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Red de Sensores Inalámbricos Submarinos (UWSN)

2.2.1 *Descripción de las Redes de Sensores Inalámbricos Submarinos (UWSN)*

La Red de Sensores Inalámbricos Submarinos o Bajo el Agua consiste de un número variable de nodos sensores que se despliegan tanto en el agua como en la superficie para llevar a cabo tareas colaborativas sobre un entorno acuático para lo cual los nodos deben intercambiar y compartir información entre sí y las estaciones base (Gkikopouli, 2012).

En la Tabla 1-2, se describe los tres tipos de medios de transmisión, que existen: comunicación acústica, comunicaciones que emplean las ondas radioeléctricas y las comunicaciones ópticas.

El agua es un medio no transparente para la luz visible por ende la propagación de ondas por radiofrecuencia se atenúa rápidamente, las ondas ópticas ofrecen una transferencia de datos de alta velocidad, sin embargo el efecto de absorción y dispersión influyen en la señal y su precisión, finalmente por su característica de baja absorción, la comunicación bajo el agua utiliza señales acústicas para la transferencia de información ya que ésta ofrece un rango de transmisión más largo a menores pérdidas, aunque con varias limitaciones.

Los problemas que las redes acústicas submarinas plantean incluyen el ancho de banda que es severamente limitado, los retrasos de propagación que en magnitud representan cinco veces mayor a un canal de radio frecuencia terrestre, mayor tasa de error de bits, conectividad limitada y energía de batería limitada.

Tabla 1-2: Comparación entre Medios de Comunicación UWSN

Tipo de Medio	Velocidad (m/s)	Ancho de Banda	Rango de Transmisión	Atenuación
Acústico	1500	1 KHz	1 Km	>0.1 dB/m/Hz
Radio Frecuencia	333 333 333	1 MHz	10 m	28 dB/Km/100MHz
Óptico	333 333 333	10 – 150 MHz	10 – 100 m	Depende de la turbidez

Fuente: (Gkikopouli, 2012).

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En comunicaciones acústicas submarinas, la velocidad de propagación del sonido medida en m/s depende de varios factores como: profundidad del agua, temperatura, salinidad. El experimento realizado por el matemático Charles Francois Sturm permitio estimar la velocidad del sonido en el agua en 1435 m/s para una temperatura de 8⁰C (Dhurandher, 2012). Siguiendo la recomendación de varios autores, para ésta investigación se asume un valor promedio de 1500 m/s.

Las comunicaciones acústicas trabajan en tres bandas de frecuencias:

- Frecuencia muy Alta (> 50 KHz).- Tiene un rango corto de comunicación.
- Frecuencia Moderada (20 KHz a 50 KHz).- Tiene un rango de comunicación medio en el orden de 1 Km
- Frecuencia Baja (< 10 KHz).- Tiene un rango de comunicación que llega a los 10 Km

2.2.2 Características de las UWSN

Las redes UWSN son significativamente diferentes de las tradicionales redes WSN en los siguientes aspectos:

Bajo Ancho de Banda y Alta latencia

Las radiofrecuencias RF presentan altas atenuaciones bajo el agua, por lo que, como método de comunicación submarina se utiliza canales acústicos. La velocidad de propagación de las señales acústicas bajo el agua es de $1,5 \times 10^3$ m/s, lo que representa la quinta parte de la velocidad de propagación de las radiofrecuencias quienes trabajan a 3×10^8 m/s.

Topología Dinámica de la Red

Debido a las corrientes de agua, todos aquellos sensores que no estén anclados en boyas superficiales, presentan movilidad. Por las observaciones empíricas, se puede decir que los objetos bajo el agua pueden moverse a una velocidad de dos a tres nudos o tres a seis Km/h.

Propensa de Errores

Factores como el ruido y la multi trayectoria causan altos errores de bits y retardos. Además en ambientes submarinos ásperos los nodos presentan más vulnerabilidades.

Tridimensionales

Las UWSN son redes desplegadas en un espacio tridimensional lo que hace que los trabajos investigativos y aplicativos desarrollados para redes terrestres WSN no sean adecuados para UWSN y plantea muchos desafíos en casi toda la suite de protocolos.

2.2.3 Arquitecturas de Comunicación UWSN

La construcción de una topología de red adecuada representa un factor crucial para la determinación de su capacidad, fiabilidad y consumo de energía. La vigilancia submarina es una misión relativamente costosa por lo que es importante desplegar una red fiable a fin de alcanzar eficazmente las metas planteadas. Una red UWSN tiene diversas características de acuerdo a su aplicación y despliegue, es decir, pueden ser estáticas, semi-móviles y móviles, entre las arquitecturas que más se utilizan están:

2.2.3.1 UWSN Bidimensional

Destinadas al monitoreo del fondo del mar, éstas redes están constituidas de varios sensores colocados a grandes profundidades del océano con la ayuda de anclas, dichos sensores se conectan a través de enlaces acústicos a uno o más nodos gateway (uw-sink). Los uw-sink (módems acústicos) son los dispositivos encargados de la transmisión de información desde el fondo del mar hacia la superficie. En la Figura 1-2, se muestra el funcionamiento de una arquitectura de dos dimensiones.

Un modem acústico está integrado de dos transmisores acústicos:

- Transmisor Horizontal: Utilizado para enviar datos de configuración y comandos desde el uw-gateway hasta los sensores y recolectar datos monitorizados desde los sensores hasta los uw-gateways.
- Transmisor Vertical: Utilizado para enviar los datos recolectados desde el uw-gateway hasta una estación base en la superficie.

La estación base ubicada en la superficie consta de un transmisor acústico capaz de mantener comunicación simultánea con los uw-gateways desplegados. Puede además tener transmisores de Radio Frecuencia y/o transmisores satelitales para comunicarse con otras estaciones que pueden

estar ubicadas en la superficie del mar (Surface sink) o en la orilla del mismo (onshore sink). (Chicaiza, 2009)

Existen dos formas de comunicación entre sensores y uw-gateway.

Enlace Directo

Es la comunicación donde los sensores envían sus datos recolectados directamente a un uw-sink los cuales generalmente se encuentran muy distantes por lo que aunque pareciera ser una vía de comunicación bastante simple, la potencia de transmisión puede decaer mientras aumenta la distancia. En consecuencia ésta no es la mejor opción cuando de conservar energía se trata, además en los enlaces directos es muy probable que el rendimiento de la red se reduzca por el aumento de interferencia acústica ocasionada por las altas potencias de transmisión empleadas.

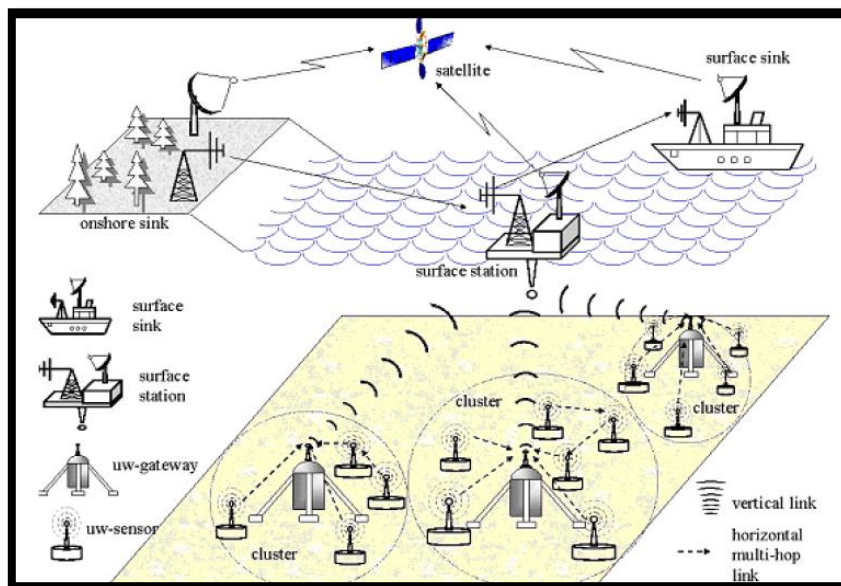


Figura 1-2: UWSN Bidimensional

Fuente: (Chicaiza, 2009)

Enlace Multi salto

Comunicación donde los sensores envían sus datos recolectados a otros sensores intermedios y a su vez éstos lo enviarán a los diferentes uw-gateways. Por ser una transmisión colaborativa, se genera un ahorro de energía además de un aumento de la capacidad de la red pero también aumenta la complejidad en el funcionamiento y en el enrutamiento.

2.2.3.2 UWSN Tridimensional

Se compone de una red de sensores anclados a diferentes profundidades para cubrir un área de tres dimensiones. Se destinan al monitoreo de la columna oceánica y fenómenos que no pueden ser debidamente observados por nodos sensores en el fondo del mar como procesos bioquímicos, corrientes de agua, contaminación y otras aplicaciones de vigilancia. Diseñar un protocolo de enrutamiento eficiente para las redes tridimensionales resulta difícil debido a que factores como velocidad y retardo de propagación de la señal acústica es diferente a diferentes profundidades, lo que causara que algunos sensores a cierta profundidad utilizaran más energía para enviar y recibir datos que otros. La Figura 2-2, representa una red tridimensional.

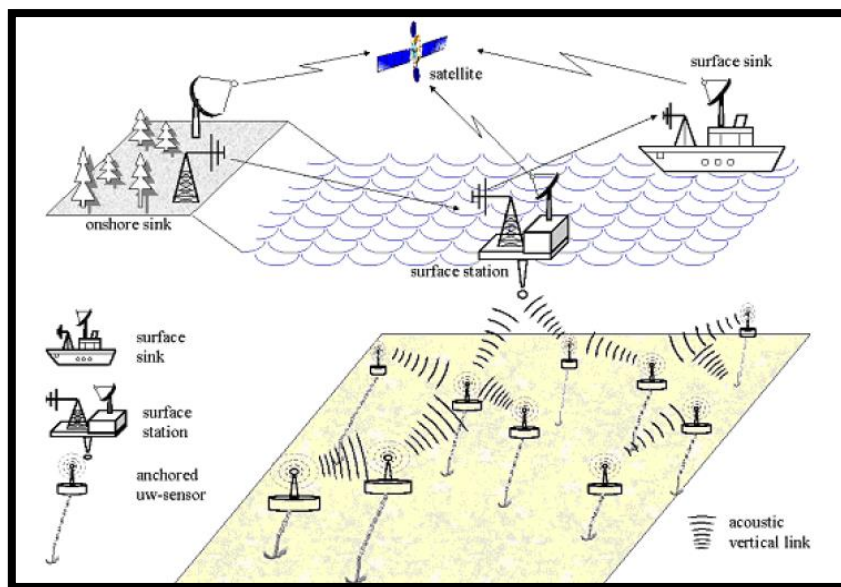


Figura 2-2: UWSN Tridimensional
Fuente: (Chicaiza, 2009)

Las UWSN tridimensionales utilizan enlaces multi-salto para transmitir información a la estación en la superficie (surface station) ya que no existe noción de la ubicación de los uw-gateways. Por lo que, los dispositivos de red siempre deben tener al menos una ruta de acceso para con la estación en la superficie.

2.2.3.3 Red con Vehículos Autónomos Bajo el Agua (AUVs)

Los vehículos autónomos son boyas relativamente costosas y están equipadas con múltiples sensores submarinos que pueden funcionar sin ataduras o control remoto es por ello que son utilizadas en aplicaciones de vigilancia del medio ambiente, estudio de recursos oceánicos entre

otras, además son muy útiles para incrementar la funcionalidad de las UWSN de muchas maneras. La Figura 3-2, representa un AUVs.

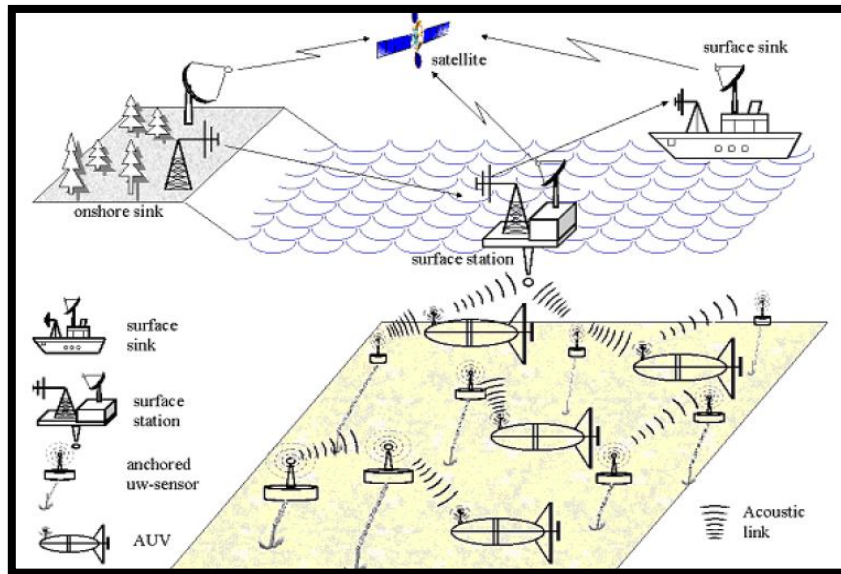


Figura 3-2: Red de Sensores con AUV's
Fuente: (Chicaiza, 2009)

Para aumentar la vida útil de los AUV's se puede utilizar sistemas de energía solar logrando así mantenerlos independientes y listos para adquirir información continua en cualquier momento.

2.2.4 Elementos de una Red UWSN

Una red de sensores inalámbricos submarinos está compuesta por cuatro elementos básicos, a continuación se presenta una descripción general de estos.

2.2.4.1 Nodos Sensores.

Los dispositivos sensores (nodos) son los componentes físicos de la red, típicamente son unidades hardware autosuficiente, es decir, cuentan con todos los elementos necesarios como memoria, interfaz de entrada y salida y unidades de procesamiento para computar la información ambiental, adicionalmente son unidades independientes que están alimentados por baterías o pilas, por lo tanto, no necesitan de un suministro de corriente estático. Un dispositivo sensor está compuesto por tres elementos básicos:

- Sistema de Transmisión de datos (Modem Acústico)
- Sistema de Recolección de Información (Sensores)
- Suministro de Energía (Baterías)

Sistema de Transmisión de Datos (Módem Acústico): se emplea para transmitir los datos producidos por los módulos sensores de manera inalámbrica hasta el dispositivo o nodo central, facilitando la ubicación de los mismos dentro de cualquier ambiente.

Sistema de Recolección de Información (Sensores): se utiliza para la recolección de los datos que están presentes en el ambiente donde se encuentra ubicado el sensor, estos dispositivos son los encargados de obtener señales ambientales (salinidad, temperatura, pH, etc.). Estos datos son procesados por el nodo y transmitidos al nodo central a través del sistema de transmisión.

Suministro de Energía (Baterías): las redes de sensores inalámbricos están conformados por una fuente de alimentación portátil (baterías) que suministra la energía suficiente para el correcto funcionamiento del nodo permitiendo la eficiencia de un protocolo.

2.2.4.2 Nodo SINK.

Es el encargado de recibir los datos que provienen de los sensores instalados en la red, normalmente se encuentra ubicado en la superficie marina anclada a una baliza flotante (boya) cuenta con una fuente de alimentación principal, como paneles solares o por una línea dedicada de suministro energético, adicionalmente cuenta con un respaldo de energía constituido por una batería. El SINK está constituido por dos sistemas de comunicaciones, el uno, permite comunicarse con los nodos sensores dentro de la UWSN porque posee la misma configuración que los nodos destinados al senso. El segundo sistema comunica al SINK con la central de monitoreo para el almacenamiento de los datos obtenidos por la red UWSN, este sistema puede estar constituido por un medio guiado (cable de cobre, fibra óptica, cable coaxial) o por un medio no guiado (vía satélite, microondas, radiofrecuencia).

2.2.4.3 Canal Físico.

El canal físico utilizado dentro de una UWSN es de carácter no guiado, el medio físico es el agua por lo que las ondas acústicas sufren diferentes inconvenientes como son la atenuación, reflexión, refracción, etc. El análisis del canal físico no está contemplado en este estudio, por lo cual, no se lo profundiza.

2.2.4.4 Red.

Un elemento importante dentro de las redes de datos es su topología, para las UWSN las arquitecturas admitidas son tres: bidimensional cuando los nodos están desplegadas y sin movimiento en el fondo del mar, tridimensional, cuando los nodos están ubicados a diferentes

profundidades en diferentes lugares, y red de vehículos autónomos bajo el agua (AUVs) son boyas que se controlan a distancia y se desplazan por diferentes lugares.

2.2.5 Aplicaciones de Redes de Sensores Submarinos

La necesidad de percibir el mundo submarino impulsa el desarrollo de redes UWSN, las aplicaciones pueden tener diferentes requisitos: estáticos, móviles, para tiempos cortos, de largo alcance. Según el tipo de despliegue varían dos parámetros importantes, la movilidad y la densidad. En la Figura 4-2, se muestran una red uwsn con todos los elementos que lo constituyen.

Las UWSN son a menudo *estáticas* ya que constan de nodos individuales que son suspendidos en muelles o anclados al fondo del mar, mientras que debido al hecho de que los nodos pueden flotar y moverse con las corrientes marinas existen también las potenciales UWNS *móviles* que pueden tener sensores conectados a AUV o ser suspendidas en boyas desplegadas en buques

(Jornet, Stojanovic, & Zorzi, 2008), define a una *red densa* aquella conformada por cien o más nodos mientras que (Jalaja & Lillykutti, 2014) considera *red dispersa* a aquella compuesta por hasta diez nodos.

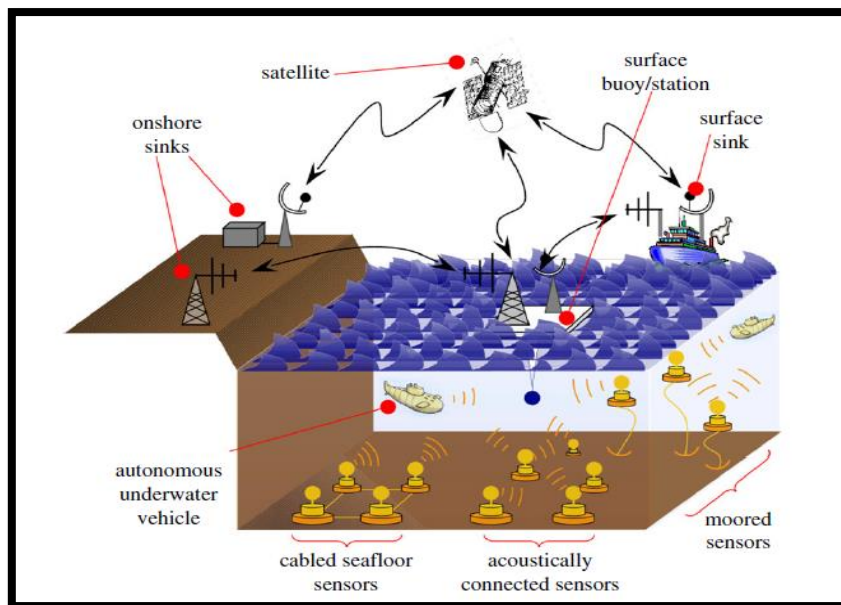


Figura 4-2: Red de Sensores Inalámbricos Submarinos

Fuente: (Heidemann, Stojanovic, & Zorzi, 2012)

A continuación se resume algunas de las utilidades de las redes de sensores submarinos.

➤ **Monitoreo**

Compuesto por redes de sensores y AUV's, que se despliega bajo el agua para monitorear el ambiente subacuático, sus características, propiedades o cualquier objeto de interés. El área con más relación a estas aplicaciones es la vigilancia de entornos físicos. Entre sus opciones de aplicación están el monitoreo de la calidad del agua, monitoreo del hábitat y monitoreo de exploraciones submarinas.

➤ **Prevención de Desastres**

Entre otros, los desastres naturales basados en el agua son más peligrosos y producen una enorme destrucción en la tierra, por lo cual los sistemas y mecanismos de vigilancia y los sistemas de prevención de desastres son muy necesarios. Las redes de sensores submarinas ofrecen una amplia gama de aplicaciones para la detección, gestión y recuperación de desastres como inundaciones, erupciones volcánicas submarinas, terremotos submarinos, tsunamis y derrames de petróleo.

➤ **Militares**

UWSNs se emplean también para colaborar con actividades militares tomando la ayuda de varios sensores desplegados para la detección de diferentes aspectos de las aplicaciones militares. Diferentes sensores como cámaras, sonares de imágenes y detectores de metales integrados con AUVs se utilizan para ayudar a encontrar minas submarinas, asegurar puertos y submarinos y también se usan para monitoreo y vigilancia. Estas aplicaciones pueden conducir a una solución económica para proteger las fuerzas navales.

➤ **Asistencia para Navegación**

El ambiente subacuático es extremadamente desigual, inexplorado, aleatorio y oscuro con una profundidad cada vez mayor. En estos ambientes es muy necesario para la navegación de los barcos el uso de tecnologías asistenciales de navegación que son más comunes sobre la superficie del agua pero no se usan bajo el agua debido al cambio en el medio de transmisión. Para localizar, guiar y navegar, hay una necesidad de tecnologías de navegación asistida. En esta perspectiva, UWSN puede utilizarse para proporcionar sistemas y aplicaciones de navegación asistida.

2.3 Protocolos de Enrutamiento para UWSN

Los protocolos de enrutamiento tienen la responsabilidad de descubrir y mantener rutas confiables durante la transmisión de paquetes considerando el alcance, mínimo requerimiento de energía y tiempo de funcionamiento de la red. En redes de sensores submarinos, además del ahorro de energía, los métodos de enrutamiento deben ser capaces de manejar eficientemente las limitaciones de ancho de banda, retardo en la propagación, movilidad y densidad de los nodos para lo cual los protocolos de enrutamiento se dividen en dos categorías: Basados en localización o protocolos de enrutamiento geográfico

El enrutamiento geográfico es un tipo de enrutamiento que se basa en información de posición geográfica donde la fuente envía sus paquetes a la ubicación geográfica del dispositivo de destino y no a su ubicación lógica.

Para enrutar paquetes entre los nodos sensores y el sink han sido propuestos algunos protocolos de enrutamiento geográfico de entre los cuales, para el presente estudio, se ha seleccionado los siguientes: VBF, HH-VBF, FBR, SBR-DLP.

2.3.1 Reenvío Basado en Vectores (VBF)

En el protocolo de reenvío basado en vectores (VBF) cada paquete lleva las posiciones del transmisor, del destino y del retransmisor (nodo intermedio que transmite el paquete). La ruta para el reenvío se especifica mediante el vector de enrutamiento desde el transmisor hasta el destino. Al recibir un paquete, un nodo calcula su posición relativa al retransmisor midiendo su distancia a éste y el ángulo de arribo (AOA) de la señal. Así mismo, los dispositivos (nodos) que reciben el paquete calculan sus posiciones. Si un nodo determina que se encuentra lo suficientemente cerca al vector de enrutamiento (inferior a una distancia umbral predefinida), ubica en el paquete su propia posición calculada y posteriormente lo reenvía; caso contrario, simplemente elimina el paquete. De esta forma, todos los retransmisores de la red forman una tubería de encaminamiento (vector de encaminamiento): los nodos sensores en esta tubería son aptos para reenviar paquetes y aquellos que no están próximos a la tubería de encaminamiento no reenviarán los paquetes. La Figura 5-2, ilustra la idea básica de VBF, el nodo S_1 es la fuente, y el nodo S_0 es el receptor. El vector de enrutamiento se especifica mediante $\overrightarrow{S_1S_0}$. Los paquetes se reenvían de S_1 a S_0 . Los retransmisores a lo largo del vector de enrutamiento forman una tubería de encaminamiento con un radio pre-controlado (la distancia umbral, designada por W en este caso) (Xie, Cui, & Lao, VBF: Vector-Based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks, 2006).

VBF no requiere información de la ubicación de cada nodo. Por lo cual, es escalable al tamaño de la red. Por otra parte, en VBF, sólo los nodos a lo largo de la ruta participan en el enrutamiento de los paquetes, ahorrando así la energía en la red.

Para cumplir con su función los nodos sensores de las UWSNs deben estar armados con algunos dispositivos que pueden medir la distancia y el ángulo de llegada (AOA) de la señal porque las antenas direccionales acústicas son de un tamaño mucho menor que las antenas direccionales RF debido a la extremadamente pequeña longitud de onda del sonido. Una ventaja de los nodos sensores submarinos es su gran tamaño lo que facilita la instalación de estos dispositivos (Xie, Zhou, Peng, Yan, & Hu, 2013).

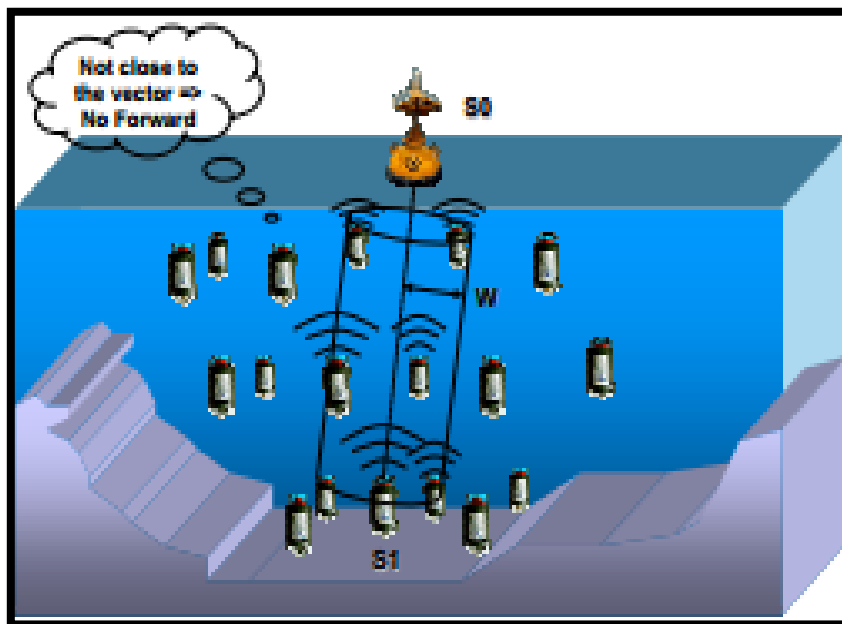


Figura 5-2: Visión a alto nivel de VBF para UWSNs
Fuente: (Xie, Zhou, Peng, Yan, & Hu, 2013)

Funcionamiento del Protocolo VBF

VBF es un protocolo de enrutamiento de origen. Cada paquete tiene toda la información necesaria para un enrutamiento simple. En un paquete, hay tres campos de posición, OP, TP y FP, es decir, las coordenadas del transmisor, del destino y del receptor. Para manejar la movilidad del nodo, cada paquete contiene un campo RANGE. Cuando un paquete llega al área especificada por su TP, este paquete es enviado dentro de un área específica que está controlada por el campo RANGE. La ruta de reenvío es especificada mediante el vector de enrutamiento desde el transmisor hasta el destino. Cada paquete también contiene un campo RADIUS, que es un umbral predefinido usado por los

nodos sensores para determinar si están lo suficientemente cerca del vector de enrutamiento y si son aptos para el reenvío de paquetes.

Hay dos tipos de consultas. Una es la consulta dependiente de la ubicación. Al receptor le interesa el área específica y conoce la ubicación del área. El otro tipo de consulta es independiente de la ubicación, cuando el receptor quiere conocer algún tipo específico de datos independientemente de su ubicación. Ejemplo, el receptor quiere saber si existen altas temperaturas anormales en la red. Ambos tipos de consultas pueden ser encaminados de forma efectiva por VBF (Xie, Zhou, Peng, Yan, & Hu, 2013).

Reenvío de consultas.- Para las consultas dependientes de la ubicación, el receptor está interesado en algún área específica, por lo que emite un paquete de consulta INTEREST, que lleva las coordenadas del receptor y del destino basado en la posición del receptor. Cada nodo que recibe este paquete calcula su propia posición y la distancia al vector de enrutamiento. Si la distancia es menor que RADIUS (umbral de distancia), entonces este nodo actualiza el campo FP del paquete y lo reenvía; caso contrario lo descarta. Para las consultas dependientes de la ubicación, el paquete INTEREST puede contener algunas posiciones no válidas para el destino. Al recibir dichos paquetes, el nodo comprueba si tiene los datos en los que está interesado el receptor. Si es así, el nodo calcula su posición con el sistema de coordenadas que se basa en el receptor, genera paquetes de datos y los reenvía al receptor. Caso contrario, actualiza el campo FP del paquete y lo reenvía (Xie, Zhou, Peng, Yan, & Hu, 2013).

Consulta iniciada por el origen.- En algunos escenarios de aplicación, el origen puede iniciar el proceso de consulta. VBF también admite dicha consulta iniciada por el origen. Si el origen detecta algunos eventos y desea informar al receptor, primero emite un paquete DATA READY. Al recibir dichos paquetes, cada nodo calcula su propia posición en el sistema de coordenadas basado en el origen, actualiza el campo FP y envía el paquete. Una vez que el receptor recibe este paquete, calcula su posición en el sistema de coordenadas basado en el origen y transforma la posición del origen en su propia posición. Entonces el receptor decide si los datos son necesarios o no. En tal caso, puede enviar un paquete INTEREST para el área donde reside el origen (Xie, Zhou, Peng, Yan, & Hu, 2013).

Movilidad del dispositivo origen.- Dado que el nodo fuente continúa moviéndose, su ubicación calculada en base al paquete INTEREST anterior podría nunca ser precisa. Cuando no se toma ninguna medida para corregir la ubicación del origen, la actual ruta de reenvío podría alejarse

de la estimada, o sea, el destino de la ruta de reenvío de datos probablemente pierda el camino al receptor. Para resolver este problema se sugiere el siguiente enfoque asistido por el receptor.

La fuente sigue enviando paquetes al receptor, y el receptor puede utilizar la información de localización de la fuente transportada en los paquetes para determinar si el origen de los datos se distancia del dispositivo de destino. Por ejemplo, si el receptor calcula su posición como:

$$P_c = (x_c, y_c, z_c) \quad (1)$$

En base a las coordenadas de la fuente, como:

$$P_{source} = (x_{source}, y_{source}, z_{source}) \quad (2)$$

Y su posición real $P = (x, y, z)$, entonces el receptor puede calcular la posición relativa del receptor al origen mediante:

$$(\delta_x, \delta_y, \delta_z) = (x_c - x_{source}, y_c - y_{source}, z_c - z_{source}) \quad (3)$$

Por lo tanto, la posición real de la fuente es:

$$P'_{source} = (\delta_x + x, \delta_y + y, \delta_z + z) \quad (4)$$

Al comparar P_{source} y P'_{source} el receptor puede decidir si la fuente se mueve fuera del área de interés. Si es así, el receptor envía el paquete SOURCE_DENY a la fuente usando P'_{source} . Una vez que la fuente obtiene dichos paquetes, deja de enviar datos. Al mismo tiempo, el receptor inicia una nueva consulta INTEREST y encuentra un nuevo origen (Xie, Zhou, Peng, Yan, & Hu, 2013).

Algoritmo de auto-adaptación

En el protocolo VBF básico, todos los nodos lo suficientemente cercanos al vector de enrutamiento son aptos para enviar paquetes. El protocolo es simple e introduce poca sobrecarga de cálculo. Sin embargo, cuando los nodos sensores están densamente desplegados, VBF puede emplear demasiados nodos en el reenvío de datos, lo que incrementa el consumo de energía. En tal caso es deseable ajustar la decisión de reenvío basada en el número de dispositivos (nodos) existentes. La problemática del movimiento de los dispositivos (nodos), es imposible determinar la densidad global. Por otra parte, no es apropiado medir la densidad de transmisión en los extremos (el transmisor y el emisor) debido a la baja velocidad de propagación de las señales acústicas. Para solucionar este inconveniente se propone un algoritmo de auto-adaptación para VBF el cual permite

La Figura 6-2, representa los diversos parámetros utilizados en la definición del factor de deseabilidad. A partir de la definición, se aprecia que para cualquier nodo lo suficientemente cercano al vector de enrutamiento, es decir:

$$0 \leq p \leq W \quad (6)$$

El factor de deseabilidad de este nodo se oscila en el rango de $[0, 3]$. Para un nodo, si su factor de deseabilidad es grande, significa que su proyección hacia el vector de enrutamiento es grande o no está demasiado lejos del retransmisor. Es decir, no es deseable que este nodo continúe reenviando el paquete. Por otro lado, si el factor de deseabilidad de un nodo es 0, significa que este nodo está entre el vector de enrutamiento y al borde del rango de transmisión del retransmisor. A este nodo se lo conoce como el nodo óptimo, y su posición como la mejor posición. Para cualquier retransmisor, hay como máximo un nodo óptimo y una mejor posición. Si el factor de deseabilidad de un nodo es cercano a 0, significa que este nodo está cerca de la mejor posición (Xie, Zhou, Peng, Yan, & Hu, 2013)

El Algoritmo que se propone se lo denomina de auto-adaptación basado en el concepto de factor de deseabilidad. Este algoritmo tiene como objetivo seleccionar los nodos más idóneos como retransmisores. En este algoritmo, cuando un nodo recibe un paquete, primero determina si está lo suficientemente cercano al vector de enrutamiento. En caso afirmativo, el nodo mantiene el paquete durante un período de tiempo relacionado con su factor de deseabilidad. En otras palabras, cada nodo apto retrasa el reenvío del paquete por un intervalo de tiempo $T_{adaptation}$, que se calcula de la siguiente manera:

$$T_{adaptation} = \sqrt{\alpha} \times T_{delay} + \frac{R-d}{v_0} \quad (7)$$

Dónde:

- T_{delay} es un retardo máximo predefinido
- v_0 es la velocidad de propagación de las señales acústicas en el agua, es decir, 1500 m/s
- d es la distancia entre este nodo y el retransmisor.

En la ecuación (7), el primer término refleja el tiempo de espera basado en el factor de deseabilidad del nodo: cuanto más idóneo (más pequeño sea el factor de deseabilidad), la espera para transmitir decaerá considerablemente. El segundo término representa el tiempo adicional necesario para que todos los nodos de retransmisión en el rango de transmisión reciban la señal acústica del retransmisor.

Durante el período de tiempo de retardo $T_{adaptation}$, si un nodo recibe paquetes duplicados de n otros nodos, entonces este nodo tiene que calcular sus factores de deseabilidad en relación con estos nodos, $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ y el retransmisor original es:

$$\alpha_0. \text{ Si } \min(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n) < \alpha_c / 2^n, (8)$$

Dónde:

- α_c es un valor inicial predefinido del factor de deseabilidad ($0 \leq \alpha_c \leq 3$)

Entonces este nodo envía el paquete; caso contrario, descarta el paquete. Esencialmente, el algoritmo de auto-adaptación anterior otorga mayor prioridad al nodo deseable para continuar difundiendo el paquete y permite que un nodo menos deseable o idóneo tenga la oportunidad de reevaluar su "importancia" en el vecindario. Después de recibir los mismos paquetes de sus vecinos, el nodo menos idóneo puede medir su importancia calculando su factor de deseabilidad en relación con sus vecinos. Si hay muchos nodos más idóneos en el vecindario, se reduce exponencialmente la probabilidad de que este nodo transmita el paquete. Es decir, es inútil para este nodo reenviar el paquete ya que muchos otros nodos más idóneos han reenviado el paquete. De hecho, si un nodo recibe más de dos paquetes duplicados durante su tiempo de espera, es muy probable que este nodo no enviará el paquete sin importar el valor inicial que α_c posea. De esta manera se reduce la sobrecarga de cálculo omitiendo la reevaluación del factor de deseabilidad (Xie, Zhou, Peng, Yan, & Hu, 2013).

2.3.2 Reenvío Basado en Vectores Salto a Salto (HH-VBF)

El protocolo de enrutamiento basado en vectores (VBF) presenta dos grandes inconvenientes, en primer lugar, el uso de un único vector fuente-destino, es decir, la creación de una sola tubería virtual podría significar la eficiencia en el enrutamiento dentro de redes densas, de la misma manera en redes dispersas las tuberías virtuales no podrían detectar a ningún nodo para reenviar el paquete, lo cual hace una red desconectada y afecta directamente en la eficiencia al momento de entregar los datos a su destino. Otro problema es el radio de la tubería virtual de enrutamiento, éste afecta el rendimiento dentro de las redes y la efectividad en el enrutamiento lo cual constituye un gran problema al aplicarlo en ambientes reales.

Para solucionar estos problemas se ha desarrollado el protocolo vector basado en reenvío salto a salto. Este protocolo utiliza los principales fundamento del protocolo VBF, con la mejora que HH-VBF, utiliza diferentes tuberías virtuales para cada nodo que entra en el reenvío del paquete. Cada

nodo puede calcular adaptarse al envío del paquete recalculando la ruta basándose en su propia posición.

En HH-VBF, se redefine la tubería de enrutamiento virtual en una nueva creación de tuberías virtuales por saltos, en lugar de una única tubería desde la fuente hasta el destino. Este nuevo concepto de salto a salto permite expandir la probabilidad de encontrar una vía de enrutamiento en comparación con VBF. Consideramos un nodo N_i el cuál recibe un paquete desde el origen o un nodo de reenvío S_j . Al recibir el paquete, el nodo calcula el vector desde el transmisor S_j hacia su destino. De esta manera la tubería de reenvío cambia en cada salto en la red, adquiriendo el nombre de vector basado en reenvío salto a salto (HH-VBF). Después el receptor calcula el vector desde su transmisor hasta el destino, calcula su distancia hacia aquel vector. Si esa distancia es inferior al umbral predefinido entonces éste es elegible para reenviar el paquete, y se ha definido a dicho nodo como un candidato de reenvío para el paquete (Nicolaou, See, Peng, Cui, & Maggiorini, 2007).

Como en VBF, cada candidato de reenvío mantiene su propio reloj adaptable que depende del factor de deseabilidad α_i de un nodo A, es definido como:

$$\alpha_i = \frac{(R-d \times \cos\theta)}{R} \quad (9)$$

Dónde:

- d es la distancia entre el nodo A y el nodo F,
- θ es el ángulo entre \vec{FS}_0 y \vec{FA} .
- R es el alcance de transmisión
- S_0 es el nodo destino.

El algoritmo de auto-adaptación en HH-VBF es diferente de aquel algoritmo que se lo empleo en el original VBF. Debido a la estrategia efectiva de supresión del paquete adoptada en VBF, solo unos pocos caminos pueden ser seleccionados para reenviar paquetes. Esto podría provocar problemas dentro de las redes dispersas. Para mejorar la relación de entrega de paquetes en redes dispersas, se ha introducido algunos controles de redundancia en el proceso de auto adaptación para HH-VBF.

En HH-VBF, cuando un nodo recibe un paquete, éste primero retiene el paquete por algún tiempo proporcional a su factor de deseabilidad (este es similar a VBF). Por lo tanto, el nodo con el menor factor de deseabilidad enviará el paquete primero. Siguiendo este camino, cada nodo en los alrededores puede escuchar el mismo paquete múltiples veces. HH-VBF permite que cada nodo escuche las transmisiones de paquetes duplicados para controlar el reenvío de este paquete de la

siguiente manera: El nodo calcula sus distancias a varios vectores desde el paquete reenviado hasta el destino. Si la medida mínima de estas distancias es todavía mayor que el umbral de la distancia mínima pre-definida β , este nodo reenviará el paquete; caso contrario, simplemente abandona el paquete. Obviamente, si β es mayor, a más nodos se les permitirá reenviar paquetes. En consecuencia, nuestro HH-VBF puede controlar la redundancia de reenvío ajustando el factor β .

Cada nodo que califique como candidato de reenvío retrasa el reenvío de paquetes en un intervalo $A_{\text{adaptación}}$ el cual es calculado de la misma manera como en VBF. Entonces cada nodo aún usa el algoritmo de auto-adaptación para limitar los paquetes redundantes (Nicolaou, See, Peng, Cui, & Maggiorini, 2007).

La Figura 7-2, ilustra una gráfica de alto nivel de HH-VBF usando el mismo ajuste de red como en la Figura 8-2. Como se puede ver, en HH-VBF, los nodos A y C pueden alcanzar el sumidero mediante el uso de caminos que no son posibles por medio de VBF.

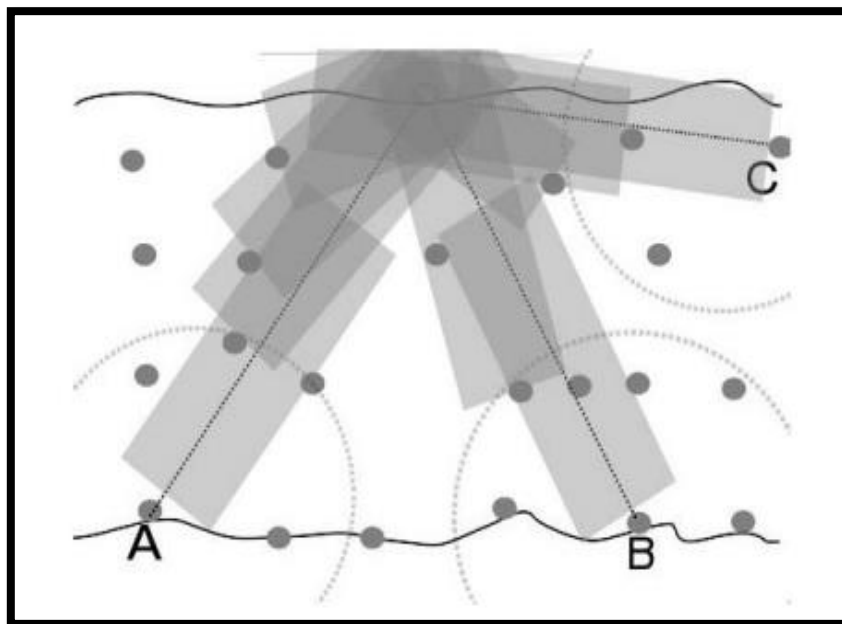


Figura 7-2: Gráfico de los vectores por saltos en HH-VBF
Fuente: (Nicolaou, See, Peng, Cui, & Maggiorini, 2007)

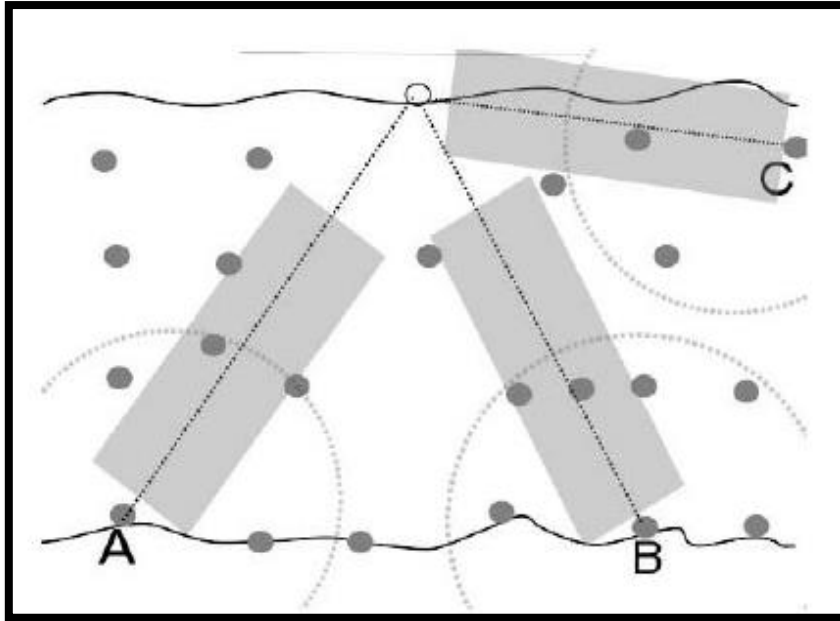


Figura 8-2: Gráfico de los vectores por saltos en VBF
 Fuente: (Nicolaou, See, Peng, Cui, & Maggiorini, 2007)

2.3.3 Protocolo de Enrutamiento de Haz Enfocado (FBR)

En las redes de sensores inalámbricos submarinos el poder de transmisión depende de la distancia que se desea cubrir y esto en muchos de los casos requiere de una fuente de poder grande pero debido al diseño de la red el consumo energético es restringido lo que lo convierte en un problema. Un primer intento para solucionar este problema es limitar el alcance de transmisión y, para lograr que un paquete alcance a su destino, es necesario varios nodos retransmisores. Una segunda solución es aumentar el ancho de banda con lo cual se reduce la duración del bit y por consiguiente la energía requerida para dicho bit. Pero el inconveniente en estas soluciones es la limitación en el ancho de banda y el alto costo en la colocación de más nodos en la red lo cual impide que se pueda aplicar dichas soluciones en entornos reales.

Para solucionar estos inconvenientes se ha desarrollado una metodología de enrutamiento con control de energía. Esta técnica de enrutamiento asume que cada nodo conoce su propia localización y la localización del nodo destino pero desconoce la posición del resto de nodos. Aunque esta afirmación no es totalmente cierta debido a que todos los nodos dentro de la red submarina se desplazan y cambian su posición constantemente, para enfrentar esta situación se desarrolló el protocolo de enrutamiento de haz enfocado el cual desarrollo una técnica para localizar a los nodos que serán el próximo salto con el menor consumo energético y sin sobrecargar a la red con mensajes de control. A continuación se describe este protocolo a detalle.

Para cada nivel de potencia P_n existe un radio de transmisión d_n . Solamente los nodos que se encuentran dentro de este radio se asume reciben la señal a un nivel suficiente para la detección. La señal, por supuesto, se propaga más allá de esa distancia y puede ser escuchada, pero a causa de la atenuación no se la puede detectar. Como tal, esto causa interferencia a otros nodos, que se tomarán en cuenta cuando se evalúe el rendimiento del sistema. (Jornet, Stojanovic, & Zorzi, 2008)

Regresando al ejemplo, se dibuja una línea imaginaria entre los nodos A y B. Los nodos que reciben multicast *RTS* desde A calculan primero la ubicación relativa con relación a la línea AB. El objetivo al hacerlo consiste en determinar si son candidatos para la retransmisión. Los nodos candidatos son aquellos que se encuentran dentro del cono angular $\pm \theta/2$ que emana desde el transmisor hacia el destino final. Si un nodo determina que está dentro del cono del transmisor, responderá al *RTS*. Los nodos que están fuera del cono no responderán.

En este ejemplo, no existen nodos dentro del cono de transmisión que puedan alcanzar el nivel de potencia P_1 . Por lo tanto, después de un tiempo esperado de ida y vuelta es la relación entre dos veces la distancia d_1 y la velocidad de propagación del sonido dentro del agua que equivale a 1500 *m/s*, el nodo A no recibe respuestas. Al aumentar la potencia de transmisión ahora P_2 , se envía un nuevo *RTS*. En general, un nodo transmisor continuará aumentando la potencia hasta que llegue a alguno, o hasta que todos los niveles de potencia hayan sido agotados. Si no puede llegar ninguno al nivel máximo P_N , el transmisor cambiará su cono y comenzará a buscar de izquierda a derecha del cono principal a los posibles candidatos para la retransmisión. Esta estrategia favorece encontrar caminos con una mínima cantidad de zigzag, mientras garantiza que todos los caminos posibles serán buscados. Alternativamente, un nodo puede buscar primero en su vecino d_1 desplazando su cono para luego aumentar su potencia y así avanzar en su camino.

También son posibles otras estrategias; por ejemplo, definir zonas de retransmisión como las intersecciones de círculos concéntricos alrededor del receptor y el área de cobertura centrada en el transmisor. A continuación, un retransmisor es elegido de la región que proporciona el mayor alcance. Expresamente, el círculo más lejano al transmisor es interrogado primero, después los círculos más cercanos. El objetivo al hacer esto no es conservar la potencia (la potencia de transmisión es fija, para alcanzar el círculo más lejano), sino para encontrar el camino más corto.

Si el transmisor, después de incrementar la potencia a cierto nivel, llega a un único vecino, pasa el paquete de datos a ese vecino, que se convierte en un retransmisor. Se espera un acuse de recibo positivo en cada salto. El retransmisor ahora inicia un procedimiento idéntico, buscando nodos candidatos dentro de su cono. Llega a ser un transmisor eficaz, con la búsqueda del próximo

retransmisor hacia el destino final. Si hay más de un retransmisor candidato, el transmisor actual tendrá que decidir cuál se convertirá en el siguiente retransmisor. En el ejemplo, A alcanza a dos candidatos, *C* y *D*, a la potencia P_2 . (El protocolo no cambia si hay más de dos candidatos.) Cuando reciben el *RTS* desde A, cada uno sabe que puede ayudar en la retransmisión, cada cual responde a la solicitud de A utilizando un paquete de control muy corto, similar al transparente empleado para enviar el código (*CTS*). Se puede apreciar que hay una sutil diferencia entre el *CTS* tradicional, emitido por el nodo destino, y éste, que es emitido por un retransmisor candidato. El *CTS* de un candidato contiene la dirección (nombre y ubicación) del nodo que lo emite (*C* o *D*), así como las direcciones de origen y destino (*A* y *B*). Los dos retransmisores candidatos no están (aún) al corriente de la existencia del otro, por lo que es posible que sus respuestas colisionen. Sin embargo, debido a que el *CTS* es muy corto, existe poca probabilidad que las distancias *CA* y *DA* sean exactamente las mismas, y la posibilidad de que los dos *CTS* colisionen en A son mínimas. Por ejemplo, con 500 bits en un paquete *CTS* y una velocidad de bits de 5 kbps, no habrá colisión si las distancias *CA* y *DA* difieren en más de 75 m. Los tiempos de transmisión también pueden ser aleatorios para evitar efectos de sincronización de los nodos.

Si no hay colisión, A recibe ambas respuestas. Una respuesta incluye la ubicación del transmisor y, por lo tanto, A sabe qué candidato está más cerca del destino final – el nodo D en este caso. Se puede elegir D como el retransmisor, y transferir el paquete de datos a él. El nodo C escuchará la transacción del paquete de datos y deducirá de su cabecera aquel que no será elegido como retransmisor. Adicionalmente, se puede agregar más información para tomar esta decisión. Por ejemplo, A podría conocer a partir de escuchas de transacciones previas que D ya está ocupado en otro lugar convirtiéndose así en un cuello de botella; por lo tanto, podría elegir C como su retransmisor. Alternativamente, el paquete *CTS* puede incluir información sobre la actividad de la red que cada uno de los candidatos está midiendo. En ese caso, el enrutamiento se realiza aprovechando la información de su primer y segundo vecino para esquemas MAC / routing más eficientes e integrados. Dentro de este concepto la información se puede utilizar como parte de la decisión tomada por los retransmisores de si y cuándo responder a un *RTS* multicast. Sin embargo, tales detalles no conllevan problemas para el principio básico de enrutamiento. Una observación importante que debe hacerse es que la (longitud) del paquete de datos es transmitida únicamente después de que se ha elegido el retransmisor, es decir, el enlace está asegurado y no hay riesgos de colisiones de paquetes de datos. En otras palabras, los únicos paquetes que pueden colisionar son los paquetes (cortos) de control.

Aunque las oportunidades de colisión son mínimas, esto aún podría suceder. Si A detecta una colisión (ej. Por detección de señal energética sin ser posible decodificar el paquete), A enviará de nuevo un RTS , utilizando el mismo nivel de potencia. Sin embargo en esta oportunidad, C y D detectan la presencia del otro. Esta sólo se puede garantizar si están dentro de un cono con una abertura menor o igual a 60° . En este caso, ellos también tienen conocimiento de la ubicación del otro, y sólo aquel nodo que conoce que se encuentra más cerca del destino final responderá. Así, la próxima colisión CTS se evitará. En un caso más general, C y D pueden no estar al corriente de la existencia del otro debido al funcionamiento semi-dúplex de los módems acústicos, o porque la distancia CD es mayor que la del rango de transmisión ligado con el nivel de potencia en uso. En esta situación, son capaces de detectar que la solicitud anterior no se ha completado correctamente porque habrán recibido exactamente la misma solicitud que antes fue enviada. Entonces, pueden retrasar sus retransmisiones:

$$CTS \text{ Por } T_{wait} = N_{rtx} \cdot T_{CTS} \cdot x \quad (10)$$

Dónde:

- N_{rtx} es la cantidad de retransmisiones
- x variable aleatoria uniformemente distribuida entre 0 y 1
- T_{CTS} representa la duración del paquete de respuesta.

Cuando se ha seleccionado el siguiente retransmisor, el procedimiento continúa. El cono emanado desde el nodo D se ilustra mediante líneas punteadas en la Figura 9-2. Se puede observar que el transmisor original no necesita conocer la ubicación exacta del destino. A medida que avanza el descubrimiento de ruta, el retransmisor final alcanzará a todos los nodos en su propio cono, y, mientras el destino no se haya movido fuera de esta región, será alcanzado. Por lo tanto, existe una región sobre la cual un nodo puede moverse sin afectar el funcionamiento del protocolo. Normalmente, los nodos submarinos pueden moverse a una velocidad mucho más lenta que la velocidad de propagación (pocos m/s en comparación con pocos km/s) y, se supone que un nodo no "escapará" hasta que la información sea transmitida exitosamente.

A medida que el algoritmo avanza, y se forma un cono en cada retransmisor, la ruta se acercará al destino final siempre y cuando haya retransmisores candidatos dentro del alcance. La Figura 10-2, ilustra el lugar de las posiciones de los retransmisores candidatos para los casos en donde es posible encontrar un retransmisor en cada salto dentro de un único cono, es decir, ningún nodo necesita desplazar su cono y observar fuera del ángulo θ . Se puede apreciar que esta región está limitada,

como lo determina la definición del cono del transmisor. Este es el por qué el protocolo se llama enrutamiento de haz enfocado. (Jornet, Stojanovic, & Zorzi, 2008)

Control de Acceso al Medio.

El algoritmo de FBR puede ser acoplado con cualquier protocolo MAC. Puesto que el intercambio de paquetes cortos de control es una parte inherente del protocolo de enrutamiento propuesto DACAP, el protocolo basado en un sensor de portadora virtual previene de colisiones, lo que parece una opción adecuada. A continuación, se resume los aspectos más importantes del acoplamiento MAC y las capas de enrutamiento (Jornet, Stojanovic, & Zorzi, 2008)

Solicitudes multicast - Al solicitar una ruta, el transmisor envía un *RTS* multicast. Cada paquete de control contiene tres pares $\{ID, Posición\}$: uno para el transmisor actual, uno para el destino final y otro para el siguiente nodo intermedio, es decir, el retransmisor. En un *RTS* de multidifusión, ese campo se deja vacío. Un nodo que se plantea a sí mismo como un retransmisor lo sobrescribe con su propio *ID* y posición. Después de enviar un *RTS* multicast, el transmisor esperará por dos veces el retardo máximo de propagación correspondiente al nivel de potencia de la transmisión actual incluso si ya ha recibido uno o más *CTS*s (más el retardo adicional correspondiente si es un paquete retransmitido). La abertura del cono también se especifica en el *RTS* multicast.

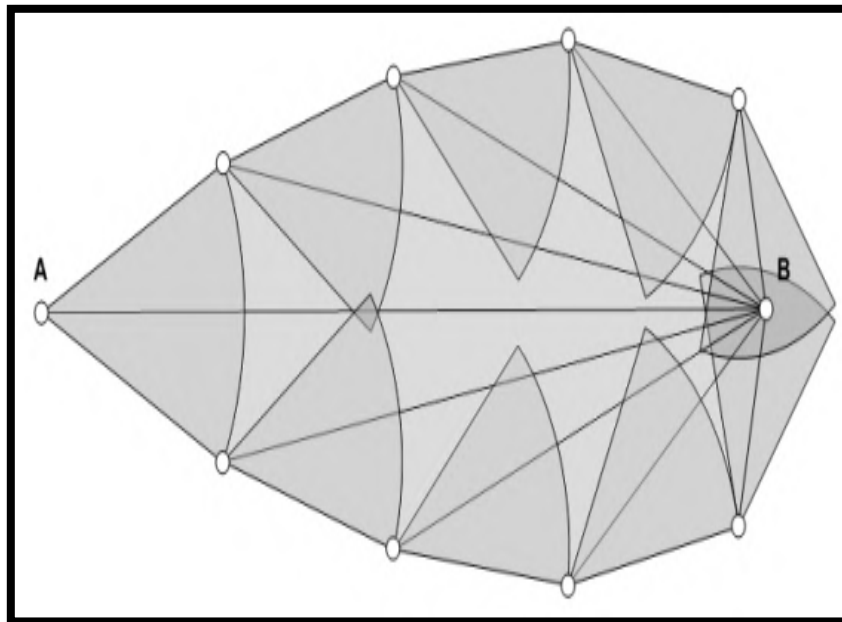


Figura 10-2: Región de las posiciones de los retransmisores candidatos
Fuente: (Jornet, J. M., et la., 2008)

Paquetes Silenciosos - Después de un *RTS* multicast, el nodo solicitante podría no recibir respuestas. Esto ocurrirá si no existen vecinos, o existen, pero ya están comprometidos con otra comunicación. En este último caso, si el transmisor no se encuentra al tanto de la situación, decidirá incrementar la potencia de transmisión, aumentando las posibilidades de interferir a otras transmisiones. Para evitar esta situación, un nodo consciente de una comunicación simultánea que escucha un *RTS* multicast enviará un paquete silencioso muy corto al nodo solicitante. El nodo receptor del paquete silencioso postergará su transmisión. La longitud de este tipo de paquete minimiza las posibilidades de interferencia con la comunicación en curso.

Acuse de recibo implícito - Aparte de un mensaje de recibido de extremo a extremo que puede generarse en las capas de transporte o de aplicación, cada nodo intermedio aguarda por la confirmación de la entrega de los datos. El concepto del acuse de recibo implícito, se lo describe como, si los nodos utilizan transductores omnidireccionales, cual es el caso de los nodos móviles, el transmisor puede deducir que sus últimos datos de transacción se han completado correctamente si escucha su propio paquete siendo transmitido al siguiente retransmisor. Si el nivel de potencia usado para alcanzar el siguiente nodo es menor que el utilizado para la transmisión previa, el acuse de recibo se debe enviar explícitamente usando un nivel de potencia más alto. Lo mismo debe hacerse cuando el paquete llega a su destino final. Al mismo tiempo, si por alguna razón un nodo recibe un *RTS* del mismo transmisor para un paquete que se ha transmitido correctamente (cada paquete tiene un identificador único), se envía explícitamente un acuse de recibo, evitando la retransmisión de paquetes de datos largos.

Retroceso dinámico y tiempos de espera - El nivel de potencia que está siendo utilizado es específico en cada paquete de control. Realizando esto, cualquier nodo que escucha una comunicación en curso puede ajustar dinámicamente su back off y sus tiempos de espera.

2.3.4 Enrutamiento Sectorial con Predicción de Localización de Destino (SBR-DLP)

Con la finalidad de proveer un buen protocolo para las redes de sensores móviles en ambientes submarinos, se ha desarrollado un protocolo llamado Enrutamiento sectorial con predicción de localización de destino (SBR-DLP), mismo que trabaja sobre un esquema de enrutamiento basado en la localización con capacidad de predecir la localidad cuyo propósito es mejorar la entrega promedio de paquetes.

Algoritmo SBR-DLP

El algoritmo SBR-DLP es un algoritmo de enrutamiento basado en la localización mediante el cual un nodo sensor no transporta ninguna información de los nodos vecinos ni del diseño de la red. Sin embargo, se asume que cada nodo conoce su propia posición, y los movimientos pre-planificados del nodo destino. Hay mucho interés en las aplicaciones como la exploración y el monitoreo marino, etc., que puede requerir que el nodo destino se mueva a lo largo de la red móvil para cubrir el área entera de exploración/monitoreo. Para tales aplicaciones, los nodos destino actúan como un nodo móvil, y su movimiento es usualmente predefinido antes del lanzamiento de la red. Esto en contraste a algunas aplicaciones, donde el nodo destino puede ser fijado en la superficie del agua actuando como una entrada o un nodo central, y es a su vez conectado a una red troncal de alta velocidad. La ubicación fija del destino puede darse a conocer a todos los otros nodos sin ninguna ambigüedad. Aunque *SBR – DLP* aborda el problema de movilidad del nodo destino asumiendo que sus movimientos pre-planificados son conocidos por todos los otros nodos antes de su lanzamiento, es importante observar que el nodo destino puede todavía desviarse de su lista debido a la corriente oceánica. También, *SBR – DLP* no sabe los movimientos de los diferentes nodos. A fin de evitar la falta de inundaciones, encamina un paquete hacia el destino mediante salto a salto, en lugar de buscar el camino completo antes de enviar el paquete (Chirdchoo, Soh, & Chua, 2012).

Funcionamiento.

Encontrar el siguiente nodo de retransmisión: Cuando un nodo, S, desea enviar un paquete (ya sea un paquete nuevo o de retransmisión) a un nodo destino D, encuentra su siguiente nodo de retransmisión difundiendo un paquete *Chk_Ngb*, el cual incluye la posición actual de los transmisores y el ID del paquete. Al escuchar al *Chk_Ngb*, cada nodo vecino *x* revisa si es más cercano al nodo D que la distancia existente entre los nodos S y D, usando la localización prevista del nodo D. Si la condición se cumple, el nodo *x* tendrá que responder al Nodo S retransmitiendo un paquete *Chk_Ngb*.

Con el fin de reducir posibles colisiones entre las respuestas *Chk_Ngb_Replay* en el nodo S, cada nodo vecino determina primero el sector en el que se encuentra, luego programa el tiempo de transmisión de sus *Chk_Ngb_Replay*. Para un sistema *k*sector dado, el nodo empieza a localizar el primer sector garantizando que el sector sea dividido por el vector virtual \overline{SD} . Los posteriores sectores son entonces designados de acuerdo a sus prioridades, que son determinadas usando las diferencias angulares de \overline{SD} . La Figura 11-2, ilustra como un sistema de cuatro sectores es rotulado. Después de determinar el sector en el que se encuentra (denominado *j*), un nodo vecino

incluye en su *Chk_Ngb_Replay* el número del sector j , su ID de nodo y su distancia estimada desde la ubicación destino predicha. (Chirdchoo, N., et la., 2009). A continuación programa la transmisión que ocurre después de un desplazamiento dado por:

$$t_{offset,j} = \alpha (j - 1) P_{max} \quad (11)$$

Dónde:

- $0 \leq \alpha \leq 1$
- P_{max} es la potencia de propagación máxima.

Como pauta general, α puede ser seleccionado en base al número de sectores k , tal que si k es grande, un valor pequeño α sería suficiente porque la posibilidad de colisiones de diferentes sectores sería también menor. Esto también ayuda a acortar el tiempo que el nodo S necesita esperar antes de adquirir todas las respuestas de todos los sectores k .

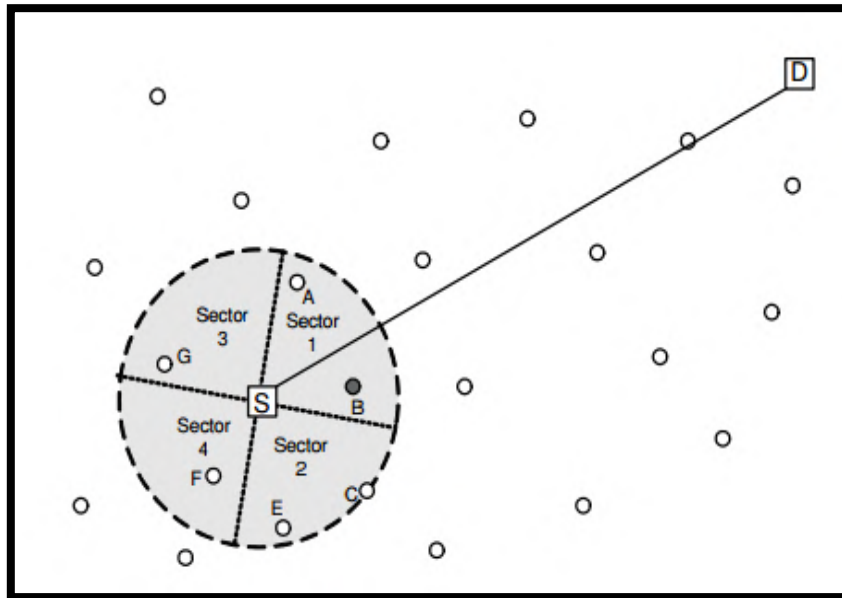


Figura 11-2: Selección del reenvío al transmisor

Fuente: (Chirdchoo, Soh, & Chua, 2012)

Después de reunir todos los *Chk_Ngb_Replay* desde sus vecinos candidatos, el nodo S filtra los nodos desechando los que podrían salirse de su rango antes de comprobar que los datos llegaron a su destino. Esto es estimado usando la propagación de retransmisión de cada nodo candidato, al momento en que recibe el *Chk_Ngb_Replay*, y la velocidad máxima posible. Se debe tomar en consideración que el filtrado es necesario porque el cambio en su distancia relativa puede ser bastante significativo sobre el largo retardo producido por la baja velocidad de transmisión de las

ondas que se utilizan para transmitir los datos dentro de agua. Además, si se desea una estimación mucho más precisa del movimiento del nodo candidato, se puede considerar incluir la dirección y velocidad del nodo en el *Chk_Ngb_Replay* hacia el transmisor. Después del filtrado, el resto de candidatos son ordenados de acuerdo a sus prioridades sectoriales. Si hay más de un candidato que tiene la misma prioridad en la parte superior de la lista, será seleccionado el que tenga la distancia prevista más cercana al Nodo D. La Tabla 2-2, se ilustra cómo el Nodo S selecciona al Nodo B como su nodo de retransmisión y observando la distribución de los nodos en la topología que se indica en la Figura 11-2. Después de seleccionar su nodo de retransmisión, el Nodo S transmite su paquete de datos a este nodo. El nodo de retransmisión actúa como un transmisor usando el mismo procedimiento señalado anteriormente, hasta que el paquete alcanza su destino. Ahora, considerando que no hay respuesta de ninguno de los nodos vecinos del transmisor. El transmisor deberá esperar durante un intervalo de tiempo de T_{wait} para que la topología cambie, antes de hacer otro intento. Si el transmisor no llega a encontrar ningún vecino durante un número de veces $n_{discard}$, se descarta el paquete (Chirdchoo, Soh, & Chua, 2012).

Tabla 2-2: Proceso como el nodo S selecciona el siguiente nodo de retransmisión

Sector	Candidatos	Distancia a D	Después del filtrado
1	A,B	500,480	A,B
2	C	550	
3	-	-	
4	-	-	
Siguiente nodo de retransmisión			B

Fuente: (Chirdchoo, Soh, & Chua, 2012)

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Reconocimientos implícitos / explícitos

Para un canal de alto grado de error tal como un canal acústico submarino, el reconocimiento se realiza preferiblemente de manera salto a salto, en cambio el reconocimiento de extremo a extremo se lo deja a las capas superiores. Además, para lograr eficiencia energética, el reconocimiento en *SBR – DLP* se lo realiza implícitamente a través de escucha siempre que sea posible. El transmisor asume que el paquete es recibido con éxito si escucha al paquete *Chk_Ngb* desde su nodo de retransmisión, mientras que el último intenta encontrar el siguiente nodo de retransmisión. Se empleará un paquete de acuse de recibo explícito (ACK) en caso de que el nodo destino reciba el paquete. Si el transmisor no recibe ningún acuse de recibo después de cierto tiempo de espera, se realiza otro intento de transmisión mediante la difusión repetida de *Chk_Ngb*. En caso de que el

nodo de retransmisión haya recibido con éxito el paquete de datos pero su ACK falla al llegar al transmisor, responderá al transmisor con un ACK explícito cuando éste escuche al siguiente *Chk_Ngb* del remitente para el mismo ID de paquete (Chirdchoo, Soh, & Chua, 2012).

Predicción de la localización del destino

La predicción de la localización del destino es parte importante del *SBR – DLP*, porque un transmisor trata de reenviar su paquete de datos en la dirección del vector virtual \overrightarrow{SD} . Si la predicción es muy lejana, un paquete puede ser enrutado a través de una ruta que es mucho más larga de lo necesario, o incluso no podría llegar al destino. Aunque *el SBR – DLP* no requiere un acuse de recibo preciso de la ubicación del destino, se espera que cuanto mayor sea el error en la predicción de la ubicación del destino, el cálculo total del rendimiento del *SBR – DLP* es menor. Este problema llega a ser más notorio en redes móviles submarinas donde los nodos sensores pueden experimentar movilidad tanto por sus propios propulsores como por las corrientes oceánicas. En general, el movimiento de un vehículo submarino autónomo (AUV) suele ser planificado previamente, pero la velocidad y dirección de la corriente oceánica no se los puede predecir están ligados a parámetros externos aleatorios. Por lo tanto, incluso si el movimiento pre-planificado del nodo destino está disponible para todos los otros nodos, la corriente oceánica podría todavía hacer esta información inexacta.

Para ayudar a predecir la ubicación del destino, el *SBR – DLP* requiere que el nodo destino emita periódicamente un paquete de *notificación (NTF)* para informar a sus vecinos de un salto si se desvía significativamente de su lista. Elegimos notificar sólo a sus vecinos de un salto, en lugar de a toda la red, porque el retraso prolongado de propagación puede hacer que el paquete *NTF* se vuelva obsoleto cuando alcanza a un nodo que está a varios saltos de distancia. Además, ya que el propio nodo destino es móvil, otros nodos dentro de la red también pueden escuchar su paquete *NTF* en un momento diferente.

Para poner en movimiento el paquete *NTF*, el nodo destino comprueba si se ha desviado de su lista cada vez que alcanza un destino predefinido. Si encuentra que la diferencia (Δ) entre el tiempo actual (t_{NTF}) y el tiempo programado (t_{expect}) es mayor que el umbral ($\Delta_{threshold}$), difundirá el paquete *NTF*, que contiene los parámetros t_{NTF} y Δ . Al oír el paquete *NTF*, un nodo almacena estos parámetros para ser usados posteriormente. Ahora, supongamos que un nodo acaba de escuchar el paquete *Chk_Ngb* de un transmisor en tiempo t_{now} . Primero comprueba si ha oído previamente el paquete *NTF*. Si es así, calculará la ubicación actual del destino observando el movimiento del destino predefinido en el momento que es desplazado por $\hat{\Delta}$ de su lista, donde $\hat{\Delta}$ es la diferencia de

tiempo estimada a partir de la lista predefinida. El nodo utiliza los parámetros t_{NTF} , Δ y t_{now} para calcular $\hat{\Delta}$ usando (Chirdchoo, Soh, & Chua, 2012).

$$\hat{\Delta} = \frac{\Delta \cdot t_{now}}{t_{NTF}} \quad (12)$$

2.4 Herramientas de Simulación.

Los simuladores son una potente herramienta utilizada para facilitar la investigación, se los utiliza de manera constante para comparar y evaluar diferentes diseños de redes, probar la funcionalidad de los algoritmos así como de nuevos y preexistentes protocolos. Su facilidad de manejo, bajo costo y las múltiples pruebas satisfactorias de redes a gran escala, permiten determinar si un proyecto es o no viable para determinar si la implementación está dentro del presupuesto establecido.

A continuación se presenta una descripción general de los diversos simuladores actualmente disponibles para UWSN; factores como entorno de trabajo, plataforma de software, lenguaje de simulación, características clave y limitaciones de cada uno de ellos, permitirán determinar la herramienta que mejores prestaciones brinde.

2.4.1 Aqua-Sim

Este simulador puede fácilmente simular la atenuación de las señales acústicas y la colisión de los paquetes dentro de las redes de sensores subacuáticas. Puede soportar códigos realizados en NS-2. Soporta los paquetes de simulación inalámbricas CMU. Aqua-Sim no es afectado por las alteraciones realizadas en los paquetes inalámbricos y es independiente del paquete inalámbrico. Puede ser diseñado con extensibles y flexibles opciones. Consta de 3 módulos principales: entradas, interfaces y funciones. En la Figura 12-2, se presenta la ventana de simulación en 3D de la herramienta Aqua-Sim.

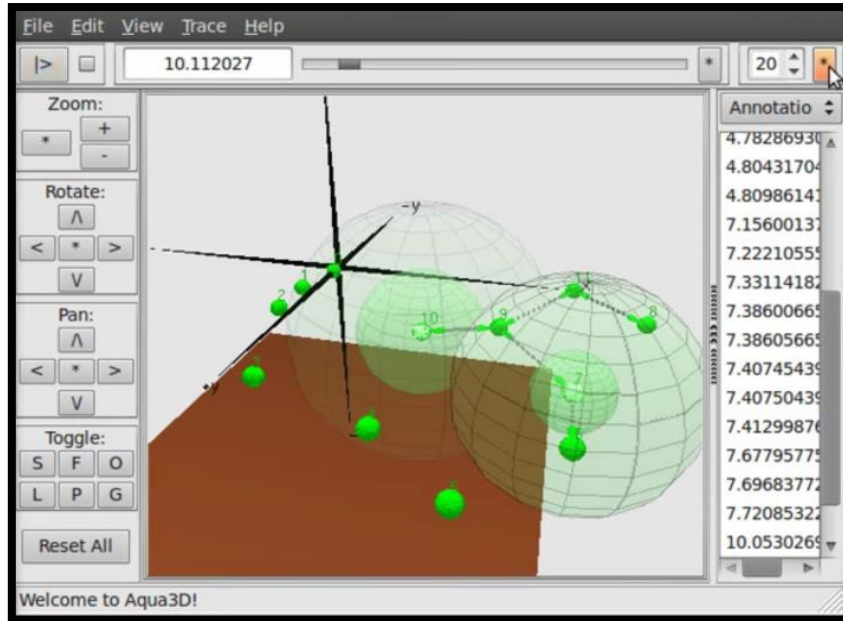


Figura 12-2: Simulación en Aqua-Sim
Fuente: (Ptolemy Project, 2017)

Ventajas

- Conduce eventos discretos para las simulación de redes
- Tiene soporte para redes móviles basadas en movimientos 3D
- Alta fidelidad en las simulación de los canales acústicos submarinos
- Facilidad en la importación de nuevos protocolos

Desventajas

- Las señales acústicas son muy cortas

2.4.2 Shawn

Es un simulador para redes de sensores personalizable de código abierto, diseñado para soportar redes a gran escala. Su intención es proveer de un buen nivel de abstracción y tener una mejor red que sus competidores NS-2, OMNET++ y GLoMoSim. Puede ser escrito en Java. Este consiste de características de perseverancia y desacople de las instancias de la simulación. Estas características hacen que sea más fácil la implementación. Shawn ha sido habilitado para trabajar con varios modelos de interfaz que pueden ser usados para controlar la simulación. Diseñado para protocolos de alto nivel, empleando simples modelos de comunicación que permiten a dos o más nodos intercambiar mensajes. En la Figura 13-2, se indica la Arquitectura del Shawn.

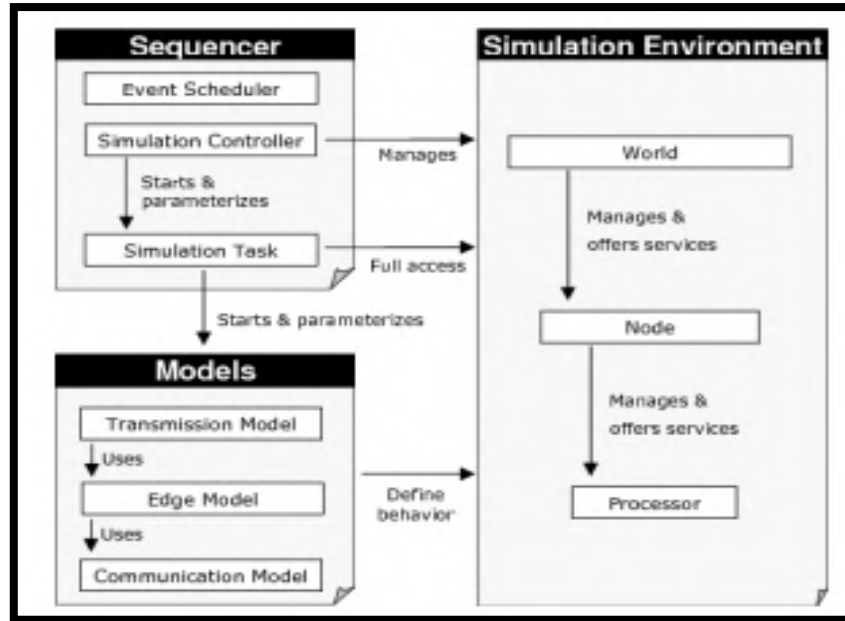


Figura 13-2: Arquitectura del Shawn

Fuente: (Kroller, Pfisterer, Buschmann, Fekete, & Fischer, 2007)

Ventajas

- Soporta Protocolos densos que pueden ser fácilmente modificados
- Fácil para determinar los efectos de los parámetros de un canal

Desventajas

- No implementa parámetros de las capas bajas ni cuestiones de simulación.
- Limitado para generar los archivos postscript

2.4.3 UWSim

Es diseñado para redes de sensores subacuáticos (UWSN). Actualmente se enfoca en simulaciones de grandes extensiones de sensores y redes adhoc pero no consideran ningún factor que afecte a la comunicación subacuática. Está enfocado para manejar ciertos parámetros propios de las UWSN como es el ancho de banda pequeño, frecuencias bajas, trasmisiones altas y memoria limitada. Se encuentra enfocado como un simulador en base de protocolo/capa.

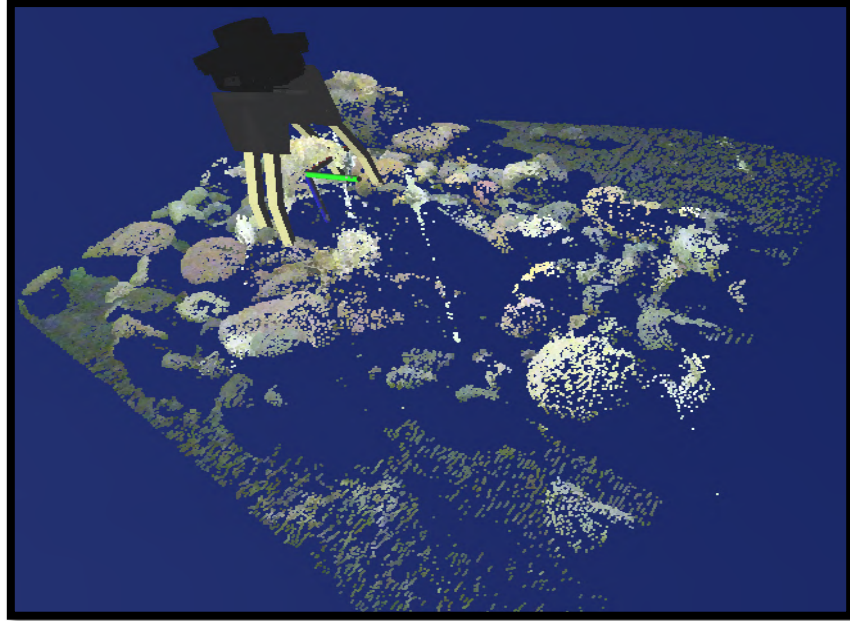


Figura 14-2: Ejemplo de Simulador UWSim
Fuente: (IRS Lab, 2012)

Este software fue construido sobre Windows XP usando Microsoft Net Framework 2.0 y está desarrollado principalmente para máquinas de 64 bits. Utiliza C# y programación orientada a objetos, trabaja con protocolos de enrutamientos proactivos y reactivos (AODV y DSR). En la Figura 14-2 se puede apreciar un ejemplo de simulación en UWSim.

Desventajas

- Restricción en el número de funcionalidades
- No puede usarse para otra red de sensores que no sea UWSN

2.4.4 VisualSense

Diseñado para representar requerimientos específicos de las redes inalámbricas así como examinar los canales de comunicación. Está diseñado para mantener una base de componentes estructurados como modelos. Ofrece un exacto y extensible modelo de radio comunicación. El modelo de radio utilizado viene acompañado de un modelo de programación de energía general que puede ser reprogramado por los fenómenos físicos.

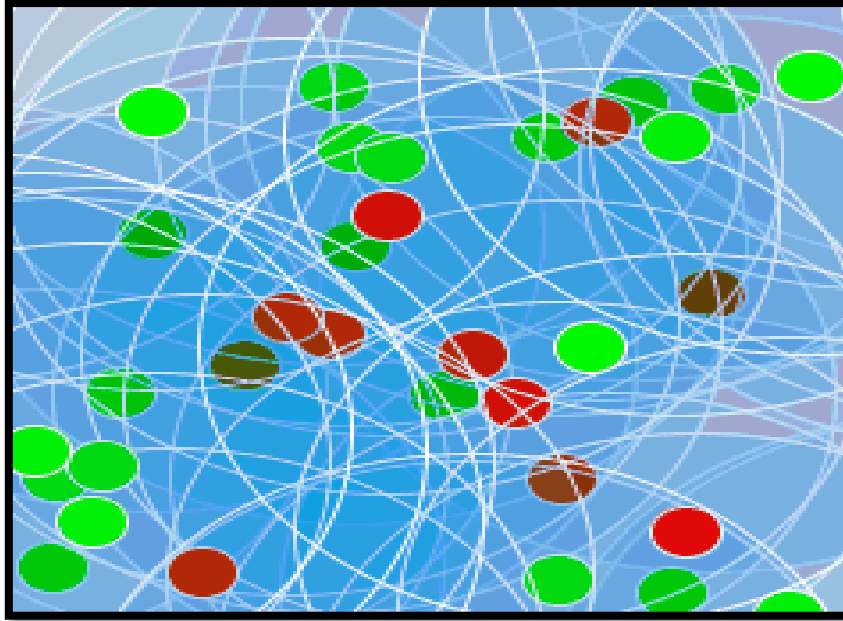


Figura 15-2: Representación de una red en VisualSense
Fuente: (Ptolemy Project, 2017)

El modelo de sonido es utilizado conjuntamente con un modelo de propagación que es usado para la localización de los objetos. El desarrollo consiste en una nueva clase Java y muy pocos archivos XML. VisualSense mantiene una descripción orientada a objetos de las redes de nodos, del canal de comunicación. Se mantienen sistemas heterogéneos para simular diferentes aspectos que conjuntamente con un modelo pre construido presentan una idea de detención de objetos a través del sonido. Puede ser utilizado con estándares conocidos de las redes de sensores inalámbricas (UWS). En la Figura 15-2, se tiene un ejemplo de una red dentro de una herramienta de simulación.

Ventajas

- Ofrece una simulación exacta y entendible del canal de comunicación

Desventajas

- Provee solamente un protocolo para el sonido

CAPÍTULO III

3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Introducción

Para llevar a cabo la evaluación de los mecanismos de localización de nodos es importante establecer un escenario de pruebas del cual se pueda extraer las características de simulación, el sistema presentado está destinado a ser implementado en extensos ambientes oceánicos, lo que implica obtener gran cantidad de información con altos niveles de cobertura y conectividad.

En redes UWSN donde los nodos generalmente funcionan con baterías que difícilmente pueden ser cambiadas o recargadas, la restricción de energía es una limitante. Bajo estas características, la investigación plantea determinar la herramienta de simulación para redes inalámbricas subacuáticas que brinde las mejores prestaciones de simulación y permita el análisis gráfico y estadístico de variables de tráfico como retardo, trougput y consumo de energía mediante los cuales se puede evaluar cuál es el mejor protocolo de enrutamiento para este tipo de redes.

3.2 Selección de la Herramienta de Simulación

Para seleccionar la herramienta de simulación adecuada, se ha considerado varias características importantes como el tipo de licencia que posee, facilidad de configuración o creación de nuevos protocolos, disponibilidad de información en línea, facilidad en el manejo del software, posibilidad de la generación de archivos PostScript, fiabilidad en los resultados, capacidad para simular redes extensas, cantidad de recursos necesarios para trabajar, posibilidad de soportar movilidad de los nodos y capacidad de manejar redes en 3D (tres dimensiones).

Estas características se consideran necesarias para realizar un análisis eficiente de los protocolos de localización para las UWSN.

Para determinar la herramienta de simulación que cumpla con la necesidad propuesta en el presente estudio se ha utilizado el método Escala de Likert, que es un instrumento de medición de datos utilizado por los investigadores para medir actitudes a través de las opiniones que tienen los individuos acerca de un asunto específico.

Las características de cada protocolo se cuantificaron en una escala del uno (1) al cuatro (4), utilizando la Escala de Likert que se muestra en la Tabla 1-3 se procedió a ponderar cada una de las características que previamente se describieron como importes para llevar a cabo el presente trabajo investigativo.

En la Tabla 2-3, se resumen las características que poseen los simuladores con su respectiva ponderación.

Tabla 1-3: Escala de Likert de las Características de los Protocolos

Escala de Likert	
Valor	Caracterización
1	No / Muy Complicado / Nada fiable / Alto Consumo / Simulación en 2D
2	Algunos / Complicado / Poca Información / Poco fiable / Considerable
3	Comercial / Relativamente Fácil / Suficiente Información / Fiable / Medio
4	Si / Suficiente / Muy Fácil / Muy Fiable / Bajo / Simulación en 3D

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Tabla 2-3: Ponderación de las características de los Simuladores para UWSN

Descripción	SHAWN	UWSIM	VISUALSE NSE	AQUASIM
Considera factores de capa física que afectan la comunicación submarina (absorción, reflexión)	2	4	4	4
Software Libre	4	3	3	4
Facilidad para creación y modificación de protocolos	3	2	2	2
Disponibilidad de Información Online	3	2	2	3
Interfaz Gráfica amigable	3	3	3	4
Permite generar archivos Postscript	1	1	1	4
Fiable	3	2	3	4
Ofrece escalabilidad de redes	4	4	4	4

Consumo de recursos hardware	3	1	3	3
Soporta movilidad de nodos	1	4	1	4
Topología de red	1	1	1	4
TOTAL	28	27	27	40

Fuente: Protocolos de enrutamiento

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Tabla 3-3: Resultado Final de la Ponderación de los Simuladores

HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN		CALIFICACIÓN
1	Aquasim	40
2	Shawn	28
3	UWSim	27
4	VisualSense	27

Elaborado por: Cujilema, Gisela, 2019

En la Tabla 3-3, se muestra las calificaciones obtenidas por cada herramienta de simulación, ordenadas de manera descendente. Se pudo determinar que Aqua-Sim es la herramienta de simulación que cumple con las características necesarias para ser el simulador utilizado en el análisis de los protocolos de enrutamiento de redes de sensores inalámbricos submarinos.

3.3 Esquema de Red UWSN.

En la Figura 1-3 se representa esquemáticamente la red UWSN que se ha propuesto para ser simulada a través de la herramienta Aqua-Sim. El esquema consta de un conjunto de nodos sensores ubicados dentro de un área establecida a diferentes profundidades, dichos nodos se comunican a través de ondas sonoras al nodo central SINK quien recopila los datos sensados y envía hasta la central de monitoreo a través de la red de interconexión donde serán procesados y analizados.

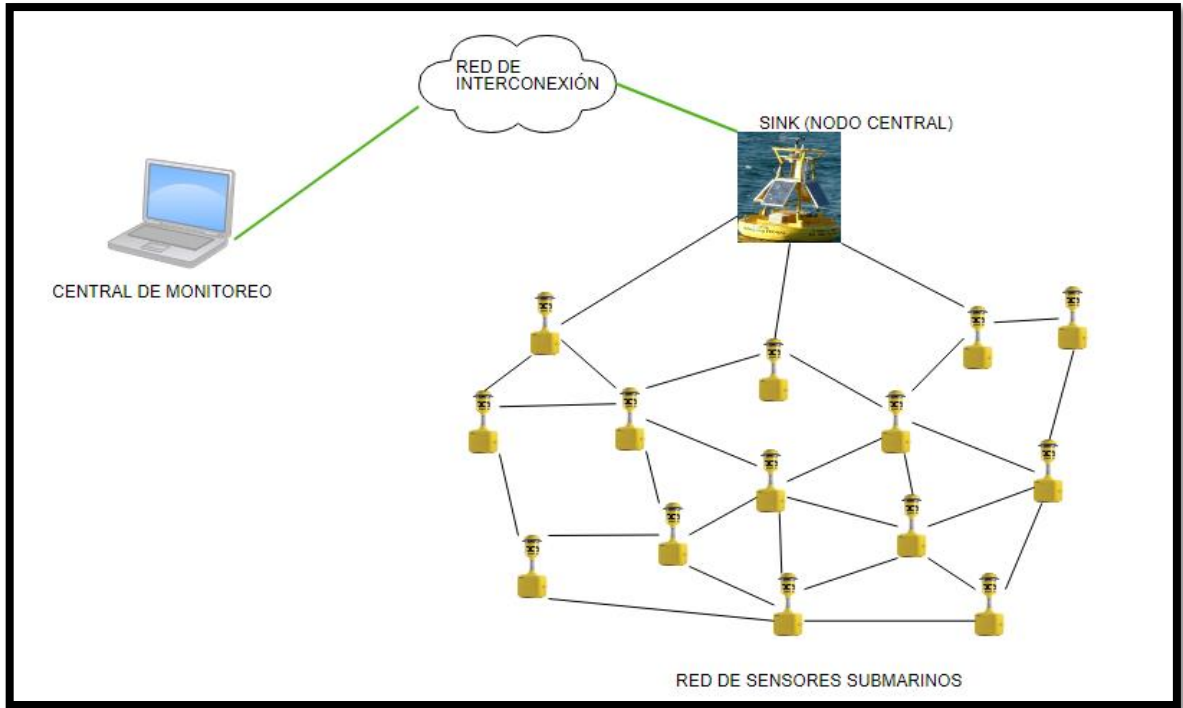


Figura 1-3: Modelo esquemático de la red UWSN
 Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

3.3.1 Elementos de la Red UWSN.

A continuación se presenta una descripción de los elementos que forman parte del escenario a analizar.

Nodos Sensores y Nodo SINK.- El presente estudio no está basado en un caso específico de hardware sin embargo los parámetros de comunicación son similares a aquellos de un modem acústico comercial, en la Tabla 4-3 se citan los parámetros de configuración utilizados para la representación de los nodos dentro Aqua Sim, estos valores fueron adoptados de los trabajos previos de (Xie, Cui, & Lao, VBF: Vector-Based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks, 2006) y (Xie, Zhou, Peng, Yan, & Hu, 2013)

Canal Físico.- Dentro de la herramienta de simulación Aqua-Sim se configura todos los aspectos que afectan la transmisión de datos por ondas acústicas como son la atenuación, reflexión, refracción, etc.

Tabla 4-3: Parámetros de Simulación.

Variable	Valor(es)
Tipo de Modelo de Cola	Queue/DropTail/PriQueue
Tamaño Máximo de la Cola	50 paquetes
Canal	Underwater Channel
Propagación	Underwater propagation
Tipo de MAC	Broadcast MAC
Energía Inicial	10000 Joule
Poder Trasmisión	2.0 Watt
Poder Recepción	0.1 Watt
Poder IDLE	0.01 Watt
Tipo de Antena	Omnidireccional
Tiempo de Simulación	500 segundos
Tamaño del paquete	50 bytes
Tamaño de Paquetes de control	20 bytes
Movimiento	3D
Actualización de la Ubicación de los Nodos	0.3 segundos
Tipo de Esparcimiento	Esparcimiento Esférico
Canal Utilizado	UnderwaterChannel
Método de Propagación	UnderwaterPropagation
Protocolo Mac	UnderwaterMac/BroadcastMac
Tipo de Cola	DropTail/PriQueue

Elaborado por: Cujilema, Gisela, 2019

Red.- Para llevar a cabo la tarea de sensado en la red de sensores bajo el agua a gran escala, se propone una arquitectura de red UWSN que tiene una topología tridimensional ya que sus sensores flotan con las corrientes de agua y a diferentes profundidades cubriendo un área de tres dimensiones.

3.4 Ambiente de Simulación.

Para el desarrollo de pruebas de funcionamiento de los protocolos y extracción de características necesarias para la configuración de la herramienta Aqua Sim, se estableció un ambiente de simulación que posee características de un entorno real.

Como modelo idóneo y con el fin de aportar para la preservación de la flora, fauna y su frágil ecosistema, se ha seleccionado a las Islas Galápagos, consideradas por la UNESCO como Patrimonio Natural de la Humanidad por su belleza natural, biodiversidad de especies endémicas, localización y el encanto que producen.

Las islas Galápagos se encuentran ubicadas a 1000 km del Ecuador continental, este paraíso natural está formado por 233 islas de las cuales 13 son islas grandes, 6 pequeñas y 40 islotes que se encuentran en sus alrededores, en las que se destacan 14 islas mayores, 4 de ellas habitadas: San Cristóbal que es la Capital, Santa Cruz, Isabela, y Floreana.

El archipiélago de Galápagos es de origen volcánico, habría emergido del fondo submarino de 3 a 5 millones de años atrás. Su superficie es de ocho mil nueve kilómetros cuadrados, 97% de los cuales forman parte del Parque Nacional Galápagos y el 3% restante está destinado para el desarrollo de la población.

Galápagos tiene una gran fama por su única e inigualable biodiversidad, la cual inspiró a Charles Darwin, a desarrollar la teoría de la evolución de las especies. El archipiélago que conforma las Islas Galápagos posee una gran diversidad por lo que, se lo considera un paraíso mega diverso. Está conformado por dos áreas que se encuentran dentro del programa de protección ambiental: Parque Nacional Galápagos y Reserva Marina de Galápagos. La Reserva Marina posee una extensión de ciento treinta y tres mil kilómetros cuadrados, convirtiéndola en una de las diez reservas naturales más extensas del mundo. En la Figura 2-3 se presenta un ejemplar de la fauna existente en estas islas.

Las costas del oeste y sur del archipiélago presentan laderas muy precipitadas con profundidades que alcanzan los tres mil metros de profundidad. En cambio, entre islas adyacentes se alcanza una profundidad de 500 metros. Mientras que las islas ubicadas hacia el oriente son las más antiguas y con mayores erosiones conforman la cordillera submarina de Carnegie (Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador., 2014).



Figura 2-3: Fauna de las Islas Galápagos
Fuente: (Conservación Internacional, 2014)

Galápagos además de ser un santuario de vida, hogar de 30 mil personas y destino de 225 mil turistas que al año lo visitan, constituyen uno de los más complejos, diversos y únicos archipiélagos oceánicos del mundo que aún conserva el 95% de la biodiversidad originalmente registrada, gracias a los esfuerzos ejecutados por el Estado ecuatoriano conjuntamente con los demás organizaciones para su protección. Así tenemos que:

La Dirección del Parque Nacional Galápagos (DPNG) conjuntamente con La Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) se encarga del monitoreo mensual de la calidad del agua, el objetivo clave de este proyecto es el análisis del agua en sitios terrestres y costeros, es decir al agua que se emplea para satisfacer las necesidad del hombre. Dicho proceso se lo realiza a través de la toma de muestras de agua y el traslado de las mismas hasta un laboratorio donde se realiza el respectivo análisis.

El Instituto Oceanográfico de la Armada INOCAR, tiene entre sus tareas fundamentales, el resguardo de las personas en el mar, la protección del ecosistema marino y la investigación marina. Para el cumplimiento de sus funciones ha implementado varios proyectos, entre ellos citamos los siguientes:

En el año 2013, El INOCAR en cooperación con los institutos de investigación: Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) y Scripps Institution of Oceanography (SCRIP), desarrollaron el proyecto denominado ROGER (Repeat Observations by Gliders in the Equatorial Region) en español, Mediciones Continuas con submarinos no tripulados en la Region Ecuatorial. El objetivo principal del mismo consiste en determinar los procesos oceanográficos que afectan a la región ecuatorial generando información en tiempo real y de forma continua. En este proyecto se ha contemplado el despliegue de cinco Vehículos Autónomos (AUVs) al Este y Oeste de las Islas Galápagos durante un periodo de dos años. Dichos vehículos autónomos han explorado nuestro océano desplazándose a lo largo de la columna oceánica de agua hasta alcanzar una profundidad de 500m, cada dos horas, una vez en superficie transmiten su información de temperatura, salinidad, oxígeno, clorofila y nitratos sensada, a la estación de monitoreo del INOCAR. En la Figura 3-3, se muestra uno de los cinco Gliders desplegados.

Cabe resaltar que los proyectos antes mencionados ya no están en funcionamiento por sus altos costos de mantenimiento, degradación de sus componentes y por las condiciones inherentes de cada proyecto. La presente investigación busca aportar con herramientas científicas al proceso de monitoreo y conservación del ecosistema de las islas incentivando la instalación de una red UWSN que permita ampliar el alcance y funcionalidad de dichos proyectos.



Figura 3-3: Vehículo autónomo empleado en el proyecto ROGER.
Fuente: (INOCAR, 2013)

De esta manera el presente proyecto propone la instalación de una red UWSN en el canal de Itabaca entre las Islas Baltra y Santa Cruz, dicho canal alberga una producción extensa de especies nutritivas del área (Naranjo & Tapia, 2015). Este ecosistema saludable es sumamente frágil y vulnerable a una contaminación por hidrocarburos ya que dentro de la isla Baltra se encuentra el punto de abastecimiento de combustible para toda la zona insular a través de la terminal de Aerocomercial (Lucero & Mindiola, 2000).

3.4.1 Parámetros de Simulación

Los parámetros de configuración para el escenario de pruebas que se utilizaron dentro de la herramienta de simulación Aqua-Sim y que se extrajeron del ecosistema de las Islas Galápagos, fueron:

- Área de Cobertura
- Velocidad de las corrientes
- Número de Nodos

Área de Cobertura.- La zona seleccionada para la ubicación del escenario de pruebas de la red UWSN es el Canal de Itabaca situado entre las Isla Baltra y Santa Cruz. Según el Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador, la profundidad entre las islas del archipiélago alcanzan un máximo de quinientos (500) metros y la distancia entre islas del canal en mención es de aproximadamente de mil (1000) metros, por lo que se ha establecido que el área para el desarrollo

de pruebas sea de mil metros de largo por mil metros de ancho y una profundidad de quinientos metros. En la Figura 4-3, se muestra el espacio geográfico del entorno seleccionado como escenario de pruebas.

Velocidad de la Corriente.- Según, (**Instituto Oceanográfico de la Armada INOCAR, 2011**) y (**Lucero & Mindiola, 2000**), dentro de la reserva Marina Galápagos las corrientes marinas se presentan como se indica en la Tabla 5-3, donde se han escogido dos valores (0,1 m/s y 1,2 m/s) que representan el mejor y el peor de los casos a los que se enfrentan los nodos en cuanto a su movilidad.

Número de nodos.- Según (Xie, Zhou, Peng, Yan, & Hu, 2013) y tomando en cuenta las especificaciones técnico comerciales de los módems acústicos, un nodo bajo el agua brinda un alcance promedio de 100 metros en todas sus direcciones, por lo que para cubrir la totalidad del área sensada (1000m x 1000m x 500m) se ha determinado el despliegue de un nodo coordinador o sink y noventa y nueve nodos sensores encargados de generar los datos necesarios para la simulación establecida.



Figura 4-3: Ubicación de la Red UWSN situada entre las Islas Baltra y Santa Cruz (Islas Galápagos).

Fuente: (Google Maps, 2017)

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Tabla 5-3: Velocidad de las Corrientes Marinas en las islas Galápagos

Bahía	Corriente	
	Temporada Seca (Jul-Nov)	Temporada Húmeda (Dic-Jun)
Bahía Naufragio	0,31 a 0,81 m/s	0,54 a 1,01 m/s
Bahía Academia	0,1 a 0,2 m/s	0,21 a 0,3 m/s
Isla Baltra	0,1 a 0,81 m/s	0,82 a 1,2 m/s

Fuente: (Lucero & Mindiola, 2000) y (Instituto Oceanográfico de la Armada INOCAR, 2011)
Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

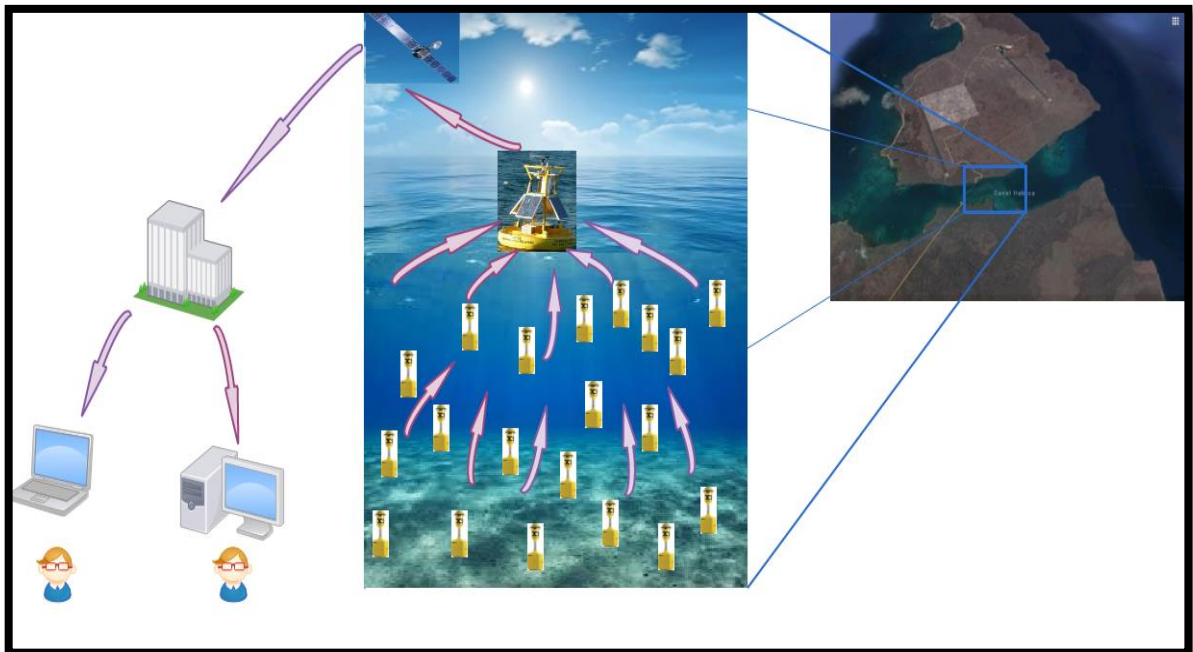


Figura 5-3: Ubicación del Esquema de Simulación dentro de las Islas Galápagos

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En la Figura 5-3, se presenta el escenario de pruebas planteado para la respectiva simulación de los protocolos de enrutamiento de nodos. Consta de un nodo SINK y noventa y nueve nodos sensores cubriendo un área de mil metros de largo por mil metros de ancho y quinientos metros de profundidad. Se ha adoptado velocidades de corrientes marinas de 0,1 m/s y 1,2 m/s.

Con lo antes expuesto, se establece un escenario móvil 3D, donde para probar el funcionamiento de los métodos de enrutamiento se realiza simulaciones en dos tipos de red UWSN “Densa y Dispersa” flotando a velocidades de 0,1m/s y 1,2 m/s, como se muestra en la Figura 6-3.

3.5 Software Utilizado.

Para la ejecución de la herramienta de simulación se utilizó el sistema operativo Ubuntu en su versión 16.04.02, el Software denominado Aqua-Sim se lo obtiene de la página de Underwater Sensor Network (UWSN) Laboratory de la Universidad de Connecticut de los Estados Unidos de Norte América. Adicionalmente se utiliza dos herramientas de visualización y animación llamadas NAM y Aqua3D.

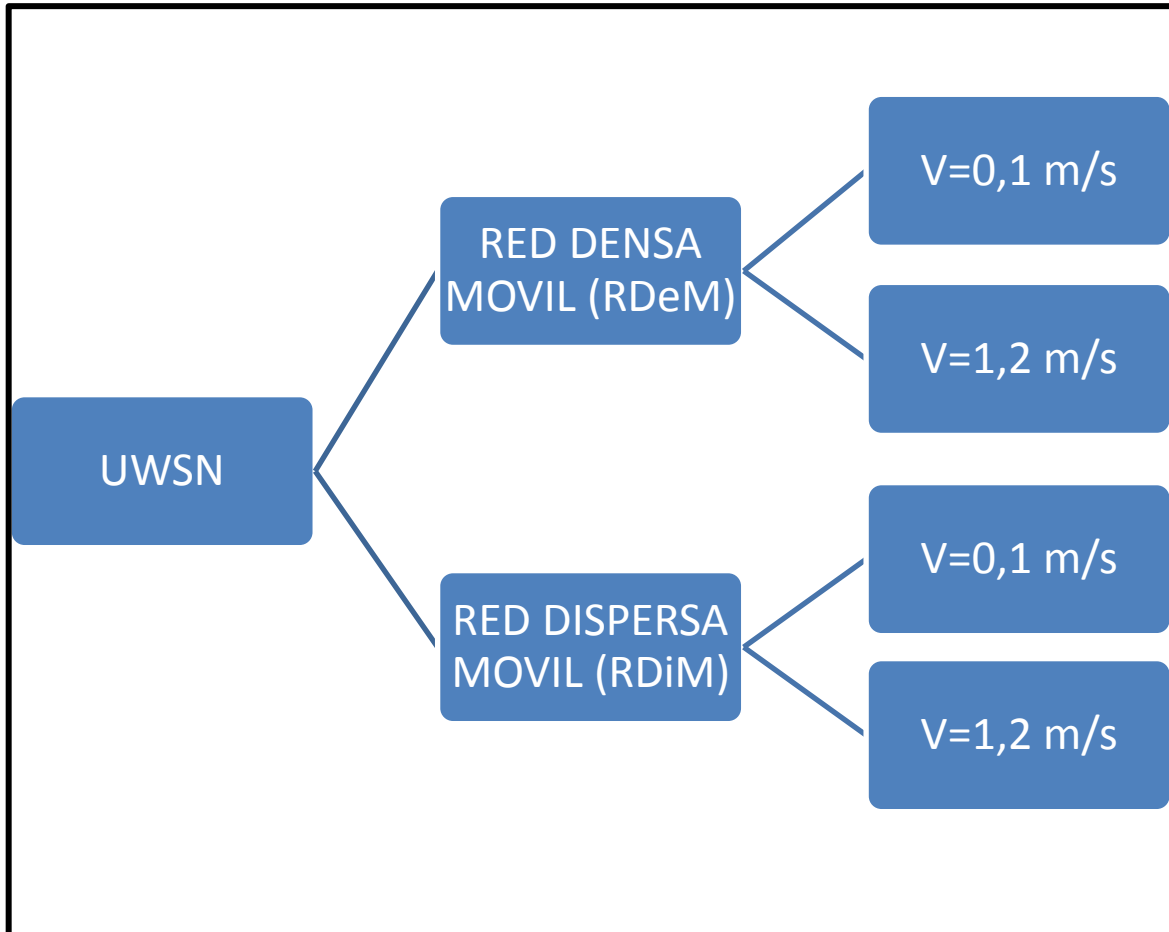


Figura 6-3: Redes UWSN utilizadas en el escenario de pruebas.

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

3.5.1 Instalación de Aqua-Sim

Aqua-Sim para su correcto funcionamiento requiere instalar y actualizar una serie de librerías y un compilador así como la edición de un archivo de configuración, en Anexos se encuentra cada uno de los pasos de instalación explicados a detalle y que a continuación se resume.

- Instalar las librerías y el compilador necesario.

- Eliminar el error de Violación de Segmentación en archivo de configuración.
- Actualizar y Activar la versión del compilador cc.
- Instalar Aqua-Sim
- Editar el Path.

La Figura 7-3, muestra la pantalla de configuración exitosa del programa de simulación.

```
File Edit Tabs Help
into your LD_LIBRARY_PATH environment variable.
If it complains about X libraries, add path to your X libraries
into LD_LIBRARY_PATH.
If you are using csh, you can set it like:
    setenv LD_LIBRARY_PATH <paths>
If you are using sh, you can set it like:
    export LD_LIBRARY_PATH=<paths>

2) You MUST put /home/jason/aquasim/tcl8.4.13/library into your TCL_LIBRARY en
ronmental
variable. Otherwise ns/nam will complain during startup.

3) [OPTIONAL] To save disk space, you can now delete directories tcl8.4.13
and tk8.4.13. They are now installed under /home/jason/aquasim/{bin,include
ib}

fter these steps, you can now run the ns validation suite with
d ns-2.30; ./validate

or trouble shooting, please first read ns problems page
ttp://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-problems.html. Also search the ns mailing list a
hive
or related posts.
```

Figura 7-3: Instalación correcta de Aqua-Sim.

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

3.5.2 Configuración de los parámetros de simulación.

Área de cobertura: para la configuración del área se utilizó las tres medidas que se establecieron anteriormente (largo, ancho y profundidad) a través del código que se muestra en la Figura 8-3.

```
set opt(x)          1000 x Dimensión. (Largo)
set opt(y)          1000 y Dimensión. (Ancho)
set opt(z)          500  z Dimensión. (Profundidad)
```

Figura 8-3: Configuración del área de simulación

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Velocidad de corrientes: la velocidad de las corrientes marinas afecta directamente a la movilidad y el desplazamiento de los nodos, para configurar la velocidad de los nodos se utilizó la línea de código presentada en la Figura 9-3. Donde se ha configurado velocidades de 0,1 m/s y de 1,2 m/s.

```
set opt(minspeed) 0.1 Velocidad mínima del nodo
set opt(maxspeed) 1.2 Velocidad máxima del nodo
```

Figura 9-3: Configuración de movilidad de los nodos
Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Número de Nodos: en la simulación planteada se ha determinado un total de 100 nodos configurados de la siguiente manera. Ver Figura 10-3.

```
set opt(nn) 100 Número de nodos
```

Figura 10-3: Configuración del número de nodos.
Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

3.5.3 Ejecución de la Simulación en Aqua-Sim.

Para realizar la simulación del escenario de pruebas dentro de Aqua-Sim, se realiza la codificación de un script, que es un archivo de texto escrito en lenguaje de herramienta de comando (Tcl) orientado a objetos, este archivo es interpretado por el simulador para realizar las diferentes tareas planteadas. Dentro de este archivo se configura todos los parámetros necesarios para la ejecución de la simulación, como: topología de la red, temporización de eventos, tráfico de paquetes, etc.

Luego de ejecutado el script mediante el comando "ns", la Figura 12-3, muestra los valores que fueron procesados por la herramienta de simulación, mismos que son importantes para el análisis del rendimiento de los protocolos. Los valores encerrados de color blanco indican el número de paquetes enviados por cada nodo, los de amarillo representan el total de paquetes recibidos por el SINK, el valor de rojo muestra el retardo y el de azul representa el consumo energético total de la red simulada.

Adicionalmente, la herramienta de simulación crea tres archivos de resultados, un archivo con la extensión *.nam*, otro *.tr* y el último con *.data*. En el archivo generado para la herramienta *nam*, se almacena los eventos realizados por el simulador línea por línea, para simplificar su comprensión, se emplea la herramienta de animación denominada NAM. El archivo de trazo (*.tr*), es más amigable para el usuario, no necesita de alguna herramienta para su análisis y contiene los mismos valores que el primer archivo pero en un formato diferente. En la Figura 11-3, se puede apreciar un ejemplo de cada archivo generado por el simulador.

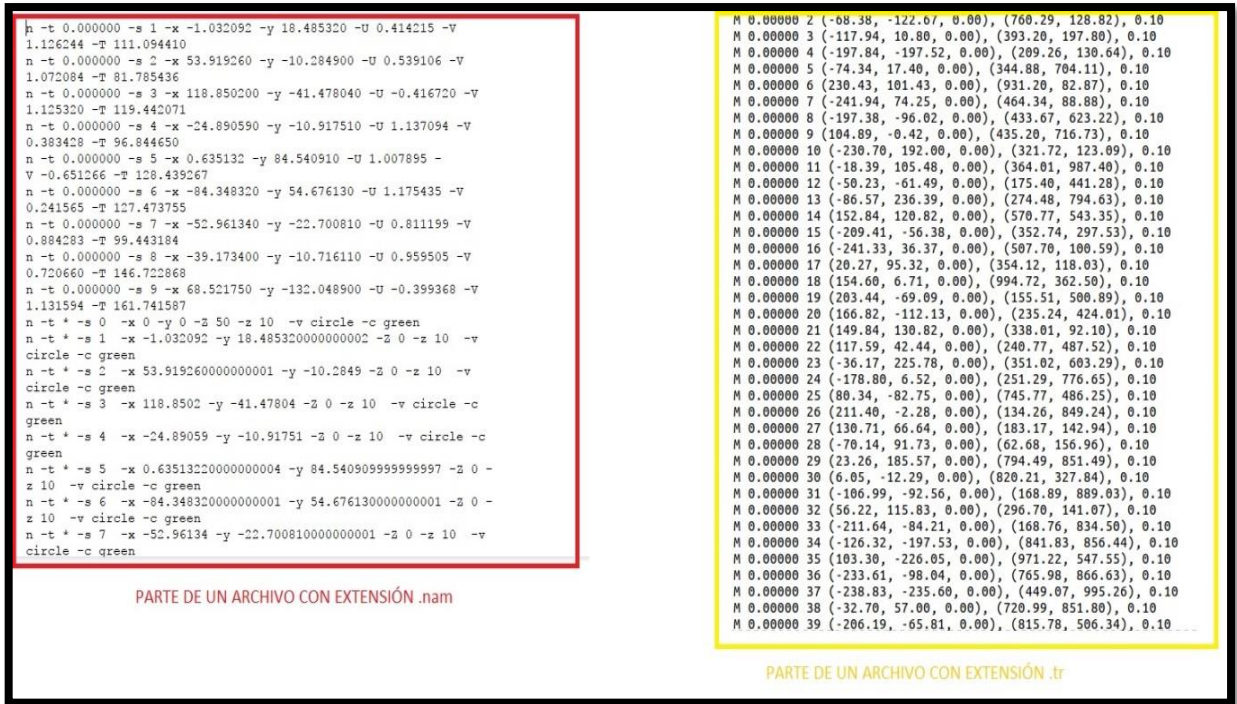


Figura 11-3: Archivos nam y tr generados por el simulador.

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

El último archivo que se genera con extensión .data se almacena los mismos resultados visualizados en el terminal pero con un formato más amigable como se muestra en la Figura 13-3.

```

SK 0: Num_Recv 212, InterArrival 0.339057
UWSink (id:0): I get the packet data no.95 from 5
SK 0: Num_Recv 213, InterArrival 0.497502
UWSink (id:0): I get the packet data no.96 from 5
SK 0: Num_Recv 214, InterArrival 9.160528
UWSink (id:0): I get the packet data no.96 from 4
SK 0: Num_Recv 215, InterArrival 0.341932
UWSink (id:0): I get the packet data no.96 from 5
SK 0: Num_Recv 216, InterArrival 0.497983
UWSink (id:0): I get the packet data no.97 from 5
SK 0: Num_Recv 217, InterArrival 9.157358
UWSink (id:0): I get the packet data no.97 from 4
SK 0: Num_Recv 218, InterArrival 0.344629
UWSink (id:0): I get the packet data no.97 from 5
SK 0: Num_Recv 219, InterArrival 0.498460
UWSink (id:0): I get the packet data no.98 from 5
SK 0: Num_Recv 220, InterArrival 9.154068
UWSink (id:0): I get the packet data no.98 from 4
SK 0: Num_Recv 221, InterArrival 0.347449
UWSink (id:0): I get the packet data no.98 from 5
SK 0: Num_Recv 222, InterArrival 0.498934
UWSink (id:0): I get the packet data no.99 from 1
SK 0: Num_Recv 223, InterArrival 8.003194
UWSink (id:0): I get the packet data no.99 from 5
SK 0: Num_Recv 224, InterArrival 1.147554
UWSink (id:0): I get the packet data no.99 from 4
SK 0: Num_Recv 225, InterArrival 0.350301
UWSink (id:0): I get the packet data no.99 from 5
SK 0: Num_Recv 226, InterArrival 0.499405
SINK 1 : terminates (send 100 recv 0, cum_delay 0.000000)
SINK 2 : terminates (send 100 recv 0, cum_delay 0.000000)
SINK 3 : terminates (send 100 recv 0, cum_delay 0.000000)
SINK 4 : terminates (send 100 recv 0, cum_delay 0.000000)
SINK 5 : terminates (send 100 recv 0, cum_delay 0.000000)
SINK 6 : terminates (send 100 recv 0, cum_delay 0.000000)
SINK 7 : terminates (send 100 recv 0, cum_delay 0.000000)
SINK 8 : terminates (send 100 recv 0, cum_delay 0.000000)
SINK 9 : terminates (send 100 recv 0, cum_delay 0.000000)
SINK 0 : terminates (send 0, recv 226, cum_delay 35.420985)
SINK(0) : send_id = 2, num_recv = 100
SINK(0) : send_id = 5, num_recv = 100
SINK(0) : send_id = 4, num_recv = 25
SINK(0) : send_id = 1, num_recv = 1
god: the energy consumed is 185.701600
NS EXISTING...

```

Figura 12-3: Parámetros arrojados por el Simulador.
 Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

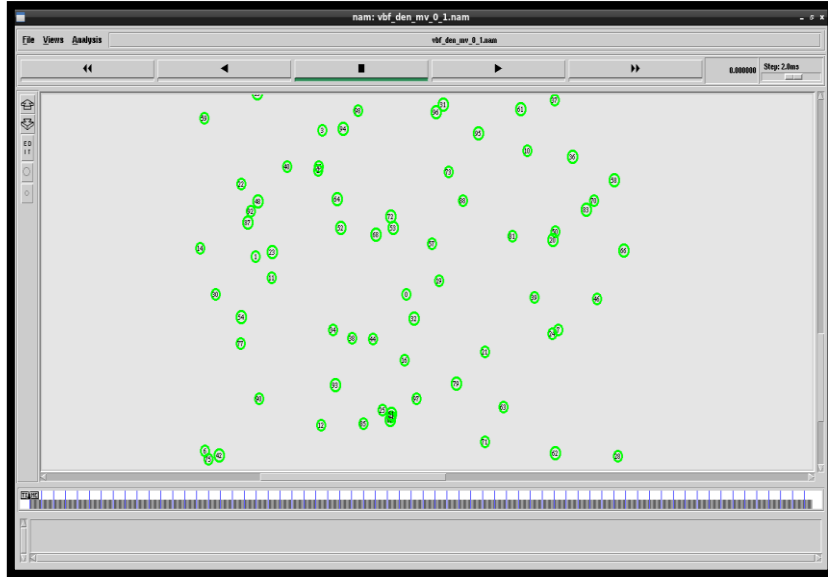


Figura 14-3: NAM - Distribución de nodos visualizados en 2D.

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En la Figura 15-3 se observa la distribución en 3D de los nodos que interactúan en la comunicación, mientras que, en la Figura 16-3 y Figura 17-3 se observa el enlace entre nodos para la transmisión de un paquete en la herramienta Aqua3D.

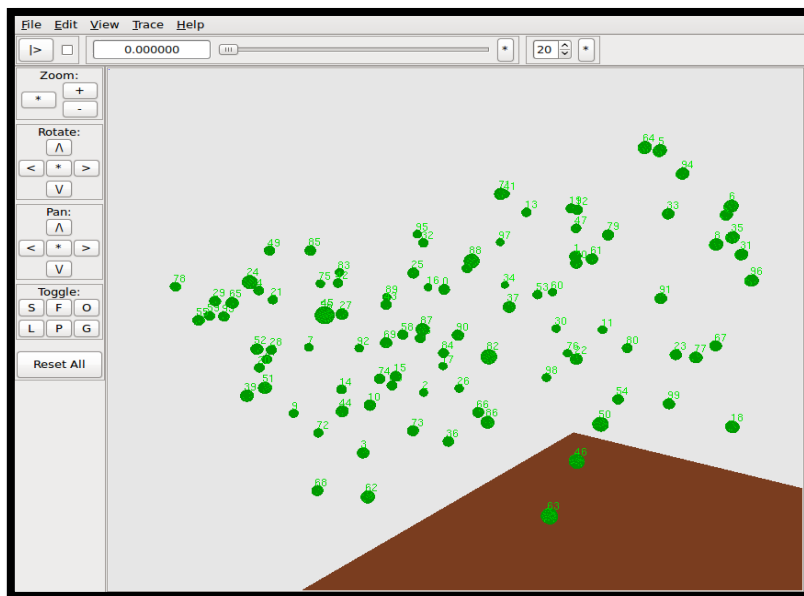


Figura 15-3: Aqua3D - Distribución de nodos visualizados en 3D.

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

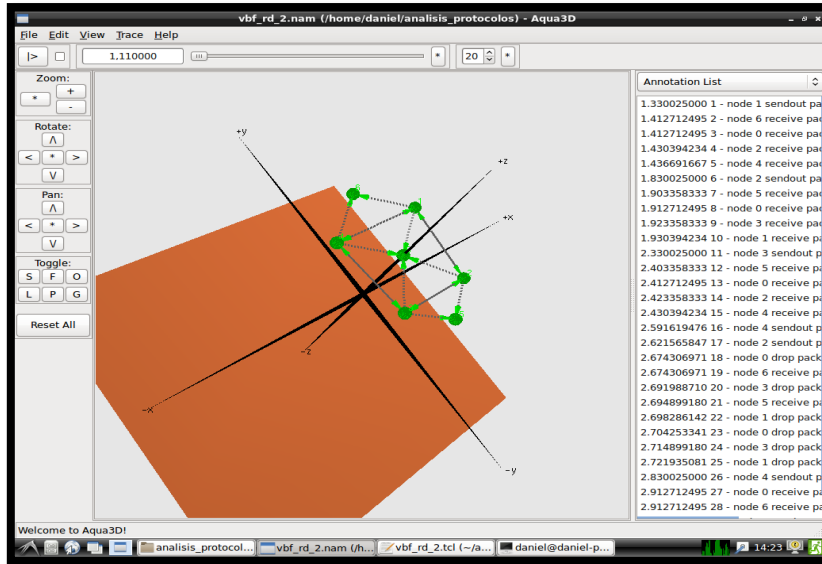


Figura 16-3: Animaciones en Aqua3D.
 Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

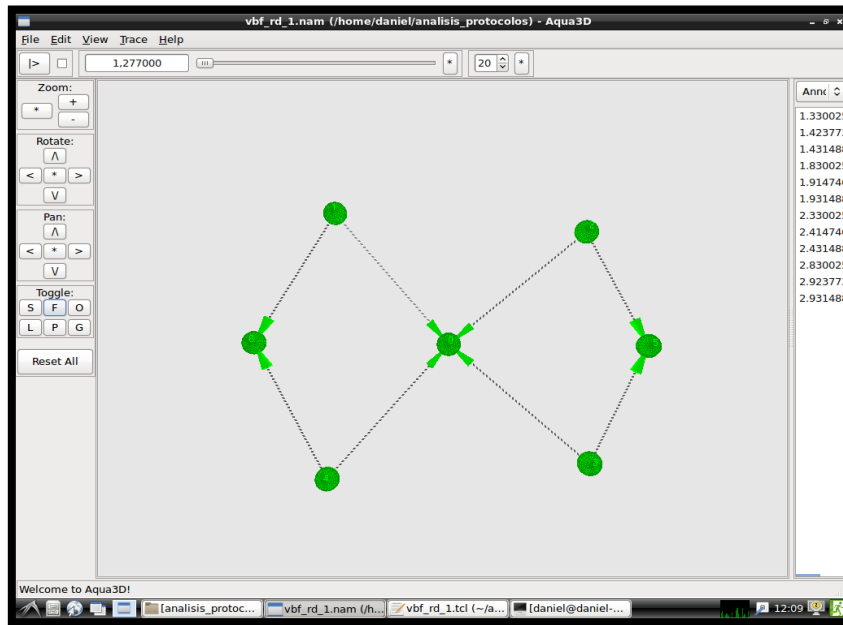


Figura 17-3: Aqua3D –Interconexión de Nodos
 Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En el análisis de los protocolos de enrutamiento para redes de sensores inalámbricos submarinos se busca identificar al protocolo que tenga el mejor rendimiento en transferencia de datos frente a un bajo consumo de energía. Para cumplir con este objetivo se utilizó la herramienta de simulación Aqua-Sim por medio de la cual se obtuvieron los parámetros de rendimiento (retardo, consumo de energía, throughput) de cada uno de los protocolos, mismos que han permitido determinar el protocolo que brinda las mejores prestaciones para el escenario propuesto.

El escenario planteado, descrito en la sección 3.7, fue configurado con los protocolos: Reenvío Basado en Vectores (VBF), Reenvío Basado en Vectores Salto a Salto (HH-VBF), Protocolo de Enrutamiento de Haz Enfocado (FBR) y Enrutamiento Sectorial con Predicción de Localización de Destino (SBR-DLP). De las simulaciones realizadas se han extraído veinte (20) muestras de cada escenario y posteriormente, estos datos fueron ponderados, analizados y comparados entre sí obteniendo los resultados que a continuación se describen.

3.6 Análisis de Resultados

Los parámetros de rendimiento extraídos del simulador son:

- *End and End Delay (Retardo Punto a Punto)*: Representa el tiempo promedio que le toma a un paquete de datos atravesar desde la fuente hasta el dispositivo SINK.
- *Energy consumption (Energía Consumida)*: Considera el consumo total energía, que incluye la transmisión, recepción y el consumo idle (en modo espera) de todos los nodos de la red, su valor viene dado en W/s.
- *Throughput*: Equivale al número total de bits recibidos por el SINK divididos para el tiempo total de la simulación.

Los resultados obtenidos fueron sometidos a una prueba de normalidad para posteriormente ser analizados mediante las herramientas estadísticas, Anova y Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey para identificar la presencia de diferencias entre las muestras y los resultados de estas pruebas se presentan en las siguientes tablas y gráficos con su correspondiente análisis.

3.6.1 *Análisis de los Parámetros de Rendimiento.*

3.6.1.1 *Análisis de los Promedios End and End Delay*

En la Tabla 1-4, se presentan los diferentes promedios del End and End Delay (Retardo Punto a Punto) obtenidos para las redes densas y dispersas.

Tabla 1-4: Promedios del End and End Delay

Promedios del End and End Delay (ms)				
	<i>Redes Densas</i>		<i>Redes Dispersas</i>	
	V= 0.1 m/s	V = 1.2 m/s	V= 0.1 m/s	V= 1.2 m/s
VBF	154,48	149,67	90,98	81,98
HH-VBF	221,94	208,26	147,31	51,23
SBR-DLP	720,78	561,73	130,02	137,91
FBR	169,94	84,385	4,60	1,49

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En el Gráfico 1-4, se puede apreciar que al aumentar la velocidad de los nodos dentro de una red densa, el retardo disminuye.

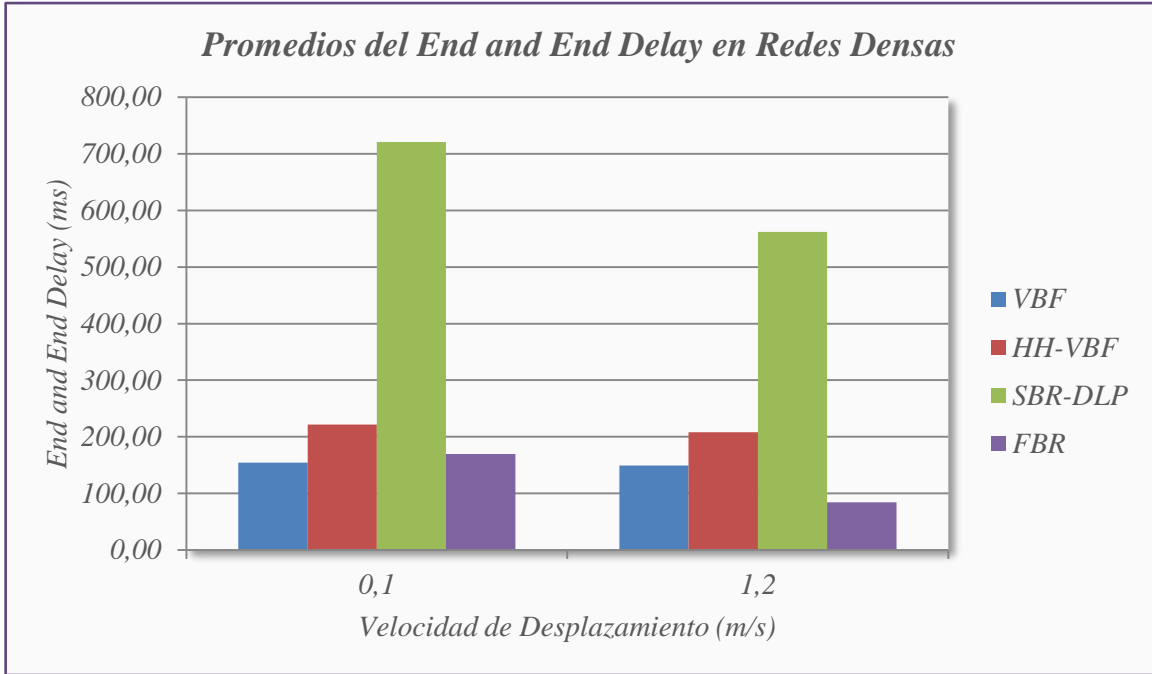


Gráfico 1-4: Promedios del End and End Delay en Redes Densas.

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En el Gráfico 2-4, se puede apreciar que al aumentar la velocidad de los nodos dentro de una red dispersa, el retardo disminuye con los protocolos VBF, HH-VBF y FBR mientras que aumenta con SBR-DLP.

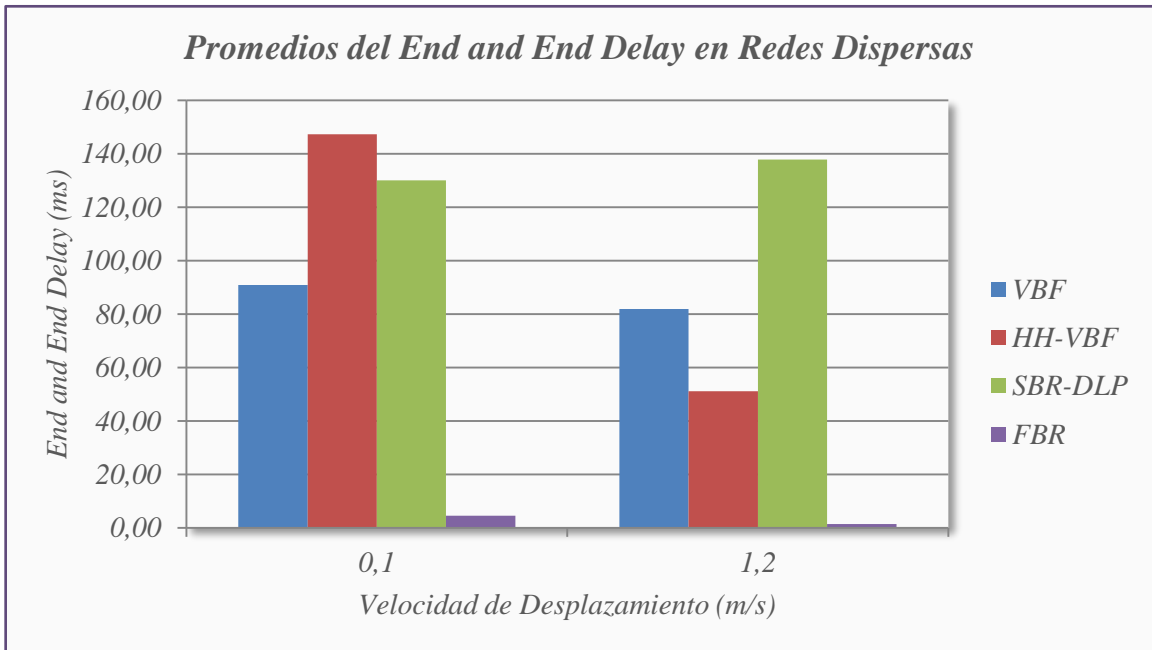


Gráfico 2-4: Promedios del End and End Delay en Redes Dispersas.

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

3.6.1.2 Análisis de los Promedios del Energy Consumption.

En la Tabla 2-4, se presenta los diferentes promedios del Energy Consumption (Energía Consumida) obtenido del escenario planteado.

Tabla 2-4: Promedios del Energy Consumption.

Promedios del Energy Consumption (W/s)				
	<i>Redes Densas</i>		<i>Redes Dispersas</i>	
	V= 0.1 m/s	V = 1.2 m/s	V= 0.1 m/s	V= 1.2 m/s
VBF	1,15402	1,15701	0,12683	0,12414
HH-VBF	2,70903	2,77263	0,31228	0,24371
SBR-DLP	6,69430	6,73551	0,58253	0,54605
FBR	1,21551	1,20729	0,12148	0,12156

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En el Gráfico 3-4, se puede observar que dentro de las redes densas cuando se aumenta la velocidad de los nodos, el consumo energético tiende a aumentar ligeramente.

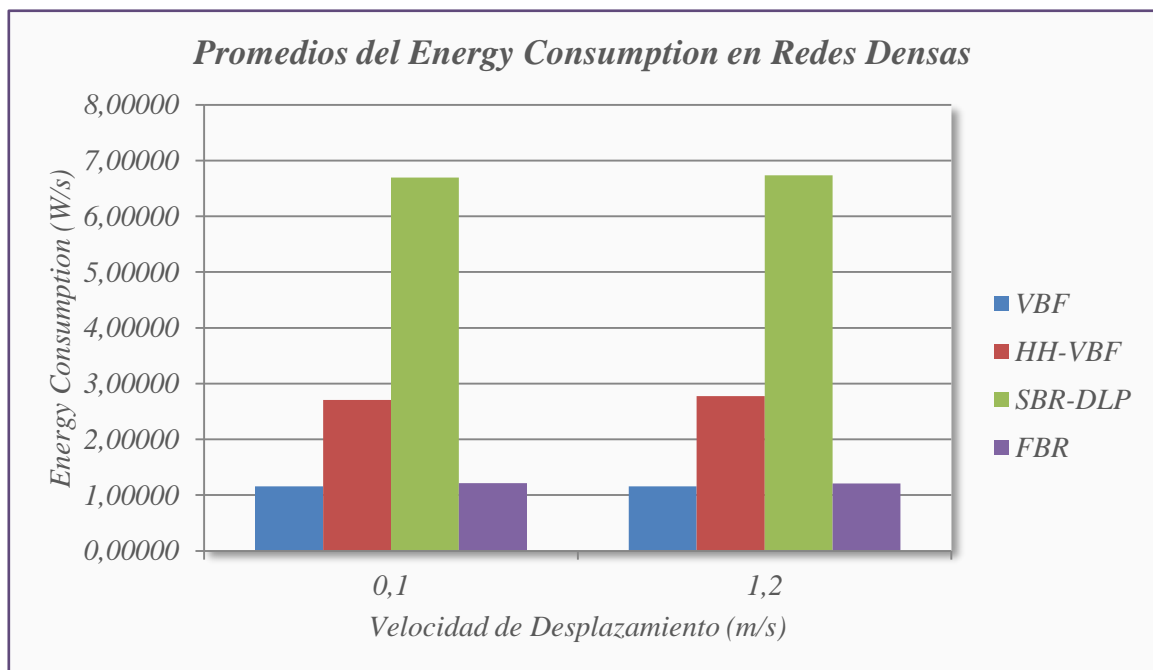


Gráfico 3-4: Promedios del Energy Consumption dentro de las Redes Densas.

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En el Gráfico 4-4, se puede observar que dentro de las redes dispersas cuando se aumenta la velocidad de los nodos, el consumo energético no se ve significativamente afectado con los protocolos VBF y FBR mientras que tiende a disminuir con los protocolos HH-VBF y SBR-DLP.

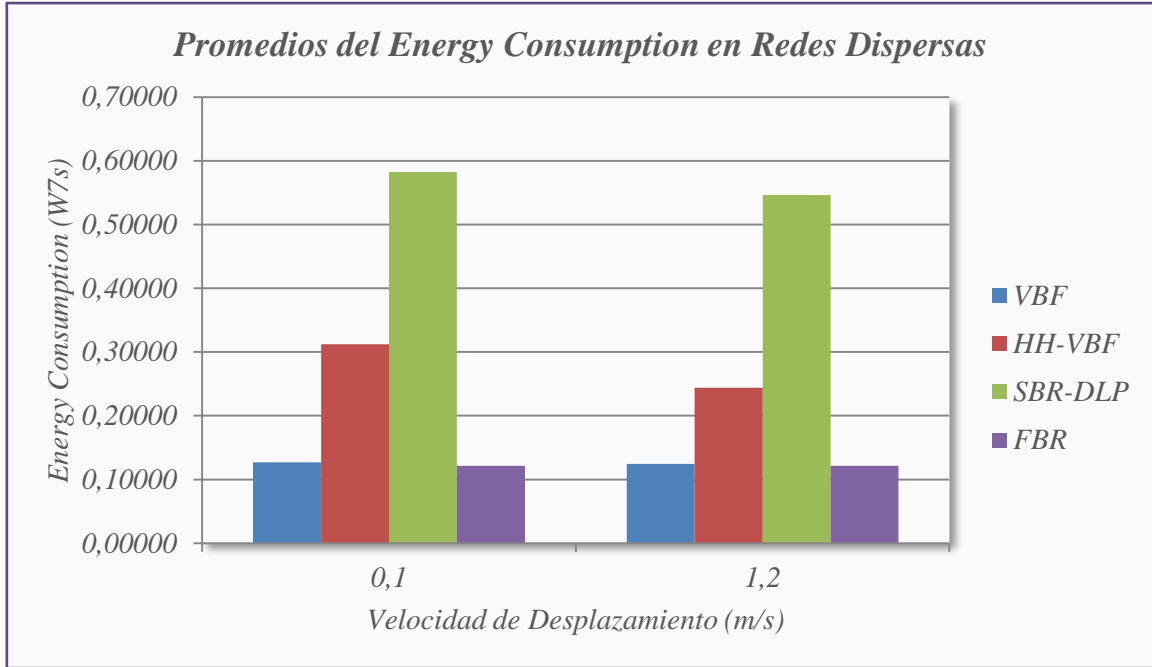


Gráfico 4-4: Promedios del Energy Consumption dentro de las Redes Dispersas
 Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

3.6.1.3 *Análisis de los Promedios del Throughput.*

En la Tabla 3-4, se presenta los diferentes promedios del Throughput que se obtuvieron en el escenario planteado.

Tabla 3-4: Promedios del Throughput.

Promedios del Throughput (bps)				
	Redes Densas		Redes Dispersas	
	V= 0.1 m/s	V = 1.2 m/s	V= 0.1 m/s	V= 1.2 m/s
VBF	38,02	38,60	28,82	24,52
HH-VBF	38,28	38,48	22,58	12,04
SBR-DLP	14,90	13,76	13,26	8,16
FBR	36,32	37,80	34,80	15,32

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En el Gráfico 5-4, se puede observar que dentro de las redes densas cuando se aumenta la velocidad de los nodos, el Throughput tiende aumentar pero mínimamente.

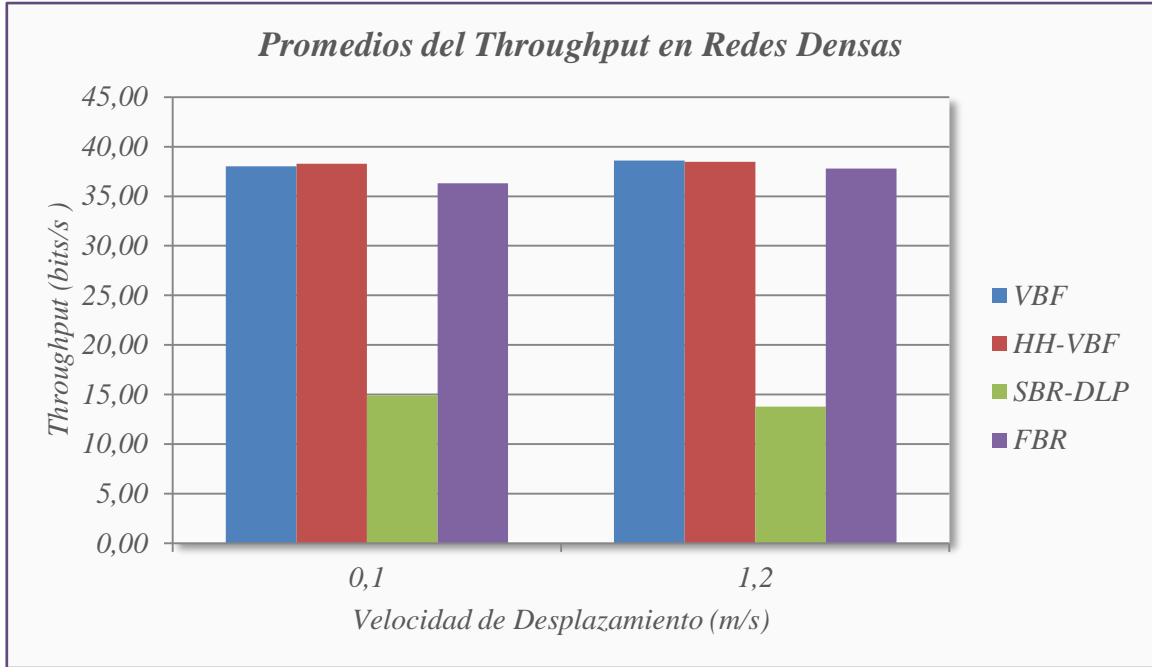


Gráfico 5-4: Promedios del Throughput dentro de las Redes Densas.

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En el Gráfico 6-4, se puede observar que dentro de las redes dispersas cuando se aumenta la velocidad de los nodos, el Throughput disminuye con los protocolos VBF, HH-VBF y FBR mientras que con SBR-DLP tiende a aumentar ligeramente.

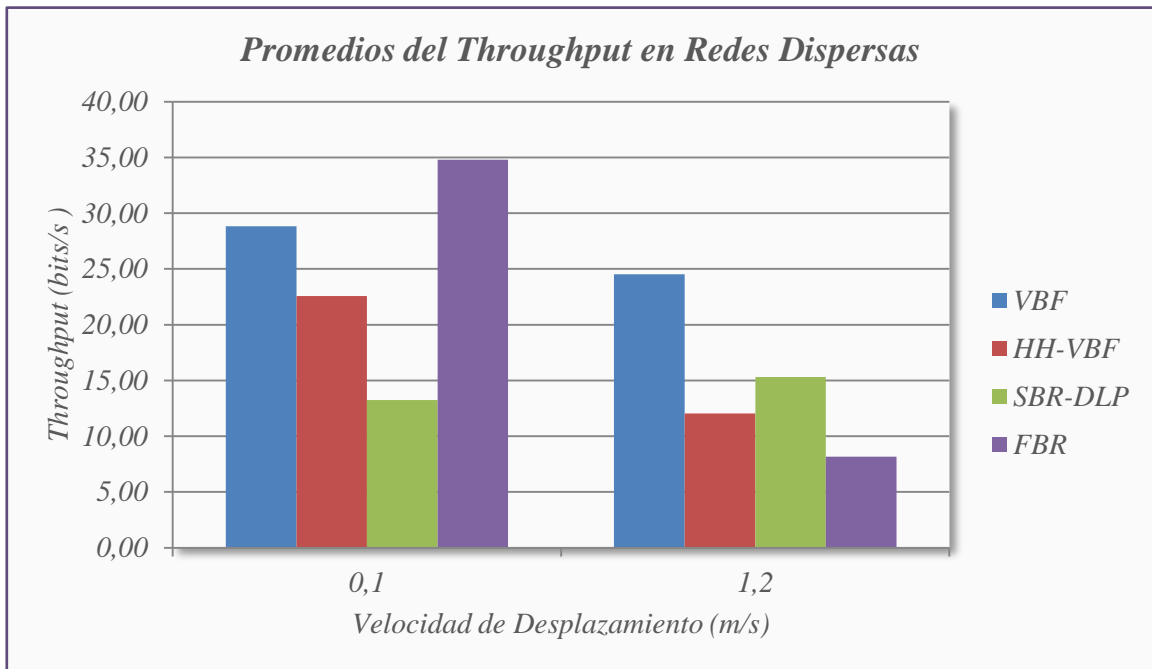


Gráfico 6-4: Promedios del Throughput dentro de las Redes Dispersas.

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

3.7 Comprobación de la Hipótesis

Para comprobar la hipótesis se utilizaron los resultados obtenidos en las simulaciones configuradas con los cuatro protocolos de enrutamiento para redes de sensores submarinos (UWSN).

La información fue procesada, ponderada y tabulada, para aceptar o rechazar la hipótesis planteada, en el presente trabajo de investigación se ha utilizado la prueba de varianza Anova de un solo factor, misma que permite la comparación de las medias extraídas de varias poblaciones con distribución normal, es decir, permite definir la presencia de divergencias entre las muestras. Para comprobar que las muestras arrojadas por el simulador tienen una distribución normal se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk.

Cuando se determina la existencia de desigualdades en las muestras normales extraídas, se debe detectar qué muestras difieren, para esto se ha empleado la prueba estadística complementaria post hoc de HSD de Tukey.

3.7.1 Comprobación de Hipótesis para las Redes Densas Móviles.

3.7.1.1 Prueba Shapiro-Wilk para la Normalidad.

En la Tabla 4-4, se presenta el resultado de la prueba Shapiro-Wilk utilizada para verificar la normalidad en las muestras de las redes densas móviles, se puede observar que para todos los protocolos, el nivel crítico (Sig.) es superior a cero coma cero cinco (0,05), por lo que, se determina que todos los datos presentados tienen una distribución normal.

Tabla 4-4: Prueba Shapiro-Wilk de las muestras de las RDeM.

Prueba Shapiro-Wilk de las muestras de las Redes Densas Móviles						
End and End Relay con v=0,1 m/s				End and End Relay con v=1,2 m/s		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
VBF	0.973	20	0.813	0.947	20	0.330
HH-VBF	0.965	20	0.644	0.930	20	0.155
SBR-DLP	0.933	20	0.177	0.924	20	0.117
FBR	0.941	20	0.250	0.948	20	0.345
Energy Consumption con v=0,1 m/s				Energy Consumption con v=1,2 m/s		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
VBF	0.962	20	0.593	0.924	20	0.118
HH-VBF	0.962	20	0.593	0.924	20	0.118
SBR-DLP	0.924	20	0.118	0.962	20	0.587
FBR	0.927	20	0.136	0.980	20	0.935
Throughput v=0,1 m/s				Throughput v=1,2 m/s		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.

VBF	0.934	20	0.181		0.945	20	0.301
HH-VBF	0.933	20	0.180		0.945	20	0.297
SBR-DLP	0.939	20	0.230		0.948	20	0.331
FBR	0.931	20	0.165		0.941	20	0.253

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

3.7.1.2 *Prueba de Anova de un Factor y Prueba Post Hoc de Comparaciones Múltiples HSD de Tukey para las Muestras RDeM con $v=0,1m/s$.*

End and End Delay: En la Tabla 5-4, se presenta el cuadro de resultados de Anova de un Factor con un nivel de confianza del 95%, donde el valor estadístico $F=73.86$ tiene un nivel de significación $Sig=0.000$. Al ser la significación menor de 0,05 se puede afirmar que las dos variables están relacionadas y por tanto las diferencias de media entre los grupos de protocolos son significativas. Aunque aparentemente podamos pensar que las diferencias no son exageradas, la decisión de si las diferencias son significativas no depende de nuestro criterio, sino de la significación de F. este es el objetivo de aplicar Anova de un Factor: Valorar estadísticamente si las diferencias de medias son significativas o no.

Tabla 5-4: Prueba de Anova del End and End Delay en RDeM con $v=0,1 m/s$

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Inter Grupos	4402348.713	3	1467449.571	73.869	0.000
Intra grupos	1509778.765	76	19865.510		
Total	5912127.478	79			

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En la Tabla 6-4, se muestra el resumen de la prueba de Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey para el retardo en redes densas móviles con velocidad de 0,1 m/s, donde aparecen todas las posibles combinaciones entre los protocolos, las diferencias entre los retardos medios de cada dos grupos, el error típico de esas diferencias y el nivel crítico Sig asociado a cada diferencia. Lo valores de Sig menores al nivel de significación establecido por defecto (0,05) definen los grupos cuyas medias difieren significativamente, por lo tanto se puede concluir que: Estadísticamente, los protocolos VBF, FBR y HH-VBF tienen medias similares pero éstos son totalmente diferentes a las medias del protocolo SBR-DLP. Se escoge VBF.

Tabla 6-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey del End and End Delay en RDeM con $v=0,1$ m/s.

PROTOCOLO (i)	PROTOCOLO (j)	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite Inferior	Límite superior
VBF	HH-VBF	-67.46	44.57	0.435	-184.54	49.62
	SBR-DLP	-566.30	44.57	0.000	-683.38	-449.22
	FBR	-15.46	44.57	0.986	-132.53	101.62
HH-VBF	VBF	67.46	44.57	0.435	-49.62	184.54
	SBR-DLP	-498.84	44.57	0.000	-615.92	-381.76
	FBR	52.00	44.57	0.650	-65.07	169.08
SBR-DLP	VBF	566.30	44.57	0.000	449.22	683.38
	HH-VBF	498.84	44.57	0.000	381.76	615.92
	FBR	550.85	44.57	0.000	433.77	667.92
FBR	VBF	15.46	44.57	0.986	-101.62	132.53
	HH-VBF	-52.00	44.57	0.650	-169.08	65.07
	SBR-DLP	-550.85	44.57	0.000	-667.92	-433.77

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Energy Consumption: En la Tabla 7-4, se resume la prueba de Anova de un Factor con un nivel de confianza del 95%, donde el valor estadístico $F=3980.46$ tiene un nivel de significación $Sig=0.000$. Al ser la significación menor de 0,05 se puede afirmar que la variación de las medias del consumo de energía entre los grupos de protocolos es significativa.

Tabla 7-4: Prueba de Anova de un factor para Energy Consumption en RDeM con $v=0,1$ m/s.

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Inter Grupos	331215174.653	3	110405058.218	3980.469	0.000
Intra grupos	2107989.010	76	27736.698		
Total	333323163.664	79			

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En la Tabla 8-4, se presenta el resumen de la prueba de Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey para el Consumo de energía en redes densas móviles con velocidad de 0,1 m/s, de todas las posibles combinaciones los niveles críticos asociados Sig menor a 0,05 definen los grupos cuyas medias difieren significativamente, por lo tanto se puede concluir que: estadísticamente el consumo de energía difiere en todos los protocolos ubicando al protocolo VBF como el de menor consumo energético, seguido de FBR y por ultimo HH-VBF y SBR-DLP.

Tabla 8-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Energy Consumption en RDeM con $v=0,1$ m/s.

PROTOCOLO (i)	PROTOCOLO (j)	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite Inferior	Límite superior
VBF	HH-VBF	0.00	52.67	0.000	-138.34	138.34
	SBR-DLP	-3,985.27	52.67	0.000	-4,123.61	-3,846.93
	FBR	1,493.51	52.67	0.000	1,355.17	1,631.86
HH-VBF	VBF	0.00	52.67	0.000	-138.34	138.34
	SBR-DLP	-3,985.27	52.67	0.000	-4,123.61	-3,846.93
	FBR	1,493.51	52.67	0.000	1,355.17	1,631.86
SBR-DLP	VBF	3,985.27	52.67	0.000	3,846.93	4,123.61
	HH-VBF	3,985.27	52.67	0.000	3,846.93	4,123.61
	FBR	5,478.79	52.67	0.000	5,340.44	5,617.13
FBR	VBF	-1,493.51	52.67	0.000	-1,631.86	-1,355.17
	HH-VBF	-1,493.51	52.67	0.000	-1,631.86	-1,355.17
	SBR-DLP	-5,478.79	52.67	0.000	-5,617.13	-5,340.44

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Throughput: En la Tabla 9-4, se resume la prueba de Anova de un Factor con un nivel de confianza del 95%, donde el valor estadístico $F=817.39$ tiene un nivel de significación $Sig=0.000$. Al ser la significación menor de 0,05 se puede afirmar que las medias del throughput tienen una variación significativa entre los grupos de protocolos.

Tabla 9-4: Prueba de Anova de un factor para Throughput en RDeM con $v=0,1$ m/s

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Inter Grupos	7733.872	3	2577.957	817.39	0.000
Intra grupos	239.696	76	3.154		
Total	7973.568	79			

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En la Tabla 10-4, se presenta el resumen de la prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey para la variable Throughput en redes densas móviles con velocidad de 0,1 m/s, los valores de Sig mayores a 0,05 permiten determinar que los protocolos VBF y HH-VBF tienen medias estadísticamente similares y de acuerdo a los datos obtenidos del simulador, se escoge a VBF como el protocolo que entrega mayor throughput (38,02bps) seguido de los protocolos HH-VBF, FBR y SBR-DLP presentados descendientemente.

Tabla 10-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Throughput en RDeM con $v=0,1$ m/s

PROTOCOLO (i)	PROTOCOLO (j)	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite Inferior	Límite superior
VBF	HH-VBF	-0.26	0.56	0.967	-1.74	1.22
	SBR-DLP	23.12	0.56	0.000	21.64	24.60
	FBR	1.70	0.56	0.017	0.22	3.18
HH-VBF	VBF	0.26	0.56	0.967	-1.22	1.74
	SBR-DLP	23.38	0.56	0.000	21.90	24.86
	FBR	1.96	0.56	0.004	0.48	3.44
SBR-DLP	VBF	-23.12	0.56	0.000	-24.60	-21.64
	HH-VBF	-23.38	0.56	0.000	-24.86	-21.90
	FBR	-21.42	0.56	0.000	-22.90	-19.94
FBR	VBF	-1.70	0.56	0.017	-3.18	-0.22
	HH-VBF	-1.96	0.56	0.004	-3.44	-0.48
	SBR-DLP	21.42	0.56	0.000	19.94	22.90

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

3.7.1.3 Prueba de Anova de un Factor y Prueba Post Hoc de Comparaciones Múltiples HSD de Tukey para las Muestras RDeM con $v=1,2$ m/s.

End and End Delay: En la Tabla 11-4, se resume la prueba de Anova de un Factor con un nivel de confianza del 95%, donde el valor estadístico $F=101.09$ tiene un nivel de significación $Sig=0.000$. Al ser la significación menor de 0,05 se puede afirmar que las diferencias de medias de la variable retardo entre los grupos de protocolos son significativas.

Tabla 11-4: Prueba de Anova de un factor para End and End Delay en RDeM con $v=1,2$ m/s

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Inter Grupos	2728150.608	3	909383.536	101.09	0.000
Intra grupos	683652.352	76	8995.426		
Total	3411802.960	79			

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En la Tabla 12-4, se presente el resumen de la prueba de Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey para la variable retardo en redes densas móviles con velocidad de 1,2 m/s. Los valores de Sig menores al nivel de significación 0,05 definen los grupos cuyas medias difieren significativamente, por lo tanto se puede concluir que: Los protocolos VBF, HH-VBF y FBR

poseen retardos similares totalmente diferentes al protocolo SBR-DLP. Se escoge VBF con menor retardo.

Tabla 12-4: Post hoc de comparaciones múltiples para End and End Delay en RDeM con $v=1,2$ m/s

PROTOCOLO (i)	PROTOCOLO (j)	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite Inferior	Límite superior
VBF	HH-VBF	-58.59	29.99	0.215	-137.37	20.20
	SBR-DLP	-412.06	29.99	0.000	-490.84	-333.27
	FBR	65.29	29.99	0.139	-13.50	144.07
HH-VBF	VBF	58.59	29.99	0.215	-20.20	137.37
	SBR-DLP	-353.47	29.99	0.000	-432.26	-274.69
	FBR	123.87	29.99	0.001	45.09	202.66
SBR-DLP	VBF	412.06	29.99	0.000	333.27	490.84
	HH-VBF	353.47	29.99	0.000	274.69	432.26
	FBR	477.34	29.99	0.000	398.56	556.13
FBR	VBF	-65.29	29.99	0.139	-144.07	13.50
	HH-VBF	-123.87	29.99	0.001	-202.66	-45.09
	SBR-DLP	-477.34	29.99	0.000	-556.13	-398.56

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Energy Consumption: En la Tabla 13-4, se resume la prueba de Anova de un Factor para la variable consumo de energía con un nivel de confianza del 95%, donde el valor estadístico $F=3681.00$ tiene un nivel de significación $Sig=0.000$. Al ser la significación menor de 0,05 se puede afirmar que las diferencias de medias del consumo de energía entre los grupos de protocolos son significativas.

Tabla 13-4: Prueba de Anova de un factor para Energy Consumption en RDeM con $v=1,2$ m/s

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Inter Grupos	334353919.536	3	111451306.512	3681.000	0.000
Intra grupos	2301086.354	76	30277.452		
Total	336655005.890	79			

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En la Tabla 14-4, se presenta el resumen de la prueba de Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey para el consumo de energía en redes densas móviles con velocidad de 1,2 m/s, Los valores de Sig menores al nivel de significación 0,05 definen los grupos cuyas medias difieren significativamente, por lo tanto se puede concluir que: Estadísticamente el consumo de energía

difiere en todos los protocolos ubicando al protocolo VBF como el de menor consumo energético (1,15W/s), seguido de FBR y por ultimo HH-VBF y SBR-DLP.

Tabla 14-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Energy Consumption en RDeM con $v=1,2$ m/s

PROTOCOLO (i)	PROTOCOLO (j)	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite Inferior	Límite superior
VBF	HH-VBF	0.00	55.02	0.000	-144.54	144.54
	SBR-DLP	-3,962.88	55.02	0.000	-4,107.42	-3,818.34
	FBR	1,565.34	55.02	0.000	1,420.80	1,709.88
HH-VBF	VBF	0.00	55.02	0.000	-144.54	144.54
	SBR-DLP	-3,962.88	55.02	0.000	-4,107.42	-3,818.34
	FBR	1,565.34	55.02	0.000	1,420.80	1,709.88
SBR-DLP	VBF	3,962.88	55.02	0.000	3,818.34	4,107.42
	HH-VBF	3,962.88	55.02	0.000	3,818.34	4,107.42
	FBR	5,528.23	55.02	0.000	5,383.69	5,672.77
FBR	VBF	-1,565.34	55.02	0.000	-1,709.88	-1,420.80
	HH-VBF	-1,565.34	55.02	0.000	-1,709.88	-1,420.80
	SBR-DLP	-5,528.23	55.02	0.000	-5,672.77	-5,383.69

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Throughput: En la Tabla 15-4, se resume la prueba de Anova de un Factor con un nivel de confianza del 95%, donde el valor estadístico $F=1766.24$ tiene un nivel de significación $Sig=0.000$. Al ser la significación menor de 0,05 se puede afirmar que las medias del throughput tienen una variación significativa entre los grupos de protocolos.

Tabla 15-4: Prueba de Anova de un factor para Throughput en RDeM con $v=1,2$ m/s

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Inter Grupos	9035.712	3	3011.904	1766.240	0.000
Intra grupos	129.600	76	1.705		
Total	9165.312	79			

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En la Tabla 16-4, se presenta el resumen de la prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey para la variable Throughput en redes densas móviles con velocidad de 1,2 m/s. Los valores de Sig mayores a 0,05 permiten determinar que todos los protocolos tienen medias estadísticamente similares y de acuerdo a los datos obtenidos del simulador, se escoge a VBF como el protocolo que

entrega mayor throughput (38,60 bps) seguido de los protocolos HH-VBF, FBR y SBR-DLP presentados descendientemente.

Tabla 16-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Throughput en RDeM con $v=1,2$ m/s

PROTOCOLO (i)	PROTOCOLO (j)	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite Inferior	Límite superior
VBF	HH-VBF	24.84	0.41	0.000	23.76	25.92
	SBR-DLP	0.80	0.41	0.221	-0.28	1.88
	FBR	-0.12	0.41	0.991	-1.20	0.96
HH-VBF	VBF	24.72	0.41	0.000	23.64	25.80
	SBR-DLP	0.68	0.41	0.359	-0.40	1.76
	FBR	-24.84	0.41	0.000	-25.92	-23.76
SBR-DLP	VBF	-24.72	0.41	0.000	-25.80	-23.64
	HH-VBF	-24.04	0.41	0.000	-25.12	-22.96
	FBR	-0.80	0.41	0.221	-1.88	0.28
FBR	VBF	-0.68	0.41	0.359	-1.76	0.40
	HH-VBF	24.04	0.41	0.000	22.96	25.12
	SBR-DLP	24.84	0.41	0.000	23.76	25.92

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

3.7.2 Comprobación de Hipótesis para las Redes Dispersas Móviles.

3.7.2.1 Prueba Shapiro-Wilk para la Normalidad.

En la Tabla 17-4, se presenta el resultado de la prueba Shapiro-Wilk que se utilizó para verificar la normalidad en las muestras de las redes dispersas móviles, la cual indica que en todos los casos el nivel crítico (Sig.) es superior a cero coma cero cinco (0,05), lo que significa que todos los datos obtenidos del simulador tienen una distribución normal.

Tabla 17-4: Prueba Shapiro-Wilk de las muestras de las RDiM.

Prueba Shapiro-Wilk para las muestras de las Redes Dispersas Móviles						
End and End Relay con $v=0,1$ m/s				End and End Relay con $v=1,2$ m/s		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
VBF	0.909	20	0.061	0.932	20	0.168
HH-VBF	0.956	20	0.466	0.917	20	0.086
SBR-DLP	0.952	20	0.404	0.953	20	0.413
FBR	0.923	20	0.111	0.917	20	0.089
Energy Consumption con $v=0,1$ m/s				Energy Consumption con $v=1,2$ m/s		

	Estadístico	gl	Sig.		Estadístico	gl	Sig.
VBF	0.965	20	0.640		0.924	20	0.120
HH-VBF	0.965	20	0.640		0.924	20	0.120
SBR-DLP	0.962	20	0.588		0.969	20	0.736
FBR	0.918	20	0.091		0.943	20	0.273
Throughput v=0,1 m/s					Throughput v=1,2 m/s		
	Estadístico	gl	Sig.		Estadístico	gl	Sig.
VBF	0.933	20	0.173		0.953	20	0.417
HH-VBF	0.945	20	0.295		0.950	20	0.362
SBR-DLP	0.971	20	0.773		0.951	20	0.384
FBR	0.963	20	0.609		0.972	20	0.792

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

3.7.2.2 Prueba de Anova de un factor y Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey para las muestras RDIM con $v=0,1$ m/s.

End and End Delay: En la Tabla 18-4, se resume la prueba de Anova de un Factor con un nivel de confianza del 95%, donde el valor estadístico $F=68.67$ tiene un nivel de significación $Sig=0.000$. Al ser la significación menor de 0,05 se puede afirmar que las medias del retardo tienen una variación significativa entre los grupos de protocolos.

Tabla 18-4: Prueba de Anova de un factor para End and End Delay en RDIM con $v=0,1$ m/s

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Inter Grupos	242780.394	3	80926.798	68.670	0.000
Intra grupos	89565.768	76	1178.497		
Total	332346.162	79			

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En la Tabla 19-4, se presenta el resumen de la prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey para la variable retardo en redes dispersas móviles con velocidad de 0,1 m/s. Los valores de Sig menores al nivel de significación 0,05 definen los grupos cuyas medias difieren significativamente, por lo tanto se puede concluir que: estadísticamente los protocolos SBR-DLP y HH-VBF son similares pero difieren de VBF y FBR, analizados los datos extraídos del simulador se determina que el protocolo FBR posee el menor retardo (4,60ms).

Tabla 19-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para End and End Delay en RDIM con $v=0,1$ m/s

PROTOCOLO (i)	PROTOCOLO (j)	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite Inferior	Límite superior
VBF	HH-VBF	-56.33	10.86	0.000	-84.84	-27.81
	SBR-DLP	-39.04	10.86	0.003	-67.56	-10.53
	FBR	86.38	10.86	0.000	57.87	114.90
HH-VBF	VBF	56.33	10.86	0.000	27.81	84.84
	SBR-DLP	17.29	10.86	0.389	-11.23	45.80
	FBR	142.71	10.86	0.000	114.20	171.23
SBR-DLP	VBF	39.04	10.86	0.003	10.53	67.56
	HH-VBF	-17.29	10.86	0.389	-45.80	11.23
	FBR	125.43	10.86	0.000	96.91	153.94
FBR	VBF	-86.38	10.86	0.000	-114.90	-57.87
	HH-VBF	-142.71	10.86	0.000	-171.23	-114.20
	SBR-DLP	-125.43	10.86	0.000	-153.94	-96.91

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Energy Consumption: En la Tabla 20-4, se resume la prueba de Anova de un Factor para la variable consumo de energía con un nivel de confianza del 95%, donde el valor estadístico $F=157.43$ tiene un nivel de significación $Sig=0.000$. Al ser la significación menor de 0,05 se puede afirmar que las diferencias de medias del consumo de energía entre los grupos de protocolos son significativas.

Tabla 20-4: Prueba de Anova de un factor para Energy Consumption en RDIM con $v=0,1$ m/s

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Inter Grupos	2157242.376	3	719080.792	157.437	0.000
Intra grupos	347124.218	76	4567.424		
Total	2504366.594	79			

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En la Tabla 21-4, se presenta el resumen de la prueba de Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey para la variable consumo de energía en redes dispersas móviles con velocidad de 0,1 m/s. Los valores de Sig menores al nivel de significación 0,05 definen los grupos cuyas medias difieren

significativamente, por lo tanto se puede concluir que: Estadísticamente el consumo de energía difiere en todos los protocolos ubicando al protocolo FBR como el de menor consumo energético (0,121W/s), seguido de VBF y por ultimo HH-VBF y SBR-DLP.

Tabla 21-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Energy Consumption en RDiM con $v=0,1$ m/s

PROTOCOLO (i)	PROTOCOLO (j)	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite Inferior	Límite superior
VBF	HH-VBF	0.00	21.37	0.000	-56.14	56.14
	SBR-DLP	-270.25	21.37	0.000	-326.38	-214.11
	FBR	190.81	21.37	0.000	134.67	246.95
HH-VBF	VBF	0.00	21.37	0.000	-56.14	56.14
	SBR-DLP	-270.25	21.37	0.000	-326.38	-214.11
	FBR	190.81	21.37	0.000	134.67	246.95
SBR-DLP	VBF	270.25	21.37	0.000	214.11	326.38
	HH-VBF	270.25	21.37	0.000	214.11	326.38
	FBR	461.05	21.37	0.000	404.91	517.19
FBR	VBF	-190.81	21.37	0.000	-246.95	-134.67
	HH-VBF	-190.81	21.37	0.000	-246.95	-134.67
	SBR-DLP	-461.05	21.37	0.000	-517.19	-404.91

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Throughput: En la Tabla 22-4, se resume la prueba de Anova de un Factor con un nivel de confianza del 95%, donde el valor estadístico $F=89.85$ tiene un nivel de significación $Sig=0.000$. Al ser la significación menor de 0,05 se puede afirmar que las medias del throughput tienen una variación significativa entre los grupos de protocolos.

Tabla 22-4: Prueba de Anova de un factor para Throughput en RDiM con $v=0,1$ m/s

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Inter Grupos	5084.870	3	1694.957	89.851	0.000
Intra grupos	1433.672	76	18.864		
Total	6518.542	79			

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En la Tabla 23-4, se presente el resumen de la prueba de Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey del Throughput en redes dispersas móviles con velocidad de 0,1 m/s. Los valores de Sig

menores a 0,05 permiten determinar que, estadísticamente todos los protocolos tienen medias totalmente diferentes y de acuerdo a los datos obtenidos del simulador, se escoge a FBR como el protocolo que entrega mayor throughput (34,80 bps) seguido de los protocolos VBF, HH-VBF y SBR-DLP presentados descendientemente.

Tabla 23-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Throughput en RDiM con $v=0,1$ m/s

PROTOCOLO (i)	PROTOCOLO (j)	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite Inferior	Límite superior
VBF	HH-VBF	6.24	1.37	0.000	2.63	9.85
	SBR-DLP	15.56	1.37	0.000	11.95	19.17
	FBR	-5.98	1.37	0.000	-9.59	-2.37
HH-VBF	VBF	-6.24	1.37	0.000	-9.85	-2.63
	SBR-DLP	9.32	1.37	0.000	5.71	12.93
	FBR	-12.22	1.37	0.000	-15.83	-8.61
SBR-DLP	VBF	-15.56	1.37	0.000	-19.17	-11.95
	HH-VBF	-9.32	1.37	0.000	-12.93	-5.71
	FBR	-21.54	1.37	0.000	-25.15	-17.93
FBR	VBF	5.98	1.37	0.000	2.37	9.59
	HH-VBF	12.22	1.37	0.000	8.61	15.83
	SBR-DLP	21.54	1.37	0.000	17.93	25.15

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

3.7.2.3 Prueba de Anova de un Factor y Prueba Post Hoc de Comparaciones Múltiples HSD de Tukey para las Muestras RDiM con $v=1,2$ m/s.

End and End Delay: En la Tabla 24-4, se resume la prueba de Anova de un Factor con un nivel de confianza del 95%, donde el valor estadístico $F=75.28$ tiene un nivel de significación $Sig=0.000$. Al ser la significación menor de 0,05 se puede afirmar que las medias del retardo tienen una variación significativa entre los grupos de protocolos.

Tabla 24-4: Prueba de Anova de un factor para End and End Delay en RDiM con $v=1,2$ m/s

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Inter Grupos	195773.224	3	65257.741	75.284	0.000
Intra grupos	65878.117	76	866.817		
Total	261651.341	79			

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En la Tabla 25-4, se resume la prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey para el retardo en redes dispersas móviles con velocidad de 1,2 m/s. Los valores de Sig menores al nivel de significación 0,05 permiten concluir que: estadísticamente todos los valores de retardo son significativamente diferentes y luego de analizados los datos extraídos del simulador se determina que el protocolo FBR posee el menor retardo (1,49ms).

Tabla 25-4: Prueba Post hoc HSD para End and End Delay en RDIM con v=1,2 m/s

PROTOCOLO (i)	PROTOCOLO (j)	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite Inferior	Límite superior
VBF	HH-VBF	30.76	9.31	0.008	6.30	55.22
	SBR-DLP	-55.93	9.31	0.000	-80.39	-31.47
	FBR	80.50	9.31	0.000	56.04	104.95
HH-VBF	VBF	-30.76	9.31	0.008	-55.22	-6.30
	SBR-DLP	-86.69	9.31	0.000	-111.14	-62.23
	FBR	49.74	9.31	0.000	25.28	74.19
SBR-DLP	VBF	55.93	9.31	0.000	31.47	80.39
	HH-VBF	86.69	9.31	0.000	62.23	111.14
	FBR	136.43	9.31	0.000	111.97	160.88
FBR	VBF	-80.50	9.31	0.000	-104.95	-56.04
	HH-VBF	-49.74	9.31	0.000	-74.19	-25.28
	SBR-DLP	-136.43	9.31	0.000	-160.88	-111.97

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Energy Consumption: En la Tabla 26-4, se resume la prueba de Anova de un Factor para la variable consumo de energía con un nivel de confianza del 95%, donde el valor estadístico F=129.29 tiene un nivel de significación Sig=0.000. Al ser la significación menor de 0,05 se puede afirmar que las diferencias de medias del consumo de energía entre los grupos de protocolos son significativas.

Tabla 26-4: Prueba de Anova de un factor para Energy Consumption en RDIM con v=1,2 m/s

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Inter Grupos	1964299.798	3	654766.599	129.290	0.000
Intra grupos	384889.579	76	5064.337		
Total	2349189.377	79			

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En la Tabla 27-4, se presenta el resumen de la prueba de Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey para el consumo de energía en redes dispersas móviles con velocidad de 1,2 m/s. Los valores de Sig menores al nivel de significación 0,05 definen los grupos cuyas medias difieren significativamente, por lo tanto se puede concluir que: estadísticamente el consumo de energía difiere en todos los protocolos ubicando al protocolo FBR como el de menor consumo energético (0,121W/s), seguido de VBF y por ultimo HH-VBF y SBR-DLP.

Tabla 27-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Energy Consumption en RDIM con v=1,2 m/s

PROTOCOLO (i)	PROTOCOLO (j)	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite Inferior	Límite superior
VBF	HH-VBF	0.00	22.50	0.000	-59.11	59.11
	SBR-DLP	-302.35	22.50	0.000	-361.46	-243.23
	FBR	122.14	22.50	0.000	63.03	181.26
HH-VBF	VBF	0.00	22.50	0.000	-59.11	59.11
	SBR-DLP	-302.35	22.50	0.000	-361.46	-243.23
	FBR	122.14	22.50	0.000	63.03	181.26
SBR-DLP	VBF	302.35	22.50	0.000	243.23	361.46
	HH-VBF	302.35	22.50	0.000	243.23	361.46
	FBR	424.49	22.50	0.000	365.38	483.61
FBR	VBF	-122.14	22.50	0.000	-181.26	-63.03
	HH-VBF	-122.14	22.50	0.000	-181.26	-63.03
	SBR-DLP	-424.49	22.50	0.000	-483.61	-365.38

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Throughput: En la Tabla 28-4, se resume la prueba de Anova de un Factor con un nivel de confianza del 95%, donde el valor estadístico F=35.03 tiene un nivel de significación Sig=0.000. Al ser la significación menor de 0,05 se puede afirmar que las medias del throughput tienen una variación significativa entre los grupos de protocolos.

Tabla 28-4: Prueba de Anova de un factor para Throughput en RDIM con v=1,2 m/s

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Inter Grupos	2925.592	3	975.197	35.031	0.000
Intra grupos	2115.680	76	27.838		
Total	5041.272	79			

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

En la Tabla 29-4, se presenta el resumen de la prueba de Post hoc de comparaciones múltiples HSD de Tukey para la variable Throughput en redes dispersas móviles con velocidad de 1,2 m/s. Los valores de Sig mayores a 0,05 determinan que estadísticamente los protocolos FBR y VBF son similares y de acuerdo a los datos obtenidos del simulador, se escoge a FBR como el protocolo que entrega mayor throughput (15,32 bps) seguido de los protocolos VBF, HH-VBF y SBR-DLP presentados descendientemente.

Tabla 29-4: Prueba Post hoc de comparaciones múltiples HSD para Throughput en RDiM con $v=1,2$ m/s

PROTOCOLO (i)	PROTOCOLO (j)	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite Inferior	Límite superior
VBF	HH-VBF	-67.12	3.10	0.000	-75.26	-58.98
	SBR-DLP	13.16	3.10	0.000	5.02	21.30
	FBR	5.60	3.10	0.278	-2.54	13.74
HH-VBF	VBF	-67.12	3.10	0.000	-75.26	-58.98
	SBR-DLP	7.56	3.10	0.078	-0.58	15.70
	FBR	-72.72	3.10	0.000	-80.86	-64.58
SBR-DLP	VBF	-13.16	3.10	0.000	-21.30	-5.02
	HH-VBF	-7.56	3.10	0.078	-15.70	0.58
	FBR	-80.28	3.10	0.000	-88.42	-72.14
FBR	VBF	5.60	3.10	0.278	-2.54	13.74
	HH-VBF	72.72	3.10	0.000	64.58	80.86
	SBR-DLP	80.28	3.10	0.000	72.14	88.42

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

Con los resultados estadísticos obtenidos, se construye la Tabla 30-4 en la que, dentro de cada parámetro de rendimiento analizado se ubica al protocolo que presenta los mejores resultados en cada uno de los escenarios planteados, con lo que se puede comprobar que la evaluación de los mecanismos de localización de nodos para redes UWSN a través de la herramienta de simulación Aqua-Sim ha permitido determinar el protocolo que combina valores óptimos de rendimiento y consumo de energía reducido, por lo que, la hipótesis planteada ha sido verificada y aceptada.

Tabla 30-4: Resumen de la asignación de la posición de los protocolos.

Redes Densas Móviles		Parametro de Rendimiento	Redes Dispersas Móviles	
V= 0,1 m/s	V= 1,2 m/s		V= 0,1 m/s	V= 1,2 m/s
VBF	VBF	End and End Delay	FBR	FBR
VBF	VBF	Energy Consumption	FBR	FBR
VBF	VBF	Throughput	FBR	FBR

Elaborado por: Gisela E. Cujilema D. 2019

CONCLUSIONES

- El estudio de los protocolos de enrutamiento geográfico: VBF, HH-VBF, FBR y SBR-DLP, mediante simulaciones computacionales permitió determinar el rendimiento y consumo de energía de cada uno de ellos.
- De las herramientas de simulación existentes para UWSN: Shawn, UWSim, VisualSense y AquaSim, Aqua Sim es un simulador altamente confiable y flexible, es decir es el apropiado para la comparación de los protocolos propuestos.
- Para arquitecturas de red UWSN densas, con nodos moviéndose a velocidades de 0.1m/s (época seca del año), el protocolo que presenta mejor rendimiento es VBF, ya que posee un retardo moderado (154,48 ms), throughput significativo (38.02 bits/s) mientras consume menos energía (1,15402 W/s) que el resto de protocolos analizados.
- Para arquitecturas de red UWSN densas con nodos moviéndose a velocidades de 1.2 m/s (época húmeda del año), el protocolo que presenta mejor rendimiento es VBF con valores de retardo (149,67 ms), throughput (38.60 bits/s) y consumo de energía (1,15701 W/s).
- Para arquitecturas de red UWSN dispersas, con nodos moviéndose a velocidades de 0.1m/s (época seca del año), el protocolo que presenta mejor rendimiento es FBR, con valores de retardo (4,60 ms), throughput (34.80 bits/s) y consumo de energía (0,12148 W/s).
- Para arquitecturas de red UWSN dispersas con nodos moviéndose a velocidades de 1.2 m/s (época húmeda del año), el protocolo que presenta mejor rendimiento es FBR con valores de retardo (1,49 ms), throughput (15.32 bits/s) y consumo de (0,12156 W/s).
- Al incrementar la densidad de los nodos mejora el promedio de entrega de paquetes, esto se da porque al existir más nodos existe más posibilidades de que éstos se encuentren dentro de la tubería virtual elegible, en otras palabras más nodos son calificados para enviar paquetes.
- La transmisión inalámbrica de información a través del agua, el envío y recepción de mensajes por medio de un canal acústico, es decir, las UWSN se han convertido en una poderosa herramienta tecnológica para el desarrollo de importantes sistemas de observación oceanográfica a gran escala.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda configurar la red propuesta con múltiples nodos sink para descongestionar el tráfico de paquetes y lograr un mejor rendimiento de red.
- Se recomienda realizar la simulación utilizando velocidades de corrientes marinas presentes en épocas de tsunami para aplicaciones de prevención de desastres naturales.
- Para determinar el número de nodos que participará en un área determinada se recomienda tomar en cuenta el radio de cobertura de los módems acústicos a utilizar ya que si éstos se encuentran demasiado dispersos es posible que muy pocos se encuentren dentro de la tubería virtual elegible para el reenvío de datos, lo que puede conducir a la desconexión de la red y la degradación en la entrega de datos.
- Utilizando el mismo escenario pero otra herramienta de simulación, se puede corroborar los valores obtenidos en esta investigación ya que no existen estudios con los que puedan ser comparados.
- Las Redes de Sensores Inalámbricos Submarinos UWSN utilizan diferentes medios de propagación: radioeléctrico, óptico y acústico. Las ondas acústicas a diferencia de las demás sufren absorción relativamente baja y pueden viabilizar la comunicación a largas distancias, sin embargo se puede realizar un estudio para aplicaciones de corto alcance utilizando otro medio de transmisión como RF u óptico.
- Para redes UWSN transmitiendo por ondas acústicas donde el canal de comunicación es abierto y de fácil acceso, se recomienda abordar temas de estudio que permitan enfrentar los problemas de seguridad y eficiencia energética en la transmisión de datos.
- Instituciones como el INOCAR podrían extender el alcance de sus proyectos utilizando la investigación y tecnología existente para redes UWSN con el fin de monitorear en tiempo real y constantemente grandes ambientes marinos, conservar nuestro ecosistema, mejorar la productividad además de certificar la calidad del agua que se distribuye para el consumo de la población.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Nodos: En informática y en telecomunicaciones se lo define como un punto de intersección o conexión de varios elementos, normalmente son máquinas que proveen servicios dentro de una red.

UWSN: Son las siglas para las redes de sensores inalámbricas submarinas, por su siglas en ingles. Este tipo de red se las utiliza en aplicaciones marinas posee elementos que son sumergidos en las aguas oceánicas para capturar diferentes parámetros ambientales.

Sensores: Son dispositivos físicos encargados de recolectar o detectar magnitudes física o químicas ambientales tanto de manera analógica o digital para posteriormente ser procesados y presentados al usuario.

Ancho de banda: Cantidad de bits que viajan por un medio físico (cable coaxial, par trenzado, fibra óptica, etc.) o por un medio inalámbrico (onda electromagnéticas). Con una banda ancha grande, más rápido será la obtención de la información.

WSN: Son las siglas para las redes informáticas que poseen sensores y se conectan inalámbricamente, estas redes se caracteriza por no utilizar cable para conectar los diferentes elementos de la red en su lugar utilizan conexiones inalámbricas para transmitir la información entre los diferentes elementos que constituyen la red. Posee sensores autónomos distribuidos dentro de un espacio físico con la finalidad de monitorizar condiciones físicas o ambientales.

Ondas acústicas: Son ondas de sonido generadas por un dispositivo diapasón. Las partículas de aire aproximadas al diapasón vibran y a su vez estas hacen que las partículas cercanas vibren produciendo la propagación del sonido a lo cual se define con el nombre de onda acústica.

Radio frecuencia: Es la porción menos energética del espectro electromagnético, ubicado entre los 3 Hz hasta los 300 GHz, dentro de esta porción se ubican la mayor parte de las frecuencias utilizadas para las comunicaciones de hoy en día.

Ondas electromagnéticas: Son aquellas ondas que no necesitan de medios físicos para propagarse. Se generan por la oscilación de los campos magnéticos y campos eléctricos transportando de esta manera se transmite energía produciendo la transmisión de información.

Latencia: Es la cantidad de tiempo que emplea un paquete determinado en atravesar una red.

Topología: Es el mapeo de la distribución y ubicación de los elementos de una red tanto de manera física como lógica, es decir, es la manera en que está diseñada una red.

Gateway: Es la Puerta de enlace entre los dispersivos de una red con los dispositivos o servicios de otra. Se lo utiliza dentro de las redes informáticas para compartir recursos con la finalidad de que todos los equipos puedan acceder a la información.

AUVs: Son dispositivos sensores móviles llamados vehículos que poseen autonomía para viajar bajo el agua, son controlados de manera inalámbrica.

SINK: Es el nombre del nodo central que se le da dentro de las redes de sensores inalámbricos submarinas, posee los elementos necesarios para comunicarse con los nodos de la red UWSN y para comunicarse con la central de monitoreo.

VBF: Protocolo de enrutamiento basado en vectores diseñado para las redes de sensores inalámbricas submarinas.

HH-VBF: Protocolo diseñado para las redes de sensores inalámbricas submarinas se basa en el reenvío basado en vectores salto a salto, es una mejora del protocolo VBF.

SBR-DLP: Protocolo diseñado para las redes de sensores inalámbricas submarinas se basa en un enrutamiento sectorial con predicción de localización de destino.

FBR: Protocolo diseñado para las redes de sensores inalámbricas submarinas se basa en un enrutamiento de haz enfocado.

NS-2: Simulador de redes versión dos, es un simulador de redes de eventos discretos puede ser configurado para trabajar con extensiones orientadas a objetos del TCL (Tool Command Language) y el lenguaje de programación C++. Hoy en día muchos usuarios corren el NS-2 dentro de máquinas Linux. Está diseñado para trabajar tanto con redes alámbricas como redes inalámbricas.

Aqua-Sim: Es un simulador que puede fácilmente simular la atenuación de las señales acústicas y la colisión de los paquetes dentro de las redes de sensores subacuáticas. Puede soportar códigos realizados en NS-2. Soporta los paquetes de simulación inalámbricas CMU.

SHAWN: Es un simulador para redes de sensores personalizable de código abierto, diseñado para soportar redes a gran escala. Puede ser escrito en Java. Este consiste de características de perseverancia y desacople de las instancias de la simulación. Estas características hacen que sea más fácil la implementación.

UWSim: Es un simulador diseñado para redes de sensores subacuáticos (UWSN). Actualmente se enfoca en simulaciones de grandes extensiones de sensores y redes adhoc pero no consideran ningún factor que afecte a la comunicación subacuática.

Visual Sense: Simulador diseñado para representar requerimientos específicos de las redes inalámbricas así como examinar los canales de comunicación. Mantiene una base de componentes estructurados como modelos. Ofrece un exacto y extensible modelo de radio comunicación.

INOCAR: Es el instituto oceanográfico de la armada del ecuador, proporciona seguridad en la navegación marítima, efectúa investigación oceanográfica, compila la cartografía náutica nacional, emite la hora oficial del ecuador y además representa al estado ante los organismos internacionales que tienen relación con la actividad hidro-oceanográfica y con la Antártida.

End and End Delay (Retardo Punto a Punto): Representa el tiempo promedio que le toma a un paquete de datos atravesar desde el nodo fuente hasta el nodo SINK.

Energy consumption (Energía Consumida): Considera el consumo total energía, que incluye la transmisión, recepción y el consumo idle (en modo espera) de todos los nodos de la red.

Throughput: Equivale al número total de bits recibidos por el SINK divididos para el tiempo total de la simulación.

BIBLIOGRAFÍA

- Chicaiza, D. (2009). *Estudio de las redes de sensores bajo el agua y sus principales aplicaciones*.
Obtenido de Estudio de las redes de sensores bajo el agua y sus principales aplicaciones:
<https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/662>
- Chirdchoo, N., Soh, W., & Chua, K. (2012). Sector-based Routing with Destination Location Prediction for Underwater Mobile Networks. *Sector-based Routing with Destination Location Prediction for Underwater Mobile Networks. 2009 International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, 1148-1153. doi: 10.1109/WAINA.2009.105 .
- Conservación Internacional*. (2014). Obtenido de Islas Galápagos: <http://conservation.org.ec/islas-galapagos/>
- Dhurandher, S. M. (2012). *An acoustic communication based AQUA-GLOMO simulator for underwater networks*. Obtenido de An acoustic communication based AQUA-GLOMO simulator for underwater networks: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186%2F2192-1962-2-3.pdf>
- Gkikopouli, G. N. (Julio de 2012). *A Survey on Underwater Wireless Sensor Networks and Application*. Obtenido de A Survey on Underwater Wireless Sensor Networks and Application: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6265793/>
- Heidemann, J., Stojanovic, M., & Zorzi, M. (2012). *Underwater sensor networks: applications, advances and challenges*. Obtenido de Underwater sensor networks: applications, advances and challenges.
- INOCAR. (2013). *Proyecto ROGER*. Obtenido de <http://alerta-temprana.wixsite.com/roger/porductos>
- Instituto Oceanográfico de la Armada INOCAR*. (2011). Obtenido de Capítulo VI. Islas Galápagos: [1.] Instituto Oceanográfico de la Armada INOCAR. (2011). https://www.inocar.mil.ec/docs/derrotero/derrotero_cap_VI.pdf

- IRS Lab. (2012). Obtenido de UWSim The UnderWater Simulator:
<http://www.irs.uji.es/uwsim/gallery>
- Jalaja, M., & Lillykutty, j. (2014). On-Demand Data Collection in sparse Underwater Acoustic Sensor Network Using Mbile Elements. *The Tenth International Conference on Wireless and Mobile Communications*, 105-111.
- Jornet, J., Stojanovic, M., & Zorzi, M. (2008). Focused Beam Routing Protocol for Underwater Acoustic Networks. *WuWNET 08 Proceedings of the third ACM international workshop on Underwater Networks*, 75-82 doi: 10.1145/1410107.1410121.
- Kroller, A., Pfisterer, D., Buschmann, C., Fekete, S., & Fischer, S. (2007). Shawn: A new approach to simulation wireless sensor networks. *2007 Fourth International Conference on Networked Sensing Systems*, 1-10. doi: 10.1109/INSS.2007.4297441.
- Lucero, M., & Mindiola, M. (2000). Distribución de la Corrientes alrededor de las Islas Galápagos. *INOCAR*, 21-27.
- Naranjo, C., & Tapia, M. (2015). PLANCTON EN EL CANAL BOLÍVAR DE LA ISLA ISABELA (CALETA TAGUS), ISLAS GALÁPAGOS DURANTE MARZO DE 2009. *Acta Oceanográfica del Pacífico*. 20(1), 71-87.
- Nicolaou, N., See, A., Peng, X., Cui, J., & Maggiorini, D. (2007). Improving the Robustness of Location-Based Routing for Underwater Sensor Networks. *OCEANS 2007 - Europe*, 1-6. doi: 10.1109/OCEANSE.2007.4302470.
- Ptolemy Proyect*. (2017). Obtenido de Visual editor and simulator for wireless sensor network systems: <https://ptolemy.eecs.berkeley.edu/visualsense/>
- UWSN, U. (2014). *Aqua-Sim*. Obtenido de <http://obinet.engr.uconn.edu/wiki/index.php?title=Aqua-Sim&redirect=no>
- Xie, P., Cui, J., & Lao, L. (2006). *VBF: Vector-Based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks*. Connecticut, Estado Unidos: Universidad de Connecticut, Computer Science Department. .
- Xie, P., Zhou, Z., Peng, Z., Yan, H., & Hu, T. (2013). Aqua-Sim: An NS-2 Based Simulator for Underwater Sensor Networks. *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges*, 1-7. doi: 10.23919/OCEANS.2009.5422081.