

SELECCIÓN DE PROTOCOLO DE ENRUTAMIENTO EN UNA RED AD HOC DE ENLACES DE DATOS TÁCTICOS EN ESCENARIOS MARÍTIMOS



Ing. Arturo Arenas Castro

Trabajo de grado
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Director:
Ing. Guefry Leider Agredo Méndez, PhD

Codirector:
Ing. Camilo Ernesto Segovia Forero. MSc.

Universidad del Cauca
En convenio con
Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla" - Cartagena
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Señales y Sistemas de Comunicaciones
Cartagena, noviembre de 2020

SELECCIÓN DE PROTOCOLO DE ENRUTAMIENTO EN UNA RED AD HOC DE ENLACES DE DATOS TÁCTICOS EN ESCENARIOS MARÍTIMOS

Ing. Arturo Arenas Castro

Trabajo de grado para la obtención del título de

Magister en:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Director:
Ing. Guefry Leider Agredo Méndez, PhD

Codirector:
Ing. Camilo Ernesto Segovia Forero. MSc.

Universidad del Cauca
En convenio con
Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla” - Cartagena
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Señales y Sistemas de Comunicaciones
Cartagena, noviembre 2020

Hoja de Aprobación

Dedicatoria

Dedico este trabajo a las personas que han creído en mí, a José Arturo y Ana Idaly mis padres, a Milena mi esposa, Sathya mi hija, Jennie y François mis hermanos.

Agradecimientos

Terminar este trabajo de grado fue un esfuerzo que solo no hubiese podido realizar, en especial sin el apoyo paciencia y tolerancia de las personas que a través del tiempo intervinieron y me animaron para que esto fuese realidad.

Primero agradezco a Dios y la Virgen, gracias y mil gracias por permitirme terminar este trabajo.

Agradezco a mi esposa Milena Trillos y a mi hija Sathya por su comprensión y paciencia en especial por el tiempo que me cedieron para realizar este trabajo, a mi madre Ana Idaly y a mi padre José Arturo por sus oraciones y aliento permanente.

Agradecer a la Universidad del Cauca y a la Escuela Naval por darme la oportunidad de estudiar esta maestría.

Quiero agradecer a mi director de tesis Dr. Guefry Agredo Méndez, por haberme guiado de forma correcta ilustrándome los procedimientos, ayudándome a resolver las dificultades y sobre todo por no desfallecer y alentarme constantemente.

A mi codirector Camilo Ernesto Segovia Forero, mi confidente académico que con sus consejos y tertulias de nunca acabar le dimos forma a este trabajo en sus inicios, igualmente su acompañamiento en todo el proceso y es especial su aliento para que lo terminara.

Al Ingeniero Alejandro Toledo Tovar, Coordinador del Programa de Maestría en Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, su paciencia, tolerancia, comprensión y disposición, fueron el combustible constante para que este proyecto no muriese.

Un especial agradecimiento al Ingeniero y amigo Juan Manuel Bayona Guerrero el cual dedico parte de su valioso tiempo en la estructuración y redacción del artículo relacionado con el trabajo, aparte de sus sugerencias bien acertadas fue fundamental en ayudarme con el estilo en idioma inglés con el que fue escrito.

A mis amigos y cómplices en este trabajo: Francisco Javier Guevara, Ferney Martínez, Lalo Garcés y Doubert Sánchez, su disposición para colaborar en cada uno de los problemas que surgían siendo parte de la solución, permitieron que este trabajo llegase por fin a su culminación.

Finalmente, a todos los que de una u otra forma me ayudaron en la culminación de este trabajo que no alcanzo a nombrar, ellos lo saben, Dios los bendiga.

Cartagena, octubre de 2020

Resumen

El sistema de Enlaces Tácticos de Datos (TDL, *Tactical Data Link*) es una Red Móvil Ad Hoc (MANET, *Mobile Ad Hoc Network*) utilizada en diversos entornos operativos marítimos como desastres naturales, vigilancia, búsqueda y rescate en el mar, entre otros. Por lo general, una red TDL se compone de nodos o unidades que representan buques de superficie, submarinos y aeronaves capaces de participar en operaciones marítimas. Los protocolos de enrutamiento son necesarios para establecer la comunicación entre los nodos, para garantizar el establecimiento de la ruta desde el nodo de origen al nodo de destino. Se ha desarrollado en el país el Enlace de Datos Tácticos Colombiano (CTDL, *Colombian Tactical Data Link*); no obstante, en este no se ha implementado eficientemente. así las cosas, el objetivo de este trabajo es realizar un estudio preliminar para establecer un protocolo apropiado al CTDL.

Las restricciones de entorno local, además del análisis de rendimiento de los protocolos elegidos, proporcionan los antecedentes para la elección de protocolos de enrutamiento en redes Ad Hoc. Se realizó una descripción del entorno operativo marítimo del caribe colombiano, un análisis comparativo de los protocolos de enrutamiento, una simulación de tres protocolos Ad Hoc: AODV, DSR y DSDV, un estudio de referentes con su posterior análisis de cara a los resultados obtenidos y se establecieron unas conclusiones y desarrollos futuros con respecto a CTDL.

El desarrollo del presente trabajo da a entender que finalmente una vez analizado el estado del arte y la teoría, verificado los referentes y su posterior comparación, y habiendo ejecutado las respectivas simulaciones de los protocolos, el candidato a ser implementado en un CTDL es el protocolo reactivo DSR .

Abstract

Tactical Data Link (TDL) systems are a kind of Mobile Ad Hoc NETWORK (MANET) used in diverse maritime operational environments such as natural disasters, surveillance, maritime search, and rescue. A TDL network is usually composed of nodes or units representing surface ships, submarines, and aircrafts able to participate in maritime operations. A routing protocol is required to establish communication between nodes, which guarantees the route from the source node to the destination node. A TDL has been developed in the Colombian (CTDL). However, no efficient routing protocol has been implemented. This work aims to perform a preliminary study to implement an appropriate routing protocol for the CTDL.

Locale constraints and performance analysis of the chosen protocols provide the background for choosing routing protocols in Ad Hoc networks. A description of the maritime operating environment of the Colombian Caribbean was carried out.

A comparative analysis of routing protocols was held, a simulation of three Ad Hoc protocols, AODV, DSR, and DSDV, a reference study with its subsequent analysis for the results obtained and conclusions future developments were written concerning CTDL.

Throughout this work, it is finally implied that once the state of the art, theory, referents, and subsequent comparison have been analyzed, and having executed the respective simulations of the protocols, the candidate being implemented in a CTDL is the DSR reactive protocol.

Página en blanco

Lista de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Formulación del Problema	1
1.1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.1.2. Justificación	4
1.1.3. Marco teórico	4
1.2. Estado del Arte	8
1.2.1. Tactical Data Link Systems and the Australian Defense Force.....	8
1.2.2. Network Centric Operations: Background and oversight issues for congress	9
1.2.3. Desarrollo de un enlace de datos táctico, Fase 1: Prototipo	10
1.2.4. A review of current routing protocols for Ad Hoc mobile wireless networks	11
1.2.5. Performance evaluation and comparison of different Ad Hoc routing protocols	12
1.2.6. A survey of evaluation platforms for Ad Hoc routing protocols.....	12
1.3. Aportes Investigativos	14
1.4. Objetivos.....	14
1.4.1. General.....	14
1.4.2. Específicos	14
1.5. Propuesta	15
1.6. Organización del Trabajo de Grado	15
2. Caracterización del Ambiente y Determinación del Escenario.....	17
2.1. Caracterización del Ambiente Operacional.	17
2.1.1. Funciones y gestión:	20
2.1.2. Sistema:.....	20
2.1.3. Capacidades de integración del sistema	21
2.1.4. Capacidades para el manejo del ciclo de vida del sistema.....	22
2.2. Necesidad del Usuario.....	23
2.3. Determinación del escenario Marítimo.....	24
2.4. Características técnicas del escenario marítimo.	25
3. Estudio de Protocolos de Enrutamiento.	28
3.1. Generalidades de una red Ad Hoc	28
3.2. Clasificación de los protocolos de enrutamiento.....	36
3.2.1. Protocolos proactivos	37
3.2.2. Protocolos reactivos	42
3.2.3. Protocolos híbridos	49
3.3. Consideraciones y comparación de protocolos	52
4. Análisis de Referentes y Simulación de protocolos seleccionados.	58

4.1	Referentes y métricas para las características de desempeño.....	58
4.1.1.	Jong-Mu Choi.....	58
4.1.2.	Matías Robles.....	61
4.1.3.	Muthuvel Shobana.....	63
4.1.4.	Othman Fuad Ziad.....	64
4.1.5.	Duyen Trung.....	65
4.1.6.	Mohapatra Shyam.....	66
4.2.	Software de simulación.....	67
4.3.	Modelamiento de la Simulación.....	68
4.4.	Protocolos.....	72
4.5.	Métricas.....	72
4.6	Simulación.....	73
5.	Análisis de resultados.....	78
5.1.	Resultado caracterización y el modelado del ambiente de uso y definición de la necesidad del usuario.....	78
5.2.	Escogencia de un protocolo de acuerdo con los requerimientos establecidos.....	79
5.3	Presentación de datos de las simulaciones efectuadas.....	80
5.4	Análisis de los Benchmark presentados en referencia a los resultados de las Simulaciones.....	84
6.	Conclusiones y Recomendaciones.....	88
6.1.	Conclusiones.....	88
6.2.	Recomendaciones.....	91
7.	Bibliografía.....	92
Anexo A	97
Anexo B	102
Anexo C	104
Anexo D	105

Lista de Figuras

Figura 1. Categorización del enrutamiento Ad Hoc.....	3
Figura 2. Arquitectura de una red PRNET´s.....	5
Figura 3. Arquitectura TDL.....	7
Figura 4. Extensión de las 7 capas del modelo OSI.....	8
Figura 5. Vista del despliegue del sistema CDL 1.0.....	10
Figura 6. Ambiente Operacional Típico de una red Táctica.....	19
Figura 7. Partición de una red.....	31
Figura 8. Descripción de una Red Táctica Básica.....	34
Figura 9. Descripción del Sistema Táctico de Datos.....	35
Figura 10. Protocolo CGRS ruta del nodo1 al 8.....	41
Figura 11. (a) Creación de ruta, (b) mantenimiento de la ruta en TORA.....	47
Figura 12. Diagrama de Flujo Protocolo TORA.....	49
Figura 13. Zona de enrutamiento, nodo A p=2.....	51
Figura 14. Relación de entrega de paquetes.....	59
Figura 15. Promedio de retardo entre terminales (a) Velocidad, (b) Cantidad de Nodos	60
Figura 16. Control de carga de paquetes, (a) Velocidad, (b) cantidad de nodos.....	61
Figura 17. Tasa de entrega de paquetes.....	62
Figura 18. Retardo promedio.....	63
Figura 19. Rendimiento en Mbps.....	64
Figura 20. Comparación de protocolos en relación con la variación de nodos.....	66
Figura 21. Porcentaje de uso de simuladores de redes.....	67
Figura 22. Escenarios Planteados. a. 11 Nodos, b. 29 Nodos, c. 35 Nodos, d. 41 Nodos	76
Figura 23. Ejemplo de simulación NAM Protocolo AODV.....	77
Figura 24. Métrica de Desempeño Promedio.....	82
Figura 25. Métrica de Relación de Entrega de Paquetes.....	83
Figura 26. Retransmisión de Paquetes.....	84
Figura 27. Comparación de Métrica relación de paquetes enviados.....	85
Figura 28. Comparación de graficas de tasa de entrega de paquetes.....	86
Figura 29. Comparación de graficas de desempeño promedio.....	87

Lista de Tablas

Tabla 1. Comparación de Documentos	13
Tabla 2. Composición del Escenario de Simulación	25
Tabla 3. Comparación de las características de los Protocolos Reactivos.	53
Tabla 4. Comparación de las características de los Protocolos Proactivos	55
Tabla 5. Nodos finales de simulación.....	69
Tabla 6. Parámetros fundamentales de simulación	70
Tabla 7. Parámetros de Simulación	71

Lista de Abreviaturas

ACK	<i>Acknowledgment</i>	Confirmación
AODV	<i>Ad Hoc On Demand Vector</i>	Vector Ad Hoc en Demanda
ARPANET	<i>Advance Research Projects Agency NET</i>	Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación en Redes
BRP	<i>Border cast Resolution Protocol</i>	Protocolo de Resolución de Frontera
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>	Tasa Constante de Bits
CDL	<i>Common Data Link</i>	Enlace Común de Datos
CGRS	<i>Cluster Head Gateway Switch Routing</i>	Enrutamiento Nodos Cabeza de Racimo y Nodos Puerta de Salida
CLR	<i>Clear</i>	Borrar
COTECMAR		Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Marítimo y Fluvial
COTS	<i>Commercial of the Shelf</i>	Elementos Comerciales
CTDL	<i>Colombian Tactical Data Link</i>	Enlace de Datos Tácticos Colombiano
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>	Agencia de Defensa Avanzada para Proyectos de Investigación
DLP	<i>Data Link Processor</i>	Procesador de Data Link
DSDV	<i>Destination Sequence Distance Vector</i>	Vector de Secuencia por Distancia al Destinatario
DSR	<i>Dynamic Source Routing</i>	Enrutamiento Dinámico de la Fuente
DTDMA	<i>Distributed Time Division Multiple Access</i>	Acceso Múltiple Distribuido por División de Tiempo
HRLN	<i>Hierarchical Routing for Large Networks,</i>	Enrutamiento Jerárquico para Redes Grandes
IARP	<i>Intrazonal Routing Protocol</i>	Protocolo de Enrutamiento Intra zonal
IDM	<i>Improve Data Modem</i>	Módem de Mejoramiento de Datos
IERP	<i>Interzone Routing Protocol</i>	Protocolo de Enrutamiento Reactivo Inter zonal
IFF	<i>Identification Friend or Foe</i>	Identificación Amigo o Enemigo
LAM	<i>Light Adaptative Multi-diffusion</i>	Algoritmo de Multidifusión Adaptativo Ligero

LAMR	<i>Location-Aided Multipath Routing</i>	Algoritmo de Localización Asistida en Rutas Múltiples
LAR	<i>Location Aided Routing</i>	Algoritmo de Localización Asistida de Ruta
LCC	<i>Least Cluster Change</i>	Mínimo Cambio de Clúster
LLC	<i>Link Level Communication</i>	Módulo de Comunicaciones entre Enlaces de Nivel
LMR	<i>Retransmission Message List</i>	Lista de Mensajes de Retransmisión
MAC	<i>Media Access Protocols</i>	Protocolos de Acceso al Medio
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Networking</i>	Redes Móviles Ad Hoc
MMI	<i>Man, Machine Interface</i>	Interfaz Hombre Máquina
NAM	<i>Network Animator</i>	Animador de Red
NCW	<i>Network. Centric Warfare</i>	Centro de Redes para la Guerra
NDP	<i>Neighbor Discovery Protocol</i>	Protocolo Descubridor de Vecinos
NILE	<i>NATO Improved Link Eleven</i>	Enlace Once Mejorado de la OTAN
NPDUs	<i>Multiple Network Protocol Data Units,</i>	Múltiples Nodos de Relevó
OLSR	<i>Optimized Link State Routing Protocol</i>	Protocolo de Enrutamiento de Optimización del Estado del Enlace
OTAN		Organización del Tratado del Atlántico Norte
PDR	<i>Packet Delivery Ratio</i>	Relación de entrega de Paquetes
PRNet	<i>Packet Radio Net</i>	Red de Empaquetamiento por Radio
PWIN	<i>Prototype WWMCCS (Worldwide Military Command and Control System), Intercomputer Network</i>	Prototipo de Red Inter Computacional de Sistema de Comando y Control Militar de Cobertura Mundial
RERR	<i>Route Error</i>	Error en la Ruta
RREP	<i>Route Reply</i>	Respuesta de Ruta
RREQ	<i>Route Request</i>	Solicitud de Ruta
RTT	<i>Round Trip Time</i>	Tiempo de Ida y Vuelta
SHARP	<i>Sharp Hybrid Adaptive Routing Protocol</i>	Protocolo de Enrutamiento Adaptativo, Híbrido y Afinado
SGR		Sistema de Gestión de Redes
SNC	<i>System Network Controller</i>	Sistema Controlador de Red
SPC	<i>Signal processing Controllers</i>	Controladores de Procesadores de Señal

STANAG	<i>Standardization Agreement</i>	Tratado de Estandarización
TADIL	<i>Tactical Digital Information Link</i>	Enlaces Tácticos de Información Digital
TBRPF	<i>Topology Broadcast base on reversed path Forwarding</i>	Tipología de Difusión Basada en Rutas desde y hacia
TCP-IP	<i>Transmission Control Protocol Internet Protocol</i>	Protocolo de Control de Transmisión, Protocolo de Internet
TDL	<i>Tactical Data Link</i>	Enlace de Datos Tácticos
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>	Múltiple Acceso con División de Tiempo
TDS	<i>Tactical Data System</i>	Sistemas de Enlaces Tácticos
TORA	<i>Temporally Ordered Routing Algorithm</i>	Algoritmo Temporal de Enrutamiento Ordenado
TTL	<i>Time to Live</i>	Tiempo de Vida
UAV	<i>Unmanned Autonomous Vehicle</i>	Vehículo Autónomo No Tripulado
VANET	<i>Vehicular Ad Hoc Networks</i>	Redes Móviles Vehiculares
WRP	<i>Wireless Routing Protocol</i>	Protocolo de Enrutamiento Inalámbrico
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>	Redes Inalámbricas de Sensores.
WWMCCS	<i>Worldwide Military Command and Control System</i>	Sistema de Comando y Control Militar de Cobertura Mundial
ZRP	<i>Zone Based Routing Protocol</i>	Protocolo Basado en Zonas

1. Introducción

1.1. Formulación del Problema

1.1.1. Planteamiento del problema

Las redes Ad Hoc como se puede intuir en su libro capítulo 2 y 3 de [1], pueden crearse sin una infraestructura preinstalada y sin un centro de gestión. Este tipo de redes es el indicado para los enlaces de datos tácticos debido a la fácil conexión de las unidades, flexibilidad y movilidad de la red, robustez, funcionamiento en tiempo real (transmisión oportuna) seguridad e interoperabilidad (hace referencia a tener las mismas características como frecuencias, técnicas de modulación, tasas de datos, formato de tramas, protocolos, estandarización de los mensajes, entre otras). Normalmente estos enlaces son soportados en redes inalámbricas ubicadas en las bandas del espectro electromagnético de HF y UHF, para largo y corto alcance, respectivamente. En el estado del arte ya en versiones como LINK 22 ¹y el Enlace Común de Datos [2] (CDL, *Common Data Link*) se usan enlaces satelitales en las bandas entre los 14 y 15 GHz.

En la región, países como Chile a través de [3] una empresa asociada con ASMAR, principal astillero de ese país, desarrollaron un sistema llamado el LINK SP-100, el cual cumple con la función esencial de transferencia de datos e información necesaria para mantener actualizado el escenario de operaciones entre diferentes unidades marítimas y opera en las bandas de UHF, VHF, HF y Satelital

A pesar de que existen protocolos capaces de determinar y manejar una red Táctica, estos son de carácter comercial, son genéricas y se utilizan de acuerdo con unas funciones predeterminadas por el constructor de la Red, estas suelen suplir las necesidades básicas de un usuario determinado. Sin embargo, para lograr determinar

¹ El LINK22 [60] es el último desarrollo de enlaces de datos tácticos entregado por la OTAN, y se trata de un enlace de datos que mejora el ancho de banda de HF hasta UHF, va más allá de la línea de vista, tiene compatibilidad con los anteriores, LINK 16 y LINK 11, y en general introduce nuevas mejoras acorde al estado de la tecnología.

ciertos parámetros como son el tipo de información, la forma de transmisión y la flexibilidad de cambiar la configuración de acuerdo con la dinámica de las circunstancias o escenarios operacionales (atención de desastres en el mar, búsqueda y rescate, operaciones de coordinación de seguridad y cumplimiento de las leyes en el mar) es necesario tener la capacidad de determinar un protocolo de enrutamiento con una serie de nodos o unidades participantes en una red de enlaces Tácticos.

En Colombia se está trabajando el LINK COTECMAR [4] que utiliza un sistema de comunicación liviano, que abrió la puerta para continuar la investigación enfocada a definir el acceso al medio y el protocolo de red a emplear la cual sin embargo aún no ha sido definida.

Una definición simple de DATALINK [5] hace referencia a un equipo electrónico, incluyendo protocolos y mensajes que permiten la transmisión de información en forma digital. Los objetivos de tener un DATALINK están orientados al logro de un bajo costo utilizando Elementos comerciales (COTS, *Commercial of the shelf*), teniendo una arquitectura abierta, modular y escalable con el propósito de obtener una configuración variable que pueda satisfacer requerimientos futuros de expansión [6]. Estos deben ser de tamaño pequeño y de bajo peso, operar en diversas bandas de frecuencia y a diferentes tasas de transmisión. Se deben caracterizar por su robustez, capacidad de encriptación y operación en tiempo real. Finalmente, estos deben tener la posibilidad de ser interoperables entre diferentes plataformas como buques, aviones y estaciones en tierra entre otros.

Para el caso de estudio, en la figura 1 [1] se definen los protocolos de enrutamiento en dos categorías: Proactivos (Tablas Dirigidas) y los Reactivos (En demanda). Los proactivos se fundamentan en una base de datos en donde se almacenan todas las posibles rutas entre los nodos para lograr establecer una comunicación entre dos o más participantes en la red. Esta categoría requiere más ancho banda, afectando por ende el desempeño de la red, aun cuando garantiza que siempre exista una ruta para el intercambio de la información.

Por otro lado, los reactivos se caracterizan por tener un mecanismo de “descubrimiento de ruta” que es asociado a un protocolo en demanda permitiendo así utilizar los nodos

estrictamente necesario para descubrir y mantener el enlace, esto requiere menor ancho de banda y consumo de energía, pero podría darle inestabilidad al enlace en caso de pérdida de la ruta.

En la literatura [7] se puede encontrar que catalogan este tipo de redes Ad Hoc de acuerdo con la movilidad como Redes Móviles Ad Hoc (MANET, *Mobile Ad Hoc Networking*), Redes Móviles Vehiculares (VANET, *Vehicular Ad Hoc Networks*) Redes Inalámbricas de Sensores (WSN, *Wireless Sensor Network*) entre otras referencias. Se han estudiado protocolos híbridos tratando de optimizar el consumo de energía y el ancho de banda, así las cosas, nos enfocaremos en los protocolos tipo en Vector Ad Hoc en Demanda (AODV, *Ad Hoc On Demand Vector*), Enrutamiento Dinámico por Fuente (DSR, *Dynamic Source Routing*), Enrutamiento con Localización Asistida (LAR, *Location-Aided Routing*) y para los proactivos el de Vector de Secuencia por Distancia al Destinatario (DSDV, *Destination Sequence Distance Vector*)

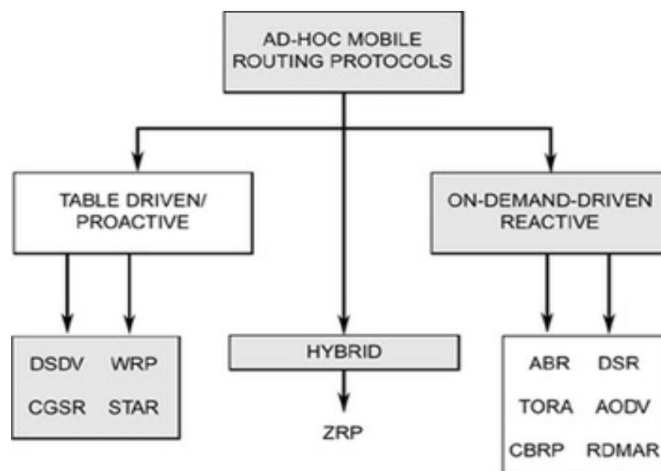


Figura 1. Categorización del enrutamiento Ad Hoc

En este contexto, la pregunta que busca responder este trabajo de maestría es:

¿En una red Ad Hoc, cuál es el protocolo de enrutamiento más eficiente a implementar considerando la cantidad de nodos y los diferentes escenarios operacionales?

1.1.2. Justificación

Existe una brecha entre los enlaces de datos en redes tácticas comerciales y propietarios determinada por las limitaciones con los sistemas de gestión de información. Los sistemas comerciales son genéricos, de uso global, cerrados, con seguridad impuesta y no propietaria y no se ajustan a las necesidades particulares de cada usuario como lo son el clima, la ubicación y las condiciones exclusivas de cada escenario operacional en el entorno, que para el caso es el colombiano, entre otras. Estas características hacen que estos no puedan ser implementados en el contexto local y regional, igualmente no existen protocolos de enrutamiento en los diseños elaborados en Colombia tal como se menciona por los estudios realizados por la Armada Nacional y [8] en el desarrollo e implementación de un sistema DATALINK que, para el caso específico definió las necesidades operacionales y los requerimientos de diseño, pero no contempló el alcance los protocolos de enrutamiento.

El presente trabajo de grado busca aportar a la solución del problema con el fin de obtener contribuciones específicas en estudio para determinar un protocolo que se puedan usar en el tipo Táctica de Enlace necesaria para satisfacer las necesidades del usuario de manera eficiente. Esto se logrará mediante el estudio de protocolos de enrutamiento basados en redes sin infraestructura, como son los reactivos: Algoritmo Temporal de Enrutamiento Ordenado (TORA, *Temporally Ordered Routing Algorithm*) y Enrutamiento Dinámico de la Fuente (DSR, *Dynamic Source Routing*), los proactivos: Protocolo de Enrutamiento de Optimización del Estado del Enlace (OLSR, *Optimised Link State Routing Protocol*), Tipología de Difusión Basada en Rutas desde y hacia (TBRPF, *Topology Broadcast base on Reversed Path Forwarding*), y los Híbridos: Enrutamiento Jerárquico para Redes Grandes (HRLN, *Hierarchical Routing for Large Networks*)

1.1.3. Marco teórico

Se puede definir como un sistema de enlaces tácticos aquel que disemina información procesada desde un RADAR, SONAR, equipo de Identificación de Amigo o Enemigo (IFF, *Identification Friend or Foe*), radiogoniómetros o inclusive información visual, a través de radiocomunicaciones (ondas electromagnéticas) por medio de mensajes dedicados y

estandarizados que garantizan la interoperabilidad entre unidades marítimas, terrestres o aéreas en situaciones de operación [9]. En si los enlaces de datos tácticos consisten en procedimientos, procesos y equipos diseñados para recolectar, desplegar, evaluar y diseminar información con el propósito de asistir al director del escenario operacional en el proceso de toma de decisión

A partir de la segunda guerra mundial, tras la invención del radar se generó la necesidad de mantener un intercambio de datos entre las armas, los sensores y el sistema de gestión de guerra a nivel unidad, y un intercambio de información entre las unidades, especialmente las aéreas. A finales de los 60's se dio inicio al primer sistema basado en la técnica de *Packet Radio* el cual consistía en un intercambio de paquetes de información de Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación en Redes (ARPANET, *Advance Research Projects Agency NET*) [10] y se caracterizaba por tener una forma dinámica de compartir el ancho de banda entre múltiples usuarios. Para 1975 la Agencia de Investigación Avanzada de Proyectos de Defensa (DARPA, *Defense Advance Research Projects Agency*) inició un proyecto de investigación en redes de este tipo, llamado Red de Empaquetamiento por Radio (PRNet, *Packet Radio Net*), en la figura 2 [11], se muestra el esquema de funcionamiento, el cual proveía una forma eficiente de compartir los canales radioeléctricos en múltiples terminales, múltiples repetidores y estaciones estáticas para efectuar el enrutamiento, que se caracterizaba por no tener una infraestructura flexible y no definida.

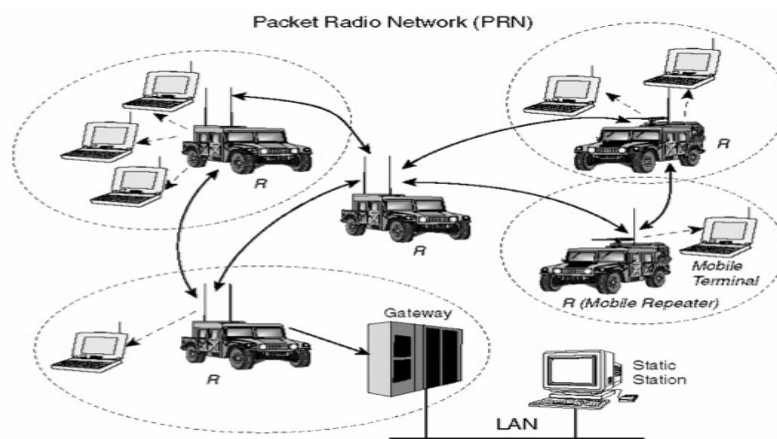


Figura 2. Arquitectura de una red PRNET's

Por otro lado, el proyecto pasó a ser controlado por la Agencia de comunicaciones del departamento de Defensa de EE. UU., donde se continuó con proyectos como el Prototipo de Red Inter Computacional de Sistema de Comando y Control Militar de Cobertura Mundial (WWMCCS, *World Wide Military Command and Control System*), Prototipo de Red Inter-computo WWMCCS (PWIN, *Prototype WWMCCS Intercomputer Network*), entre otros.

Su desarrollo ha evolucionado, de manera reservada y confidencial por su alto valor estratégico especialmente porque afecta la Seguridad de las Naciones del mundo. Uno de los principales desarrollos de estos sistemas en la época de los 80's y 90's pero que actualmente son obsoletos fueron los llamados Enlaces Tácticos de Información Digital (TADIL, *Tactical Digital Information Link*) perfeccionado por Estados Unidos y que a su vez evolucionó al Link 11 de la OTAN.

A principios de los 90's la Organización de países del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) [12], líder en este tipo de desarrollos y ante la necesidad de mejorar su versión del link 11, elaboró un proyecto llamado Enlace Once Mejorado de la OTAN (NILE, *NATO Improved Link Eleven*), ante lo cual se desarrolló el Tratado de Estandarización (STANAG, *Standardization Agreement*) 5522 de la OTAN, la interacción de estos proyectos permitió tener la última versión llamada LINK 22, que se caracteriza por ser robusta, manejar datos y video, y un alto nivel criptográfico, prácticamente indescifrable.

Este tipo de enlaces de datos tácticos son desarrollados a nivel internacional por los países miembros de la OTAN y no se permite su implementación en países no miembros. Esto ha generado el desarrollo de sistemas alternos y paralelos de carácter comercial y genéricos como el SP100 de SISDEF, el LINK A de ATLAS y el LINK Y de THALES.

La figura 3 [6] describe funcionalmente el Enlace de Datos Tácticos (TDL, *Tactical Data Link*). Inicialmente el Procesador de Data Link (DLP, *Data Link Processor*) se encarga de establecer un enlace con otro DLP para efectuar el intercambio de datos necesarios provenientes de una Interfaz Hombre Máquina (MMI, *Man Machine Interface*), llamada Sistemas de Enlaces Tácticos (TDS, *Tactical Data System*), en donde se originan y/o reciben los mensajes. Posteriormente, el Sistema Controlador de Red (SNC, *System Network Controller*) se encarga de efectuar la modulación, el retardo y enrutamiento

necesario, a fin de lograr el control de flujo de información con base a la prioridad de esta y orientarlas a la cola respectiva.

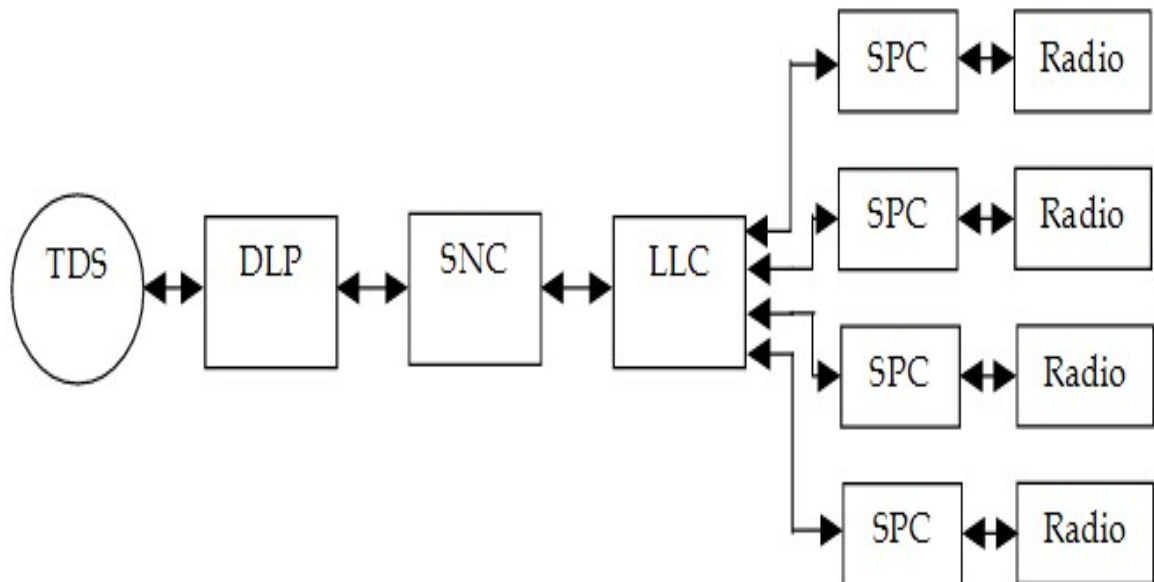


Figura 3. Arquitectura TDL.

Finalmente, los datos son encriptados y verificados en integridad a través del módulo de comunicaciones entre enlaces de nivel (LLC, *Link Level Communication*), que adicionalmente se encarga de proveer una interface con los Controladores de procesadores de señal (SPC, *Signal Processing Controllers*) disponibles, el cual se encarga de proveer la operación simultánea de múltiples redes establecidas [6].

Para el caso de estudio se enfocará en la sección del proceso que se dedica al enrutamiento de la red, esto se puede observar en un sistema de gestión de enlace de datos tácticos desde la óptica de un modelo OSI [13], la figura 4 [13] muestra cómo está compuesto un TDL típico.

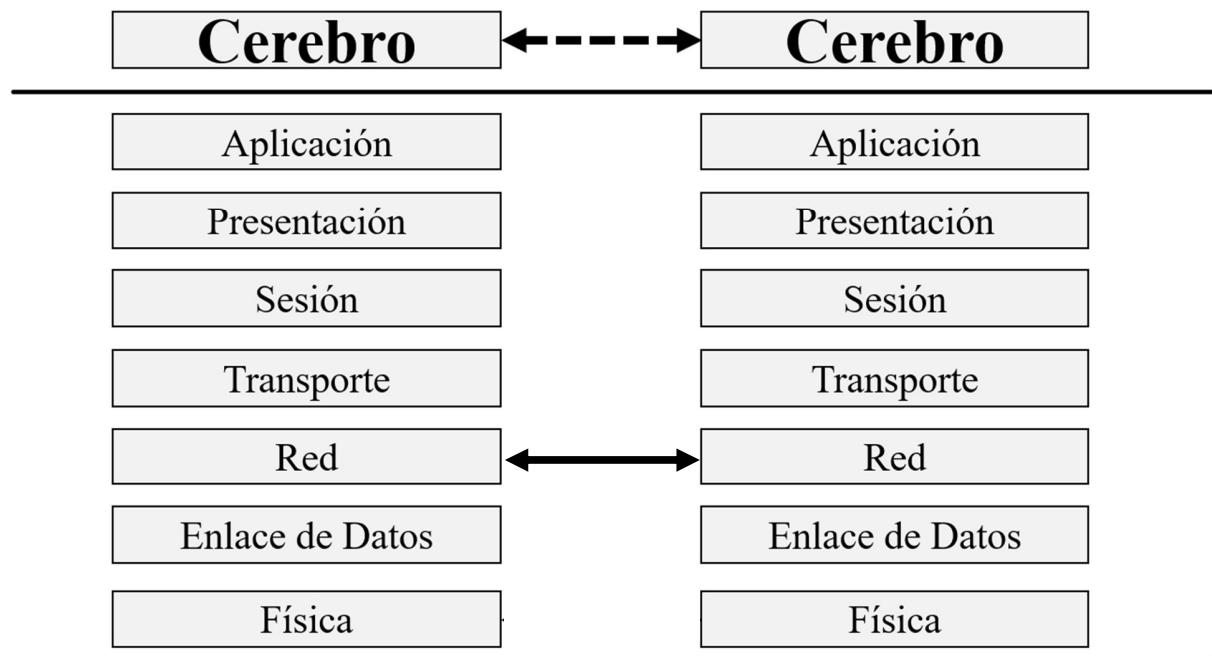


Figura 4. Extensión de las 7 capas del modelo OSI

Así las cosas, la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Marítimo y Fluvial (COTECMAR) [14] a nivel local ha trabajado desde la capa de aplicación hasta la capa de red, sin embargo, las capas de enlace y física prácticamente no se han abordado, en la capa de RED y de enlace se puede determinar el acceso al medio, encriptación, corrección de error etc. Con el fin de establecer qué tipo de red puede usar el sistema, se considerarán los tipos de redes existentes ya mencionadas anteriormente.

1.2. Estado del Arte

1.2.1. Tactical Data Link Systems and the Australian Defense Force

La Fuerza de Defensa Australiana a través de la división de asuntos de desarrollo de tecnología e interoperabilidad, realizó un análisis del enrutamiento en una red de datos tipo Ad Hoc en donde planteó un estudio del estado del arte de los sistemas tácticos de enlace de datos [6], en esta, se recopila brevemente la historia, empezando por el

desarrollo del LINK 11, LINK 16, Sistemas de mejoramiento de módems de datos (IDM, *Improved Data Modems*), Link 22 Enlace de datos comunes (CDL, *Common Data Link*) y el Centro de Redes para la Guerra (NCW *Network.Centric Warfare*).

Las primeras versiones desarrolladas llamadas Enlaces Tácticos de Información Digital (TADIL, *Tactical Digital Information Link*) alcanzaron velocidades de 238 bps con la serie "a" (serie inicial del sistema), el producto final industrial y comercializable fue el LINK 11, pionero en ser estandarizado por la OTAN en los años sesenta. No obstante, rápidamente la dinámica del crecimiento del tipo de operaciones y de las unidades navales a nivel mundial sobrepasó la capacidad del LINK11, para el efecto se evolucionó al link 16 y 22 con velocidades superiores a los 107.52 kbps con la conocida serie "j", permitiendo ampliar las capacidades de la red, este mejoramiento partió del proyecto NILE. Igualmente, ante las limitaciones en operaciones aéreas, debido a la dinámica de este tipo de escenarios, en forma simultánea se evolucionó a un enlace personalizado llamado LINK 16, el cual es utilizado en los escenarios operacionales aéreos. El LINK 22 se puede considerar como el sistema táctico de enlace de datos más avanzado construido en servicio, ha mejorado las capacidades de protección en ambientes electromagnéticamente hostiles, aumentado la velocidad de transmisión de los mensajes, obteniendo mayor participación de las unidades en la red, robustez, detección y corrección de errores, ha aumentado el rendimiento con la introducción del Acceso Múltiple Distribuido por División de Tiempo (DTDMA, *Distributed Time Division Multiple Access*), entre otras características. Se podría afirmar que parte de la siguiente generación de Sistemas de Gestión de Redes (SGR) Tácticas apunta a ser un sistema de sistemas de datos comunes CDL, es decir, permite que este integre cualquier tipo de red táctica TDL, a un sistema propio de manejo de comando y control para desarrollar operaciones de vigilancia, búsqueda y rescate entre otras.

1.2.2. Network Centric Operations: Background and oversight issues for congress

El Gobierno de Estados Unidos ha desarrollado un concepto [15] como parte de la transformación de sus ejércitos para proveer un teatro de operaciones común entre sus fuerzas militares, consiste en desarrollar un sistema de sistemas integrado como complemento del CDL, el cual va más allá, e implica integrar cualquier tipo de enlace

táctico, de tal forma que sea transparente para el usuario. Dicha integración, busca una auto sincronización, o en otras palabras, ejecutar lo inmediato sin las órdenes tradicionales, mejorando el entendimiento de la intención del conductor de la situación y del teatro de operaciones en todos los niveles de comando e incrementando la capacidad de aprovechar el conocimiento colectivo de un grupo para reducir la “fricción y la niebla” (entendido como las variables externas que afectan el buen desempeño de un grupo determinado ante una situación determinada como puede ser atender un desastre en el mar, una operación de búsqueda y rescate o el control del tráfico marítimo).

1.2.3. Desarrollo de un enlace de datos táctico, Fase 1: Prototipo

En el contexto nacional [4] ha venido trabajando en un proyecto de enlace de datos básico tal como se describe en la figura 5 [4].

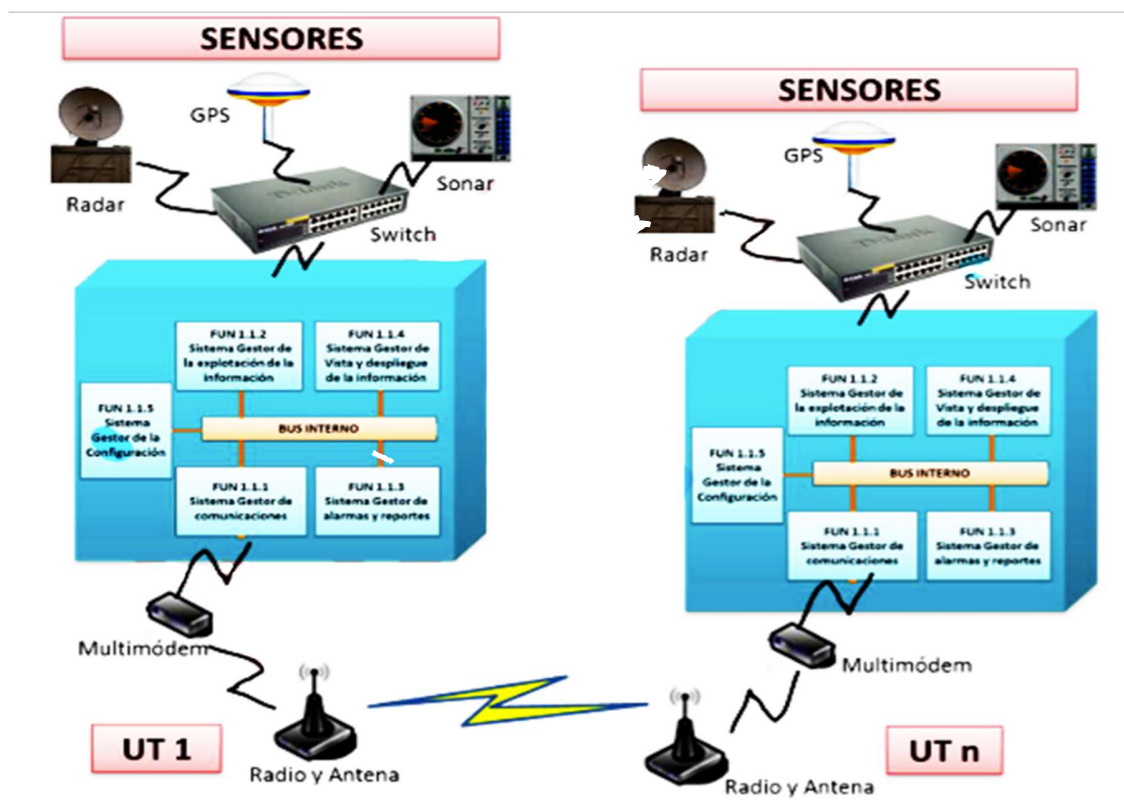


Figura 5. Vista del despliegue del sistema CDL 1.0.

Básicamente el DATA LINK que presenta COTECMAR, es un sistema de gestión de información que se usa para enlazar unidades militares que participan en una operación determinada. La función esencial de estos sistemas es poder brindar herramientas para que los conductores de operaciones puedan tomar mejores decisiones ante las situaciones que se presenten. En este orden de ideas, la configuración física está compuesta por el sistema de gestión de información y por los efectores. El primero, se compone de los sensores como fuente de información para mostrar la situación operativa y táctica de la unidad. Y los segundos, se componen de los efectores como tal. Cada unidad como tal despliega su propia situación, sin embargo, estas unidades no son aisladas ni autónomas, son parte de una estrategia para cumplir una misión, lo que demanda que entre ellas se deba compartir la información, y como ya se mencionó con anterioridad al acceso al medio y la configuración de la red es incipiente y básica haciéndola que carezca de robustez.

1.2.4. A review of current routing protocols for Ad Hoc *mobile wireless networks*

Existen ya productos completamente desarrollados desde hace más de tres décadas, se observa que el tema sigue vigente y extendiéndose hacia la frontera del conocimiento, sin embargo, en el momento de aplicarlas a un entorno operacional y específico estos no tienen en cuenta todas las variables. Así las cosas, para el caso colombiano se observa que existe una carencia de la aplicación de protocolos de enrutamiento. En el contexto académico se han realizado estudios comparativos para evaluar estos tipos de protocolos, como [16], los cuales realizaron estudios para encontrar protocolos de enrutamiento entre nodos basado en una serie de parámetros dados, ellos evaluaron ocho protocolos diferentes para redes Ad Hoc teniendo en cuenta sus características y funcionalidad donde finalmente analizaron su desempeño, en sus conclusiones identifican posibles aplicaciones entre las cuales se destacan conferencias, lecturas , reuniones, como también Servicios de emergencia y operaciones para el cumplimiento de la ley. Finalmente, no se pudo concluir cuál protocolo es mejor para los diferentes escenarios, cada protocolo define ventajas y desventajas inherentes a cada situación específica.

1.2.5. Performance evaluation and comparison of different Ad Hoc routing protocols

En 2007 también se realizó un estudio comparativo [17] de cuatro protocolos de enrutamiento clasificados en tres categorías, proactivos, reactivos y basados en posición, usaron parámetros de simulación como lo son la movilidad de los nodos y la variación de la configuración de la red, analizados, ellos proponen una variación o extensión del protocolo de Localización Asistida de Ruta (LAR, *Location Aided Routing*) basada en enrutamiento múltiple, no solo analizaron aspectos de desempeño sino que también analizaron aspectos de seguridad de la red, ellos demostraron un mejoramiento en los algoritmos modificados que usaban enrutamiento múltiple, los parámetros evaluados son entrega de paquetes, retraso promedio de principio a fin, consumo de ancho de banda entre otros comparados frente a la movilidad de los nodos en el escenario de tráfico definido en las simulaciones, por último concluyen que la modificación propuesta mejora la fracción de entrega.

1.2.6. A survey of evaluation platforms for Ad Hoc routing protocols

Recientemente en 2014 realiza un trabajo interesante [18] al proponer una taxonomía para evaluar los protocolos de enrutamiento desde la óptica de la característica más importante que es la capacidad de la red a resistir los cambios en el ambiente como podrían ser fallas accidentales, ataques a la red, entre otras, el estudio planteo tres objetivos, el primero se estudiaron los protocolos que comúnmente son usados para la evaluación de desempeño, seguido se analizaron las diferentes metodologías de comparación y por último se creó una nueva taxonomía que caracteriza la evaluación. Finalmente, como conclusión, el estudio plantea que la evaluación a la resistencia de estos protocolos da una nueva perspectiva a entender y evaluar la capacidad de tolerancia a fallas de una red ante las posibles afectaciones o amenazas presentes en el ambiente, información que puede ser útil para mejorar el uso de nuevas aplicaciones y servicios tecnológicas entre otras ventajas.

Con el ánimo de dar objetividad y poder comparar lo presentado en el estado del arte, se tomaron las principales características que debe tener un sistema de enlace de datos [1] y sus aplicaciones las cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Comparación de Documentos

CARACTERISTICAS	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
Sistemas de gestión de información	X	X	X			
Velocidad de los enlaces	X	X	X			
Acceso al medio	X	X	X			
Tipología de enrutamiento	X	X		X	X	X
Aplicaciones						
Civiles	X		X	X	X	X
Tácticas militares	X	X	X			X
Concepto operacional o ambiente en Colombia			X			

Durante la revisión bibliográfica de los trabajos realizados en esta área se puede observar que el enfoque de estos se aproxima a desarrollar e implementar protocolos de enrutamiento para establecer sus sistemas de enlaces tácticos, estos sistemas como se mencionó anteriormente son de carácter genérico y comercial. En Colombia los trabajos que se han desarrollado realizan evaluaciones técnicas comparativas de diferentes sistemas de enlaces, sin embargo, a pesar de su avance y evolución, no evidencian la implementación de protocolos de enrutamiento diseñados para un ambiente operacional como el colombiano, consideraciones que, al no ser tenidas en cuenta en la adquisición de estos sistemas, limita el desempeño y restringe la explotación de las capacidades para las cuales fueron diseñadas. La reducción de esta brecha asociada a las consideraciones de diseño en los protocolos de enrutamiento establecerá un referente que permita generar parámetros de comparación y evaluación apropiados que una vez implementados tengan una aplicación real para dar una solución puntual al problema planteado.

1.3. Aportes Investigativos

Las Redes de Enlaces Tácticos se caracterizan porque están compuestas de participantes que se conectan a una red móvil de enlace de datos, lo que determina que se debe utilizar una red sin infraestructura definida “Una típica Red Ad Hoc”. El aporte de este trabajo es la determinación de un protocolo de enrutamiento que pueda ser implementado por la Armada Nacional en operaciones Marítimas. Su desarrollo contribuye con el proceso de investigación con los siguientes aspectos:

- El entorno de operación de acuerdo con las necesidades y requerimientos planteados por la Armada Nacional.
- Protocolos que de acuerdo con el entorno puedan ser implementados y modelados.
- Un protocolo adecuado para ser implementados luego de la simulación y evaluación.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Determinar un protocolo para la configuración de enrutamiento de una red de enlaces tácticos Ad Hoc para ser utilizada por unidades participantes en escenarios marítimos.

1.4.2. Específicos

- 1.4.2.1. Establecer la necesidad del usuario para caracterizar y modelar el ambiente de uso.
- 1.4.2.2. Estudiar protocolos de enrutamiento de redes Ad Hoc de acuerdo con las características del entorno de uso definido que permitan escoger un diseño de un protocolo de acuerdo con los requerimientos establecidos.

- 1.4.2.3. Encontrar un referente (*benchmark*)² que estipule cuales son las características de desempeño y mediante simulación comparar los protocolos modelados para determinar el más adecuado.

1.5. Propuesta

La propuesta que se busca aceptar o refutar mediante la realización del presente trabajo es:

Es posible encontrar el protocolo de enrutamiento de una red Ad Hoc de enlaces de datos tácticos más eficiente a ser implementado considerando la cantidad de nodos y de diferentes escenarios operacionales marítimos.

1.6. Organización del Trabajo de Grado

El documento se encuentra organizado de la siguiente manera:

Capítulo 1. Introducción.

En este se presentan los antecedentes de una revisión preliminar del estado del arte, un resumen del desarrollo a través del tiempo de lo que han sido los sistemas de enlaces de datos tácticos, y se exponen la intenciones y objetivos del proyecto.

Capítulo 2. Caracterización del Ambiente y Determinación del Escenario.

Corresponde a los parámetros establecidos por el usuario en referente a sus requerimientos de diseño y de implementación, en este capítulo se logran individualizarlos para que puedan ser tenidos en cuenta como variables de comparación para la escogencia de parámetros de los protocolos de enrutamiento.

² La palabra *BENCHMARK* de acuerdo con el diccionario hace referencia a una marca en una pared o edificación que es usada como punto de referencia, pero que hoy en día se usa en sentido figurado como un estándar para comparar algo o como referente. <https://www.vocabulary.com/dictionary/benchmark>

Capítulo 3. Estudio de Protocolos de Enrutamiento.

En este capítulo se describen los principales protocolos de enrutamiento proactivos, reactivos e híbridos, con el objetivo de poderlos caracterizar y comparar en su desempeño teórico.

Capítulo 4. Análisis de Referentes y Simulación de Protocolos Seleccionados.

Reúne los resultados presentados por diferentes autores en relación con la comparación de protocolos de enrutamiento, igualmente se muestran las simulaciones realizadas con sus resultados.

Capítulo 5. Análisis de Resultados

En este capítulo se muestran y se analizan los resultados obtenidos generando un concepto de cuál podría ser el protocolo por implementar, igualmente se comparan estos resultados con los referentes mencionados y se analiza la congruencia de estos.

Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones.

Se exponen las conclusiones y se hacen las recomendaciones para tener en cuenta para trabajos futuros.

2. Caracterización del Ambiente y Determinación del Escenario.

En el marco del proyecto [19] realizado por COTECMAR, en el anexo C se definió el concepto operacional, este hace una descripción lo más real posible al escenario marítimo. El documento describe las necesidades existentes de la iniciativa de un codesarrollo de un sistema TDL para fortalecer las capacidades en la conducción de operaciones inherentes al ámbito del control del mar, la integración de sensores, el intercambio de información en caso de desastres naturales, y la concientización sobre el dominio marítimo, contribuyendo al proceso de toma de decisiones, así como mejorando las capacidades I+D+i.

A continuación, se describe como en [8] se plantea el ambiente operacional y la necesidad del usuario, luego se determina el escenario y se caracteriza el mismo de acuerdo con la información planteada.

2.1. Caracterización del Ambiente Operacional.

Las operaciones que se realizan son en grupos de unidades, normalmente barcos, helicópteros, aviones y submarinos, dependiendo de las circunstancias. Se define que es fundamental que las unidades puedan transferir información táctica entre ellas, con la finalidad de tener un panorama común que facilite la coordinación de las operaciones en tiempo real. El sistema debe ser seguro en las comunicaciones, que los procesos técnicos no sean perceptibles por el usuario, con la atención debida al uso de la banda ancha y que cuente con las respectivas herramientas que le permitan visualizar, procesar y manejar la información que se intercambia.

De igual manera se hace necesario contar con las respectivas herramientas que permitan el procesamiento de la información que entra y sale, el despliegue de esta en una forma útil que brinde al usuario final la capacidad de poder planear sus acciones, ejecutarlas, controlarlas y compartirlas, estas herramientas deben ser parte de un sistema de enlace

de datos tácticos que proporcione una parametrización de las características antes mencionadas.

Se cuenta con cuatro barcos de mar que cuentan con sistemas de enlaces de datos propietarios, comerciales cerrados y no escalables, sin embargo, en este proyecto es deseable extender dicha capacidad a los submarinos, helicópteros y aviones, y así mejorar la capacidad de intercambio de información, para que estas como un todo puedan interoperar durante sus tiempos en el mar o cuando sea requerido.

En concordancia, se requiere la implementación de un sistema de red táctica que aumente las capacidades para operar en grupos más grandes (sistemas de sistemas) integrando la información de los sensores (como estaciones meteorológicas, submarinas etc.) y actuadores de las diferentes unidades en un solo panorama común, para en si aumentar la eficiencia en sus operaciones.

La figura 6 [*por Autor*] muestra como es el típico ambiente operacional en una red táctica, las condiciones físicas de esta red táctica están asociadas a las capacidades e infraestructura de las unidades existentes en cuanto a tamaño, ergonomía, interfaces entre otras más.

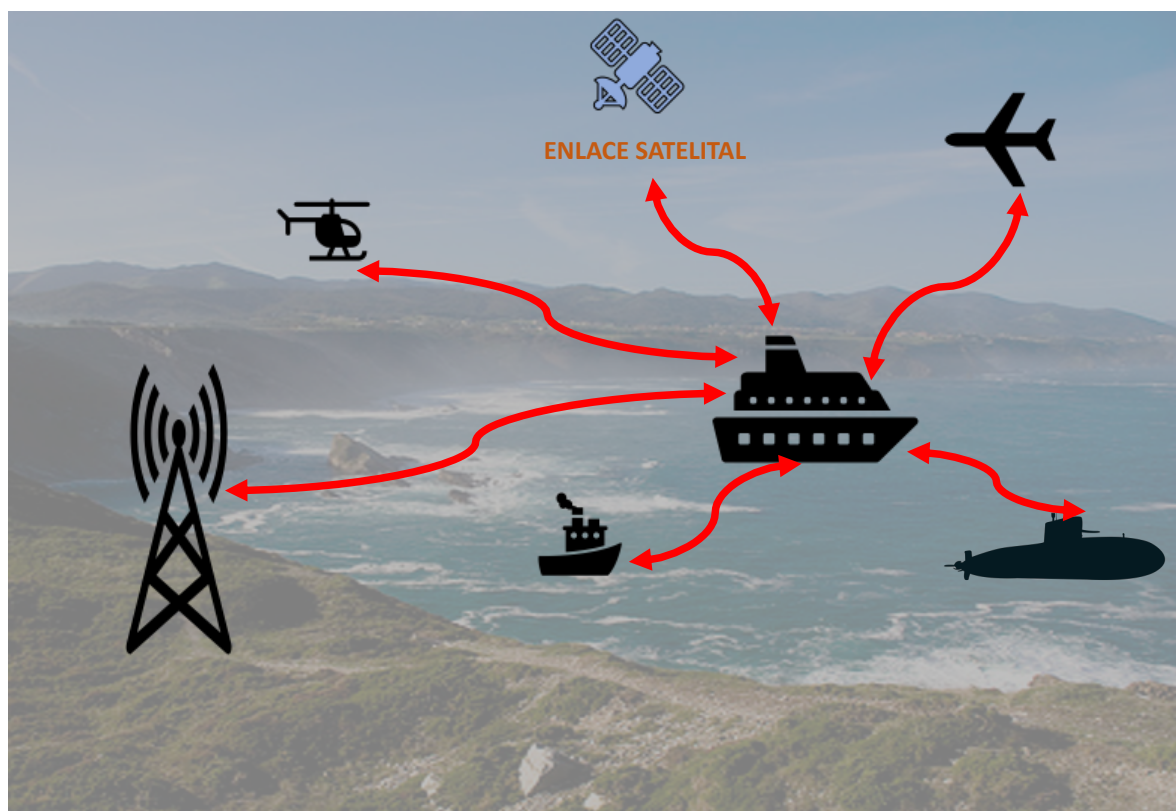


Figura 6. Ambiente Operacional Típico de una red Táctica

Adicional a las capacidades mencionadas anteriormente este sistema mejora y facilita el control centralizado que requiere en estas operaciones a nivel táctico, mantiene un panorama común en tiempo real en las dimensiones de superficie, submarinas, aéreas y electromagnéticas.

Los capitanes de los barcos y submarinos, así como los pilotos de los helicópteros y aviones estarían en la capacidad de compilar y difundir el panorama táctico común en tiempo real para poder hacer el control y direccionamiento efectivo de las operaciones con las unidades participantes. Las unidades de la operación deben estar conectadas a una red táctica para compartir la información de sus sensores como pueden ser estaciones meteorológicas, radares de navegación, cartas electrónicas, y actuadores como un Vehículo Autónomo no Tripulado UAV (*Unmanned Autonomous Vehicle*), etc., en un panorama táctico común, esta información proporciona coordinación con el fin de cumplir con la misión encomendada cualquiera que sea esta, algo importante y puntual

es que se mejora ostensiblemente la seguridad en las operaciones pudiéndose establecer las respectivas reglas de encuentro para prevenir accidentes y colisiones.

Para el sistema de la red Táctica de Datos en ambientes marítimos se requieren características de tipo funcional, técnico, de integración y de gestión de información. En tal sentido, la red tendrá la capacidad de:

2.1.1. Funciones y gestión:

- De la operación, esta permite introducir información necesaria para conformar las variables y referencias de la operación que se va a realizar, esta incluye todos los mensajes y acciones inherentes a las características de las unidades participantes.
- De la red, esta contempla los criterios y aspectos necesarios para acceder al medio, junto con las especificaciones de calidad del sistema para organizar y controlar la red.
- De los sensores y actuadores, esta contempla toda aquella mensajería que se intercambia para tener un lenguaje común en el uso compartidos de los sensores y actuadores de las unidades participantes.
- De la información Táctica, esta incluye toda la mensajería a nivel táctico que se intercambia para obtener el panorama táctico común al día, abarcando mensajes de actualización, reportes de configuración, reportes de cambios, posición y contactos en el área de operación, mensajería informal, alertas correlación de información, entre otras más.
- Del despliegue de la información y toma de decisiones, esta funcionalidad está diseñada para que las aplicaciones de software y hardware se ejecuten para obtener el máximo beneficio, la mejor interpretación de la información, de tal forma que sea un verdadero fundamento para que el capitán del buque o los pilotos tomen decisiones acertadas.

2.1.2. Sistema:

- Operación con frecuencia fija o saltos de frecuencia en las bandas HF, VHF y UHF.

- Permitir a cualquier unidad la entrada tardía en la red, que será implementada en forma automática. Para el caso este trabajo de grado aportaría las bases para poder iniciar con la implementación de un protocolo de enrutamiento que permitiera que los enlaces se realicen de forma automática y no manual.
- Modificar la topología de la red durante una operación.
- Participación simultánea de alguna unidad en más de una red.
- Mantener la red a pesar de que alguna unidad relevo se caiga de la ruta.
- Gestión automática de la red.
- Encriptar las comunicaciones mediante un sistema criptográfico integrado.
- La información por transmitirse debe tener un formato definido y propietario.
- Configuración de la prioridad y calidad del servicio con la que se envían los mensajes tácticos.
- La estructura de la red está basada en un diseño de redes Ad Hoc que garantiza la disponibilidad de las unidades que entren o salgan de la red.
- Capacidad de incorporar a la red 30 unidades funcionales.
- Retransmisión automática de mensajes.
- Capacidad de realizar agrupaciones de unidades que participen en una misma misión, direccionando a esta agrupación, cualquier tipo de mensajes mediante el enrutamiento automático.
- El protocolo de enrutamiento debe ser acorde a la capacidad de proceso, movilidad de los nodos y el ancho de banda disponible.

2.1.3. Capacidades de integración del sistema

Las unidades que se pueden enlazar pueden ser del tipo:

- Buques de superficie, en la actualidad la mayoría no cuenta con sistema de enlaces táctico, sin embargo, existen unidades que tienen la capacidad de enlace automático DATALINK que es propietario de compañías como como el SP100 de SISDEF, LINK A de ATLAS y LINK Y de THALES como ya se había mencionado, este está integrado al sistema de mando y control y al sistema de comunicaciones, y lo ideal es poder integrar el sistema a las actuadores y sensores de otras unidades para poder compartir la información.

- Submarinos, podrían existir unidades de operación submarina que al igual que los buques de superficie poseen actuadores, sensores e información que puede ser compartida mediante el sistema de enlaces de datos tácticos caracterizado solo para este tipo de unidades.
- Helicópteros, los disponibles en el país no disponen de sistemas de enlaces de datos tácticos funcional e integrado con otras unidades, igualmente estas aeronaves cuentan con información táctica, información de los sensores y actuadores que debe ser compartida con el resto de las unidades.
- Aviones, los que participan en operaciones marítimas no tienen un sistema automático de enlace de datos tácticos, estos son fundamental para realizar operaciones como búsquedas de náufragos rescate de unidades y atención de desastres entre otras, estas unidades también tienen información táctica, información de los sensores y actuadores que debe ser compartida para ser más eficientes en la operación y poder salvaguardar las vidas en el mar.

2.1.4. Capacidades para el manejo del ciclo de vida del sistema

Este sistema de red táctica de datos bajo el esquema funcional y táctico podrá ser aprovechado en operaciones marítimas del tipo:

- Búsqueda y rescate
- Control de migraciones
- Desembarco
- Investigación oceánica

A futuro la pretensión es tener la capacidad autónoma de ampliarlo las unidades participantes, es decir tener la capacidad de ampliar la red a conveniencia, reducir la dependencia tecnológica a través de del desarrollo tecnológico y la transferencia efectiva de conocimientos y adquirir y fortalecer las capacidades para diseñar, desarrollar, implementar, integrar, mantener y actualizar el sistema de enlace de datos tácticos, que permitan un desarrollo sostenible y continuo.

El proyecto contempla la transferencia de conocimiento y experiencia tendientes a cubrir los siguientes aspectos:

- Software para el establecimiento y control de redes inalámbricas Ad Hoc.
- Software para el control de enlaces de datos tácticos y optimización de los mensajes tácticos.
- Adecuación del sistema para futuro uso de enlaces satelitales.
- Protecciones de seguridad en las comunicaciones con tasas de transmisión eficientes.

También se estimó el fortalecimiento de las siguientes áreas del saber a través de la capacitación y transferencia del conocimiento y experiencia así:

- Arquitectura de redes Ad Hoc.
- Modulación usada en un sistema Data Link.
- Implementación de técnicas de acceso al medio.
- Enrutamiento de redes.
- Protocolo de comunicaciones.
- Técnicas de espectro ensanchado.
- Bases de datos distribuidas en la red táctica.

2.2. Necesidad del Usuario.

Ya descrito el ambiente operacional y sus condiciones, las cuales permiten identificar diferentes campos y áreas de conocimiento por explorar, el sistema se desarrolló en varios aspectos de los mencionados, pero como se menciona en la sección 1.3.6 en la sección de comparación del estado del arte, hay que fortalecer la implementación de protocolos de enrutamiento diseñados para un ambiente operacional como el colombiano.

La necesidad se desprende de los siguientes aspectos mencionados en la sección 2.2 tales como como requisitos o capacidades que debe tener el sistema:

- Permitir que cualquier unidad la entrada tardía en la red, la cual será implementada en forma automática, para el caso este trabajo de grado aportaría las bases para poder iniciar con la implementación de un protocolo de enrutamiento que permitiera que los enlaces se realicen de forma automática y no manual.
- Gestión automática de la red.
- Retransmisión automática de mensajes.
- Capacidad de realizar agrupaciones de unidades que participen en una misma misión, direccionando a esta agrupación, cualquier tipo de mensajes mediante el enrutamiento automático.
- El protocolo de enrutamiento debe ser acorde a la capacidad de proceso, movilidad de los nodos y el ancho de banda disponible.
- La necesidad de transferencia del conocimiento en arquitectura de redes Ad Hoc.

Mediante este trabajo se contribuye al desarrollo e implementación futura del protocolo de enrutamiento que más convenga para que el sistema funcione eficientemente. Adicionalmente, estas características determinan el diseño del protocolo de enrutamiento.

En resumen, las necesidades del usuario final pueden mostrar la topología de red, las funciones y la administración pueden determinar el tamaño y la densidad de la red, el sistema ofrece el espectro electromagnético y el uso en banda ancha, y por último, la capacidad de integración indica la cantidad de nodos de red.

2.3. Determinación del escenario Marítimo.

Teniendo en cuenta que en la sección 2.2.3 se establecieron el tipo de unidades participantes. Para este trabajo se le asignara un nodo a cada tipo de unidad quedando como se muestra en la siguiente tabla 2 así:

Tabla 2. Composición del Escenario de Simulación

Número	Tipo de Unidad	Velocidad	Proporción Velocidad	Altura	Banda	LOS	Proporción LOS
Nodo 0	Buque 1	15 nudos	1	0 metros	VHF/UHF	20 millas	1
Nodo 1	Buque 2	15 nudos	1	0 metros	VHF/UHF	20 millas	1
Nodo 2	Submarino	5 nudos	0,33	-2 metros	VHF/UHF	10 millas	0,5
Nodo 3	Helicóptero	100 nudos	5	500 metros	VHF/UHF	60 millas	3
Nodo 4	Avión	130 nudos	6,2	1500 metros 7000 pies	VHF/UHF	60 millas	3

El propósito del diseño es establecer la capacidad de simulación del escenario futuro; este modelo debe tener suposiciones, es decir, todos los nodos deben estar en el rango de línea de visión; los nodos deben establecer comunicaciones en las mismas frecuencias, incluso si hay diferentes marcas de hardware.

2.4. Características técnicas del escenario marítimo.

De la información de la tabla 1, y las características del Sistema de Enlace de Datos Tácticos Colombiano (CTDL, *Colombian Tactical Data Link*), es posible inferir:

2.4.1. Movilidad de nodos

Según la configuración de CTDL, se considera una red moderada y de baja densidad (numeral 1 y 8 de las tablas 3 y 4).

2.4.2. Retrasos y latencia

En cuanto a este punto, son móviles y tienen baja velocidad en comparación con los vehículos terrestres o aeronaves [20] [21] [22], lo que hace que la latencia, los retrasos en la mensajería y la restauración de rutas sean manejables y tolerables. Sin embargo,

a medida que aumenta la velocidad de los nodos, estas variables se vuelven críticas debido a cambios más rápidos en las distancias entre los nodos de distribución (numeral 4 de las tablas 3 y 4).

2.4.3. Uso de ancho de banda.

Los nodos tienen diversidad de marca de equipos de comunicaciones, tecnologías, capacidades y prestaciones que limitarían el ancho de banda disponible y el uso y consumo del canal de comunicación. Estas limitaciones imponen tareas adicionales para controlar los mensajes necesarios para la operación de protocolos de enrutamiento (numeral 5 de las tablas 3 y 4).

2.4.4. Métrica de enrutamiento

Como ya se ha mencionado, no se espera que la red CTDL sea altamente congestionada; por lo tanto, los criterios de selección de ruta conducen a elegir la ruta más corta, que es más confiable que la menos ocupada (numeral 6 de las tablas 3 y 4).

2.4.5. Tamaño y la cantidad de nodos

CTDL es una red pequeña en comparación con los sistemas TDL estándar generados por la OTAN. Allí las redes pueden tener de dos a un rango entre 100 y 200 nodos o usuarios (por ejemplo, Link-22 [23], correspondientes al estado de la técnica de los TDL navales, que pueden manejar hasta 130 estaciones). CTDL tiene 25 nodos, ampliables hasta 100 en la red. Debido al tamaño de la red y a la carga de mensajería ligera por nodo, no se espera que el tráfico de información sea tan alto, lo que facilita el uso de la banda ancha (numeral 7 de las tablas 3 y 4).

2.4.6. Capacidad de multidifusión

La transmisión dirigida no se permite debido al uso de antenas omnidireccionales; pese a esto, el sistema puede transmitir, multidifusión o unidifusión cualquier comunicación según sea necesario. No obstante, la forma de la conversión es un problema de

optimización en el sentido de que la carga en los mensajes cambia con el tipo de difusión (numeral 9 en las tablas 3 y 4).

2.4.7. Gestión de Potencia

No es necesario como parte del estudio con respecto a que los nodos o unidades participantes tienen disponibilidad constante y sin restricciones de fuentes de alimentación (numeral 13 en las tablas 3 y 4).

2.4.8. Capacidad de retransmisión de nodos

Los nodos de red Ad Hoc y TDL deben poder servir simultáneamente como fuente y relé. El diseño CTDL tiene esta capacidad (numeral 14 de las tablas 3 y 4).

2.4.9. Uso de los temporizadores de expiración de la memoria caché de ruta/tabla

El CTDL utiliza información GPS en su mensajería para determinar la posición de los nodos entre la red establecida, así como una herramienta de sincronización cuando se utiliza Multiple Acceso con División de Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Acces*) como una técnica de acceso a medios; es decir, el uso de GPS podría aprovechar en protocolos que requieren sincronización en los temporizadores de expiración (numeral 15 en las tablas 3 y 4).

3. Estudio de Protocolos de Enrutamiento.

En este capítulo se abordará el tema de lo general o lo particular, se iniciará por definir que es una red Ad Hoc, como es su estructura y funcionamiento, luego definimos que es una red de enlaces tácticos de datos, como está estructurada, cual es la actualidad de ella y finalmente se describirá el tema en referencia del presente trabajo que es la estructura de los protocolos de enrutamiento.

3.1. Generalidades de una red Ad Hoc

De acuerdo con [1] en el capítulo 3 de su libro, define a una red Ad Hoc de esta manera:

“Es una colección de dos o más unidades o nodos equipados con comunicaciones inalámbricas y con capacidad para trabajo en redes, la comunicación entre los nodos es inmediata entre un radio de frecuencia directo o por fuera de este con otro nodo relevo, un nodo intermedio es usado como relevo o enlace para enviar un paquete de datos desde una fuente hasta un destino.”

Puntualmente se define que las redes Ad Hoc son auto organizadas y adaptativas, teniendo como principal característica que se arman en el “camino” sin la necesidad de un sistema que la administre. El término Ad Hoc hace referencia a que esta puede tomar cualquier forma, puede ser móvil, funcionar de manera autónoma o en una red.

En [24] se definen como redes inalámbricas cuya cobertura puede ser mas allá de la línea de vista y del alcance directo de las ondas de radio, debido a que los nodos no son fijos por el contrario son dinámicos y pueden actuar también como nodos relevo extendiendo el alcance más allá del horizonte, como su nombre lo indica son redes Ad Hoc o temporales en donde los interesados, no importa su cantidad, pueden intercambiar información y servicios estipulados para la red.

Este tipo de redes encuentra utilidad en situaciones donde se debe establecer una red de datos inalámbrica de emergencia o con apremio como lo son los desastres naturales en donde se hace necesario coordinar servicios de manera eficiente o inclusive acceder

a información remotamente, igualmente en situaciones donde el ambiente es hostil, inhóspito o de difícil acceso como el mar, el desierto o la selva.

Retomando lo establecido en [1], las redes Ad Hoc estructuralmente están organizadas por la dinámica de su uso, por un lado, la heterogeneidad de los equipos a usar (terminales y nodos) que afectan el desempeño en las comunicaciones y/o el diseño de los protocolos, es evidente que estos son diferentes en su forma, tamaño, peso, software, y marca entre otras. Básicamente la capacidad de estos a integrarse a la red depende de la capacidad de computación, memoria, capacidad de la batería etc., en si caracterizando cada posible nodo de la red.

En la actualidad se considera necesario y esencial contar con una red MANET especialmente en aplicaciones militares y en situaciones de desastres, los sensores permiten de forma remota recolectar información vital para tomar decisiones en tiempo real que salvarían muchas vidas y previenen situaciones adversas, los sensores son diferentes tamaños y características van desde los micro sensores como los usados en la industria de la salud que monitorean información crítica para mantener la vida, en la industria de las comidas son usados en el control de calidad, los de meteorología son usados para la recolección de datos de humedad y temperatura entre otros permitiendo conocer al minuto el estado del tiempo y sus condiciones atmosféricas, y así podrían existir diversas aplicaciones en el mundo real; sin embargo, las redes Ad Hoc serían una de las formas como se podrían conectar este tipo de unidades para compartir la información de acuerdo con las circunstancias y necesidades.

la ventaja de hacerlo a través de las redes Ad Hoc es que se pueden conectar cuantos nodos se requieran y manejar la información pertinente y requerida en el tiempo real, las redes Ad Hoc podrían satisfacer la necesidad en el manejo de la información teniendo en cuenta sus características como marcas de los equipos de comunicación, conservación potencia, protocolos de eficiencia de energía, computación distribuida, escalabilidad, disseminación de datos y seguridad, entre las más importantes.

Las redes Ad Hoc por su estructura permiten utilizar diferentes perfiles de tráfico, en el caso que se establezca un enlace entre dos terminales o nodos sin intermediarios y durante un periodo de tiempo se puede decir que se estableció un enlace punto a punto,

otro perfil que se presenta es cuando se establece comunicación entre varios usuarios o nodos en un periodo prolongado y que pueden migrar o cambiar en grupos a éstas se le llama remoto a remoto, y finalmente existe un perfil donde los nodos o usuario se enlazan de una forma no coherente, con sesiones cortas, abruptas e indeterminadas a estas se les llama Híbridas.

En las redes Ad Hoc es esencial es el tipo de movimientos o dinámica del *host* ya que estos determinan y validan el enrutamiento en sí, el primer tipo de movimiento es la ruta entre nodos, para que esta exista se necesita una fuente, un destino y un número determinado de nodos intermedios, el nodo fuente establece un *downstream link* (enlace entre un proveedor hacia un usuario) y cuando este se mueve fuera del radio de cobertura de sus nodos vecinos, el enlace se convierte en inválido, así todos los nodos vecinos tienen que ser informados para borrar la ruta en mención, lo mismo sucede con los nodos destino cuando este se mueve fuera del radio de cobertura de los nodos destino que realizan un *upstream link* (enlace entre el usuario hacia la fuente), al igual de los nodos fuente o destino para los nodos intermedios salirse del radio de cobertura de sus vecinos implica que se invalide la ruta. Todo este tipo de movimientos determinan la implementación de protocolos distribuidos de enrutamiento que respondan de inmediato a los cambios de enlaces entre nodos, de esta forma se hace necesario contar con un gran ancho de banda para la radiodifusión y actualización de los radioenlaces, esto se convierte en ineficiencia, pérdida del ancho de banda y de tiempo. Es así como para solucionar este inconveniente se hace necesario la implementación de otros protocolos.

Otro escenario son los movimientos de nodos de enlace entre subredes, esto hace referencia al nodo o nodos de una red capaces de dividir la red en dos o más subredes, en la figura 7 [1] se observa como el nodo que está en la intersección fraccionó la red en dos subredes. Los protocolos de enrutamiento pueden aceptar estas subredes, pero tienen que actualizar todas las tablas de enrutamiento, esto resulta ser ineficiente y el protocolo debería únicamente actualizar las tablas asociadas a los nodos afectados.

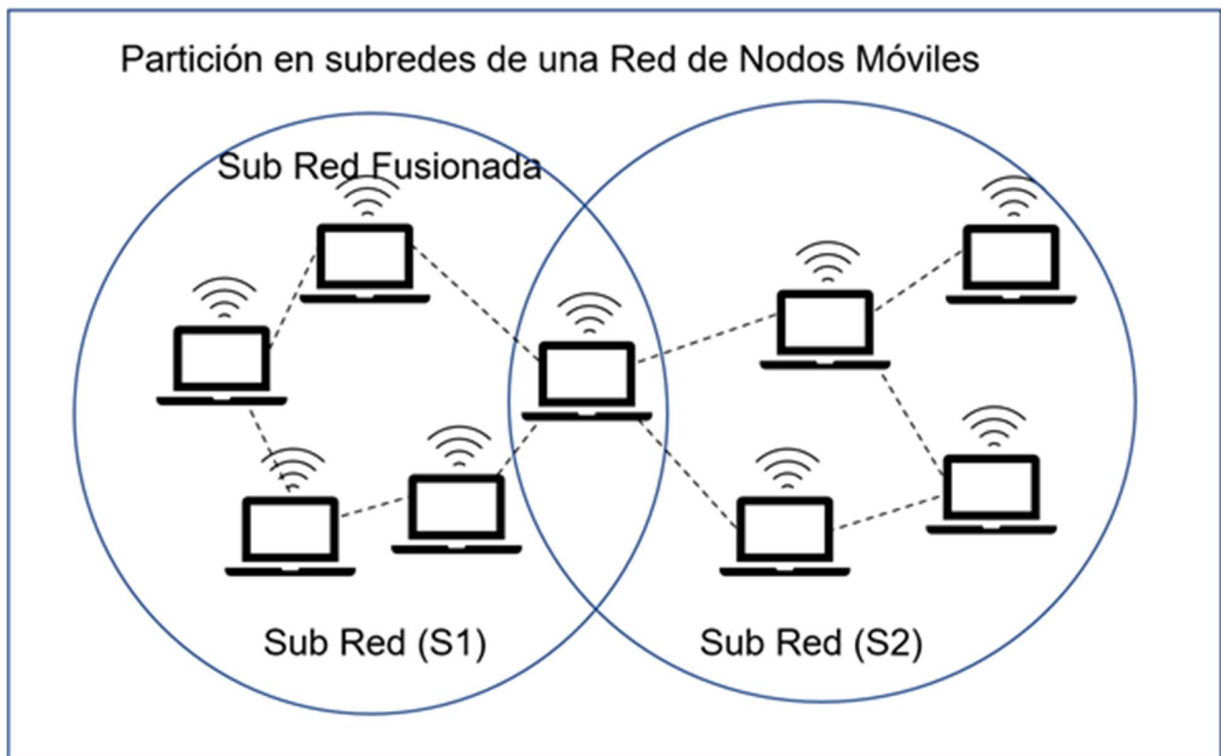


Figura 7. Partición de una red

En la realidad se ha estipulado que el movimiento entre los nodos fuente, intermedios y destino son concurrentes y se necesitan reglas que garanticen la consistencia de la red especialmente cuando esta se tiene que reconfigurar o reparar, este proceso finalmente converge la mejor ruta reconfigurada que garantice el enlace.

Algunas consideraciones para tener en cuenta que hace [1] en especial a los retos y dificultades que se esperarían al usarlas son:

El derecho y uso del espectro electromagnético que depende mucho de las regulaciones específicas de cada país, en cuanto a las pruebas de funcionamiento y desempeño de las redes Ad Hoc. Estas podrían ubicarse en la banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) o en la banda U-NII [25] (5.1 GHz a los 5.925 GHz) de acuerdo con el uso requerido. En una aplicación real, las redes Ad Hoc deben funcionar en la forma que no genere interferencias en el espectro cuidando, respetando siempre la normatividad específica para la región, igualmente se deben tener en cuenta que en ocasiones el uso del espectro no es gratis y hay que adquirir la respectiva licencia.

A diferencia de las redes WLAN y las redes móviles celulares que mantienen un control centralizados, las redes Ad Hoc no; así las cosas, los esquemas tradicionales TDMA FDMA no aplican, adicionalmente algunos protocolos para el Control de Acceso al Medio (MAC, *Media Access Control*) tampoco pueden funcionar con nodos móviles. [1] define que la única forma de lograr los enlaces en donde diferentes equipos comparten la misma información a través de diferentes nodos debe ser de una forma distribuida, especialmente porque en las redes Ad Hoc los nodos son móviles y no existe un controlador centralizado haciendo que la presencia de nodos móviles, y terminales no visibles, entre otros, sean tenidos en cuenta a la hora del diseño del protocolo MAC.

La presencia de nodos móviles implica que los enlaces se puedan interrumpir de una forma indeterminada, el tema ha sido ya caracterizado y en la presencia de nodos móviles implica que los enlaces se puedan interrumpir, en el ítem 3.2 de este capítulo se extenderá la explicación, básicamente los redes Ad Hoc demandan una caracterización basada en tipos de protocolos reactivos o proactivos que de acuerdo a su aplicación tienen ventajas y desventajas pero que al final deben garantizar que los enlaces se mantengan el tiempo que sea necesario.

En este tipo de sistemas, el tema del manejo de la energía adquiere relevancia debido a que los equipos que se conectan normalmente son móviles y utilizan fuentes de energía como baterías cuyas cargas son limitadas por el tiempo y por el uso, adicionalmente, las unidades no solo actúan como tal si no que también se convierten en nodos móviles que consumen energía.

El desempeño de Protocolo de Control de Transmisión, Protocolo de Internet (TCP-IP, *Transmission Control Protocol Internet Protocol*,) implica que en el diseño de la red se tenga en cuenta que el control de transmisión intrínsecamente asume que los nodos son estáticos y la media del Tiempo de Ida y Vuelta (RTT, *Round -Trip Time*) es relativamente estable, sin embargo, el TCP no distingue la presencia de nodos móviles y la congestión de la red que deriva de la misma, generando así que haya pérdidas de paquetes y se aumente el RTT, así, cobran importancia los cambios que se realicen para garantizar que TCP funcione bien y no afecte la tasa de transmisión de datos.

En cuanto a la seguridad y privacidad son aspectos determinantes en especial en usos militares. Una ventaja es que por su naturaleza las redes Ad Hoc son intranet y están

aisladas a menos que se conecten a internet, sin embargo, se pueden implementar códigos de encriptación para brindar mayor seguridad y protección tanto de la red como de la información.

Para definir una red de datos tácticos primero se debe entender su origen, básicamente todos se estructuran bajo una pirámide organizacional, existe un nivel estratégico, directivo o político, un nivel inferior de carácter operativo y otro nivel aún menor que es el táctico, este último hace referencia al nivel donde se trabaja, donde se realizan las cosas, donde se construye físicamente de una forma organizada y con una metodología específica.

La Real Academia de la Lengua [26] define que la táctica es exegéticamente hablando la habilidad de poner orden, también señala que la táctica naval es el arte de disponer, mover y emplear la fuerza bélica para el combate. Igualmente, el Departamento de Defensa de E.E.U.U. lo define en su diccionario [27] como un enlace de comunicación estandarizado adecuado para la transmisión de información digital, que interconecta dos o más sistemas de mando y control o armas a través de una arquitectura de red única o múltiple y múltiples medios de comunicación para el intercambio de información táctica, también llamado TDL.

En si una Red Táctica de Datos es una red Ad Hoc con un fin específico. En la figura 8 [por Autor] se pueden detallar los componentes funcionales de una red táctica en donde la comunicación inicia a través de un nodo compuesto por un usuario, un MMI, un módulo procesador y un equipo de radio que le permite salir al medio, cada nodo está configurado de igual manera y también le permite recibir y hace parte de la red.

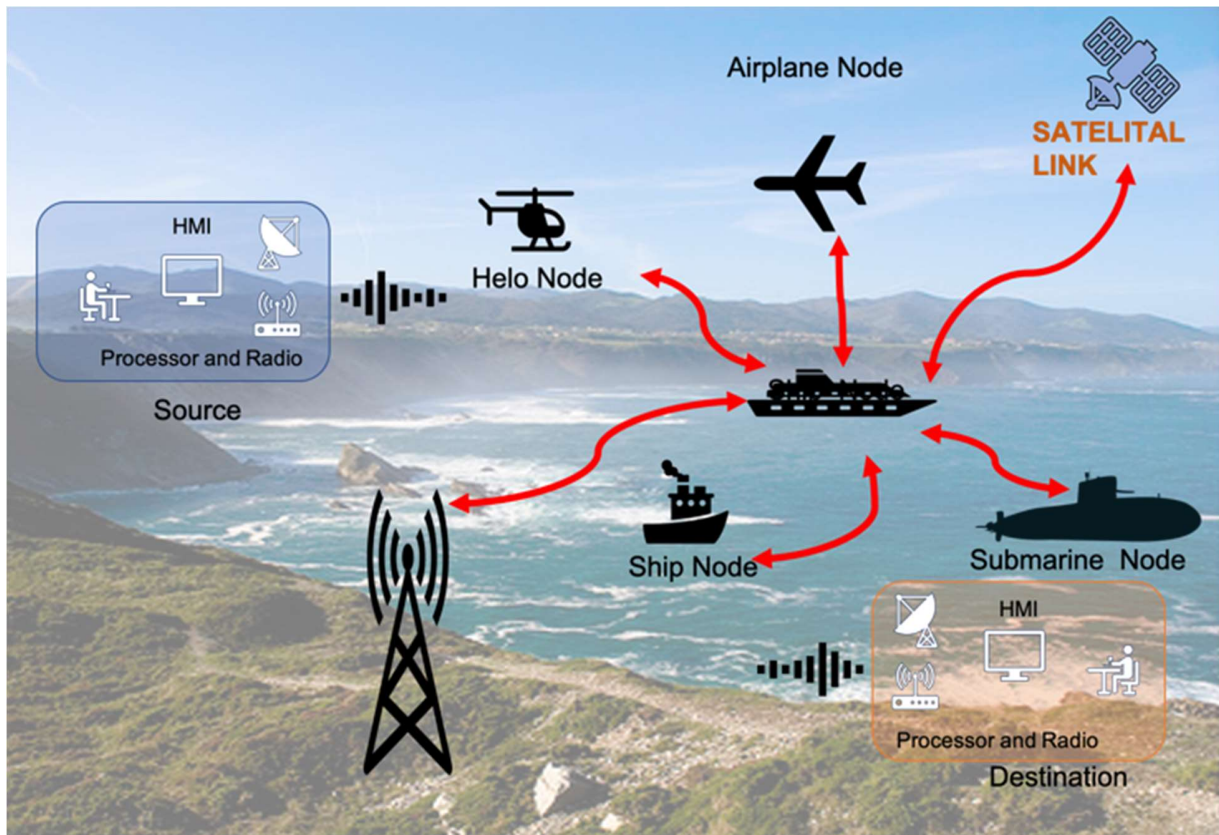


Figura 8. Descripción de una Red Táctica Básica

En un artículo clásico de 1985 [28] se describe de forma clara qué es un *Tactical Data Link*, definiéndolo como un enlace necesario para mantener la capacidad de evaluación de la situación actual de las unidades militares comprometidas en situaciones especiales las cuales requieren un rápido intercambio de información de comando y control (C²) que normalmente solo puede ser controladas por un sistema automático de distribución de datos. El sistema está compuesto procedimientos, procesos, métodos y personal, esto incluye el procesamiento de datos y demás equipos físicos diseñados para recolectar, desplegar, evaluar y diseminar datos con el propósito de dar asistencia al usuario final para la toma de decisiones en entornos militares, aéreos, navales y marítimos específicos, el TDL está compuesto físicamente de equipos electrónicos, incluyendo protocolos y mensajes que permiten la transmisión de datos en forma digital, en la figura 8 se observa cómo va la comunicación de usuario 1 a usuario 2, y en la figura 9 [28] se muestra como está configurado físicamente desde el MMI que aporta información por parte del usuario a través de los sensores propios, el módulo de distribución de datos,

seguido por el sistema automático de procesamiento de datos y hasta el procesador de sensores.

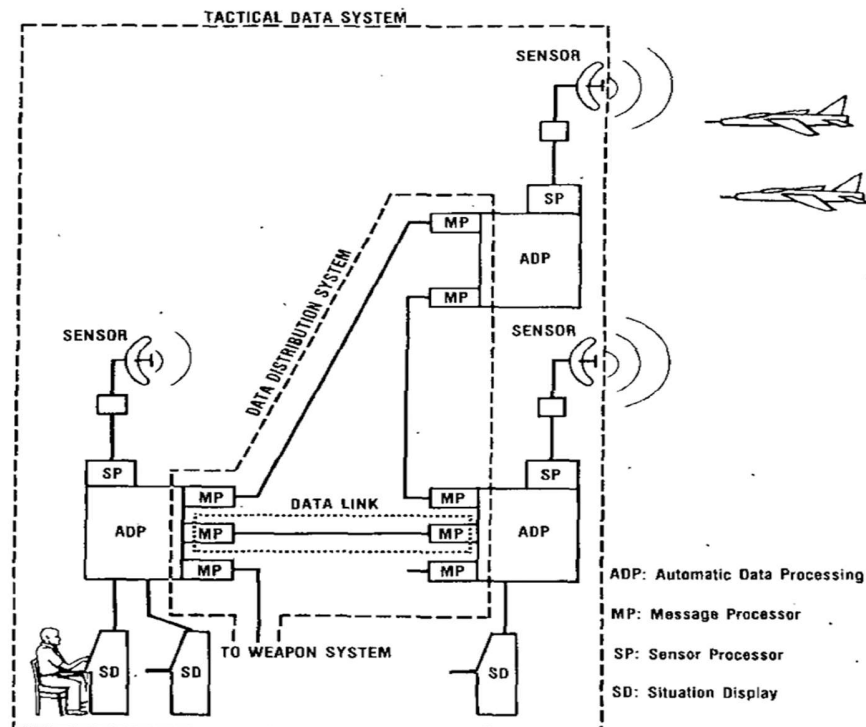


Figura 9. Descripción del Sistema Táctico de Datos

En una forma simple, para salir al aire se hace necesario un protocolo MAC (*Media Access Protocols*) que utiliza un canal definido, los protocolos MAC son una serie de reglas y procedimientos que permiten el uso eficiente de un canal compartido para comunicarse entre usuarios, cada nodo o usuario actúa además como terminal final, como un *router* o retransmisor de información, sin embargo, una vez se tiene el acceso al medio se hace necesario también tener un protocolo de enrutamiento que permita establecer y mantener el enlace.

Aquí es donde inicia el tema de investigación para lograr determinar cuál es el protocolo de enrutamiento en una red Ad Hoc de enlaces de datos tácticos en escenarios marítimos que más convenga. En la siguiente sección se describen la clasificación y tipos de protocolos.

3.2. Clasificación de los protocolos de enrutamiento

A través de la historia de las redes Ad Hoc su clasificación no ha variado, en [16] se clasifican los protocolos en *Table-Driven* o proactivos y los *On-demand* o reactivos.

Un tipo particular de las redes Ad Hoc son las Redes Ad Hoc Móviles (MANET *Mobile Ad Hoc Network*), de acuerdo con [24] son nodos móviles que no tienen una posición fija en el orden para entablar un enlace de comunicación se hace necesario encontrar y determinar cuáles serán las rutas de comunicación entre estos nodos o usuarios.

Otra aproximación se hace en [29] donde no solo se limita a la clasificación general, sino que se describe otro tipo de clasificaciones como son:

- De acuerdo con el modelo de comunicación, si se usa un canal múltiple o único.
- De acuerdo con su estructura, si los nodos son uniformes, es decir, que todos los nodos envían y responden de la misma forma, no hay jerarquía o si por el contrario no son uniformes y tienen una estructura jerárquica y se caracteriza por tener nodos que su actividad de enrutamiento está dada por la vecindad o donde los nodos son particionados.
- De acuerdo con el estado de la información, lo protocolos se catalogan con el criterio de cómo cada nodo obtiene la información y/o como la intercambia con otros nodos llamados protocolos de base topológica. La otra clasificación de este criterio son los basados en el destino, estos no almacenan toda la información topológica sino la inherente de sus vecinos próximos.
- De acuerdo con su programación, esta es la típica clasificación conocida y ya mencionada que depende si la información es enviada continuamente que son los proactivos, y están los que la información es envía de forma irregular que son reactivos
- De acuerdo con el modo de transmisión en Unicast o Multicast.

Finalmente, los protocolos, independientemente de cómo se clasifiquen existen según las necesidades específicas y se pueden encasillar de acuerdo con cualquiera de las categorizaciones antes mencionadas.

Para el presente trabajo se tipifico con arreglo a su programación y a continuación se describe su composición:

3.2.1. Protocolos proactivos

Los protocolos proactivos en [30] lo explica como una serie de paquetes utilizados para hallar nodos en la red y el camino para llegar desde y hacia ellos, esto bajo la suposición de que en algún momento todos estos caminos ya definidos serán usados, normalmente se utiliza una tabla para mantener la información de las rutas actualizada de aquí su nombre *Table Driven*, la principal ventaja es que los nodos siempre tienen la información de las rutas y establecen el enlace de manera sencilla, sin embargo, la desventaja radica en que existe mucha información en cada nodo y el proceso de actualización es lento en especial cuando hay una caída en los enlaces. [31] menciona que este tipo de protocolos de enrutamiento son usadas en redes de tamaño pequeño y con alta densidad de tráfico debido a la ventaja en el flujo constante de información. A continuación, se describen los principales protocolos que pertenecen a esta categoría:

3.2.1.1. Vector distancia secuenciado en destino

El enrutamiento por Vector de Distancia Secuenciado en Destino (DSDV, *Destination-Sequenced Distance-Vector*), se encuentra definido en [32] como un protocolo proactivo basado en la distribución clásica Bellman-Ford, la mejora realizada fue la evasión de los lazos de enrutamiento dentro de la red, cada nodo de la red mantiene una tabla con la información que incluye todos los posibles destinos y todos sus posibles nodos de relevo, de esta forma la información de las rutas siempre estará disponible sin importar si el nodo origen requiere o no la ruta, cada entrada está marcada con un numero secuencial asignado por el nodo de destino, esto permite que los nodos relevo distinguan entre una ruta vaciada y una nueva, evadiendo así los lazos de enrutamiento, las actualizaciones de estas tablas son constantes y son enviadas a la red para mantener la consistencia, esto genera un gran tráfico en la red lo que repercute en ineficiencia a la hora de usar los recursos de la red.

Para mejorar este inconveniente en la eficiencia se usan dos tipos de paquetes de actualización de las tablas, el primero se le llama vaciado completo (*full dump*) este tipo de paquetes lleva toda la información relaciona con el enrutamiento y requiere de un

Protocolo de Unidades de Datos en Redes Múltiples (NPDUs, Multiple Network Protocol Data Units), y el segundo funciona durante los periodos de escaso movimiento en la red, se transmite ocasionalmente y en mensajes pequeños incrementales solo para los nodos relevo que haya cambiado de status desde el ultimo vaciado completo en la red.

Cada nueva emisión contiene la dirección del nodo destino, el número de relevos que tiene que realizar para alcanzar el destino, el número secuencial de la información referente al destino, como también un nuevo número único secuencial de emisión. La ruta marcada con el numero secuencial más reciente en orden ascendente siempre es usada, en el evento que dos rutas tengan el mismo número secuencial se escoge la que tenga menores relevos. El protocolo DSDV [16] también mantiene registro del tiempo para establecer la ruta o un tiempo promediado ponderado de variación antes de que la ruta con mejor métrica es recibida. Para mejorar la eficiencia el protocolo retarda la emisión de la actualización de las rutas teniendo en cuenta el tiempo de establecimiento de la red, así se puede reducir el tráfico de red y se elimina la emisión que ocurriría si una mejor ruta se encuentra en un futuro muy cercano, es decir baja la tasa de actualización en mejora del tráfico.

3.2.1.2. Protocolo de enrutamiento inalámbrico

El Protocolo de Enrutamiento Inalámbrico (WRP, *Wireless Routing Protocol*), de acuerdo con [33] y [34] los cuales abordan el protocolo en como alcanza los enlaces libres o directos, es un protocolo proactivo cuyo objeto es mantener la información completa en todos los nodos en la red, este funciona típicamente para encontrar rutas, con la diferencia que evita el problema de conteo hasta infinito [35] forzando a que cada nodo realice un chequeo de consistencia en la información con el predecesor y con todos sus vecinos, esto elimina que se creen lazos y provee una rápida convergencia en el encuentro de la ruta, especialmente cuando el enlace se rompe.

Cada nodo tiene que mantener cuatro tablas:

- 1) Tabla de distancia, es el número de nodos entre la fuente y destino.
- 2) Tabla de enrutamiento, indica cuál es el próximo nodo relevo.

- 3) Tabla de costo-enlace, refleja el retardo asociado con un enlace en particular.
- 4) Tabla de Lista de Mensajes de Retransmisión (LMR, *Retransmission Message List*) contiene un numero secuencial del mensaje de actualización, un conteo de la retransmisión, una confirmación de una bandera-vector con una entrada por nodo vecino, y una lista de actualizaciones enviada en el mensaje de actualización.

El LMR registra cual actualización del mensaje de actualizaciones necesita ser retransmitido y cuales nodos vecinos necesitan confirmar la retransmisión y así sucesivamente, básicamente lo que el protocolo logra es descongestionar el tráfico tratando de que la información solo vaya por la ruta indicada y no por toda la red.

El proceso es el siguiente: cada nodo envía una actualización después de haber procesado la información que llega desde sus vecinos o cuando se detecta un cambio en un enlace con su vecino, en el caso que se pierda un enlace entre dos nodos, los nodos envían un mensaje a sus vecinos, entonces los nodos vecinos modifican la tabla de distancias y verifican la posibilidad de nuevas rutas a través de otros nodos, la nueva ruta es retransmitida al nodo original para que vaya ajustando y así reestablecer el enlace.

Cada nodo aprende de la existencia de un vecino cuando recibe la Confirmación (ACK, *Acknowledgment*) entre otros mensajes, si un nodo no está enviando mensajes debe enviar periódicamente un mensaje *hello* para garantizar la conectividad de otra forma se entiende que hay una falla en el enlace que se interpretaría como una falsa alarma. Cuando un nodo recibe *hello* de un nuevo nodo este se une a la tabla de enrutamiento y a su vez le envía al nuevo nodo un mensaje de actualización con la información de las cuatro tablas.

3.2.1.3. Enrutamiento a través de nodos cabeza de racimo y nodos tipo puerta de salida.

El enrutamiento a través de nodos cabeza de racimo y nodos tipo puerta de salida CGRS difiere a los anteriores que son de organización plana, el CGRS es jerárquico y utiliza una red móvil tipo racimo (*cluster*) multi salto con varios esquemas heurísticos, [36] menciona que con un nodo tipo cabeza de racimo controlando un grupo de nodos Ad Hoc, un sistema de separación de códigos entre clústeres y un acceso al canal, se puede alcanzar

el correcto enrutamiento y la debida distribución del ancho de banda. Se usa un algoritmo distribuido de selección dentro del clúster para escoger el nodo cabeza de racimo. Uno de los inconvenientes de este esquema son los cambios frecuentes del nodo cabeza de racimo afectando el desempeño general del protocolo debido a que los nodos están ocupados en el proceso de selección y no realizan su tarea de nodos relevo. Así las cosas, en lugar de invocar un proceso de reelección cada vez que la membresía del clúster cambia, se corre un algoritmo nombrado Mínimo Cambio de Clúster (LCC, *Least Cluster Change*) en donde la cabeza solo cambia cuando dos cabezas racimo entran en contacto o cuando un nodo sale del alcance de todas las otras cabezas de racimo.

CGSR utiliza el protocolo DSDV como base y por ende con la misma carga del DSDV, sin embargo, existe una modificación con una aproximación a un enrutamiento jerárquico de nodo cabeza de racimo a nodo puerta de salida (nodo puerta de salida se podría definir como nodo relevo clúster, pero así es denominado en [36]) en el tráfico desde la fuente hasta el destino. Los nodos puerta de salida están dentro del rango de comunicación entre dos o más nodos cabeza de racimo. Un paquete enviado por un nodo fuente primero es encaminado a un nodo cabeza de racimo luego el paquete es retransmitido por el nodo cabeza de racimo a otro nodo cabeza de racimo a través del relevo efectuado por los nodos puerta de salida, y así sucesivamente hasta que se alcance el nodo cabeza de racimo en donde se encuentre el nodo destino y así es como se transmite un mensaje desde un nodo fuente a un nodo destino. La figura 10 [16] es un ejemplo de este esquema de enrutamiento. Usando este método cada nodo debe tener una tabla de membresía del clúster donde se almacena la información de destino al nodo cabeza de racimo en su red, estas tablas son periódicamente difundidas a través del protocolo DSDV, todos los nodos actualizan la tabla de membresía del clúster a través de la transmisión de uno de sus nodos vecinos.

Adicionalmente a la tabla de membresía del clúster cada nodo debe mantener una tabla de enrutamiento que es usada para determinar el siguiente nodo relevo para alcanzar el nodo destino, cuando un nodo recibe un paquete en primero consulta su tabla de membresía del clúster y después la tabla de enrutamiento para determinar el nodo cabeza de racimo más cercano en la ruta, seguidamente vuelve y verifica su tabla de enrutamiento para determinar el próximo nodo relevo para alcanzar el nodo cabeza de racimo y así transmitir el paquete a ese nodo.

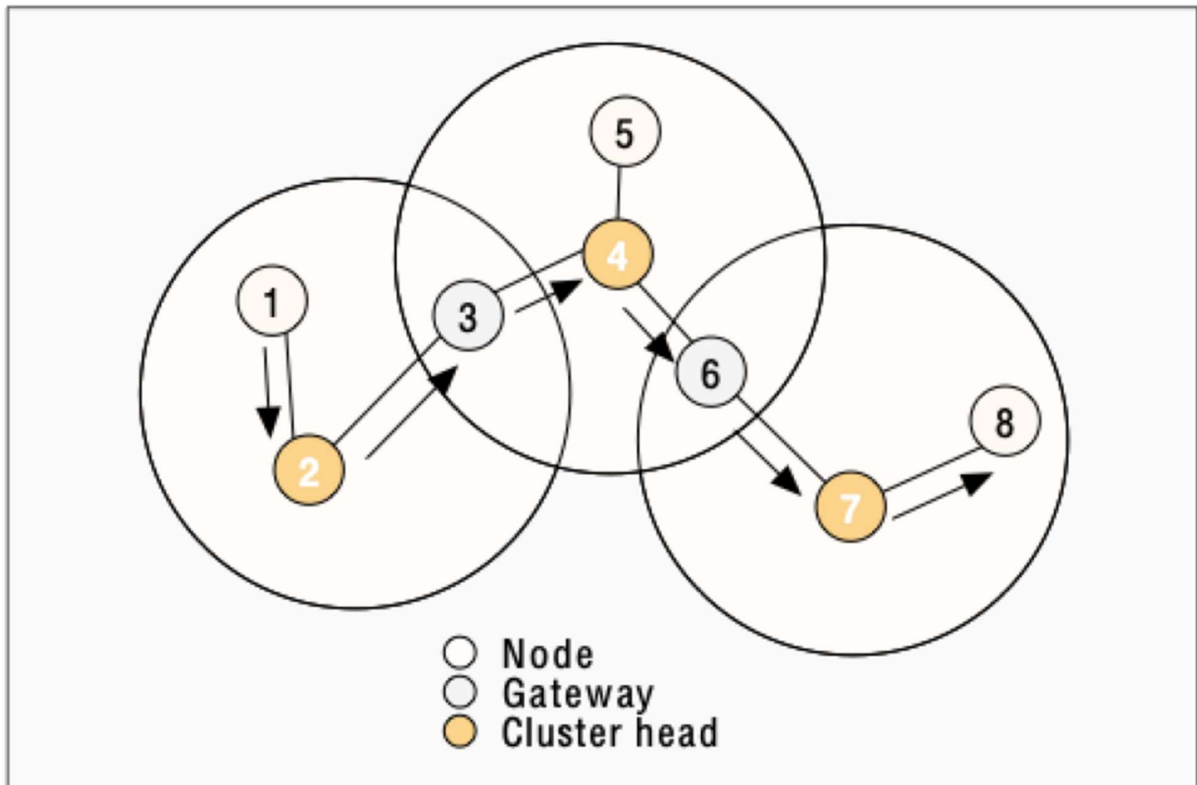


Figura 10. Protocolo CGRS ruta del nodo1 al 8.

3.2.1.4. Tipología de difusión basada en rutas desde y hacia

En referencia a la tipología de difusión basada en rutas desde y hacia TBRPF, [37] en un *Internet-Draft* que es un documento de trabajo o documento en progreso define este protocolo de enrutamiento como de enlace-estado (*Link-State*) el cual provee la información del estado de cada enlace y en cada nodo de la red, en teoría es más eficiente que los protocolos del tipo *flooding* (*inundación*) que envían la información completa a cada nodo de la red y la actualización se envía por todas las posibles rutas a cada nodo, además, cada nodo reenvía cada actualización a sus nodos vecinos inclusive cuando un solo nodo vecino necesita de la actualización. TBRPF elimina estos inconvenientes usando la técnica de “*reenvío de la ruta de vuelta*” para emitir la actualización de cada estado-enlace de una forma confiable, segura y eficiente través de la ruta con menos relevos desde la fuente.

Básicamente esta técnica emite la actualización del estado de enlace de cada nodo en la dirección contraria a lo largo del árbol de expansión formado por el mínimo de relevos

en la ruta desde todos los nodos hasta el nodo fuente, su reajuste es dinámico usando la información topológica que recibe a través del árbol de expansión por sí misma, de esta forma requiere un costo mínimo adicional para mantener el enlace, normalmente los protocolos proactivos buscan la ruta más corta basada en algún tipo de métrica mientras que este protocolo busca la ruta con menos saltos o nodos relevo en su camino así requiere actualizarse con menos frecuencia. Entre sus ventajas se encuentra que la información de las rutas alternas y las rutas rotas están inmediatamente disponibles permitiendo que la red se levante más rápido en una falla o ruptura en los enlaces o en un cambio en la topología de la red. [37] determinó que, debido al tipo de mejora, se puede establecer como un protocolo mixto, sin embargo, a este punto se considera un protocolo proactivo.

Aunque fue mencionado en el Anteproyecto, la información recolectada es incipiente y no se han encontrado referencias más avanzadas sobre su desarrollo que permitan determinar y evaluar sus características por ende no será tenido en cuenta para el análisis final de comparación de protocolos proactivos.

3.2.2. Protocolos reactivos

[24] define a esta categoría como los protocolos que solo crean rutas dentro de la red cuando un nodo fuente lo requiera, una vez que la ruta se ha establecido es mantenida por un procedimiento hasta cuando el destino se vuelva inalcanzable o que la ruta ya no sea necesaria. Se menciona en [30] que estos se ajustan de mejor forma a redes pequeñas con baja cantidad de nodos y patrones de tráfico estáticos y son preferidos en una red con alta movilidad.

En [38] se plantea que este tipo de protocolos comparados con los proactivos consumen mayor potencia y presentan mayor retardo en los mensajes, la flexibilización en las operaciones se da al reducir las cargas en las rutas teniendo en cuenta que no se forman lazos en las redes.

3.2.2.1. Protocolo Ad Hoc en demanda

El protocolo AODV, como se establece en [39], es una variación del protocolo DSDV en el sentido que este minimiza el requerimiento del sistema de emitir a toda la red hasta sus extremos, no mantiene rutas desde cada nodo de la red a otro nodo de la misma, al contrario este busca las rutas solamente cuando son requeridas e igualmente mantiene la ruta solamente en el periodo de tiempo que es usada. Finalmente señala cuáles son los pasos claves para establecer un protocolo del tipo AODV así:

1) *Búsqueda de la Ruta*, primero cuando un nodo fuente quiere enviar un paquete de información verifica si en las tablas existentes hay una ruta hacia el nodo destino, en caso de que no halla ruta en la tabla se inicia el proceso de búsqueda el cual consiste en utilizar un mensaje de Solicitud de Ruta (RREQ. *Route Request*) y un mensaje de Respuesta de Ruta (RREP, *Route Reply*), el nodo fuente crea un paquete RREQ que contiene, su dirección IP, número secuencial actual, dirección IP de destino, último número secuencial del nodo destino y el ID de emisión. El número ID de emisión se incrementa de forma secuencial cada vez que el nodo fuente inicia un proceso de búsqueda. Básicamente los números asignados de forma secuencial tienen como propósito el control de la línea de tiempo de cada paquete de datos. El conjunto del ID de emisión y la dirección del nodo de destino forman una única identificación para cada RREQ, de esta forma se individualiza cada paquete. Se inicia con un mensaje de requerimiento por parte del nodo fuente a todos sus nodos vecinos, el cuál contiene la información relacionada con la creación de la ruta que debe ser devuelta con mensaje RREP y enseguida se inicia un conteo de tiempo para esperar la respuesta. Cada nodo relevo para procesar el requerimiento establece un camino de retorno en su tabla hacia el nodo fuente, esto es lo que ayuda al RREP a llegar al nodo inicial. La línea de tiempo está asociada con el retorno y si esta no es usada en el tiempo establecido por el nodo fuente, la información es borrada, igualmente si el RREQ se pierde durante la transmisión, se le permite al nodo fuente iniciar nuevamente el mecanismo de búsqueda de ruta.

2) *Técnica de expansión del anillo de búsqueda*, el nodo fuente emite el paquete RREQ a todos los nodos vecinos y/o relevos los cuales sucesivamente hacen lo mismo con sus otros nodos vecinos, para el caso de redes muy grandes se hace necesario tener un control de emisión, para esto el nodo fuente utiliza la técnica de *expansión del anillo de búsqueda* para lo cual se establece un valor

definido para el Tiempo de Vida (TTL, *Time to live*) a partir de un valor inicial, si no hay respuesta en este periodo de búsqueda el RREQ se vuelve a emitir con un TTL aumentado en un valor ya determinado, el proceso de incremento continua hasta que se alcanza el umbral predeterminado que garantice que el paquete RREQ ha sido emitido a toda la red.

3) *Establecimiento de la ruta*, cuando el nodo destino o los nodos relevo reciben un RREQ crean un RREP el cual es emitido en una sola dirección al nodo fuente usando la ruta de vuelta, cuando el RREP es emitido y recibido por un nodo relevo, se establece una entrada para la nueva ruta en su tablas y en el momento que el mensaje RREP llega al nodo fuente significa que se ha establecido el enlace y puede empezar a transmitir.

4) *Mantenimiento de la Ruta*, es mantenida mientras esta sea necesitada por la fuente, hay que tener en cuenta que los nodos en una red Ad Hoc son móviles y se presentan rupturas en los enlaces reiniciando un proceso de búsqueda para establecer una nueva ruta. El nodo donde se produjo la falla inicia una cadena con el mensaje de Error de Ruta (RERR, *Route Error*) a los nodos vecinos afectados, consecuentemente se propaga el mensaje de error a su predecesor, este proceso continua hasta que el mensaje llega a la fuente, cuando es recibido puede enviar datos o reiniciar el mecanismo de búsqueda mandando un nuevo mensaje RREQ si es necesario.

Una de las ventajas es que este protocolo siempre selecciona la ruta menos congestionada en lugar de la mas corta, y también posee la capacidad de realizar emisiones de paquetes en forma unidireccional y multidireccional según convenga inclusive si los nodos aún se están moviendo, también responde muy rápido a los cambios topológicos. El protocolo no establece cargas adicionales a los paquetes de información transmitidos la red.

Entre sus limitaciones se encuentra que se espera o se requiere que los nodos relevos y/o intermedios en el medio de emisión puedan detectar las emisiones entre ellos mismos, también se pueda dar que una ruta válida expire por la línea de tiempo la cual es difícil de determinar con precisión, esto puede ser debido a que los nodos son móviles

variando los tiempos de forma aleatoria cambiando de forma dramática de nodo a nodo también si la red crece varias medidas de desempeño decrecen. El protocolo AODV es vulnerable a ataques de varias clases y este funciona con la presunción de que cada nodo coopera, pero porque sin su cooperación no se puede establecer la ruta.

3.2.2.2. Búsqueda de ruta a partir de una fuente dinámica

En la búsqueda de ruta a partir de una fuente dinámica DSR en [30] se define como un protocolo que basa su enrutamiento en el origen. Cada nodo tiene una memoria cache local para almacenar la información relacionada con la ruta y la topología existente. Se podrían establecer dos posibilidades para el almacenamiento, una es la cache de trayecto la cual almacena la ruta a partir de sí mismo hacia otro nodo, y la otra es el cache de enlace en el cual adiciona un enlace a un gráfico que representa la topología de la red, los enlaces obtenidos de diferentes rutas podrían formar nuevas rutas por ende el cache de enlace maneja mayor información que el cache de trayecto. En [39] se describe que el protocolo es apropiado en redes que necesiten relevos móviles. Este protocolo maneja dos componentes fundamentales que son:

- 1) *Búsqueda de ruta*, cada nodo tiene una memoria cache donde almacena las búsquedas más recientes. Cuando se desea enviar paquetes, primero se debe verificar si esta la entrada del nodo en la cache, si está allí, entonces utiliza esa para transmitir y adiciona la dirección de origen en el paquete. Si por el contrario al verificar la entrada no se encuentra o el tiempo de espera ha expirado en la memoria cache, el nodo fuente emite un paquete de requerimiento a todos los vecinos interrogando acerca de la ruta al destino esperando hasta que sea encontrada, durante este periodo el nodo original puede ejecutar otras funciones como los son reenvío de paquetes. Cuando el mensaje de requerimiento llega a cualquier nodo relevo, se verifica en la cache propia o de sus vecinos si el requerimiento es conocido o no, si es conocido, se envía una respuesta al destino porque si no se estaría enviando el mismo paquete de requerimiento. Cuando la ruta es encontrada se inicia la transmisión de la información, igualmente se registra una entrada adicional a la cache para futuros usos, cada nodo mantiene la información del

tiempo transcurrido desde la última entrada de cache a la actualidad con el objeto de tener la información de que si es reciente o no. Cuando un nodo relevo le llega un paquete el primero verifica si es el destinatario o no, si es para él lo recibe (manda el paquete de respuesta) y si no lo reenvía tal cual.

2) *Mantenimiento*, este proceso debe ser capaz de detectar en las rutas activas si la topología de la red ha cambiado, en el sentido de que la ruta establecida ya no se pueda usar o que el enlace no funcione. En el instante en que un nodo presente una novedad se verifica si existe otra ruta al destino, o si no, puede iniciar nuevamente el proceso de búsqueda, en cualquier caso consecuentemente cada nodo cambiará la entrada en la cache. El proceso de mantenimiento solo es usado durante el tiempo en que las rutas este activas.

El principal beneficio del protocolo DSR es que no se necesita disponer de una tabla de rutas, debido a que está contenida en el encabezamiento de cada paquete enviado, se supone que tiene mejor desempeño en un entorno estático o de baja movilidad. Entre sus desventajas se menciona que los enlaces rotos no se auto reparan, lo que causa mayor demora en el restablecimiento de la ruta usando más tiempo que un protocolo basado en tablas, esto sumado a que para obtener información de la ruta cada nodo gasta un tiempo considerable en el procesamiento de la información de control recibida inclusive si no es el nodo destino.

3.2.2.3. Algoritmo de enrutamiento de orden temporal

En el algoritmo de enrutamiento de orden temporal TORA, en [16] se definen como un protocolo altamente adaptativo, sin lazos y distribuido, que se basa en el concepto de enlace invertido, está diseñado para desempeñarse en redes móviles altamente dinámicas. Igualmente, en [1] se describe en la sección 5.8 que TORA se basa en el control de emisión de los paquetes de información el cual está focalizado en un grupo pequeño de nodos cercanos a la ocurrencia de un cambio topológico en la red, para cumplir esto los nodos necesitan mantener la información sobre las rutas de los nodos vecinos, básicamente, el protocolo ejecuta tres actividades principales, búsqueda o descubrimiento de la ruta, mantenimiento de la ruta y borrado de la ruta.

Durante la fase de creación y mantenimiento el protocolo usa una métrica que llama altura, esta establece un gráfico directo acíclico al nodo destino, de allí en adelante a cada enlace se le asigna una dirección específica *upstream* o *downstream* según la métrica de la altura de sus nodos vecinos, la figura 11 [1] muestra en (a) el proceso de búsqueda y en (b) el proceso de mantenimiento.

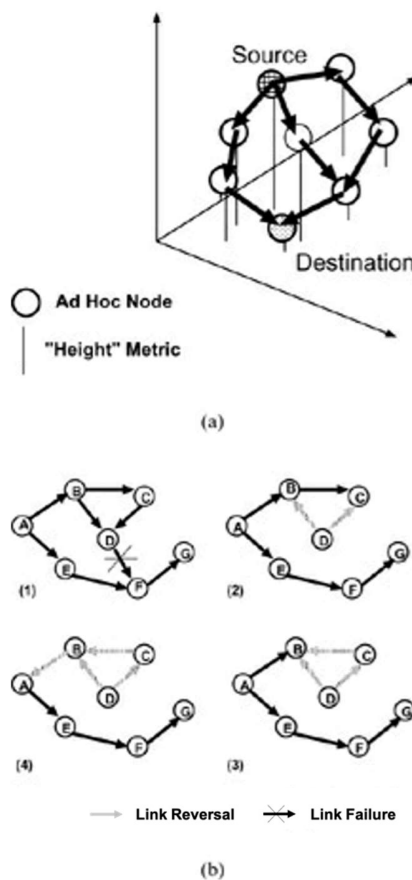


Figura 11. (a) Creación de ruta, (b) mantenimiento de la ruta en TORA

Mientras que la ruta está activa y si algún enlace se rompe, entonces, el proceso de mantenimiento inicia un proceso de restablecimiento al nodo destino como se muestra en la figura 11 parte (b), en caso de falla del último enlace en dirección al destino (*downstream*) el nodo genera una nueva referencias de altura la cual se propaga a sus vecinos, en el marco del proceso de reacción ante una falla, los enlaces son invertidos

para reflejar los cambios y para que se adapten a una nueva altura, ocurre igualmente si algún nodo no encuentra un enlace descendente (es decir ya no encuentra nodos vecinos en dirección al destino). El factor tiempo es muy importante en este protocolo por que la determinación de la métrica de la altura depende del momento o tiempo lógico en que se rompe un enlace, TORA asume que todos los enlaces tienen relojes sincronizados (probablemente por un reloj GPS).

La métrica que usa este protocolo tiene cinco componentes (1) tiempo lógico de la ruptura, (2) ID único del nodo que define la nueva altura, (3) bit indicador de reflexión, (4) parámetro de orden de propagación y (5) ID único del respectivo nodo. Los tres primeros colectivamente representan la altura, una nueva es definida cada vez que un nodo pierde su enlace en dirección al destino (*downstream*) debido a una ruptura. En la fase de borrado, el protocolo inunda la red con la emisión de un paquete *clear* (CLR) para borrar las rutas inválidas.

En [39] se menciona que este protocolo usa parámetros de altura arbitrarios para determinar la dirección del enlace entre dos nodos, de esta forma se obtienen múltiples rutas para un mismo destino, pero ninguna de ellas necesariamente es la más corta. Adicional cuando se descubre por parte de un nodo que una ruta ya no es válida, ajusta su altura al valor máximo entre los nodos vecinos y así transmite un paquete de actualización "UPDATE", si el nodo no tiene vecinos con una altura finita con respecto al destino entonces este iniciara el proceso de descubrir una nueva ruta. En la figura 12. [40] se describe el respectivo diagrama de flujo donde indica el proceso.

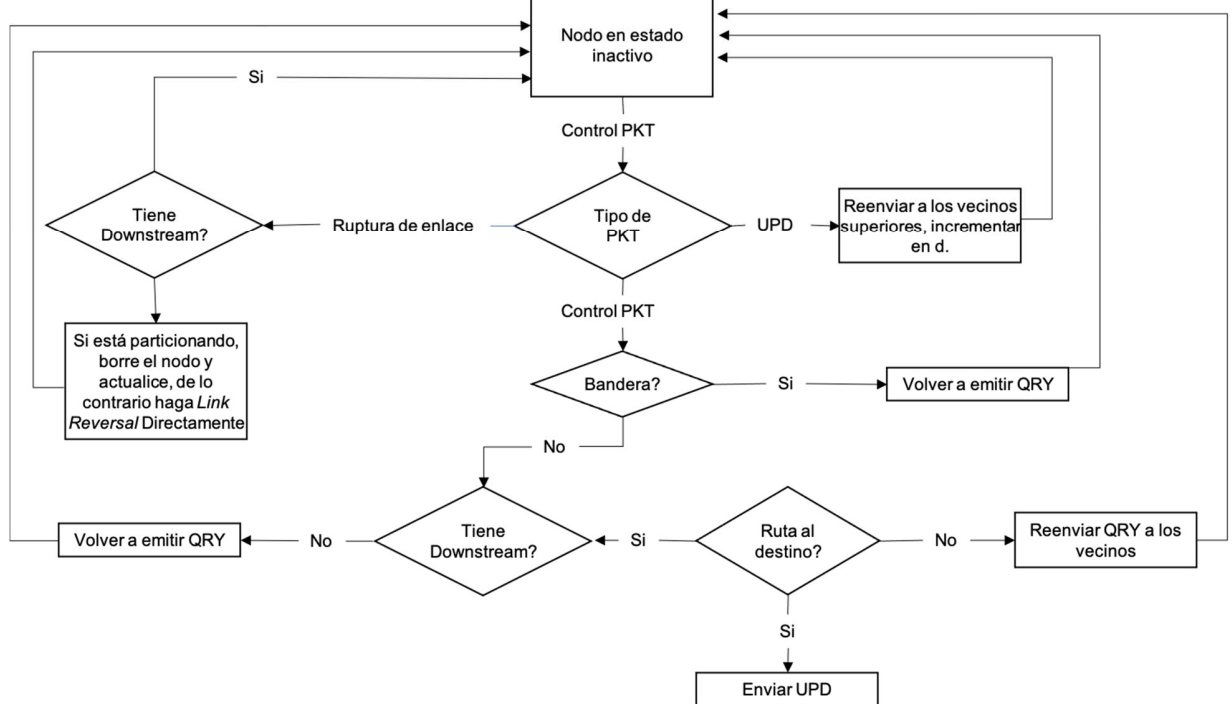


Figura 12. Diagrama de Flujo Protocolo TORA

En [39] se establece que uno de los beneficios del TORA es que puede manejar múltiples rutas entre la fuente y el destino así cuando se da una ruptura es muy rápido reestablecer la comunicación sin que intervenga el proceso de búsqueda o descubrimiento por parte del nodo fuente, lo hace cambiando automáticamente a otra ruta.

Una de sus desventajas radica en que como se expuso anteriormente necesita de una sincronización de relojes entre todos los nodos de la red, la dependencia de este protocolo en subcapas o capas bajas, de acuerdo con el autor, para que este funcione hace prever que las funcionalidades de la detección del estado, descubrimiento de vecindad, el orden de entrega de los paquetes y la resolución de direcciones son de fácil acceso, por ende hace que se corra un protocolo de encapsulamiento en la capa inferior. En TORA esto puede generar una sobrecarga en el proceso ya que esta viene impuesta por la capa más baja.

3.2.3. Protocolos híbridos

De acuerdo con [30] los protocolos híbridos mezclan parte de los protocolos proactivos y reactivos, el enrutamiento se realiza por clústeres, es decir, intradominio e interdominio de forma simultánea, el proactivo se aplica para la comunicación dentro del clúster y el reactivo para la comunicación entre los clústeres.

Son utilizados normalmente en redes de tamaño considerable, basados en zonas o clústeres, existen protocolos de este tipo como el Protocolo de Enrutamiento Basado en Zonas (ZRP, *Zone Based Routing Protocol*), y el Protocolo de Enrutamiento Adaptativo, Híbrido y Afinado (SHARP, *Sharp Hybrid Adaptive Routing Protocol*), entre otros.

3.2.3.1. Protocolo basado en zonas

En [1] se señala que los protocolos ZRP usan méritos de uno reactivo o en demanda y de tablas o proactivos. Una zona de enrutamiento equivale a un clúster, pero con la excepción de que cada nodo actúa como un encabezamiento de la zona y a la vez como miembro de otros clúster o zonas, las zonas pueden traslaparse, cada nodo especifica un radio en términos radio nodos y la selección del tamaño de la zona tiene gran incidencia en el desempeño de la red Ad Hoc.

En [30] se indica que para construir una zona cada nodo tiene que identificar a sus vecinos que estén a un salto de distancia a los que se puede llegar directamente, el Protocolo Descubridor de Vecinos (NDP, *Neighbor Discovery Protocol*), es el encargado de controlar e proceso de búsqueda y además de indicar cuando se presente una ruptura en los enlaces, ZRP emite un paquete de interrogación con el mensaje *hello* a un intervalo determinado y cuando los nodos de la zona lo identifican modifican y actualizan sus tablas, el tamaño de la zona está determinado por un radio de longitud x , donde x indica el número de saltos desde el nodo originados hasta el borde de la zona y a su vez el número de saltos está ligado a la potencia de emisión del nodo y demás parámetros que permitan mantener el radio x .

El correcto uso de este protocolo depende de la longitud del radio x que determina el área de la zona, para radios pequeños, zonas pequeñas. En redes densas cuyos nodos tienen alta movilidad y para radios mayores, zonas más grandes, redes más dispersas y

nodos con movilidad baja. En la figura 13 [30] se muestra un ejemplo de una zona de enrutamiento con radio $\rho = 2$ partiendo del nodo A.

Igualmente en [1] en la sección 5.12 se establece que ZRP maneja tres sub protocolos, (a) proactivo, llamado Protocolo de Enrutamiento Intra-zonas (IARP, *Intrazone Routing Protocol*), (b) reactivo, Protocolo de Enrutamiento Inter zonas (IERP, *Interzone Routing Protocol*) y (c) Protocolo de Resolución de Frontera (BRP, *Bordercast Resolution Protocol*), el IARP se puede implementar usando el Estado de Enlace (*Link-State*) o el Vector de Distancia (*Distance-Vector*) de enrutamiento, la información de propagación se difunde a través de la frontera en la zona de enrutamiento. El IARP depende del protocolo NDP mencionado anteriormente, para detectar la presencia o ausencia de nodos vecinos, y por lo tanto también los enlaces de conectividad a estos nodos si los hubiese, la principal misión es la asegurarse que cada nodo en la zona tenga una tabla consistente de enrutamiento actualizada donde se refleje la información de como cada nodo en la zona puede alcanzar a otros nodos.

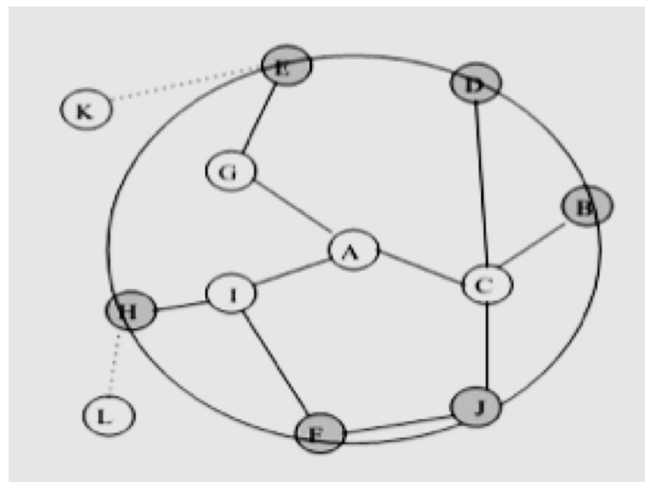


Figura 13. Zona de enrutamiento, nodo A $\rho=2$

Por otro lado, el IERP depende de los nodos que están en los bordes para ejecutar el enrutamiento en demanda con el objetivo de buscar información acerca de los nodos por fuera de su zona. En lugar de que el mensaje de interrogación *hello* o como esté determinado, se propague dentro de otra zona el IERP se hace uso del protocolo BRP, mencionado anteriormente.

Una consideración a tener en cuenta según [41], es que ZRP maneja diferentes protocolos debido a uso de zonas y esto hace que el desempeño se vea afectado por la eficiencia de la comunicación inter-zonal, y que la búsqueda de rutas pueda ser inestable y difícil de encontrar, sin el debido control de interrogación ZRP se puede inclusive tener un desempeño más pobre que los protocolos típicos basados en inundación.

Cuando hay una ruptura en una ruta debido a la movilidad de un nodo, si este está dentro de una zona, esta ruptura es tratada de acuerdo a al protocolo proactivo en donde el nodo procede a informar o todos los nodos de la zona y para que estos actualicen sus tablas, por el contrario, si la ruptura es debida a un nodo en el borde o a otro nodo de otra zona la reparación de esta ruta se ejecuta a través de una nueva búsqueda de ruta y en el peor de los casos se envía el mensaje al nodo fuente de la ruptura.

3.3. Consideraciones y comparación de protocolos

En [21] se define el software NS-2³ [42] como el simulador de red, y para el análisis de los protocolos el uso de métricas de rendimiento como son la relación de entrega de paquetes, el retardo de extremo a extremo y la longitud de trayecto.

En [22] también se usa el simulador NS-2 y se toman como métricas el rendimiento para la fracción de entrega de paquetes, el retardo medio de extremo a extremo y la sobrecarga de paquetes de control para el estudio de los protocolos.

En [14] se realiza una investigación del tema en la revisión de protocolos de enrutamiento, donde los proactivos y los reactivos se analizan por separado. Sobre la base de esta comparación, las tablas 3 y 4 definen la complejidad del tiempo, que se da por el número de pasos necesarios para trabajar y funcionar bien. Además, la complejidad de las comunicaciones proporciona varios mensajes necesarios para el funcionamiento.

³ <https://www.howtoforge.com/tutorial/ns2-network-simulator-on-ubuntu-14.04/>

Estas tablas se organizan siguiendo las métricas de simulación. Para cada una hay áreas de rendimiento como se describieron en los capítulos 2 y 3.

Tabla 3. Comparación de las características de los Protocolos Reactivos.

MÉTRICA	ÁREAS DE DESEMPEÑO		PROTOCOLOS REACTIVOS		
			AODV	DSR	TORA
I. Relación de paquetes enviados	1	Movilidad de la red		Moderado relacionado con la latencia	Alta movilidad
	2	Tipo de ruta.	Bajo demanda.	Múltiples.	Múltiples.
		Relación más corta/más congestionada	Siempre selecciona la ruta menos congestionada.		
		Complejidad en el tiempo	Inicialización 0(2d), falla 0(2d)	Inicialización 0(2i) El poste falla 0(2d) o 0*.	Inicialización 0(2i) El pos falla 0(2d)
	3	Complejidad en comunicaciones	0(2N)	0(2N)	Inicialización 0(2N) El pos falla 0(2x)
II. Retrasos TDL entre el nodo de origen y el nodo de destino.	4	Retrasos y latencia	Mayor retardo de mensajes que proactivo en el proceso de detección de rutas,		
	5	Consumo de ancho de banda	Más alto de lo habitual debido a la emisión del mensaje <i>hello</i> .	Bajo consumo	Así como el DSR es más pequeño
	6	Métrica de ruta	El camino más reciente y corto	Camino más corto	Camino más corto
		Mantenimiento de rutas	Tablas de rutas	Cachés de ruta	Tablas de rutas
		Posibilidades de varias rutas	No	Sí	Sí
		Reconfiguración de rutas	Eliminar ruta; notificar al origen	Eliminar ruta; notificar al origen	Inversión de enlace; reparación de rutas
	Actualización periódica de la ruta	No requerido	No requerido	No requerido	
III. Carga de los mensajes	7	Tamaño de la red y número de nodos	Pequeña, pocos nodos	Pequeña, no escalable para redes grandes, pocos nodos	Pequeño, maneja alta densidad de nodos
	8	Carga asociada al tráfico. frecuencia TX/RX	Estática	Estática	Estática
	9	Capacidad de multidifusión	Sí, incluso con nodos en movimiento.	Sí	No, pero soporta a través de LAM.
	10	Filosofía de enrutamiento y nodos críticos	Plana, No	Plana, No	Plana, No
	11	Carga de mensajes	No establece cargas adicionales en la red.	Proporcional a la distancia del enlace/ lleva toda la información completa de la ruta	
		Reacción a los errores de enlace	Responde rápidamente a los cambios topográficos.	No repara los enlaces, restablecimiento localmente es más largo que el proactivo	Rápidamente, pero si tiene que reiniciarse, el proceso de detección es el más lento.
		Saturación de Red	Saturado debido a la técnica de inundación.		
	Generación de tráfico de señalización	Aumenta con la creciente movilidad de las rutas activas			
12	Tx Actualización de Frecuencia y Actualizaciones TX para:	N/A	N/A	N/A	
IV. Consumo de energía	13	Consumo de energía	Consumo de energía alto		
V. Características generales que no afectan el desempeño	14	Capacidad dedicada exclusivamente de nodos de relé	No es simultáneo debido a que los nodos detectan emisiones entre sí.		
	15	Sincronización de reloj			Necesita tiempo de sincronización
	16	Bucle libre.	Sí	Sí	Sí

Abreviaciones:

l = Diámetro del Segmento de red afectado

y = Número total de nodos que forman una ruta directa por donde el paquete respuesta transita

z = Diámetro directo de la ruta por donde el paquete respuesta transita

N = Número de nodos en la red

d = Diámetro de la red

h = Altura (valor) del árbol de enrutamiento

x = Numero de nodos afectados por cambio de tipología en la red

La comparación de protocolos reactivos en la tabla 3 muestra que tanto AODV, como DSR, utiliza el mismo procedimiento para encontrar una ruta de acceso de nodo de origen a destino. Sin embargo, difieren por el hecho de que DSR tiene una carga más alta en cada paquete usado para llevar la información de ruta establecida. En contraste, AODV lleva solamente la información de la ruta de destino. Esto también sucede con las respuestas de paquetes y la carga en memoria de cada protocolo. AODV es el único protocolo comparado que puede realizar la difusión múltiple.

El requisito de simetría de vínculos entre nodos es un inconveniente de que el protocolo AODV no puede utilizar rutas de vínculos asimétricos, a diferencia de DSR, que puede utilizar vínculos asimétricos cuando los simétricos no están disponibles.

El protocolo DSR funciona mejor en redes de nodos de movilidad moderadas en relación con la latencia de transmisión de paquetes [23], y esta presunción proporciona un diámetro de red pequeño, que permite que todos los nodos se conviertan en nodos receptores. Por lo tanto, el software de administración de red recibe cualquier paquete sin un filtro o restricción proporcionada por la dirección de destino.

DSR no realiza requisitos periódicos de radiodifusión, ahorrando ancho de banda y consumo de energía. Por lo tanto, este protocolo no se sobrecarga cuando no hay cambios en la topología de red. Además, permite que cada nodo mantenga la información de todas las rutas establecidas en el nodo de destino en su caché. Por lo tanto, cuando se interrumpe un vínculo, los nodos de retransmisión pueden comprobar su caché en busca de otra ruta de acceso. Si no se encuentra, el protocolo invoca el algoritmo para encontrar una nueva ruta. En DSR, la recuperación de una ruta es más rápida que en otros protocolos. Sin embargo, debido al diámetro pequeño DSR, no es escalable a redes mas grandes.

TORA es un protocolo de tipo enlace invertido, según [24]. Este protocolo es más adecuado para redes grandes con una población de nodos denso. DSR y TORA son los dos únicos protocolos capaces de establecer más de una ruta entre los nodos de origen y de destino. La reconstrucción de rutas no es necesaria hasta que todas las rutas posibles se hayan considerado inválidas. Por lo tanto, se conserva el ancho de banda. Otra ventaja de TORA es la capacidad de multidifusión, que, a diferencia de AODV, no se incorpora en la operación esencial, sino que se realiza mediante un sub-algoritmo dedicado llamado Algoritmo de Multidifusión Adaptativo Ligero (LAM, *Light Adaptive Multi-diffusion*). TORA y LAM habilitan la capacidad de multidifusión. TORA depende en gran medida de la sincronización del reloj. Los nodos de red deben tener un GPS o cualquier otro medio para controlar el tiempo para permitir el buen desempeño. La recuperación de la ruta no es tan rápida en TORA como en otros protocolos debido a las posibles oscilaciones dentro de este período, que pueden causar largos retrasos hasta que se determine una nueva ruta.

Una comparación de los protocolos proactivos que se muestran en la tabla 4, en esta se observa que el DSDV es ineficiente debido a la necesidad de transmitir periódicamente una actualización de red independientemente de cuántas veces cambie la topología, limitando así el número de nodos que pueden conectarse debido a un aumento de la carga que es de orden exponencial. Entre las ventajas de CGRS esta el uso de varios métodos heurísticos para mejorar el rendimiento del protocolo.

Tabla 4. Comparación de las características de los Protocolos Proactivos

MÉTRICA	ÁREAS DE DESEMPEÑO		PROTOCOLOS PROACTIVOS		
			DSDV	CGRS	WRP
I. Relación de paquetes enviados	1	Movilidad de la red		Alta densidad	
	2	Tipo de ruta.	Las existentes en las tablas	Las existentes en las tablas	Las existentes en las tablas
		Relación más corta/más congestionada	Selección de ruta más corta	Selección de ruta más corta	Selección de ruta más corta
		Complejidad en el tiempo	$O(d)$	$O(d)$	$O(h)$, Bajo en comparación con DSDV
		Complejidad en las comunicaciones.	$O(x \text{ á } N)$	$O(x \text{ á } N)$	$O(x \text{ á } N)$
	3	Disponibilidad de red y ruta.	Los nodos tienen información de la ruta en dos tablas independientemente de su necesidad.	Los nodos tienen información de ruta en dos tablas independientemente de su necesidad. Es jerárquico y un nodo en algún momento no puede ser un nodo relevo.	Los nodos tienen información de ruta en cuatro tablas independientemente de su necesidad.
4	Retrasos y latencia	Menos retraso que reactivo			

II. Retrasos TDL entre el nodo de origen y el nodo de destino.	5	Consumo de ancho de banda	Puede ser mayor debido al uso de tablas	Puede ser mayor debido al uso de tablas	Alto debido a la necesidad de enviar paquetes <i>hello</i>
	6	Métrica de ruta	Camino más corto	Camino más corto	Camino más corto
		Mantenimiento de rutas	Tablas de rutas	Tablas de rutas	Tablas de rutas
		Posibilidades de varias rutas	Sí	Sí	Sí
		Reconfiguración de rutas	No es necesario que la ruta ya se reconfigure en las tablas.		
Actualización periódica de la ruta	Obligatorio	Obligatorio	Obligatorio		
III. Carga de mensajes	7	Tamaño de la red y número de nodos	La disponibilidad de rutas es alta permanente, limita el número de nodos que pueden conectarse a la red aumenta en un orden $O(n^2)$.	Pequeña, pocos nodos se pueden conectar	Alta por la disponibilidad permanente de rutas.
	8	Tráfico asociado a la carga y frecuencia de emisión y recepción	Ineficiente debido a la necesidad de transmitir periódicamente una actualización de red independientemente de cuántas veces cambie la topología de red		
	9	Capacidad de multidifusión	No	No, pero, puede hacerlo a través de un sub-algoritmo	No
	10	Filosofía de enrutamiento y nodos críticos	Plano sin nodos críticos	Jerárquica	Plano sin nodos críticos
	11	Carga de mensajes		Igual que el DSDV/WRP, la carga es aún mayor porque requiere mantener cuatro tablas.	
		Reacción a los errores de enlace	El proceso de actualización es lento porque tiene mucha información en cada nodo, significativa cuando se descarta el vínculo. / DSDV Requiere una actualización constante, ya que no hay cambios en la topología.		
		Saturación neta	No saturado		
	Tráfico de señalización generado	Más alto que el enrutamiento reactivo			
12	Tx actualizar Frecuencia y Actualizaciones TX para:	Periódicamente y según sea necesario. Vecinos	Periódicamente. Vecinos y cabeza de racimo	Periódicamente y según sea necesario. Vecinos	
IV. Consumo medio de energía	13	Consumo de energía	Consumos de energía moderados, eventualmente altos		
V. Características generales que no afectan al rendimiento	14	La capacidad dedicada exclusivamente de los nodos de relé			
	15	Sincronización del reloj	No es necesario	No es necesario	No es necesario
	16	Bucle libre.	Sí	Sí	Sí, pero no instantánea
Abreviaciones: l = Diámetro del Segmento de red afectado y = Número total de nodos que forman una ruta directa por donde el paquete respuesta transita z = Diámetro directo de la ruta por donde el paquete respuesta transita N = Número de nodos en la red d = Diámetro de la red h = Altura (valor) del árbol de enrutamiento x = Numero de nodos afectados por cambio de tipología en la red					

El WRP requiere un gran uso de memoria, especialmente cuando el número de nodos en la red es vasto, pero, evita el problema de crear bucles de enrutamiento temporales a través de la verificación de la información con su predecesor.

En las últimas líneas de la tablas 3 y 4 se describen la operación del protocolo y se comparan las características principales y se expondrán algunas diferencias. La complejidad del tiempo es más pequeña en WPR que en DSDV porque este último informa solamente a los nodos vecinos sobre los cambios de estado del enlace cuando hay una ruptura. Cuando se establecen los enlaces adicionales, el paquete *hello* se

utiliza como indicador de presencia para permitir que la entrada actualice la tabla de ruteo que afecta a los nodos vecinos exclusivamente.

En CGSR, el rendimiento depende del estado de los nodos específicos (cabezales de clúster, nodos de salida o nodos normales). La complejidad del tiempo de error del enlace se asocia a un encabezado del clúster y es mayor que en el protocolo DSDV debido a la necesidad de tiempo adicional para seleccionar un nuevo encabezado del clúster. Del mismo modo, esto se aplica a la selección de nuevos vínculos de nodos asociados a los cabezales de clúster. En términos de complejidad de las comunicaciones, dado que DSDV, CGRS y WRP utilizan protocolos vectoriales de distancia de trayecto más cortos, todos ellos tienen el mismo grado de complejidad durante las rupturas de enlaces y adiciones.

Los protocolos proactivos se basan en tablas de enrutamiento que almacenan información para todas las rutas posibles, exigen que esta información se difunda continuamente o que se emitan actualizaciones de tabla. Estas actividades requieren un mayor consumo de energía, un mayor ancho de banda y producen retrasos considerables. Estas demandas proporcionan la ventaja de enlaces más robustos que permanecen que no haya rupturas durante mucho más tiempo.

La gestión de la información basada en la demanda corresponde a protocolos reactivos, por lo que sus esfuerzos se materializan solo cuando es necesario, ya sea para establecer una nueva ruta o para reparar un enlace roto. Las ventajas de los protocolos reactivos son el bajo consumo de energía, menos tráfico de datos que mejora la explotación del ancho de banda. Sin embargo, a diferencia de los protocolos proactivos, estas rutas son menos robustas, y las rutas de reconstrucción tardan mucho más tiempo, causando retrasos o pérdida del enlace.

Por último, esta comparación se analizará más adelante en relación a los referentes y al proceso de simulación para cumplir con el objetivo principal de este trabajo, que es recomendar en la medida de lo posible el mejor protocolo a implementar en el enlace de datos táctico Colombiano CTDL.

4. Análisis de Referentes y Simulación de protocolos seleccionados.

En el presente capítulo se analiza referentes de la literatura que hayan trabajado sobre el tema que permita al final poder entender los resultados obtenidos, realizar la simulación de los protocolos seleccionados, estudiar sus desempeños y comparar con los referentes para contar con los elementos que permitan generar aportes y conclusiones en el presente trabajo de grado.

4.1 Referentes y métricas para las características de desempeño.

Existen referentes sobre el tema, en este Trabajo de Grado se buscaron los que más similitud tuvieran en los escenarios empíricos, así las cosas, en esta sección se abordarán seis de ellos que se consideran convenientes en el tema de identificar y describir cuáles métricas se usan y la razón para ello.

4.1.1. Jong-Mu Choi

En [43] se realizan simulaciones en escenarios militares en donde se utilizan equipos para la transmisión de datos en VHF y HF, al igual que el CTDL, se caracterizan por realizar transmisiones a una baja velocidad como por ejemplo de 384 Kbps.

Se compara los protocolos AODV, DSR, LAR y OLSR cuyos resultados preliminares muestran que el DSR y el LAR son los que alcanzan un desempeño relativamente bueno.

Se definió como espacio de simulación un área de 12 x 22 Km, los nodos o unidades se suponen con un modelo de movimiento aleatorio con una pausa de tiempo de 20 segundos, se corrieron con siete velocidades diferente en cada nodo. El autor evalúa el desempeño basado en cuatro parámetros, el primero es la relación de entrega de paquetes, el segundo es el retardo promedio entre terminales, el tercero es control de sobrecarga en los paquetes, y el cuarto y último consumo promedio de energía, el cual

no se considerará porque no es pertinente, ni del alcance de este trabajo. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

La relación de entrega de paquetes se muestra en la figura 14 [43], bajo la variación de parámetros como son la cantidad de nodos y la máxima variación en velocidad.

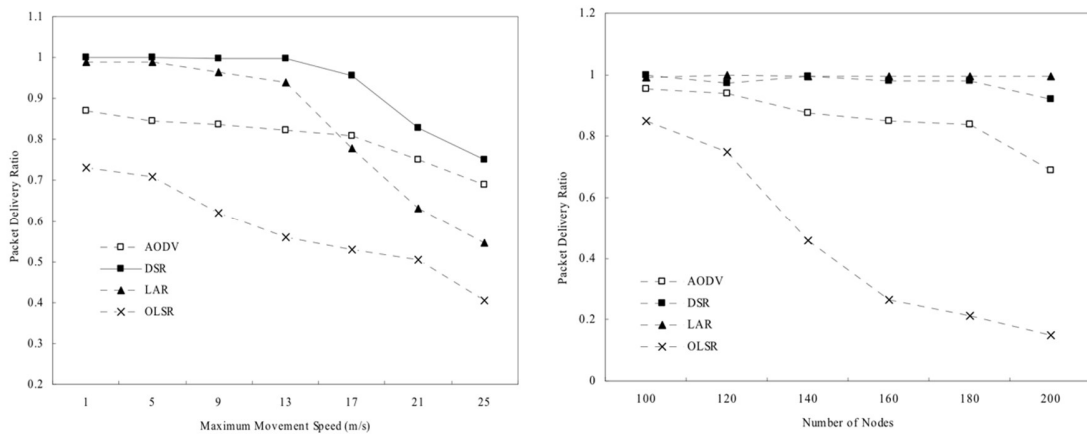


Figura 14. Relación de entrega de paquetes

El desempeño promedio de retardo entre terminales se muestra en la figura 15 (a) [43], relacionado con la cantidad de nodos. A medida que varía el movimiento y la velocidad de los nodos, varía la topología de la red e igualmente se cambia la probabilidad de enlaces rotos, esto causa que se realicen subrutinas de reparación de rutas o en el peor de los casos un nuevo proceso de descubrimiento de rutas, causando que aumenten los retardos debido al aumento de velocidad y movimiento de los nodos.

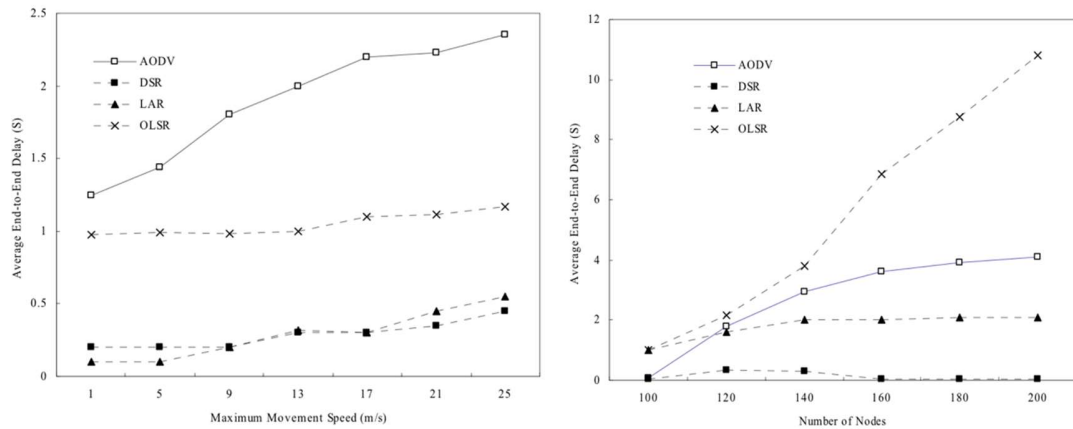


Figura 15. Promedio de retardo entre terminales (a) Velocidad, (b) Cantidad de Nodos

La figura 15 (b) [43], muestra la relación entre el retardo y la variación de velocidad de los nodos, a medida que la cantidad aumenta, también crece la probabilidad de colisiones y por ende también amplifica el retardo, en los protocolos proactivos es más evidente, sin embargo, en los protocolos reactivos, el retardo no es notorio a medida que aumentan la cantidad de nodos tal como se observa en la figura 15 (b) con el protocolo LAR.

En la métrica de control de sobrecarga en los paquetes, la figura 16 (a) [43] muestra que a medida que aumenta la velocidad de los nodos, el control de sobrecarga no se ve tan afectado, sin embargo, en el OLSR cada nodo mantiene un gran volumen de información debido a las tablas, demandando así una sobrecarga al sistema apreciable frente al resto de protocolos que son reactivos.

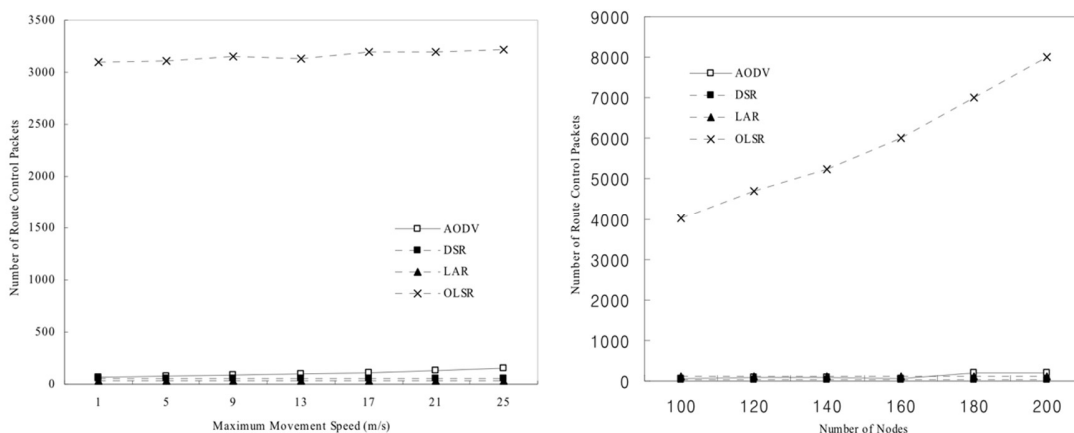


Figura 16. Control de carga de paquetes, (a) Velocidad, (b) cantidad de nodos

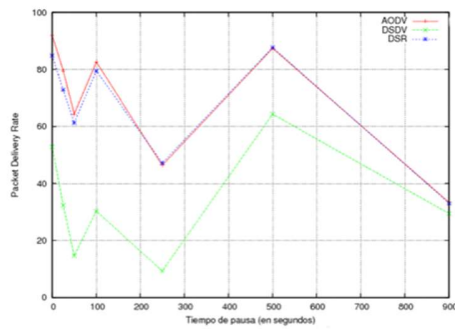
La figura 16 (b) [43], muestra el mismo criterio, pero relacionado con la cantidad de nodos. En esta ocasión los protocolos proactivos como el OLSR si muestra un aumento en la sobrecarga a medida que se aumentan los nodos, debido que a mayor cantidad hay más nodos relevos por lo cual se incrementan las emisiones de actualizaciones de las tablas. Sin embargo, con los protocolos reactivos se observa que se mantienen estables sin aumentar la sobrecarga esto debido a que sus procesos no dependen de la cantidad de nodos sino de cuando se requiera actuar.

4.1.2. Matías Robles.

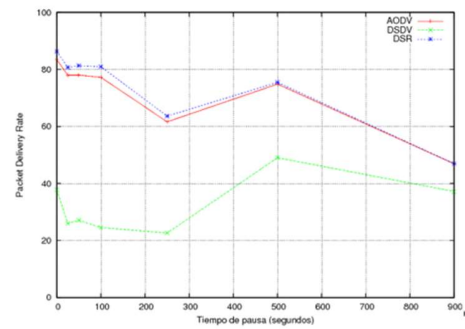
De acuerdo con [44] se realiza un trabajo de comparación del desempeño y funcionamiento en tres protocolos, DSDV, AODV y DSR utilizando el simulador NS-2, a diferencia de [43], se basa en tres métricas fundamentales que son tasa de entrega de paquetes, retardo promedio y sobrecarga de enrutamiento, a continuación, se expondrán los resultados:

Para la métrica de tasa de entrega de paquetes en la figura 17 [44], se observa que solo se compara el desempeño en relación con la cantidad de conexiones en el tiempo. El protocolo proactivo DSDV es el de más bajo rendimiento, y el de mejor rendimiento es el protocolo reactivo DSR, aunque no se menciona la razón fundamental, está relacionada

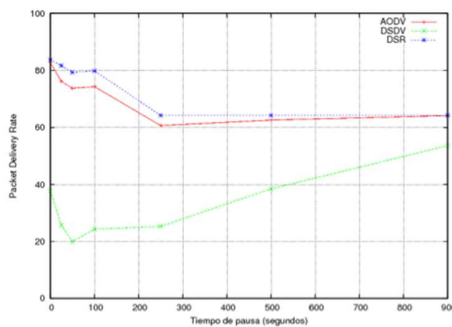
con que el DSDV es un protocolo proactivo los cuales manejan una cantidad considerable de información y necesitan una constante actualización de las tablas estén o no activas las rutas.



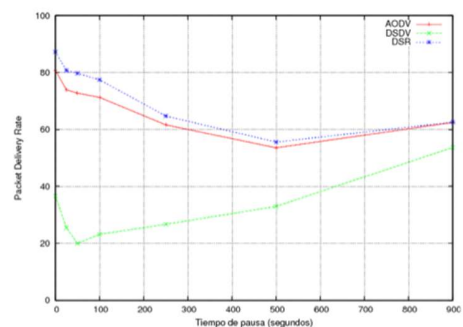
(a) 3 conexiones



(b) 15 conexiones



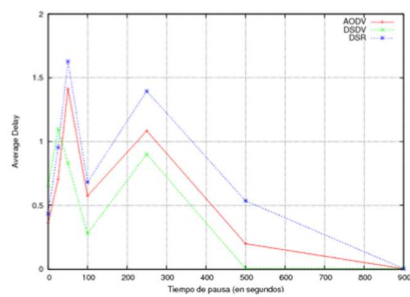
(c) 25 conexiones



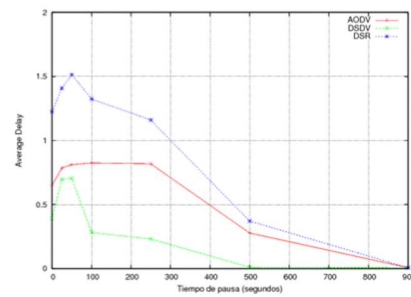
(d) 40 conexiones

Figura 17. Tasa de entrega de paquetes

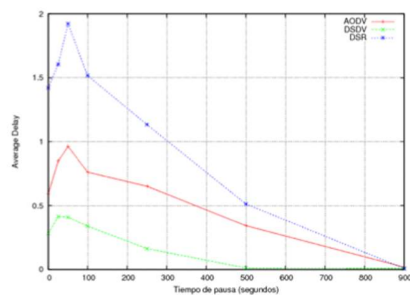
En cuanto al retardo promedio cambia la evaluación, la figura 18 [44] muestra que el DSR que es reactivo, es el que más retraso presenta debido a la cantidad de paquetes que necesita para encontrar la ruta cuando está en el proceso de descubrimiento, el DSDV es el que mejor desempeño tiene.



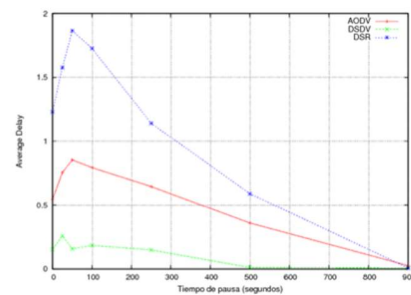
(a) 3 conexiones



(b) 15 conexiones



(c) 25 conexiones



(d) 40 conexiones

Figura 18. Retardo promedio

Finalmente, en lo referente a la sobrecarga, el protocolo DSDV es el de mejor desempeño, se menciona que es debido a que es reactivo, es decir, que como es en demanda, no importan la cantidad de conexiones por que la cantidad de paquetes enviados no cambia sustancialmente en el tiempo.

4.1.3. Muthuvel Shobana.

Otra aproximación es la de [38], que realiza una comparación entre protocolos tradicionales y protocolos de enrutamiento geográfico que no son del alcance de este trabajo, no obstante, lo interesante es que usa dos de las tres métricas establecida por [43] y [44] para comparar los protocolos que son la tasa de entrega de paquetes y retardo entre terminales, la última que menciona es la longitud de ruta, la cual no se describe y no es pertinente en este caso de estudio.

4.1.4. Othman Fuad Ziad

En [45] se realiza la comparación de protocolos usando el simulador NS-2. Los criterios de evaluación son rendimiento, que para el caso el se define como “la velocidad de transmisión de los datos (la cantidad de información útil recibida por el destino final)” la figura 19 [45] muestra que la comparación se realiza en Mbps, es decir la velocidad de cada protocolo en relación con el tiempo , menciona que los protocolos reactivos ofrecen mejores resultados, esto debido a que los proactivos alcanzan una baja velocidad por la necesidad de mantener actualizadas las tablas en cada nodo (esto con paquetes de control), indica que el protocolo DSR se destaca por que logra establecer el enlace más rápido mediante el “uso promiscuo de la capa física para hacer escucha en la red, y almacenar esta información para luego tomar la ruta más eficiente” , destaca que el protocolo reactivo AODV busca una ruta únicamente cuando hay una solicitud y el DSDV realiza un cálculo de tiempo para establecer una ruta, lo que implica un retardo en el envío de los paquetes.

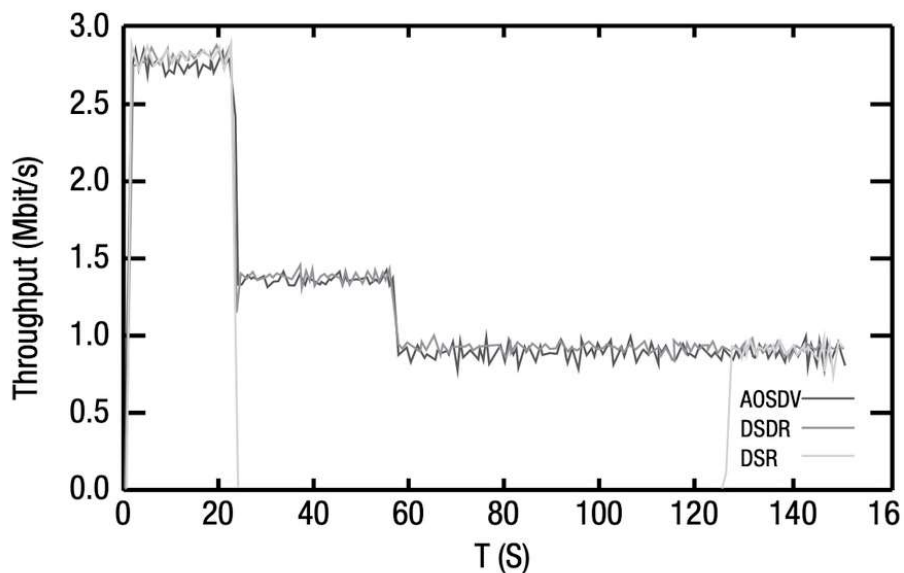


Figura 19. Rendimiento en Mbps

El protocolo DSDV es el de peor desempeño debido al tiempo que emplea para establecer una ruta y es afectado por la ruptura de enlaces, debido a que entre más movilidad más ineficiente es. Otro aspecto es que se menciona que la sobrecarga inducida en la red por las actualizaciones de ruta limita el ancho de banda, algo a tener en cuenta para el análisis final.

Finalmente concluye que el protocolo reactivo DSR es el más eficiente en el *throughput* y en la relación de entrega / recepción de paquetes por los resultados obtenidos en la simulación.

4.1.5. Duyen Trung

En [46], la simulación consiste en una comparación entre el protocolo AODV y el protocolo LAR, con variaciones como el Algoritmo de Localización Asistida en Rutas Múltiples (LAMR, *Location-Aided Multi Routing*).

Lo importante para citar este trabajo es tener como referencia las tres métricas específicas que se usan:

- 1) *Fracción de entrega de paquetes*, que corresponde a la relación de paquetes enviados al nodo de destino en relación con aquellos generados en la forma de la Tasa de Bits Constante (CBR, *Constant Bit Rate*), esto es básicamente la misma relación expuesta por otros autores en relación con la cantidad de paquetes enviados versus los recibidos.
- 2) *Retardo promedio entre terminales*, hace relación al retraso debido a las actividades del protocolo en el descubrimiento de nuevas rutas o en la reparación de estas entre otros factores.
- 3) *Control de sobrecarga en la mensajería*, hace referencia al promedio de paquetes de control generados por cada nodo, incluyendo requerimiento de rutas, mensajes de respuesta y de error.

4.1.6. Mohapatra Shyam.

En [47] se realiza un análisis entre los protocolos AODV, DSR, OLSR y DSDV utilizando el simulador NS-2. Se toman como métrica de simulación, el retardo entre terminales, el *throughput*, el control de sobrecarga y la tasa de entrega de paquetes; otros parámetros tenidos en cuenta son la pausa en el tiempo, la variación de las áreas de simulación, la cantidad de nodos y el tipo de conexiones de forma aleatoria, la figura 20 [47], muestra los resultados obtenidos.

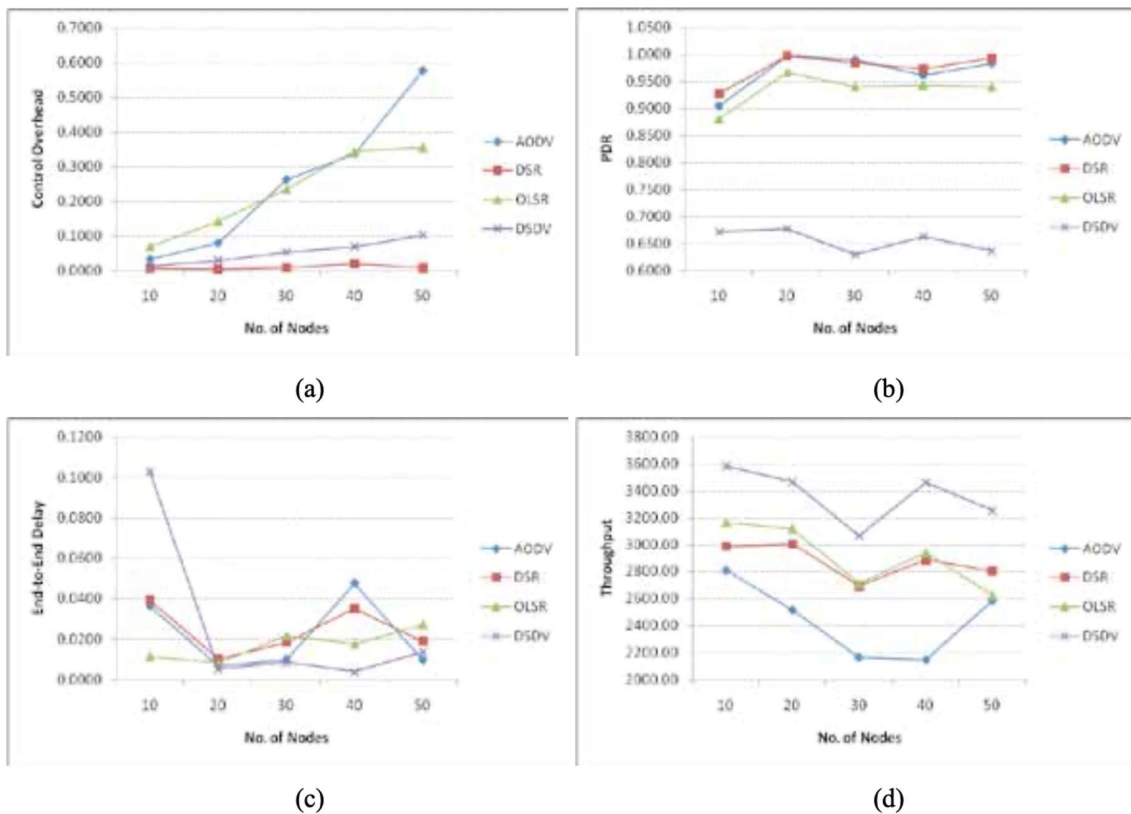


Figura 20. Comparación de protocolos en relación con la variación de nodos

Como conclusión se estableció que el DSR tuvo mejor desempeño que el DSDV y el OLSR, y muy similar al de AODV a medida que se incrementaban el número de nodos, y en cuanto al *throughput*, DSR está muy cerca del OLSR, pero es menor que el DSDV. AODV tuvo el peor desempeño.

Se establece que estas referencias pueden servir como *benchmark* para poder comparar los resultados de las simulaciones y corroborar lo planteado en el objetivo específico 1.4.2.3. de este trabajo de grado para determinar cuál puede ser el protocolo más adecuado.

4.2. Software de simulación

Se realizó una revisión investigativa en [48], relacionada con Simuladores para las MANET, en esta se establece que de 151 trabajos en redes Ad Hoc, 114 usaron simuladores para experimentar en sus investigaciones, en la figura 21 [48] se muestra que el simulador NS-2 fue usado con el 43.8% que es equivalente a 35 de 80 artículos que mencionaron el simulador usado en las investigaciones.

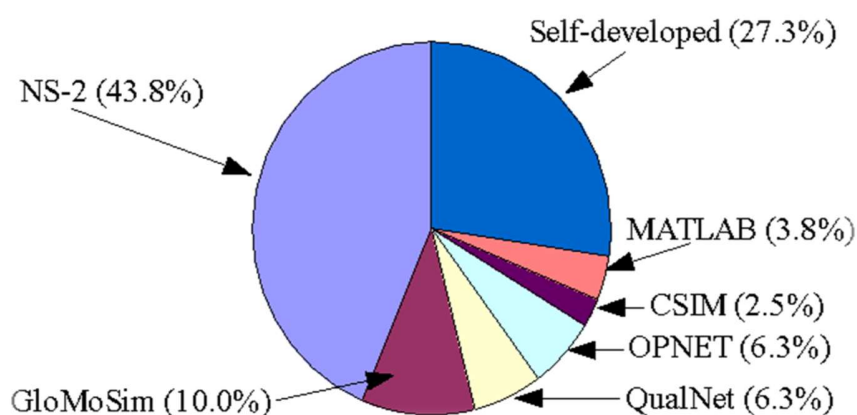


Figura 21. Porcentaje de uso de simuladores de redes

En [46] se escoge el simulador NS-2 por ser el de más amplia difusión en la comunidad académica, menciona que los manuales del simulador son de fácil comprensión y que se pueden encontrar tutoriales libres, gratis y de fácil acceso.

En [45], se establece que existen varios programas de simulación como los son el NS-2, el Qual Net y el Matlab, entre otros. Igualmente menciona que el simulador NS-2 se compone de dos partes, Un simulador como tal y un Animador de Red (NAM, *Network Animator*) en el cual se visualiza el desempeño de la red durante la simulación, e indica

que “mediante su interfaz gráfica se pueden crear y editar los modelos de simulación sin tener que recurrir a los scripts TCL para correr las animaciones” [45]. También muestra que el simulador cuenta con la herramienta Xgraph que con el uso del GNUPLOT, es la encargada de crear los gráficos bidimensionales con los cuales se pueden observar datos ordenados que sirven para el posterior análisis de resultados.

En [49] se establece que el simulador NS-2 puede ser ejecutado sobre Windows o Linux. Para este trabajo de grado se ejecutó en Linux Ubuntu 20.04, igualmente las simulaciones se realizaron usando la transmisión de paquetes FTP con una conexión TCP, emulando un escenario de radiodifusión que se acerca más a la realidad a través del modelo *Shadowing*⁴.

Además de lo anterior, en [38], [44] y [46], también utilizaron el simulador NS-2 para realizar sus experimentos de comparación de protocolos de enrutamiento.

4.3. Modelamiento de la Simulación.

Una vez realizada toda la fundamentación teórica, donde se empezó con caracterizar el escenario, luego se describieron los protocolos que se podrían usar, seguido se realizó un análisis teórico comparativo de los mismos y después se revisaron experimentos y simulaciones realizadas que podrían servir como *benchmark* para este trabajo, finalmente se realizó una revisión del simulador a usar.

El objetivo no es solo evaluar el desempeño del protocolo, si no también la comparación de su desempeño versus otros protocolos en las mismas condiciones.

En el Ítem 2.3 de este trabajo de grado se determinó el escenario real, sin embargo, de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada en los ítems 4.1 y 4.2, se observa que la mínima cantidad de nodos es de 10 por simulación, y que se hacen necesarias simulaciones con diferentes cantidades de nodos, así las cosas, se ampliaron de 5 nodos a 41 nodos como se muestra en la tabla 5:

⁴ El modelo *Shadowing* [67] consiste en “convertirse en la sombra del usuario durante un tiempo determinado y mientras se realiza aquello que quieres entender. El objetivo de esta técnica de observación es recoger información sobre el usuario para conocerlo a profundidad”

Tabla 5. Nodos finales de simulación

Número	Tipo de Unidad	Velocidad	Proporción Velocidad	Altura	Banda	LOS	Proporción LOS
Nodo 0	Buque 1	15 nudos	1	0 metros	VHF/UHF	20 Millas	1
Nodo 1	Buque 2	15 nudos	1	0 metros	VHF/UHF	20 millas	1
Nodo 2	Submarino1	5 nudos	0,33	-2 metros	VHF/UHF	10 millas	0,5
Nodo 3	Helicóptero	100 nudos	5	500 metros	VHF/UHF	60 millas	3
Nodo 4	Avión	130 nudos	6,2	1500 metros 7000 pies	VHF/UHF	60 millas	3
Nodo 5	Buque Estático	0 nudos	0	0 metros	VHF/UHF	20 millas	0
Nodo 6	Buque Estático	0 nudos	0	0 metros	VHF/UHF	20 millas	0
Nodo 7	Buque Estático	0 nudos	0	0 metros	VHF/UHF	20 millas	0
Nodo 8	Buque Estático	0 nudos	0	0 metros	VHF/UHF	20 millas	0
Nodo 9	Buque Estático	0 nudos	0	0 metros	VHF/UHF	20 millas	0
"	"	"	"	"	"	"	"
Nodo 41	Buque Estático	0 nudos	0	0 metros	VHF/UHF	20 millas	0

Solo los nodos definidos desde el principio serán móviles, el resto serán estáticos, por el diseño del escenario se tomarán 5 grupos para la simulación, el primero de 11 nodos, el segundo de 20 nodos, el tercero de 29 nodos, el cuarto de 35 nodos y el quinto y último de 41 nodos. Se estima que el CTDL al inicio no sea de más de 20 nodos, sin embargo, se pensó que se pudiese expandir a 100 nodos [8].

Ahora este es un tipo de simulación terminal y no *steady state*, es decir, está enmarcada en conocer los comportamientos de los protocolos en un periodo de tiempo y no en su desempeño indefinido en el tiempo.

Para la definición de variables se tomo como referente a [48] específicamente el punto III.A.4., en el se estipula que para este simulador podrían haber más de 538 variables, la gran mayoría están por defecto, sin embargo, para este trabajo de grado se definieron y se parametrizaron de acuerdo con la propuesta planteada:

En el ítem 2,3 se estableció, primero que todos los nodos deben estar en el rango de línea de vista; y segundo que los nodos deben establecer comunicaciones en las mismas frecuencias, incluso si hay diferentes marcas de hardware. Igualmente, se deben tener en cuenta el Ítem 2.4 en el cual se definen las características técnicas del escenario marítimo.

Para iniciar se establecen los tres parámetros fundamentales para la simulación que se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Parámetros fundamentales de simulación

No.	# Nodos	Área (m x m)	Alcance (m)
1	11 a 41	1000 x 1000	100

El área máxima corresponde al máximo desplazamiento entre las diagonales del área que puede moverse un nodo. Sin embargo, para darle forma a estas medidas [48] se realiza la tabla 7 [48], la cual se basa en los parámetros utilizados en este experimento.

Entendiendo que de acuerdo con lo observado en el ítem 4.1 se hace necesario contar con simulaciones con diferentes cantidades de nodos para validar su comportamiento, existen otras variaciones como tiempo de pausas, variación en la velocidad de los nodos, cantidad de enlaces activos o conexiones entre otros, se considera que la variación en la cantidad de nodos es un parámetro suficiente en una red pequeña como es el enlace de datos táctico Colombiano CTDL para realizar una comparación.

Se analizó como se afectan estos parámetros con el aumento de la cantidad de los nodos, la tabla 7 [por Autor] muestra las características generales y la tabla 8 [por Autor] muestra las mismas, pero calculadas para cada grupo de nodos de la simulación, en esta también se observa que el único ítem que presenta modificaciones visibles es el numeral 2, que corresponde a la densidad de nodos, el resto se mantienen debido a que su variación depende más del área de simulación que de la cantidad de nodos.

Estos datos ayudan a darle rigor al proceso de simulación y le da consistencia, para poder validar los resultados.

Tabla 7. Parámetros de Simulación

Parámetro		Descripción	Fórmula
1	Área de Simulación	Área en metros cuadrados de la topología	$w \times h$
2	Densidad de Nodos	Densidad de nodos en el área de simulación.	$\frac{n}{w \times h}$
3	Cobertura de los Nodos	Área cubierta por la transmisión del nodo	$\pi \times r^2$
4	Huella	Porcentaje del área de simulación cubierta por el alcance de transmisión de cada nodo.	$\frac{(\pi \times r^2)}{(w \times h)} \times 100$
5	Distancia máxima de ruta	La máxima distancia lineal en la que puede ser transmitido un mensaje desde la fuente al destino.	$\sqrt{(w^2+h^2)}$
6	Diámetro de la red	Es la máxima cantidad de relevos que un mensaje puede tener a lo largo de la máxima distancia lineal entre la fuente y el destino.	$\frac{\sqrt{(w^2 + h^2)}}{r}$
7	Conteo de nodos vecinos	Es el número de nodos vecinos basados en la transmisión y área de simulación, no cuenta para el borde del área de simulación.	$\frac{(\pi \times r^2)}{\left(\frac{w \times h}{n}\right)}$
8	Conteo de nodos vecinos teniendo en cuenta el "Efecto de Borde"	Es la cantidad promedio de nodos vecinos que cuentan para el borde del área de simulación, el cual reduce el área de cobertura.	Simulación con π , r , y $(w + h)$
w= Ancho		h= Altura	r= Alcance de transmisión
1000		1000	100

Se utilizó el software NSG2⁵ [50] para generar los escenarios, este software mediante una ayuda gráfica crea un script o archivo .tcl en donde se establece el código que implementa al algoritmo. Este script incluye que una vez se ejecute, se generen otro tipo de archivos que sirven para la simulación en sí y para graficarla y almacenar los datos resultantes, igualmente genera otro archivo de datos que a conveniencia de la simulación arrojan datos relacionados con la métrica.

⁵ <https://ns2blogger.blogspot.com/2014/04/nsg-21-tcl-script-generator.html>

Tabla 8. Parámetros en relación con el número de Nodos

# n	11	20	29	35	41
1	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
2	0,000011	0,00002	0,000029	0,000035	0,000041
3	31416	31416	31416	31416	31416
4	3,14%	3,14%	3,14%	3,14%	3,14%
5	1414,213562	1414,213562	1414,213562	1414,213562	1414,213562
6	14,14213562	14,14213562	14,14213562	14,14213562	14,14213562
7	0,345576	0,345576	0,345576	0,345576	0,345576
8	Simulación con Ω , r , y $(w + h)$				

4.4. Protocolos

Con base en lo descrito en el capítulo 3 se llega a la escogencia de los protocolos reactivos DSR y AODV y el proactivo DSDV para ser simulados ya que son los más estudiados y que de acuerdo con las características del enlace de datos tácticos Colombiano CTDL expuesto en el capítulo 2 pueden implementarse con probabilidad de éxito ya que se acomodan a las características y tamaño de la red. Adicionalmente se trató de que una vez se obtenidos los resultados se puedan comparar con los referentes (*benchmark*) encontrados, y que por lo menos uno corresponda a un protocolo reactivo y los otros dos a un protocolo proactivo o viceversa.

4.5. Métricas

Las métricas usadas en esta simulación son:

- 1) *Desempeño Promedio*: se define como que tan rápido un nodo puede enviar datos a través de una red [47], en si es el promedio de datos enviados satisfactoriamente sobre un canal de comunicaciones.

Otra aproximación es la medida del número de paquetes o datos que satisfactoriamente son transmitidos hasta el nodo final o destino por medio de un enlace de comunicación por unidad de tiempo, es medida en bits por segundo (bps) [51].

2) Relación de Entrega de Paquetes (PDR, *Packet Delivery Ratio*): Una definición es la relación entre la totalidad de datos en bits recibidos sobre el total de datos en bits enviados desde la fuente al destino [47].

En [51] se menciona que corresponde al porcentaje de datos o paquetes generados que logran llegar al destino satisfactoriamente expresado como:

“El Total de paquetes satisfactoriamente enviados sobre el total de paquetes enviados”.

Existen otras métricas, como la relación de consumo de energía, que como ya se explicó no es pertinente para el caso debido a que las unidades o nodos del CTDL cuentan con una fuente constante de energía. También se encuentran otras como el retardo promedio entre terminales, que hace referencia al tiempo promedio que toma un paquete entre la fuente y el destino, o se puede encontrar el control de sobrecarga que hace referencia a la cantidad de paquetes que se reciben o se envían en cada nodo. Para el caso, las dos métricas principales son suficientes para poder establecer la conveniencia de un protocolo en la simulación.

4.6 Simulación

La metodología usada consiste primero en adoptar una serie de suposiciones que garantizarán la validación de los resultados, segundo tener claro los parámetros de entrada del generador de escenarios para que se vean reflejados en los scripts generados y tercero realizar la ejecución de los scripts en el simulador.

4.6.1 Suposiciones

- Siempre se usa la misma red entre los protocolos, con los mismos parámetros.

- La misma distancia entre los nodos por simulación.
- Las velocidades son proporcionales a los espacios verdaderos como se expuso en la tabla 5 y 7.
- Dentro de las simulaciones solo serán móviles los nodos del CTDL y resto serán fijos.
- Las simulaciones no contemplan aspectos externos como el medio ambiente o condiciones del hardware entre otros.
- Todas las simulaciones tendrán 3 conexiones al mismo tiempo
- Solo se usará el software NSG2 [50] para generar el escenario planteado y el NS-2 [42] para la simulación

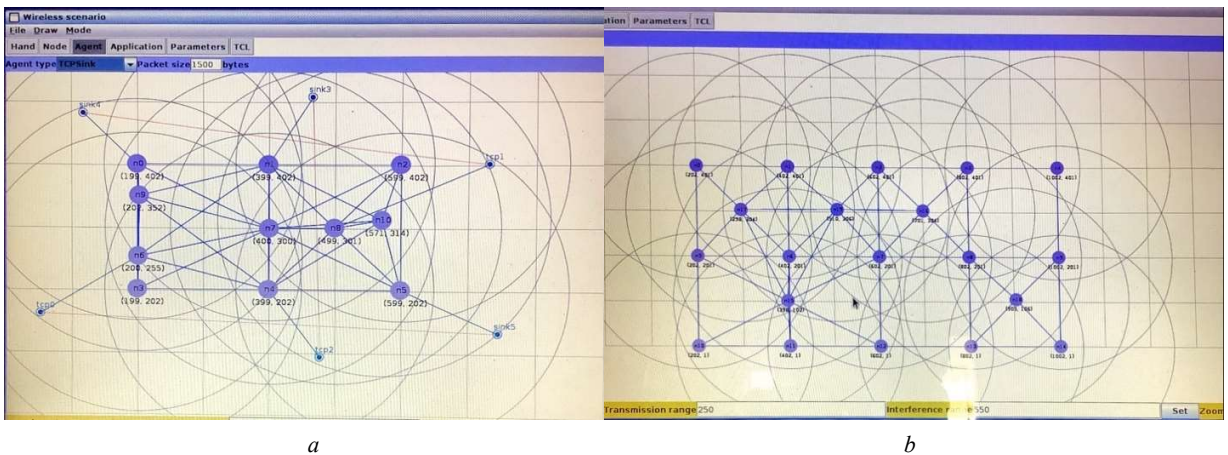
4.6.2. Parámetros del Generador de Escenario

- 1) Debe ser una red tipo *Wireless scenario*
- 2) Cantidad de nodos por simulación: se estableció que se realizarían 5 simulaciones por cantidad de nodos por cada uno de los protocolos, es decir, se realizaron 15 simulaciones independientes.
- 3) La movilidad a los nodos se les da a través de la programación de un *waitpoint* donde se establece a qué velocidad se moverá, en que tiempo empieza su recorrido y las coordenadas del destino.
- 4) Por medio del *Agente* se definen la cantidad y tipo de conexiones. Para todos los escenarios se usaron tres conexiones, cuya fuente son los dos nodos que corresponden a los buques, y un nodo que corresponde al submarino, los nodos destinos se situaron aleatoriamente en el lado opuesto.
- 5) Se determinó que el tamaño de los paquetes para todos los casos es de 1500 bytes.
- 6) En la *Aplicación* se establece el tiempo activo de las conexiones indicando su inicio y su fin.
- 7) En la sección de *Parámetros* se ingresan los siguientes datos:
 - Simulación: Tiempo 30s, Trace File *AODV.tr* y el Nam File *AODV.nam*, según el protocolo, aquí es donde se generan los scripts con los datos de seguimiento de la simulación.
 - Wireless: Tipo de canal, *Wireless channel*. Modelo de propagación, *Two Ray Gound*. Protocolo MAC – 802_11. Tipo de capa de enlace, LL.

Antena, Omnidireccional. Cantidad máxima de paquetes en cola, 50 por defecto. Finalmente, se activaron los *tracers* de datos.

- Parámetros del canal: Vienen por defecto, pero entre los principales esta, Frecuencia 2.472e9, Ancho de Banda 11Mb, *DataRate* 11Mb y *BasicRate* 1Mb.
- TCL: Es la opción donde se genera el script maestro donde está todo el código de la simulación, el cual se anexan y digitalmente estarán completos, básicamente quedan plasmados todos los puntos anteriores en un ejecutable, que como se mencionó este realiza la simulación y genera dos archivos de datos de seguimiento, el .tr y el .nam.

En la figura 22, se muestran pantallazos del generador de escenarios en los que se varían la cantidad de nodos:



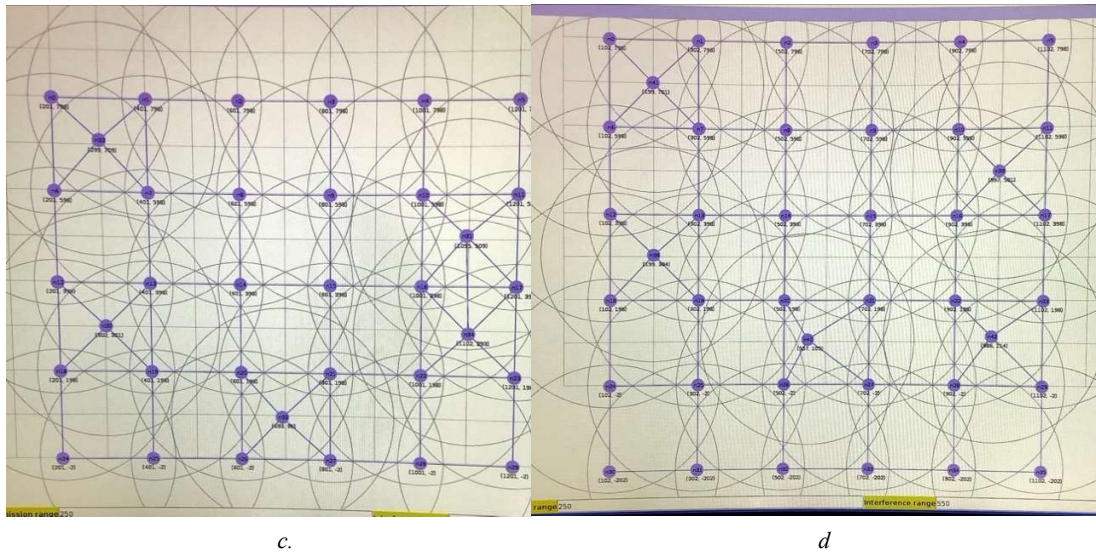


Figura 22. Escenarios Planteados. a. 11 Nodos, b. 29 Nodos, c. 35 Nodos, d. 41 Nodos

4.6.3. Ejecución de los Scripts

Para extraer los datos de los archivos `.tr` y `.nam` se hacen necesarios otros scripts del tipo `.awk` (esto por el nombre del autor **Aho Weiberger Kenighan**) los cuales requieren de un intérprete (*software gawk*). En esencia son los extractores de datos de los archivos de seguimiento para que se obtengan los datos de la métrica deseada. Para el caso se obtuvieron los archivos `average_throu.awk` (extrae los datos relacionados con el desempeño promedio) y el `pdr.awk` (extrae lo datos relacionados con la relación de paquetes enviados), los cuales también aparecen en los anexos a este Documento.

Para la simulación se recomienda usar diferentes grupos de nodos por protocolo simulado [52], para el caso se usaron los 5 grupos ya descritos.

Ya en el terminal se ejecuta el simulador llamando a los scripts de los protocolos seleccionados del tipo `.tcl`, se ejecutan y se verifica que el escenario funcione, como se muestra en la figura 23 [42].

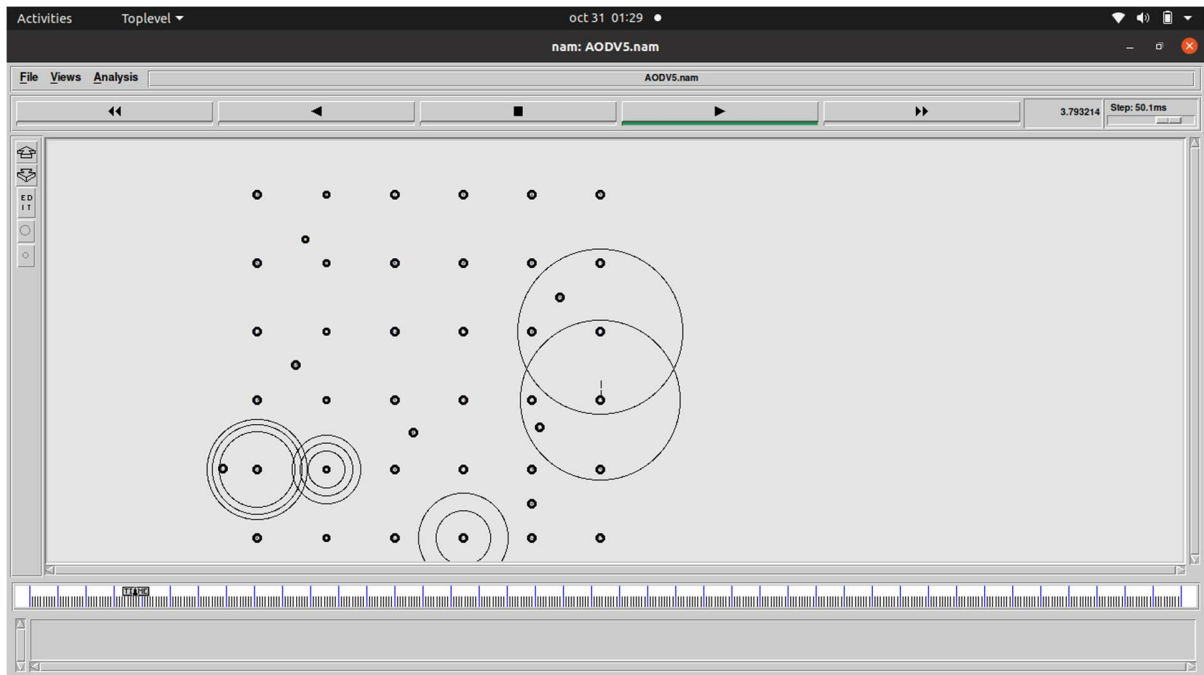


Figura 23. Ejemplo de simulación NAM Protocolo AODV

Ya mediante la ejecución del interprete *gawk* se sustraen los datos de interés, estos se almacenan en una tabla y así se configuran las respectivas figuras que se mostraran en el capítulo 5

En los anexos se encuentran ejemplos de los códigos y scripts, y digitalmente se proporcionarán todos los archivos que contienen en detalle la información de cada una de las simulaciones realizadas.

5. Análisis de resultados

Los resultados se presentan al amparo de los objetivos propuestos, el primero corresponde a establecer la necesidad del usuario para caracterizar y modelar el ambiente de uso, el segundo a estudiar protocolos de enrutamiento de redes Ad Hoc de acuerdo con las características del entorno de uso definido que permitan escoger un protocolo de acuerdo con los requerimientos establecidos y el tercero a encontrar un referente (*benchmark*) que estipule cuales son las características de desempeño.

Mediante la simulación se compararon los protocolos modelados. Todo esto para llegar a determinar un protocolo para la configuración de enrutamiento de una red de enlaces tácticos Ad Hoc para ser utilizada por unidades participantes en escenarios marítimos.

Así las cosas, en referencia al primero se menciona el trabajo realizado, para el segundo se presenta el análisis preliminar teniendo como base lo descrito en el capítulo 3 y para el tercero y último, se indica los referentes y los resultados de la simulación.

5.1. Resultado caracterización y el modelado del ambiente de uso y definición de la necesidad del usuario

Para determinar la necesidad del usuario el capítulo 2 caracterizó el ambiente de operación y en el se determinó el escenario a partir del ambiente operacional planteado para el desarrollo del CTDL, se realizaron unos requerimientos que inferían las características y necesidades para el sistema, puntualmente el ítem 2.2 describe como se llegó a determinar esta necesidad cumpliendo con el objetivo específico que aparece en 1.4.2.1., este permitió que se determinaran las características técnicas del escenario marítimo del CTDL que sirvieron para los análisis de parámetros, métricas y protocolos a usar.

5.2. Escogencia de un protocolo de acuerdo con los requerimientos establecidos

En el capítulo 3 ítem 3.3 se realiza una comparación y se establecen consideraciones a tener en cuenta, de esto se concluye que con la información investigada y presentada se puede seleccionar un protocolo a ser usado en un CTDL con los siguientes argumentos:

En los protocolos reactivos, el uso de banda ancha se optimiza debido a la menor carga en los mensajes. El tráfico no requiere de actualizaciones continuas y el bajo tráfico garantizan el excelente rendimiento del protocolo. Por lo tanto, los protocolos reactivos funcionan mejor que los proactivos en los procesos de actualización y recuperación de rupturas de enlaces, ya que los proactivos requieren una actualización constante de la tabla y, por lo tanto, el tráfico de información se congestiona. Entre los protocolos reactivos, TORA y AODV tienen la capacidad de multidifusión, mientras que, entre los protocolos proactivos, solamente CGRS tiene esta capacidad a través de un algoritmo secundario. El consumo de ancho de banda es menor, especialmente en TORA y DSR, porque los mensajes solo se envían a petición, en contraste con los que se envían continuamente en protocolos proactivos.

Todos los Protocolos de Enrutamiento mantienen los enlaces entre los nodos mientras se mantenga la información de ruta; sin embargo, los protocolos controlados por tablas funcionan mejor porque la información siempre está disponible. Teniendo en cuenta los protocolos de rendimiento teórico antes mencionados, se puede concluir que los proactivos tienen un menor retraso en la mensajería. Otra ventaja es que normalmente seleccionan el camino más corto, que es el más poderoso para crear enlaces más fuertes. En cuanto a la cantidad de nodos, relativamente pocos protocolos han mejorado el rendimiento.

Hay muchas características de los protocolos que no son realmente utilizables por la red planteada en este escenario marítimo, así como otras que no harían diferencia en su implementación, tales como el uso de energía porque los nodos participantes tienen una fuente de alimentación constante. Tanto los protocolos reactivos como los proactivos funcionan bien en redes pequeñas de tráfico moderado y baja densidad, pero a medida

que el sistema crece en densidad y tráfico, aparecen ventajas y desventajas. En términos de latencia, los protocolos de enrutamiento estarían bien implementados en el CTDL porque la dinámica de uso real permite retrasos de hasta dos minutos sin ser críticos. Este sistema implementa características de sincronización de reloj vía GPS usado para determinar la posición del nodo y el control de acceso de los medios cuando sea necesario. Esta capacidad estaría disponible si se implementa el protocolo TORA. En cuanto al tamaño de la red con fines de simplicidad, se deben implementar protocolos planos y no jerárquicos.

La validación de este estudio preliminar empleando una herramienta de simulación permite el ajuste de los resultados con los datos obtenidos.

5.3 Presentación de datos de las simulaciones efectuadas

Se diseñaron 5 escenarios con cantidades diferentes de nodos para simular los tres tipos de protocolos, en total son 15 simulaciones, que generaron 15 scripts ejecutables, y 30 archivos de datos de trazabilidad, que hacen parte de la entrega digital de este trabajo.

A continuación, se presenta un resumen de los datos obtenidos en la tabla 9.

Tabla 9. Presentación de datos de simulaciones realizadas

Métrica	Descripción	11 NODOS	20 NODOS	29 NODOS	35 NODOS	41 NODOS
average throu	Nombre del Archivo	AODV1	AODV2	AODV3	AODV4	AODV5
	Tiempo de Inicio	1	1	1	1	1
	Tiempo final	27	28	33	36	40
	Paquetes recibidos	1797	1333	561	536	589
	Desempeño dado en kbps	0.549432	0.394793	0.139133	0.124457	0.118625
	Nombre del Archivo	DSDV1	DSDV2	DSDV3	DSDV4	DSDV5
	Tiempo de Inicio	1	1	1	1	1
	Tiempo final	27	27	0	0	0
	Paquetes recibidos	2882	1628	0	0	0
	Desempeño dado en kbps	0.876759	0.496147	0.00000	0.000000	0.000000
	Nombre del Archivo	DSR1	DSR2	DSR3	DSR4	DSR5
	Tiempo de Inicio	1	1	1	1	1
	Tiempo final	27	27	34	37	40
	Paquetes recibidos	1976	1275	931	882	833
	Desempeño dado en kbps	0.600847	0.386857	0.225292	0.1934457	0.1666793
pdr	Nombre del archivo	AODV1	AODV2	AODV3	AODV4	AODV5
	Paquetes enviados	1828	1396	654	651	681
	Paquetes recibidos	1797	1333	561	536	589
	Paquetes reenviados	0	1827	2750	2934	3358
	Relación de entrega de paquetes	0.983042	0.954871	0.857798	0.823349	0.864905
	Nombre del archivo	DSDV1	DSDV2	DSDV3	DSDV4	DSDV5
	Paquetes enviados	2888	1646	12	12	12
	Paquetes recibidos	2882	1628	0	0	0
	Paquetes reenviados	0	92	0	0	0
	Relación de entrega de paquetes	0.997922	0.989064	0.0000	0.000000	0.000000
	Nombre del archivo	DSR1	DSR2	DSR3	DSR4	DSR5

Paquetes enviados	1976	1283	979	922	850
Paquetes recibidos	1976	1275	931	882	833
Paquetes reenviados	0	1992	4777	7344	8494
Relación de entrega de paquetes	1	0.993765	0.95970	0,95661605	0.9800000

En el análisis de la métrica , la primera es el desempeño promedio, los datos recolectados permitieron construir la figura 24, en esta se observa que al inicio con 11 nodos el protocolo proactivo tiene un mejor desempeño, seguido por los reactivos DSR y AODV, esta tendencia continua igual para 20 nodos, sin embargo, el desempeño para todos los protocolos expuestos disminuye para 29, 35 y 41 nodos, la moda cambia y se puede apreciar que el protocolo proactivo DSDV que al principio tuvo excelente desempeño disminuyó prácticamente a 0; lo que se puede explicar en el sentido que a medida que aumentan la cantidad de nodos el sistema se satura de información de las tablas ya que cada nodo debe ser actualizado con toda la información de las rutas de forma constante.

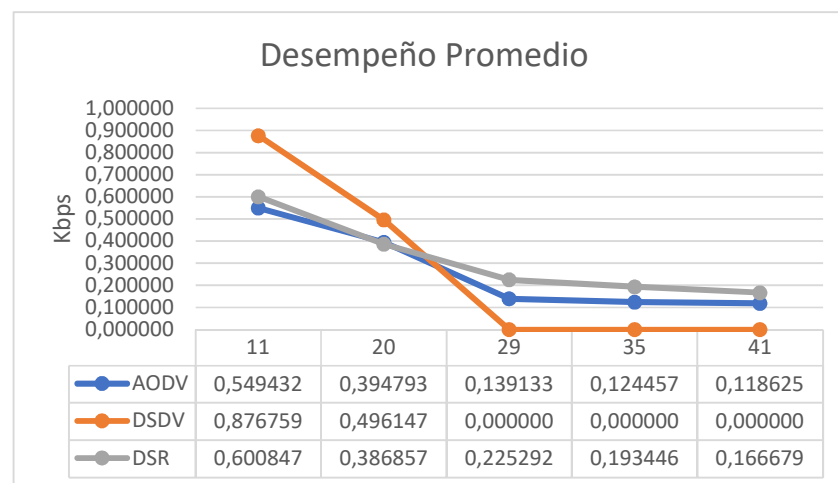


Figura 24. Métrica de Desempeño Promedio

En AODV también disminuyó su rendimiento comparado con el DSR esto podría explicarse porque a medida que aumentan los números de nodos se espera que los nodos relevo puedan detectar las emisiones entre ellos mismos y por ende gastan más tiempo en esta actividad que podría saturar la red y convertir rutas establecidas activas en obsoletas, a medida que aumentan los nodos y la movilidad la red crece varias medidas de desempeño decrecen.

DSR, aunque en un principio no fue el de mejor desempeño, no estuvo alejado del resto, pero con el aumento en el tamaño de la red y la congestión fue el más estable en su desempeño, aunque al igual que los dos anteriores también decreció.

Para analizar la figura 25 que corresponde a la relación de entrega de paquetes, se observa que el protocolo DSDV mostró un buen comportamiento en relación a la entrega de paquetes para 11 y 20 nodos, sin embargo, para el resto disminuyó dramáticamente a 0, esto al igual que el anterior análisis, se debe a que es un protocolo proactivo y que a medida que aumentan los nodos la red se satura llevándolo colapsar, se podría establecer que a partir de más de 20 nodos es el punto de quiebre de este protocolo para el escenario planteado. El protocolo AODV con el aumento de los nodos declina su desempeño y podría atribuirse a que no puede lidiar con el exceso de tráfico en la red. Igualmente se revela que el protocolo DSR mantuvo un buen desempeño a través del aumento de los nodos, esto puede ser debido a que en este protocolo se usan nodos caches que disminuyen la probabilidad de la escogencia de rutas obsoletas, este protocolo en sus procedimientos de descubrimiento de rutas no solo va almacenado las rutas al nodo de destino, sino que podría almacenar rutas a otros nodos destino aumentando así la eficiencia y mejorando el consumo de ancho de banda.

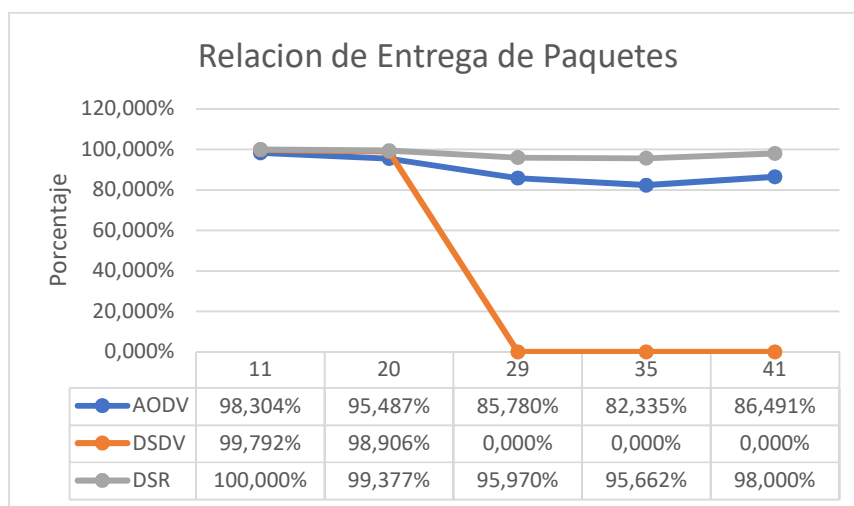


Figura 25. Métrica de Relación de Entrega de Paquetes

Finalmente en la figura 26 se observa, y aunque no es una métrica de desempeño como tal, los resultados que arrojan un medidor de la cantidad de retransmisión de paquetes, se puede concluir que por ejemplo el DSDV inicia con 0 retransmisiones al igual que los

demás, sin embargo, ya para 20 nodos, las retransmisiones que realiza son muy pocas comparadas con los protocolos reactivos, esto es debido a que no necesita realizarlas ya que mantiene las tablas actualizadas, no obstante, al colapsar el protocolo debido a la saturación es obvio que ya no hayan retransmisiones. En AODV presenta menos retransmisiones que es congruente con el desempeño que muestra. El DSR muestra la mayor cantidad de retransmisiones, pero igualmente es el de mejor desempeño de los tres a medida que aumentan los nodos, sin embargo, cabe anotar que todos los protocolos probados muestran la tendencia a disminuir su desempeño y eficiencia a medida que aumentan el número de nodos.

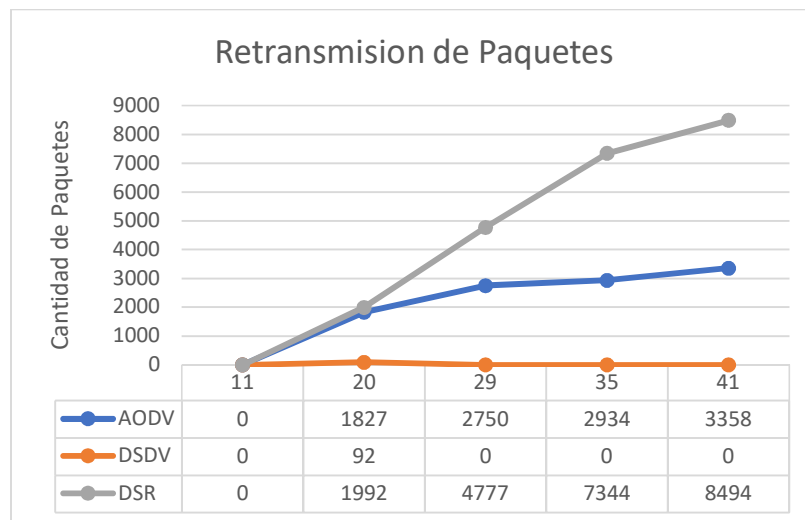


Figura 26. Retransmisión de Paquetes

5.4 Análisis de los Benchmark presentados en referencia a los resultados de las Simulaciones

Se pueden comparar de una forma general guardando las proporciones y tratando de entender las diferencias que se pueden presentar con los referentes. Hay métricas y condiciones que fueron establecidas de acuerdo con las circunstancias, para efecto se analizó una a una la pertinencia con las expuestas en la sección 4.1:

En [43] se comparan 4 protocolos, de los cuales dos se verificaron con los del presente trabajo que corresponden a los reactivos AODV y DSR. En [43] se realizaron los

experimentos basados en la variación de velocidad de los nodos y en la cantidad de nodos, y con cuatro métricas de las cuales solo es comparable la de relación de entrega de paquetes

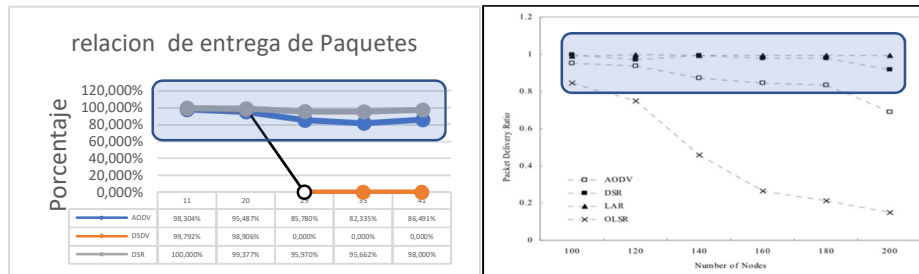


Figura 27. Comparación de Métrica relación de paquetes enviados

De la figura 27 se observa que los protocolos AODV y DSR tienen un desempeño muy similar manteniéndose cercanos al 100% a través del aumento de los nodos.

En [44] se comparan los mismos protocolos que se usaron en este trabajo, utiliza la tasa de entrega de paquetes, retardo promedio y la sobrecarga de enrutamiento como métricas, sin embargo no es posible compararlos directamente debido a que se usó como patrones de variación los tiempos de pausa, o desempeño a través del tiempo y la variación en el número de conexiones, no obstante, en sus conclusiones prácticamente se llega a la misma, que DSDV es el de peor desempeño y que el de mejor desempeño es DSR.

En [45] se comparan los mismos tres protocolos, aunque en referencia a las métricas solo utilizó la de *throughput*, no obstante, la simulación no fue basada en la variación de la cantidad de nodos sino en la variación en el tiempo, al igual que en [44] es posible compararlos a la luz de los resultados, una de las conclusiones *congruentes* es que los protocolos en demanda o reactivos ofrecen mejores resultados, también manifestó que debido a las bajas velocidades para actualizar las tablas en cada nodo que alcanzan los proactivos, es decir, la red se puede saturar, y se menciona que el DSR es el protocolo más rápido, y que DSDV es de peor desempeño debido a los cálculos de tiempo para establecer las rutas implicando de por sí un retardo en el envío de paquetes, en cuanto a AODV dice que su desempeño depende si existen solicitudes de búsquedas de ruta.

Tanto [38] como [46], realizan simulaciones con diversos protocolos diferentes, sin embargo, es interesante que se toman las mismas métricas de este trabajo de grado, para analizar los resultados.

Cabe anotar que en [47] se realiza un trabajo de comparación entre estos protocolos usando las misma métricas y protocolos, se realizó el experimento variando la cantidad de nodos de 10, 20, 30, 40 y 50, aunque también tomo parámetros diferentes tales como la variación del espacio de la red, el tiempo que fue de 0, 30,90, 120, y 150 segundos el tamaño del paquete de 500 bytes y el tipo de conexiones fue aleatoria y no definida.



Figura 28. Comparación de graficas de tasa de entrega de paquetes

No se tendrán en cuenta los resultados de las simulaciones cuya variación fue el tiempo y el área, ya que son incompatibles e incomparables, la única comparable es con la variación de la cantidad de nodos.

La figura 28 muestra el resultado de la comparación de la relación de entrega de paquetes que es congruente en el sentido que el protocolo DSR tuvo mejor desempeño que DSDV y muy cercano al AODV, pero, en el resultado de este trabajo DSDV al principio tuvo un desempeño comparable con los otros protocolos y en la experimentación de [47] siempre fue malo.

Para la figura 29, que trata del desempeño promedio *throughput*, difiere en el desempeño del protocolo AODV, este solo es similar para los nodos del 10 al 30, al final muestra un repunte en el desempeño, en relación a los protocolos DSDV y DSR para los nodos 10 al 30 el comportamiento es similar aunque para los nodos 40 y 50 cambia ya que en el experimento que se realizó en este trabajo el desempeño de los tres protocolos cae con

el aumento de los nodos y en el experimento del autor se mantienen a través de los nodos a excepción de AODV como se mencionó.

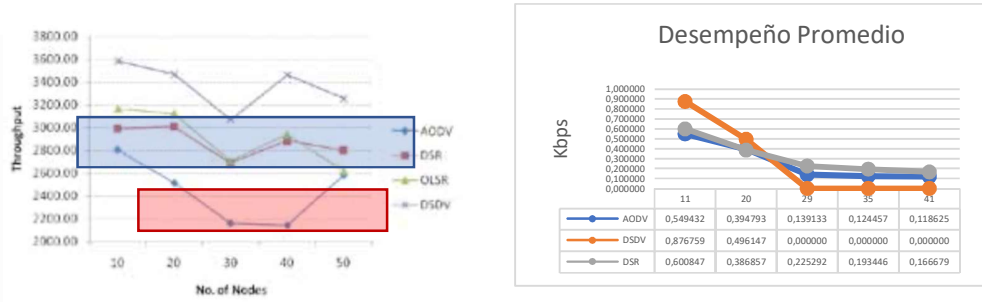


Figura 29. Comparación de graficas de desempeño promedio

6. Conclusiones y Recomendaciones.

A lo largo de este trabajo de grado se desarrollaron los tres objetivos específicos, en el capítulo 2 se estableció la necesidad del usuario, se caracterizó el sistema y finalmente se modeló el ambiente de uso. En el capítulo 3 se estudiaron los protocolos de enrutamiento de acuerdo con las características del entorno de uso definido para que al final de este trabajo se pudiese elegir un diseño de protocolo de acuerdo con los requerimientos establecidos. En el capítulo 4 y 5 se buscaron diferentes referentes en los cuales se observaron sus características, métricas y medidas de desempeño. Luego se realizó la respectiva simulación y finalmente se analizaron los resultados teniendo en cuenta los referentes, el estudio teórico y el ambiente operacional de CTDL para poder seleccionar el protocolo.

6.1. Conclusiones

- Se determinó cuál era la necesidad del usuario mediante la caracterización del medio ambiente operacional sirviendo como base fundamental para el análisis y simulación de los protocolos propuestos. Se estipuló que la red del CTDL se considera moderada y de baja densidad, los nodos son móviles y de baja velocidad haciendo que la latencia y el retraso en el envío de paquetes sea tolerable por el usuario. En cuanto al ancho de banda, es limitado debido a la diversidad de marcas y tipos de equipos del CTDL. No se espera que la red sea altamente congestionada. En relación con el tamaño y cantidad de nodos se considera que es pequeña comparadas con las redes típicas de la OTAN. Por otro lado, para la red la variable de consumo de potencia es algo que no tiene injerencia debido a que las unidades tienen disponibilidad constante y sin restricciones de fuentes de alimentación. De acuerdo con la configuración de las unidades de Armada Nacional se corrobora que todos los nodos tienen la capacidad de ser fuente, destino o relevos según se necesite. Finalmente, el CTDL utiliza información GPS en su mensajería para determinar la posición de los nodos entre la red establecida, es decir, el uso de GPS podría aprovechar en protocolos que requieren sincronización en los temporizadores de expiración

- Se estudiaron y compararon teóricamente diferentes protocolos de enrutamiento, de los resultados se concluye que para el caso se desempeñan mejor los protocolos reactivos debido al uso de las tablas que hacen que se congestione y se sature rápido la red. Este problema es crítico debido a las limitaciones de hardware mencionadas para los escenarios marítimos en especial por el consumo de banda ancha que es crítico, a diferencia de los protocolos reactivos que en redes pequeñas con un tráfico moderado hacen que la carga en los paquetes de señales no sea grande disminuyendo la congestión.

Entre los reactivos a pesar de que AODV es mas ligero en su mensajería pero por su estructura jerárquica y debido a que no puede usar rutas con vínculos asimétricos, DSR aún con mayor carga en sus mensajes, funciona mejor en redes de movilidad moderada en relación a la latencia de paquetes manejados por el protocolo, permitiendo que todos los nodos se conviertan en relevos y receptores, por lo tanto, según el análisis de este tipo de protocolos reactivos, DSR puede funcionar mejor en el Enlace de datos Tácticos Colombiano

- Las características de desempeño de referentes encontrados en la literatura que permitieron la posterior comparación de estas con los resultados obtenidos en la simulación, permiten concluir que, estos referentes realizaron simulaciones en entornos definidos, rígidos y no todas las variables son conocidas para ser equiparables con el CTDL, pese a esto, se logró extraer de los resultados las métricas de tasa de envío y recepción de paquetes y el *throughput* comparados con la variable común entre los referentes que fue la de cantidad de nodos.
- Se simularon los protocolos proactivos DSDV y los reactivos DSR y AODV, donde se corroboró que los protocolos proactivos tienen mejor desempeño a medida que la red se satura en cantidad de nodos, DSDV al inicio con pocos nodos tuvo buen desempeño, pero a medida que aumentaba el tamaño de la red este disminuyó. AODV también disminuyó su desempeño comparado con DSR, de aquí se concluye, aunque este en un principio este protocolo no fue el de mejor desempeño, no estuvo alejado del resto, pero con el aumento en el tamaño de la

red y la congestión fue el más estable, aunque al igual que los dos anteriores también decreció. Luego se compararon estos resultados con los referentes (*benchmark*) donde se pudieron validar la congruencia de estos.

- Se determinó que el protocolo para la configuración de enrutamiento de una red de enlaces tácticos Ad Hoc para ser utilizada por unidades participantes en escenarios marítimos es DSR. Respondiendo así, a la pregunta de investigación “*Es posible encontrar el protocolo de enrutamiento de una red Ad Hoc de enlaces de datos tácticos más eficiente a ser implementado considerando la cantidad de nodos y de diferentes escenarios operacionales marítimos*”. Cumpliendo a cabalidad con el objetivo general y los objetivos específicos.

6.2. Recomendaciones

- Realizar un estado del Arte en relación los protocolos implementados por sistemas TDL a nivel no OTAN, esto teniendo en cuenta que no se rigen por directrices impuestas, sino que obedecen a solución a la medida.
- Iniciar con la implementación de los protocolos de enrutamiento para empezar a evaluarlos en ambientes reales.
- Continuar con las simulaciones, ya que son una buena herramienta que ahorra tiempo y dinero, además de ser un *know-how* adquirido que poco a poco estaría logrando la experticia para crecer y mejorar el CTDL, esto contribuiría al desarrollo de la política de mejoramiento de I+D+I de la Armada Nacional.
- Investigar a futuro si se deben hacer cambios en la configuración del CTDL o en lo protocolos de enrutamiento teniendo en cuenta que a medida que la red aumenta en tamaño los protocolos de enrutamiento pierden eficiencia y tienden a saturarse.
- Aplicar estas técnicas de simulación y de protocolos de enrutamiento en otros sistemas similares de la Fuerzas Militares, como el HORUS de la Fuerza Aérea Colombiana.

7. Bibliografía

- [1] C.-K. Toh, *Ad Hoc Mobile Wireless Networks, Protocols and Systems*, Upper Saddle River, , New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [2] BAE systems, *Common Data Link*, Wayne, New Jersey: BAE Systems, 2014.
- [3] SISDEF, «SISDEF,» SPC-100, 2017. [En línea]. Available: <http://www.sisdef.cl/articulo/producto-y-servicios-mando-y-control/7/29/sistema-data-link-sp-100.html>. [Último acceso: 30 05 2017].
- [4] S. M. L. S. M. T. Gustavo Perez Valdez, «Desarrollo de un Enlace de Datos Tactico, Fsa 1: Prototipo,» COTECMAR, Cartagena, 2012.
- [5] C. L. G. JR., «Data Link Communications i Tactical Air Command and Control Systems,» *IEEE Journal Selected Areas in Commnunications*, vol. SAC 3, nº 5, pp. 779-790, 1985.
- [6] T. C. D. W. John Asentorfer, «Tactical Data Lynk Systems and the Australian <defence Force,» DSTO Information Sciences LAaboratory, Edinburg, 2003.
- [7] Z. Y. J. H. Samba Sesay, «A Survey on Mobile Ad Hoc Wireless Network,» *Information Technology Journal*, vol. 3, nº 2, pp. 168-175, 2004.
- [8] COTECMAR, «Especificaciones de Requerimientos y Diseño de Modulo de Software, Modulo DLINK,» *Informe Tecnico proyecto LINK-CO*, vol. 1, nº 1, pp. 34-45, 01 Febraury 2016.
- [9] N. Grumman, *Understanding Voice and Data Link Networking*, San Diego, California: Northrop Grumman, 2014.
- [10] I. Bolt Beranek and Newman, «A History of the ARPANET,» DARPA, Arlington, Virginia, 1981.
- [11] A. J. P. O. Grady, *Stated of Art: Ad Hoc Networking*, Cock: Cock Institute of Tchnolgy, 2003.
- [12] N. Grumman, *Link 22 Guidebook Overview*, fourth ed., San Diego, California: Northrop Grumman, 2013.
- [13] W. E. Hoekstra, «Tactical Data Links and Interoperability, The Glue between Systems,» *Systemn oncepts for integrated Air Defense of Multinational Mobile Crisis Reaction Forces*, p. 8, 24 Mayo 2000.
- [14] S. D. P. M. L. S. C. M. T. Gustavo Pérez Valdes, «DESARROLLO DE UN ENLACE DE DATOS TÁCTICOS CON ACCESO AL MEDIO BASADO EN ASIGNACIÓN POR DEMANDA,» de Tercer Congreso de ingeniería "INTERNATIONAL SHIP DESIGN & NAVAL" COLOMBIAMAR, Cartagena, 2013.
- [15] C. Wilson, «Network Centric Operations: Background and Oversight Issues for Congress,» Congressional Research Service, 2007.

- [16] C.-K. T. Elizabeth M. Royer, «A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks,» *IEEE Personal Communications*, vol. 6, nº 2, pp. 46-55, April 1999.
- [17] W. B. P. M. D. Ha DuyenTrung, «Performance evaluation and comparison of different ad hoc routing protocols,» *Computer communications*, vol. 30, nº 11-12, pp. 2478-2496, 10 September 2007.
- [18] D. d. A. J.-C. M. Jesús Friginal, «A survey of evaluation platforms for ad hoc routing protocols: A resilience perspective,» *Computer Networks*, vol. 75, nº Part A, pp. 395-413, 24 December 2014.
- [19] J. M. Gomez T., W. A. Castro C, G. Perez V, S. Marrugo LL. y J. Villegas D, «Código de un Sistema De red Táctica Naval,» COTECMAR, Cartagena, 2015.
- [20] B. Tang, Baoliu Ye, L. Sanglu, G. Song y I. Stojmenovic, «Latency-optimized Broadcast in Mobile Ad Hoc Networks without Node Coordination,» de *MobiHoc 2014*, Philadelphia, PA, USA, 2014.
- [21] K. A. Jagadev, K. B. Pattanayak, K. M. Mishra y M. Nayak, «Power and Delay Aware On-Demand Routing For Ad Hoc Networks,» *IJCSE International Journal of Computational Science and Engineering*, vol. 02, nº 04, pp. 917-923, 2010.
- [22] M. Gerla, L.-J. Chen, Y.-Z. Lee, B. Zhou, J. Chen, G. Yang y S. Das, «Dealing with node mobility in Ad Hoc wireless network,» UCLA, Computer Science Department, Los Angeles, California, 2005.
- [23] NORTHROP GRUMMAN, LINK 22 Guidebook Overview, San Diego, California: Space & Mission Systems Corp., 2010, p. 120.
- [24] J. P. O. Grady and A. McDonald, "State of the Art: Ad Hoc Networking," *M-Zones Deliverable 1*, vol. State of Art Surveys, no. 2, pp. 16-26, Mayo 2003.
- [25] A. Wilkins, *What's New With Unlicensed National Information Infrastructure (U-NII)*, FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION, 2014.
- [26] Real Academia de la Lengua, Real Academia Española, 2019. [En línea]. Available: Diccionario Lengua Española. [Último acceso: 21 junio 2019].
- [27] US Department of Defense, DOD Dictionary of Military and Associated Terms, Washington: US Department of Defense, 2018.
- [28] L. C. Golliday, «Data Link Communications in Tactical Air Command and Control Systems,» *JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, Vols. %1 de %2SAC-3, nº 5, pp. 779-791, September 1985.
- [29] P. Kuosmanen, «Classification of Ad Hoc Routing Protocols,» Helsinki.
- [30] L. Coya Rey, T. O. Ledesma Quiñones y W. Baluja Garcia, «Protocolos de enrutamiento aplicables a redes MANET,» *REVISTA TELEMÁTICA*, vol. 13, nº 3, pp. 59-74, 2014.
- [31] M. Venkat y N. Kasiviswanath, «Routing Protocols for Wireless Mesh Networks,» *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 12, nº 8, 2011.

- [32] C. Bhagwat y C. Perkins, «Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance- Vector Routing (DSDV) for Mobile Computer,» *Proceedings of ACM SIGCOMM*, pp. 234-244, Septiembre 1994.
- [33] S. Murthy y J. Garcia-Luna-Aceves, «A Routing Protocol for Packet Radio Networks,» *Proceedings of ACM First International Conference on Mobile Computing & Networking MOBICOM95*, Noviembre 95.
- [34] S. Murthy y J. Garcia-Luna-Aceves, «An efficient Routing Protocol for wireless Network,» *ACM Mobile Networks and App. J.*, n° Special on Routing In Mobile Communication Network, pp. 97-183, Octubre 1996.
- [35] A. Tanenbaum, *Computer Networks*, vol. 3, Englewood, New Jersey: Prentice Hall, 1996, pp. 357-358.
- [36] C. -C. Chiang, «Routing In Clustered Multihop, Mobile Wireless Networks with Fading Chanel,» de *IEEE SICON 97*, Singapore, April 1997.
- [37] B. Bellur, R. G. Ogier y F. L. Templin, «Topology Broadcast based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF),» 11 July 2000. [En línea]. Available: <https://tools.ietf.org/html/draft-ogier-manet-tbrpf-00>. . [Último acceso: December 2019].
- [38] M. Shobana y S. Karthik, «A Performance Analysis and Comparison of various Routing Protocols in MANET,» de *Proceedings International Conference on pattern Recognition, Informatics and Mobile Engineering*, Tamilnadu, India, 2013.
- [39] S. Taneja y A. Kush, «A soiurvey of Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks,» *International Journal of Innovation and Technology*, vol. 1, n° 3, pp. 279-285, August 2010.
- [40] G. M. Kaosar, H. M. Asif, T. R. Sheltami y A. S. Hasan Mahmud, *Simulation-Based Comparative Study of on Demand Routing Protocols for MANET*, Dhahran: King Fahd University of Petroleum and Mineral.
- [41] Z. Haas y M. Paerlman, «The Performance of Query Control Schemes for the Zone Routing Protocol,» de *ACM SIGCOMM'98*, Vancouver, 1998.
- [42] UCB. VINT. SAMAN and Conser projects at ISI., *NAM - The Network Animator*, Caliofornia: UNIVERSITY OF CALIFORNIA, UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA, USI Information Sciences Institute, 1991 -2002.
- [43] J.-M. Choi y Y.-B. Ko, «A Performance Evaluaiation for Ad Hoc Routing Protocols in Realistic Military Scenarios,» Ajou University, Suwom, Republic of Korea, 2004.
- [44] M. Robles, L. Marrone, J. Diaz y A. Barbieri, «Compatración de protocolos de ruteo en redes ad-hoc,» de *XVI Congreso Argentino de ciencias de la Computacion CACIC*, Universidad de Moron, Buenos Aires Argentina, 2010.
- [45] F. Z. Othman y A. M. Khaled, «Comportamiento de los Protocolos de Encaminamiento den rdes MANET (MOBILE AD HOC NETWORK),» *REVISTA INGENIERIA SOLIDARIA*, vol. 6, n° 10-11, pp. 45-52, Enero-Diciembre 2010.

- [46] H. D. Trung, W. Benjapolakul y P. M. Duc, «www.sciencedirect.com,» Elsevier, computer communications, Depoartament of Electrical Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, 4 May 2007. [En línea]. [Último acceso: July 2019].
- [47] S. Mohapatra y P. Kanungo, «Performance analysis of AODV, DSR, OLSR and DSDV routing protocols using NS2 simulator,» de *International Conference on Communication technology and system Design 2011*, Bhubaneswar, 2012.
- [48] S. Kurkowski, T. Camp y M. Colagrosso, «MANET Simulation Studies, The Incredibles,» *ACM SIGMOBILE Mobile Computing Communications Review*, vol. 9, nº 4, pp. 50-61, Octubre 2005.
- [49] R. Lara, G. Olmedo y L. Rodriguez P, «Evaluación de Protocolos de Enrutamiento usados en las redes Móviles Ad Hoc, utilizando el software Network Simulator 2.,» Escuela Politecnica del Ejercito Nacional del Ecuador, Pichincha, Ecuador, 2008.
- [50] P.-j. Wu, *Generador de Escenarios para NS-2 NSG2*, <http://sites.google.com/site/pengjungwu/ns2>, 2008.
- [51] S. el Khediri, N. Nasari, A. Benfradj, A. Kachouri y A. Wei, «Routing protocols in MANET: Performance comparison of AODV, DSR and DSDV protocols using NS2,» de *2014 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Hammamet, Tunisia, 2014.
- [52] D. Kumar TS, *Comparisson Routing Protocols in NS-2*, Chennai: Engineering Clinic, 2018.
- [53] N. Walczunch, «www.ula.ve,» Laboratorio de Computacion "Modelos para el Desrrollo" Universidad de los Andes Venezuela, 2009. [En línea]. Available: http://sistemas.ing.ula.ve/pr2/unidad_1/unidad_1_parte2.html. [Último acceso: 24 Marzo 2009].
- [54] G. M. E. L. J. S. D. G. D. N. J. J. .. Myron Hura, *A Continuing Challenge in Coalition Air Operations*, Santa Monica, California: RAND, 2000.
- [55] E. d. Korewa. [En línea].
- [56] A. M. D. John Paul O Grady, «State of Art: Ad Hoc Networking,» Cork Institute of Technology, Cork, 2003.
- [57] <https://espanol.mapsofworld.com/continentes/asia/corea-del-sur/>, «Mapas del mundo,» [En línea]. [Último acceso: 12 09 2017].
- [58] «<https://www.camaracomercioespanacorea.es/es/informacion-sobre-corea.html>,» [En línea]. [Último acceso: 13 SEPT 2017].
- [59] «<http://www.guiadelmundo.org.uy/cd/countries/kor0/History.html>,» Guia del Muldo, Historia. [En línea]. [Último acceso: 11 Septiembre 2017].
- [60] P. D. LCDR, «NATO Improved Link Eleven (NILE) Project Update,» NILE PMO, Vienna, Austria, 2009.
- [61] S. Murthy y J. Garcia -Luna-Avceves, «Loop-Free Internet Routing Protocol Using Herarchical Routings tress,» de *INFOCOM '97*, Kobe, JAPAN, 1997.
- [62] C.-C. Chiang, M. Gerla y L. Zhang, «Adaptative Shared Tree Multicast in Mobile Wireless Networks,» de *GLOBECOM 98*, Sidney, Australia, 1998.

- [63] D. Johnson y D. Maltz, «DYNAMIC SOURCE ROUTING IN ADHOC WIRELESS NETWORKS,» de *Mobile Computing*, T. Imielinski and H. Korth, Kluwer, 1996.
- [64] V. Park y M. Corson, «A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks,» de *INFOCOM 97*, KObe, Japan, 1997.
- [65] C.-K. Toh y G. Lin, «Implementing Associativity-Based Routing for Ad Hoc Mobile Wireless Networks,» *Unpublished*, MArch 1998.
- [66] L. Ji y M. Corson , «A lightweight Adaptive Multicast Algorithm,» de *GLOBECOM 98*, Sidney, Australia, NOV-1998.
- [67] zorraquino, «zorraquino.com,» ZORRAQUINO. [En línea]. [Último acceso: 9 November 2020].

Anexo A

Script ejecutables AODV1.tcl

Estos scripts son los ejecutables que genera el NSG2 (generador de escenarios) para que el simulador reciba toda la información y parámetros para ejecutar la simulación deseada.

```
# This script is created by NSG2 beta1
# <http://wushoupong.googlepages.com/nsg>

#=====
#      Simulation parameters setup
#=====
set val(chan)    Channel/WirelessChannel    ;# channel type
set val(prop)    Propagation/TwoRayGround   ;# radio-propagation
model
set val(netif)   Phy/WirelessPhy           ;# network interface
type
set val(mac)     Mac/802_11                 ;# MAC type
set val(ifq)     Queue/DropTail/PriQueue    ;# interface queue
type
set val(ll)      LL                          ;# link layer type
set val(ant)     Antenna/OmniAntenna        ;# antenna model
set val(ifqlen)  50                          ;# max packet in ifq
set val(nn)      11                          ;# number of
mobilenodes
set val(rp)      AODV                        ;# routing protocol
set val(x)       800                          ;# X dimension of
topography
set val(y)       520                          ;# Y dimension of
topography
set val(stop)    35.0                        ;# time of
simulation end

#=====
#      Initialization
#=====
#Create a ns simulator
set ns [new Simulator]

#Setup topography object
```

```

set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)
create-god $val(nn)

#Open the NS trace file
set tracefile [open AODV1.tr w]
$ns trace-all $tracefile
$ns use-newtrace

#Open the NAM trace file
set namfile [open AODV1.nam w]
$ns namtrace-all $namfile
$ns namtrace-all-wireless $namfile $val(x) $val(y)
set chan [new $val(chan)];#Create wireless channel

#=====
#      Mobile node parameter setup
#=====
$ns node-config -adhocRouting $val(rp) \
                -llType $val(ll) \
                -macType $val(mac) \
                -ifqType $val(ifq) \
                -ifqLen $val(ifqlen) \
                -antType $val(ant) \
                -propType $val(prop) \
                -phyType $val(netif) \
                -channel $chan \
                -topoInstance $topo \
                -energyModel "EnergyModel" \
                -initialEnergy 50.0 \ 1
#-txPower 0.9 \
  -rxPower 0.7 \
  -idlePower 0.6 \
    -sleepPower 0.1 \
      -agentTrace ON \
      -routerTrace ON \
      -macTrace ON \
      -movementTrace ON

#=====
#      Nodes Definition
#=====
#Create 11 nodes
set n0 [$ns node]
$n0 set X_ 200

```



```

$n0 set Y_ 399
$n0 set Z_ 0.0
$ns initial_node_pos $n0 20
set n1 [$ns node]
$n1 set X_ 400
$n1 set Y_ 399
$n1 set Z_ 0.0
$ns initial_node_pos $n1 20
set n2 [$ns node]
$n2 set X_ 600
$n2 set Y_ 399
$n2 set Z_ 0.0
$ns initial_node_pos $n2 20
set n3 [$ns node]
$n3 set X_ 200
$n3 set Y_ 199
$n3 set Z_ 0.0
$ns initial_node_pos $n3 20
set n4 [$ns node]
$n4 set X_ 400
$n4 set Y_ 199
$n4 set Z_ 0.0
$ns initial_node_pos $n4 20
set n5 [$ns node]
$n5 set X_ 600
$n5 set Y_ 199
$n5 set Z_ 0.0
$ns initial_node_pos $n5 20
set n6 [$ns node]
$n6 set X_ 199
$n6 set Y_ 258
$n6 set Z_ 0.0
$ns initial_node_pos $n6 20
set n7 [$ns node]
$n7 set X_ 401
$n7 set Y_ 301
$n7 set Z_ 0.0
$ns initial_node_pos $n7 20
set n8 [$ns node]
$n8 set X_ 500
$n8 set Y_ 302
$n8 set Z_ 0.0
$ns initial_node_pos $n8 20
set n9 [$ns node]
$n9 set X_ 201

```

```

$n9 set Y_ 354
$n9 set Z_ 0.0
$ns initial_node_pos $n9 20
set n10 [$ns node]
$n10 set X_ 576
$n10 set Y_ 314
$n10 set Z_ 0.0
$ns initial_node_pos $n10 20

#=====
#           Generate movement
#=====
$ns at 5 " $n6 setdest 600 255 5 "
$ns at 4 " $n7 setdest 120 380 5 "
$ns at 3 " $n8 setdest 120 290 3 "
$ns at 2 " $n9 setdest 700 210 19 "
$ns at 1 " $n10 setdest 195 420 22 "

#=====
#           Agents Definition
#=====
#Setup a TCP connection
set tcp0 [new Agent/TCP]
$ns attach-agent $n6 $tcp0
set sink3 [new Agent/TCPSink]
$ns attach-agent $n5 $sink3
$ns connect $tcp0 $sink3
$tcp0 set packetSize_ 1500

#Setup a TCP connection
set tcp1 [new Agent/TCP]
$ns attach-agent $n8 $tcp1
set sink4 [new Agent/TCPSink]
$ns attach-agent $n0 $sink4
$ns connect $tcp1 $sink4
$tcp1 set packetSize_ 1500

#Setup a TCP connection
set tcp2 [new Agent/TCP]
$ns attach-agent $n4 $tcp2
set sink5 [new Agent/TCPSink]
$ns attach-agent $n1 $sink5
$ns connect $tcp2 $sink5
$tcp2 set packetSize_ 1500

```

```

#=====
#           Applications Definition
#=====
#Setup a FTP Application over TCP connection
set ftp0 [new Application/FTP]
$ftp0 attach-agent $tcp0
$ns at 1.0 "$ftp0 start"
$ns at 25.0 "$ftp0 stop"

#Setup a FTP Application over TCP connection
set ftp1 [new Application/FTP]
$ftp1 attach-agent $tcp1
$ns at 2.0 "$ftp1 start"
$ns at 26.0 "$ftp1 stop"

#Setup a FTP Application over TCP connection
set ftp2 [new Application/FTP]
$ftp2 attach-agent $tcp2
$ns at 3.0 "$ftp2 start"
$ns at 27.0 "$ftp2 stop"

#=====
#           Termination
#=====
#Define a 'finish' procedure
proc finish {} {
    global ns tracefile namfile
    $ns flush-trace
    close $tracefile
    close $namfile
    exec nam AODV1.nam &
    exit 0
}
for {set i 0} {$i < $val(nn) } { incr i } {
    $ns at $val(stop) "\$n$i reset"
}
$ns at $val(stop) "$ns nam-end-wireless $val(stop)"
$ns at $val(stop) "finish"
$ns at $val(stop) "puts \"done\" ; $ns halt"
$ns run

```

Anexo B

Archivo de Datos AODV1.tr correspondiente al ejecutable AODV.tcl

Este es el archivo donde se leen las métricas después de la simulación dependiendo del script AWK se escoge la métrica y los datos correspondiente a esta.

```
M 1.00000 10 (576.00, 314.00, 0.00), (195.00, 420.00), 22.00
s -t 1.000000000 -Hs 6 -Hd -2 -Ni 6 -Nx 199.00 -Ny 258.00 -Nz
0.00 -Ne 50.000000 -Nl AGT -Nw --- -Ma 0 -Md 0 -Ms 0 -Mt 0 -Is
6.0 -Id 5.0 -It tcp -Il 40 -If 0 -Ii 0 -Iv 32 -Pn tcp -Ps 0 -Pa 0
-Pf 0 -Po 0
N -t 1.000375 -n 3 -e 49.999665
N -t 1.000375 -n 9 -e 49.999665
N -t 1.000375 -n 0 -e 49.999665
N -t 1.000376 -n 7 -e 49.999665
N -t 1.000376 -n 4 -e 49.999665
N -t 1.000376 -n 1 -e 49.999665
N -t 1.000376 -n 8 -e 49.999665
N -t 1.000376 -n 10 -e 49.999665
N -t 1.000376 -n 5 -e 49.999665
N -t 1.000376 -n 2 -e 49.999665
N -t 1.003910 -n 1 -e 49.999330
N -t 1.003910 -n 8 -e 49.999330
N -t 1.003910 -n 4 -e 49.999330
N -t 1.003910 -n 10 -e 49.999330
N -t 1.003910 -n 6 -e 49.999105
N -t 1.003910 -n 9 -e 49.999330
N -t 1.003910 -n 2 -e 49.999330
N -t 1.003910 -n 0 -e 49.999330
N -t 1.003910 -n 5 -e 49.999330
N -t 1.003910 -n 3 -e 49.999330
N -t 1.004848 -n 7 -e 49.998770
N -t 1.004848 -n 8 -e 49.998995
N -t 1.004849 -n 10 -e 49.998995
N -t 1.004849 -n 0 -e 49.998995
N -t 1.004849 -n 4 -e 49.998995
N -t 1.004849 -n 2 -e 49.998995
N -t 1.004849 -n 9 -e 49.998995
.
.
```

•
•
•

Anexo C

Archivo de Datos AODV1.nam correspondiente al ejecutable AODV.tcl

Este es el archivo donde se almacenan los datos de la simulación y el desempeño de la red.

```
n -t * -s 0 -x 200 -y 399 -Z 0 -z 20 -v circle -c green
n -t * -s 1 -x 400 -y 399 -Z 0 -z 20 -v circle -c green
n -t * -s 2 -x 600 -y 399 -Z 0 -z 20 -v circle -c green
n -t * -s 3 -x 200 -y 199 -Z 0 -z 20 -v circle -c green
n -t * -s 4 -x 400 -y 199 -Z 0 -z 20 -v circle -c green
n -t * -s 5 -x 600 -y 199 -Z 0 -z 20 -v circle -c green
n -t * -s 6 -x 199 -y 258 -Z 0 -z 20 -v circle -c green
n -t * -s 7 -x 401 -y 301 -Z 0 -z 20 -v circle -c green
n -t * -s 8 -x 500 -y 302 -Z 0 -z 20 -v circle -c green
n -t * -s 9 -x 201 -y 354 -Z 0 -z 20 -v circle -c green
n -t * -s 10 -x 576 -y 314 -Z 0 -z 20 -v circle -c green
V -t * -v 1.0a5 -a 0
W -t * -x 800 -y 520
A -t * -n 1 -p 0 -o 0x7fffffff -c 30 -a 1
A -t * -h 1 -m 1073741823 -s 0
n -t 1.000000 -s 10 -x 576.000000 -y 314.000000 -U -21.195001 -V
5.896772 -T 17.975937
+ -t 1.0000000000 -s 6 -d -1 -p tcp -e 40 -c 2 -a 0 -i 0 -k AGT
- -t 1.0000000000 -s 6 -d -1 -p tcp -e 40 -c 2 -a 0 -i 0 -k AGT
h -t 1.0000000000 -s 6 -d -1 -p tcp -e 40 -c 2 -a 0 -i 0 -k AGT
r -t 1.027488573 -s 5 -d 5 -p tcp -e 40 -c 2 -a 0 -i 0 -k AGT
+ -t 1.027488573 -s 5 -d -1 -p ack -e 40 -c 2 -a 0 -i 1 -k AGT
- -t 1.027488573 -s 5 -d -1 -p ack -e 40 -c 2 -a 0 -i 1 -k AGT
h -t 1.027488573 -s 5 -d -1 -p ack -e 40 -c 2 -a 0 -i 1 -k AGT
r -t 1.031500874 -s 6 -d 6 -p ack -e 40 -c 2 -a 0 -i 1 -k AGT
+ -t 1.031500874 -s 6 -d -1 -p tcp -e 1540 -c 2 -a 0 -i 2 -k AGT
- -t 1.031500874 -s 6 -d -1 -p tcp -e 1540 -c 2 -a 0 -i 2 -k AGT
.
.
.
.
.
.
```

Anexo D

Archivo script ejecutable `pdk.awk`

Este es el script con que se toman los datos de los archivos `.tr`, se interpretan y cuya ejecución es un resultado numérico que para el caso da la relación de paquetes enviados.

```
#packet Delivery Ratio
BEGIN {
    sendPkt =0
    recvPkt=0
    forwardPkt=0
}

{
packet=$19
event = $1
if(event == "s" && packet == "AGT") {
    sendPkt++;
}

if(event == "r" && packet == "AGT") {
    recvPkt++;
}

if(event == "f" && packet == "RTR") {
    forwardPkt++;
}

}

END {
    printf ("the sent packets are %d \n", sendPkt);
    printf ("the received packets are %d \n", recvPkt);
    printf ("the forwarded packets are %d \n", forwardPkt);
    printf ("Packet Delivery Ratio is %f \n",
(recvPkt/sendPkt));
}
}
```