



División de Ciencias Básicas e Ingeniería

Estudio de protocolos de comunicación para el envío de información médica mediante dispositivos móviles inteligentes

Idónea comunicación de resultados presentada por
Genaro Caleb Vázquez Pedraza

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (Ciencias y Tecnologías de la Información)

Asesores:

Dr. Michael Pascoe Chalke
Dr. Enrique Rodríguez de la Colina

Jurado Calificador:

Presidente: **Dr. Miguel López Guerrero**

UAM-I

Secretario: **Dr. Francisco García Jiménez**

UNAM

Vocal: **Dr. Enrique Rodríguez de la Colina**

UAM-I

Ciudad de México, 31 de enero de 2018



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Unidad Iztapalapa

División de Ciencias Básicas e Ingeniería

Estudio de protocolos de comunicación para el envío de información médica mediante dispositivos móviles inteligentes

Idónea comunicación de resultados presentada por
Genaro Caleb Vázquez Pedraza

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (Ciencias y Tecnologías de la Información)

Asesores:

Dr. Michael Pascoe Chalke
Dr. Enrique Rodríguez de la Colina

Jurado Calificador:

Presidente: **Dr. Miguel López Guerrero** UAM-I _____

Secretario: **Dr. Francisco García Jiménez** UNAM _____

Vocal: **Dr. Enrique Rodríguez de la Colina** UAM-I _____

Ciudad de México, 31 de enero de 2018

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por enseñarme a seguir mis sueños y ser la luz que ilumina el camino para llegar a ellos, ustedes son la fuente de amor, alegría e inspiración que me permite esforzarme para seguir adelante y día a día dar lo mejor de mí.

Agradezco profundamente a mis asesores. Dr. Michael Pascoe y Dr. Enrique Rodríguez, gracias por creer en mi trabajo y brindarme su confianza, experiencia y paciencia, mucha paciencia, para guiarme a lo largo del programa de maestría. De igual forma agradezco de sobremanera las atenciones, tiempo y comentarios brindados por el Dr. Miguel López y el Dr. Francisco García para mejorar el presente trabajo, asimismo agradezco al Dr. Bersaín Alexander por sus consejos y los conocimientos brindados en su curso, los cuales ayudaron en gran medida a mi proyecto de investigación.

Agradezco infinitamente a mis amigas y amigos, mis hermanos del alma por su apoyo incondicional, risas, locuras y experiencias irreverentes, las cuales estuvieron siempre presentes, al igual que ustedes, inclusive a la distancia y siempre me hicieron sonreír sin importar las dificultades a las que me enfrenté.

Agradezco a la UAM y al Conacyt por el apoyo brindado y la formación académica que me han permitido superarme para alcanzar y crear nuevas metas.

...Sin ustedes no hubiera sido posible.

Resumen

Los sistemas de Telemedicina basados en el uso de dispositivos electrónicos (*eHealth*) y móviles (*mHealth*) pueden aprovechar la proliferación de equipos móviles inteligentes como teléfonos, relojes y tabletas electrónicas, así como las tecnologías inalámbricas con las que estos cuentan, p.ej., Bluetooth, NFC, WiFi, 3G y 4G. Dado que dichas tecnologías dependen en mayor medida de la cobertura que brinda la infraestructura preestablecida, es posible que su acceso no esté garantizado, como en el caso de comunidades remotas o escenarios de emergencia donde esta ha sido dañada. Ante tal situación, es posible crear sistemas de comunicación que utilicen las tecnologías disponibles en los dispositivos móviles inteligentes, sin depender de dicha infraestructura, por ejemplo, las redes móviles ad-hoc (MANET por sus siglas en inglés).

Las MANET pueden formarse de manera temporal, al momento que esto se requiera, al no depender del uso de infraestructura de comunicaciones preestablecida, se conciben como una extensión de las tecnologías inalámbricas convencionales para comunicarse cooperativamente entre dispositivos (D2D: *device-to-device*), con el fin de extender su cobertura más allá de sus capacidades individuales. La utilización de este tipo de redes en un contexto de Telemedicina permitiría utilizar dispositivos móviles inteligentes, y así transmitir información proveniente de equipo médico por medio de múltiples saltos hasta un equipo que recopile dicha información para su posterior envío a personal médico. p. ej., cuando se realicen campañas de salud pública o miembros de la comunidad que requieran monitorización constante de señales fisiológicas.

El trabajo de investigación presenta resultados basados en simulaciones computacionales de redes inalámbricas en ns-3.26, donde se evaluó el desempeño de dos protocolos de encaminamiento proactivos (DSDV y OLSR) y dos reactivos (AODV y DSR) para redes MANET, incluyendo modelos de tráfico de información proporcionada por equipo médico. Asimismo, se realizó un análisis a dicha información médica mediante la implementación de un algoritmo para la detección de características fundamentales de una señal de electrocardiograma (ECG), de esta forma fue posible observar cómo se afecta dicha información en un ambiente de red ad-hoc.

Los resultados obtenidos permitieron elegir el protocolo de encaminamiento que se adecua mejor al tipo de redes planteadas y evaluar las consecuencias causadas por la pérdida de paquetes de datos. De igual forma, este proyecto de investigación propone el concepto de redes médicas ad-hoc (MedAhNet: *medical ad-hoc network*), el cual es un modelo novedoso de comunicación inalámbrica para la transmisión y encaminamiento de paquetes con datos médicos, mediante el uso de dispositivos móviles inteligentes sin la necesidad de depender de la infraestructura convencional de comunicaciones.

Abstract

Telemedicine systems based on the use of electronic devices (eHealth) and mobile devices (mHealth) can take advantage of the proliferation of smart devices such as mobile phones, watches or tablets and their available technologies (Wifi, Bluetooth, 3G, LTE, NFC), but, at the same time, they strongly depend on the coverage of pre-established infrastructure. When the telecommunications infrastructure has been damaged or is non-existent, e.g., isolated communities or emergency scenarios, connectivity cannot be guaranteed. In the face of such a situation, it is possible to create communication systems that use available technologies of smart devices, without relying on said infrastructure, for example, mobile ad-hoc networks (MANETs).

MANETs can be formed temporarily, whenever necessary, since they do not depend on the use of pre-established communications infrastructure, they are envisioned as an extension of conventional wireless technologies to cooperatively communicate from device-to-device (D2D), in order to extend their coverage beyond each one's capabilities. The use of this type of networks in a Telemedicine context would allow the use of smart mobile devices, and thus transmit information from medical equipment through multiple hops to a device that collects this information for subsequent delivery to medical personnel. e.g., public health campaigns or when members of the community require constant monitoring of physiological signals.

The research work presented herein shows results based on computer simulations with ns-3.26 Network Simulator, intended to assess the performance of two proactive (DSDV, OLSR) and two reactive (AODV, DSR) routing protocols for MANET, including data traffic models provided by medical equipment. These results allow us to evaluate how medical information sent through an ad-hoc network could be affected due to packet loss. An algorithm intended to detect the fundamental features of an electrocardiogram (ECG) signal was implemented in order to compare the original signal with one that was affected by its transmission through the ad-hoc network.

The results obtained allowed us to choose the routing protocol that best suits the type of networks proposed and to evaluate the consequences caused by the loss of data packets. This research project proposes the concept of Medical ad-hoc networks (MedAhNet), which is a novel model of wireless communication for the transmission and routing of medical data packages through the use of intelligent mobile devices without relying on conventional communications infrastructure.

Contenido

1.	Introducción	1
1.1	Motivación	2
1.2	Objetivo	3
1.3	Metodología	3
2.	Antecedentes	5
2.1	Telemedicina y redes de comunicaciones	5
2.2	Redes móviles ad-hoc	9
2.3	Protocolos de encaminamiento para redes MANET	10
2.3.1	Protocolos proactivos	11
2.3.1.1	DSDV	11
2.3.1.2	OLSR	12
2.3.2	Protocolos reactivos	12
2.3.2.1	AODV	13
2.3.2.2	DSR	13
2.4	Modelos de tráfico para datos médicos	14
2.5	Simulador para redes ns-3	14
2.6	Estudios comparativos de protocolos de encaminamiento	15
3.	Propuesta y modelo de simulación	17
3.1	Alcance de comunicación de los nodos	18
3.2	Funciones de los nodos participantes de la red ad-hoc médica	22
3.3	Tipos de nodos y funcionalidad	23
3.4	Escenarios de simulación	24
3.5	Estructura de paquetes	26
3.6	Movilidad de los nodos	27

3.7 Medidas de desempeño	28
3.8 Modelo de la simulación	29
4. Análisis de resultados	33
5. Conclusiones y perspectivas	41
Referencias bibliográficas	43

Índice de Figuras

Figura 1 - Sistemas de telemedicina	6
Figura 2 - Capa de red de la pila de protocolos para redes MANET	10
Figura 3 - Circuito de comunicación del modelo de Friis	19
Figura 4 - Ajuste de la distancia de transmisión	22
Figura 5 - Nodos participantes dentro de la red médica ad-hoc	24
Figura 6 - Escenarios de simulación	25
Figura 7 - Tamaño y estructura de paquetes	27
Figura 8 - Razón de pérdida de paquetes contra número de nodos	34
Figura 9 - Retardo promedio contra número de nodos	35
Figura 10 - Consumo de batería contra número de nodos	36
Figura 11 - Conexiones exitosas contra número de nodos	37
Figura 12 – Diagrama a bloques del algoritmo de Pan y Tompkins	39
Figura 13 – Comparación de las señales de electrocardiograma (ECG)	40

Índice de tablas

Tabla 1 - Razón de pérdida de paquetes variando distancias	22
Tabla 2 - Funcionalidades de los dispositivos inteligentes	23
Tabla 3 - Características de los nodos en la simulación	30
Tabla 4 - Selección de parámetros y su implementación en ns-3	31

Capítulo 1

Introducción

A medida que la esperanza de vida aumenta globalmente, es posible que los servicios de salud lleguen a saturarse debido al incremento en la demanda por una población cuya edad va en aumento, hecho que también sucede con las enfermedades comunes en personas de edad adulta [1]. Como regla general, la proporción de la población diagnosticada con condiciones de salud crónicas aumentará con la edad. Dado que las enfermedades crónicas representan el factor principal en el incremento de padecimientos y, por ende, un aumento en la utilización de los servicios de salud, los modelos para brindar estos servicios deben ser replanteados para solventar este reto mediante el uso de tecnologías de la información (TIs) [1], [2].

La Organización Mundial de la Salud define en [3] a la medicina a distancia o Telemedicina (*Telemedicine*) y la salud a distancia o Tele salud (*Telehealth*) de manera indistinta, presentando la siguiente descripción:

“La prestación de servicios del cuidado de la salud por todos los profesionales del cuidado de la misma, donde la distancia es un factor crítico, utilizando tecnologías de la información y la comunicación para el intercambio de información válida para el diagnóstico, tratamiento y prevención de enfermedades y lesiones, así como investigación, evaluación y educación continua de proveedores del cuidado de la salud. Todo con el interés de fomentar el bienestar de los individuos y sus comunidades”.

De igual forma menciona cuatro elementos relacionados con ésta:

1. Su propósito es brindar apoyo clínico.
2. Está destinado a superar barreras geográficas, conectando usuarios que no están en la misma ubicación física.
3. Implica el uso de varios tipos de tecnologías de la información y comunicación (TIC).
4. Su objetivo es mejorar resultados concernientes a la salud.

La Telemedicina ha sido un tema de gran interés debido a su potencial para ser utilizada en proyectos de investigación como la realización de estudios clínicos y para fines médicos debido a sus posibles aplicaciones como el monitoreo remoto de pacientes, seguimiento de sus

tratamientos y medicación en casa [4]. Dichas prácticas pueden llevarse a cabo basándose en el uso de dispositivos electrónicos (*eHealth*) y dispositivos móviles (*mHealth*). Este enfoque pretende mejorar y optimizar el uso de los servicios de salud existentes, asimismo permitiría fomentar el bienestar de pacientes que deban trasladarse largas distancias para recibir los servicios de atención médica ya mencionados. Lo anterior ayudaría a tomar en cuenta aquellos casos en los que se carece de acceso a sistemas básicos de salud, incluyendo así a los países que aún se encuentren en vías de desarrollo [2].

Existe un gran reto para proporcionar formas de comunicación alternas con las que sea posible brindar servicios de Telemedicina, especialmente en áreas aisladas o carentes de cobertura de las redes convencionales de comunicación como Internet y telefonía (fija o celular). Ya sea porque se trate de zonas remotas o de difícil acceso, donde no se cuenta con la infraestructura necesaria o esta haya sido dañada debido a la ocurrencia de algún desastre natural. Lo anterior sugiere el uso de tecnologías disponibles como equipo de cómputo y dispositivos móviles inteligentes, de tal forma que sea posible realizar la captura y almacenamiento de datos provenientes de equipo médico cuando así se requiera, p.ej., cuando se realizan jornadas de salud pública o miembros de la comunidad requieran monitorización constante de signos vitales para su posterior análisis y envío al personal encargado del cuidado de la salud o servicios de emergencia.

Las redes móviles ad-hoc (MANET por sus siglas en inglés) pueden formarse de manera temporal, al momento que esto se requiera, y al no depender del uso de infraestructura de comunicaciones preestablecida se conciben como una extensión de las tecnologías inalámbricas convencionales para comunicarse cooperativamente entre dispositivos (D2D: *device-to-device*) con el fin de extender su cobertura más allá de sus capacidades individuales. La utilización de este tipo de redes bajo el contexto anteriormente planteado permitiría utilizar dispositivos móviles inteligentes para transmitir la información proveniente de equipos médicos por medio de múltiples saltos hasta un equipo que recopile dicha información para su posterior procesamiento, análisis e interpretación.

1.1 Motivación

La madurez y los continuos avances alcanzados en las TICs en áreas como redes inalámbricas, aunados a la proliferación de dispositivos móviles inteligentes y equipos como sensores portátiles para uso médico, permiten visualizar el uso combinado de dichos recursos para monitorizar y recopilar señales fisiológicas para posteriormente reportar situaciones críticas de salud a personal médico de manera remota, de tal forma que se podría beneficiar a grandes porciones de la población que carezcan de acceso a servicios de salud, debido a barreras geográficas, económicas o tecnológicas.

También, como parte de la motivación del presente trabajo, está el promover la integración de diversas tecnologías existentes, proporcionando un modelo novedoso de comunicación para la

transmisión de datos con información médica que no dependa de la infraestructura de comunicaciones preestablecida, fomentando así el desarrollo de soluciones que involucren a diversas disciplinas. Desde esta perspectiva, es necesario impulsar el trabajo conjunto de áreas de investigación como las ciencias de la salud, ingeniería biomédica y tecnologías de la información (TI), así como actores gubernamentales, asociaciones civiles e iniciativa privada, de manera que sea posible mejorar los servicios de salud existentes como campañas móviles de salud pública y presentar posibles soluciones a casos en los que miembros de la comunidad requieran monitorización constante de signos vitales para su posterior análisis y envío a personal encargado del cuidado de la salud.

1.2 Objetivo

El objetivo principal de la investigación consiste en llevar a cabo una serie de simulaciones computacionales que permitan realizar la comparación entre distintos protocolos de encaminamiento, de tal forma que sea posible elegir el que mejor se adecúe a un escenario propuesto que tome en cuenta el tipo de tráfico generado por el envío de datos médicos entre dispositivos móviles inteligentes en un entorno de red ad-hoc, tomando especial atención a cuestiones como pérdida de datos, retardo de las transmisiones y consumo de batería. Asimismo, se mostrarán las consecuencias derivadas de la pérdida de paquetes de datos mediante un análisis realizado a dicha información médica con la implementación de un algoritmo para la detección de complejos QRS¹ a una señal de electrocardiograma.

1.3 Metodología

Se realizó el estudio de los antecedentes concernientes a los sistemas de comunicación en Telemedicina, así como la caracterización del tráfico de datos en sensores y equipo médico; de igual forma se estudió la literatura disponible de redes ad-hoc móviles, protocolos de encaminamiento y sus comparaciones realizadas mediante el uso de simuladores de eventos discretos. En esta etapa fue importante determinar el simulador de redes a utilizar.

Basándose en el estudio mencionado en el punto anterior, se planteó un escenario de simulación acorde al tipo de aplicación que se le dará a la red ad-hoc, así como las medidas de desempeño a evaluar y la selección de parámetros a variar al momento de realizar pruebas. Este escenario considera las características propias de las MANET y toma en cuenta los modelos disponibles del simulador de redes elegido, p. ej., estándares de red, modelos de movilidad, canales inalámbricos, condiciones y efectos de propagación de señales electromagnéticas y generación de tráfico.

¹ Los complejos QRS son una serie de deflexiones visibles en un electrocardiograma, representan la actividad eléctrica generada por la despolarización ventricular antes de la contracción de los ventrículos, está compuesta por tres ondas (Q, R y S).

Una vez planteado el escenario, se realizó su implementación en el simulador, así como la adecuación del mismo, ajustando parámetros y realizando pruebas pertinentes para la puesta a punto del sistema.

Se llevó a cabo una serie de pruebas exhaustivas y sistematizadas de tal forma que estas puedan reproducirse de manera independiente a cada uno de los protocolos de encaminamiento, variando los parámetros elegidos y obteniendo resultados preliminares, los cuales en medida de lo posible fueron validados con fuentes y estudios disponibles en cada paso de la simulación.

Una vez realizado el conjunto de pruebas, se obtuvieron las estadísticas relevantes de los parámetros deseados para realizar las comparaciones pertinentes entre los protocolos de encaminamiento estudiados. De dicho conjunto de datos, se obtuvieron los indicios necesarios para averiguar cómo se afecta la transmisión de datos médicos a través de una red ad-hoc.

Utilizando los resultados del punto anterior, se realizó la implementación del algoritmo de detección de complejos QRS de Pan y Tompkins [6] para comparar la señal original con una señal afectada por el envío de la información médica a través de la red ad-hoc.

El resto del trabajo se encuentra estructurado de la siguiente manera: En el Capítulo 2 se presentan los antecedentes y la búsqueda en la literatura de los sistemas de Telemedicina y las redes móviles ad-hoc; en el Capítulo 3 se expone la propuesta de los escenarios y el modelo de simulación; el Capítulo 4, se presenta una discusión de los resultados obtenidos en la simulación. Finalmente, en el Capítulo 5, se presentan las conclusiones del trabajo de investigación.

Capítulo 2

Antecedentes

A continuación se presentan los antecedentes, así como el estudio sistemático de la literatura del estado del conocimiento de los temas concernientes al proyecto de investigación. Este capítulo está conformado por las siguientes secciones: en la sección 2.1 se presenta el estudio de los sistemas de comunicación y redes para Telemedicina, en la sección 2.2 se definen las redes móviles ad-hoc, en la sección 2.3 se presenta el estudio de protocolos de encaminamiento representativos para dichas redes; en la sección 2.4 se trata el tema relacionado a los modelos de tráfico en la transferencia de datos médicos. Finalmente, las secciones 2.5 y 2.6 tratan los temas relacionados con el simulador de eventos discretos elegido y los estudios comparativos realizados previamente a estos protocolos en ambientes de simulación.

2.1 Telemedicina y redes de comunicaciones

En la mayoría de los estudios de investigación y prototipos de sistemas de Telemedicina expuestos en la literatura, se asume que la conectividad a Internet está garantizada y que existen puntos de acceso a Internet cercanos o se está dentro del alcance de comunicación de antenas celulares con disponibilidad total para los usuarios. Este tipo de soluciones proporcionan comunicación a Internet de un solo salto [7], como se puede observar en la Figura 1A.

Desafortunadamente, el tipo de esquemas de comunicación inalámbrica que manejan los sistemas de Telemedicina y, en general, cuando se depende totalmente de conexiones a Internet basadas en infraestructura y recursos como el uso de cómputo en la nube [4], podrían llegar a ser inoperables; especialmente cuando se producen fallas, daños o se encuentran saturados, p. ej., en caso de desastres naturales.

Lo anteriormente mencionado presenta la necesidad de recurrir a esquemas fiables de comunicación donde los datos médicos puedan ser enviados de manera segura en múltiples saltos a un equipo capaz de almacenarlos para su posterior procesamiento y envío a personal médico; en particular, cuando no sea posible alcanzar los medios de comunicación usuales.

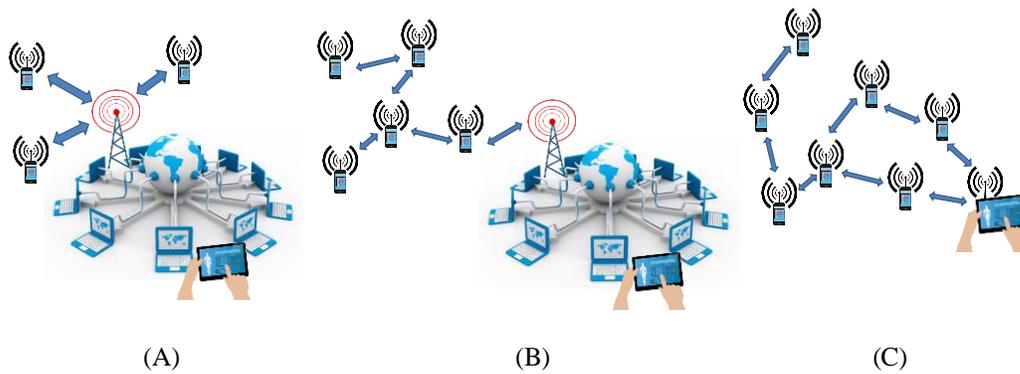


Figura 1 - Sistemas de Telemedicina

(A) Sistema a un solo salto basado en infraestructura; (B) Sistema a múltiples saltos basado en infraestructura; (C) Sistema ad-hoc a múltiples saltos.

Alternativamente, los mensajes pueden ser enviados desde el dispositivo fuente hasta el nodo destino a través de un número intermedio de nodos de reenvío por medio de múltiples saltos, con el fin de comunicarse con dispositivos distantes en un esquema de almacenamiento y retransmisión de los paquetes de datos; en la Figura 1B se ejemplifica dicha posibilidad. De esta forma, la información se retransmite de un dispositivo a otro hasta llegar a un equipo con conexión a Internet.

De igual forma, en la Figura 1C, se propone el envío de datos por medio de un sistema de comunicación cooperativa ad-hoc, ya sea para su almacenamiento y posterior envío o transmisión inmediata a personal médico o de emergencia que se encuentre dentro de la cobertura de red. Como se menciona en [8], las comunicaciones cooperativas entre dispositivos (D2D) se vuelven relevantes cuando se presenta alguna emergencia y no existe infraestructura de comunicación disponible al momento. El presente trabajo de investigación propone el uso de este último caso como una solución viable para la transmisión de datos médicos por medio del uso de dispositivos móviles inteligentes.

En [8], [9], [10] y [11] se menciona la posibilidad de que los datos generados por la monitorización de señales fisiológicas sean enviados por medio de saltos múltiples, pero sólo en [8] se reporta la implementación del protocolo adaptable de encaminamiento de difusión múltiple bajo demanda (*ADMR: adaptive demand-driven multicast routing*) para lograrlo, pero no se menciona la razón por la que se eligió dicho protocolo, ni se realiza alguna comparación con otros protocolos de encaminamiento para conocer sus ventajas con respecto a los demás. Dado que el presente proyecto de investigación involucra la comparación de protocolos de encaminamiento en escenarios donde se transmita información médica, es importante tomar en cuenta las características de las redes tratadas en los trabajos mencionados anteriormente para proponer escenarios acordes al uso de redes MANET en Telemedicina y poder elegir el protocolo de encaminamiento que se adapte mejor a las condiciones requeridas.

Las redes MANET pretenden integrar el uso dispositivos heterogéneos y soportar diversas aplicaciones que podrían construirse sobre ellas [12]. De igual forma, estas redes pueden aprovechar el creciente número de dispositivos portátiles de costo asequible; tal es el caso de teléfonos y relojes inteligentes, computadoras de mano, tabletas electrónicas y computadoras portátiles, así como la variedad de interfaces de comunicación inalámbrica con las que estos dispositivos cuentan, (p. ej., WiFi, Bluetooth, NFC, 3G y 4G)¹.

Actualmente, es posible establecer comunicación entre dos dispositivos de forma inalámbrica, como una característica estándar en distintos dispositivos comerciales como teléfonos inteligentes y tabletas electrónicas [13], así como computadoras personales [14], sin la necesidad de contar con una infraestructura de red preestablecida o servicio de Internet, formando enlaces directos entre dispositivos pares o iguales (*peer-to-peer*) para el envío de archivos multimedia. Otro servicio disponible es por medio de la aplicación descrita en [15], con la cual es posible transmitir mensajes de texto entre los usuarios de esta aplicación, sin necesidad de tener conexión a Internet, incluso entre dispositivos heterogéneos con distintas versiones de sistemas operativos, marcas y modelos de equipos inteligentes.

El establecimiento de redes ad-hoc autoorganizadas, donde cada dispositivo pueda participar libremente y de esta forma ofrecer y recibir servicios, se ha convertido en una realidad con el uso cotidiano de equipos móviles inteligentes, cuya disponibilidad crece de manera sostenida a nivel mundial.

La proliferación de dispositivos inteligentes ha sido un incentivo para investigar y crear sistemas de Telemedicina que aprovechen las prestaciones ofrecidas por estos dispositivos. Cabe destacar que estas prestaciones son cada vez más sofisticadas, ya que dichos dispositivos cuentan con diversas interfaces de comunicación, sensores integrados, cámaras, luz de flash y micrófono; de igual forma, las capacidades de procesamiento, memoria y batería de estos dispositivos inteligentes aumentan constantemente.

De acuerdo con [16], la adquisición de teléfonos inteligentes entre la gran mayoría de la población de Estados Unidos (95%) creció de 35% en 2011 a 77% en 2016. Internacionalmente, el uso de dispositivos móviles aumentó de 2.2 millones en 2005 a más de 7,000 millones a finales de 2015. En México se sigue la misma tendencia global, ya que según datos del INEGI en [17] y [18], en 2015, 71.5% de la población utilizaba algún equipo celular, de los cuales 66.3% eran teléfonos inteligentes y esa cifra aumentó en 2016, donde 73.6% de la población contaba con equipos celulares, y el uso de dispositivos inteligentes se incrementó a 76.0%.

Las suscripciones a la banda ancha móvil también han ido en aumento, el 86% de los habitantes de los países desarrollados y el 39% de los países en desarrollo tienen acceso a servicios de Internet a través de tecnologías celulares.

¹ WiFi, Bluetooth y NFC son los nombres comerciales de tecnologías de comunicación inalámbrica basadas en los estándares y protocolos IEEE 802.11, IEEE 802.15.1 e ISO/IEC 14443, ISO/IEC 18092, entre otros; respectivamente. 3G y 4G corresponden a la tercera y cuarta generación de tecnologías para redes celulares de banda ancha.

En México, se autorizó la primera concesión de uso social indígena para prestar servicios de telecomunicaciones por parte del Instituto federal de telecomunicaciones (IFT) en 2016 [19], lo cual fue posible gracias a esfuerzos como la creación de redes de telefonía celular en comunidades que carecían de estos servicios [20]. Esto representa un avance en la solución de la problemática planteada por la falta de acceso a estos servicios y permite vislumbrar la implementación de soluciones de Telemedicina en comunidades alejadas o de difícil acceso.

Como resultado de esta continua adopción de tecnología, los dispositivos inteligentes como teléfonos, relojes, tabletas electrónicas y computadoras de mano y portátiles se han integrado de manera ubicua a la vida cotidiana de las personas, cuestión que también ha permitido mejorar la percepción sobre el uso de aplicaciones relacionadas con la salud [21] y [22].

Existe una amplia gama de aplicaciones dedicadas al cuidado de la salud y monitorización de actividad física, signos vitales, sueño, entre otras. En su mayoría, estas aplicaciones utilizan los sensores incorporados a los dispositivos inteligentes como acelerómetros o funciones multimedia como cámaras y micrófonos; así como otras características utilizadas como ubicación vía posicionamiento global GPS. Algunos ejemplos de dichas aplicaciones son las que permiten detectar caídas de las personas que se encuentren utilizando un teléfono inteligente, tal es el caso de [23] y [24], estas aplicaciones al percibir cambios repentinos de aceleración envían alertas vía mensajes de texto SMS o correo electrónico con información del usuario, el evento registrado y su ubicación a un contacto previamente establecido.

También existen aplicaciones como las disponibles en [25], [26], [27] y [28], las cuales calculan la frecuencia cardiaca y la saturación arterial de oxígeno combinando el uso de la cámara de video y la luz de flash del dispositivo. El mecanismo subyacente para lograr esto es una técnica óptica no invasiva utilizada para detectar cambios en el volumen sanguíneo en el lecho microvascular de tejido conocido como Fotoplethismografía (*PPG: photoplethysmography*) [29]. También hay esfuerzos para utilizar teléfonos inteligentes para detectar arritmias (fibrilación auricular) utilizando PPG y algoritmos de procesamiento de señales fuera de línea (*offline*), combinados con métodos estadísticos [30] y [31].

Es importante mencionar que, hasta el momento, el uso de estas aplicaciones no se considera como un sustituto de los servicios de salud y el uso de instrumental médico. Esto es debido a que no pueden utilizarse para llegar a conclusiones médicas [28] y [30], ya que actualmente no están aprobadas por ningún tipo de organismo regulatorio como la administración de alimentos y fármacos de los Estados Unidos de Norteamérica (*FDA: food and drug administration*), por lo que su utilización sólo es para fines informativos y educativos. Desde esta perspectiva, otro uso propuesto para los dispositivos móviles inteligentes es como interfaz a la cual sea posible conectar sensores externos y aprovechar así sus capacidades de comunicación, almacenamiento y procesamiento.

Actualmente existen equipos médicos disponibles comercialmente, los cuales cuentan con la aprobación de la FDA y es posible conectarlos a dispositivos inteligentes como teléfonos y

tabletas electrónicas compatibles con distintos sistemas operativos para dispositivos móviles, p.ej., IOS y Android. Tal es el caso de [32], donde se describe un electrocardiógrafo de un canal, con el cual es posible obtener análisis instantáneos, utilizando algoritmos de aprendizaje automatizado, cuenta con una aplicación para dispositivos móviles inteligentes que permite registrar eventos cardíacos como arritmias. De igual forma, en [33], se presenta un electrocardiógrafo cuyos datos se transmiten a un teléfono inteligente vía Bluetooth, posteriormente el teléfono los envía a través de una conexión de red móvil a un servidor con capacidad de almacenar dichos datos y hacerlos disponibles al personal médico.

Como se mencionó anteriormente, la mayoría de las soluciones y sistemas de Telemedicina descritos en la literatura dependen de una conexión a Internet a través de la infraestructura de red celular. Cabe destacar que bajo ciertas condiciones dicha solución no es del todo adecuada, ya que los proveedores de datos y telefonía celular en cada país imponen sus propias reglas y establecen restricciones sobre la cantidad y el tipo de información que puede ser enviada a través de su red, incluyendo el tipo de aplicaciones que acceden a ella. Además, teniendo en cuenta que el costo de los planes de datos celulares es significativamente alto y restringido a unos pocos cientos de megabytes por mes, hace que la transferencia de una gran cantidad de información por medio de la red celular sea poco práctica. Otro inconveniente es que el caudal máximo de datos que se puede enviar en conexiones 3G/4G se comparte entre todos los usuarios dentro de la célula a la que se encuentren conectados y el tráfico puede convertirse en un problema, resultando en un rendimiento de la transferencia de datos muy bajo [12].

La comunicación cooperativa entre dispositivos mediante la utilización de tecnologías de red sin licencia, como las interfaces WiFi o Bluetooth, no requiere despliegue de infraestructura y es ideal para crear redes de pequeña escala con tasas de transferencia de datos relativamente altas entre dispositivos cercanos, estas características permiten su uso incluso en áreas remotas donde los servicios de telefonía celular son limitados o no existen en absoluto. A continuación se definen las características de las redes móviles ad-hoc, las cuales se propone utilizar para la transmisión de información médica por medio del uso de dispositivos móviles inteligentes.

2.2 Redes móviles ad-hoc

A diferencia de las redes inalámbricas dependientes de infraestructura, las redes ad-hoc no requieren de equipo previamente instalado ni gestión centralizada para su funcionamiento, por lo tanto pueden formarse temporalmente al momento que así sea requerido. Los dispositivos participantes dentro de dichas redes, cuyas interfaces inalámbricas estén configuradas para trabajar en modo ad-hoc, cumplen distintos roles dentro de este tipo de redes [34].

Los dispositivos participantes en una red ad-hoc cuentan con la capacidad tanto de enviar su propia información, como la de recibir y retransmitir los datos de nodos vecinos, es decir, dispositivos que se encuentren dentro de su alcance de comunicación. De igual forma, los nodos

tienen la capacidad de crear rutas por las que se reenviarán los datos de salto en salto hasta llegar a su destino, así, la información se envía de manera cooperativa del nodo transmisor al nodo receptor.

Se debe tomar en cuenta que los dispositivos son utilizados por personas que por lo regular se encuentran en constante movimiento, lo cual puede provocar que estos dispositivos entren y salgan de la cobertura de la red ad-hoc de manera aleatoria. Adicionalmente, es posible que se presenten deficiencias en la comunicación ocasionadas, entre otros factores, por el agotamiento de la batería o por la desconexión de los equipos. Como consecuencia de las condiciones anteriormente expuestas, la topología de las redes ad-hoc cambia con frecuencia y tal naturaleza dinámica hace que el encaminamiento de paquetes de datos sea una labor desafiante, la cual debe ser realizada por medio de un protocolo de encaminamiento diseñado especialmente para redes móviles ad-hoc.

2.3 Protocolos de encaminamiento para redes MANET

Un protocolo de encaminamiento de paquetes para redes ad-hoc móviles es el mecanismo subyacente mediante el cual los nodos se van a configurar de manera distribuida unos con otros, de igual forma, dicta las reglas básicas con las cuales los dispositivos participantes dentro de la red buscarán nodos vecinos y crearán rutas por las cuales la información será enviada al momento de que esto sea necesario. El diseño y el comportamiento de dichos protocolos permite clasificarlos con dos enfoques: proactivos y reactivos, estos trabajan en la capa tres de la pila de protocolos para redes MANET [35], mostrada en la Figura 2.

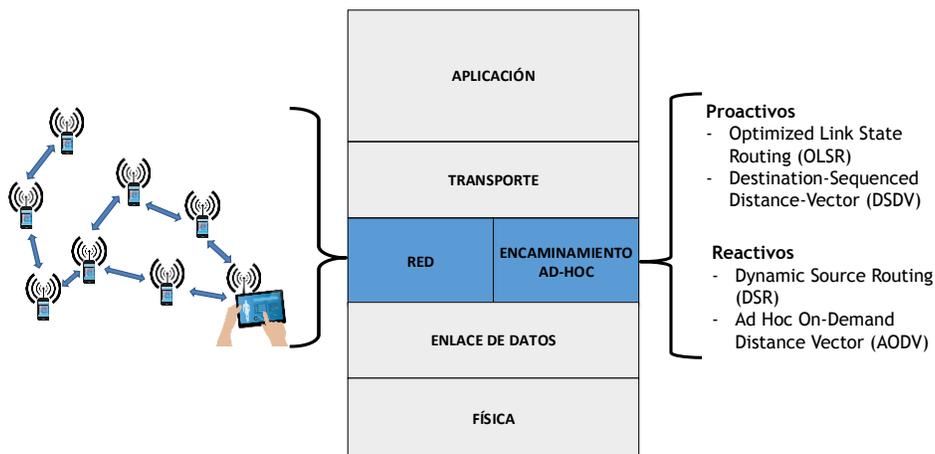


Figura 2 - Capa de red de la pila de protocolos para redes MANET

Existen distintos protocolos de encaminamiento para redes móviles ad-hoc, los cuales se basan en dos tipos de algoritmos básicos, algoritmos de vector-distancia (*DV: distance-vector*) o de estado de enlace (*LS: link state*). Aunque ambos están diseñados para encontrar el camino más corto desde el dispositivo origen hasta el nodo de destino, difieren entre sí por su principio de funcionamiento y el tipo de información de encaminamiento de paquetes mantenida por cada uno de los dispositivos participantes.

2.3.1 Protocolos proactivos

Los protocolos proactivos de encaminamiento mantienen tablas periódicamente actualizadas con rutas a otros nodos. Esta información se debe actualizar a medida que cambia la topología de la red. Esta actualización frecuente hace que dichos protocolos generen un gran número de paquetes de control o mensajes de señalización (sobrecarga), lo que afecta el uso del medio inalámbrico, el rendimiento y el consumo de la batería, incluso cuando la red se encuentra sin utilizar.

La ventaja principal de los protocolos proactivos es que, al mantener las tablas de encaminamiento ya establecidas con otros nodos, se reduce el retraso en la transmisión de paquetes desde la fuente hasta el destino. Dos ejemplos clásicos de protocolos proactivos para redes ad-hoc móviles son DSDV (*destination-sequenced distance-vector*) [36] y OLSR (*optimized link state routing*) [37].

2.3.1.1 DSDV

El protocolo de encaminamiento DSDV fue diseñado específicamente para la transmisión de paquetes de datos en redes móviles ad-hoc, basa su funcionamiento en el mantenimiento de tablas en cada uno de los nodos con información acerca de las rutas hacia los otros destinos en la red. Su funcionamiento está basado en el algoritmo de Bellman-Ford para calcular las mejores trayectorias en el envío de paquetes de datos. DSDV mejora el algoritmo original ya que evita los ciclos a infinito en tablas de encaminamiento mediante una entrada en sus tablas con números de secuencia [36], generalmente utiliza números pares para enlaces existentes, en cualquier otro caso se asignan números impares.

Es posible utilizar el protocolo DSDV en entornos de red ad-hoc móviles asumiendo que cada nodo participante actúa como dispositivo encargado de encaminar paquetes (*router*). Los cambios y actualizaciones del estado de la red se comparten entre dispositivos de manera recurrente; dado que cada nodo mantiene su propia tabla de encaminamiento, esta tabla es compartida en su totalidad (*full dump*) entre nodos vecinos con menor frecuencia.

2.3.1.2 OLSR

Al igual que DSDV, OLSR funciona como un protocolo proactivo, por lo tanto mantiene en todo momento tablas de encaminamiento con información de rutas a otros destinos. Su principio de funcionamiento es un algoritmo de estado del enlace como se describe a continuación.

Para realizar el descubrimiento de nodos vecinos, OLSR utiliza un mecanismo de intercambio de mensajes de reconocimiento (*HELLO*), dichos mensajes se difunden periódicamente a un solo salto para asegurar que existan enlaces entre dos dispositivos. Estos mensajes de control incluyen una lista con las direcciones de sus nodos vecinos cuyos enlaces sean válidos, es decir, bidireccionales; de igual forma, se incluye una lista con direcciones de nodos vecinos con los que no se fue posible establecer tales enlaces bidireccionales. Dichos mensajes *HELLO* permiten que cada nodo tenga conocimiento de sus vecinos con un alcance de hasta dos saltos de distancia. Con base en dicha información, cada nodo selecciona un conjunto de nodos conocidos como "relevos multi-punto" (*MPR: multi point relays*), los cuales son responsables del reenvío de mensajes de control de tráfico, para de esta forma diseminar tal información al resto de los participantes en la red. Dichos MPR proporcionan un mecanismo eficiente para inundar la red con mensajes de control de tráfico al reducir el número de transmisiones requeridas, por lo que el protocolo puede utilizarse en redes con alta densidad de nodos [37].

2.3.2 Protocolos reactivos

Otro enfoque de los protocolos de encaminamiento es el reactivo, estos protocolos son aquellos en los que las rutas entre origen y destino son encontradas "a petición" del nodo fuente, es decir, cuando este requiera transmitir datos. Cuando el nodo fuente requiere iniciar la transferencia de datos hacia un nodo destino solicita la búsqueda de una ruta para el envío de paquetes. Una vez establecida dicha ruta, los nodos que participan en la transmisión de datos estarán a cargo de su mantenimiento.

Una de las mayores ventajas de este tipo de protocolos es que el número de mensajes de señalización o mantenimiento de ruta es relativamente bajo, lo cual reduce el uso de la batería de los dispositivos. En términos generales, la principal desventaja de los protocolos reactivos es el retraso en la transmisión de paquetes, esto debido al tiempo que tarda el proceso de descubrimiento de rutas, dicho retardo es mayor en comparación con la mayoría de los protocolos de encaminamiento de paquetes proactivos, en los cuales dicha información se encuentra presente en sus tablas de encaminamiento al momento de solicitar una transmisión. Dos ejemplos de protocolos de encaminamiento reactivos para redes ad-hoc móviles son AODV (*ad-hoc on demand distance-vector*) [38] y DSR (*dynamic source routing*) [39].

2.3.2.1 AODV

Se trata de un protocolo reactivo para el encaminamiento de paquetes de datos, AODV comienza a realizar la búsqueda de rutas entre los nodos participantes de la red ad-hoc sólo cuando así lo requiere el dispositivo que requiera iniciar una transmisión. Dichas rutas las mantiene siempre y cuando así sea determinado por el nodo fuente. El protocolo utiliza números de secuencia para asegurar que no existan ciclos a infinito y que las rutas se mantengan actualizadas [38]. Este protocolo puede ser escalado a redes conformadas de un gran número de nodos móviles.

El protocolo AODV utiliza distintos tipos de mensajes especializados de control, por ejemplo los mensajes de solicitud de ruta (*RREQ: route request*), con los cuales se realiza un mecanismo de inundación de la red para descubrir las rutas requeridas por el nodo fuente. Un nodo que recibe un mensaje RREQ puede enviar un mensaje de respuesta con una ruta (*RREP: route reply*) si es el destino o si tiene una ruta hacia el destino. Si alguno de los enlaces establecidos se pierde mientras la ruta se encuentra activa, el nodo que lo detecte, es decir que se encuentre situado arriba de la ruptura, propaga un mensaje de error de ruta (*RERR: route error*) hacia el nodo de origen para notificarle que el destino no puede ser alcanzado. AODV también recurre a la utilización de mensajes HELLO de manera periódica con el fin de mantener rutas durante la transmisión.

2.3.2.2 DSR

Este protocolo basa su funcionamiento en un método conocido como encaminamiento de origen, debido a que cada paquete de datos enviado lleva en su cabecera una lista ordenada con la totalidad de nodos a través de los cuales pasará, el protocolo trabaja principalmente con dos mecanismos: descubrimiento de ruta y mantenimiento de ruta. Es similar al protocolo AODV en el sentido de que comienza a buscar una ruta a petición del nodo transmisor o fuente, sin embargo, DSR utiliza el encaminamiento de origen en lugar de confiar en la tabla de encaminamiento de paquetes en cada dispositivo intermedio. Cada nodo intermedio que retransmite un paquete de solicitud de ruta añade su propio identificador de dirección a una lista transportada por el paquete. El nodo de destino genera un mensaje de respuesta de ruta que incluye la lista de direcciones incluidas en la solicitud de encaminamiento y la transmite de nuevo a lo largo de la ruta inversa al nodo de origen.

El mantenimiento de ruta en DSR se logra por medio de las confirmaciones que los nodos generan cuando pueden verificar que el siguiente nodo ha recibido con éxito un paquete. El funcionamiento del protocolo depende en gran medida de mecanismos de detección de enlaces perdidos, por lo que en [39] se recomienda el uso de las tres heurísticas siguientes: en primera instancia se utilizan reconocimientos generados en la capa de enlace para detectar enlaces rotos, a continuación se utilizaran reconocimientos pasivos y por último se utilizaran reconocimientos de capa de red especificados por el protocolo. Esto permite que los nodos dispongan de múltiples rutas en su memoria caché, de esta manera el nodo transmisor puede evitar saltos duplicados en las rutas seleccionadas eliminando la posibilidad de ciclos a infinito. Cuando un nodo no es capaz de verificar la recepción exitosa de un paquete, intenta retransmitirlo; después de un número finito

de retransmisiones fallidas, el nodo genera un mensaje de error de ruta que especifica el enlace problemático, transmitiéndolo al nodo fuente.

2.4 Modelos de tráfico para datos médicos

La importancia de estudiar los modelos de tráfico en este trabajo radica en representar el tipo de información que proviene tanto de equipo médico como de sensores disponibles comercialmente, así como su caracterización. De esta forma se intenta determinar el tipo de tráfico que deberán manejar las redes que se vislumbran, las cuales estarán dedicadas a la transmisión de datos médicos. Existen distintas fuentes de información y bases de datos con recursos utilizados en disciplinas como la ingeniería biomédica y ciencias de la salud, tal es el caso de PhysioNet [40], donde se encuentra una amplia gama de colecciones de señales fisiológicas (cardiacas, cardiopulmonares, neuronales, entre otras) de sujetos sanos y pacientes con distintas afecciones de salud.

Los datos producidos por equipos médicos y sensores se han estudiado en [41] y [42], donde se tratan los modelos de tráfico de una red de sensores inalámbricos (WSN) que monitorizan dos tipos de signos vitales, p.ej., electrocardiograma (ECG) y temperatura corporal. En el caso de la señal de ECG se consideran dos escenarios: cuando los sensores transmiten datos crudos o cuando estos han tenido algún tipo de procesamiento previo fuera de línea como remuestreo de la señal, y compresión sin pérdidas, entre otros. Los modelos de tráfico para los dos escenarios son tasa constante de bits (CBR) y encendido/apagado (*on/off*), respectivamente.

2.5 Simulador para redes ns-3

El simulador elegido para llevar a cabo las comparaciones propuestas entre los protocolos de encaminamiento anteriormente mencionados es ns-3. Este es un simulador de eventos discretos, el cual fue diseñado para representar redes de sistemas de Internet, este simulador fue principalmente diseñado para fines educativos y de investigación. El simulador ns-3 es de licencia libre, bajo GPLv2 de GNU, por lo cual está públicamente disponible para su desarrollo y uso en investigación de redes [43]. Todos los protocolos de encaminamiento de paquetes y modelos para representar el tráfico de datos antes mencionados están disponibles con el simulador, incluyendo una amplia gama de bibliotecas y modelos; tales como movilidad, consumo de batería, propagación de canales y radio, especificaciones de redes y estándares que permiten llevar a cabo simulaciones fiables. A partir de la versión utilizada (3.26), ns-3 es uno de los simuladores de red disponibles más actualizados. Su utilización, actualizaciones y mantenimiento se llevan a cabo en mayor parte por las comunidades académicas y científicas especializadas en el desarrollo e investigación en las redes de comunicaciones y en la Internet.

El simulador incorpora el generador de números pseudoaleatorios (*PRNG: pseudo-random number generator*) MRG32k3a, descrito en [44], dicho generador provee 1.8×10^{19} flujos independientes de números aleatorios y cada uno de estos contiene 2.3×10^{15} corridas aleatorias independientes. Cada corrida (*run*) controla las variables aleatorias involucradas en la simulación, p.ej., la posición inicial de los nodos y su movilidad, por lo que se garantiza que al realizar comparación entre distintos protocolos, las condiciones podrán replicarse para cada uno de estos, siempre y cuando se elija el mismo número de corrida para cada protocolo.

De igual forma, es posible generar tráfico de datos de acuerdo al patrón de transmisión requerido. La aplicación del simulador genera tráfico que sigue un patrón de encendido/apagado (*on/off*), después de llamar a la rutina encargada de iniciar dicha aplicación, los estados "On" y "Off" son alternados. La duración de cada uno de estos estados se determina con las variables aleatorias *onTime* y *offTime*. Durante el estado "Apagado", no se genera tráfico. Durante el estado "Encendido", se genera tráfico CBR (Tasa constante de bits por sus siglas en inglés). Este tráfico CBR se caracteriza por la velocidad de transmisión y el tamaño del paquete especificados.

Para analizar el consumo de batería, el simulador cuenta con un entorno de trabajo compuesto por 3 partes: *Fuente de energía*, *Modelo de energía del dispositivo* y *Recolección de energía*. La función básica de la *Fuente de energía* es alimentar los dispositivos del nodo. Cada nodo puede acceder al objeto *Fuente de Energía* para obtener información, como la energía restante o la fracción de energía (nivel de batería). El *Modelo de energía del dispositivo*, es el modelo de consumo de batería por cada dispositivo de red instalado en un nodo. Es un modelo basado en estados, donde cada dispositivo tiene una determinada cantidad de estados, y cada estado está asociado con un valor de consumo de batería. Cada vez que cambie el estado del dispositivo, el *Modelo de energía del dispositivo* correspondiente notificará a la *Fuente de energía* el nuevo consumo de corriente del dispositivo. Así, la *Fuente de energía* calculará el nuevo consumo de corriente total y actualizará el nivel restante de batería en el nodo. Finalmente, la *Recolección de energía* representa los elementos que "cosechan" energía del medio ambiente y recargan la *Fuente de energía* a la que está conectada [43].

2.6 Estudios comparativos de protocolos de encaminamiento

Si bien existen diversos artículos donde se reporta la comparación entre distintos protocolos de encaminamiento, incluidos los mencionados en la sección 2.3 (AODV, DSDV, DSR y OLSR), se encontró que su mayoría, estos estudios sólo presentan un análisis teórico de las características principales de los cuatro protocolos expuestos, p. ej., su principio de funcionamiento, si se trata de un protocolo proactivo o reactivo, si este es libre de ciclos, etcétera. En el caso del análisis cuantitativo basado en simulaciones computacionales, p. ej., comparación de medidas de desempeño como la razón de pérdida o entrega de paquetes y retardo promedio, se encontró que al realizar la comparación entre protocolos se excluyó alguno de estos en sus resultados. También se observó que en algunos casos como el presentado en [45], las pruebas realizadas a estos protocolos no se llevaron a cabo con un solo ambiente de simulación y no se tomaron las mismas

medidas de desempeño a los cuatro protocolos, lo cual podría provocar discrepancias en los resultados.

Con respecto a la evaluación de protocolos de encaminamiento de redes MANET para la transmisión de datos médicos, el trabajo presentado en [46] realiza la comparación entre los protocolos AODV, DSR y OLSR en un escenario de monitorización para pacientes, pero la velocidad elegida para los nodos en dicho trabajo es de 5 m/s (18 km/h), lo cual representa una velocidad de caminata muy elevada de acuerdo con [47] y [48]. El trabajo presentado en [49] también contempla un escenario semejante para una Red de área corporal (*BAN: body area network*), y aunque también fue realizado en ns-3, provee sólo resultados basados en la comparación de los protocolos AODV, DSDV y OLSR, excluyendo a DSR y reporta el uso del estándar 802.11p, el cual fue diseñado específicamente para sistemas de comunicación vehicular.

La importancia de tomar en cuenta parámetros acordes con el tipo de red propuesta, radica en la confiabilidad de las simulaciones a realizar para llevar a cabo la comparación de los protocolos de encaminamiento y así poder elegir el que mejor se adecúe al tipo de red propuesta. En este sentido también es importante obtener resultados del protocolo DSR debido a que en trabajos como [35], [50], [51] y [52], se reporta un comportamiento aceptable de este protocolo, inclusive se menciona que ofrece mejores resultados que los demás protocolos en escenarios de baja movilidad, tal como el que se presenta en este trabajo de investigación.

En [53] se presenta una comparación entre los cuatro protocolos de encaminamiento mencionados en el ambiente de simulación ns-2, dicha simulación se realizó bajo distintas áreas y condiciones de densidad y velocidad de los nodos, de igual forma en [54] se expone la implementación del protocolo DSR en ns-3 y se comparó con los tres protocolos restantes. Aunque ambos estudios no consideran un escenario con distintos tipos de tráfico o una aplicación en particular (en este caso transmisión de datos médicos), se consideran de especial utilidad como referencias para observar la congruencia de los resultados obtenidos con las simulaciones.

De acuerdo a lo estudiado en la literatura, no se encontró evidencia de que exista algún trabajo comparativo que tome en cuenta el uso de la batería para los cuatro protocolos de encaminamiento mencionados anteriormente en ns-3. El uso eficiente de la batería es una característica importante a tomar en cuenta al momento de elegir el protocolo de encaminamiento que mejor se acople al tipo de aplicación que se desea dar a la red ad-hoc propuesta.

Capítulo 3

Propuesta y modelo de simulación

Para evaluar el comportamiento de cada uno de los protocolos de encaminamiento, en [34] se recomienda realizar un análisis teórico para conocer las características principales de los cuatro protocolos expuestos, p. ej., su principio de funcionamiento, si se trata de un protocolo proactivo o reactivo, si este es libre de ciclos, etcétera. También se debe medir el desempeño de los protocolos de manera cuantitativa, basándose en simulaciones computacionales para obtener datos como razón de pérdida o entrega de paquetes y retardo promedio, de tal forma que sea posible juzgar el mérito de cada uno de estos al momento de realizar comparaciones entre protocolos de encaminamiento. De igual forma, se recomienda considerar el contexto del escenario de red y diversos parámetros a variar como el tamaño de la red, los diferentes patrones de tráfico, la movilidad de los nodos, entre otros. Adicionalmente, como se menciona en [55], se debe tomar en cuenta la importancia de estudiar el consumo de batería en las redes ad-hoc para la monitorización de pacientes, ya que esto representa una limitante al momento de considerar el uso de dispositivos móviles inteligentes.

Con el fin de establecer un escenario en el cual puedan llevarse a cabo las simulaciones necesarias para realizar la comparación entre los cuatro protocolos de encaminamiento presentados en la sección 2.3 y tomando especial atención a las recomendaciones anteriormente mencionadas, se planteó un contexto con el cual fuera posible asignar funciones a los nodos o dispositivos participantes dentro de la red ad-hoc propuesta.

Para realizar un estudio completo, se consideró prioritario analizar las características de los cuatro protocolos de encaminamiento mencionados anteriormente (dos reactivos y dos proactivos) de manera homogénea, es decir en un solo simulador y aplicando exactamente las mismas condiciones a cada uno de estos, tomando especial atención en el análisis cuantitativo de las medidas de desempeño que permitan discernir cuál de estos protocolos es el más adecuado para la transmisión de datos médicos en un ambiente de red ad-hoc.

El resto del capítulo está conformado por las siguientes secciones: La sección 3.1 presenta un análisis del alcance de comunicación de los dispositivos, la sección 3.2 define el tipo de nodos participantes en el escenario de simulación; la sección 3.3 describe de las funciones y el tipo de tráfico generado por los nodos participantes en la red ad-hoc médica propuesta 3.4 se proponen

los escenarios de simulación en los cuales se llevaran a cabo las pruebas comparativas entre los protocolos de encaminamiento, en las secciones 3.5 y 3.6 se propone una estructura de paquetes a utilizar en la simulación, así como la movilidad de los nodos participantes respectivamente, en la sección 3.7 se definen las medidas de desempeño a evaluar y finalmente la sección 3.8 presenta el modelo de simulación.

3.1 Alcance de comunicación de los nodos

Como se menciona en la Sección 2.2, el encaminamiento de paquetes en redes ad-hoc es una tarea desafiante, en gran medida atribuido a la desconexión que sufren algunos nodos cuando pierden cobertura de la red. Tomando esto en consideración, se decidió utilizar el estándar 802.11b en la simulación, ya que si bien existen versiones más recientes a este, p. ej., 802.11g, 802.11n, 802.11ac, etcétera, las cuales presentan mejoras en las tasas de transferencia de datos y alcance de transmisión, todas estas tienen compatibilidad hacia atrás con el estándar elegido. De igual forma, se encontró que algunos equipos de cómputo como laptops cuentan con interfaces de red inalámbricas en las que la configuración que les permite funcionar en modo ad-hoc sólo está disponible con 802.11b, p. ej., *Intel Centrino Advanced N6205*. En el simulador ns-3, el conjunto de modelos 802.11 intenta proporcionar una implementación precisa de la capa MAC de dicha especificación y proporciona un modelo que representa dicho estándar, es posible encontrar este modelo como `WIFI_PHY_STANDARD_802.11b`.

En [56] se reporta un alcance de comunicación (r_{tx}) para las tarjetas de red que trabajan en el estándar mencionado anteriormente de 150 pies (45 metros), pero no se indica en qué condiciones fue medido. Se debe considerar que la propagación de las ondas de radio se ve afectada por diversos fenómenos, p. ej., reflexión, refracción, difracción, absorción, polarización y dispersión [57], tales factores son provocados por la presencia de edificaciones relativamente grandes y los distintos materiales con los que estas se construyen, entre otros. Por otra parte, la batería representa una restricción en el uso de los dispositivos inteligentes, por lo tanto, se debe considerar el uso eficiente de sus recursos energéticos en las redes móviles ad-hoc. Bajo la suposición de que dichos dispositivos utilizan interfaces inalámbricas de baja potencia para reducir el consumo de batería, en las simulaciones se utilizó una distancia de comunicación menor a la mencionada anteriormente.

El presente trabajo de investigación propone el uso de tecnologías inalámbricas que no dependen de la infraestructura, debido en mayor medida a la carencia de la misma, por lo tanto se consideró que el área donde se podrían desplegar las redes propuestas, al tratarse de zonas rurales, carece de obstáculos como edificios y en general construcciones relativamente grandes, por lo que se eligió utilizar el modelo de propagación del espacio libre de Friis.

El modelo de Friis se utiliza para calcular de manera aproximada la intensidad de la señal recibida cuando el transmisor y el receptor tienen una línea de vista despejada entre ellos, este se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \dots (3.1)$$

Donde:

P_r : Potencia de recepción [W]

P_t : Potencia de transmisión [W]

G_t : Ganancia de transmisión [adimensional]

G_r : Ganancia de recepción [adimensional]

λ : Longitud de onda [m]

d : Distancia [m]

L : Pérdidas del sistema [adimensional]

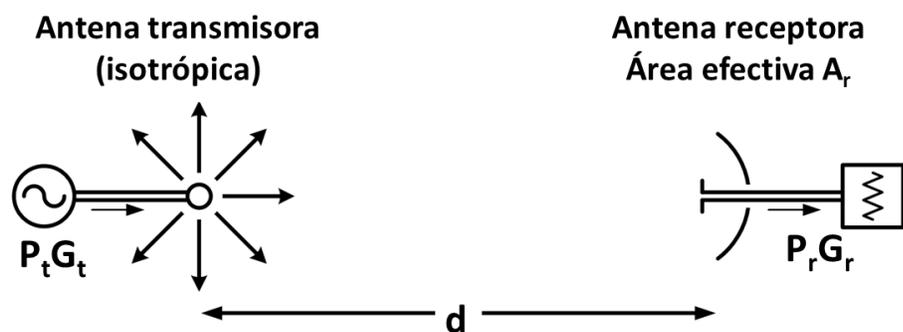


Figura 3 - Circuito de comunicación del modelo de Friis

La ecuación originalmente se describió en [58], como se muestra en la Figura 4, se modeló para el caso de una antena ideal isotrópica, por lo que la potencia emitida en espacio libre se reparte sobre una superficie esférica cuya área es proporcional al cuadrado del radio de la misma. La intensidad de la señal recibida está en función de la distancia d entre el emisor y el transmisor,

creando el efecto de atenuación, es decir, la potencia recibida es inversamente proporcional a la distancia entre las antenas.

La ecuación que describe la intensidad de la señal a la distancia d , con respecto a una distancia de referencia $d_0 < d$, de la cual se conoce su intensidad, se describe a continuación:

De la Ecuación (3.1):

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d_0)^2 L} \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d}\right)^2$$

Entonces se tiene que:

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \dots (3.2)$$

Donde d_0 es la distancia de campo lejano. La Fórmula (3.2) representa el modelo de pérdidas por trayectoria, cuyo exponente cuadrático indica que es en el espacio libre. Dicha expresión puede mostrarse de manera generalizada como sigue:

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d}\right)^\gamma \dots (3.3)$$

Donde γ es el exponente de pérdidas por trayectoria, la variación de dicho exponente permite estimar la potencia de la señal recibida en distintos ambientes, es decir, si se desea tomar en cuenta una atenuación mayor, se debe elegir $\gamma > 2$, p. ej., para escenarios en interiores con obstrucciones, γ toma valores entre 4 y 6, [57]. De igual forma, este exponente puede obtenerse con mediciones experimentales, por lo que en [59] se muestra el resultado de mediciones empíricas en distintos ambientes. Como resultado, los autores muestran que el valor encontrado de dicho exponente en el espacio libre fluctúa entre 1.80 y 1.95, por lo que concluyen que las mediciones encontradas verifican el análisis teórico disponible en el resto de la literatura.

Para relacionar el consumo de energía con la distancia de comunicación, tomando en cuenta el exponente de pérdidas por trayectoria, es posible utilizar la siguiente expresión [60]:

$$E_t = E_{te} + E_{ta} d^\gamma \dots (3.4)$$

Donde:

E_t : Consumo de energía por bit del transmisor

E_{te} : Consumo de energía de los componentes electrónicos del transmisor [J]

E_{ta} : Consumo de energía por el amplificador del transmisor [J]

d : Distancia de comunicación [m]

γ : Exponente de pérdidas por trayectoria [adimensional]

De la Fórmula 3.4, se tiene que el radio de transmisión (r_{tx}) para dispositivos móviles en un escenario en el espacio libre puede expresarse como sigue:

$$r_{tx} = d = \sqrt{\frac{E_t - E_{te}}{E_{ta}}} \dots (3.5)$$

La importancia de tomar en cuenta consideraciones como alcance de transmisión y los efectos de la propagación de las señales en las simulaciones, radica en la creación de escenarios acordes al tipo de aplicación que se le quiera dar a las redes móviles ad-hoc y a las tecnologías a utilizar para tal efecto. En [61] y [62], se menciona la existencia de un "horizonte ad-hoc", el cual se deriva del trabajo experimental en redes MANET. Dicho horizonte establece un alcance que limita el número de saltos (entre dos y tres) y la cantidad de nodos (entre 10 y 20) para crear redes ad hoc funcionales con la tecnología 802.11. Más allá de dicho límite, los beneficios de las MANET prácticamente desaparecen. Por lo que se propone estudiar y mejorar el rendimiento dentro de dicho alcance para posteriormente expandir sus límites como siguiente paso lógico.

Con base en lo anteriormente expuesto, se consideró apropiado establecer un radio de comunicación $r_{tx} = 33 \text{ m}$ para los dispositivos móviles inteligentes. Tomando en cuenta que sería posible alcanzar una distancia de aproximadamente 100 metros en tres saltos, se aumentó la longitud de los lados del área de simulación en un 50%, estableciendo así un área de simulación de $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$. De igual forma, se eligió un número inicial de nodos igual a 10, el cual se incrementa gradualmente hasta alcanzar los 40 nodos dentro del área de simulación, con la finalidad de observar el comportamiento de los protocolos de encaminamiento ante escenarios con diferentes densidades de dispositivos y tráfico.

Una vez establecido el alcance de comunicación de los nodos, se programó el escenario preliminar mostrado en la Figura 5, en el cual se posicionaron dos nodos a diferentes distancias para observar su comportamiento durante la transmisión y se ajustaron parámetros en el simulador para lograr una distancia de comunicación acorde a lo mencionado anteriormente.

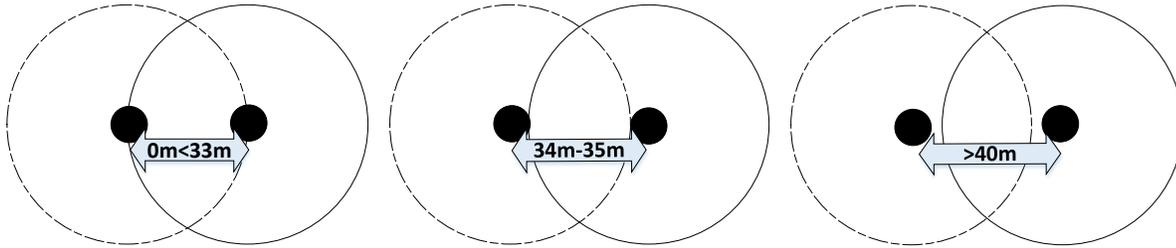


Figura 4 - Ajuste de la distancia de transmisión

Finalmente, se recabaron datos con respecto a la razón de pérdida de paquetes (*PLR: packet loss ratio*) tanto de control como de datos mediante el uso de la herramienta FlowMonitor de ns-3, la cual proporciona estadísticas de las simulaciones realizadas. En la Tabla 1 se resumen los resultados derivados de estas pruebas.

Tabla 1 - Razón de pérdida de paquetes variando distancias

Distancia (m)	PLR (%)	
	Control	Datos
>40	100	100
34-35	Entre 2.25 y 8.33	Entre 1.98 y 21.36
0<33	0	0

3.2 Funciones de los nodos participantes de la red ad-hoc médica

Dado que los dispositivos móviles inteligentes de los usuarios participantes de una red ad-hoc estarán conectados a un sensor o equipo médico portátil, estos tienen diferentes funcionalidades, las cuales son presentadas en tres casos. Cada caso describe el tipo de datos que manejarán los nodos como se muestra en [40], [41] y [42], así como la forma en que se gestiona y procesa dicha información, la caracterización del tráfico generado al momento de su envío y el tamaño típico del paquete.

Dado que existen distintos algoritmos de detección, compresión de datos sin pérdidas, procesamiento de las señales, entre otros, existe la posibilidad de aprovechar las capacidades de memoria y procesamiento disponibles en la mayoría de los dispositivos móviles inteligentes hoy en día. Reduciendo así la cantidad de datos a enviar de manera significativa [42]. Tomando en cuenta que la capacidad del medio de transmisión y la batería son recursos limitados, se consideró mantener un volumen moderado de tráfico de datos para evitar su uso excesivo de

dichos recursos, por lo que en las simulaciones sólo se utilizaron los últimos dos casos mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2 - Funcionalidades de los dispositivos inteligentes, caracterización del tráfico y tamaño del paquete para los tres casos propuestos.

Caso	Función de los Nodos	Caracterización del Tráfico Generado	Tamaño de Paquete (Bytes)
1	El dispositivo inteligente recibe la información sin procesar (equipo médico, sensores)	CBR	4000 ¹
2	Caso 1 + Se realiza procesamiento (re-muestreo de la señal, compresión)	On/Off	500 ²
3	Caso 2 + El dispositivo detecta algún evento y emite alerta	On/Off	64 ³

3.3 Tipos de nodos y funcionalidad

Los dispositivos encargados de la transmisión periódica de información médica son nodos móviles generadores de tráfico (T) y el nodo de interés (I) es el que detecta y genera alertas, cuya información debe ser enviada de manera prioritaria (Casos 2 y 3 de la Tabla 2 respectivamente). Estos nodos de igual forma tienen la capacidad de retransmitir los datos provenientes de nodos vecinos en caso de que así sea requerido.

Ambos tipos de nodos transmiten su información a una estación o dispositivo final, se asume que las capacidades de almacenamiento, procesamiento y batería de dicho equipo son mayores a los nodos móviles, por lo que también sería capaz de realizar análisis fuera de línea o almacenamiento de los datos recabados para su posterior envío. Tal es el caso de equipos de cómputo, servidores o inclusive otros dispositivos inteligentes que cumplan con las características anteriormente mencionadas. A este se le llama nodo Colector o *Sink* (S).

Finalmente, están los nodos encargados del encaminamiento de paquetes (*routers*), cuya única función es la de retransmitir los datos de nodos vecinos que se encuentren enviando información

¹ Representa la señal de electrocardiograma original obtenida en [40], la cual fue digitalizada a 360 muestras por segundo con una resolución de 11 bits por muestra.

² Representa la señal de electrocardiograma ya procesada.

³ Valor propuesto para paquetes con alertas.

al nodo *Sink*. Estos nodos se pueden ver como los dispositivos inteligentes de miembros de la comunidad o personal médico que se encuentren en la cercanía y también pertenezcan a la red ad-hoc. Dichos dispositivos pueden ser móviles (R_m) o estáticos (R_s). La Figura 3 muestra una representación de los nodos participantes en la red ad-hoc.



Figura 5 - Nodos participantes dentro de la red médica ad-hoc: colector o sink (S), generador de tráfico (T), interés (I), encaminamiento (R_m, R_s)

3.4 Escenarios de simulación

Debido a que el presente trabajo de investigación está centrado en la comparación de protocolos de encaminamiento para redes ad-hoc móviles, las cuales podrían desplegarse en áreas remotas, p. ej., comunidades rurales donde la infraestructura es limitada o inexistente, se idearon dos escenarios donde se podrían utilizar dichas redes.

El primer escenario (E1), mostrado en la Figura 6A, contempla un caso semejante a [19], donde la comunidad adquiere su propio equipo para brindar servicios a los miembros de la misma. En este caso, se podría tratar de equipo médico como el presentado en [31] y [32], entre otros, de tal forma que aquellos habitantes que necesiten constante monitorización de señales fisiológicas transmitan dicha información, de ser necesario, de manera cooperativa por medio de sus dispositivos móviles inteligentes hasta un equipo que recopile dichos datos, los cuales serán enviados al personal médico posteriormente.

El segundo escenario propuesto (E2) toma en consideración cuando se llevan a cabo campañas de salud pública en áreas remotas, donde se visitan dichas comunidades para brindar servicios de salud y se realizar distintas pruebas clínicas a sus habitantes, en este caso, a las personas que necesiten realizarse tales pruebas, se les podría brindar un dispositivo para monitorizar señales fisiológicas, las cuales serían recopiladas y procesadas de manera distribuida como se muestra en la Figura 6B.

Como se mencionó anteriormente, el área de simulación comprende una región de $150\text{ m} \times 150\text{ m}$, donde interactúan los dispositivos mencionados en la sección 3.2. A lo largo de la totalidad de las simulaciones la estación (S) se encuentra fija en la misma localización recibiendo los datos médicos transmitidos de manera cooperativa por los dispositivos inteligentes (T, I, R_m, R_s). Para llevar a cabo una serie de simulaciones bajo distintas circunstancias de densidad de

nodos y de tráfico de la red, se varió el número de nodos encargados del encaminamiento de paquetes (R_m) y el número de nodos generadores de tráfico (T).

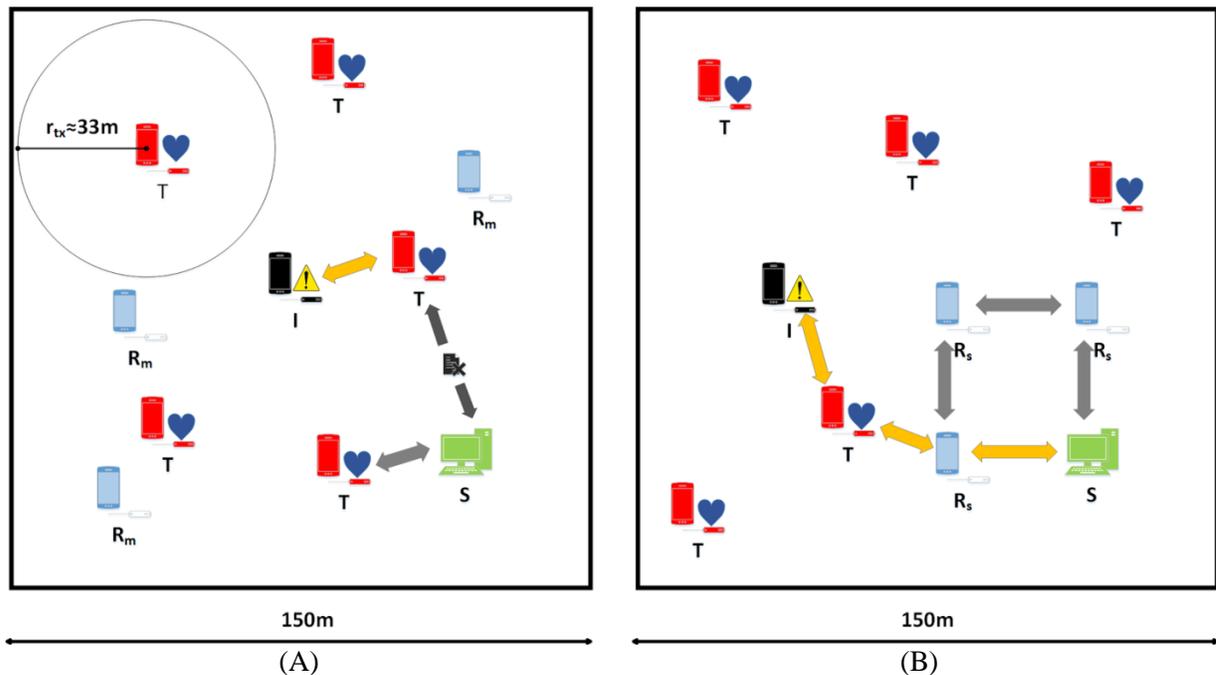


Figura 6 – Escenarios de simulación; (A) Escenario 1 (E1) con tres *routers* móviles, (B) Escenario 2 (E2) con Tres *Routers* Estáticos.

El escenario de simulación E1 consiste en una colección de nodos móviles, los cuales establecen una red ad-hoc inalámbrica. Las funciones y características de los nodos participantes en dicha red se explican a continuación:

- Nodo Colector o *Sink* (S):

Es el equipo encargado de recopilar los datos médicos, ya sea generados o retransmitidos por el resto de los nodos participantes de la red ad-hoc, dicho nodo es estático.

- Nodos generadores de tráfico (T):

Son las personas que requieran constante monitorización de señales fisiológicas y envían dichos datos médicos por medio de sus dispositivos inteligentes, estos nodos también tienen la capacidad de retransmitir los datos de sus vecinos y tienen movilidad.

- Nodo de interés (I):

Es un usuario móvil cuyo dispositivo inteligente inesperadamente activa una alerta debido a algún evento detectado por su dispositivo inteligente al momento de realizar algún tipo de procesamiento a las señales monitorizadas, este también es móvil y tiene la capacidad de retransmitir los datos de sus vecinos.

- *Routers* móviles (R_m):

Son usuarios móviles cuyos dispositivos inteligentes también participan en la red ad-hoc y se encuentren dentro del área de transmisión de los nodos S , T e I , su única tarea es la de retransmitir y encaminar datos.

En el escenario de simulación E2 participan los mismos nodos que el escenario E1, y estos cumplen las mismas funciones descritas anteriormente, la única diferencia es que E2 contiene otro tipo de nodo, el cual se define a continuación:

- *Routers* estáticos (R_s):

Son tres dispositivos fijos que se encuentran posicionados dentro del alcance de comunicación del nodo S , como se observa en la Figura 6B, dicho arreglo de dispositivos permite extender el área de cobertura del nodo colector y ayudan a distribuir las tareas de encaminamiento.

3.5 Estructura de paquetes

Para la transmisión de paquetes de datos se propone una estructura de los mismos, como se muestra en la Figura 7, los datos de prioridad se enviarían con información pertinente para este tipo de aplicaciones, es decir; identificación del paciente, fecha, hora, ubicación GPS e información preliminar del problema detectado.

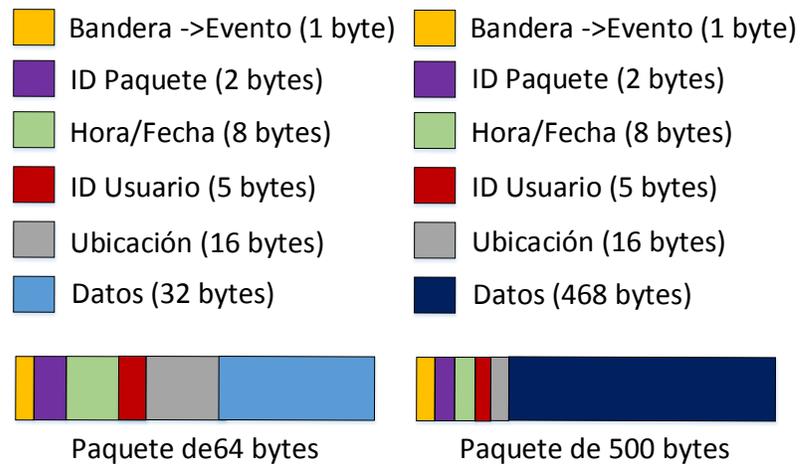


Figura 7 - Tamaño y Estructura de Paquetes

Es importante notar que para una implementación real, la información sensible como los datos médicos y la identificación del paciente debe ser protegida, teniendo en cuenta esquemas tradicionales de seguridad y privacidad como criptografía y autenticación. En [63] se propone un mecanismo de confianza para asegurar el encaminamiento de paquetes como una línea adicional de defensa contra los ataques comunes en WSNs, el cual podría utilizarse como base para la implementación propuesta.

3.6 Movilidad de los nodos

El modelo de movilidad y el intervalo de velocidad a la que se mueven los nodos permiten plantear el caso en el que un paciente en movimiento tiene una emergencia médica dentro de una región confinada. Cuando una emergencia es detectada por el dispositivo inteligente y se comienza a transmitir información sobre ella, la movilidad de los nodos puede provocar que se pierda conectividad con otros dispositivos. De acuerdo con [64], en situaciones en las que se presentan emergencias, la distribución espacio-tiempo de los dispositivos móviles es no uniforme e impredecible debido a la aleatoriedad en su movimiento [8].

El modelo de movilidad de caminata aleatoria (RW: *random walk*) permite que los nodos se muevan y cambien de dirección de formas extremadamente impredecibles. Consideramos esto como una forma apropiada de probar los protocolos de encaminamiento de paquetes, dado que al simular escenarios con diferentes densidades de nodos y tráfico de red en condiciones adversas de movilidad permitirá elegir el protocolo que se adecúe a este tipo de desafíos y presente la menor cantidad de pérdidas de información y retardo, ya que las fallas en la transmisión de la información prioritaria transmitida podría afectar el bienestar de los usuarios.

3.7 Medidas de desempeño

Para realizar el análisis cuantitativo de los protocolos de encaminamiento, se obtuvieron datos estadísticos concernientes a estos, se consideró tomar en cuenta la pérdida de paquetes, el retardo generado por la transmisión de los mismos, del nodo fuente al nodo destino, así como un recuento de las conexiones exitosas, es decir cuando por lo menos un paquete con información de alerta llegó a destino. De igual forma, se tomó en consideración el consumo de batería promedio en el nodo I , para esto, se utilizó el entorno de trabajo del simulador ns-3, descrito en la sección 2.5. A continuación se define formalmente la razón de pérdida de paquetes y el retardo promedio.

- Razón de Pérdida de paquetes (*PLR: packet loss ratio*)
- Retardo Promedio (*MD: mean delay*)

Sean:

t_{tx} : Instante de tiempo en el que se envía un paquete desde el nodo fuente

t_{rx} : Instante de tiempo cuando el nodo destino recibe el paquete

p_{tx} : Número de paquetes emitidos por el nodo fuente

p_{rx} : Número de paquetes recibidos exitosamente por el nodo destino

Tal que:

$$PLR = \sum \left(\frac{p_{tx} - p_{rx}}{p_{tx}} \right) * (100) [\%], \quad p_{tx} > 0 \quad \dots \quad (3.6)$$

$$MD = \sum \left(\frac{t_{rx} - t_{tx}}{p_{rx}} \right) [ms], \quad p_{rx} > 0 \quad \dots \quad (3.7)$$

Donde:

$$t_{tx} < t_{rx}$$

$$p_{rx} \leq p_{tx}$$

3.8 Modelo de simulación

Como se mencionó anteriormente, el número inicial de dispositivos es igual a 10, considerando los siguientes nodos en el primer escenario de simulación: $S = 1$; $I = 1$; $R_m = 3$; $R_s = 0$ y $T = 5$. En el segundo escenario, los nodos iniciales son: $S = 1$; $I = 1$; $R_m = 0$; $R_s = 3$; $T = 5$.

Con la finalidad de obtener datos estadísticos confiables, el manual de ns-3, recomienda realizar un mínimo de 20 repeticiones para cada experimento, desafortunadamente en el escenario propuesto, se encontró un margen de error elevado (mayor a 38%) para tal número de simulaciones, por tal motivo, se definió un nivel de confianza del 95% y se aumentó el número corridas de simulación, de la corrida 0 a la 500, esto con la finalidad de obtener un margen de error aceptable, lo cual se logró al obtener márgenes de error de hasta ± 2.48 %.

El conjunto de casos considerados para realizar las simulaciones es el siguiente: El caso 1 corresponde a un escenario en el que sólo se aumenta la densidad de los *routers* móviles, cinco a la vez, esto con la finalidad de poner a prueba los protocolos de encaminamiento bajo diferentes densidades de red, dejando el tráfico generado por cinco nodos T constante. El caso 2 corresponde a un escenario en el que sólo se aumenta la densidad de nodos generadores de tráfico, cinco a la vez, sometiendo a los protocolos de encaminamiento a condiciones variables de tráfico. Finalmente el caso 3 corresponde a una combinación de los anteriores, poniendo a prueba los protocolos de encaminamiento bajo distintas condiciones de densidad de tráfico y nodos. La variación de los nodos en cada caso se muestra a continuación:

- Escenario 1: Nodos iniciales $\rightarrow (S = 1, I = 1, R_s = 0, R_m = 3, T = 5; \text{Total} = 10)$
 - Caso 1: Solamente se aumentó el número de *routers* móviles, cinco nodos a la vez, tal que: $R_m = 3 + \{5, 10, 15, 20, 25, 30\}$
 - Caso 2: Solamente se aumentó el número de generadores de tráfico, cinco nodos a la vez, tal que: $T = \{5, 10, 15, 20, 25, 30\}$
 - Caso 3: Variación de *routers* móviles y generadores de tráfico, donde el número de cada uno de estos aumentó cinco nodos a la vez, tal que: $R_m, T = \{5, 10, 15\}$

- Escenario 2: Nodos iniciales $\rightarrow (S = 1, I = 1, R_s = 3, R_m = 0, T = 5; \text{Total} = 10)$
 - Caso 1: Solamente se aumentó el número de *routers* móviles, cinco nodos a la vez, tal que: $R_m = \{5, 10, 15, 20, 25, 30\}$
 - Caso 2: Solamente se aumentó el número de generadores de tráfico, cinco nodos a la vez, tal que: $T = \{5, 10, 15, 20, 25, 30\}$
 - Caso 3: Variación de *routers* móviles y generadores de tráfico, donde el número de cada uno de estos aumentó cinco nodos a la vez, tal que: $R_m, T = \{5, 10, 15\}$

Así, las simulaciones se realizaron de tal forma que la densidad de nodos varió de 10 a 40 nodos en cada escenario.

En cada corrida de simulación, los nodos móviles T , R_m e I fueron ubicados aleatoriamente de acuerdo con una distribución uniforme dentro del área de simulación. Además, las velocidades de dichos nodos fueron asignadas de manera aleatoria, en un intervalo entre 1 y 2 m/s de acuerdo con el modelo de movilidad `RandomWalk2dMobilityModel` de ns-3, donde la velocidad y dirección se eligen a partir de valores predefinidos, en este caso entre $[1, 2]$ m/s y $[0, 2\pi]$, respectivamente. Los cambios de movimiento ocurren a un intervalo de tiempo constante $t = 25$ s, al final de los cuales se selecciona una nueva dirección y velocidad. En la Tabla 3 se resumen las características como el modelo de movilidad, tamaño de paquetes y patrones de tráfico implementados en el simulador al principio de cada uno de los escenarios.

Tabla 3 - Características de los nodos en la simulación; modelo de movilidad, posición, tamaño del paquete y patrón de tráfico

Número de nodos	Tipo de nodos	Descripción o función	Movilidad	Posición	Tamaño de paquetes (Bytes)	Patrón de tráfico (UDP)
1	Colector	Recibir y procesar información médica	Ninguno	Fijo	-	-
1	Interés	Detección de eventos, emergencias, emisión de alertas	RW	Aleatorio	64	On/Off
3	<i>Routers</i>	Retransmisión	RW (E1) Ninguna (E2)	Aleatorio (E1) Fijo (E2)	-	-
5	Tráfico	Usuarios enviando datos médicos al nodo colector	RW	Aleatorio	500	On/Off

Para la simulación se utilizó una estructura de los paquetes de datos semejante a la propuesta en la sección 3.5, de tal forma que se añadió una cabecera personalizada a cada uno de estos.

Para la recolección de datos estadísticos, fue necesario prescindir del uso de `FlowMonitor` debido a que dicha herramienta no presenta resultados relacionados al protocolo de encaminamiento DSR, por lo que se implementó una aplicación propia dentro del simulador para obtener estadísticas de todos los protocolos a estudiar, cabe mencionar que en medida de lo posible se compararon los resultados obtenidos por la solución implementada con los de

FlowMonitor para verificar su concordancia. Dicha estructura de paquetes permitió lograr el rastreo de cada uno de estos del nodo fuente al nodo destino.

Finalmente, en la Tabla 4 se muestra un compendio de la selección de parámetros restantes elegidos para realizar la simulación, así como los modelos utilizados al momento de la codificación en ns-3.

Tabla 4 - Selección de parámetros y su implementación en ns-3

Parámetros	Selección	Modelo en ns-3
Propagación	Retardo (velocidad constante), pérdidas (Friis)	ConstantSpeedPropagationDelayModel, FriisPropagationLossModel
Protocolo de transporte	UDP	UdpSocketFactory
Control de acceso al medio (MAC) y especificación del estándar	IEEE 802.11b, modo ad-hoc	AdhocWifiMac, WIFI_PHYSTANDARD_802.11b
Movilidad	Random walk	RandomWalk2dMobilityModel
Energía	Radio, batería	WifiRadioEnergyModel, BasicEnergySourceHelper

Capítulo 4

Análisis de resultados

Los resultados de la simulación se muestran en las subsecuentes gráficas. En primera instancia se muestra la comparación entre el comportamiento de los protocolos de encaminamiento de paquetes en los escenarios E1 y E2, estos se obtuvieron al aumentar el número de nodos de encaminamiento de paquetes (R_m) y los nodos generadores de tráfico (T) por separado, para posteriormente combinar ambos casos, aumentando los nodos T y R_m simultáneamente. Se realizaron un total de 501 simulaciones de cada uno de los tres casos mencionados (gráficas A, B y C respectivamente).

En general, el escenario E2 presenta mejores resultados con respecto al escenario E1, esto debido a la presencia de los nodos de encaminamiento fijos entorno al nodo colector, los cuales extienden el área de cobertura de este último, ya que este arreglo ayuda a distribuir de manera más efectiva las tareas de encaminamiento, pudiendo reducir la congestión de paquetes.

Como puede observarse en las Figuras 8A, 8B, 8C, en términos generales, los protocolos reactivos se comportan de manera más eficiente que los protocolos proactivos con respecto a la relación de pérdida de paquetes (PLR). El protocolo que se comporta de manera más eficiente con una baja densidad de nodos es DSR, mejora hasta 2 % en la pérdida de paquetes con respecto a AODV. Al aumentar el número de nodos, AODV muestra una mejora del 12 % con respecto a DSR con una densidad de 40 nodos. Aunque en escenarios con tráfico de información intenso, ambos protocolos tienen comportamiento semejante. En general, con todos los protocolos de encaminamiento se puede observar la siguiente tendencia: En primer lugar, a medida que aumenta el número de nodos, la relación de pérdida de paquetes disminuye hasta un punto en el que comienza a aumentar de nuevo. Dicho comportamiento se puede atribuir al aumento de la densidad de nodos y la intensidad de tráfico, provocando colisiones entre los datos médicos, los paquetes de control y las retransmisiones como un efecto combinado. Lo cual provoca que los protocolos proactivos presenten un desempeño inferior.

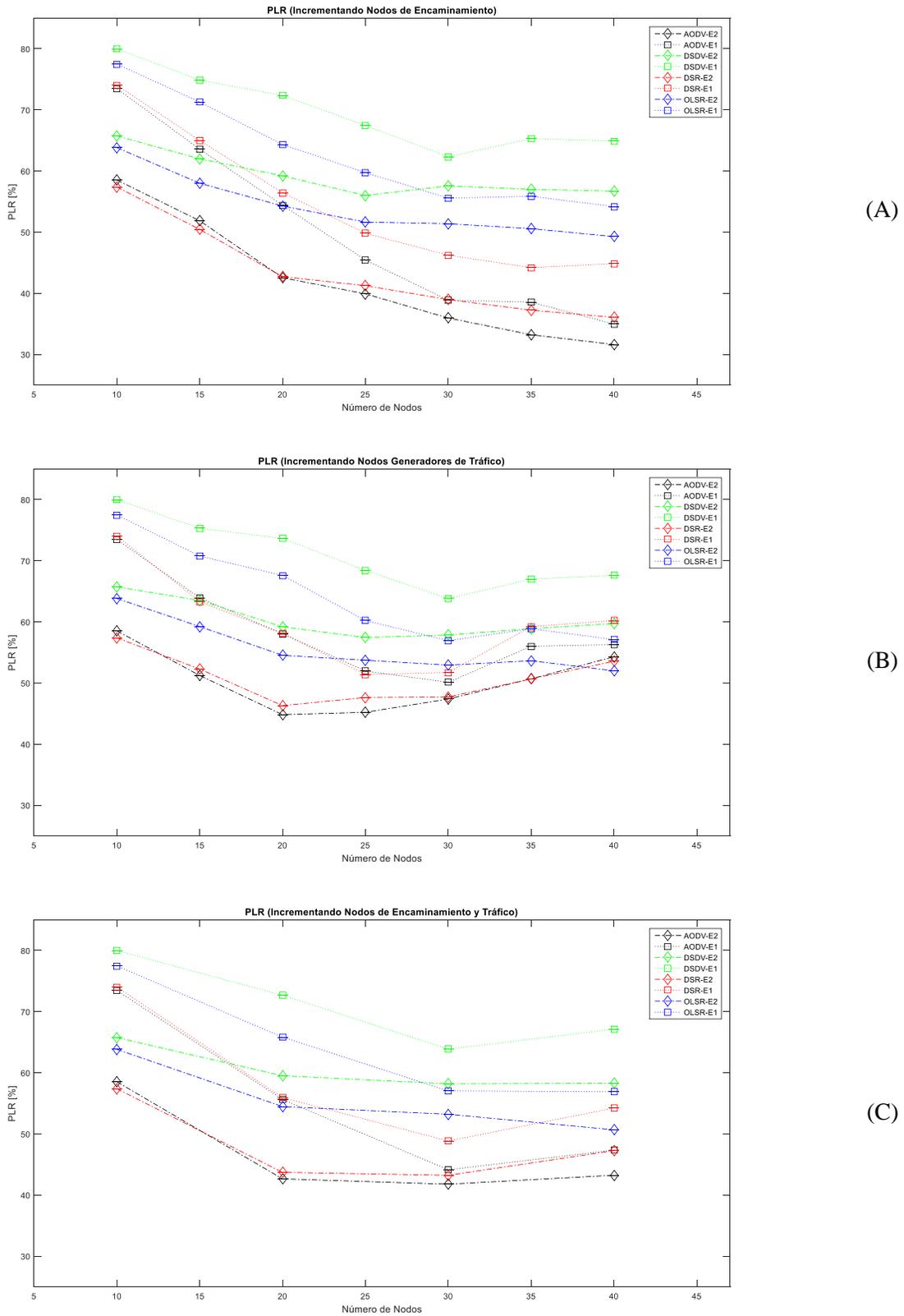
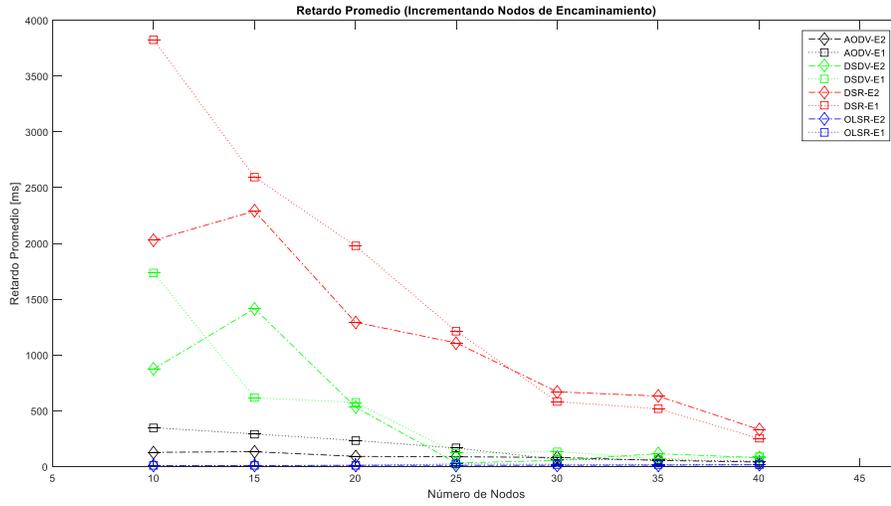
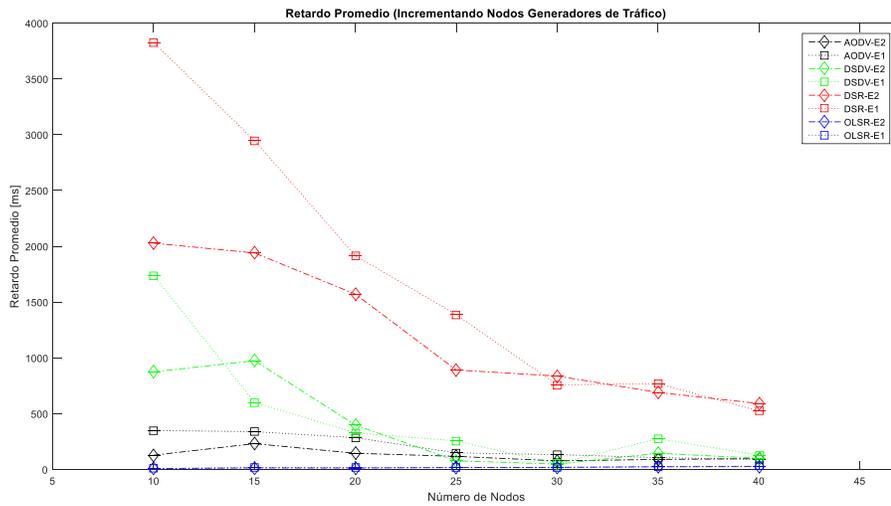


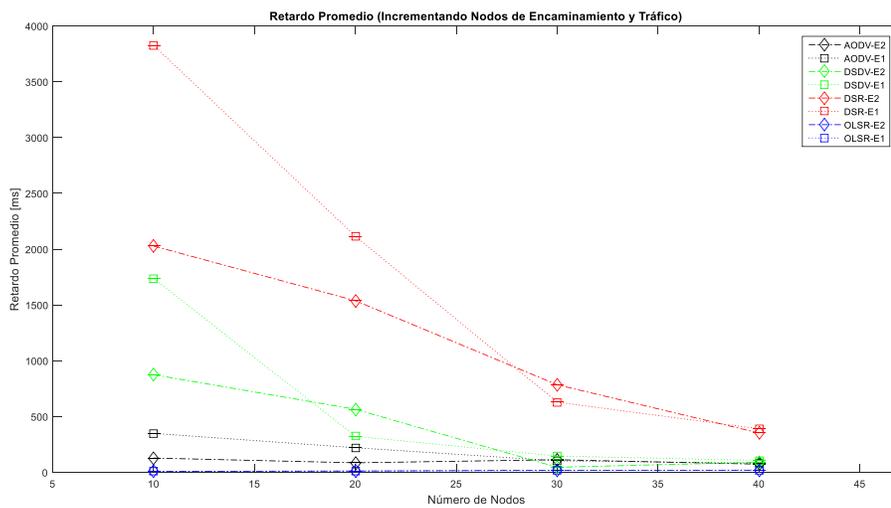
Figura 8 - Razón de pérdida de paquetes contra número de nodos
 (A) Incrementando nodos R_m ; (B) Incrementando nodos T ; (C) Incrementando nodos R_m y T .



(A)

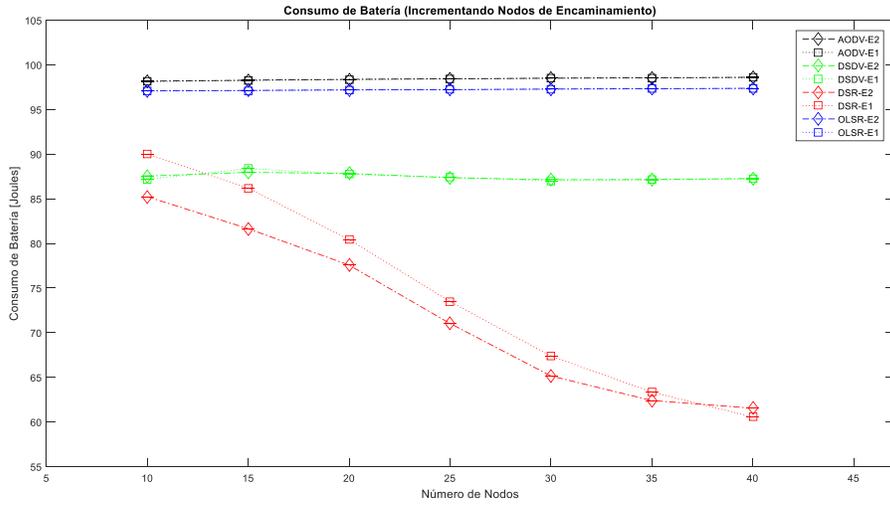


(B)

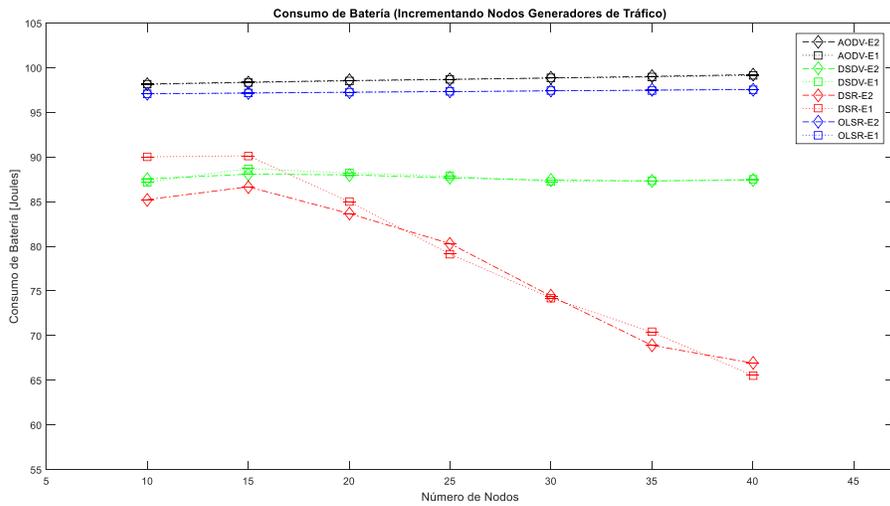


(C)

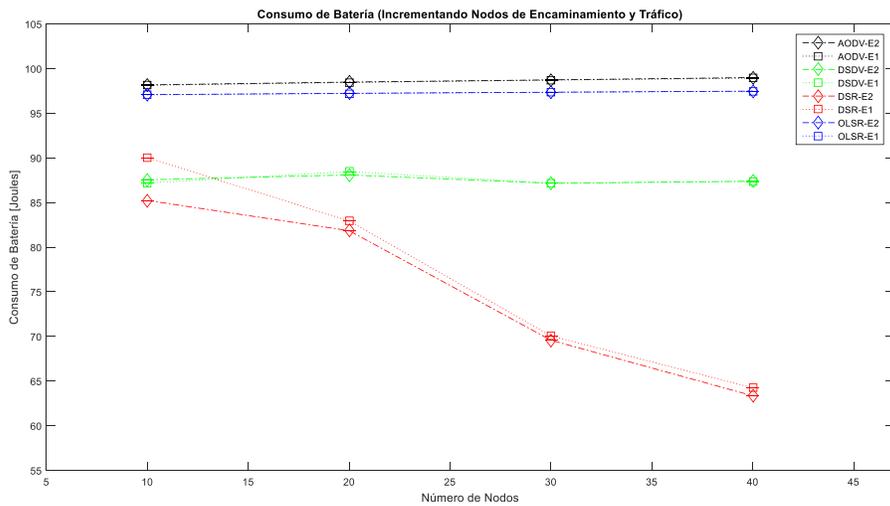
Figura 9 - Retardo promedio contra número de nodos
 (A) Incrementando nodos R_m ; (B) Incrementando nodos T ; (C) Incrementando nodos R_m y T .



(A)

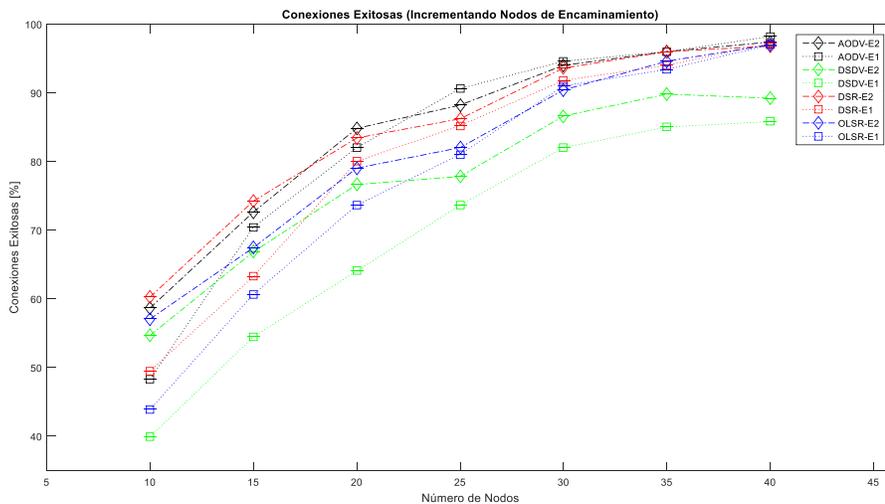


(B)

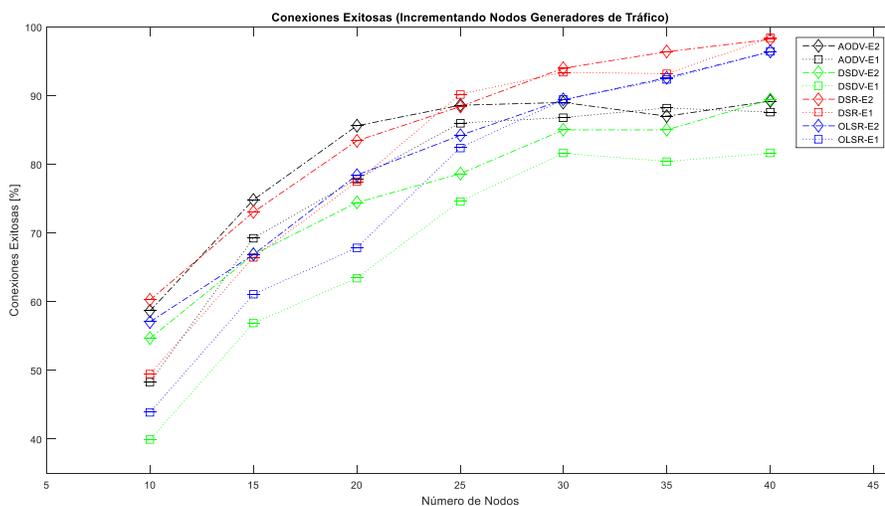


(C)

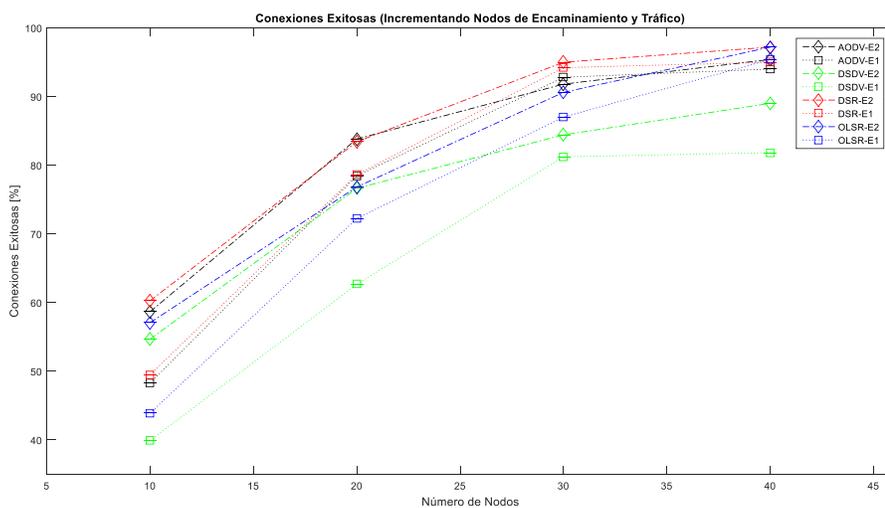
Figura 10 - Consumo de batería contra número de nodos
 (A) Incrementando nodos R_m ; (B) Incrementando nodos T ; (C) Incrementando nodos R_m y T .



(A)



(B)



(C)

Figura 11 - Conexiones exitosas contra número de nodos
 (A) Incrementando nodos R_m ; (B) Incrementando nodos T ; (C) Incrementando nodos R_m y T .

Estos resultados ayudan a prever la posibilidad de enviar datos médicos a través de redes móviles ad-hoc, lo cual podría aumentar la posibilidad de recibir atención médica de manera oportuna, especialmente en entornos de conectividad baja o nula infraestructura. Si bien esto es factible, deben tenerse en cuenta algunas consideraciones como la pérdida de paquetes. Esto podría resolverse en gran medida implementando redundancia de datos por parte del nodo fuente y solicitudes de retransmisión en la entidad receptora, ambos mecanismos implementados a nivel de aplicación.

Cuando se compara el retardo promedio, definido en la sección 3.7, en la transmisión de paquetes entre los protocolos estudiados, se puede observar en las figuras 9A, 9B y 9C, que DSR presenta un mayor retardo en contraste con los demás protocolos, lo cual es consistente con la bibliografía, donde se mencionan las heurísticas con las que trabaja dicho protocolo en escenarios donde la densidad de nodos es baja, disminuyendo su retardo conforme la cantidad de nodos aumenta. En estas figuras, también puede observarse que OLSR ofrece el mejor rendimiento en este sentido, ya que sigue un enfoque proactivo que reduce el retardo al momento de enviar los paquetes. Sin embargo, vale la pena destacar que el protocolo AODV, a pesar de ser un protocolo reactivo, se comporta de manera similar a OLSR.

En el caso del uso de la batería, las figuras 10A, 10B y 10C muestran que el protocolo DSR se comporta de manera más eficiente, aunque se debe considerar que los resultados arrojados con respecto a dichos datos no toman en cuenta el consumo de energía debido al procesamiento al momento de elegir las rutas. En este mismo sentido, AODV y OLSR muestran un comportamiento similar a pesar de que AODV es un protocolo reactivo, esto se debe a transmisiones periódicas de mensajes de control HELLO durante la fase de mantenimiento de rutas en dicho protocolo.

A pesar de la pérdida de paquetes presentada en las simulaciones, como se observa en las figuras 11A, 11B y 11C, es posible lograr un número de conexiones exitosas aceptable, en el que por lo menos un paquete llegó a destino. Con esto se puede observar la utilidad del modelo presentado para hacer llegar mensajes de emergencia aunque se carezca de infraestructura de red. En este sentido se puede observar que DSR presenta un mejor comportamiento con respecto a los demás protocolos, logrando hasta 98% de conexiones exitosas en ambientes con tráfico de datos alto.

Una de las razones principales por la que otros trabajos de investigación no incluyen un análisis cuantitativo del protocolo DSR cuando se realizan comparaciones entre distintos protocolos de encaminamiento en ns-3, es porque no se pueden obtener datos estadísticos mediante el empleo de la herramienta FlowMonitor, sin embargo, como se demostró por medio de simulaciones exhaustivas; en general dicho protocolo presenta los mejores resultados en cuanto al consumo de batería y el número de conexiones exitosas en comparación con los demás protocolos.

Por último, con el fin de evaluar cómo la pérdida de paquetes afecta a los datos de los signos vitales monitoreados, se utilizó una porción de 25 segundos de un registro original de datos de ECG de PhysioNet MIT-BIH Arrhythmia Database [39]; con la cual, teniendo en cuenta el

promedio de pérdida de paquetes, que es al menos de 29% (ver Figura 8A), se obtuvo una versión dañada de la señal original proporcional a estos resultados. Una vez generados estos archivos, se implementó un Algoritmo de Detección de complejos QRS basado en el algoritmo de Pan y Tompkins, presentado en [6]. En la Figura 12 se muestra el diagrama de bloques de dicho algoritmo.

Finalmente, se analizó tanto la señal original como una versión dañada para compararlas como se muestra en las Figuras 13A y 13B.

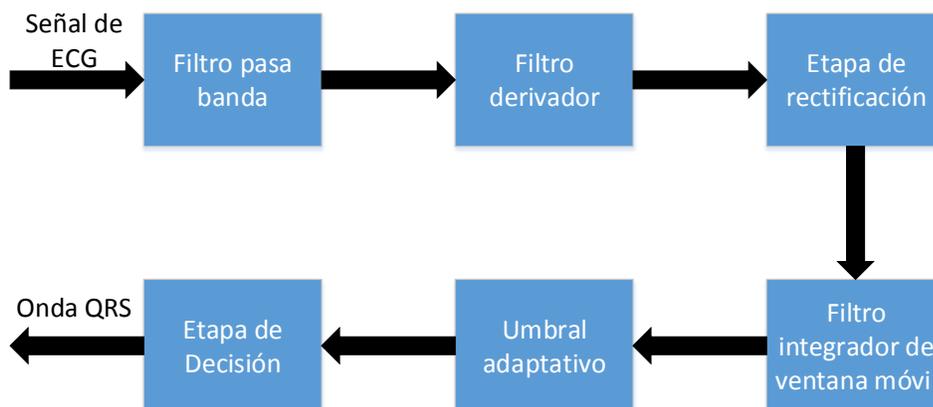
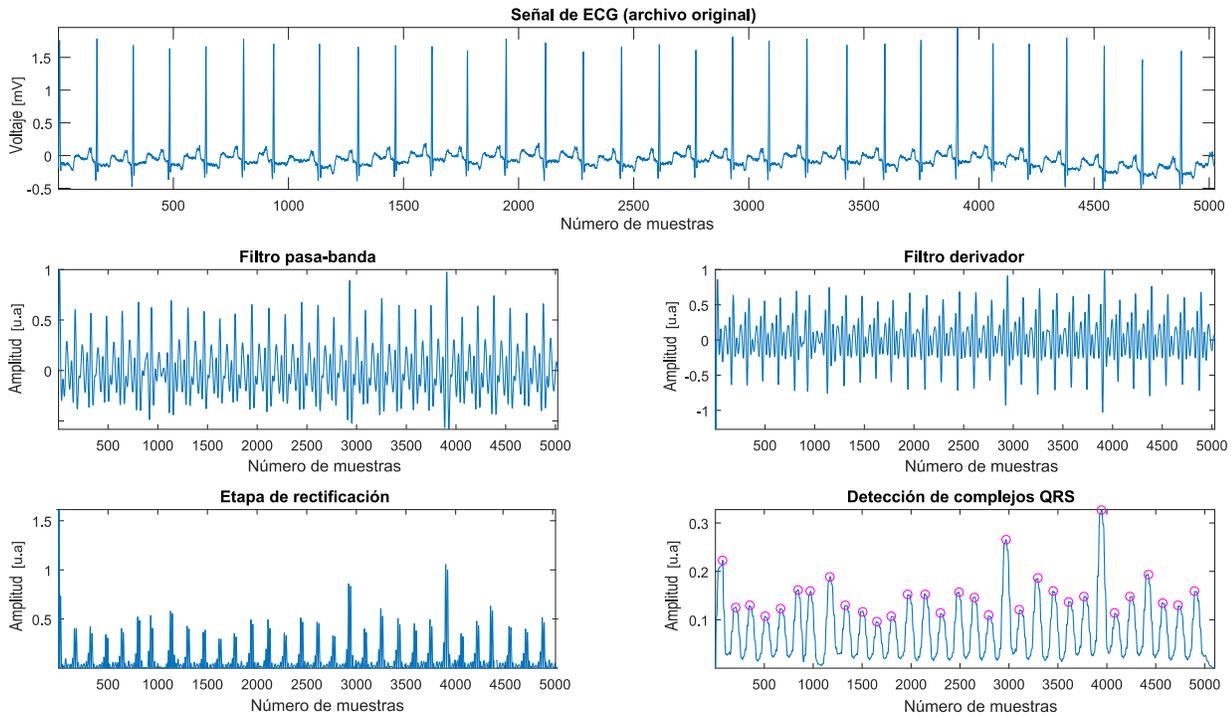


Figura 12 – Diagrama a bloques del algoritmo de Pan y Tompkins

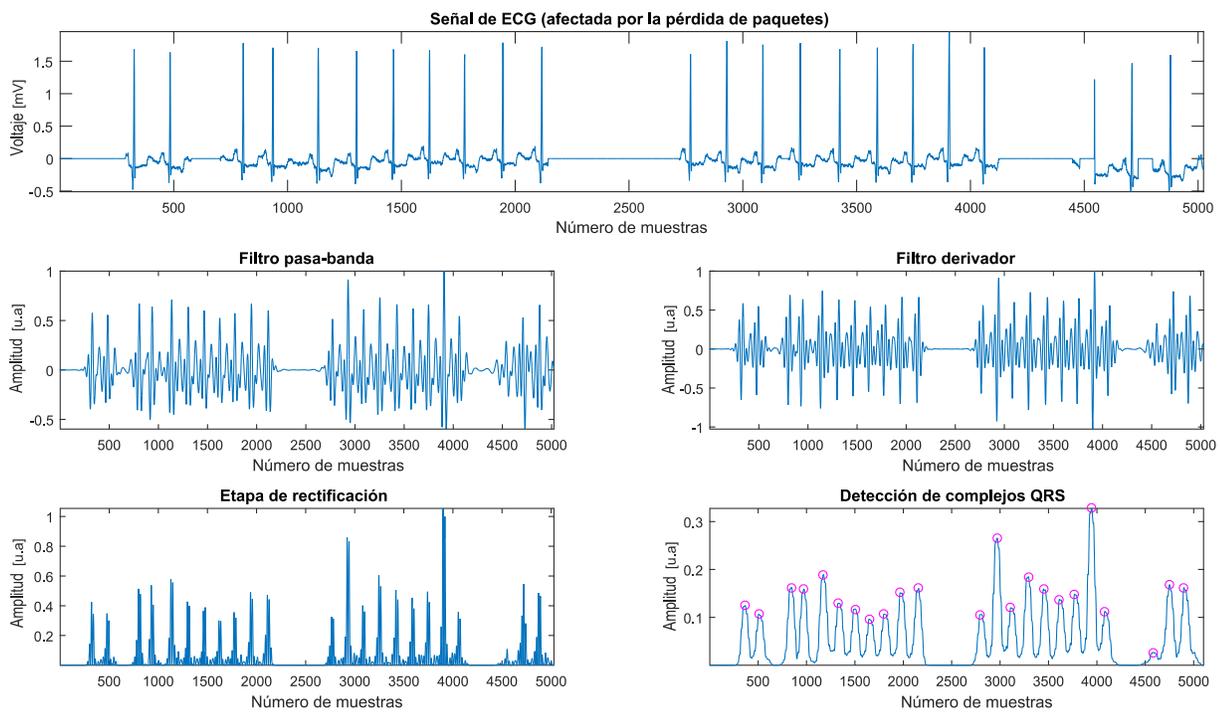
En la Figura 13A se puede observar como la utilización del algoritmo de Pan y Tompkins en una porción de señal de ECG permitió encontrar 100 % de los complejos QRS, de los cuales 0 % fueron falsos positivos. Debido a la pérdida de información en la transferencia de paquetes, se observó que en la señal afectada, mostrada en la Figura 13B, se detectó un 17.4% de falsos positivos, por lo que en total sólo se encontró el 61.3 % de los complejos QRS correctamente.

Si bien la cantidad de paquetes perdidos representó un 29 %, al momento de efectuar su procesamiento se observó que la pérdida de información para la detección de complejos QRS fue del 38.7 %.

Se contempla la posibilidad de que los resultados mostrados en esta investigación sean útiles para proponer mejoras a los protocolos de encaminamiento de paquetes existentes y ayudar a diseñar nuevos mecanismos teniendo en cuenta la importancia de la información médica que se está enviando. Se requieren esfuerzos multidisciplinarios para crear soluciones que permitan ayudar a resolver los desafíos existentes en la prestación de servicios de salud a través de las tecnologías de la información y la comunicación.



(A)



(B)

Figura 13 – Comparación de señales de electrocardiograma (ECG)
 (A) Original; (B) Dañada debido a la pérdida de paquetes.

Capítulo 5

Conclusiones y Perspectivas

Este análisis presenta el concepto de redes médicas ad-hoc (*MedAhNet: medical ad-hoc network*), el cual es un modelo de comunicación inalámbrica para el encaminamiento de paquetes de datos médicos.

La investigación presentada muestra resultados basados en simulaciones computacionales en ns-3.26 mediante la evaluación de dos protocolos de encaminamiento proactivos (DSDV, OLSR) y dos reactivos (AODV, DSR) para redes MANET, tomando en cuenta modelos de tráfico de información proporcionada por instrumentos y sensores médicos. Las pruebas realizadas a estos protocolos fueron llevadas a cabo de manera exhaustiva y en condiciones adversas de movilidad, alcance de transmisión y tráfico en un solo ambiente de simulación.

De acuerdo a lo estudiado en la literatura, no se encontró evidencia de que se haya reportado un estudio cuantitativo que incluyera los cuatro protocolos de encaminamiento mencionados anteriormente en ns-3 bajo condiciones que tomen en cuenta una aplicación en particular como la expuesta en el presente trabajo de investigación. Por lo que se diseñó e implementó un escenario de simulación para el envío de datos con información médica a través de una red ad-hoc, donde se tomó en consideración los modelos de tráfico de datos provenientes de sensores e instrumental médico. De esta forma se realizó un análisis a los protocolos encargados del encaminamiento de paquetes en distintas condiciones de densidad de nodos y tráfico.

A diferencia de otros estudios, el presente trabajo de investigación incluye resultados concernientes al uso de la batería para cada uno de los protocolos, por lo que ofrece otra característica a tomar en cuenta al momento de elegir el que mejor se acople al tipo de aplicación propuesta.

Los resultados muestran que bajo las condiciones propuestas, los protocolos reactivos se comportan de manera más eficientemente que los protocolos proactivos y que el protocolo DSR tiene el mejor rendimiento con baja densidad de nodos. A medida que aumenta el número de nodos, AODV muestra un mejor rendimiento que DSR, sin embargo, DSR muestra un uso eficiente de la batería. Vale la pena mencionar que el protocolo AODV, a pesar de ser un protocolo reactivo, se comporta de manera similar a los protocolos proactivos en este sentido.

También se muestra que es posible lograr un número de conexiones exitosas, es decir, que por lo menos un paquete llega al nodo destino. En este sentido DSR presenta un mejor comportamiento con respecto a los demás protocolos en escenarios donde el tráfico de datos es alto, por lo tanto se puede observar la utilidad del modelo presentado para hacer llegar mensajes de alerta en escenarios en los que la infraestructura de comunicaciones haya sido dañada, por ejemplo en caso de desastres naturales.

Mediante la implementación de un método de recolección de datos estadísticos dentro del simulador ns-3.26, utilizando la estructura de paquetes propuesta, se pudo lograr una comparación donde se tomaron en cuenta los cuatro protocolos de encaminamiento mencionados, lo cual permite vislumbrar su posterior utilización para realizar adecuaciones a estos o inclusive llevar a cabo la implementación de nuevos algoritmos de encaminamiento y su posterior puesta a prueba contra los protocolos existentes.

Al presentar un análisis de los datos médicos mediante la implementación de un algoritmo de detección de complejos QRS y utilizando datos obtenidos por medio de simulaciones, se pudo realizar la comparación entre una señal dañada debido a la pérdida de información al momento de su envío a través de una red ad-hoc y la señal original, y se observó que la pérdida de paquetes se afecta de manera significativa la detección de tales complejos QRS.

Una posible solución a lo anteriormente planteado sería implementar mecanismos como redundancia y solicitud de retransmisiones. Esto con la finalidad de evitar la pérdida de información, aunque eso, significaría aumentar la cantidad de tráfico de red, lo que podría provocar mayor número de colisiones. Otra posible solución sería crear un modelo adaptable, donde los nodos decidan a partir de la detección de nodos vecinos o densidad de tráfico el protocolo de encaminamiento a utilizar, para esto, sería necesario utilizar mensajes de control “multiprotocolo”, es decir que estos contengan información de dos o más protocolos de encaminamiento, lo cual provocaría un aumento significativo tanto en el tamaño de paquetes como en el procesamiento de dicha información.

Referencias Bibliográficas

- [1] Richard V. Milani y Carl J.Lavie. Health Care 2020: Reengineering Health Care Delivery to Combat Chronic Disease. *American Journal of Medicine*, 128(4):337–343, abril 2015.
- [2] World Health Organization. Global diffusion of eHealth: making universal health coverage achievable: report of the third global survey on eHealth, páginas 16-45, diciembre 2016.
- [3] World Health Organization. Global Observatory for eHealth series-Volume 2- Telemedicine–Opportunities and developments in Member States. 978(92):4, enero 2011.
- [4] Riazul Islam, Daehan Kwak, Humaun Kabir, Mahmud Hossain y Kyung-Sup Kwak. The Internet of Things for Health Care: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, 3(1):678–708, junio 2015.
- [5] Pavel Masek, Ammar Muthanna, y Jiri Hosek. Suitability of MANET routing protocols for the next-generation national security and public safety systems. en *Conference on Smart Spaces*, páginas 242–253, agosto 2015.
- [6] Pan Jiapu y Willis J. Tompkins. A Real-Time QRS Detection Algorithm. *IEEE Trans. Biomedical Engineering*. BME-32(3): 230–236, marzo 1985.
- [7] Hande Alemdar y Cem Ersoy. Wireless sensor networks for healthcare: A survey. *Computer Networks*. 54(15): 2688–2710, octubre 2010.
- [8] Hiroki Nishiyama, Masaya Ito y Nei Kato. Relay-by-smartphone: realizing multihop device-to-device communications. *IEEE Communications Magazine*. 52(4):56–65, abril 2014.
- [9] Chien-Chih Lai, Ren-Guey Lee, Chun-Chieh Hsiao, Hsin-Sheng Liu y Chun-Chang Chen. A H-QoS-demand personalized home physiological monitoring system over a wireless multi-hop relay network for mobile home healthcare applications. *Journal of Network and Computer Applications*. 32(6):1229–1241, noviembre 2009.
- [10] Young-DongLee y Wan-YoungChung. Wireless sensor network based wearable smart shirt for ubiquitous health and activity monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 140(2):390–395, julio 2009.

- [11] Victor Shnayder, Bor-rong Chen, Konrad Lorincz, Thaddeus R. F. Fulford-Jones y Matt Welsh. Sensor networks for medical care. En *Harvard Computer Science Group Technical Report*, agosto 2005.
- [12] Stefano Basagni, Marco Conti, Silvia Giordano e Ivan Stojmenovic. Mobile Ad-hocNetworking: The Cutting Edge Directions. Páginas 75-235, 2da Edición, John Wiley & Sons, 2013.
- [13] Share content with AirDrop on your iPhone, iPad, or iPod touch - Apple Support. <https://support.apple.com/en-us/HT204144>. Accedido el 02/06/2017.
- [14] Use AirDrop to send content from your Mac - Apple Support. <https://support.apple.com/en-us/HT203106>. Accedido el 02/06/2017.
- [15] Start Something - Open Garden. <https://www.opengarden.com/firechat.html>. Accedido el 02/06/2017.
- [16] Demographics of Mobile Device Ownership and Adoption in the United States | Pew Research Center. <http://www.pewInternet.org/fact-sheet/mobile/>. Accedido el 31/05/2017.
- [17] Estadística a propósito del Día Mundial del Internet 2016. Datos nacionales. http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2016/Internet2016_0.pdf. Accedido el 04/12/2017.
- [18] Estadística a propósito del Día Mundial del Internet 2017. Datos nacionales. http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2017/Internet2017_Nal.pdf. Accedido el 04/12/2017.
- [19] El IFT autoriza la primera concesión de uso social indígena para prestar servicios de telecomunicaciones (Comunicado 73/2016). <http://www.ift.org.mx/comunicacion-y-medios/comunicados-ift/es/el-ift-autoriza-la-primera-concesion-de-uso-social-indigena-para-prestar-servicios-de>. Accedido el 10/11/2017.
- [20] Erick Huerta Velázquez y Peter Lawrence Bloom. Manual de Telefonía Celular Comunitaria, Conectando al siguiente billón. Redes por la Diversidad, Equidad y Sustentabilidad A. C., México, 2016.
- [21] Wei Peng, Shaheen Kanthawala, Shupeí Yuan y Syed Ali Hussain. A qualitative study of user perceptions of mobile health apps. *BMC Public Health*. 16(1):4-11, diciembre 2016.
- [22] Arul Chib, Michelle Helena van Velthoven y Josip Car. mHealth Adoption in Low-Resource Environments: A Review of the Use of Mobile Healthcare in Developing Countries. *Journal of Health Communication*. 20(1):4-34, enero 2015.

- [23] Fade: Fall detector. <http://fade.iter.es/>. Accedido el 01/06/2017.
- [24] FallSafety Pro with Fall Detection and Emergency Contact Fall Alerts. <https://www.fallsafetyapp.com/>. Accedido el 01/06/2017.
- [25] digiDoc Technologies. <http://digidoctech.no/products-1.html>. Accedido el 01/06/2017.
- [26] Cardiio | Heart Rate Monitor App, Check Your Pulse. <https://www.cardiio.com/>. Accedido el 01/06/2017.
- [27] iCare Health Monitor--Mobile measuring blood pressure, heart rate, vision, hearing, lung capacity, color blindness. <http://www.icarefit.com/>. Accedido el 01/06/2017.
- [28] Instant Heart Rate by Azumio. <http://www.azumio.com/s/instantheartrate/index.html>. Accedido el 01/06/2017.
- [29] John Allen. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiological Measurement* 28(3):R1–R39, marzo 2007.
- [30] Jinseok Lee, Bersain A. Reyes, David D. McManus, Oscar Maitas y Ki H. Chon. Atrial Fibrillation Detection Using an iPhone 4S. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 60(1):203–206, enero 2013.
- [31] David D. McManus, Jo Woon Chong, *et al.* PULSE-SMART: Pulse-Based Arrhythmia Discrimination Using a Novel Smartphone Application. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology* 27(1):51–57, enero 2016.
- [32] AliveCor. <https://www.alivecor.com/>. Accedido el 02/06/2017.
- [33] eMotion ECG | BittiumBiosignalsOy. <http://www.megaemg.com/products/emotion-ecg/>. Accedido el 02/06/2017.
- [34] Joseph Macker. Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations, 1999.
- [35] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y.-C. Hu, y J. Jetcheva. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols, en *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. Páginas 85–97, octubre 1998
- [36] C. E. Perkins and P. Bhagwat, “Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers,” in *ACM SIGCOMM computer communication review*, 1994, vol. 24, pp. 234–244.

- [37] Thomas Clausen y Philippe Jacquet. Optimized link state routing protocol (OLSR). No. RFC 3626, 2003.
- [38] Charles Perkins , Elizabeth Belding-Royer y Samir Das. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. No. RFC 3561, 2003.
- [39] David Johnson, Yin-chun Hu, y David Maltz. The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile ad hoc networks for IPv4. No. RFC 4728, 2007.
- [40] PhysioNet. <https://physionet.org/>. Accedido el 20/11/2016.
- [41] A. Ahmad, A. Riedl, W. J. Naramore, N.-Y. Chou, y M. S. Alley. Scenario-Based Traffic Modeling for Data Emanating from Medical Instruments in Clinical Environment. 1(1):529–533, marzo 2009.
- [42] Geoffrey G. Messier e Ivars G. Finvers. Traffic models for medical wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters* 11(1):13–15, enero 2007.
- [43] ns-3. <https://www.nsnam.org/>. Accedido el 10/04/2017.
- [44] P. L’ecuyer, R. Simard, E. J. Chen, y W. D. Kelton, “An object-oriented random-number package with many long streams and substreams”, *Oper. Res.* 50(6):1073–1075, diciembre 2002
- [45] S. A. Ade y P. A. Tijare. Performance comparison of AODV, DSDV, OLSR and DSR routing protocols in mobile ad hoc networks. *International journal of information technology and knowledge management.* 2(2):545-548, julio 2010.
- [46] R. Tiwari, S. Shrivastava, y S. Das. Performance analysis of patient monitoring system under different routing algorithm. en *Convergence of Technology (I2CT), 2014 International Conference for.* Páginas 1–6, abril 2014
- [47] T. M. Steffen, T. A. Hacker, y L. Mollinger. Age-and gender-related test performance in community-dwelling elderly people: Six-Minute Walk Test, Berg Balance Scale, Timed Up & Go Test, and gait speeds. *Physical therapy,* 82(2):128-137, febrero 2002.
- [48] F. C. Anderson y M. G. Pandey. Dynamic optimization of human walking. *Journal of biomechanical engineering,* 123(5):381-390, octubre 2001.
- [49] M. H. Purnomo, I. K. E. Purnama, y E. Setijadi. Performance of the routing protocols AODV, DSDV and OLSR in health monitoring using NS3. En *Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 2016 International Seminar on,* Páginas 323–328, julio 2016.

- [50] C. E. Perkins, E. M. Royer, S. R. Das, y M. K. Marina. Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks. *IEEE Personal communications*, 8(1):16-28, febrero 2001.
- [51] P. Johansson, T. Larsson, N. Hedman, B. Mielczarek, y M. Degermark. Routing protocols for mobile ad-hoc networks-a comparative performance analysis, en *Proceedings of the 5th international conference on mobile computing and networking (ACM MOBICOM'99)*, páginas. 195–206, agosto 1999
- [52] D. A. Maltz, J. Broch, J. Jetcheva, y D. B. Johnson. The effects of on-demand behavior in routing protocols for multihop wireless ad hoc networks. *IEEE Journal on Selected areas in Communications*, 17(8):1439-1453, agosto 1999.
- [53] S. Mohapatra y P. Kanungo. Performance analysis of AODV, DSR, OLSR and DSDV Routing Protocols using NS2 Simulator. *Procedia Engineering*. 30(2012):69–76, 2012.
- [54] Yufei Cheng, Egemen K. Çetinkaya y James P. G. Sterbenz. Dynamic source routing (DSR) protocol implementation in ns-3. en *Proceedings of the 5th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*. Páginas 367–374, marzo 2012.
- [55] U. Varshney y S. Sneha, “Patient monitoring using ad hoc wireless networks: reliability and power management”, *IEEE Communications magazine*. 44(4): 49–55, abril 2006
- [56] Mike Harwood. CompTIA Network+ N10-004 Exam Prep. Capítulo 7, página 270, Pearson Education, 2009.
- [57] T. S. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*, vol. 2. prentice hall PTR New Jersey, 1996.
- [58] H. T. Friis, “A note on a simple transmission formula”, *Proceedings of the IRE*, 34:(5):254-256, mayo 1946
- [59] J. Miranda *et al.*, “Path loss exponent analysis in wireless sensor networks: Experimental evaluation”, en *Industrial Informatics (INDIN), 2013 11th IEEE International Conference on*, páginas. 54–58, 2013.
- [60] P. Chen, B. O’Dea, y E. Callaway, “Energy efficient system design with optimum transmission range for wireless ad hoc networks”, en *Communications, 2002. ICC 2002. IEEE International Conference on*, 2002, vol. 2, pp. 945–952.
- [61] M. Conti y S. Giordano, “Multihop ad hoc networking: The reality”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 45, núm. 4, 2007.

- [62] C. Tschudin, P. Gunningberg, H. Lundgren, y E. Nordström, “Lessons from experimental MANET research”, *Ad Hoc Netw.*, vol. 3, núm. 2, pp. 221–233, 2005.
- [63] Farruh Ishmanov y Yousaf Bin Zikria. Trust Mechanisms to Secure Routing in Wireless Sensor Networks: Current State of the Research and Open Research Issues. *Journal of Sensors*. 2017(1):1–16, febrero 2017.
- [64] Tracy Camp, Jeff Boleng y Vanessa Davies. A survey of mobility models for ad-hoc network research. *Wireless communications and mobile computing*. 2(5):483-502, agosto 2002.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00071

Matrícula: 2153805506

ESTUDIO DE PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN PARA EL ENVÍO DE INFORMACIÓN MÉDICA MEDIANTE DISPOSITIVOS MÓVILES INTELIGENTES

En la Ciudad de México, se presentaron a las 11:00 horas del día 31 del mes de enero del año 2018 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. MIGUEL LOPEZ GUERRERO
DR. ENRIQUE RODRIGUEZ DE LA COLINA
DR. FRANCISCO GARCIA JIMENEZ



GENARO CALEB VAZQUEZ PEDRAZA
ALUMNO

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS (CIENCIAS Y TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION)

DE: GENARO CALEB VAZQUEZ PEDRAZA

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

Aprobar

REVISÓ

LIC. JULIO CESAR DE LARA ISASSI
DIRECTOR DE SISTEMAS ESCOLARES

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

DR. JOSE GILBERTO CORDOBA HERRERA

PRESIDENTE

DR. MIGUEL LOPEZ GUERRERO

VOCAL

DR. ENRIQUE RODRIGUEZ DE LA COLINA

SECRETARIO

DR. FRANCISCO GARCIA JIMENEZ