

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



**”MODELO DE SELECCION DE RUTA
UTILIZANDO DESORDEN DE ENTROPIA EN
DESCONEXION DE ENLACE EN REDES MANET”**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta:

CARLOS FRANCISCO ALVAREZ SALGADO

Bajo la dirección de:

DR. LUIS ENRIQUE PALAFOX MAESTRE

Co-dirigido por:

DR. LEOCUNDO AGUILAR NORIEGA

TIJUANA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

ENERO 2016

A mis tres “Chamacas” (Erika, Carla Daniela y Anette) que impulsan mis días y me motivan a llegar más lejos en muchos aspectos de mi vida.

Universidad Autónoma de Baja California
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA
COORDINACIÓN DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FOLIO No. 168

Tijuana, B. C., a 13 de junio de 2016

C. Carlos Francisco Álvarez Salgado
Pasante de: Doctor en Ciencias
Presente

El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la
Opción TESIS

Es propuesto, por los CC. Dres. Luis Enrique Palafox Maestre y Leocundo Aguilar Noriega

Quienes serán los responsables de la calidad del trabajo que usted presente,
referido al tema: "MODELO DE SELECCIÓN DE RUTA UTILIZANDO DESORDEN DE ENTROPÍA EN DESCONEXIÓN DE ENLACE EN REDES MANET"

el cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:

- I.- INTRODUCCIÓN
- II.- MARCO TEÓRICO
- III.- METODOLOGÍA
- IV.- EXPERIMENTOS Y RESULTADOS
- V.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS
QUÍMICAS E INGENIERÍA

Dr. Luis Enrique Palafox Maestre
Director de Tesis

Dr. José Luis González Vázquez
Secretario

Dr. Leocundo Aguilar Noriega
Co-Director de Tesis

Dr. Luis Enrique Palafox Maestre
Director

Agradecimientos

En primera instancia quiero agradecer a mi familia y amigos que durante este tiempo de preparación doctoral me acompañaron en los buenos y malos momentos y apoyaron mis alegrías y tristezas.

A mis directores, el Dr. Luis Enrique Palafox Maestre y el Dr. Leocundo Aguilar Noriega, que se dieron tiempo de trabajar a mi lado con un proyecto desde cero.

A los amigos y compañeros de la facultad, Dr. Luis Gmo. Martínez Méndez, Dra. Felicitas Pérez Ornelas, Dr. Mauricio Sánchez Herrera que ayudaron con la carga en los días pesados con sus consejos y respaldo.

A los compañeros de la facultad, con quienes cursé materias, hice trabajos prácticos, que hicieron más ameno este tiempo; algunos de ellos ahora amigos, más allá del ámbito laboral.

Carlos Fco. Alvarez Salgado

Resumen

Las redes inalámbricas son una gran herramienta como plataforma de comunicación para diversos proyectos y aplicaciones, cubriendo exigencias de flexibilidad en velocidad y espacio. Algunas redes proporcionan autoconfiguración e independencia de estructuras fijas. Esta autoconfiguración característica presenta retos en el diseño de innovadoras formas de trabajar. Las restricciones a resolver pueden variar desde limitantes en la capacidad del canal, variabilidad en la topología, y sobre todo la falta de infraestructura entre otras variables.

El ruteo o selección de ruta en este tipo de redes es de suma importancia, la selección de una ruta estable permite que la comunicación de datos sea persistente incluso con cambios drásticos de la topología y por lo tanto la calidad de los servicios prestados por esta red.

Varios protocolos de ruteo seleccionan la primera ruta encontrada, estas son las más sencillas, pero poco efectivas ante factores como interferencias, movilidad o tráfico. Otros protocolos más avanzados utilizan métricas para seleccionar la ruta más rápida, la más duradera u otros factores importantes para la comunicación de datos.

La presente tesis aborda el estudio de la selección de ruta desde un punto de vista teórico-práctico. Esto aporta la teoría y experimentación a una solución diferente para seleccionar la ruta de mejor adaptación en una MANET. Esta metodología permite validar la aplicación del modelo de selección de ruta en diversos posibles escenarios admitiendo la replicación de experimentos con diferentes parámetros.

En el aspecto teórico, este trabajo desarrolla un modelo de selección de ruta utilizando una métrica que evalúa la condición de cada nodo participante en la red, buscando la mejor ruta al momento iniciar la comunicación; esto con la finalidad de utilizar las rutas más fuertes entre fuente y destino utilizando un bajo consumo de recursos.

El modelo propuesto es validado empíricamente. Unos conjuntos de experimentos se llevaron a cabo en tres fases, asegurando reproducibilidad y validar la función de la métrica dentro y fuera del modelo de selección de ruta. Para este propósito se estableció una metodología para fundar un marco de experimentación de validación primeramente a la métrica de Desorden de Entropía en Desconexión de Enlace, para después incorporarla a la selección de ruta.

La comprobación del modelo se realiza a través de medidas experimentales realizadas en ambientes simulados cercanos a situaciones reales, asegurando también la reproducibilidad en los experimentos.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Hipótesis	3
1.3. Objetivos y Limitaciones	3
1.4. Estructura de la tesis	4
2. Marco teórico	6
2.1. MANETs y redes Ad-hoc	6
2.1.1. Comunicaciones inalámbricas	6
2.1.2. MANETs y redes Ad-hoc	10
2.1.3. Usos y aplicaciones de MANETs	12
2.1.4. Limitantes y retos en MANETs	13
2.2. Ruteo en redes Ad-hoc	16
2.2.1. Características del ruteo en MANETs	16
2.2.2. Protocolos Proactivos	18

2.2.3. Protocolos Reactivos	18
2.2.4. protocolos Híbridos	19
2.3. Métricas, Entropía y Desorden	20
2.3.1. Métricas en MANETs	20
2.3.2. Entropía y desorden	21
2.3.3. Desorden de entropía de desconexión de enlace (DEDE)	22
2.4. Técnicas Generales de ruteo en MANETs	26
2.4.1. Open Shortest Path First (OSPF)	26
2.4.2. Dynamic Source Routing (DSR)	27
2.4.2.1. Descubrimiento básico de rutas	29
2.4.2.2. Mantenimiento básico de rutas	30
2.4.2.3. Almacenaje en caché de rutas escuchadas	30
2.4.2.4. Respondiendo solicitud de ruta usando el caché	32
2.4.3. Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV)	33
3. Propuesta y Metodología	35
3.1. Propuesta: DEDE como métrica de selección de ruta en DSR link-cache . . .	35
3.2. Metodología	37
3.2.1. Fase 1: Relación de métrica DEDE con movilidad y tráfico	39
3.2.2. Fase 2: Evaluar la métrica DEDE como un elemento identificador de nodos con alta movilidad	42
3.2.3. Fase 3: Incorporar la métrica DEDE en la lógica de selección de ruta	43

4. Experimentos y resultados	44
4.1. Bases de las simulaciones	44
4.2. Experimentos Fase 1	45
4.3. Experimentos Fase 2	48
4.4. Experimentos Fase 3	51
5. Conclusiones y trabajo futuro	63
5.1. Conclusiones	64
5.2. Trabajos futuros	66
Apéndice A. Tablas de resultados de experimento 3	I
Apéndice B. Configuración Omnet++ para fase 3	XI
Apéndice C. Configuración net80211 LD DSR para simulaciones Omnet++	xx
Apéndice D. Configuración UDPEntropySink para simulaciones Omnet++	xxii
Apéndice E. Configuración UDPEntropyApp.NED para simulaciones Omnet++	xxiv

Índice de figuras

2.1. Modo infraestructura	7
2.2. Modo Ad-hoc	7
2.3. Clasificación de Protocolos de ruteo Ad-hoc	17
2.4. Ventana de tiempo del nodo En tiempo $t+1$, nodo 1 pierde las conexiones a nodo 2 y 5 hechas en tiempo t ; registrando éxito o falla en un arreglo con una ventana de tiempo deslizable	23
2.5. Nodo recorriendo el área de la MANET Cuando un nodo se mueve dentro del área de trabajo de la red, ocurren rompimientos de enlaces y se crean nuevas conexiones	24
2.6. Nodo S solicita ruta hacia nodo destino D; Nodos A,B,y C participan como intermediarios.	29
2.7. Almacenamiento de Ruta en Path-Cache	32
2.8. Almacenamiento de Ruta en Link-Cache	33
3.1. Decisión de Ruta en Link-Cache	36
3.2. Area de trabajo con 50 nodos 802.11g	40

4.1. DEDE frente a Velocidad y Saturación de canal	45
4.2. DEDE frente a relación de entrega de paquetes	46
4.3. Área de trabajo con 20 nodos y el rango de transmisión individual	52
4.4. Área de trabajo con 100 nodos	53
4.5. Área de trabajo con 100 nodos y la cobertura individual	54
4.6. Distribución de velocidades en los nodos	55
4.7. Distribución de velocidades con media de 1 m/s	56
4.8. Distribución de velocidades con media de 1.5 m/s	57
4.9. Distribución de velocidades con media de 2 m/s	57
4.10. Pérdidas en entrega de paquetes de 30 corridas en escenario con media de 1 m/s	59
4.11. Pérdidas en entrega de paquetes de 30 corridas en escenario con media de 1.5 m/s	60
4.12. Pérdidas en entrega de paquetes de 30 corridas en escenario con media de 2 m/s	62

Índice de cuadros

2.1. Comparativo de versiones 802.11	9
2.2. Comparativa de estándares 802.11, 802.15.1 y 802.15.4	10
4.1. ANOVA de dos variables (Velocidad y saturación de tráfico	47
4.2. Comparativa DEDE a velocidad de referencia 0 m/s	49
4.3. Comparativa DEDE a velocidad de referencia 2 m/s	49
4.4. Comparativa DEDE a velocidad de referencia 4 m/s	50
4.5. Resultados de Escenario 1 m/s	58
4.6. Resultados de Escenario 1.5 m/s	61
4.7. Resultados de Escenario 2 m/s	61
4.8. Promedio de resultados de escenarios	61
A.1. Tabla PathCache con Media 1 m/s y de desviación estándar de 0.66 m/s . .	II
A.2. Tabla LinkCache con Media 1 m/s y de desviación estándar de 0.66 m/s . .	III
A.3. Tabla DEDECACHE con Media 1 m/s y de desviación estándar de 0.66 m/s .	IV
A.4. Tabla PathCache con Media 1.5 m/s y de desviación estándar de 0.5 m/s . .	V

A.5. Tabla LinkCache con Media 1.5 m/s y de desviación estándar de 0.5 m/s . .	VI
A.6. Tabla DEDECACHE con Media 1.5 m/s y de desviación estándar de 0.5 m/s .	VII
A.7. Tabla PathCache con Media 2 m/s y de desviación estándar de 0.3 m/s . . .	VIII
A.8. Tabla LinkCache con Media 2 m/s y de desviación estándar de 0.3 m/s . . .	IX
A.9. Tabla DEDECACHE con Media 2 m/s y de desviación estándar de 0.3 m/s . .	X

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

El desarrollo de la comunicación en internet ha llevado a investigadores a estudiar y crear nuevas formas de trasladar información de un punto a otro de manera segura y rápida adaptándose a las nuevas y cambiantes necesidades de nuestras aplicaciones y servicios.

Un motivador para estos desarrollos e investigaciones son los avances en la tecnología que miniaturiza los componentes electrónicos al punto de tener dispositivos tan pequeños como un botón, capaces de enviar información sensorial a bases de datos para su análisis en tiempo real; además de la simple navegación de páginas web o servicios de redes sociales. Estos dispositivos son tan diversos en el consumo de energía y procesamiento que aun teniendo limitantes considerables son suficiente para tareas específicas o de uso general.

Una mejora importante en el uso de este tipo de dispositivos es la eliminación de cables para la comunicación; la gran mayoría comparten tecnologías de comunicación de bajo consumo con velocidades aceptables para el paso de información entre ellos, tales como Bluetooth, zigbee, NFC, y el más popular de ellos el IEEE 802.11 comúnmente conocida como wifi;

utilizando uno de los estándares mencionados permitirá el acceso a servicios de datos como correos electrónicos, páginas web entre otros, manteniendo la libertad de movimiento.

Para que los dispositivos inalámbricos puedan tener un consumo de servicios de red es necesario una comunicación constante y confiable, existiendo dos maneras de mantenerla, la primera es utilizando una infraestructura fija de conexión donde un punto de acceso centralizado (AP) se debe mantener al alcance del dispositivo o nodo en todo momento, limitando la movilidad del usuario al área de cobertura del AP; la segunda opción es en la cual los dispositivos participantes de la red colaboran con el paso de información cuando el destino no está al alcance, a este tipo de redes se les denomina redes Ad-Hoc multisalto.

Cuando la red Ad-hoc se forma de dispositivos pequeños y móviles se le denomina “Mobile Ad-hoc Networks” o MANETS [1, 2]; si la movilidad entre los dispositivos es mediana o alta se dificulta el paso de información entre los nodos, obligando a que las rutas sean actualizadas para adaptarse a la topología cambiante.

La movilidad no es el único reto a vencer para decidir las rutas de la información entre los nodos, se encuentran otras limitantes implícitas a los dispositivos, tales como la limitada reserva de energía, la capacidad de procesamiento, capacidad de almacenamiento y hasta el corto alcance de comunicación directa.

Varios modelos de ruteo han sido propuestos e implementados para MANETs [3, 4, 5] los cuales centran la lógica de selección de la ruta en características básicas de comunicación tales como el retraso o duración de entrega de un paquete, la menor cantidad de saltos (dispositivos intermedios para llegar al destino), o simplemente el primer camino que se encontró; mecanismos de ruteo más avanzados toman en cuenta características compuestas por diferentes factores que afectan dicha ruta para seleccionar la más apropiada a la situación.

La presente tesis emprende el estudio de la selección de ruta en redes MANET desde un enfoque teórico-práctico. El enfoque teórico plantea los rasgos de la movilidad en redes

MANET y los efectos en la conectividad entre cada par de nodos para determinar un valor numérico capaz de evaluar a cada camino, seleccionando de las rutas descubiertas la más estable.

Con el interés de asegurar la correlación de los resultados y de facilitar su reproducibilidad, el modelo teórico propuesto se valida de forma empírica obedeciendo una metodología de diseño para cada experimento realizado; estableciendo una base para la comparación directa con otros protocolos utilizados en la selección de ruta.

1.2. Hipótesis

Utilizando el desorden de entropía de desconexión de enlace en los nodos de una ruta, es posible seleccionar el camino con mayor estabilidad obteniendo menor pérdida de paquetes en una red MANET con mediana o alta movilidad.

1.3. Objetivos y Limitaciones

Los objetivos para el desarrollo de esta tesis son:

1. Obtener el desorden de entropía de desconexión de enlace de cada nodo en una red MANET con densidad media de nodos y movilidad dentro del rango humano; encontrar la relación de movilidad con entropía de enlace.
2. Obtener el efecto de el desorden de entropía de desconexión de enlace de la red con la pérdida de paquetes enviados.
3. Medir la entropía de enlace de ruta tomada buscando relación con la pérdida de paquetes.

4. Incorporar el desorden de entropía de desconexión de enlace en la ruta como un factor en la selección de ruta a modelo de ruteo dinámico (DSR)

Un punto importante a subrayar en este trabajo es su enfoque en el uso de dispositivos limitados en muchos aspectos como rango de comunicaciones, almacenaje de energía, capacidad de procesamiento que hacen la selección de ruta una carga más a estos recursos.

Por la naturaleza de las redes MANETs es necesario para analizar el tráfico y respaldar la hipótesis planteada una cantidad de dispositivos móviles produciendo tráfico mientras cambian de posición a un ritmo constante y controlado; la realización de pruebas con dispositivos físicos es compleja; obstaculizando la precisión en la movilidad con la cantidad de dispositivos necesarios para cada experimento. Por esta limitante la simulación en computadora es esencial.

1.4. Estructura de la tesis

La sección 2.1 detalla dificultades comunes encontradas por MANETs para comunicar los nodos participantes y las características principales de este tipo de redes; en la sección 2.2 se describen modelos de ruteo categorizándolos por la forma en la que la solicitud de ruta es iniciada; los efectos de la movilidad en el ruteo Ad-hoc se describen en la sección 2.3 y se finaliza el capítulo 2 con la descripción del modelo propuesto en la sección 2.4.

La experimentación es esencial para la validación del modelo propuesto en la sección 3.1; para ello se sigue la metodología de la sección 3.2.

Los experimentos y resultados ideados para las herramientas selectas son descritos en el capítulo 4 con el propósito de cumplir con los objetivos marcados en 1.3 y demostrar la hipótesis de la sección 1.2.

Por último la seccion 5.1 formula las conclusiones del trabajo de tesis y la 5.2 los posibles trabajos futuros.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. MANETs y redes Ad-hoc

2.1.1. Comunicaciones inalámbricas

Cuando se habla de redes inalámbricas lo primero que aparece en la mente son las redes comerciales comúnmente llamadas wifi, pero existe diversidad en este tipo de redes, alguna de ellas las usamos diariamente sin ser notadas, tales como las redes de telefonía celular, las pequeñas redes de dispositivos conectados al celular como el manos libres, el reloj inteligente o la tableta comunicándose con varios dispositivos a su alcance.

Para que la comunicación inalámbrica transmita la información de un dispositivo a otro es necesaria una coordinación y planeación; esta coordinación es realizada por un dispositivo central administrando todas las conexiones y paso de datos como en la figura 2.1; los dispositivos dependen de la unidad coordinadora para comunicarse. Este modo de coordinar se le denomina “modo infraestructura” y es utilizada en cafés internet, hotspots y servicios inalámbricos de internet comercial y el doméstico.

El modo infraestructura (Figura 2.1) requiere que un equipo llamado punto de acceso utilice muchos de sus recursos para comunicar a los demás dispositivos, y es necesario que cada dispositivo esté en el rango de comunicación con él; toda la comunicación entre dispositivos tienen como intermediario al punto de acceso aun cuando los dispositivos estén cercanos entre ellos y en rango de transmisión directa.

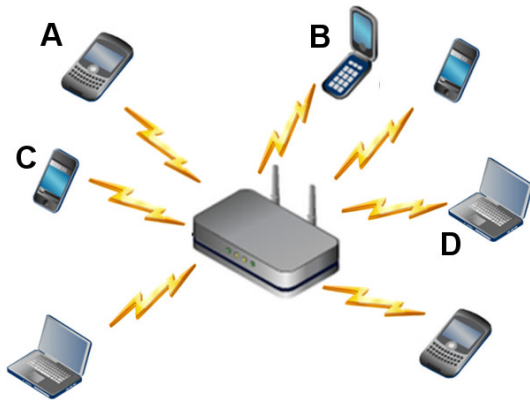


Figura 2.1: Modo infraestructura

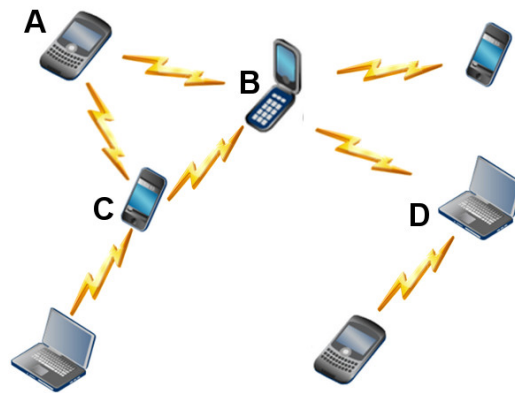


Figura 2.2: Modo Ad-hoc

Estas redes trabajan con distintos protocolos y estándares usando servicios tan específicos al uso para el cual fueron diseñados; algunos protocolos se especializan en la transmisión de video entre dispositivos, o el paso de datos entre sensores esparcidos en una habitación o vehículo; la practicidad que proporciona la conectividad sin cables hace que las redes inalámbricas prosperen y sus usos sean cada vez más comunes.

Las tecnologías utilizadas para comunicación son variadas, desde el manejo de luz infrarroja hasta un uso avanzado de radio frecuencias, todas cuentan con limitantes intrínsecas en el medio utilizado para llevar información de un punto a otro; la velocidad, la distancia y la tasa de información son las limitantes más notables al momento de seleccionar la tecnología.

Las comunicaciones inalámbricas no son nuevas; las primeras transmisiones de código morse fueron a una distancia de más de una milla por Guglielmo Marconi en 1895 y para 1901 fue posible transmitir a través del Atlántico. Los avances en electrónica impulsaron las

comunicaciones inalámbricas a mayor distancia, velocidad y tasa de transmisión.

Las primeras redes inalámbricas fueron resultado de los experimentos por ingenieros de IBM en Suiza en 1979, que lograron transmitir a velocidades menores a 1Mbps en un rango de hasta 50m con un rayo infrarrojo de 950nm [6].

Con la popularidad en el uso de radio frecuencias para comunicaciones, en la conferencia internacional de telecomunicaciones de Atlanta 1947 se estableció la banda “Industrial, Scientific and Medical” (ISM) para la “radiación intencional” con uso industrial, científico y médico para comunicaciones; esta banda fue adoptada por la FCC (Federal Communications Commission) en Mayo de 1985. Permitiendo las frecuencias 902 a 928 Mhz, 2400 a 2483.5 Mhz y 5725 a 5850 Mhz con una potencia máxima de un Watt sin la necesidad de una licencia de uso. Una problemática de esta banda es la falta de protección contra interferencias; un ejemplo en particular es el horno microondas que limita el rango útil de algunos equipos de comunicaciones por trabajar en la misma banda de frecuencia (2.4 Mhz).

Una vez establecida la banda ISM para su uso sin licencia, con la intención de usarla en máquinas registradoras, las compañías NCR y AT&T se acercaron a el instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos IEEE por sus siglas en inglés para desarrollar estándares creando el comité llamado 802.11 en 1988. Pero fue hasta 1997 que pudieron coordinarse con varios fabricantes para aprobar las especificaciones básicas y trabajar en dos prototipos que las utilizaran.

Para Diciembre de 1999 el estándar 802.11b fue ratificado siguiéndole el 802.11a en enero del siguiente año; el primero trabajando en la banda de 2.4Ghz y el segundo en la de 5.8Ghz.

Las tecnologías mencionadas necesitaban que desde el punto de vista del consumidor fueran identificables de forma amigable para diferenciar entre equipos compatibles con 802.11a o como 802.11b; el nombre comercial popularizado fue el de Wi-Fi por “Wireless fidelity” y especificado en 2007.

Con el avance en dispositivos más rápidos y voraces de información los estándares requirieron extensiones y adaptaciones para soportarlos, naciendo así estándares de la familia 802.11, el cuadro 2.1 muestra características de los estándares comerciales.

	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n	802.11ac
Popularidad	Amplia adopción	Adopción limitada	Mediana adopción	Adopción en varios productos, algunos basados en especificaciones preliminares	Versiones preliminares
Velocidad	11Mbps	54Mbps	54Mbps	300Mbps	1Gbps
Frecuencia	2.4Ghz	5Ghz	2.4Ghz	2.4Ghz y 5Ghz	5Ghz
Rango	140m	120m	140m	250m	250m
Compatibilidad	802.11b	802.11a	802.11b 802.11g	802.11b 802.11g 802.11n 802.11a	801.11a 802.11n 802.11ac

Cuadro 2.1: Comparativo de versiones 802.11

El protocolo 802.11 es un estándar muy popular para dispositivos móviles; los teléfonos inteligentes cuentan con al menos una de las versiones de este estándar. Comunicar una cámara de seguridad y transmitir por internet es fácil utilizando este estándar, de igual forma conectar a una red una serie de dispositivos pequeños tales como radio, luces, lámparas y televisores inteligentes, haciendo posible el consumo de servicios de internet con mínimas configuraciones.

La gran adopción del estándar para dispositivos pequeños y grandes, el paso de información sin cables, la simplicidad de configuración, y la portabilidad en distintas plataformas son rasgos que han provocado una reducción en los costos implicados en la inclusión del 802.11 en proyectos.

Un protocolo similar al 802.11 popular para dispositivos móviles, trabajando también en las frecuencias ISM es el 802.15.1 [7] o comúnmente llamado Bluetooth; diseñado para

dispositivos pequeños de bajo consumo de energía con un alcance máximo de 100 metros.

De la familia de redes de área personal (802.15) tenemos al denominado zigbee o 802.15.4 [8] diseñado para tasas de datos pequeñas que permiten menor consumo de energía para su transmisión; trabajando en las frecuencias 868Mhz, 915 Mhz y 2.4Ghz de la banda ISM.

Estándar	Modo Ad-hoc	Modo Infraes- tructura	Velocidad	Rango	Tipo de Red
802.11a	Si	Si	54Mbps	120m	LAN
802.11b	Si	Si	11Mbps	140m	LAN
802.11g	Si	Si	54Mbps	140m	LAN
802.11n	Si	Si	300Mbps	250m	LAN
802.11ac	Si	Si	1Gbps	250m	LAN
802.15.1	Si	No	3Mbps	100m	PAN
802.15.4	SI	No	250kbps	10m	BAN

Cuadro 2.2: Comparativa de estándares 802.11, 802.15.1 y 802.15.4

2.1.2. MANETs y redes Ad-hoc

Las redes MANET son formadas por dispositivos móviles con capacidades de comunicación inalámbricas [9]; estos nodos participan sin un coordinador central y forman una infraestructura temporal y flexible; Los nodos tienen la libertad de cambiar de ubicación y el protocolo de ruteo debe adaptarse, la velocidad del cambio puede variar dependiendo de la aplicación y los dispositivos, por lo general la velocidad del cambio de ubicación está dentro de los parámetros de movilidad humana, pero es posible que excedan estas velocidades cuando se trata de redes Ad-hoc vehiculares.

Los dispositivos móviles utilizados en este tipo de redes pueden variar desde dispositivos especializados, la gama de dispositivos de medianos recursos como raspberry pi o los distintos modelos de arduinos y microcontroladores, y dispositivos con mayores recursos como los de un Smartphone o tableta. Los recursos limitados de mayor impacto son la capacidad de

procesamiento, almacenamiento y la del almacenamiento de energía, es de suma importancia que desde diseño se administren de manera eficiente estos preciados recursos.

Debido a que no cuentan con un administrador o controlador central, la infraestructura formada puede adaptarse desde casi cualquier condición de despliegue, con la única condición de que los dispositivos se encuentren en rango de otros dispositivos que pueda llevarlos eventualmente al dispositivo con que se desea comunicarse.

La facilidad de despliegue de este tipo de redes permite su uso para comunicar grupos de rescate en zonas de desastre, donde implementar una infraestructura no es difícil y costoso, en cuestión de segundos los dispositivos se comunican y forman una infraestructura dinámica y sin necesidad de equipos adicionales como repetidores o antenas de mayor potencia para cubrir toda el área de trabajo.

Aun con las limitantes que los dispositivos presentan, es posible el desarrollo de una infinidad de aplicaciones gracias a las características básicas que se necesitan.

Los dispositivos que pueden formar parte de una red MANET son de bajo coste y relativamente sencillo conseguir. En el mercado existen dispositivos con implementaciones de tecnologías inalámbricas como 802.11, 802.15, Bluetooth o componentes de radio frecuencia para comunicarse de un equipo a otro.

Los dispositivos pueden ser programados con facilidad y simplicidad; la mayoría de los dispositivos mencionados cuentan con módulos fácilmente modificables para implementar los protocolos de ruteo en capas 2 y 3 del modelo OSI, si afectar las aplicaciones de capas superiores.

Algunos de estos dispositivos pueden utilizar fuentes de energía recargables de alta capacidad o inclusive es posible agregar fuentes de energía alternativas como las celdas solares.

Los protocolos implementados para las redes MANET son diseñados para un constante

cambio en las condiciones de comunicación; el movimiento de los dispositivos provoca cambio de ruta entre dispositivos y es trabajo del protocolo en adaptarse a tales cambios. Si algún dispositivo deja de funcionar o participar es necesario utilizar rutas alternas y el protocolo de ruteo debe contemplar ese tipo de eventos y recuperarse; la capacidad de un protocolo de ruteo Ad-hoc de adaptarse es crucial para un buen funcionamiento de una red MANET.

Una gran ventaja de este tipo de redes es la integración a proyectos de todo tipo y uso; con dispositivos pequeños y de bajo consumo pueden ser encapsulados en cajas selladas a los elementos y fácilmente integrados a proyectos en exteriores o inclusive en la industria automotriz.

2.1.3. Usos y aplicaciones de MANETs

Las redes MANETs, por su versatilidad, son ideales para diferentes situaciones donde una infraestructura estática de red no es posible. Este tipo de redes se adaptan a la movilidad de los dispositivos participantes y utilizan a sus nodos como enlaces a nodos lejanos creando una infraestructura dinámica capaz de ser desplegada rápidamente.

La flexibilidad de una red MANET permite su uso en aplicaciones de comunicaciones o redes de sensores. En el campo de batalla es posible utilizar este tipo de redes como una infraestructura dinámica para comunicación entre personal militar como soldados, vehículos o estaciones de control.

Este tipo de redes ayuda a la coordinación de equipos no tripulados, comunicando equipos en caso de administración local de recursos, intercambiando información entre equipos participantes.

En el ámbito comercial, pueden formar la infraestructura de comunicación entre departamentos de una empresa, dando la capacidad de computo colaborativo en dispositivos

inalámbricos móviles.

La habilidad de adaptarse a diferentes escenarios topológicos y de formar una infraestructura en cuestión de minutos, hace a las redes MANETs ideales para la comunicación en escenarios de búsqueda y rescate para eventos de emergencias. Cuando se utiliza una infraestructura fija la movilidad de los brigadistas en zonas peligrosas podría dejarlos desconectados, pero con una MANET, la cobertura está ligada a la distribución natural de los brigadistas en una operación de búsqueda y rescate.

En el campo del entretenimiento su uso es posible para juegos multijugador, redes igual-a-igual (peer-to-peer), acceso a internet para exteriores o mascotas electrónicas. La habilidad de una red que sea capaz de comunicar datos y otros medios hace de las redes MANETs adaptable para un múltiples aplicaciones.

Los servicios consientes del contexto pueden ser beneficiados con este tipo de redes. Los servicios como seguimiento de llamadas, servicios de información o información turística pueden ser automáticamente distribuidos por una red tipo MANET.

Los usos de una red MANET son tan variados dadas la virtudes que provee este tipo de red. La red MANET trabaja en las capas de enlace (2) y red (3) del modelo OSI, lo que facilita que cualquier dispositivo pueda ser modificado sin agregar módulos especiales de comunicación.

2.1.4. Limitantes y retos en MANETs

Las redes MANETs presentan una red capas de armarse en un instante y en áreas que difícilmente cubriría una red cableada; pero este tipo de redes tiene limitantes y retos a vencer.

Ancho de Banda Limitado: Los dispositivos inalámbricos se comunican por medio

de ondas electromagnéticas, contando con anchos de banda limitados y cortos alcance. Las tecnologías más comunes las encontramos incorporadas a dispositivos móviles. Las tecnologías más comunes para este tipo de comunicación son el bluetooth y WiFi.

Topología dinámica: La movilidad de los dispositivos y la topología física del área de trabajo obliga a la topología de comunicaciones a cambiar y enlazar hasta lo posible a los dispositivos participantes. La facilidad de despliegue de una red de este tipo también se convierte en un costo para mantener la comunicación de todos sus participantes mientras cambian de posición o características.

pérdida de paquetes por errores de transmisión: Por su popularidad y facilidad de configuración las tecnologías usadas son el IEEE 802.11 comúnmente conocido como WiFi, y el IEEE 802.15.1 llamado comercialmente como Bluetooth. Estas dos tecnologías trabajan en el rango de frecuencias del 2.4GHz y 5GHz, donde comparte frecuencia con una gran gama de dispositivos electrónicos, el hecho de compartir frecuencias afecta la comunicación causando la pérdida de paquetes por errores de transmisión.

Escalabilidad: El rango de comunicación es el principal factor para que una red MANET requiera que un nodo ayude a retransmitir los paquetes hacia nodos fuera del rango del transmisor. Se utilizan a los nodos participantes para crear una ruta de saltos hacia algún nodo lejano del nodo transmisor, formando una cadena de nodos, entre más lejano sea el nodo, la cadena de nodos será más grande y con mayor probabilidad de fallar. La capacidad de una red MANET de crecer está limitada por la escalabilidad del protocolo de ruteo de formar y mantener las rutas con forme crezca el área de trabajo y la cantidad de participantes.

Cambios de ruta por movilidad de los dispositivos participantes: La movilidad de los dispositivos obliga al protocolo de ruteo a formar rutas estables o a reaccionar al rompimiento de una ruta establecida; Si un nodo sale del alcance de una ruta, otra se necesita formar. La respuesta del protocolo de ruteo es crítico, debe buscar caminos alternativos desde

el punto donde fallo, o encontrar una nueva ruta completa.

Restricciones de energía: Los dispositivos móviles tienen una fuente de energía limitada, todo lo que realicen lo deben tener administrado; Los cálculos para crear rutas o repararlas necesitan procesador y elementos de comunicación que pueden consumir mucha de esta energía, así que los protocolos de ruteo también deben tomar en cuenta esta limitante para realizar conservadoramente las evaluaciones de selección de ruta.

Amenazas de seguridad: Como toda red inalámbrica, está expuesta a que la información que se transmita sea escuchada por cualquier nodo que utilice la misma frecuencia y protocolos de la red; dejando vulnerable la información o la comunicación en si. Algunos ataques a este tipo de redes pueden ser dirigidos a obtener información de la red o simplemente desestabilizar la comunicación. Elementos de seguridad son necesarios para proteger la integridad de la comunicación, así como los datos que fluyen por la red.

2.2. Ruteo en redes Ad-hoc

Para cumplir con los retos y limitaciones de las redes MANETs, investigadores han desarrollado varios protocolos, tratando de diferente manera la forma de administrar los recursos a las limitantes asociadas a este tipo de redes [10, 11, 12].

Lo que se espera de un buen protocolo de ruteo es que opere en ambientes donde cada nodo es móvil. Al ser una red inalámbrica no centralizada, el protocolo debe funcionar de manera distribuida por los nodos participantes. Y debe tomar en cuenta que en cualquier momento los nodos podrían salir del alcance de la red o simplemente desaparecer.

No solo es necesario mantener comunicación entre nodos participante de una MANET; dependiendo de la aplicación de esta red, también es necesario mantener la calidad de servicio y seguridad de la información. El protocolo de ruteo tiene que balancear las necesidades y los recursos para mantener una calidad de servicio para todos los dispositivos en la red.

2.2.1. Características del ruteo en MANETs

La responsabilidad de enlazar nodos que no se encuentran en rango de transmisión, es del protocolo de ruteo. Los protocolos de ruteo son variados en la forma de crear y mantener rutas para comunicar nodos participantes que se encuentren fuera del alcance del nodo emisor.

Los protocolos de ruteo se pueden dividir en tres clasificaciones [13, 14]; Proactivos, reactivos e híbridos.

Los protocolo proactivos utilizan tablas de ruteo para su funcionamiento. Cada nodo tiene que mantener una o más tablas para mantener información sobre el ruteo. Si existiera algún cambio en la topología, las modificaciones a las tablas deben ser reflejadas lo más pronto posible para mantener una vista consistente de la red. Cada cambio detectado requiere que se envíe una actualización de tablas en toda la red.

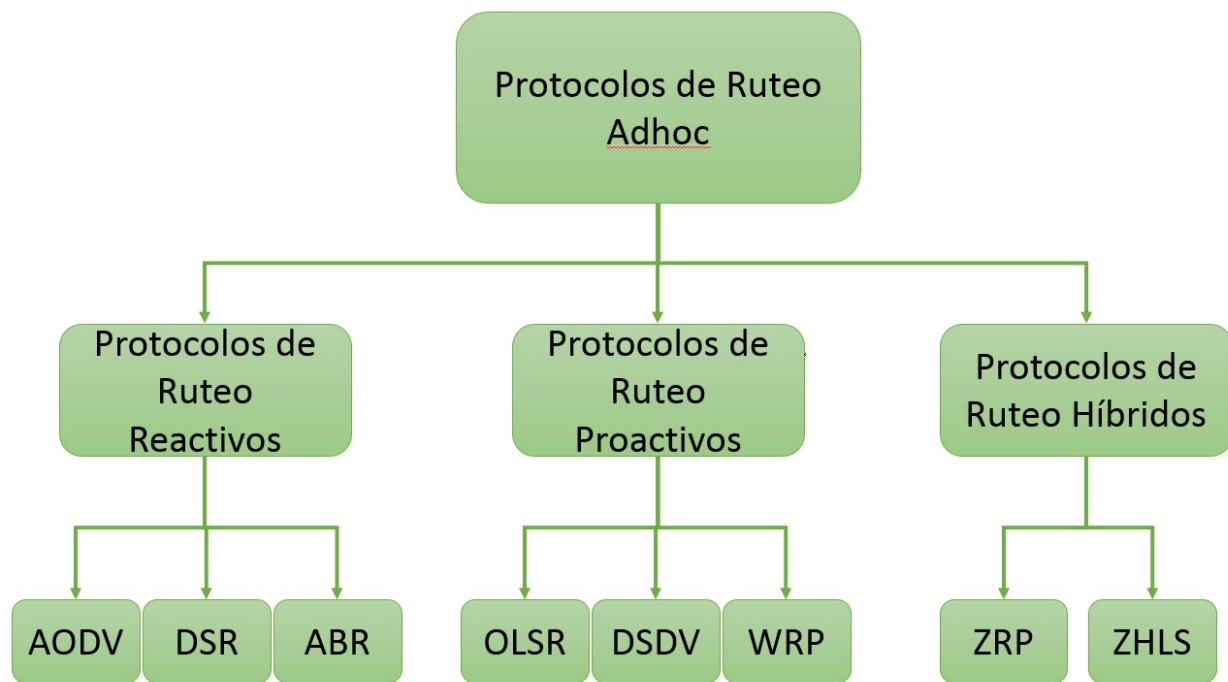


Figura 2.3: Clasificación de Protocolos de ruteo Ad-hoc

Los protocolos reactivos también se conocen como protocolos sobre demanda, esto debido a que la ruta solo es buscada hasta el momento que es solicitada. Los protocolos reactivos no mantienen tablas de ruteo, buscan la ruta de fuente a destino en el momento que se necesita; si no es necesaria la comunicación entre otros nodos, no se mantiene un registro de ruta. La búsqueda de rutas se realiza mediante un mecanismo de inundación de la solicitud de ruta a toda la red estableciendo comunicación con los nodos cercanos en búsqueda del destinatario.

Los protocolos híbridos combinan el uso de tablas de ruteo y la inundación de paquetes de ruteo. Existen varias técnicas para realizar la combinación, todas con el fin de hacer eficiente la búsqueda y manutención de rutas.

2.2.2. Protocolos Proactivos

Los proactivos dependen de la obtención y mantenimiento de tablas de ruteo de nodos destino conocidos. Esto requiere del tráfico de paquetes de control para enviar actualizaciones por rutas conocidas, haciendo difícil y costoso el mantener actualizada a toda la red; la actualización utiliza mucha memoria y en ocasiones tiene que enviar actualizaciones periódicas a los nodos vecinos, disminuyendo el ancho de banda. Este tipo de ruteo no es útil para redes con alto dinamismo, los cambios de topología necesitan actualizar constantemente con cada cambio de la topología, degradando el desempeño de la red [15].

Algunos protocolos de esta clasificación son DSDV (Destination Sequence Distance Vector Routing Protocol) [16], WRP (Wireless Routing Protocol [17], OLSR (Optimized Link State Routing [18].

2.2.3. Protocolos Reactivos

Los protocolos reactivos o bajo demanda no mantienen tablas de ruteo, buscan rutas en el momento de necesitarlas. Las peticiones para formar rutas son enviadas desde la fuente de transmisión, y pasadas de nodo a nodo inundando la red hasta encontrar al destino o a algún nodo que conozca la ruta al destino. La selección de una ruta puede ser por “ruta de origen” o por “ruteo por vector de distancia”.

El ruteo de origen utiliza cabeceras en los paquetes de datos, que contienen información del ruteo, esto nos libera de tablas de ruteo; pero sobrecargando la red con mayor cantidad de paquetes o más grandes.

El ruteo por vector de distancia utiliza las direcciones del destino y de siguiente salto para el paso de los paquetes, y para esto se requiere que los nodos almacenen información de rutas activas hasta que la ruta no sea útil o llegue a ocurrir un tiempo límite con el fin de

evitar rutas no válidas [19].

El uso de un paquete que inunde la red es un método confiable para esparcir información a los nodos de la red, pero esto tiene un costo, crea saturación en la red y consume ancho de banda cuando la ruta es buscada. El tiempo de búsqueda de una ruta viable puede retrasar los paquetes mientras los nodos calculan y retransmiten los paquetes de ruteo.

El método de búsqueda de los protocolos de ruteo reactivos utilizan poca memoria con respecto a los protocolos proactivos, y además facilitan la escalabilidad de una MANET [10].

Dentro de los protocolos reactivos se podrían citar a AODV (Adhoc On Demand Distance Vector) [20], DSR (Dynamic Source Routing) [21], LMR (lightweight Mobile Routing) [22] y TORA (Temporary Ordered Routing ALgorithm) [23].

2.2.4. protocolos Híbridos

Los protocolos híbridos combinan las bondades de los protocolos proactivos con las de los protocolos reactivos, tomando la baja transmisión de paquetes de control de los protocolos proactivos mientras reducen los retrasos en el descubrimiento de rutas de los protocolos reactivos mediante tablas de ruteo [19].

Los protocolos híbridos de esta clasificación son ZRP (Zone Routing Protocol) [24] y ZHLS (Zone-based Hierarchical Link State Protocol) [25].

2.3. Métricas, Entropía y Desorden

2.3.1. Métricas en MANETs

Los protocolos de ruteo necesitan el uso de métricas para poder comparar una o más rutas cuando son encontradas; estas métricas están relacionadas con algún aspecto de la comunicación o movilidad de los nodos de la red.

El uso de métricas para seleccionar rutas es crucial para determinar la mejor dentro de las rutas encontradas. La obtención de métricas tiene un costo, ya sea en procesamiento, tiempo o tráfico en la red.

El uso de métricas creativas, no tan intensas en el uso de recursos son requeridas para evaluar la confiabilidad de los nodos. El consumo de energía se puede minimizar utilizando información que cada nodo conoce, con menor utilización de procesador y otros recursos. Estas métricas describen el comportamiento de enlaces o estabilidad de la ruta [26, 27, 28].

En las redes MANET, los nodos son libres y con movilidad independiente. La topología de una MANET cambia de acuerdo a la movilidad de cada nodo dentro del área de cobertura de la red, alterando la tasa de datos y los enlaces entre nodos, rompiendo enlaces de comunicación establecidos [26].

Otras métricas se derivan del comportamiento de los enlaces ante el movimiento. Conforme el nodo se mueve, los enlaces a nodos vecinos pueden cambiar. Cuando la conexión es completamente estable, siempre está presente y la comunicación está en el punto óptimo.

Una conexión que mantenga rupturas en el enlace por la mitad del tiempo de conexión, obliga a que los paquetes que son enviados en este tiempo, se pierdan o se retransmitan, degradando el enlace. El protocolo ETX [27, 29] utiliza la relación de entrega de ida y regreso de una conexión; La métrica de duración de enlace (LD) [30] usa el tiempo de cada enlace

entre nodos. Algunas otras métricas de este tipo evalúan la relación de cambio de uno o más características de comunicación [31].

Para que una métrica sea práctica en su uso en una red MANET es necesario [32]:

- Poder implementarse en nodos reales
- Computable de manera distribuida en la red
- Adaptarse a medir el desempeño local
- Evaluarse en tiempo real

2.3.2. Entropía y desorden

La entropía es una métrica versátil [33] usada en diferentes campos. Esta métrica es usada y adaptada a la Química, Biología e investigación médica [34, 35], comportamiento humano y animal [36, 37, 38].

En las ciencias computacionales, es utilizada en el análisis de sistemas complejos e información [39, 40, 41, 42], análisis de imágenes [43], y redes de computadoras [31, 44, 45].

Las métricas basadas en entropía toman la razón de cambio o el comportamiento de alguna característica de la comunicación para crear la métrica; usualmente la medida es entropía, orden o desorden. La entropía representa la incertidumbre en un sistema [44, 46?]. La mayoría de las métricas basadas en entropía usadas en MANETs evalúan la razón de cambio en ubicación o características del enlace tales como el rompimiento. Cuando la medida de entropía es alta expresa una considerable razón de cambios [47].

El orden y el desorden [48, 49] son la representación normalizada de la entropía. La definición de desorden es [47, 50]:

$$\Delta = \frac{S}{S_{max}} \quad (2.1)$$

Donde S es la entropía Boltzmann-Gibbs-Shannon [51], dada por:

$$S \equiv -k \sum_{i=1}^N (p_i) \log_2(p_i) \quad (2.2)$$

Usando a P_i como la probabilidad de que el estado i de N estados en el sistema, con la constante Boltzmann representada como k.

S_{max} denota la entropía máxima de un sistema con una distribución equiprobable de p_i [48, 49]

$$S_{max} = (k) \log_2(N) \quad (2.3)$$

Si N es el número de posibles estados en el sistema y k la constante Boltzmann. El valor de p_i para cada posible estado es:

$$p_i = \frac{1}{N} \quad (2.4)$$

2.3.3. Desorden de entropía de desconexión de enlace (DEDE)

Para mediciones de movilidad física (velocidad, aceleración y posicionamiento) son necesarios sensores especializados, que consumen significativamente la fuente de energía (batería). Es posible observar los efectos de la movilidad directamente en las conexiones para determinar la estabilidad de un nodo debida a la movilidad física.

Las conexiones de un nodo pueden ser monitoreadas mediante un paquete de reconoci-

miento (hello). Este paquete es escuchado solo por nodos en el rango de transmisión del nodo; registrándolo como un posible estado de conexión; cuando el paquete esperado no es recibido, se considera como perdido.

El paquete periódico puede ser pequeño, no contiene mucha información. El objetivo de este paquete es informar a los nodos vecinos la presencia del nodo y su posible enlace. La periodicidad del paquete es clave para contabilizar los paquetes perdidos en un tiempo observado T . Cada nodo participante notifica su presencia a nodos vecinos y su posible conexión.

En la figura 2.4 un paquete exploratorio es recibido en tiempo t , y es marcado con el valor de uno; pero para el tiempo $t+1$ el enlace no existe, el paquete esperado para este tiempo no es recibido y considerado como rompimiento del enlace. Este registro es utilizado para evaluar el micro-estado de la entropía durante la ventana de tiempo T .

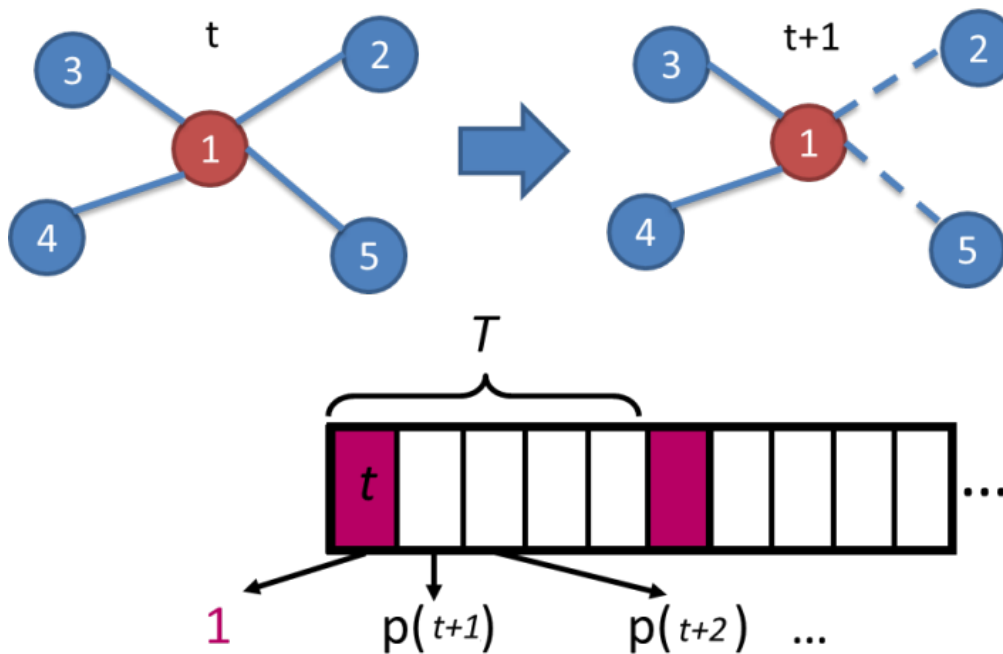


Figura 2.4: Ventana de tiempo del nodo En tiempo $t+1$, nodo 1 pierde las conexiones a nodo 2 y 5 hechas en tiempo t ; registrando éxito o falla en un arreglo con una ventana de tiempo deslizable

La ventana de tiempo T , es una ventana de tiempo deslizable donde la información de cada paquete exploratorio es almacenado por un determinado tiempo, y descartado después de cumplido el límite temporal. Usando una ventana de tiempo de 4 segundos, las entradas más antiguas que esto son eliminadas.

Al evaluar DEDE, se evalúa la contabilidad de paquetes perdidos, así que si esperamos 10 paquetes en el periodo de tiempo y solo recibimos 4, la expectativa es de 6 paquetes perdidos.

Cuando un nodo se mueve dentro del área de trabajo de la red, ocurren rompimientos de enlaces y se crean nuevas conexiones. En la figura 2.5 se muestra que el nodo 0 mantiene una dirección y velocidad fija. Cuando el nodo pasa dentro del rango de algún vecino, un nuevo enlace es creado, y lo mismo hace para cada nuevo encuentro de vecinos. Al salir del rango de un nodo, este enlace es roto y registrado los paquetes exploratorios no son recibidos.

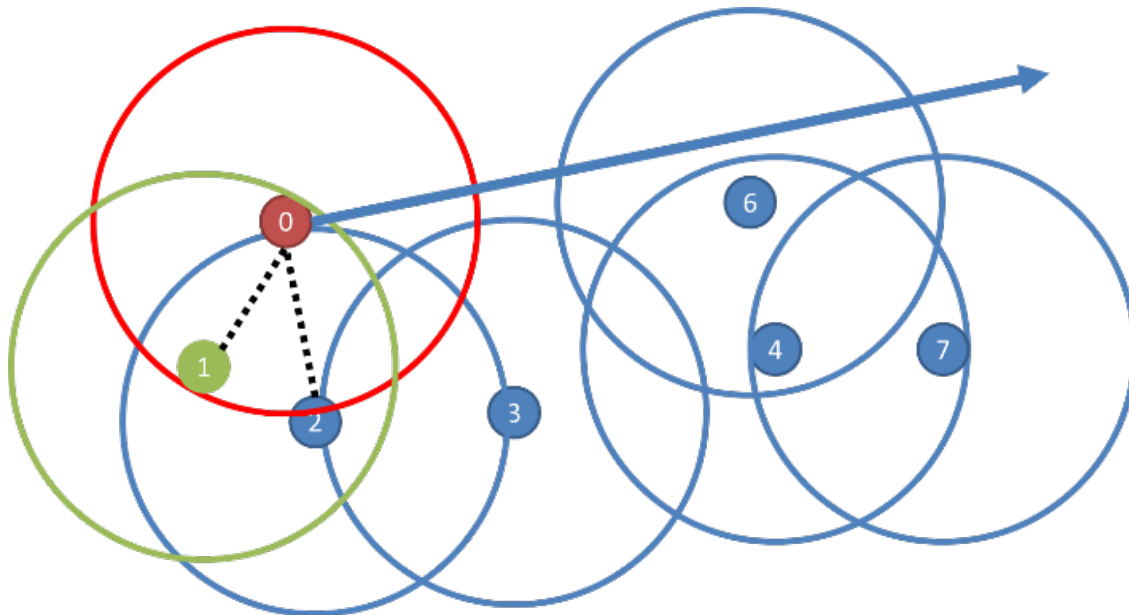


Figura 2.5: Nodo recorriendo el área de la MANET Cuando un nodo se mueve dentro del área de trabajo de la red, ocurren rompimientos de enlaces y se crean nuevas conexiones

El arreglo de enlaces existe mientras no se encuentre vacío de conexiones exitosas dentro de la ventana de tiempo. El registro es borrado cuando no exista entrada alguna en el periodo

de tiempo. Todos los enlaces a vecinos con al menos una entrada exitosa son utilizados para evaluar DEDE.

Si la conexión es continua durante el periodo de tiempo, el valor de DEDE es bajo; denotando poco o ningún cambio en el enlace. Cuando la conexión es pérdida y recuperada varias veces en este periodo, el valor de DEDE será alto.

El total de las posibles conexiones y desconexiones son usadas para evaluar el DEDE de cada nodo con sus vecinos. Un nodo es considerado estable cuando las posibilidades de conexión están presente en el periodo de tiempo. De otra forma, cuando la posibilidad de conexión es baja, denotaría a un nodo inestable a la conexión futura con los vecinos.

Una característica observable de un nodo con alta movilidad, es la creación de enlaces con nodos recién conocidos. Las conexiones con nodos recién conocidos son agregados como posibles conexiones futuras, elevando el valor DEDE de ese nodo.

Usando N como el número de conexiones esperadas por el nodo durante el periodo T en la eq. 2.3 obtenemos la entropía máxima. Utilizando los enlaces perdidos en la eq. 2.2 evaluamos la entropía de desconexión del nodo.

2.4. Técnicas Generales de ruteo en MANETs

Investigadores han desarrollado numerosos protocolos de ruteo; tradicionalmente son clasificadas en protocolos proactivos, reactivos e híbridos de los dos anteriores, esto basado en la forma en la que encuentran y actualizan las rutas. Ya sean clasificado como alguno de los anteriores por la forma de encontrar rutas, también pueden ser clasificados por la forma que seleccionan la mejor ruta; los protocolos de estado de enlace (Link state) [52] y los protocolos de vector-distancia (distance-vector) [53].

En los protocolos de ruta con enfoque de estado de enlace, se mantiene una copia parcial o completa de la topología y los costos de cada uno de los enlaces conocidos. Los protocolos de vector-distancia solo mantiene la información de los enlaces a los vecinos inmediatos y los costos de rutas conocidas. Los protocolos de estado de enlace son de mayor complejidad e intensos computacionalmente hablando, agregando también un alto consumo de memoria.

De los protocolos más usados y que sirven de base para otros protocolos podemos encontrar a OSPF [54], AODV [20], y DSR [21, 55]; este último es la base para el ruteo usando DEDE.

2.4.1. Open Shortest Path First (OSPF)

El protocolo OSPF es un protocolo de estado de enlace dentro de la clasificación de los proactivos. Es ampliamente usado en las redes cableadas. La idea principal de OSPF es mantener una base de datos de la topología en cada uno de los equipos de ruteo, de manera que puedan armar una tabla de ruteo de manera local. Normalmente las rutas son construidas usando árboles de camino más corto [54]; Este algoritmo selecciona el camino más corto y garantiza no tener bucles o loops.

En OSPF es de vital importancia mantener las rutas a posibles destinos. Y es por esto

que se requiere del envío de paquetes de control para mantener actualizada la topología reduciendo el aprovechamiento de la red.

Las redes que utilizan OSPF dividen la red en varias áreas indizadas. Un identificador de área es manualmente asignado a cada segmento de red o subred. Cada área incluye a enrutadores en una o más subredes. Cada área mantiene una copia de la base de datos de los estados de enlace de esa área. Dos áreas están conectadas cuando comparten enrutadores.

Cinco tipos de paquetes de control son usados para determinar adyacencia y sincronizar bases de datos: Paquetes Hola, paquetes descriptivos de la base de datos, paquetes de solicitud de estado de enlace, paquetes de actualización de estado de enlace, y paquetes de reconocimiento de estado de enlace.

Cuando dos enrutadores establecen una comunicación dos vías entre ellos, se comparten las entradas de la base de datos de estado de enlace y sincronizan con paquetes de descripción de la base de datos. Un paquete de reconocimiento es usado para notificar los paquetes recibidos. Para mantener las entradas más actuales, se selecciona de uno de ellos a un enrutador maestro que es el que coordina los números de secuencia, manteniendo las entradas más actualizadas.

Una vez actualizada la base de datos de estado de enlace, empieza la búsqueda de los caminos más cortos. Para esta tarea el algoritmo Dijkstra [56] es utilizado en cada enrutador. Los cambios en los enlaces son notificados de manera de broadcast a todos sus vecinos.

2.4.2. Dynamic Source Routing (DSR)

El protocolo Dynamic Source Routing (DSR) es un protocolo sencillo y eficiente de ruteo para MANETs, extensible en sus opciones y es por esto que sirve de base para modificar elementos como la selección de mejor ruta.

Todos los nodos participantes en una MANET pueden en algún momento moverse de lugar o dejar el área de la red a conveniencia, y DSR debe adaptarse a estos cambios y mantener conectados a los nodos participantes.

Este protocolo encuentra las rutas de manera dinámica hacia un nodo destino utilizando múltiples saltos, iniciando desde la fuente, a este tipo de ruta se le denomina ruta de origen. Esta ruta es incluida en la cabecera de cada paquete enviado; en esta cabecera se encuentra la ruta completa y ordenada de todos los nodos que la forman. Esto evita ciclos en la ruta la necesidad de tener actualizadas las rutas de cada uno de los nodos por lo que atraviesa el paquete; también es posible que los nodos puedan leer la información de esta cabecera y actualicen sus tablas sin producir tráfico extra en la red.

Este protocolo fue planeado para reducir la sobrecarga de tráfico en la red y al mismo tiempo mantener la rapidez de respuesta a los cambios de la red, dando un servicio que se adapta y responde en caso de movimiento de nodos y otros cambios en la condición de la red.

Este protocolo asume la movilidad de los nodos, siempre y cuando esta movilidad no llega al punto de que los paquetes involucrados en la búsqueda de ruta sean enviados por cada paquete de datos.

DSR se compone principalmente de dos mecanismos que trabajan en conjunto para el descubrimiento y mantenimiento de rutas de origen.

Estos dos mecanismos son el descubrimiento de ruta y el mantenimiento de ruta. Estos son la base y fortaleza de este protocolo para el funcionamiento sobre demanda de rutas de origen, y no es requerido un paquete periódico para mantener actualizadas las rutas. Conforme los nodos recorren el área de cobertura, cambiando las características de la MANET, el protocolo se adapta cambiando y manteniendo las rutas en uso; Si no hay comunicación, las rutas no son necesarias y por lo tanto las tablas son desechadas.

2.4.2.1. Descubrimiento básico de rutas

Cuando un nodo S requiere de una ruta con destino al nodo D, y no fue encontrada en el caché, se inicia el protocolo de búsqueda para encontrar dinámicamente el camino a D. El nodo S inicia el protocolo y lo llamaremos “Fuente” y al nodo D lo llamaremos “Destino”, al cual es necesario encontrar una ruta.

Tomando como ejemplo la figura 2.6, el nodo S intenta formar una ruta al nodo destino D. Para inicial el descubrimiento de ruta a nodo D, la fuente envía un mensaje “Route Request” en forma de broadcast, recibido por todos los nodos en el área de transmisión del nodo fuente. Este mensaje contiene la identificación de la fuente y un identificador de solicitud de ruta o un “route id”, único y determinado por la fuente. Este mensaje contiene también la dirección de cada nodo intermediario por el que ha pasado. La lista de nodos de la ruta se encuentra en blanco por la fuente al inicio del protocolo de descubrimiento.

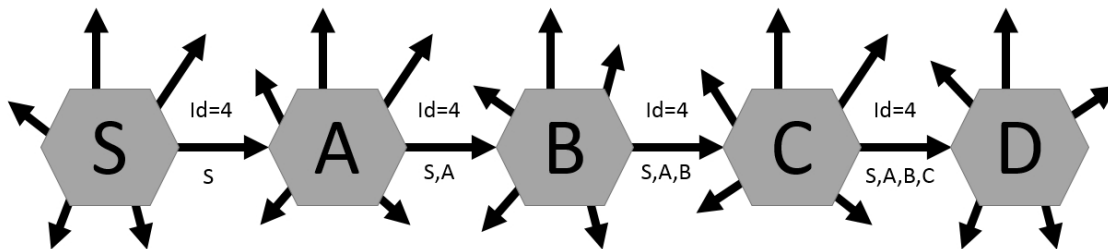


Figura 2.6: Nodo S solicita ruta hacia nodo destino D; Nodos A,B,y C participan como intermediarios.

Cuando otro nodo recibe el mensaje de solicitud de ruta, y es el destinatario del mensaje, este responde con un mensaje tipo “Route Reply” con destino a la fuente, regresando una copia del registro acumulado de nodos intermedios provenientes del mensaje recibido.

Los nodos que escuchan el mensaje de solicitud, revisan el identificador de solicitud de ruta, si el mensaje ya fue atendido, ese mensaje es descartado. Si la solicitud no ha sido tratada, se agrega la dirección propia a la lista de nodos intermedios y se realiza el envío de

esa solicitud en modo broadcast repitiendo la secuencia en cada nodo que escucha, inundando la red con la solicitud y evitando bucles gracias al identificador de solicitud de ruta.

Antes de responder a la solicitud de ruta, el nodo destino examina su caché de rutas buscando un regreso a la fuente, si lo encuentra lo usará como la ruta descubierta en el mensaje de respuesta. De otra forma tomará la lista de nodos del mensaje de solicitud de ruta y lo agregará a la respuesta de ruta.

Mientras el descubrimiento de ruta sucede, el paquete de información se mantiene en un buffer de envío. El buffer de envío contiene una copia de cada paquete en espera ya que no hay todavía una ruta al destino, ahí permanece por un tiempo determinado, luego de este tiempo el paquete es eliminado.

2.4.2.2. Mantenimiento básico de rutas

Ya sea iniciando o pasando paquetes de ruta de origen, cada nodo transmitiendo un paquete es responsable de confirmar la recepción en el siguiente salto; y se retransmite hasta la confirmación de la recepción.

Si el paquete es retransmitido un número máximo de veces, y no se recibe confirmación, el nodo retransmisor emite un mensaje de error (“Route Error”) al nodo fuente, identificando que ese enlace no puede pasar paquetes. Si el nodo fuente o inclusive uno de los nodos participantes tiene en memoria caché una ruta alternativa, esa ruta se utiliza, de lo contrario se requiere de una nueva solicitud de ruta al nodo destino.

2.4.2.3. Almacenaje en caché de rutas escuchadas

El modelo DSR es uno de los modelos de ruteo sobre demanda en MANETs. Este protocolo es un protocolo muy eficiente, y sirve de base para mejoramiento y expansiones que toma en

cuenta varios elementos de la comunicación para la selección de una ruta. Algunas extensiones o modificaciones de este protocolo utilizan un caché temporal de las rutas conocidas, estas opciones son Link Cache y Path Cache.

Un nodo intermedio o los nodos que escuchen algún paquete con una ruta, puede agregar esta información a su caché de rutas. Simplemente con escuchar rutas, ya sea en un paquete de datos o una solicitud de ruta o su correspondiente respuesta de solicitud.

Cuando el protocolo DSR usa la opción de tabla caché, todas las rutas escuchadas o descubiertas son almacenadas temporalmente en una tabla. El uso de esta tabla reduce las solicitudes en la red cada vez que se necesita una ruta. Antes de enviar un paquete de datos se busca primero en la tabla caché, si no se encuentra una ruta se iniciará el proceso de descubrimiento y el resultado se almacenará en la tabla y en las tablas de los nodos que escucharon ese descubrimiento de ruta.

El almacenaje de estas rutas en caché debe estar limitado a un tiempo de vida, para evitar rutas rancias, viejas, o inexistentes. Este tiempo de retención en caché puede variar dependientes de la movilidad de los nodos de red.

Hay dos estructuras para almacenar las rutas, Path-Cache y Link-Cache. Path-cache almacena la lista completa de la ruta, es decir, la lista de los nodos y su secuencia en la ruta encontrada. Link-cache almacena una lista de enlaces entre nodos, cada enlace se agrega por separado; para la búsqueda de una ruta completa es necesario usar teoría de grafos.

La diferencia entre Path-cache y Link-cache radica en la forma que se almacena la ruta. En el caso de que una nueva ruta A-B-E-F, en path-cache se almacena la ruta completa en una entrada independiente en la memoria (Figura 2.7).

En el caso de almacenar una nueva ruta con link-cache, se agrega únicamente los enlaces no conocidos y se ajustan los pesos de cada enlace si es que aplica. Para el caso anterior, si se utilizara link-cache, solo se agrega al grafo el enlace B-E (Figura 2.8).

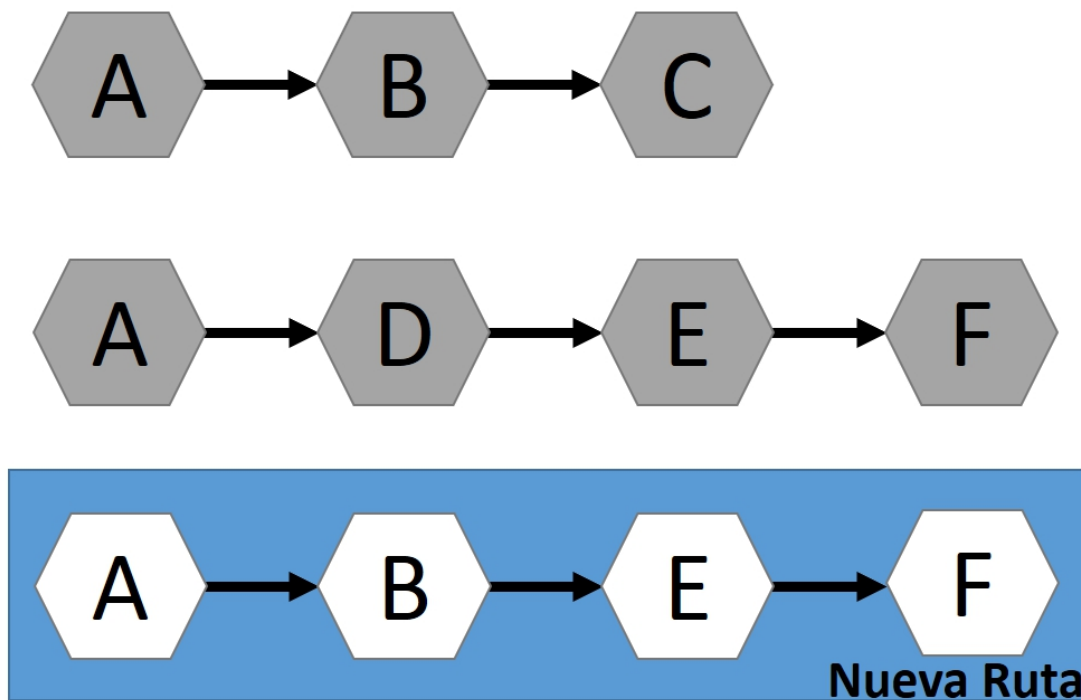


Figura 2.7: Almacenamiento de Ruta en Path-Cache

El uso de link-cache puede mejorar el rendimiento con respecto path-cache [57]. Esto es debido a un mejor aprovechamiento de la información de estado de los enlaces; si un enlace se rompe, en link-cache se borra el enlace y no la ruta completa como en path-cache.

2.4.2.4. Respondiendo solicitud de ruta usando el caché

Los nodos que reciben una solicitud de ruta de los cuales no son el destino, buscan primeramente en su caché de rutas antes de enviar de nuevo la solicitud a otros nodos. Si se encuentra una o varias rutas posibles al nodo destino, se selecciona la mejor de ellas y se retorna en un “Route Reply”.

De cualquier manera, antes de retornar el mensaje “Route Reply” desde el caché de rutas, el nodo debe verificar que la ruta a agregar o concatenar en el mensaje no contiene bucles o

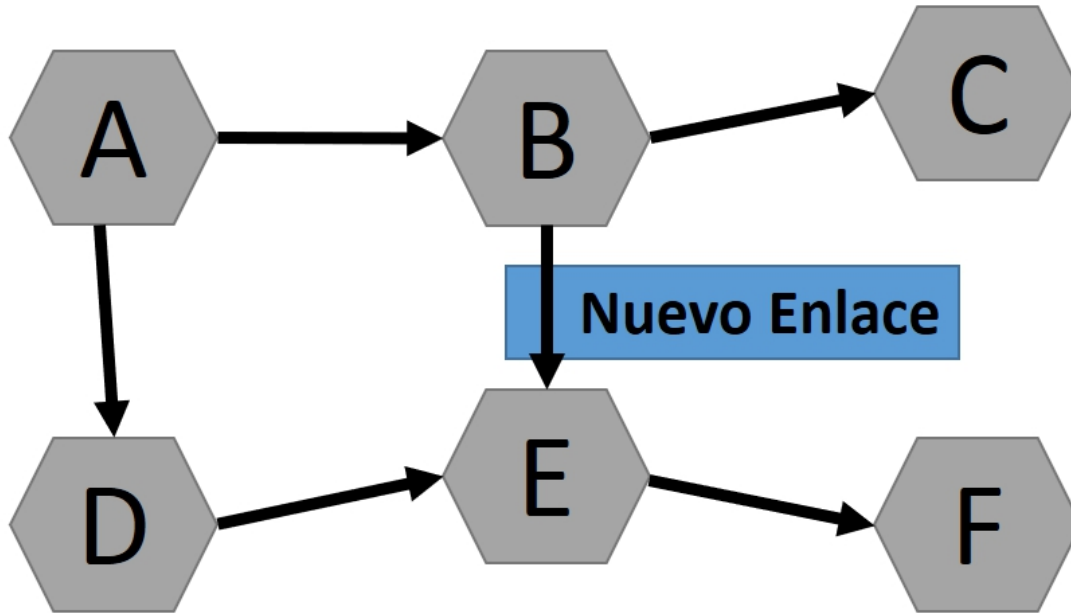


Figura 2.8: Almacenamiento de Ruta en Link-Cache

nodos repetidos.

La selección de la mejor ruta se puede efectuar utilizando un algoritmo de camino más corto como Dijkstra [56], donde el valor de cada enlace es asignado por algún mecanismo dentro de la búsqueda o cada nodo lo evalúe. En el caso de este trabajo, el peso de cada enlace es el valor DEDE del nodo receptor, de esa manera contabilizamos la estabilidad del salto hacia el nodo receptor.

2.4.3. Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV)

El protocolo de ruteo Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV) se clasifica como reactivo. AODV transmite una petición de ruta para el descubrimiento de ruta de modo reactivo. En este registro de ruta se agrega el número de saltos de la ruta. Cada nodo intermedio almacena temporalmente una conexión en reversa del proceso de descubrimiento. Este registro temporal apunta hacia el nodo que solicito el paso del paquete. De esa manera

se puede encontrar el camino de regreso cuando se encuentre el destino. Para evitar rutas viejas se le agrega un numero de secuencia al paquete de respuesta, implicando que el número más alto es la ruta más actual.

AODV descubre rutas sin bucles gracias a la asociación de los números secuenciales en la búsqueda del destino. El nodo que inicio la solicitud y todos los nodos intermedios construyen las rutas asociando un número secuencial cuando reciben la solicitud; y se agrega el número de saltos para poder encontrar el camino más corto cuando se reciben varias rutas con el mismo número de secuencia.

El marco teórico expuesto en este capítulo presenta las bases del ruteo en redes MANET, describiendo las características básicas y limitaciones de este tipo de redes y enlistando algunas técnicas utilizadas para el ruteo y selección de ruta, de donde se toma como protocolo base al DSR para implementar una propuesta de selección de ruta trabajada en la sección 3.1 mediante la metodología explicada en la sección 3.2.

Capítulo 3

Propuesta y Metodología

3.1. Propuesta: DEDE como métrica de selección de ruta en DSR link-cache

Usualmente la métrica utilizada por link-cache para seleccionar ruta es el conteo de saltos; lo que no representa una métrica ideal para MANETs [58]. Una ruta corta puede existir y ser seleccionada, pero no garantiza que sea la más estable o la más rápida; otros elementos se deben agregar para dar el peso representativo a cada enlace. Varias métricas se han propuesto para seleccionar una ruta [59, 60], mejorando la respuesta de entrega de paquetes ante situaciones diversas.

link-cache permite el cambio de la métrica de evaluación de ruta. El peso de una ruta es calculado con la sumatoria de los pesos de cada enlace o nodo que la forma. Esta métrica puede ser evaluada de diferentes maneras, la más común es el camino más corto por Dijkstra [56].

Como muestra la figura 3.1, existen dos rutas del nodo A hacia el nodo E. La ruta A

usando como intermediarios a los nodos B y C; y ruta B usando solamente al nodo D. La métrica tradicional utilizaría la ruta B con el salto más corto; pero esta ruta, aunque más corta, contiene el mayor desorden de enlace (DEDE de 0.5). La ruta A contiene más saltos, pero contiene a nodos con mayor estabilidad en sus enlaces (DEDE de 0.4).

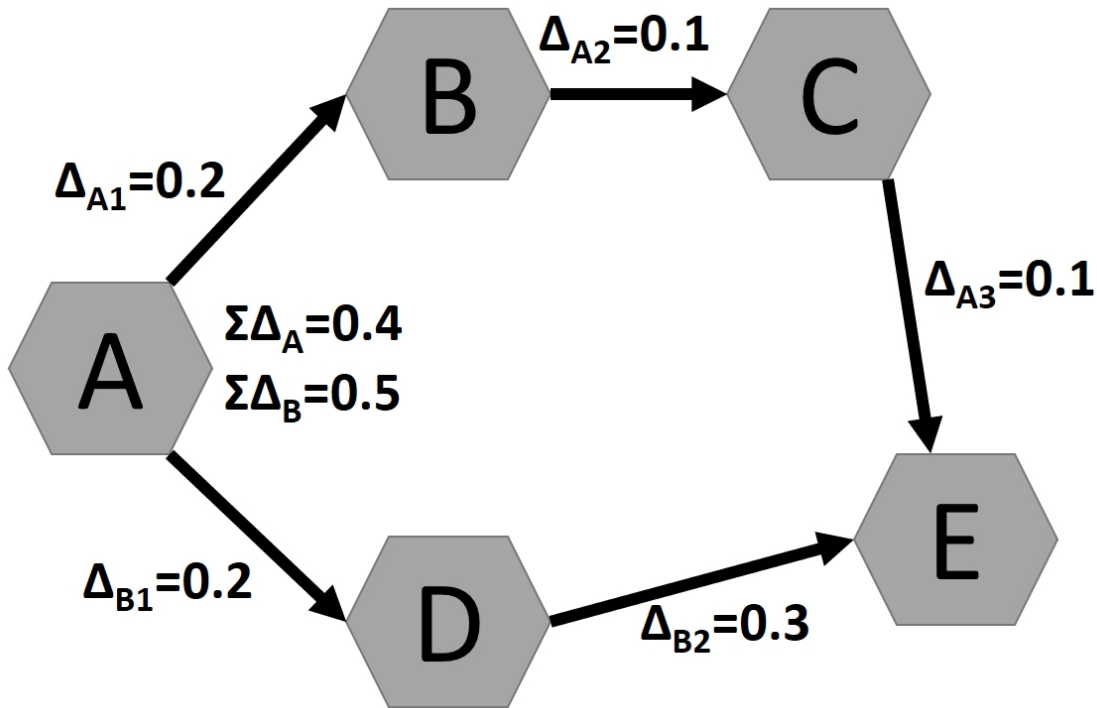


Figura 3.1: Decisión de Ruta en Link-Cache

Los enlaces rancios o no funcionales en memoria caché pueden ser utilizados por este algoritmo. El uso de los enlaces de la memoria caché puede resultar en rutas falsas si es que algunos de los enlaces que lo forman ya no existen dada la movilidad de los nodos. Las rutas que se detectan fallidas son removidas; pero igual de importante es que el resto de los enlaces sean descartadas o actualizados después de un tiempo razonable. El tiempo asignado para que un enlace puede ser fijo o adaptivo [61, 62].

3.2. Metodología

Para la validación y experimentación se utilizaron varias herramientas básicas. Para la simulación de las redes MANET se utilizó un simulador discreto de redes llamado Omnet++. En el cual para obtener movilidad y elementos inalámbricos se requirió instalar las librerías de INET. Esto permitió agregar nodos inalámbricos con características 802.11g (wifi) y movilidad independiente para cada uno de los nodos.

La versión utilizada fue Omnet++ IDE 4.6b1 con la librería INET 2.4.0. Estas herramientas son licencia libre y con soporte limitado. Se utilizaron las versiones para Linux y Windows.

Los resultados de las simulaciones fueron analizados con hojas de cálculo de Excel en la versión 2013. Solo se realizaron cálculos estadísticos descriptivos.

Los módulos de ruteo son programados utilizando lenguaje C++, la base del código fue la modificación del protocolo de ruteo DSR.

Los parámetros y características de cada simulación son descritos para cada fase del proyecto.

La implementación y validación de la métrica DEDE se dividió en Tres fases.

- Fase 1: Relación de métrica DEDE con la movilidad y tráfico de una red
- Fase 2: Evaluar la métrica DEDE como elemento identificador de nodos con alta movilidad
- Fase 3: Incorporar la métrica DEDE en la lógica de selección de ruta y enfrentarlo con las lógicas de selección predeterminadas en el protocolo DSR

Cada una de estas fases retoma las fases anteriores. Con la primera fase se buscó demos-

trar la relación de movilidad y tráfico de la red con el rompimiento de enlaces. Capturar estos rompimientos y variaciones en los enlaces de cada nodo y reflejarlos en el Desorden de Entropía de Desconexión de Enlace (DEDE).

Una vez probado que la métrica DEDE indicó una relación con el movimiento y el tráfico se inició la fase 2. La métrica DEDE en cada nodo representa los rompimientos de enlace causados por la movilidad con referencias a los nodos vecinos.

Si la métrica es indicador referenciado con la movilidad de los vecinos, la métrica puede identificar a nodo vecinos errantes; estos son los nodos con movilidad mayor al promedio de sus vecinos. Una vez identificados como nodos errantes, podríamos marcarlos como nodos con poca fiabilidad para transmitir información como nodos intermedios.

Para la fase 3, se incorpora la métrica DEDE a cada uno de los nodos participantes. De esta manera es posible identificar a los nodos que no son adecuados para funcionar como nodos intermediarios, si es posible, el algoritmo de selección buscará otra ruta más adecuada, si no existe otro camino más estable, el nodo se incluirá a una ruta.

3.2.1. Fase 1: Relación de métrica DEDE con movilidad y tráfico

Esta fase evalúa el comportamiento de la métrica DEDE frente a saturación de canal y la movilidad de los nodos; Buscando la relación y efecto que tienen la saturación de canal y el movimiento de los nodos, principales causas de rompimiento de enlaces.

Para este objetivo es necesario simular diversas situaciones de saturación de canal y movilidad de nodos para determinar estadísticamente la viabilidad de la métrica DEDE en determinar la estabilidad de un nodo afectada por la movilidad y saturación de canal.

Para evaluar esta relación de movilidad, densidad de tráfico, y la métrica DEDE se hacen combinaciones de velocidades en busca de la relación entre el aumento de velocidad con el aumento de la métrica DEDE.

Cada corrida de simulación utiliza una semilla para el generador de números aleatorios, así que, inicializando esta semilla a un valor definido, la corrida de simulación puede ser replicada o cambiar el comportamiento de los nodos para esa corrida de simulación.

Las corridas de simulaciones fueron realizadas en juegos de 4 y 7 corridas, cambiando la semilla aleatoria, obteniendo resultados reproducibles para las estadísticas requeridas en cada fase.

Cada simulación consistió en 50 dispositivos móviles con capacidades 802.11g; cada nodo trabaja independiente a los demás. Cada nodo tiene la libertad de movilidad; los nodos son libres de transmitir utilizando los protocolos de 802.11g.

El marco de referencia y simulador seleccionado fue Omnet++; un simulador discreto de redes. Este simulador utilizó librerías de expansión especializadas para administrar y controlar la movilidad de los dispositivos. La tabla Trivellato se usó para dar una respuesta cercana a una situación real de tráfico y pérdidas.

El modelo de movilidad utilizado es el llamado “RandomWaypoint” que mueve a cada

nodo de manera independiente dentro del área de trabajo. Cada nodo selecciona un destino y se mueve con una velocidad seleccionada, cuando se logra el destino, una nueva posición destino es seleccionada y el proceso se repita por la duración de la simulación. No se usó tiempo de espera al alcanzar el destino.

En la figura 3.2 se muestra la distribución de los nodos en el área de trabajo y el rango de transmisión de cada nodo.

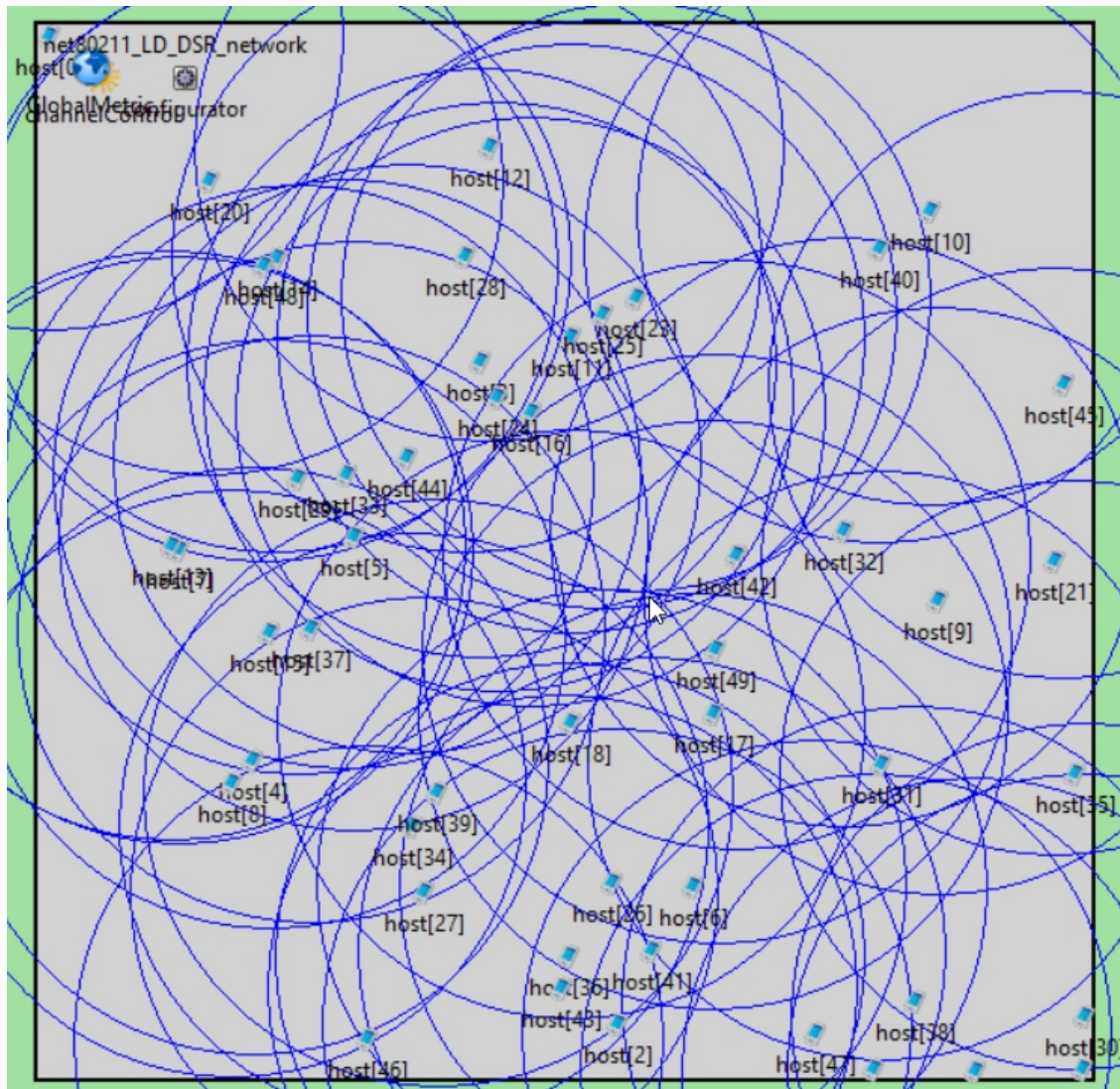


Figura 3.2: Área de trabajo con 50 nodos 802.11g

Para generar varios niveles de estrés en la red, se utilizó tráfico con las características del

estándar G.728(16kbps). La carga de cada paquete enviado es de 60Bytes, conteniendo 30 segundos de audio; enviando 33.3 paquetes por segundo. Este tráfico es enviado de manera constante por el tiempo de la simulación.

Para evaluar DEDE, cada nodo se configuro con:

- Ventana de tiempo de 4 segundos
- Cada 0.5 segundos se envía un mensaje Hola
- La métrica se recalcula cada 2 segundos

El impacto de la movilidad es un factor importante para la métrica, así que para identificar su impacto se implementaron escenarios con diferentes velocidades. Cada simulación tiene una duración de 600 segundos y se selecciona una velocidad para esa corrida. Las velocidades fueron de 0.2, 0.5, 0.7, de 2 a 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28 metros por segundo.

Los resultados de esta fase se encuentran en la sección 4.2.

3.2.2. Fase 2: Evaluar la métrica DEDE como un elemento identificador de nodos con alta movilidad

Los nodos con alta movilidad presentan características identificables en la métrica DEDE, los nodos de mayor movilidad presentan un DEDE alto, mientras que nodos inmóviles presentan un bajo valor en esta métrica.

El objetivo de esta fase es simular situaciones en las cuales utilizando únicamente la métrica DEDE podamos identificar y marcar a los nodos de alta movilidad. Y demostrarlo estadísticamente.

3.2.3. Fase 3: Incorporar la métrica DEDE en la lógica de selección de ruta

El objetivo de esta fase es incorporar la métrica DEDE en la lógica de selección de ruta; seleccionando la rutas con menor valor DEDE de un grupo de rutas encontradas.

Para tomar un marco de referencia, se compara los resultados de las simulaciones usando la métrica de la menor cantidad de saltos contra la métrica DEDE.

El simulador replica los movimientos de cada nodo para cada par de pruebas, es decir, los nodos tienen las mismas rutas y velocidades para cada par de corridas; Solo cambia la lógica de selección de ruta.

La propuesta hecha en la sección 3.1 es puesta a prueba mediante la metodología de la sección 3.2 en el capítulo 4.

Capítulo 4

Experimentos y resultados

4.1. Bases de las simulaciones

Utilizando la metodología antes mencionada en 3.2.1, se simularon una serie de experimentos con el objetivo de cada una de las fases. Todos los objetivos buscan encontrar la estabilidad de la medida DEDE, especialmente ante las variaciones causadas por la movilidad; siendo la movilidad el factor predominante para la inestabilidad en la comunicación.

4.2. Experimentos Fase 1

Para la fase Uno, se evaluó el comportamiento de la métrica frente a la saturación de canal y la movilidad de los nodos; Buscando la relación y el efecto que tienen esta dos ante la métrica. Estos dos factores se seleccionaron por ser los factores principales del rompimiento de enlaces.

Para esta fase se simularon varias corridas en donde se combinaron los niveles de saturación de canal con las velocidades de los nodos participantes, graficando relación entre las variables de saturación y velocidad sobre la métrica DEDE.

En la figura 4.1 se ve representada la respuesta de la medida DEDE frente a la velocidad de los nodos y la saturación de tráfico. Para diferenciar el efecto de saturación de tráfico con el de la velocidad, se agrupo por densidad de tráfico.

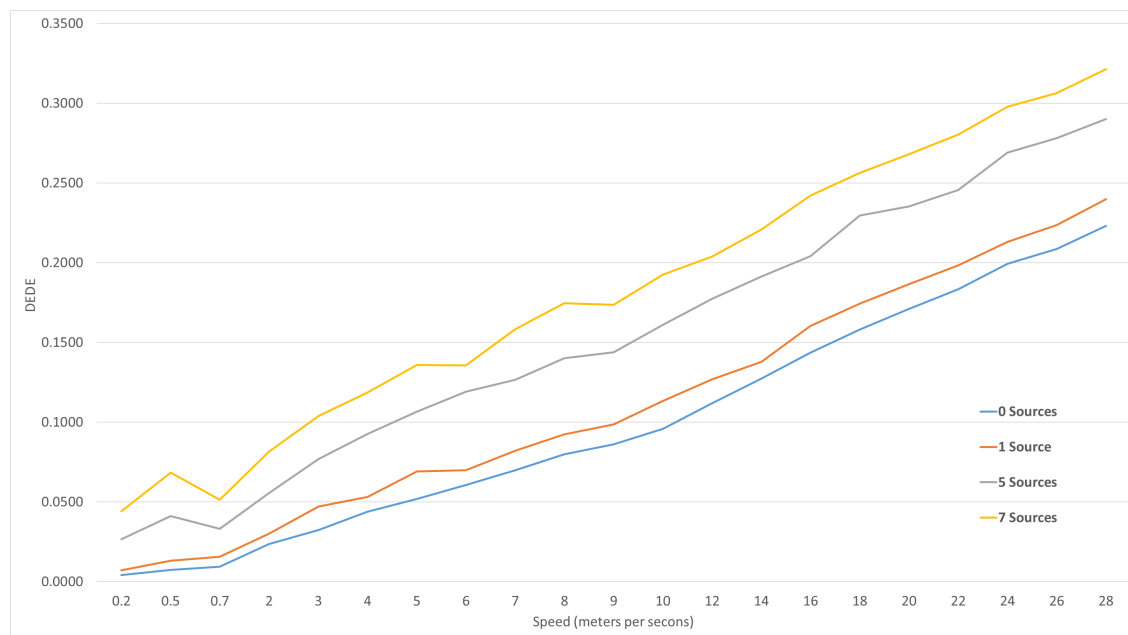


Figura 4.1: DEDE frente a Velocidad y Saturación de canal

En la gráfica podemos distinguir el efecto de la movilidad en la métrica, a mayor movilidad de los nodos, mayor es la medida DEDE; si observamos el efecto que tiene la saturación de

tráfico en la métrica notamos poco efecto, manteniendo el mismo comportamiento.

La combinación de velocidad y saturación de tráfico puede producir un incremento en el desorden gracias a la pérdida de paquetes que se presentan al saturarse el canal; el incremento más notable en DEDE se puede notar al incrementar la velocidad y ocasionar mayores rompimientos de enlaces elevando el DEDE.

Otra forma de relacionar al DEDE con los factores que se involucran con los rompimientos, es relacionar al DEDE con la relación de entrega de paquetes de datos. A mayor rompimiento de enlaces, mayor pérdida de paquetes y una elevación en el DEDE.

En la figura 4.2 se puede notar correspondencia con la relación de entrega de paquetes con DEDE. Con forme DEDE incrementa, la entrega de paquetes disminuye, es decir existen mayores pérdidas cuando DEDE se incrementa.

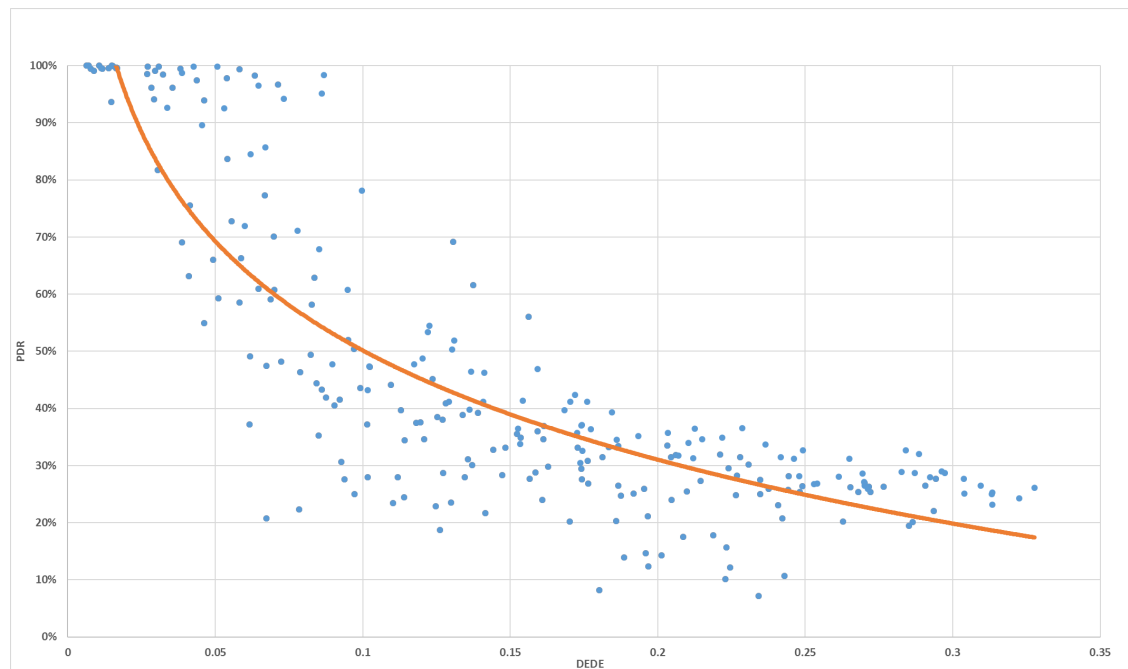


Figura 4.2: DEDE frente a relación de entrega de paquetes

La tabla 4.1 muestra el resultado de un análisis de varianza de dos variables. El análisis se basa en el resultado DEDE cuando utilizamos a la velocidad y a la saturación de tráfico

Cuadro 4.1: ANOVA de dos variables (Velocidad y saturación de tráfico)

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit	ETAsqr
Traffic	0.27801	3	0.0926	1630.3300	6.2215E-124	2.6583	0.1557
Speed	1.4828	20	0.0741	1304.3727	4.6757E-173	1.6333	0.8305
Interaction	0.0149	60	0.0002	4.3715	2.77179E-14	1.3980	0.0083
Within	0.0095	168	5.6842E-05				
Total	1.7853	251					

como variables. Con esto se busca el tamaño de efecto de estas variables en la medida DEDE.

En esta tabla podemos observar el efecto que tiene la velocidad en DEDE; El valor ETAsqr de .8306 indica un tamaño de efecto de un 83.06 % sobre la varianza de la medida DEDE, es decir, la velocidad contribuye a un 83.06 % de los cambios en la medida DEDE. EL 15.57 % se debe a los cambios en la saturación de tráfico, y la combinación de Trafico y Velocidad menos de un 1 %. /par

4.3. Experimentos Fase 2

El objetivo de esta fase es simular situaciones en las cuales utilizando únicamente la métrica DEDE podamos identificar y marcar a los nodos de alta movilidad. Y demostrarlo estadísticamente.

Para esta fase se requirió identificar nodos solamente por su DEDE relativa a sus vecinos, identificando a los nodos de mayor velocidad. Cada grupo de simulaciones utiliza un juego de velocidades de referencia. Esto es por el fuerte vínculo entre la velocidad de los nodos relativa a los vecinos.

Cada nodo a identificar se le designo una velocidad constante, por ejemplo, nodo A es estático con movilidad de 0 m/s, nodo B tiene una velocidad de 2 m/s, nodo C tiene 4 m/s y nodo D viaja a 12 m/s. El resto de los nodos (47) sirven de referencia y cada juego de corridas de simulación tiene su velocidad de referencia.

Como se muestra en la tabla 4.2 los nodos de referencia (Nodos R) muestran una diferencia (Dif) de 0 % con respecto a ellos mismos; el promedio de cuatro corridas del nodo A tiene un -10 % de diferencia con respecto al promedio de los nodos de referencia; los nodos B,C, y D tienen una diferencia superior al 100 %. Los nodos identificados, tienen una movilidad mayor que el promedio de los nodos vecinos, y es posible identificar su movilidad en la diferencia de su DEDE; a mayor diferencia en el DEDE, mayor es la diferencia de movilidad comparada con la referencia.

Para evaluar la confiabilidad de las medidas en este grupo de simulaciones, se calculó el Coeficiente de correlación intraclass (CCI). Este coeficiente analiza la varianza en la evaluación de las cuatro simulaciones y determina la constancia en la medición del DEDE. La confiabilidad máxima es un valor de 1.0.

El mismo patrón se encuentra cuando elevamos las velocidades de los nodos de referencia.

Cuadro 4.2: Comparativa DEDE a velocidad de referencia 0 m/s

Nodo	Velocidad	Corr. 1	Corr.2	Corr.3	Corr.4	Promedio	Dif
A	0mps	0.0157	0.0150	0.0106	0.0168	0.0145	-10 %
B	2mps	0.0513	0.0527	0.0447	0.0511	0.0500	209 %
C	4mps	0.0838	0.0953	0.0781	0.0825	0.0849	426 %
D	12mps	0.1897	0.1917	0.1833	0.2014	0.1915	1085 %
R	0mps	0.0166	0.0153	0.0154	0.0172	0.0161	0 %
CCI	0.9950						

Cuadro 4.3: Comparativa DEDE a velocidad de referencia 2 m/s

Nodo	Velocidad	Corr. 1	Corr.2	Corr.3	Corr.4	Promedio	Dif
A	0mps	0.0410	0.0717	0.0758	0.0547	0.0608	1 %
B	2mps	0.0541	0.0564	0.0535	0.0609	0.0562	-7 %
C	4mps	0.0887	0.0770	0.0835	0.0800	0.0823	36 %
D	12mps	0.1847	0.1923	0.1904	0.2074	0.1937	220 %
R	2mps	0.0598	0.0616	0.0594	0.0608	0.0604	0 %
CCI	0.9775						

Y estos los podemos observar en las tablas 4.3 y 4.4, donde los nodos de referencia tienen velocidades de 2 y 4 m/s respectivamente.

En estas tablas es fácil identificar a los nodos con movilidad mayor a la de los nodos de referencia, pero los de menor o igual velocidad no es tan apreciable. Por esto es recomendado solo utilizar esta medida para identificar a nodos con mayor movilidad que el promedio; las características observadas por la métrica son las de nodos con mayor velocidad que los demás, recordando que, al ser nodos limitados de referencias, solo usan como referencia algunos patrones, ayudados de los nodos vecinos que son realmente la referencia.

Cuadro 4.4: Comparativa DEDE a velocidad de referencia 4 m/s

Nodo	Velocidad	Corr. 1	Corr.2	Corr.3	Corr.4	Promedio	Dif
A	0mps	0.0867	0.0817	0.0724	0.0957	0.0841	-19 %
B	2mps	0.0854	0.0857	0.0830	0.0859	0.0850	-18 %
C	4mps	0.1103	0.1003	0.1149	0.0997	0.1063	2 %
D	12mps	0.2043	0.1983	0.2106	0.2149	0.2070	99 %
R	4mps	0.1042	0.1028	0.1030	0.1054	0.1039	0 %
CCI	0.9843						

4.4. Experimentos Fase 3

El objetivo de esta fase es incorporar la métrica DEDE en la lógica de selección de ruta; seleccionando la ruta con menor valor DEDE en un grafo de rutas encontradas.

Para tomar un marco de referencia, se compara los resultados de las simulaciones usando la métrica de la menor cantidad de saltos contra la métrica DEDE. Este protocolo es DSR utilizando linkcache; este protocolo usa también grafos para determinar la menor cantidad de saltos.

El protocolo DSR también cuenta con una variante que utiliza el almacenamiento por ruta; también fue utilizado en la comparación. La opción del protocolo DSR que almacena por rutas encontradas es llamada Pathcache.

El simulador replica los movimientos de cada nodo para cada par de pruebas, es decir, los nodos tienen las mismas rutas y velocidades para cada par de corridas; Solo cambia la lógica de selección de ruta.

Los parámetros de la métrica están descritos en la sección 4.1. El área de trabajo es de 1 km x 1 km. Para proporcionar rutas variadas, se utilizaron 100 nodos; dos de los nodos mantienen comunicación descrita en la sección 4.1.

Los nodos involucrados en la comunicación se encuentran con una separación de 900 metros, forzando a utilizar nodos intermedios con diferentes rutas. Estos nodos en comunicación son fijos, no tienen movilidad alguna, los nodos intermedios son los que proporcionan movilidad y dinamismo a las rutas de comunicación.

En la figura 4.3 se muestra el área de trabajo con los nodos a comunicar (nodo 0 y nodo 1) en sus posiciones fijas, y otros 18 nodos resaltar el rango de transmisión de los dispositivos.

Para mostrar la saturación de los dispositivos en el área de trabajo, la figura 4.4 muestra 100 nodos dentro del área de trabajo, el nodo 0 y el nodo 1 están marcados por un círculo

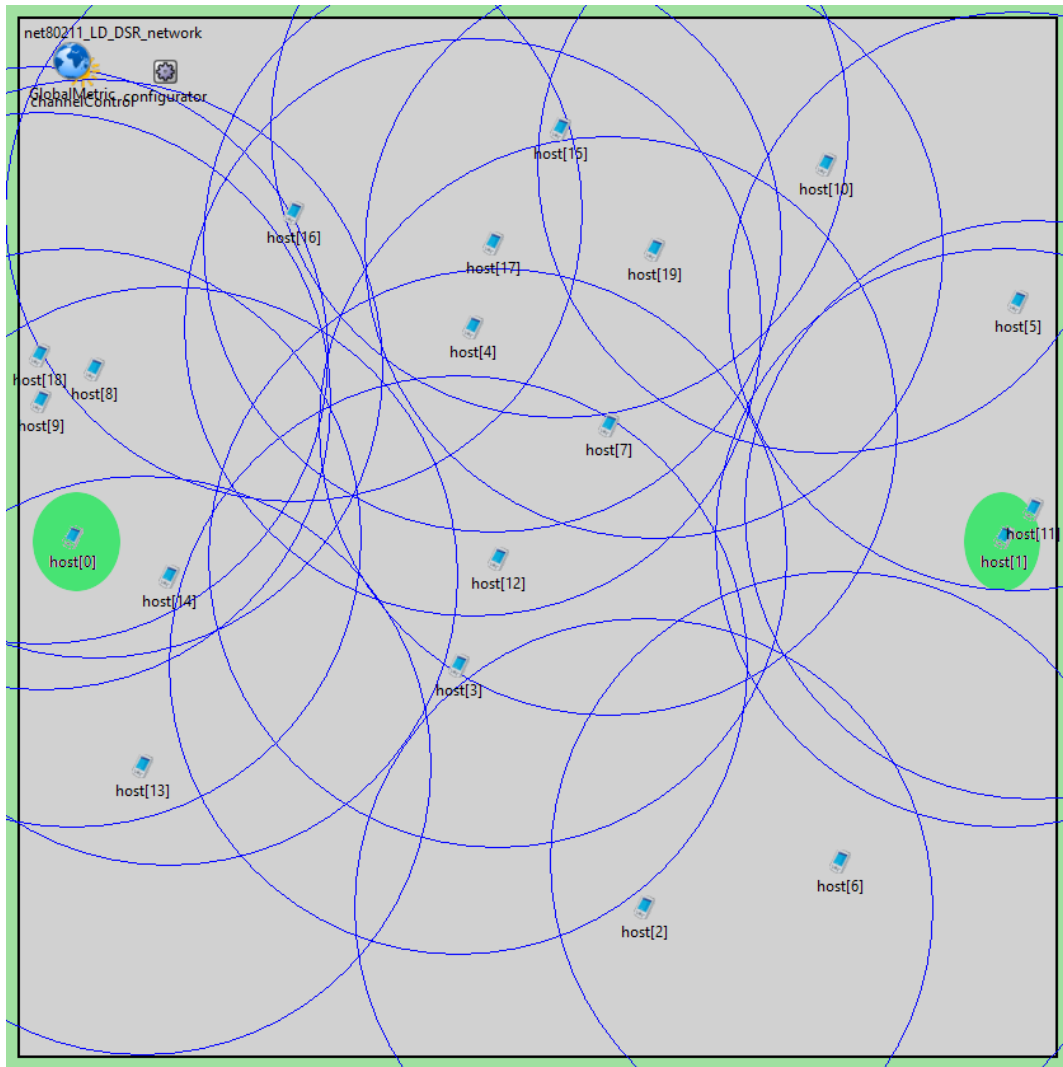


Figura 4.3: Área de trabajo con 20 nodos y el rango de transmisión individual

verde, esa es su ubicación por el tiempo de simulación.

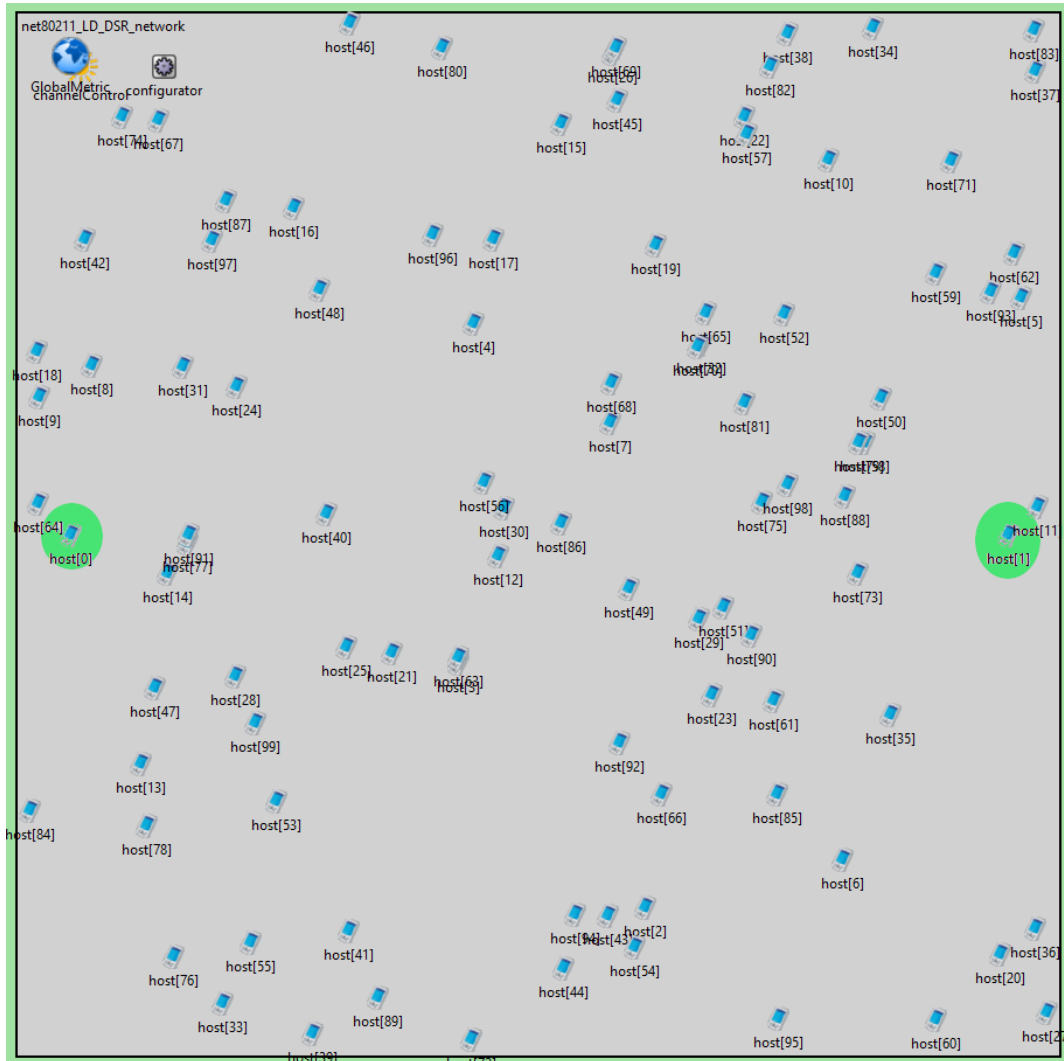


Figura 4.4: Área de trabajo con 100 nodos

El área de trabajo con los 100 nodos, incluyendo su rango de transmisión se muestra en la figura 4.5. Los nodos intermedios cambiarían de ubicación utilizando el modelo de movilidad randomwaypoint.

Para que los nodos tengan una movilidad cercana a una situación real, se implementaron 3 escenarios de velocidades donde se representan los nodos en un área controlada, similar a un parque peatonal o plaza; en estos tipos de sitios, podemos encontrarnos a personas

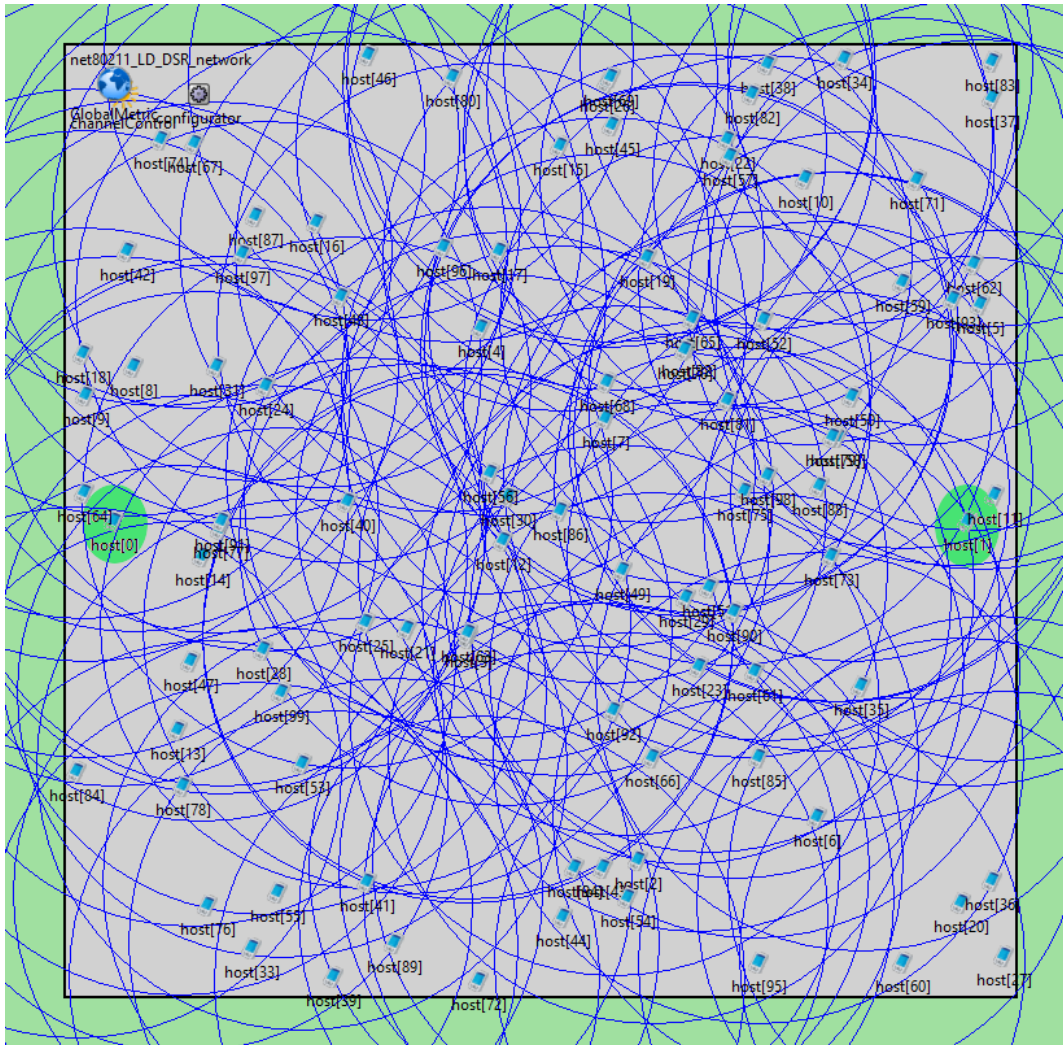


Figura 4.5: Área de trabajo con 100 nodos y la cobertura individual

sentadas en bancas o mesas de juego (movilidad 0 m/s), personas caminando (hasta 1.5 m/s), y personas en caminata o corriendo (de 2 a 3 m/s).

Las velocidades que llevarían los nodos se asignaron usando una distribución normal con medias de 1, 1.5, y 2 m/s, ajustando la desviación estándar para que la velocidad máxima de un nodo no superara los 3 m/s. Obteniendo nodos con movilidad 0 m/s a nodos con una velocidad máxima de 3 m/s.

Al utilizar una distribución normal para distribuir las velocidades a los nodos, el 68 % de los nodos tienen una velocidad entre la media más/menos la desviación estándar. Y el resto de los nodos en velocidades cercanas a 3 m/s o sin movilidad (0 m/s) como se muestra en la figura 4.6.

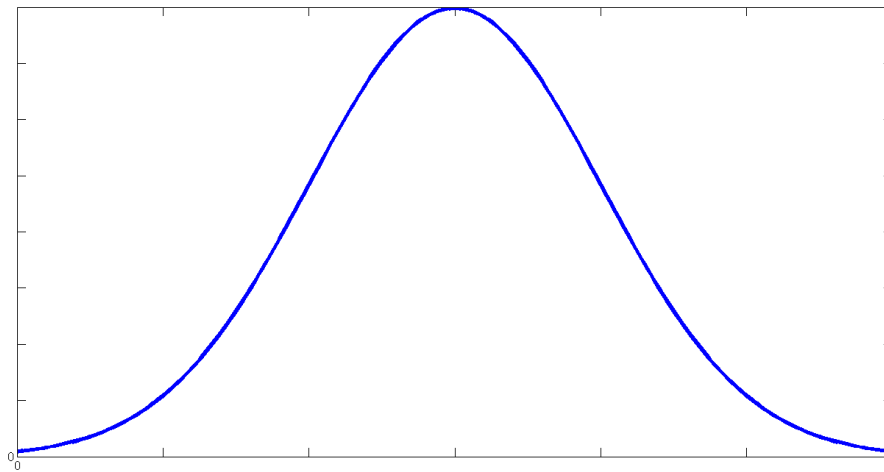


Figura 4.6: Distribución de velocidades en los nodos

Tres velocidades medias son seleccionadas para cada escenario. Escenario 1: la velocidad media es de 1 m/s donde el promedio de nodos tiene una velocidad cercana a la de una persona caminando; Escenario 2: Mayor grupo de personas caminando a una velocidad de 1.5 m/s. y el ultimo escenario es con una media de velocidad de 2 m/s.

En la figura 4.7 se muestra la proporción de nodos con velocidades cercanas a 1 m/s, y

pocos nodos son seleccionados para la velocidad de 3 m/s.

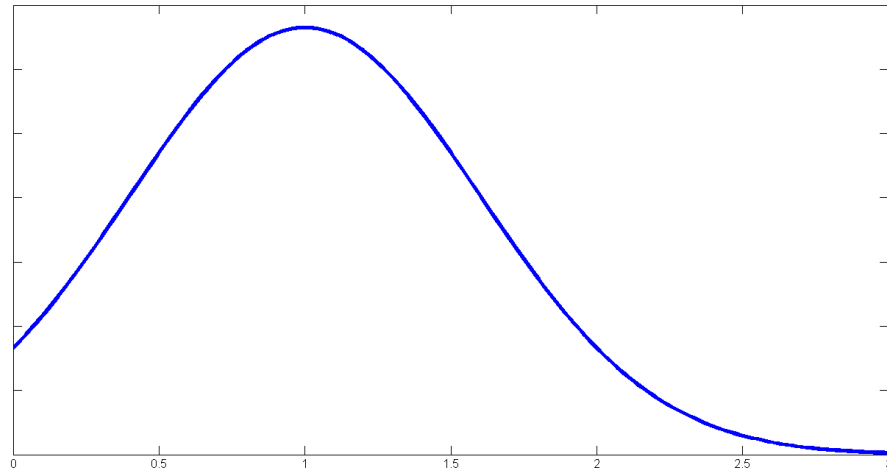


Figura 4.7: Distribución de velocidades con media de 1 m/s

La figura 4.8 representa la distribución de nodos con una media de 1.5 m/s. Se puede observar la misma proporción de nodos cerca del reposo (0 m/s) y de nodos cercanos a la velocidad de 3 m/s. la mayoría de los nodos obtienen una velocidad cerca del promedio (1.5 m/s).

Los nodos tienen libertad de recorrer el área de trabajo, los nodos en este escenario tienen una movilidad mayor a la anterior, haciendo a los nodos más activos, dando mayor posibilidad a la ruptura de enlaces.

De forma más evidente la figura 4.9 muestra una rango de movilidad más elevado con pocos nodos en reposo (0 m/s). este escenario pretende poner a prueba la selección de ruta cuando la movilidad es alta.

Este último escenario pone a prueba que la selección de la ruta que sea formada con los nodos de mayor estabilidad para comunicar, por lo general son los nodos de menor velocidad. Si seleccionamos de las posibles rutas los nodos de menor DEDE, se estaría seleccionando el nodo de mejor posibilidad de conectividad.

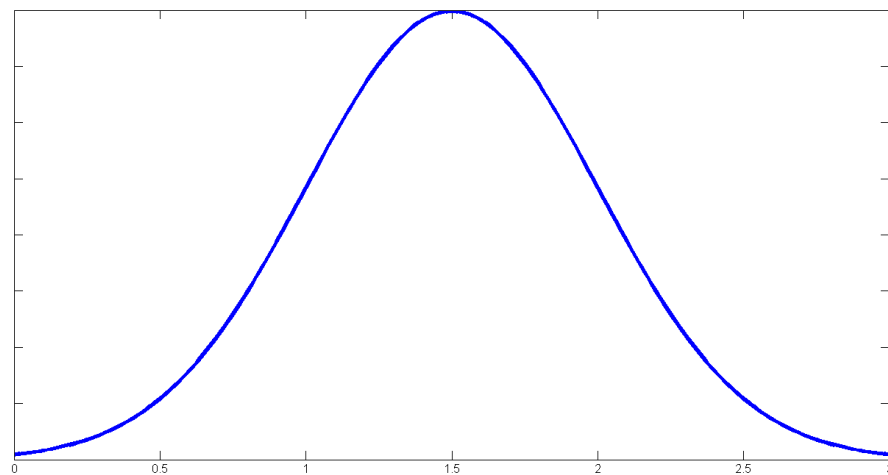


Figura 4.8: Distribución de velocidades con media de 1.5 m/s

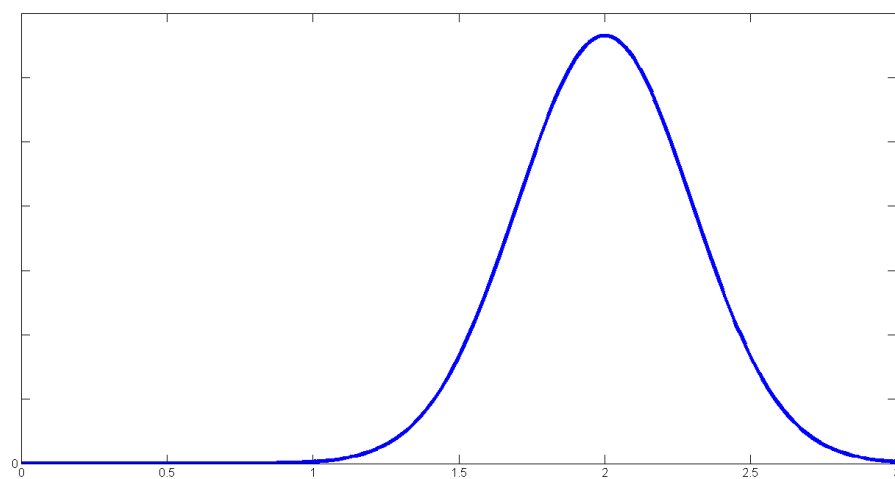


Figura 4.9: Distribución de velocidades con media de 2 m/s

Los modelos de selección de ruta usados fueron PathCache, LinkCache y DEDECache; Cada modelo de selección de ruta se experimentó con los tres escenarios de movilidad. Se corrió simulación 30 veces por cada combinación de modelo de selección y escenario, cambiando la semilla del generador de números aleatorios. En total se realizaron 270 simulaciones para realizar el análisis estadístico correspondiente. Los resultados completos de estos experimentos se pueden encontrar en el apéndice A: “Tablas de resultados de experimento 3”.

La figura 4.10 representa el análisis del primer escenario (velocidad media a 1 m/s) donde se observa la pérdida de paquetes en relación a los paquetes enviados para cada una de las 30 corridas simuladas. De esta grafica se puede resaltar la baja entrega de paquetes del modelo de selección de ruta por PathCache y una cercana similitud de entrega entre LinkCache y DEDECache. La estadística descriptiva de este escenario es la tabla 4.5.

Cuadro 4.5: Resultados de Escenario 1 m/s

Mean 1 m/s	Mean PDR	Variance
DEDECache	75.24 %	3.50 %
LinkCache	67.64 %	5.72 %
PathCache	26.93 %	3.38 %

La entrega promedio en 30 simulaciones es de 75.24 % usando DEDECache obteniendo una varianza de 3.5 %, seguida por un 67.64 % de LinkCache con una varianza de 5.72 %, y por ultimo un 26.93 % y una varianza de 3.38 % de PathCache. La varianza de 3.5 % del modelo DEDECache y el 3.38 % de PathCache muestra una buena estabilidad para los modelos de selección, aun que PathCache es estable en sus resultados, estos son de baja entrega.

Al incrementar la velocidad media a 1.5 m/s obtenemos los resultados de la figura 4.11; el bajo desempeño de PathCache sigue evidente, mientras que las entregas de LinkCache y DEDECache logran obtener una ligera mejora en la entrega de paquetes que con menor velocidad en la media. La estadística descriptiva de este escenario es la tabla 4.6. PathCache sigue con baja varianza pero también muy baja entrega de paquetes, mientras que DEDECache

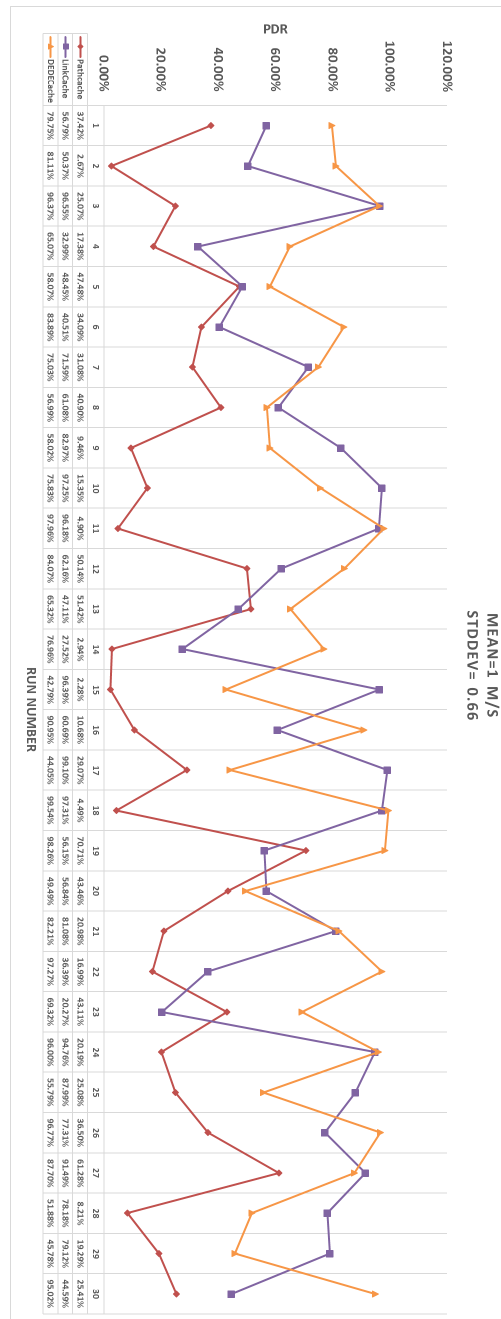


Figura 4.10: Pérdidas en entrega de paquetes de 30 corridas en escenario con media de 1 m/s

tiene mayor estabilidad con una varianza de 3.45 % comparado con el 4.61 % de LinkCache.

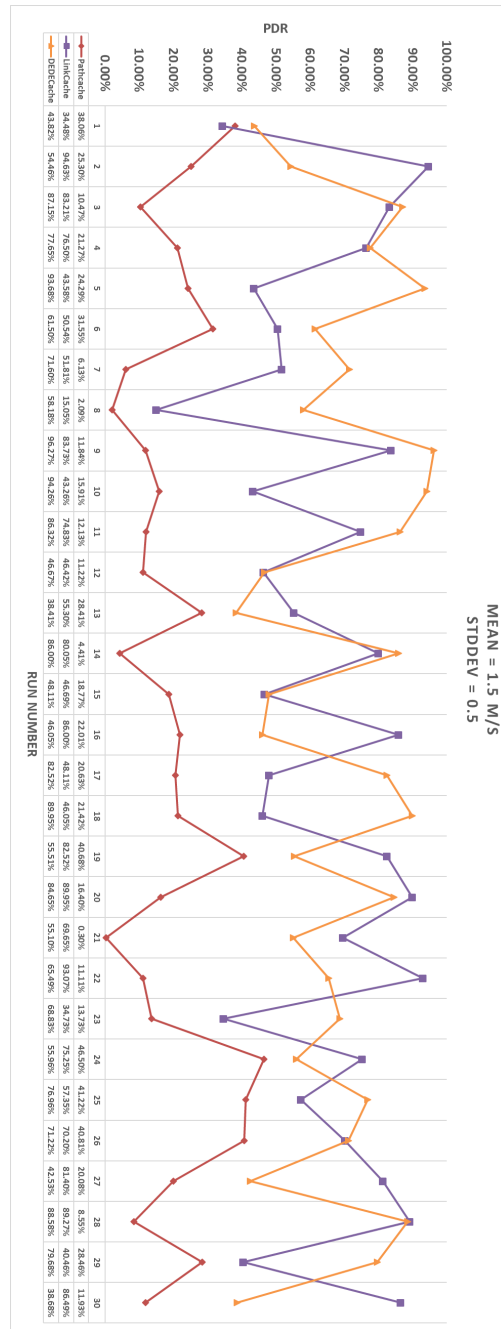


Figura 4.11: Pérdidas en entrega de paquetes de 30 corridas en escenario con media de 1.5 m/s

Incrementando de Nuevo la velocidad media del escenario a 2 m/s el desempeño más bajo en entrega de paquetes es PathCache, y una respuesta favorable en LinkCache y DEDECACHE

Cuadro 4.6: Resultados de Escenario 1.5 m/s

Mean 1.5 m/s	Mean PDR	Variance
LDEDCache	68.19 %	3.45 %
LinkCache	64.35 %	4.61 %
PathCache	20.19 %	1.54 %

como lo muestra la figura 4.12. La estadística descriptiva de este escenario es la tabla 4.7, donde la entrega de paquetes y la varianza son muy similares entre DEDECache y LinkCache.

Cuadro 4.7: Resultados de Escenario 2 m/s

Mean 2 m/s	Mean PDR	Variance
DEDECache	60.15 %	2.68 %
LinkCache	60.18 %	2.85 %
PathCache	17.20 %	1.08 %

Al analizar las estadísticas descriptivas con los resultados de todos los escenarios podremos observar algunos datos interesantes sobre la respuesta de los modelos de selección. En la tabla 4.8 DEDECache tiene una entrega de 67.86 % y una varianza de 3.21 %, LinkCache entrega un 64.06 % con una varianza de 4.39 %, dejando al final a PathCache con una entrega de 21.44 % y la menor varianza de todas, un 2 %. Le mejor entrega pertenece al protocolo DEDECache con mejor estabilidad que LinkCache marcado por la varianza.

Cuadro 4.8: Promedio de resultados de escenarios

	Mean PDR	Variance
DEDECache	67.86 %	3.21 %
LinkCache	64.06 %	4.39 %
PathCache	21.44 %	2.00 %

Los resultados de la fase 1 en la sección 4.2 nos muestran una métrica DEDE reaccionando a las características de movilidad de una red MANET; mientras que en la fase 2 de la sección 4.3 se utiliza esta métrica para identificar a los nodos de mayor movilidad.

Finalmente en la fase 3 en la sección 4.4 se utiliza la identificación de nodos para seleccionar una ruta formada por nodos con menor métrica DEDE y tomar la mejor ruta.

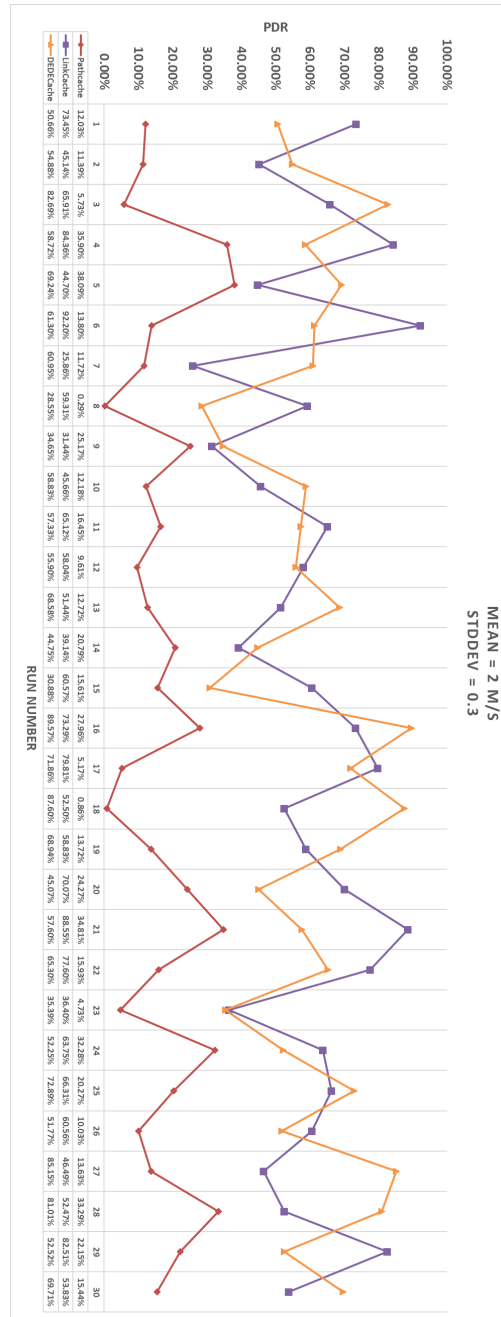


Figura 4.12: Pérdidas en entrega de paquetes de 30 corridas en escenario con media de 2 m/s

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones

Las redes MANETs son dinámicas y por lo general impredecibles; los protocolos de ruteo tradicionales seleccionan las mejores rutas usando métricas basadas en la comunicación de datos, tales como velocidad de enlace o camino más corto. Otro punto de vista para la selección de ruta puede tomar en cuenta la movilidad o alguna manera de predecir el comportamiento del usuario o equipo, y realizarlo con un bajo o nulo impacto sobre los recursos como batería y procesamiento.

La hipótesis de este trabajo propone usar el desorden de desconexión de enlace en los nodos de una ruta para seleccionar el camino con mejor estabilidad para reducir la pérdida de paquetes; al hacerlo de esta manera, se pretende juzgar la estabilidad de un nodo en relación a sus conexiones y la interacción con nodos vecinos.

La movilidad de un nodo puede ser medida por GPS, infrarrojo u otros sensores que podrían indicar solamente su movilidad física, y el costo por el uso de estos sensores puede no obtener el desempeño que compense el uso de estos sensores.

El desorden de entropía de desconexión de enlace puede tomar el efecto que la movilidad ocasiona en la interacción entre nodos, haciendo posible identificar a los nodos de mayor movilidad y tomar mejores decisiones para la selección de ruta. DEDE no expresa una métrica directa de la movilidad, pero refleja la capacidad del nodo para la participación de comunicación como nodo intermedio.

La métrica del desorden de entropía de desconexión de enlace puede presentar una herramienta para seleccionar la ruta con mayor estabilidad en los nodos participantes, pero también es posible para comparar situaciones donde no es difícil encontrar puntos de comparación. Por ejemplo, si un sistema MANET se trabaja con un área de trabajo de 1km x 1km, y presenta un DEDE de 0.02 se podría considerar similar a una MANET con el mismo

DEDE pero que trabaje en un área de 1km x 0.5km puesto que tienen el mismo dinamismo entre nodos.

DEDE requiere poco ancho de banda para los paquetes de control de la métrica, y para realizar el cálculo de la métrica se requiere pocos recursos; Con el bajo uso de recursos para obtener esta métrica es ideal para la implementación en dispositivos de recursos muy limitados.

5.2. Trabajos futuros

La investigación en protocolos de ruteo en redes MANET es extensa y diversa, se han producido protocolos para solucionar desde casos específicos como los del sector de comunicaciones VANET a casos genéricos donde el protocolo puede adaptarse a cualquier aplicación.

La métrica DEDE puede servir para la identificación de nodos no confiables para la comunicación, y puede ser utilizado para medir diferentes elementos en la comunicación de una MANET, es posible implementar mejoras y trabajos futuros derivados de este trabajo.

Tiempos auto ajustables de muestreo: El tiempo de muestreo es un valor fijo en este trabajo, es posible optimizar los tiempos de muestreo ajustándose a la aplicación o características del entorno. En situaciones de poca movilidad es útil un tiempo de muestreo grande, debido a que los cambios son lentos y espaciados en el tiempo, al contrario de un sistema donde la movilidad es más grande, donde se beneficiaría con un tiempo de muestreo corto, obteniendo mejor resolución de en la métrica.

Experimentar con diferentes escenarios y aplicaciones: Las soluciones únicas no existen en las redes MANETs, diversos factores hacen cada caso diferente, no todos los escenarios son iguales y en algunos casos esta solución no podría ser la opción más viable.

Sería útil también analizar el comportamiento de la métrica en comportamientos donde la movilidad tenga distintos patrones, como el de un área comercial, o un concierto.

Los resultados en simulaciones pueden acercarse al comportamiento de un grupo de nodos, pero se eliminan algunas variables que podrían afectar la comunicación, es por eso que la experimentación en una plataforma de prueba es recomendada.

Bibliografía

- [1] M. Gerla, “From battlefields to urban grids: New research challenges in ad hoc wireless networks,” *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 1, pp. 77–93, Mar. 2005.
- [2] P. Goyal and V. Parmar, “MANET: Vulnerabilities, Challenges, Attacks, Application,” *International Journal of Computational Engineering & Management*, vol. 11, no. January, pp. 32–37, 2011.
- [3] J. Kumar, M. Kulkarni, and D. Gupta, “Performance Comparison of MANET Routing Protocols,” *international Review on Computer Software*, vol. 5, no. 1, 2010.
- [4] a. Ariza-Quintana, E. Casilari, and A. Triviño Cabrera, “Implementation of MANET routing protocols on OMNeT++,” in *Proceedings of the First International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications Networks and Systems*, pp. 5–8, ICST, 2008.
- [5] D. Djenouri and A. Derhab, “Ad hoc networks routing protocols and mobility,” *Int. Arab J. Inf. Technol*, vol. 3, no. 2, pp. 126–133, 2006.
- [6] F. Gfeller and U. Bapst, “Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, pp. 1474–1486, Nov 1979.
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Part 15.1: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area net-*

- works (WPA N s)*, vol. 2005. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.1-2005.pdf>, 2005.
- [8] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, vol. 2006. 2006.
- [9] J. Hoebeke and I. Moerman, “An overview of mobile ad hoc networks: Applications and challenges,” . . . *Communications Network*, pp. 60–66, 2004.
- [10] E. Alotaibi and B. Mukherjee, “A survey on routing algorithms for wireless Ad-Hoc and mesh networks,” *Computer Networks*, vol. 56, no. 2, pp. 940–965, 2012.
- [11] S. Taneja and A. Kush, “A Survey of routing protocols in mobile ad hoc networks,” *International Journal of Innovation, Management and Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 248–2010, 2010.
- [12] A. Boukerche, B. Turgut, N. Aydin, M. Z. Ahmad, L. Bölöni, and D. Turgut, “Routing protocols in ad hoc networks: A survey,” *Computer Networks*, vol. 55, no. 13, pp. 3032–3080, 2011.
- [13]
- [14] A. Hinds, M. Ngulube, S. Zhu, and H. Al-Aqrabi, “A Review of Routing Protocols for Mobile Ad-Hoc NETworks (MANET),” *International Journal of Information and Education Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 1–5, 2013.
- [15] C.-h. Liu and S.-S. Chang, “The study of effectiveness for ad-hoc wireless network,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Interaction Sciences Information Technology, Culture and Human - ICIS '09*, (New York, New York, USA), pp. 412–417, ACM Press, 2009.

- [16] C. E. Perkins and P. Bhagwat, “Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers,” in *Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications - SIGCOMM '94*, (New York, New York, USA), pp. 234–244, ACM Press, 1994.
- [17] S. Murthy and J. J. Garcia-Luna-Aceves, “An efficient routing protocol for wireless networks,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 1, pp. 183–197, June 1996.
- [18] P. Jacquet, P. Muhlethaler, T. Clausen, a. Laouiti, a. Qayyum, and L. Viennot, “Optimized link state routing protocol for ad hoc networks,” *Ieee Inmic 2001: Ieee International Multi Topic Conference 2001, Proceedings: Technology for the 21St Century*, pp. 62–68, 2001.
- [19] H. A. Amri, M. Abolhasan, and T. Wysocki, “Scalability of MANET routing protocols for heterogeneous and homogenous networks,” *Computers and Electrical Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 752–765, 2010.
- [20] C. E. Perkins, M. Park, and E. M. Royer, “Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing,” In *Proceedings of Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA), 1999*, pp. 90–100, 1999.
- [21] D. Johnson, D. Maltz, J. Broch, and Others, “DSR: the Dynamic Source Routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks,” *Ad-hoc Networking*, vol. 5, pp. 139–72, 2001.
- [22] M. Corson and a. Ephremides, “A distributed routing algorithm for mobile wireless networks,” *Wireless Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 61–81, 1995.
- [23] V. D. Park and M. S. Corson, “A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks,” *Proceedings of the 16th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 3, pp. 1405–1413, 1997.

- [24] M. Sree Ranga Raju and J. Mungara, “Enhanced ZRP Protocol for Mobile Ad-hoc Networks,” *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, vol. 3, no. 4, pp. 160–173, 2011.
- [25] M. Joa-Ng, “A peer-to-peer zone-based two-level link state routing for mobile ad hoc networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 8, pp. 1415–1425, 1999.
- [26] C. Hieu and C. Hong, “A connection entropy-based multi-rate routing protocol for mobile ad hoc networks,” *Journal of Computing Science and Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 225–239, 2010.
- [27] S. Naimi and A. Busson, “Anticipation of ETX Metric to manage Mobility in Ad Hoc Wireless Networks,” in *Ad Hoc Now* (S. Guo, J. Lloret, P. Manzoni, and S. Ruehrup, eds.), vol. 8487 of *Lecture Notes in Computer Science*, (Benidorm, Spain), pp. 29–42, Springer International Publishing, 2014.
- [28] D. S. J. D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, “a High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing,” *Wireless Networks*, vol. 11, pp. 419–434, July 2005.
- [29] X. Ni, K.-c. Lan, and R. Malaney, “On the performance of expected transmission count (ETX) for wireless mesh networks,” in *Proceedings of the 3rd International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools*, ICST, 2008.
- [30] S. Chen, H. Jones, and D. Jayalath, “Effective link operation duration: a new routing metric for mobile ad hoc networks,” 2007.
- [31] C. Yawut, B. Paillassa, and R. Dhaou, “Mobility Metrics Evaluation for Self-Adaptive Protocols,” *Journal of Networks*, vol. 3, pp. 53–64, Jan. 2008.

-
- [32] J. Abdullah and D. J. Parish, “Node connectivity index as mobility metric for GA based QoS routing in MANET,” *Proceedings of the 4th international conference on mobile technology, applications, and systems and the 1st international symposium on Computer human interaction in mobile technology - Mobility '07*, p. 104, 2007.
- [33] E. B. Starikov, “Many faces of entropy or Bayesian statistical mechanics.,” *Chemphys-chem : a European journal of chemical physics and physical chemistry*, vol. 11, pp. 3387–94, Nov. 2010.
- [34] M. Dehmer, S. Borgert, and F. Emmert-Streib, “Entropy bounds for hierarchical molecular networks.,” *PloS one*, vol. 3, p. e3079, Jan. 2008.
- [35] M. Dehmer, A. Mowshowitz, and F. Emmert-Streib, “Connections between classical and parametric network entropies.,” *PloS one*, vol. 6, p. e15733, Jan. 2011.
- [36] S.-M. Qin, H. Verkasalo, M. Mohtaschemi, T. Hartonen, and M. Alava, “Patterns, entropy, and predictability of human mobility and life,” *PloS one*, vol. 7, pp. 1–19, Nov. 2012.
- [37] K. Zhao, M. Karsai, and G. Bianconi, “Entropy of dynamical social networks.,” *PloS one*, vol. 6, p. e28116, Jan. 2011.
- [38] M. Kadota, E. J. White, S. Torisawa, K. Komeyama, and T. Takagi, “Employing relative entropy techniques for assessing modifications in animal behavior.,” *PloS one*, vol. 6, p. e28241, Jan. 2011.
- [39] F. Abdul Razak and H. J. Jensen, “Quantifying ‘causality’ in complex systems: understanding transfer entropy.,” *PloS one*, vol. 9, p. e99462, Jan. 2014.
- [40] L. Sivakumar and M. Dehmer, “Towards information inequalities for generalized graph entropies.,” *PloS one*, vol. 7, p. e38159, Jan. 2012.

- [41] M. a. Montemurro and D. H. Zanette, “Universal entropy of word ordering across linguistic families,” *PloS one*, vol. 6, p. e19875, Jan. 2011.
- [42] M. a. Ré and R. K. Azad, “Generalization of entropy based divergence measures for symbolic sequence analysis,” *PloS one*, vol. 9, p. e93532, Jan. 2014.
- [43] H. V. Ribeiro, L. Zunino, E. K. Lenzi, P. a. Santoro, and R. S. Mendes, “Complexity-entropy causality plane as a complexity measure for two-dimensional patterns,” *PloS one*, vol. 7, p. e40689, Jan. 2012.
- [44] B. An and S. Papavassiliou, “An entropy-based model for supporting and evaluating route stability in mobile ad hoc wireless networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. 6, pp. 328–330, Aug. 2002.
- [45] F. Yang and B. Sun, “Ad hoc on-demand distance vector multipath routing protocol with path selection entropy,” in *2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, pp. 4715–4718, IEEE, Apr. 2011.
- [46] T. Kunz, “Mobility Metrics to Enable Adaptive Routing in MANET,” in *IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2006. (WiMob’2006)*, pp. 1–8, IEEE, 2006.
- [47] P. Landsberg, “Can entropy and “order” increase together?,” *Physics Letters A*, vol. 102, no. 4, pp. 171–173, 1984.
- [48] J. Shiner, M. Davison, and P. Landsberg, “Simple measure for complexity,” *Physical Review E*, vol. 59, pp. 1459–1464, Feb. 1999.
- [49] G. B. Brandani, M. Schor, C. E. Macphee, H. Grubmüller, U. Zachariae, and D. Marenduzzo, “Quantifying disorder through conditional entropy: an application to fluid mixing,” *PloS one*, vol. 8, p. e65617, Jan. 2013.

- [50] P. Landsberg, “Is equilibrium always an entropy maximum?,” *Journal of statistical physics*, vol. v, no. April 1983, pp. 159–169, 1984.
- [51] C. E. Shannon, “A mathematical theory of communication,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. July 1928, pp. 379–423, 1948.
- [52] J. Moy, “Routing in Communications Networks,” in *Routing in Communications Networks*, ch. Link-State, pp. 135–157, New Jersey: Prentice- Hall, 1995.
- [53] G. S. Malkin and M. E. Steenstrup, “Distance-Vector Routing,” in *Routing in Communications Networks*, ch. Distance-V, pp. 83–98, New Jersey: Prentice- Hall, 1995.
- [54] J. Moy, “OSPF Version 2,” 1998.
- [55] D. B. Johnson, “Routing in Ad Hoc Networks of Mobile Hosts,” *Proceedings of the IEEE workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp. 158–163, 1995.
- [56] D. B. West, *Introduction to Graph Theory*. New Jersey: Prentice- Hall, 2nd ed., 2001.
- [57] G. Holland and N. Vaidya, “Analysis of TCP performance over mobile ad hoc networks,” *Wireless Networks*, vol. 8, pp. 275–288, 2002.
- [58] D. S. J. D. Couto, D. Aguayo, B. a. Chambers, and R. Morris, “Performance of multihop wireless networks: shortest path is not enough,” *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 33, no. 1, pp. 83–88, 2003.
- [59] B. Kadri, M. Feham, and A. M’Hamed, “Weight based DSR for Mobile Ad Hoc Networks,” in *2008 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications*, pp. 1–6, IEEE, Apr. 2008.
- [60] M. Ramadhan and M. Davis, “A Bandwidth Aware Modification to the DSR Routing Protocol for Wireless Mesh Networks,” 2009.

-
- [61] Y.-C. Hu and D. B. Johnson, “Caching strategies in on-demand routing protocols for wireless ad hoc networks,” *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking - MobiCom '00*, pp. 231–242, 2000.
- [62] W. Lou and Y. Fang, “Predictive Caching Strategy For On-demand Routing Protocols In Wireless Ad Hoc Networks,” *Winet*, vol. 8, no. 6, pp. 671–679, 2002.

Apéndice A

Tablas de resultados de experimento 3

Cuadro A.1: Tabla PathCache con Media 1 m/s y de desviación estándar de 0.66 m/s

Run#	Sent	Recvd	PDR	P. Loss
1	5920	2215	37.42 %	62.58 %
2	5920	158	2.67 %	97.33 %
3	5920	1484	25.07 %	74.93 %
4	5920	1029	17.38 %	82.62 %
5	5920	2811	47.48 %	52.52 %
6	5920	2018	34.09 %	65.91 %
7	5920	1840	31.08 %	68.92 %
8	5920	2421	40.90 %	59.10 %
9	5920	560	9.46 %	90.54 %
10	5920	909	15.35 %	84.65 %
11	5920	290	4.90 %	95.10 %
12	5920	2968	50.14 %	49.86 %
13	5920	3044	51.42 %	48.58 %
14	5920	174	2.94 %	97.06 %
15	5920	135	2.28 %	97.72 %
16	5920	632	10.68 %	89.32 %
17	5920	1721	29.07 %	70.93 %
18	5920	266	4.49 %	95.51 %
19	5920	4186	70.71 %	29.29 %
20	5920	2573	43.46 %	56.54 %
21	5920	1242	20.98 %	79.02 %
22	5920	1006	16.99 %	83.01 %
23	5920	2552	43.11 %	56.89 %
24	5920	1195	20.19 %	79.81 %
25	5920	1485	25.08 %	74.92 %
26	5920	2161	36.50 %	63.50 %
27	5920	3628	61.28 %	38.72 %
28	5920	486	8.21 %	91.79 %
29	5920	1142	19.29 %	80.71 %
30	5920	1504	25.41 %	74.59 %

Cuadro A.2: Tabla LinkCache con Media 1 m/s y de desviación estándar de 0.66 m/s

Run#	P. Sent	P. Recvd	PDR	P. Loss
1	5920	3362	56.79 %	43.21 %
2	5920	2982	50.37 %	49.63 %
3	5920	5716	96.55 %	3.45 %
4	5920	1953	32.99 %	67.01 %
5	5920	2868	48.45 %	51.55 %
6	5920	2398	40.51 %	59.49 %
7	5920	4238	71.59 %	28.41 %
8	5920	3616	61.08 %	38.92 %
9	5920	4912	82.97 %	17.03 %
10	5920	5757	97.25 %	2.75 %
11	5920	5694	96.18 %	3.82 %
12	5920	3680	62.16 %	37.84 %
13	5920	2789	47.11 %	52.89 %
14	5920	1629	27.52 %	72.48 %
15	5920	5706	96.39 %	3.61 %
16	5920	3593	60.69 %	39.31 %
17	5920	5867	99.10 %	0.90 %
18	5920	5761	97.31 %	2.69 %
19	5920	3324	56.15 %	43.85 %
20	5920	3365	56.84 %	43.16 %
21	5920	4800	81.08 %	18.92 %
22	5920	2154	36.39 %	63.61 %
23	5920	1200	20.27 %	79.73 %
24	5920	5610	94.76 %	5.24 %
25	5920	5209	87.99 %	12.01 %
26	5920	4577	77.31 %	22.69 %
27	5920	5416	91.49 %	8.51 %
28	5920	4628	78.18 %	21.82 %
29	5920	4684	79.12 %	20.88 %
30	5920	2640	44.59 %	55.41 %

Cuadro A.3: Tabla DEDECACHE con Media 1 m/s y de desviación estándar de 0.66 m/s

Run#	P. Sent	P. Recvd	PDR	P. Loss
1	5920	4721	79.75 %	20 %
2	5920	4802	81.11 %	19 %
3	5920	5705	96.37 %	4 %
4	5920	3852	65.07 %	35 %
5	5920	3438	58.07 %	42 %
6	5920	4966	83.89 %	16 %
7	5920	4442	75.03 %	25 %
8	5920	3374	56.99 %	43 %
9	5920	3435	58.02 %	42 %
10	5920	4489	75.83 %	24 %
11	5920	5799	97.96 %	2 %
12	5920	4977	84.07 %	16 %
13	5920	3867	65.32 %	35 %
14	5920	4556	76.96 %	23 %
15	5920	2533	42.79 %	57 %
16	5920	5384	90.95 %	9 %
17	5920	2608	44.05 %	56 %
18	5920	5893	99.54 %	0 %
19	5920	5817	98.26 %	2 %
20	5920	2930	49.49 %	51 %
21	5920	4867	82.21 %	18 %
22	4653	4526	97.27 %	3 %
23	5920	4104	69.32 %	31 %
24	5920	5683	96.00 %	4 %
25	5920	3303	55.79 %	44 %
26	5920	5729	96.77 %	3 %
27	5920	5192	87.70 %	12 %
28	5920	3071	51.88 %	48 %
29	5920	2710	45.78 %	54 %
30	5920	5625	95.02 %	5 %

Cuadro A.4: Tabla PathCache con Media 1.5 m/s y de desviación estándar de 0.5 m/s

Run#	P. Sent	P. Recvd	PDR	P. Loss
1	5920	2253	38.06 %	61.94 %
2	5920	1498	25.30 %	74.70 %
3	5920	620	10.47 %	89.53 %
4	5920	1259	21.27 %	78.73 %
5	5920	1438	24.29 %	75.71 %
6	5920	1868	31.55 %	68.45 %
7	5920	363	6.13 %	93.87 %
8	5920	124	2.09 %	97.91 %
9	5920	701	11.84 %	88.16 %
10	5920	942	15.91 %	84.09 %
11	5920	718	12.13 %	87.87 %
12	5920	664	11.22 %	88.78 %
13	5920	1682	28.41 %	71.59 %
14	5920	261	4.41 %	95.59 %
15	5920	1111	18.77 %	81.23 %
16	5920	1303	22.01 %	77.99 %
17	5920	1221	20.63 %	79.38 %
18	5920	1268	21.42 %	78.58 %
19	5920	2408	40.68 %	59.32 %
20	5920	971	16.40 %	83.60 %
21	5920	18	0.30 %	99.70 %
22	5920	658	11.11 %	88.89 %
23	5920	813	13.73 %	86.27 %
24	5920	2753	46.50 %	53.50 %
25	5920	2440	41.22 %	58.78 %
26	5920	2416	40.81 %	59.19 %
27	5920	1189	20.08 %	79.92 %
28	5920	506	8.55 %	91.45 %
29	5920	1685	28.46 %	71.54 %
30	5920	706	11.93 %	88.07 %

Cuadro A.5: Tabla LinkCache con Media 1.5 m/s y de desviación estándar de 0.5 m/s

Run#	P. Sent	P. Recvd	PDR	P. Loss
1	5920	2041	34.48 %	65.52 %
2	5920	5602	94.63 %	5.37 %
3	5920	4926	83.21 %	16.79 %
4	5920	4529	76.50 %	23.50 %
5	5920	2580	43.58 %	56.42 %
6	5920	2992	50.54 %	49.46 %
7	5920	3067	51.81 %	48.19 %
8	5920	891	15.05 %	84.95 %
9	5920	4957	83.73 %	16.27 %
10	5920	2561	43.26 %	56.74 %
11	5920	4430	74.83 %	25.17 %
12	5920	2748	46.42 %	53.58 %
13	5920	3274	55.30 %	44.70 %
14	5920	4739	80.05 %	19.95 %
15	5920	2764	46.69 %	53.31 %
16	5920	5091	86.00 %	14.00 %
17	5920	2848	48.11 %	51.89 %
18	5920	2726	46.05 %	53.95 %
19	5920	4885	82.52 %	17.48 %
20	5920	5325	89.95 %	10.05 %
21	5920	4123	69.65 %	30.35 %
22	5920	5510	93.07 %	6.93 %
23	5920	2056	34.73 %	65.27 %
24	5920	4455	75.25 %	24.75 %
25	5920	3395	57.35 %	42.65 %
26	5920	4156	70.20 %	29.80 %
27	5920	4819	81.40 %	18.60 %
28	5920	5285	89.27 %	10.73 %
29	5920	2395	40.46 %	59.54 %
30	5920	5120	86.49 %	13.51 %

Cuadro A.6: Tabla DEDECACHE con Media 1.5 m/s y de desviación estándar de 0.5 m/s

Run#	P. Sent	P. Recvd	PDR	P. Loss
1	5920	2594	43.82 %	56.18 %
2	5920	3224	54.46 %	45.54 %
3	5920	5159	87.15 %	12.85 %
4	5920	4597	77.65 %	22.35 %
5	5920	5546	93.68 %	6.32 %
6	5920	3641	61.50 %	38.50 %
7	5920	4239	71.60 %	28.40 %
8	5920	3444	58.18 %	41.82 %
9	5920	5699	96.27 %	3.73 %
10	5920	5580	94.26 %	5.74 %
11	5920	5110	86.32 %	13.68 %
12	5920	2763	46.67 %	53.33 %
13	5920	2274	38.41 %	61.59 %
14	5920	5091	86.00 %	14.00 %
15	5920	2848	48.11 %	51.89 %
16	5920	2726	46.05 %	53.95 %
17	5920	4885	82.52 %	17.48 %
18	5920	5325	89.95 %	10.05 %
19	5920	3286	55.51 %	44.49 %
20	5920	5011	84.65 %	15.35 %
21	5920	3262	55.10 %	44.90 %
22	5920	3877	65.49 %	34.51 %
23	5920	4075	68.83 %	31.17 %
24	5920	3313	55.96 %	44.04 %
25	5920	4556	76.96 %	23.04 %
26	5920	4216	71.22 %	28.78 %
27	5920	2518	42.53 %	57.47 %
28	5920	5244	88.58 %	11.42 %
29	5920	4717	79.68 %	20.32 %
30	5920	2290	38.68 %	61.32 %

Cuadro A.7: Tabla PathCache con Media 2 m/s y de desviación estándar de 0.3 m/s

Run#	P. Sent	P. Recvd	PDR	P. Loss
1	5920	712	12.03 %	87.97 %
2	5920	674	11.39 %	88.61 %
3	5920	339	5.73 %	94.27 %
4	5920	2125	35.90 %	64.10 %
5	5920	2255	38.09 %	61.91 %
6	5920	817	13.80 %	86.20 %
7	5920	694	11.72 %	88.28 %
8	5920	17	0.29 %	99.71 %
9	5920	1490	25.17 %	74.83 %
10	5920	721	12.18 %	87.82 %
11	5920	974	16.45 %	83.55 %
12	5920	569	9.61 %	90.39 %
13	5920	753	12.72 %	87.28 %
14	5920	1231	20.79 %	79.21 %
15	5920	924	15.61 %	84.39 %
16	5920	1655	27.96 %	72.04 %
17	5920	306	5.17 %	94.83 %
18	5920	51	0.86 %	99.14 %
19	5920	812	13.72 %	86.28 %
20	5920	1437	24.27 %	75.73 %
21	5920	2061	34.81 %	65.19 %
22	5920	943	15.93 %	84.07 %
23	5920	280	4.73 %	95.27 %
24	5920	1911	32.28 %	67.72 %
25	5920	1200	20.27 %	79.73 %
26	5920	594	10.03 %	89.97 %
27	5920	807	13.63 %	86.37 %
28	5920	1971	33.29 %	66.71 %
29	5920	1311	22.15 %	77.85 %
30	5920	914	15.44 %	84.56 %

Cuadro A.8: Tabla LinkCache con Media 2 m/s y de desviación estándar de 0.3 m/s

Run#	P. Sent	P. Recvd	PDR	P. Loss
1	5920	4348	73.45 %	26.55 %
2	5920	2672	45.14 %	54.86 %
3	5920	3902	65.91 %	34.09 %
4	5920	4994	84.36 %	15.64 %
5	5920	2646	44.70 %	55.30 %
6	5920	5458	92.20 %	7.80 %
7	5920	1531	25.86 %	74.14 %
8	5920	3511	59.31 %	40.69 %
9	5920	1861	31.44 %	68.56 %
10	5920	2703	45.66 %	54.34 %
11	5921	3856	65.12 %	34.88 %
12	5920	3436	58.04 %	41.96 %
13	5920	3045	51.44 %	48.56 %
14	5920	2317	39.14 %	60.86 %
15	5920	3586	60.57 %	39.43 %
16	5920	4339	73.29 %	26.71 %
17	5920	4725	79.81 %	20.19 %
18	5920	3108	52.50 %	47.50 %
19	5920	3483	58.83 %	41.17 %
20	5920	4148	70.07 %	29.93 %
21	5920	5242	88.55 %	11.45 %
22	5920	4594	77.60 %	22.40 %
23	5920	2155	36.40 %	63.60 %
24	5920	3774	63.75 %	36.25 %
25	5269	3494	66.31 %	33.69 %
26	4718	2857	60.56 %	39.44 %
27	5920	2752	46.49 %	53.51 %
28	5920	3106	52.47 %	47.53 %
29	2007	1656	82.51 %	17.49 %
30	3860	2078	53.83 %	46.17 %

Cuadro A.9: Tabla DEDECACHE con Media 2 m/s y de desviación estándar de 0.3 m/s

Run#	P. Sent	P. Recvd	PDR	P. Loss
1	5920	2999	50.66 %	49.34 %
2	5920	3249	54.88 %	45.12 %
3	5920	4895	82.69 %	17.31 %
4	5920	3476	58.72 %	41.28 %
5	5920	4099	69.24 %	30.76 %
6	5920	3629	61.30 %	38.70 %
7	5920	3608	60.95 %	39.05 %
8	5920	1690	28.55 %	71.45 %
9	5920	2051	34.65 %	65.35 %
10	2468	1452	58.83 %	41.17 %
11	5920	3394	57.33 %	42.67 %
12	5920	3309	55.90 %	44.10 %
13	5920	4060	68.58 %	31.42 %
14	5920	2649	44.75 %	55.25 %
15	5920	1828	30.88 %	69.12 %
16	3882	3477	89.57 %	10.43 %
17	5380	3866	71.86 %	28.14 %
18	5920	5186	87.60 %	12.40 %
19	5920	4081	68.94 %	31.06 %
20	5920	2668	45.07 %	54.93 %
21	5920	3410	57.60 %	42.40 %
22	5920	3866	65.30 %	34.70 %
23	5920	2095	35.39 %	64.61 %
24	5920	3093	52.25 %	47.75 %
25	5920	4315	72.89 %	27.11 %
26	5920	3065	51.77 %	48.23 %
27	5920	5041	85.15 %	14.85 %
28	5920	4796	81.01 %	18.99 %
29	5920	3109	52.52 %	47.48 %
30	5920	4127	69.71 %	30.29 %

Apéndice B

Configuracion Omnet++ para fase 3

```
[General]
# Configuracion de fase 3
# Actualizacion 2 de Oct 2015
#debug-on-errors = true
sim-time-limit = 300s
#seed-0-mt = 3

network = inet.examples.manetrouting.net80211_LD_DSR.net80211_LD_DSR_network
**.udpApp[*].vector-recording = true
**.udpApp[*].scalar-recording = true
**.wlan[*]**.vector-recording = false
**.wlan[*]**.scalar-recording = false

cmdenv-express-mode = true
```

```
tkenv-plugin-path = ../../../../etc/plugins
```

```
description = "Link Disorder DSR test"
```

```
**.routingProtocol="DSRUU"
```

```
**.batteryType = "InetSimpleBattery"
```

```
**.usage_radio_idle = 1.38mA #[mA]
```

```
**.usage_radio_recv = 9.6mA #[mA]
```

```
**.usage_radio_sleep = 0.06mA #[mA]
```

```
**.usage_radio_send = 9.6mA #[mA]
```

```
**.battery.nominal = 50
```

```
**.battery.capacity = 50
```

```
**.battery.voltage = 18
```

```
**.battery.resolution = 1s
```

```
**.battery.publishDelta = 0.5
```

```
**.battery.publishTime = 20s
```

```
**.drawCoverage=true
```

```
**.constraintAreaMinX = 0m
```

```
**.constraintAreaMinY = 0m
```

```
**.constraintAreaMinZ = 0m
```

```
**.constraintAreaMaxX = 1000m
```

```
**.constraintAreaMaxY = 1000m
```

```
**.constraintAreaMaxZ = 0m
```

```
*.numFixHosts = 0

**.host[*].numUdpApps = 3

**.arp.globalARP = true

##### mobility
**.mobility.initFromDisplayString = false
#**.fixhost[0].mobility.initialX = 10m
#**.fixhost[0].mobility.initialY = 10m

**.host[0].mobility.initialX = 50m
**.host[0].mobility.initialY = 500m
**.host[0].mobilityType = "StationaryMobility"

**.host[1].mobility.initialX = 950m
**.host[1].mobility.initialY = 500m
**.host[1].mobilityType = "StationaryMobility"

#**.host*.mobilityType = "StationaryMobility"
**.mobilityType = "RandomWPMobility"

#**.rogueHosts*.mobility.speed = 10mps
**.mobility.waitTime = 0#uniform(.5s,1s)
```

```
***.SensitivityTable = xmlDoc("sensitivityTable")
```

```
# udp apps (on)
```

```
**.host[*].udpApp[0].typename = "UDPBasicBurst"
```

```
**.host[0].udpApp[0].destAddresses = "host[1]"
```

```
***.host[1].udpApp[0].destAddresses= "host[28]"
```

```
***.host[2].udpApp[0].destAddresses= "host[27]"
```

```
***.host[3].udpApp[0].destAddresses= "host[26]"
```

```
***.host[4].udpApp[0].destAddresses= "host[25]"
```

```
***.host[5].udpApp[0].destAddresses= "host[24]"
```

```
***.host[6].udpApp[0].destAddresses= "host[23]"
```

```
***.host[7].udpApp[0].destAddresses= "host[22]"
```

```
***.host[8].udpApp[0].destAddresses= "host[21]"
```

```
***.host[9].udpApp[0].destAddresses= "host[20]"
```

```
**.host[*].udpApp[0].destAddresses = ""
```

```
**.udpApp[0].localPort = 1234
```

```
**.udpApp[0].destPort = 1234
```

```
**.udpApp[0].messageLength = 512B #
```

```
**.udpApp[0].sendInterval = 0.05s + uniform(-0.001s,0.001s) # 0.002s 500 p/s
```

```
0.1s 10 p/s 0.005s 200p/s
```

```
**.udpApp[0].burstDuration = 0
```

```
**.udpApp[0].chooseDestAddrMode = "perBurst"
```

```
**.udpApp[0].sleepDuration = 0s
```

```
**.udpApp[0].startTime = 4s
***.udpApp[0].delayLimit = 1s
**.udpApp[0].destAddrRNG = 0

***.host[*].udpApp[3].typename = "UDPSink"
##**.fixhost[*].numUdpApps = 1
***.host[*].udpApp[3].localPort = 1234

# tcp apps (off)
**.numTcpApps = 0
**.tcpApp[0].typename = "TelnetApp"

# ping app (host[0] pinged by others)
# ping app (off)
**.pingApp.count = 0
**.pingApp.startTime = 1s
**.pingApp.printPing = true

# tcp settings
**.tcp.mss = 1024
**.tcp.advertisedWindow = 14336 # 14*mss
***.tcp.sendQueueClass = "TCPMsgBasedSendQueue"
***.tcp.receiveQueueClass = "TCPMsgBasedRcvQueue"
**.tcp.tcpAlgorithmClass = "TCPReno"
**.tcp.recordStats = true
```

```

# ip settings
**.ip.procDelay = 10us
# **.IPForward=false

#####
**.udpApp[1].typename = "UDPEntropyApp" # Enviar beacon a puerto 110
**.udpApp[1].localPort = 100
**.udpApp[1].destPort=110
**.udpApp[1].messageLength = 5B
**.udpApp[1].sendInterval = ${beacon=0.3}s # Same for receiving UDPAp
#**.udpApp[1].burstDuration = 0
#**.udpApp[1].destAddresses="224.0.0.1"
**.udpApp[1].chooseDestAddrMode = "perBurst"
**.udpApp[1].sleepDuration = 0s
**.udpApp[1].startTime = uniform(0s,1s)
#**.udpApp[1].stopTime = -1s
**.udpApp[1].delayLimit = 0s
#**.udpApp[1].destAddrRNG = 0

**.udpApp[2].typename = "UDPEntropySink" #Receptor de Beacon en puerto 110 y
**.udpApp[2].receiveBroadcast=true
**.udpApp[2].localPort = 110
**.udpApp[2].timeWindow = 10
**.udpApp[2].evalInterval = 2s
**.udpApp[2].beaconInterval = ${beacon}s #0.5s # Same for sending UDPAp

```

```
##*.udpApp[2].destAddresses=""
##*.udpApp[2].destPort=110
##*.udpApp[2].chooseDestAddrMode="perBurst"
##*.udpApp[2].sendInterval=0s
##*.udpApp[2].burstDuration = 1s
##*.udpApp[2].messageLength=512B
##*.udpApp[2].stopTime = 0s
##*.udpApp[2].delayLimit = 0s
##*.udpApp[2].sleepDuration = 0s
```

```
#####
```

```
##*.llfeedback = true
# nic settings
##*.wlan*.bitrate = 54Mbps

##*.wlan*.typename="Ieee80211Nic"
##*.wlan*.opMode="g"
##*.wlan*.mac.EDCA = false
##*.wlan*.mgmt.frameCapacity = 10
##*.wlan*.mac.maxQueueSize = 14
##*.wlan*.mac.rtsThresholdBytes = 3000B
##*.wlan*.mac.basicBitrate = 6Mbps # 24Mbps
##*.wlan*.mac.retryLimit = 7
```

```

**.wlan*.mac.cwMinData = 31
**.wlan*.mac.cwMinBroadcast = 31

# channel physical parameters
*.channelControl.pMax = ${tPower=2.5}mW

**.wlan*.radio.transmitterPower=${tPower}mW #100mW EIRP para 802.11 b/g = 20
32mW típica para Laptop 10mW Lisandra 2.5mW Bluetooth
**.wlan*.radio.sensitivity=-85dBm
**.wlan*.radio.berTableFile="per_table_80211g-Trivellato.dat"

**.broadcastDelay=uniform(0s,0.005s)

#####
# manet routing
#####

#[Config DSRUU]
description = "DSR PathCache test"
**.manetrouting.PathCache = ${pathCache = false} #Activa o desactiva el LinkC

*.numHosts = 100
**.manetrouting.PrintDebug = false
**.manetrouting.MAX.SALVAGECOUNT = 100
repeat=40

```

```
#**.manetrouting.ETX_Active = true
```

```
#**.manetrouting.ETXHelloInterval = .5
```

```
#**.manetrouting.ETXWindowNumHello = 10
```

```
#**.manetrouting.ETXRetryBeforeFail = -1
```

```
**mobility.speed = truncnormal(1mps,0.66mps)#truncnormal(1mps,0.66mps)#${spe  
DSDV_2
```

```
output-scalar-file = ${resultdir}/DSDV/1km-PCache(${pathCache})-trunc1-0.6mps
```

```
output-vector-file = ${resultdir}/DSDV/1km-PCache(${pathCache})-trunc1-0.6mps
```

Apéndice C

Configuracion net80211 LD DSR para simulaciones Omnet++

```
package inet.examples.manetrouting.net80211_LD_DSR;

import inet.networklayer.autorouting.ipv4.IPv4NetworkConfigurator;
import inet.nodes.inet.AdhocHost;
import inet.world.radio.ChannelControl;
import inet.applications.udpapp.SingletonGlobalMetrics;

network net80211_LD_DSR_network
{
    parameters:
        int numHosts;
```

```

        int numFixHosts;

    submodules:

        fixhost[numFixHosts]: AdhocHost {

            parameters:

                @display("i=device/pocketpc_s;r=,,#707070");

        }

        host[numHosts]: AdhocHost {

            parameters:

                @display("i=device/pocketpc_s;r=,,#707070");

        }

        channelControl: ChannelControl {

            parameters:

                @display("p=60,50;i=misc/sun");

        }

        configurator: IPv4NetworkConfigurator {

            parameters:

                config=xml("<config><interface hosts='*' address='145.236.x.x  

                @display("p=140,50;i=block/cogwheel_s");

        }

        GlobalMetric: SingletonGlobalMetrics {

            @display("p=50,40;i=misc/globe;is=b");

        }

    connections allowunconnected:
}

```

Apéndice D

Configuracion UDPEntropySink para simulaciones Omnet++

```
package inet.applications.udpapp;  
  
import inet.applications.IUDPApp;  
  
simple UDPEntropySink like IUDPApp  
{  
    parameters:  
        int localPort = default(110); // local port  
        int timeWindow = default(5); // Time window for temporal entropy calc  
        double beaconInterval @unit(s);  
        double evalInterval @unit(s);  
        @display(" i=block/sink ");  
        @signal[rcvdPk]( type=cPacket );
```

```

    @statistic [rcvdPk] ( title="packets received"; source=rcvdPk; record=co
    // @statistic [endToEndDelay] ( title="end-to-end delay"; source="message

    // @signal [bconRcvd] ( type=IPvXAddress );
    // @statistic [_bconRcvd] ( title="Beacons received"; source=bconRcvd; re

    // Signal for neighbors
    @statistic [_neighborsTW] ( title="Neighbors in Time window"; source=neig
    // Signal for node entropy-order
    @statistic [_nodeEDisorder] ( title="Node Link Disorder"; source=nodeED;
    @statistic [_nodeEDisorderSM] ( title="Node Link Disorder MMean"; source
    @statistic [_nodeEOrder] ( title="Node Entropy Order"; source=nodeEO; re
    @statistic [_nodeEntropy] ( title="Node Entropy"; source=nodeEntropy; re

gates:
    input udpIn @labels(UDPControlInfo/up);
    output udpOut @labels(UDPControlInfo/down);
}

```

Apéndice E

Configuracion UDPEntropyApp.NED para simulaciones Omnet++

```
package inet.applications.udpapp;

import inet.applications.IUDPApp;

simple UDPEntropyApp like IUDPApp
{
    parameters:
        int localPort = default(100); // local port (-1: use ephemeral port)
        string destAddresses = default("224.0.0.1"); // list of IP addresses,
        int destPort = default(110);
        volatile int messageLength @unit(B); // length of messages to generate
        double startTime @unit(s) = default(this.sendInterval); // application
        double stopTime @unit(s) = default(0); // time of finish sending, 0
```

```

    volatile double sendInterval @unit(s); // should usually be a random
    int timeToLive = default(-1); // if not -1, set the TTL (IPv4) or Hop
    int typeOfService = default(-1); // if not -1, set the ToS (IPv4) or
    string multicastInterface = default(""); // if not empty, set the m
    bool receiveBroadcast = default(true); // if true, makes the socket r
    bool joinLocalMulticastGroups = default(false); // if true, makes the
    @display("i=block/app");
    @signal[sentPk](type=cPacket);
    @signal[rcvdPk](type=cPacket);
    @statistic[rcvdPk](title="packets received"; source=rcvdPk; record=count);
    @statistic[sentPk](title="packets sent"; source=sentPk; record=count);
    @statistic[rcvdPkJifetime](title="received packet lifetime"; source="
gates:
    input udpIn @labels(UDPControlInfo/up);
    output udpOut @labels(UDPControlInfo/down);
}

```