

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



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

**Análisis del impacto del número de usuarios y tasa de datos
ofrecida en el traspaso entre resumideros de una WBAN/WPAN
enfocada a aplicaciones de sistemas del cuidado de la salud.**

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

Presenta:

Luis Angel Reyes Cruz

Ensenada, Baja California, México
2017

Tesis defendida por
Luis Angel Reyes Cruz

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda
Director de tesis

Miembros del comité

Dr. Salvador Villarreal Reyes

Dr. Roberto Conte Galván

Dr. Arturo Serrano Santoyo

Dr. Raúl Rivera Rodríguez

Dr. Heriberto Márquez Becerra



Dr. Daniel Saucedo Carvajal
Coordinador del Posgrado en Electrónica y Telecomunicaciones

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Luis Angel Reyes Cruz © 2017

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

Resumen de la tesis que presenta **Luis Angel Reyes Cruz** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones.

Análisis del impacto del número de usuarios y tasa de datos ofrecida en el traspaso entre resumideros de una WBAN/WPAN enfocada a aplicaciones de sistemas del cuidado de la salud.

Resumen aprobado por:

Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda
Director de tesis

La integración de la tecnología en los sistemas de salud ha traído beneficios que se ven reflejada en la atención hospitalaria y por ende en los pacientes, que tienen mejores diagnósticos, mayor acceso a los servicios de salud y reducción de costos. El telemonitoreo hospitalario es uno de los servicios que han surgido gracias a los desarrollos en tecnologías inalámbricas, este permite tener un conocimiento del estado del paciente en todo momento incluso cuando el paciente se encuentra en movimiento (para realizar algún estudio o terapia, etc.). En este aspecto, se han concentrado esfuerzos de investigación en las redes WBAN/WPAN debido a su consumo bajo de energía y las tasas de datos que ofrece. Sin embargo, queda mucho por explorar y mejorar, como el caso de los mecanismos de traspaso (cuando la arquitectura de la red contempla movilidad) que se pueden especificar de acuerdo con los requerimientos de la aplicación en cuestión. Este trabajo se enfoca en realizar un análisis de los factores que tienen mayor relevancia en el traspaso entre resumideros del estándar IEEE 802.15.4 dentro de un escenario de telemonitoreo. Para esto se realizó un análisis estadístico tomando como base un modelo de simulación validado a través de un modelo analítico. Se definió un perfil de tráfico comúnmente usado en un escenario de telemonitoreo hospitalario incluyendo variables como: temperatura, oximetría, ECG, detección de movimiento, etc. Los resultados mostraron que retardo en el traspaso se ve afectado por el efecto *ping-pong* ocasionado por los traspasos innecesarios, mientras que la pérdida de paquetes se encuentra relacionada principalmente con los traspasos fallidos y la contención por el canal.

Palabras clave: telemonitoreo hospitalario, IEEE 802.15.4, WPAN, WBAN, mecanismos de traspaso.

Abstract of the thesis presented **by Luis Angel Reyes Cruz** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronic and Telecommunications with orientation in Telecommunications

Analysis of the impact of number of users and data rate offered in the handover between sinks of a WBAN/WPAN focused on healthcare systems applications

Abstract approved by:

Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda
Thesis Director

The integration of technology into health systems has benefits in the hospital services and therefore in patients, who have better diagnostics, better access to health services and costs reduction. Hospital telemonitoring is one of the services that have happened (came up) thanks to the developments in wireless technologies, allowing a knowledge of the patient's status at any times even when the patient is moving (to do some therapy, to get some study, etc.). In this context, research efforts have been concentrated on the WBAN/WPAN networks due to their low power consumption and data rates that these technologies offer. However, still much to improve, such as the handover mechanisms (when the architecture of the network contemplates mobility), which can be specified according to the requirements of the application. This work focuses on an analysis of the most relevant factors that are involved in the handover between sinks, following the IEEE 802.15.4 standard into a telemonitoring scenario. In order to do this, a statistical analysis was made based on a validated simulation model through an analytical model. A traffic profile was defined in a hospital telemonitoring scenario including physiological variables such as: temperature, oximetry, ECG, motion detection, etc. The results showed that the handover delay is affected by the ping-pong effect caused by unnecessary handovers, while packet loss is mainly related to failed handover and the channel contention.

Keywords: hospital telemonitoring, IEEE 802.15.4, WPAN, WBAN, handover mechanism.

Dedicatoria

A mis padres por su apoyo incondicional, sus consejos y por estar al pendiente en cada decisión que he tomado.

A mi hermana por su cariño y hacerme sentir siempre especial.

A mi novia por su apoyo y hacerme compañía pese a la distancia.

Agradecimientos

Al CICESE por abrirme las puertas, otorgarme una formación académica de calidad y proporcionarme las herramientas necesarias para mi crecimiento tanto académico y profesional como personal. Me voy con la sensación de haber estado en el mejor lugar para realizar mis estudios de maestría.

Al CONACYT por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría con número de becario 587247.

Quiero agradecer ampliamente a mi director de tesis, el Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda y al Dr. Salvador Villarreal Reyes por su orientación y guía durante mi investigación. Por su confianza para hacer las cosas, sus consejos y la gran aportación que brindaron a mi trabajo de tesis.

A los miembros de mi comité de tesis: Dr. Roberto Conte Galván, Dr. Arturo Serrano Santoyo, Dr. Arturo Rivera Rodríguez y Dr. Heriberto Márquez Becerra por sus consejos, comentarios y observaciones que ayudaron a mejorar y enriquecer este trabajo de investigación.

A los integrantes del grupo ARTS que con su apoyo y recomendaciones fortalecieron mi desarrollo a lo largo de la maestría. En especial un agradecimiento a Manuel Casillas por compartir sus conocimientos para hacer posible mi trabajo de tesis.

A mis padres y mi hermana, sé que siempre podré contar con ellos en cualquier situación. Les debo mis logros y la persona que soy.

A Andrea por acompañarme durante esta etapa y saber estar ahí en mis buenos y malos momentos.

A todos mis amigos, especialmente a Heberto y Alan, por su ayuda durante la maestría. Juntos crecimos académica y personalmente, hicimos un gran equipo y supimos apoyarnos. De todos ustedes me llevo grandes amistades, recuerdos y experiencias.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	x
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Antecedentes.....	1
1.1.1 Tecnologías inalámbricas de área personal y corporal.....	2
1.1.2 Mecanismos de traspaso.....	6
1.2 Planteamiento del problema.....	8
1.4 Justificación.....	11
1.4 Objetivos.....	13
1.4.1 Objetivo general	13
1.4.2 Objetivos específicos.....	13
1.5 Metodología.....	13
1.6 Organización de la tesis.....	15
Capítulo 2. Telemonitoreo hospitalario	
2.1 Introducción.....	16
2.2 Variables fisiológicas.....	16
2.3 Perfil de tráfico.....	18
2.4 Escenarios de despliegue.....	20
Capítulo 3. Traspaso entre resumideros en el estándar IEEE 802.15.4	
3.1 Introducción.....	24
3.2 IEEE 802.15.4.....	25
3.2.1 Arquitectura.....	26
3.2.2 Capa física	27
3.2.3 Capa MAC.....	29

3.3	Traspaso entre resumideros en el estándar IEEE 802.15.4.....	34
Capítulo 4. Validación de la capa MAC del estándar IEEE 802.15.4		
4.1	Introducción.....	38
4.2	Modelo analítico CSMA/CA para el acceso al medio no ranurado de IEEE 802.15.4.....	40
4.2.1	Modelo de Markov	41
4.2.2	Cola M/G/1 para la generación de paquetes.....	45
4.3	Simulación en el modelador de red OMNeT++.....	46
4.3.1	Modelador de red OMNeT ++.....	46
4.3.2	Modelo CSMA/CA en MiXiM.....	47
4.3.3	Escenario de simulación.....	49
4.4	Implementación.....	51
4.4.1	Texas Instruments SensorTag CC2650.....	51
4.4.2	Cama de pruebas basada en el SensorTag CC2650.....	52
4.5	Análisis de los resultados obtenidos para la validación de la capa MAC.....	53
4.6	Conclusiones sobre la validación de la capa MAC.....	57
Capítulo 5. Análisis de los factores más relevantes que afectan el traspaso en una red IEEE 802.15.4		
5.1	Introducción	59
5.2	Descripción del escenario propuesto de telemonitoreo.....	60
5.3	Factores a considerar (Incluyendo umbrales).....	62
5.4	Metodología para realizar el análisis 2^k	65
4.3.1	Simulación.....	74
4.3.2	Implementación.....	77
5.3	Resultados del análisis estadístico	79
5.3	Conclusiones del análisis estadístico.....	87
Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro		
7.1	Introducción.....	89
7.2	Conclusiones.....	89
7.3	Trabajo futuro.....	93
	Literatura citada	95
	Anexos	100

Lista de figuras

Figura		Página
1	Enfoque de los mecanismos de traspaso.....	8
2	Escenario de un telemonitoreo hospitalario	9
3	Ventajas del monitoreo hospitalario	11
4	Escenario ejemplo de despliegue	22
5	Topologías soportadas	27
6	Canales de la capa PHY.....	28
7	Formato de PDDU de la PHY de IEEE 802.15.4.....	29
8	Estructura de la supertrama.....	30
9	Diagrama de flujo del algoritmo CSMA/CA no ranurado.....	32
10	Formato de los encabezados MAC de IEEE 802.15.4.....	33
11	Formato de los encabezados para un ACK.....	34
12	Proceso de asociación de IEEE 802.15.4.....	35
13	Proceso de disociación de IEEE 802.15.4.....	36
14	Ejemplo de transmisión exitosa.....	38
15	Ejemplo de transmisión fallida debido a colisiones.....	39
16	Elementos para la validación a nivel MAC.....	40
17	Modelo de Markov para el mecanismo CSMA/CA no ranurado de IEEE 802.15.4 (Casillas, 2012).....	42
18	Cola M/G/1 para el análisis.....	45
19	Integración de los módulos en OMNET++.....	47
20	Escenario para la validación de la capa MAC.....	50
21	SensorTag CC2650 (Texas Instruments, 2017).....	52
22	Cama de pruebas para la validación MAC.....	53
23	Resultados de paquetes descartados.....	56

24	Resultados pérdida de paquetes.....	57
25	Proceso de simulación-análisis.....	60
26	Escenario propuesto de telemonitoreo.....	61
27	Metodología para el análisis 2^k factorial.....	66
28	Diagrama de flujo del proceso de disociación.....	75
29	Escenario en el simulador OMNeT++.....	77
30	Cama de pruebas del escenario propuesto.....	78
31	Porcentaje de variación de los factores para el retardo en el traspaso.....	82
32	Porcentaje de variación de los factores para el número de traspasos.....	83
33	Porcentaje de variación de los factores para los traspasos fallidos.....	84
34	Porcentaje de variación de los factores para los paquetes perdidos.....	85
35	Porcentaje de variación de los factores para el end-to-end delay.....	86
36	Porcentaje de variación de los factores para el end-to-end delay de los paquetes encolados.....	87

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Tabla comparativa de tecnologías WBAN (Suhonen, 2012).....	4
2	Características de algunas variables fisiológicas.....	20
3	Bandas de frecuencias del estándar IEEE 802.15.4.....	28
4	Parámetros utilizados del estándar IEEE 802.15.4 para la banda de 2.4GHz.....	49
5	Parámetros para las simulaciones de la validación MAC.....	51
6	Parámetros del tráfico generado.....	55
7	Velocidades de caminata y su desviación estándar.....	69
8	Tiempo de intervalo de paquetes fono para distintos valores de BO.....	70
9	Factores y valores considerados para el análisis estadístico.....	74
10	Parámetros para las simulaciones del escenario propuesto.....	76
11	Resultados del análisis estadístico 2 ^k factorial.....	80

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

Actualmente, los sistemas de cuidado de la salud (SCS) han presentado un incremento en la cantidad de usuarios que requieren atención, principalmente para el tratamiento de enfermedades crónico-degenerativas (Touati & Tabish, 2013). Esto evidentemente incrementa de manera importante los costos de operación de los SCS. Por lo que se ha buscado que el esquema de atención se centre más en la prevención y control de las enfermedades que en los tratamientos de sus consecuencias. Esto requiere que los pacientes se involucren en mayor grado en el cuidado de su salud.

En este sentido las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) han sido reconocidas como una herramienta clave para los profesionales de la salud y los pacientes para mejorar la calidad y el acceso a los servicios de salud. De hecho, a través de habilitar aplicaciones como teleconsulta o telemonitoreo, las TIC ofrecen diversos beneficios para los SCS como: disminuir costos de operación, aumentar la capacidad y cobertura de los mismos. Aún más importante, las TIC favorecen la inclusión de los pacientes en la prevención, control y tratamiento de sus enfermedades. Esto gracias a que brindan desde un mayor alcance en las campañas públicas de prevención por medio de Internet, monitoreo y retroalimentación del estado de salud del paciente con la ayuda de dispositivos de bienestar, hasta la interacción de especialistas con la finalidad de otorgar un mejor diagnóstico (Dilmaghani et al., 2011). De esta manera se puede encaminar a la población a generar hábitos que beneficien a su salud.

Específicamente, las Redes Inalámbricas de Sensores (WSN, por sus siglas en inglés) aplicadas a la salud han permitido habilitar aplicaciones de salud como monitoreo continuo de pacientes (Khan, et al., 2009), detección de caídas (Hiremath & Mankodiya, 2015), rehabilitación (Gregorio, 2010). Las WSN consisten en sensores que permiten recolectar, procesar y transmitir la información de distintas variables fisiológicas o biomecánicas hacia un profesional de la salud a través de un resumidero de información. Las WSN formadas por sensores de bajo consumo de energía que se encuentran distribuidos a lo largo del cuerpo son de especial interés, dado que permiten la recolección de signos vitales de personas con alguna condición médica que requiere un monitoreo continuo (González, 2011). A través de las WSN, es posible tener un monitoreo remoto de la salud en pacientes en un nivel no crítico, lo que permite monitorear al paciente dentro del hospital o en casa, desahogando la ocupación de recursos y teniendo un flujo de trabajo más eficiente de los servicios de salud (González, 2014).

Para lograr un despliegue exitoso de este tipo de aplicaciones aún existen retos que deben ser resueltos. Entre los más relevantes se encuentran los relacionados con el radio de transmisión reducido de las Redes Inalámbricas de Área Personal y Corporal (WPAN y WBAN, por sus siglas en inglés respectivamente) del orden de decenas de metros para las WPAN y de un metro para las WBAN. En particular, el área de cobertura de las WPAN hace necesario que en el diseño de la red se considere el despliegue de varios resumideros de información. Esto para dar cobertura en las zonas donde el paciente monitoreado se desplaza, p.ej., cocina, dormitorio, etc. Por lo tanto, es necesario contar con algoritmos que permitan manejar adecuadamente el traspaso entre diferentes resumideros de información.

Es importante mencionar que el traspaso entre resumidero afecta el desempeño de la red en términos de métricas relacionadas con la calidad de servicio como retardo punto a punto y el número de paquetes perdidos (Ghaleb et al., 2016). Por lo que manejar adecuadamente el traspaso entre resumideros de información es de especial interés en aplicaciones de telemonitoreo. Esto en las diferentes tecnologías para WSN aplicadas al cuidado de la salud como Bluetooth e IEEE 802.15.4.

1.1.1 Tecnologías inalámbricas de área personal y corporal

Las WSN pueden ser usadas efectivamente para el cuidado de la salud y mejorar la calidad de vida de los pacientes, además de mejorar la calidad de los mismos servicios médicos. Por ejemplo, a un paciente al que se le proporciona los sensores y dispositivos necesarios que operen en una WBAN, no tiene la necesidad de que el médico se encuentre presente para poder presentar un diagnóstico.

Existe una variedad amplia de tecnologías y estándares que pueden ser usados para sistemas del cuidado de la salud. Además, los dispositivos móviles electrónicos están cambiando rápidamente los servicios de salud de manera global. Los celulares o teléfonos inteligentes particularmente han tenido un gran impacto ya que es posible usar estándares como 3G/4G, WiFi y Bluetooth para que los datos de los pacientes puedan ser consultados desde múltiples lugares con actualizaciones oportunas.

Específicamente, las WBAN y las WPAN describen principalmente las aplicaciones con nodos flexibles, en movimientos y con tasas de datos medias y bajas. Existen diversos estándares (tanto abiertos como propietarios) que pueden ser utilizados para habilitar las WBAN y WPAN, p.ej. LoRa (Centenaro et al., 2016), Bluetooth (Mikhaylov et al., 2013), IEEE 802.15.4 (Khanfer, et al., 2014). Comparados con las tecnologías propietarias, los estándares abiertos como el IEEE 802.15.4 presentan ventajas importantes

(Suhonen, 2012). Por ejemplo, los estándares abiertos resisten cambios tecnológicos a largo plazo ya que la tecnología no depende de un solo vendedor. Además, la disponibilidad pública de las especificaciones permite realizar investigación que contribuye la mejora continua del estándar y a encontrar nuevas áreas de aplicación. Seleccionar el radio y estándar adecuado para una aplicación específica es un punto crítico en su desarrollo, ya que depende de requerimientos como: número de usuarios, tasa de datos ofrecida, movilidad, cobertura, seguridad y distribución de los resumideros.

Uno de los estándares más populares es el IEEE 802.15.4 (ver tabla 1), de hecho, es usado como base para otros estandartes para habilitar una amplia gama de aplicaciones en distintas áreas. Algunos estándares como 6LoWPAN y ZigBee usan 802.15.4 en su totalidad, mientras que otros como WirelessHART únicamente utilizan su capa física. Una de las razones principales de la popularidad del estándar IEEE 802.15.4 es que proporciona una capa de acceso al medio distribuida y relativamente sencilla que pretende un bajo consumo de energía y permite montar protocolos de capas superiores sobre ella. Además, la capa física del estándar puede operar en dos bandas reservadas para áreas Industrial, Científica y Médica (ISM, por sus siglas en inglés) distintas de frecuencia lo que lo convierte en un estándar flexible y de uso sin licencia.

A continuación, se muestra en forma de resumen, una discusión de los principales protocolos para redes WBAN utilizados en aplicaciones relacionadas con la telemedicina, telemonitoreo y de bienestar:

IEEE 802.15.4 es parte de la familia de especificaciones 802.15 para redes inalámbricas de área personal. Dentro de sus características principales se encuentra el uso de paquetes básicos de datos y el uso de radios de bajo costo. Es adecuado para que nodos de sensores alimentados con baterías puedan comunicarse con una estación central o resumidero.

Dentro de los estándares con los que cuenta la Familia IEEE 802.15 se encuentran:

- 802.15.1: Capas inferiores de la pila de protocolos de Bluetooth 1.x
- 802.15.2: Método para mejorar la coexistencia de las WPAN con otros dispositivos inalámbricos dentro de las bandas sin licencia. El método propuesto incluye saltos en frecuencia adaptativos, control de energía y técnicas para evitar interferencia
- 802.15.3: WPAN de alta velocidad para aplicaciones multimedia con tasa de datos desde 55Mbps hasta algunos Gbps.

- 802.15.4: Capas PHY (Physical Layer) y MAC (Medium Access Control Layer) para WPAN de bajas tasas de datos, Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs).
- 802.15.5: Funcionalidades para redes tipo malla dentro de las WPAN.
- 802.15.6: Redes de Área Corporal (BAN) que operan alrededor del cuerpo humano.
- 802.15.7: Capa PHY y MAC para comunicaciones por medio de luz visible.

Tabla 1. Tabla comparativa de tecnologías WBAN (Suhonen, 2012).

Estándar	Frecuencia (MHz)	Tasa de datos	Capa de los protocolos					Seguridad	
			Física	MAC	Red	Trasporte	Aplicación	ACL	Encriptación
IEEE 802.15.4	868	20	●	●	○	○	○	●	●
	915	40	●	●	○	○	○	●	●
	2400	250	●	●	○	○	○	●	●
ZigBee*	-	-	○	○	●	●	●	●	●
6LoWPAN*	-	-	○	○	●	○	○	●	●
WirelessHART**	2400	250	●	●	●	●	●	●	●
ISA 100.11a**	2400	250	●	●	●	●	●	●	●
Z-Wave	865	40	●	●	●	○	●	○	○
	915	40	●	●	●	○	●	○	○
Bluetooth Low Energy	2400	1000	●	●	●	●	●	●	●
ANT/ANT+	2400	1000	●	●	●	○	●	●	●

*Usa la capa física y MAC de IEEE 802.15.4.

**Usa la capa física de IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 especifica una interfaz de aire de bajo costo, junto con un protocolo MAC. Está optimizado para comunicaciones de corto alcance (normalmente 10-50m), bajas tasas de datos y topologías flexibles (estrella, árbol, malla). Además, soporta un gran número de nodos. Una red IEEE 802.15.4 puede tener hasta 216 dispositivos, los cuales son administrados y se le asignan recursos de la red durante el proceso de asociación. Está diseñado para maximizar la eficiencia de energía en la capa física y MAC.

El estándar IEEE 802.15.4a es una extensión del estándar 802.15.4 que define dos tasas de datos opcionales: PHY UWB opera en la banda de 3.6GHz a 10GHz y *Chirp Spread Spectrum* (CSS) que opera en 2.4GHz. Las dos tienen robustez al desvanecimiento por multitrayectorias, por lo que trabajan con bajas

potencias. La PHY de UWB tiene tasa de datos nominal en el aire de 851kbps y opcional 110kbps, 6.81Mbps y 27.24Mbps. CSS por su parte tiene tasas de datos nominales de 1000kbps y opcional de 250kbps, además tiene enlaces de larga distancia lo que lo hace adecuado para dispositivos moviéndose a altas velocidades (Suhonen. et al., 2012).

ZigBee y 6LoWPAN están desarrollados bajo las especificaciones de IEEE 802.15.4, utilizando la capa PHY y MAC. Por una parte, ZigBee especifica capas superiores que fueron desarrolladas por un consorcio de varias compañías llamado ZigBee Alliance (Dishongh et al., 2010). Este estándar es recurrentemente utilizado para el control de luces, alarmas de seguridad, sensores de movimiento, termostatos, detectores de humo, etc. Desafortunadamente ZigBee necesita de un dispositivo puente para alcanzar dispositivos en redes IP. Por otra parte, 6LoWPAN se especifica en el RFC 4944 por la IETF (Internet Engineering Task Force) para la transmisión de paquetes IPv6 sobre redes 802.15.4. De esta manera, el sensor puede actuar como parte de la red global de internet y en consecuencia, permite un rango amplio de uso de la tecnología y para las aplicaciones existentes basadas en IP (Suhonen. et al., 2012). Esto lo convierte en un estándar con un gran potencial de aplicación, considerando las limitantes del propio estándar IEEE 802.15.4.

Bluetooth es un protocolo de redes inalámbricas de bajo costo, baja potencia, robustez y corto alcance. En un principio fue desarrollado para sustituir los cables de teléfonos móviles, *headsets*, PDA's, laptops, etc. La pila de protocolos de Bluetooth resulta compleja, debido a esto, no puede ser usado por dispositivos con restricciones de procesamiento, energía y memoria (Dishongh et al., 2010). Usa 79 canales de 1MHz para la transmisión. La interferencia entre otros dispositivos en la misma banda ISM (dispositivos 802.15.4 y 802.11), al igual que otras piconets Bluetooth es minimizado utilizando *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS), donde la portadora cambia rápidamente sobre los 79 canales disponibles (haciendo saltos) (Casillas et al., 2015). Bluetooth Low Energy (BLE) es una extensión de la tecnología Bluetooth para dispositivos de bajo consumo y bajas tasas de datos, definida para comprender: *Human Interface Device* (HID) y perfiles de sensores. Es un conjunto de protocolos definidos en el estándar de Bluetooth para aplicaciones que requieren realizar intercambio de información de manera inalámbrica en escenarios como: cuidado de la salud, deportes, seguridad y entretenimiento. BLE incorpora mecanismos que ayudan a mantener apagado el transmisor por un mayor tiempo. Para lograr esto se redujo la complejidad de la pila de protocolos, reduciendo la cantidad de estados y tipos de mensajes dentro ella.

Otros estándares propietarios como: WirelessHART y ANT/ANT+ son definidos para el uso específico de una aplicación específica como la automatización para la industria o aplicaciones de

entretenimiento. Esto hace que el estándar además de no ser abierto a modificaciones se ve limitado en mecanismos que sean adaptados para áreas fuera de las establecidas por el mismo (Casillas et al., 2015).

1.1.2 Mecanismos de traspaso

Debido a los requerimientos de eficiencia de las WBAN/WPAN en términos de energía, es común asumir arquitecturas donde existan varios resumideros de información con capacidades superiores que estén recolectando los datos que envían los usuarios. Adicionalmente, se debe tomar en consideración la movilidad de los usuarios (Ghaleb et al., 2016). Por lo tanto, un componente esencial para un despliegue exitoso de este tipo de redes es el mecanismo de traspaso. Los mecanismos de traspaso son los encargados de tomar las acciones necesarias para garantizar una comunicación continua cuando el usuario en movimiento se encuentra dentro de un área crítica en donde puede perder la conexión con su resumidero.

Por lo anterior es necesaria la selección del algoritmo que ofrezca un correcto desempeño en la integración de estas tecnologías (Khan et al., 2011). Los mecanismos de traspasos tienen una función esencial en las redes celulares cuando los usuarios hacen cambio de estación base, manteniendo la cobertura, sin embargo, los mecanismos traspaso de las redes celulares son diferentes que los mecanismos para las redes inalámbricas de sensores. Esto debido principalmente a que las WSNs tienen enlaces de baja potencia y pequeñas áreas de cobertura y una alta variabilidad. Los problemas generales en los procesos de traspaso son la latencia, los paquetes perdidos y los traspasos innecesarios. De acuerdo con (Caldeira et al., 2012) los mecanismos de traspaso se pueden clasificar principalmente en:

- Traspaso horizontal: Ocurre con un nodo en movimiento dentro de una red homogénea.
- Traspaso vertical: Ocurre con un nodo en movimiento sobre una red heterogénea con dos diferentes protocolos de comunicación. Debe haber una desconexión y se deben tener dos interfaces inalámbricas (una para cada tecnología).

Para iniciar el mecanismo de traspaso entre resumideros se han considerado el uso métricas de decisión dentro de la capa física como: RSSI (Received Signal Strength Indication), LQI (Link Quality Indicator), SNR (Signal to Noise Ratio) y BER (Bit Error Rate) (Misra et al., 2015). Algunos mecanismos de traspaso hacen uso de una combinación de estas métricas con la finalidad de mejorar el desempeño. Se puede hacer una distinción entre dos clases de traspasos de acuerdo con el mecanismo y métricas que se

utilicen y puede funcionar como otra forma de clasificación de los mecanismos de traspaso (Hussain & Pyun, 2013):

- El *hard-handover*: son mecanismos en donde se tiene una sola interfaz y por lo tanto solamente se puede monitorear un canal, esto ocasiona que el proceso de traspaso debe llevar un tiempo de desconexión y un tiempo de conexión a la nueva área de cobertura de manera que existe una interrupción en la comunicación.
- El *soft-handover*: son mecanismos en donde se puede monitorear más de un canal por lo tanto es posible mantener una comunicación continúa dado que en algún momento se puede estar transmitiendo por las dos interfaces, dando como resultado un proceso de traspaso casi transparente para el nodo.

En el área donde dos resumideros o puntos de acceso se intersectan es donde se debe tomar la decisión de permanecer en ella o decidir hacia qué nueva área de cobertura se debe cambiar para no perder la conectividad. En la literatura se pueda observar principalmente tres enfoques distintos en el diseño de mecanismos de traspasos para redes WBAN, como lo muestra la figura 1.

- En los mecanismos de RSSI se evalúan parámetros de la señal (la intensidad o nivel de ruido e interferencia) de tal manera que el nodo es el responsable de tomar la decisión de realizar el traspaso a un área de cobertura dentro de un AP con mejores parámetros en la calidad del enlace.
- Los basados en *backbone* establecen una comunicación entre los Puntos de Acceso (AP, por sus siglas en inglés) de la red para que estos tomen la decisión del traspaso basados en el movimiento (en algunas ocasiones predictivo) del nodo.
- Los mecanismos que usan *proxies* son mayormente utilizados en redes 6LoWPAN ya que involucran capas superiores (capa de red, transporte y en algunos casos capa de aplicación), de esta manera se puede tener un control de la parte de enrutamiento, direccionamiento y hasta de tasas de compresión; lo cual permite la implementación de soluciones con enfoque de *cross-layer* (Fotouhi et al., 2012; Caldeira et al., 2015).

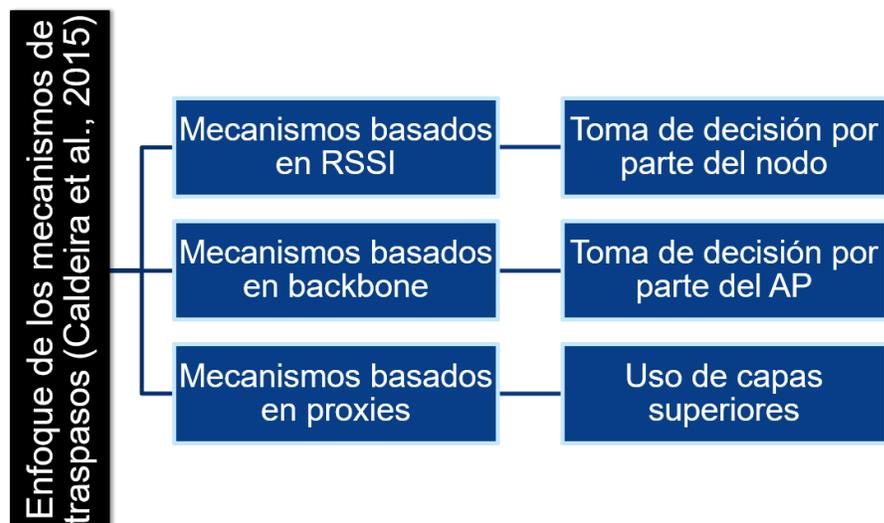


Figura 1. Enfoque de los mecanismos de traspaso.

Respecto al estándar IEEE 802.15.4, únicamente se definen los procesos de asociación y disociación por parte de los nodos hacia el coordinador de la red. Por lo tanto, el estándar no considera la movilidad del usuario ni define procesos para mitigar los efectos ocasionados por el cambio de resumidero. El presente trabajo se enfoca en evaluar al estándar únicamente con los procesos que establece a manera de mecanismo de traspaso.

1.2 Planteamiento del problema

Como ya se mencionó anteriormente, existen dos tipos de monitoreo: el monitoreo en el hogar y el hospitalario. El monitoreo en el hogar tiende a ser un poco más flexible en cuanto a los requerimientos de infraestructura y técnicos. Puede ser usado como medio que proporcione tanto al paciente como al médico información relevante y actualizada de la salud del paciente, en muchas ocasiones puede ser un monitoreo en tiempo real. Esta aplicación se enfoca principalmente en pacientes con enfermedades crónico-degenerativas que requieren un monitoreo permanente para llevar un control de su enfermedad. La información del estado del paciente puede ser consultada por el médico en cualquier momento y puede existir una retroalimentación tanto del personal médico como del sistema hacia el paciente, de manera que se reciban alertas, recordatorios de toma de medicamentos y de citas médicas.

El monitoreo hospitalario cuenta con requerimientos más estrictos a los que podemos encontrar en un monitoreo en el hogar básico. En primer lugar, en el monitoreo hospitalario es necesario contar con un mayor equipamiento e infraestructura para proporcionar información completa del estado del paciente en situaciones de emergencia donde la disponibilidad requerida del sistema de monitoreo es alta, es decir, se debe garantizar un monitoreo ininterrumpido. Un esquema general de tele-monitoreo se muestra en la figura 2.

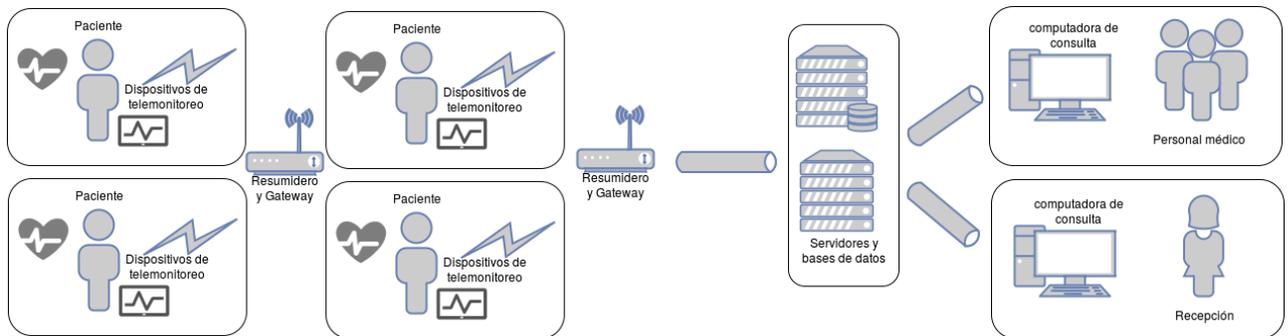


Figura 2. Escenario de un telemonitoreo hospitalario.

Dentro de las problemáticas planteadas de los mecanismos de traspaso en WSNs para los escenarios como el planteado en la figura 2, son los umbrales de decisión para tomar la acción de realizar el proceso de traspaso. Los umbrales pueden provocar retardos grandes en el mecanismo o por otra parte pueden ocasionar traspasos consecutivos entre dos APs, a esto último se le denomina efecto ping-pong (Caldeira et al., 2013). Por otra parte, la alta variabilidad de la red tiene un impacto en la estabilidad de la misma. Si no se diseña correctamente el mecanismo de traspaso, este puede degradar el rendimiento de la red debido al efecto ping-pong que se ocurre principalmente en la frontera entre dos APs. Esto se ve reflejado en retardo de paquetes y por lo tanto disminución del caudal eficaz.

Dentro de la literatura revisada respecto a mecanismos de traspaso para redes WBAN/WPAN se encontró que estos mecanismos varían de acuerdo con las características principalmente de la capa MAC y de la capa de red (cuando el estándar incorpora protocolos en esta capa). En la capa MAC los retos que se enfrentan al tener nodos móviles son: la sincronización, el consumo de energía y el tiempo que se tarda en crear una conexión nueva. Esto se puede ver reflejado de igual manera en un retardo y/o pérdida de paquetes (Petäjälä & Karvonen, 2011). Por lo tanto, la densidad de los APs depende de los requerimientos de la aplicación. Gran parte de estos problemas a nivel MAC se han atacado en redes con

una arquitectura de supertrama, por ejemplo, en (Sthapit & Pyun, 2014) se evalúan estrategias de traspaso para redes IEEE 802.15.4 en modo con paquetes fano habilitados, utilizando ranuras de tiempo que garanticen la transmisión de la información. En (Bradai et al., 2015; Elhadj et al., 2015; Papadopoulos et al., 2015) se implementan distintos esquemas para clasificar el tráfico de la red y asignar niveles de prioridad, de manera que al momento de realizar el traspaso se envíe inmediatamente la información de mayor prioridad (sensible al retardo) y de esta forma mitigar el retardo en la transmisión. Otros trabajos como en (Silva et al., 2012; Caldeira et al., 2013) tienen la finalidad de evitar el efecto ping-pong, para esto, hacen uso de dos umbrales para establecer el rango crítico de intensidad de la señal y determinar cuándo empezar a buscar otro AP con mejor calidad en el enlace. Además de lo anterior, en (Fotouhi et al., 2012) utilizan un monitoreo constante en la calidad del enlace hacia el AP puede mitigar los trasposos innecesarios, aunque por otra parte aumenta la carga de paquetes de control en la red y el consumo de energía en el nodo. En redes 6LoWPAN existen trabajos como el de (Teo et al., 2015; Gohar et al., 2015; Wang, 2016) donde hacen uso del protocolo IP que adapta el estándar para implementar una comunicación entre los puntos de acceso con la finalidad de disminuir el intercambio de paquetes dentro de la red inalámbrica, esto reporta ventajas en la sobrecarga de la red pero tiende a aumentar el tiempo necesario para llevar a cabo el traspaso.

De manera general, los trabajos existentes relacionados con este tema se enfocan en diseñar un mecanismo de traspaso que funcione para una aplicación en condiciones específicas de acuerdo con el escenario propuesto para su evaluación, de esta manera resulta sencillo que el mecanismo diseñado tenga un rendimiento adecuado en la métrica deseada. Sin embargo, no existen trabajos que se enfoquen en analizar el impacto que tienen los factores involucrados en el traspaso sobre las métricas de interés y que, a partir de este análisis se diseñe el mecanismo de traspaso. Para plantear soluciones a las problemáticas que surgen en los mecanismos de trasposos, es necesario primero conocer los aspectos o variables que afectan el rendimiento tanto de un enlace como de la red en general. Una vez evaluados estos aspectos, es posible crear o modificar los mecanismos de traspaso, así como conocer los límites para la tecnología inalámbrica. Lo anterior establece un área grande de investigación dentro de los mecanismos de traspaso enfocados a aplicaciones de telemedicina, que ayuden a cumplir y mejorar los requerimientos que estas demandan. Realizar un modelado de la capa MAC con los mecanismos de traspaso nos puede brindar información de utilidad para generar propuestas que ayuden a mejorar el rendimiento de las distintas aplicaciones de telemonitoreo médico.

1.3 Justificación

La población adulta puede vivir en muchas ocasiones sola y sin algún pariente cerca que dedique el tiempo requerido para observar las condiciones de salud de estas personas. Y aunque sus actividades físicas disminuyen, ellos requieren seguir siendo autónomos e independientes al momento de realizar sus actividades diarias durante el mayor tiempo posible. Además, se requiere de una disminución en los servicios de cuidado intensivo (post-operatorio) dentro de los hospitales. Esto con la finalidad de reducir costos hospitalarios a los pacientes y a su vez lograr una reducción en la ocupación dentro de los hospitales que muchas veces se encuentran sobresaturados (en el caso de instituciones públicas de salud).

El apoyo a estos grupos de personas en su vida diaria y la mejora de su bienestar a costos razonables puede ayudar a reducir esa brecha antes mencionada (la necesidad de independencia de la población adulta) y alertar a los parientes, vecinos o a los servicios médicos de emergencia en caso de que sea requerido. Los dispositivos electrónicos actuales pueden remplazar gran parte de las responsabilidades de una enfermera o cuidador de la salud, mediante la automatización de tareas y monitoreo. Las ventajas del telemonitoreo hospitalario se desglosan en la figura 3, donde se pueden encontrar ventajas en los servicios ofrecidos, ventajas para el paciente y para el hospital (incluyendo al personal médico).



Figura 3. Ventajas del monitoreo hospitalario.

Algunos hospitales en la actualidad han optado por invertir en sistemas de telemetría dentro de los cuartos de cuidado, debido a la demanda de pacientes en áreas médicas, quirúrgicas o de cuidados intensivos. Esta expansión en el monitoreo de signos vitales permite al hospital cuidar a los pacientes de una manera menos costosa, admitir pacientes más rápido, reducir los cuellos de botella en las salas de emergencia y de cuidados intensivos. Sin embargo, investigaciones han documentado que gran parte de los sistemas empleados no están avalados o certificados por alguna asociación médica de importancia como la *American Heart Association*, lo cual aumenta el riesgo de desplegar irregularidades en el ritmo cardíaco (Welch Allyn, 2016). A pesar de las implicaciones de realizar un sobre-monitoreo, muchos médicos rutinariamente escogen poner a los pacientes en un telemonitoreo basados en parte de manera errónea en la creencia de que la telemetría los llevara a reconocer y actuar a tiempo sobre cambios que amenacen la salud el paciente. Además, desplegar un monitoreo de ECG en cuidados generales puede tener consecuencias negativas, tales como: el incremento de falsas alarmas y diagnósticos erróneos.

La importancia de desarrollar investigación en tecnología WBANs que pueda ayudar a mantener en buen estado de salud a los pacientes desde su hogar con un bajo costo, agregando ventajas como libertad de movimiento y comodidad en comparación de las herramientas cableadas con las que se cuenta. Debido a la sensibilidad de la información que se recolecta de un paciente, que en situaciones de emergencia se vuelve crítico, las investigaciones en esta área han ido en aumento. Como se mencionó anteriormente, surgen problemas en las tecnologías aplicadas, los cuales no son triviales, por lo que plantear y analizar estos problemas resulta el primer paso para posteriormente generar recomendaciones para atenuar el problema. Por lo tanto, uno de los principales retos y materia de investigación actual se enfoca en entregar información oportuna y confiable al personal del cuidado de la salud para que este tome las decisiones adecuadas que beneficien al paciente. La motivación de este trabajo recae en la necesidad de contar con una tecnología madura, que posea un grado de fiabilidad aceptable para aplicaciones en el cuidado de la salud.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el impacto del número de usuarios y la tasa de datos ofrecida en el traspaso entre resumideros de información en el contexto de una red de corto alcance con aplicación a los sistemas del cuidado de la salud.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar y validar el modelo de simulación de la capa MAC de la tecnología seleccionada.
- Desarrollar el escenario de simulación que contenga las características necesarias para evaluar el modelo obtenido.
- Analizar los resultados obtenidos para realizar recomendaciones sobre las condiciones para el despliegue de aplicaciones de telemedicina con un conjunto de resumideros distribuidos.

1.5 Metodología

A continuación, se enlistan los procedimientos seguidos para el desarrollo de este trabajo y se describen de manera breve cada uno de ellos.

Estudio de las tecnologías inalámbricas de sensores utilizadas en el telemonitoreo médico. Se realizó un estudio de las principales tecnologías inalámbricas utilizadas en ambientes como el del telemonitoreo hospitalario con características similares como: las tasas de datos utilizadas y movilidad de los usuarios. El objetivo de este apartado es proporcionar un panorama del uso de tecnologías inalámbricas WBAN/WPAN. Una vez teniendo este estudio, se puede determinar la tecnología utilizada para el análisis de este trabajo. La selección debe realizarse de acuerdo con la importancia y uso que está teniendo la tecnología y lo factible que puede ser el uso de esta en un escenario como el que se pretende realizar.

Estudio de las tasas y perfil de tráfico utilizados en el telemonitoreo hospitalario. Una parte esencial del trabajo es conocer las variables fisiológicas que involucran el telemonitoreo hospitalario y las tasas de datos que estas generan, dado que este es un parámetro importante que se utiliza a lo largo de este trabajo. Por lo tanto, se hace una revisión bibliográfica de las principales variables utilizadas y el tráfico asociado a este.

Validación del modelo de simulación de la capa MAC de IEEE 802.15.4. Es de gran importancia contar con herramientas de las cuales se tengan la certeza de su correcto funcionamiento. Por esta razón, se planteó validar la capa MAC de la tecnología seleccionada por medio de un modelo analítico e implementación. De esta manera se pueden establecer escenarios más complejos con la confiabilidad de que las herramientas utilizadas funcionan de acuerdo a lo establecido por el estándar.

Implementación del escenario de telemonitoreo propuesto en el modelo de simulación validado. Se implementó el escenario de telemonitoreo a evaluar dentro del simulador de red. De manera adicional se implementó una cama de pruebas basada en sensores con la pila de protocolos del estándar IEEE 802.15.4 con la finalidad de comparar los resultados del modelo de simulación. Esto involucra la definición de cada uno de los parámetros y los valores que van a tomar. Además, se estableció las métricas de importancia para el análisis posterior.

Análisis estadístico de los resultados obtenidos del modelo de simulación validado. Posterior a las exhaustivas simulaciones, se recolectaron los resultados para la realización de un análisis estadístico que nos permita encontrar cuales son los parámetros que afectan en mayor medida al mecanismo de traspaso dentro del contexto de un telemonitoreo médico.

Elaboración de conclusiones para el desarrollo de mecanismos de traspaso. Con los resultados obtenidos, se realizaron una serie de recomendaciones sobre los parámetros y consideraciones que deben tomarse para el diseño de un mecanismo de traspaso para aplicaciones médicas.

1.6 Organización de la tesis

En el capítulo 2 se describe el contexto en el que funciona el telemonitoreo hospitalario. Se enlistan las variables fisiológicas que pueden ser involucradas en este tipo de aplicaciones, así como el perfil de tráfico que éstas generan de acuerdo con el muestreo y resolución necesaria para cada una de las variables. Esto es necesario en la definición del escenario a evaluar, para determinar las tasas de datos que se generan por usuario.

En el capítulo 3 se muestran las características del estándar IEEE 802.15.4. En esta sección se pretende explicar la arquitectura del estándar y los mecanismos que contempla en realización con el traspaso de usuarios.

En el capítulo 4 se puede encontrar la metodología seguida para la validación de la capa MAC de IEEE 802.15.4 correspondiente al modelo matemático retomado, la simulación y la implementación. Se comparan y analizan los resultados de las tres partes realizadas, con el objetivo de contar con un modelo de simulación con un comportamiento cercano a la implementación y sustentado en un modelo analítico.

El capítulo 5 consta de la realización de exhaustivas simulaciones basadas en el escenario propuesto, así como la implementación con el objetivo de comparar los resultados. También se muestra el análisis estadístico realizado con los resultados de las simulaciones para determinar los parámetros que afectan en mayor medida a los mecanismos de traspaso. Se enlistan a manera de guía, recomendaciones para el desarrollo de mecanismos de traspaso para aplicaciones de telemonitoreo hospitalario.

Para finalizar el trabajo de tesis, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y reflexiones de este trabajo de investigación. De igual manera, se enlista el trabajo futuro como continuidad de este trabajo.

Capítulo 2. Telemonitoreo hospitalario

2.1 Introducción

En la actualidad existe un gran número de sensores en la industria que pueden ser usados para medir parámetros fisiológicos como: temperatura, humedad, presión, iluminación, gas etc. La estandarización de las interfaces de sensores y protocolos de comunicación son necesarios para que exista una integración y unificación de estos para aplicaciones. El objetivo de la estandarización es permitir que los sensores de diferentes empresas manufactureras trabajen juntos sin la intervención o modificación.

En el contexto de un hospital, el monitoreo de variables fisiológicas es necesario y puede variar dependiendo del escenario y aplicación cuestión, así como de la situación del paciente dado que cada padecimiento requiere un tratamiento específico. Con la combinación de los sensores y las redes inalámbricas, el personal médico puede monitorear constantemente a los pacientes en cuestiones de salud y comportamiento en todo momento. En este capítulo se hace énfasis en las variables fisiológicas más comunes dentro de un hospital y en específico las utilizadas durante el trabajo de tesis.

2.2 Variables fisiológicas

Electrocardiograma (ECG)

El ECG es la representación gráfica de la actividad eléctrica del corazón y es una prueba física ampliamente utilizada para valorar la condición del corazón en forma no invasiva. La herramienta utilizada se conoce como electrocardiógrafo y es comparable a un voltímetro que realiza una función de registro de la actividad eléctrica.

Dentro de un ECG, las derivaciones se refieren a la medida del voltaje entre dos electrodos. Los electrodos se colocan sobre el cuerpo del paciente. Las derivaciones de un ECG utilizan diferentes combinaciones de electrodos para medir distintas señales procedentes del corazón: en forma figurada, cada derivación es como una "fotografía" de la actividad eléctrica del corazón, tomada desde un ángulo diferente. Por ejemplo, para realizar un ECG estándar de 12 derivaciones, hacen falta 10 electrodos.

- Las derivaciones I, II y III son periféricas y son las más comunes y utilizadas para un ECG básico, estas miden la diferencia de potencial entre los electrodos situados como se describe a continuación (Hartmann, 2003):
- La derivación I mide la diferencia de potencial entre el electrodo del brazo derecho y el izquierdo
- La derivación II, del brazo derecho a la pierna izquierda.
- La derivación III, del brazo izquierdo a la pierna izquierda.

Presión sanguínea

La presión sanguínea o presión arterial es la tensión ejercida por sangre circulante sobre las paredes de los vasos sanguíneos, y constituye uno de los principales signos vitales. La presión arterial es comúnmente medida por medio de un esfigmomanómetro, que usa la altura de una columna de mercurio para reflejar la presión de circulación. Los valores de la presión sanguínea se expresan en milímetros del mercurio (mmHg), a pesar de que muchos dispositivos de presión vascular modernos ya no usan mercurio.

Los valores típicos para un ser humano adulto sano y en reposo, son aproximadamente 120 mmHg para la sistólica y 80 mmHg para la diastólica, comúnmente escrita como 120/80 mmHg. Estas medidas tienen grandes variaciones de un individuo a otro y no son estáticas, por lo que experimentan variaciones naturales entre un latido del corazón a otro y en el transcurso del día, al igual que depende de la actividad que esté realizando el individuo; también cambian en respuesta al estrés, factores alimenticios, medicamentos, o enfermedades. Las principales enfermedades relacionadas con la presión sanguínea son: la hipertensión que se refiere a la presión sanguínea anormalmente alta, y, por el contrario, la hipotensión es cuando la presión sanguínea se encuentra anormalmente baja. La presión arterial también es una herramienta muy común en el diagnóstico de diabetes.

Saturación de oxígeno

La saturación de oxígeno es la medida de la cantidad de oxígeno disponible en el torrente sanguíneo. La saturación de oxígeno en la sangre saludable se encuentra entre un 95% y un 100%. Los pacientes con niveles de oxígeno en sangre por debajo de 90% se consideran que tienen hipoxemia, y un

nivel de oxígeno en la sangre por debajo del 80% se conoce como hipoxemia severa. La dificultad para respirar es el síntoma principal de la hipoxemia. Hay varias causas para esta enfermedad, como la enfermedad cardíaca congénita o un bajo gasto cardíaco.

La herramienta para realizar la medición de la saturación de oxígeno en la sangre se llama oxímetro de dedo (o de pulso) o lóbulo de una oreja. Se trata de un pequeño dispositivo que se sujeta en el lóbulo del dedo y lanza dos rayos de luz, uno rojo (660nm) y otro infrarrojo (940nm), a través de la piel del paciente. Estos haces de luz permiten al oxímetro por medio de un fotodiodo leer los cambios de color en la sangre causadas por la absorción de la luz, lo que proporciona una estimación inmediata de la saturación de oxígeno en la sangre.

Temperatura

La medición de temperatura corporal es una herramienta básica para el diagnóstico de enfermedades comunes como infecciones. Es un síntoma claro que indica alguna anomalía en el cuerpo del paciente. La temperatura corporal varía dependiendo de la persona, edad y el momento del día, sin embargo, algunos estudios han demostrado que el rango de temperatura “normal” es de 36.1° a 37.2° grados centígrados.

2.3 Perfiles de tráfico

Las variables fisiológicas son analógicas al igual que cualquier variable que podemos encontrar en la naturaleza, por lo que pueden ser caracterizadas dentro del rango de valores que pueden llegar a tomar. Por lo tanto, cada variable fisiológica debe ser tratada diferente, pero en general, todas deben ser muestreadas y cuantizadas para obtener una digitalización de la señal y de esta manera poder enviarla a través de una red de comunicaciones. A continuación, se describen las tasas de datos que generan las variables fisiológicas anteriormente mencionadas.

Para aplicaciones clínicas, el ECG estándar tiene un ancho de banda de 0.05Hz a 100Hz, por lo tanto, se puede determinar que la frecuencia mínima de muestreo es de 200Hz. La literatura (Pizzut et al., 1985) afirma que la frecuencia óptima de muestreo es de 250Hz. Por ejemplo, con la frecuencia de

muestreo anteriormente mencionada y usando una resolución de 16 bits por muestra, se tiene una tasa de datos por cada canal de 4000bps (250Hz) (16 bits).

La presión arterial puede ser medida de manera intrusiva y no intrusiva y existen una amplia variedad de técnicas para realizar la medición. El esfigmomanómetro es un dispositivo en forma de brazalete que se coloca en el brazo del paciente para realizar la medición de forma no intrusiva. Las muestras para la medición son tomadas a una frecuencia de 120Hz con una resolución de 16 bits, dando una tasa de datos de 1920bps.

El oxímetro de pulso forma parte de las herramientas básicas para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades relacionadas con el corazón. Dado que los niveles de oxígeno en la sangre están relacionados con el pulso cardiaco, se debe muestrear a 60Hz con una resolución de 16 bits, dando una tasa de datos de 960bps.

La temperatura se realiza por medio de un termómetro electrónico. Lo recomendado es tomar la temperatura del paciente con una frecuencia de 0.2Hz y usar una resolución de 16 bits, dando una tasa de 2.4bps.

Las variables fisiológicas anteriormente descritas suelen ser utilizadas en diferentes aplicaciones de telemonitoreo en escenarios dentro de hospitales o en hogares y son importantes para el tratamiento de enfermedades crónico-degenerativas como la hipertensión, diabetes y problemas cardiacos. Sin embargo, se puede hacer uso de la combinación de algunas otras variables médicas de acuerdo con lo que requiera la condición del paciente y lo que crea más conveniente el médico en cuestión. En la tabla 2 se muestra un resumen de las tasas de datos que generan algunas señales fisiológicas comúnmente utilizadas para evaluar tecnologías inalámbricas como las WBAN/WPAN en aplicaciones de telemonitoreo (Adibi, 2012; Abdullah et al., 2015; Casillas et al., 2015; Elhadj et al., 2016).

Tabla 2. Características de algunas variables fisiológicas.

Señal biomédica	Muestreo y resolución	Tasa de datos
ECG	Muestreo: 200Hz (x3 Ch.) 12-16 bits/muestra	7,200-9,600bps
Detección de movimiento	Muestreo: 50Hz (x9 Ch.) 16 bits/muestra	7,200bps
Presión sanguínea	Muestreo: 120Hz 16 bits/muestra	1,920bps
Oximetría (SpO₂)	Muestreo: 60Hz (x2 Ch.) 16 bits/muestra	1,920bps
Respiración	Muestreo: 50Hz 6 bits/muestra	300bps
Temperatura corporal	Muestreo: 0.2Hz 12 bits/muestra	2.4bps

Con la información anterior, es posible realizar un análisis de los requerimientos para la transmisión de las variables fisiológicas ya mencionadas por medio de tecnologías inalámbricas principalmente de tasas medianas y bajas, que proporcionan un consumo bajo de energía. Es importante mencionar que la literatura muestra que la mayoría de estas variables no son sensibles al retardo con excepción del ECG y de la detección de movimiento. Esto da la posibilidad al análisis y desarrollo de esquemas de empaquetamiento que permitan una transmisión más eficiente y de esta manera aprovechar lo más posible los recursos limitados de red en un escenario de telemonitoreo.

2.4 Escenario de despliegue

Uno de los casos de mayor éxito de despliegue de sistemas de salud móvil se puede encontrar en *Whole System Demonstrator Programme* (Henderson et al., 2013), creado por el departamento de salud del Reino Unido. El objetivo de este programa fue el observar como la tecnología puede ayudar a la gente a mejorar su salud a largo plazo. Los resultados obtenidos incluyen:

- 45% de reducción de las tasas de mortalidad.
- 21% de reducción de admisiones de emergencia por persona.
- 14% de reducción de días en cama por persona.
- 8% de reducción de costos en tarifas por persona.

La búsqueda de beneficios como los enlistados anteriormente, han propiciado que el monitoreo de pacientes se amplíe considerablemente, de manera que puede ser usado en escenarios donde el paciente es monitoreado en casa, esto debido al incremento en la necesidad de servicios médicos para adultos. Explotar las capacidades de los servicios para controlar equipos y herramientas en casa puede ayudar a los pacientes a recordar el tomar sus medicamentos, buscar información médica o tener una comunicación con sus cuidadores o personal médico. Todo lo anterior mientras se actualizan los datos médicos en las bases de datos. Existe una amplia variedad de aplicaciones que se han creado para el monitoreo en casa, como la detección de movimiento y caídas, localización y recordatorios de toma de medicamentos. Esto permite una observación completa del paciente sin causar un efecto en su vida cotidiana, lo que da como resultado una disminución de costos en consultas médicas y traslados. En este tipo de aplicaciones los usuarios por hogar son escasos y por lo tanto los requerimientos tienen a ser menores, además de que el área de cobertura del servicio está limitada perfectamente.

El telemonitoreo puede ser trasladado a escenarios en donde el número de usuarios sea mayor, al igual que un área de cobertura extendida. Ejemplos de estas aplicaciones se pueden encontrar en casas de retiro u hospitales. De (Misra et al., 2015) se basa la figura 4, en donde se establece un escenario de telemonitoreo hospitalario real. Se puede observar las distintas áreas dentro de un hospital como los cuartos de los pacientes en donde puede haber más de un paciente siendo monitoreado, el área de cuidados intensivos donde muy posible se debe monitorear a pacientes con más de un sensor. Adicional a esto, se tiene salas de estar o de entretenimiento, cafeterías, recepción, baños y elevadores en dónde los pacientes se encuentran transitando en todo momento. Con la figura 4 se puede determinar que los pacientes se concentran en áreas de cobertura específicas, aunque es posible que tenga la necesidad de moverse a alguna otra área del hospital con la finalidad de recibir terapia, realizarse estudios que el médico en cuestión mandó o simplemente hacer caminatas y utilizar algún servicio extra que ofrezca el hospital.

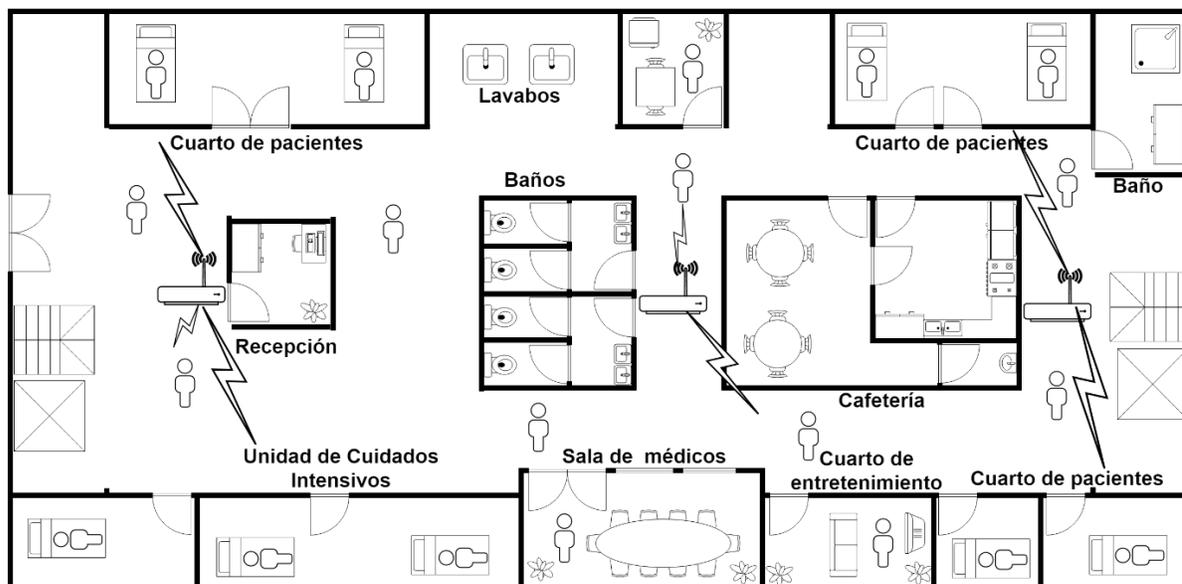


Figura 4. Escenario ejemplo de despliegue.

Por estas razones, es necesario considerar que a partir del perfil de tráfico (como el de la tabla 2) se puede determinar qué tipo de tecnología puede soportar las tasas de datos que se requieren por usuario y el comportamiento cuando una red de esta tecnología se encuentra sirviendo a una serie de usuarios, es decir, la cantidad de usuarios que pueden estar operando en la red sin que esta se sature y afecte el desempeño de la aplicación. Adicional a las tasas de datos, la tecnología debe mostrar una respuesta adecuada cuando se trata de variables fisiológicas con sensibilidad al retardo o pérdida de paquetes, por lo que cuando la red contiene un conjunto de usuarios, es necesario evaluar su desempeño en términos de retardo en la recepción y pérdida de paquetes debido a una posible saturación.

Otra característica importante que debe evaluarse de la tecnología son los mecanismos para la movilidad del usuario que esta ofrece, es decir, que procesos o acciones contempla el estándar o se han desarrollado para garantizar la comunicación cuando los usuarios se encuentran en movimiento y qué efectos tiene dicha movilidad en el desempeño de la aplicación para determinar si es factible su implementación. Ligado a esta característica, se encuentran algunas otras que hacen complejo y objeto de estudio a los mecanismos de movilidad para redes como las WBAN/WPAN, dentro de éstas características podemos encontrar:

- El canal inalámbrico del escenario: es decir, si se trata de un escenario en exteriores o interiores, con línea de vista o sin ella, los tipos de obstáculos que se encuentra (ej. Árboles, edificios, paredes, etc.). Esto puede tener repercusiones directas en el desempeño de la red y el área de cobertura garantizada de la tecnología.
- La movilidad del usuario: La velocidad con la que se mueven los usuarios y el comportamiento del movimiento (constante, esporádico o aleatorio). Esta característica está ligada directamente con los mecanismos de movilidad que se deben considerar para garantizar comunicación al realizar traspasos de manera recurrente.
- Distribución de los puntos de acceso: Cuántos puntos de acceso o resumideros se encuentran dentro del escenario, el área de cobertura de cada uno de ellos y el área de intersección de dichas áreas por resumidero. La distribución puede tener efecto en el número de traspasos que se realicen o la contención que puede ocasionar al generar interferencia en otras áreas de cobertura.
- Monitoreo de la conexión con el resumidero: La forma de conocer por parte del usuario o del resumidero si el dispositivo se encuentra todavía dentro de la red, forma parte importante en el mecanismo de movilidad, ya que mediante esta acción el nodo puede tomar la decisión de cambiar de área de cobertura o buscar alguna reconexión con su resumidero actual.

Capítulo 3. Traspaso entre resumideros en el estándar IEEE 802.15.4

3.1 Introducción

Las redes WBAN/WPAN son utilizadas para la transmisión de información a cortas distancias entre un conjunto de dispositivos participantes dentro de la red. Estas redes suelen formarse con poca o nula infraestructura, con mecanismos de conectividad directa entre los nodos e incluso con comunicación entre redes de la misma o de diferente tecnología. La flexibilidad de estas redes permite el desarrollo de soluciones de tamaño diminuto, con eficiencia en el consumo de energía e ideales para la implementación a gran escala en aplicaciones con una gran cantidad de usuarios. Con estas características han surgido una serie de tecnologías de WPANs como las ya mencionadas en el capítulo 1.

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por sus siglas en inglés) es una de las instituciones más importantes a nivel mundial encargadas de la estandarización en las áreas técnicas que abarca. El grupo de trabajo IEEE 802.15 fue creado para diseñar las especificaciones y estándares de las redes WPAN. Dentro de este grupo de trabajo se tiene otros grupos más específicos como el grupo 4 que fue constituido para realizar investigación en soluciones con tasas bajas de datos y autonomía en la alimentación, es decir, duración prolongada de las baterías, lo que involucra una baja complejidad de la red (IEEE Standards Association, 2005). El estándar IEEE 802.15.4 fue liberado en el 2003 y desde entonces se han liberado versión actualizadas con cambios de acuerdo con las mejoras y evolución que va teniendo la tecnología, así como protocolos opcionales diseñados para aplicaciones específicas.

En este trabajo se propone utilizar el estándar IEEE 802.15.4 para el envío de la información emulando las tasas de generación de datos correspondientes a los sensores brindados a los pacientes para un telemonitoreo hospitalario. El envío de la información se hace hacia un resumidero, es decir, una red de un solo salto o topología estrella. La selección de esta tecnología fue debido a que, como ya se mencionó, el estándar IEEE 802.15.4 se utiliza para la definición de otras tecnologías (ZigBee, 6LoWPAN, WirelessHart, entre otros), además, esta tecnología ofrece simplicidad en su arquitectura. Lo anterior hace de este estándar objeto de estudio y análisis en escenarios de telemonitoreo con la finalidad de desarrollar mecanismos y protocolos que agreguen robustez ante este tipo de aplicaciones. En este capítulo se describen las características más relevantes del estándar IEEE 802.15.4 y el funcionamiento de sus protocolos, principalmente en la capa MAC, así como los mecanismos que describe el estándar en relación con la movilidad del usuario y los mecanismos de traspaso

3.2 IEEE 802.15.4

El estándar de telecomunicaciones IEEE 802.15.4 define las especificaciones para tecnologías y soluciones para redes inalámbricas de área personal de bajas tasas de datos (LR-WPAN). La versión más reciente del estándar fue liberada en el 2015. Las redes LR-WPAN son simples y de bajo costo para su implementación, permitiendo establecer comunicación inalámbrica en aplicaciones donde los requerimientos establecen un bajo consumo de energía con tasas de datos moderadas. Dentro de los objetivos de las especificaciones del estándar IEEE 802.15.4 se encuentran: la facilidad de instalación, transferencia de datos confiable, limitado rango de operación, bajo costo y duración prolongada de la batería, implementación y mantenimiento simple y flexible de los protocolos que lo involucran. Dentro de las características que define el estándar para las LR-WPAN se pueden observar las siguientes (IEEE Standards Association, 2011):

- Topologías simples: estrella, igual-a-igual (peer-to-peer), malla y árbol.
- Tasas de datos moderadas a bajas: 250 kbps, 100 kbps, 40 kbps y 20 kbps.
- Dos tipos de direccionamiento: corto de 16bits o extendido de 64bits.
- Modo de operación *Beacon-enable* (con paquetes faro) o *Non Beacon-enable* (sin paquetes faro).
- Mecanismo de acceso al medio utilizando CSMA/CA (Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones) ranurado y no ranurado.
- Opción de utilizar ranuras de tiempo garantizadas (GTS) para el modo *Beacon-enable*.
- Opción de habilitar el protocolo de acuse de recibo (ACK) cuando las aplicaciones requieren una alta fiabilidad.
- Utilización de tres bandas de frecuencia con 27 canales en total, distribuidos de la siguiente manera: 16 canales en la banda de 2.4 GHz, 10 canales en la banda de 915 MHz y un canal en la banda de 868MHz.

El estándar IEEE 802.15.4 define la capa PHY y la capa MAC para redes LR-WPAN, estos protocolos sirven como base para otros estándares que a su vez definen especificaciones para las capas superiores (red, transporte, aplicación) de manera que las funcionalidades agregadas por estas capas permiten crear redes más robustas y complejas que incluyen mecanismos de enrutamiento, transporte y entre otros.

3.2.1 Arquitectura

El estándar IEEE 802.15.4 define solamente algunas primitivas (solo un tercio de las usadas por Bluetooth) y por lo tanto es muy adecuado para dispositivos con poca memoria y capacidades computacionales. Dos tipos de dispositivos son definidos dentro del estándar: Dispositivos de Funcionalidades Completas (FFD, por sus siglas en inglés) y Dispositivo de Funcionalidades Reducidas (RFD, por sus siglas en inglés). Un FFD puede comunicarse con los FFDs y RFDs dentro de una red, mientras que un RFD únicamente se puede comunicar con los FFDs. La baja complejidad, bajo costo y bajo consumo de energía son las características que hacen que los desarrollos en esta tecnología puedan correr durante años con el uso de baterías estándar; ya sea para aplicaciones industriales, de agricultura y de medicina (Dishongh & McGrath, 2010).

IEEE 802.15.4 soporta tres modos de operación para los dispositivos: coordinadores de la PAN, coordinadores y los dispositivos finales, a continuación, se describen de manera breve las funcionalidades de cada uno de los modos de operación.

- **Coordinador PAN:** Es el encargado de iniciar la red, es decir, realiza la selección del canal y del identificador de red (PAN ID) para que los demás dispositivos se asocien a ella. Cuando se trabaja en el modo Beacon-enable el coordinador PAN también se encarga de la sincronización de cada dispositivo de la red para la transmisión. Este dispositivo también opera como Gateway (puerta de salida) para la comunicación con otras redes.
- **Coordinador:** Son dispositivos colaboran entre ellos para tener información de enrutamiento y una organización de la red, pueden encargarse de la sincronización de otros dispositivos dentro de su área de alcance, sin embargo, solamente puede haber un coordinador PAN.
- **Dispositivo final:** No tienen enrutamiento y solamente se pueden comunicar con los coordinadores. Los coordinadores requieren ser dispositivos FFD, mientras que los dispositivos finales pueden ser RFD.

El estándar IEEE 802.15.4 define dos tipos de topologías: topología estrella e igual-a-igual, esta última puede ser extendida para formar topologías tipo malla y árbol, como se muestran en la figura 5. En la topología estrella se establece un nodo central que en este caso es el coordinador de la PAN y los dispositivos asociados a esta red únicamente tienen comunicación directa con el coordinador PAN. Mientras que en la topología igual-a-igual se establece comunicación entre cualquier dispositivo siempre

y cuando se encuentre dentro del área de cobertura y con las limitantes del dispositivo en cuestión (es decir, si se trata de un dispositivo RFD o FFD). Este modo de operación permite la creación de redes más complejas como las ya mencionadas topologías malla y árbol.

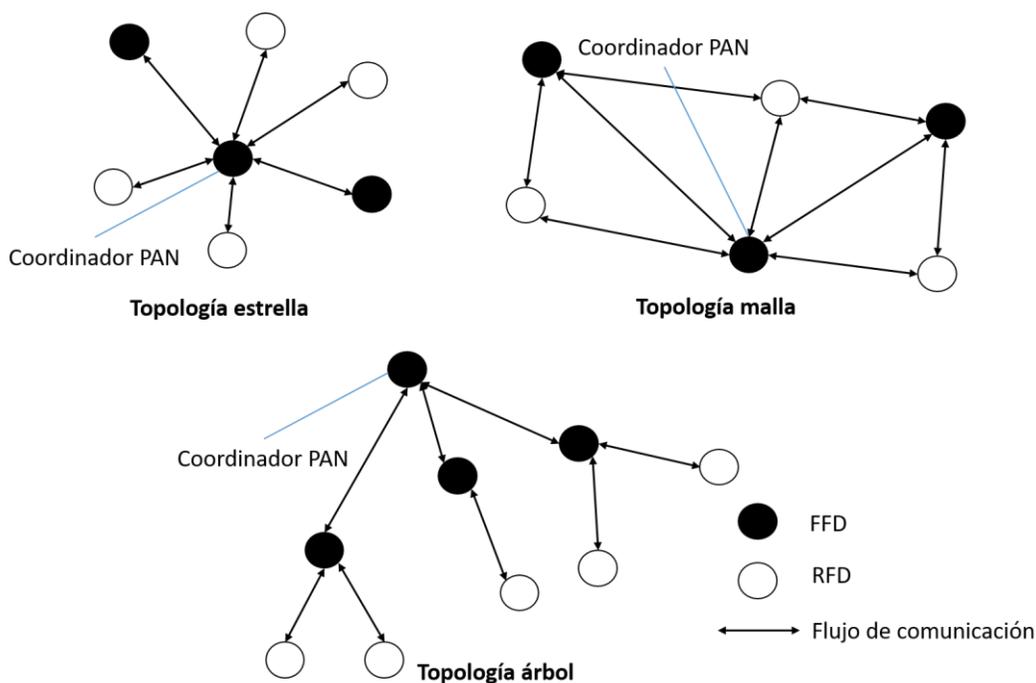


Figura 5. Topologías soportadas.

3.2.2 Capa física

La capa física del estándar IEEE 802.15.4 se encarga de realizar las siguientes funciones:

- Apagado y encendido del transceptor para el ahorro de energía.
- Detección de Energía (ED, por sus siglas en inglés) dentro del canal de operación.
- Evaluación del Canal Libre (CCA, por sus siglas en inglés) como parte del funcionamiento de CSMA/CA con la finalidad de determinar si el canal se encuentra ocupado.
- Selección del canal de operación.
- Transmisión y recepción de los datos.

IEEE 802.15.4 utiliza un total de 27 canales distribuidos en las bandas de frecuencia de 2.4GHz, 902 a 928MHz (Norte América) y 868 MHz (Europa), como se muestra en figura 6. Esto indica que se tienen tres tasas diferentes de datos sobre el aire: 16 canales con una tasa de 250kbps, 10 canales con una tasa de 40kbps y un canal con 20kbps. Cada red puede seleccionar uno de estos canales dependiendo de la disponibilidad, congestión y tasa de datos por canal.

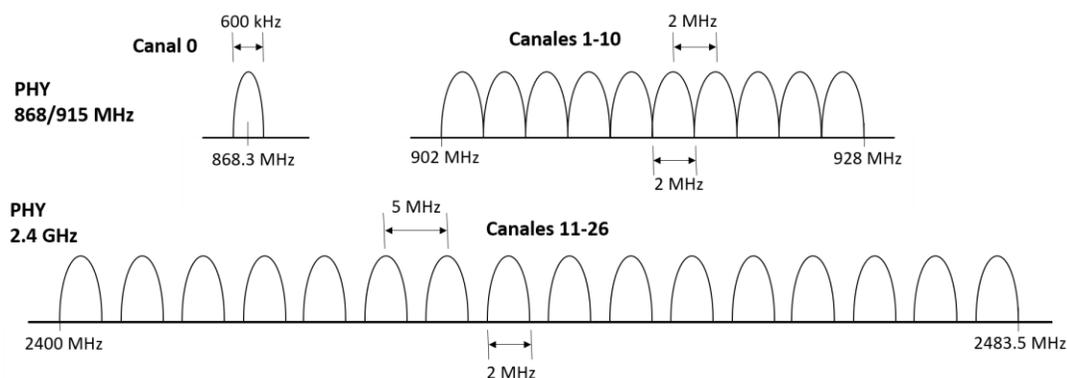


Figura 6. Canales de la capa PHY.

Todas las bandas de frecuencia utilizan la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, por sus siglas en inglés), la cual utiliza secuencias de chips con la finalidad de mitigar la interferencia de otras redes y agregando robustez frente al ruido ocasionado por el uso de otras tecnologías en las mismas bandas de frecuencia. Sin embargo, el estándar define características de operación diferentes para cada banda de frecuencia como lo son: el ancho de banda por canal, números de canales, tasa de transmisión, parámetros de ensanchado, modulación, entre otras. Estas diferencias en las características de operación por banda de frecuencia se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Bandas de frecuencias del estándar IEEE 802.15.4 .

Banda / Capa física	Tasa de chips (kchips/s) ensanchado	Tasa de datos kbps	Símbolos (kbaudios)	Esquema de modulación
868MHz	300	20	20	BPSK
902-928MHz	600	40	40	BPSK
2.4GHz	2000	250	62.5	O-QPSK

La estructura de la Unidad de Datos del Protocolo PHY (PPDU, por sus siglas en inglés) que define el estándar IEEE 802.15.4 se compone de los siguientes campos (se muestra en la figura 7):

- El Encabezado de Sincronización (SHR, por sus siglas en inglés), el cual tiene la función de establecer la sincronización con la serie de bits que se están recibiendo. Se conforma de dos partes: el campo con la secuencia de preámbulo, utilizado por el transceptor para la sincronía con los chips y el Delimitador de Inicio de Trama (SFD, por sus siglas en inglés), el cual funciona para indicar el final del SHR y el inicio de la trama de datos.
- El Encabezado PHY (PHR, por sus siglas en inglés) el cual contiene la longitud de la trama incluyendo este campo.
- La Unidad de Datos de Servicio PHY (PSDU, por sus siglas en inglés), la cual corresponde a la carga útil de la capa PHY. Consta de una longitud variable que depende de la trama de la capa MAC, sin embargo, el tamaño máximo definido por el estándar para la PSDU es de 127 bytes.

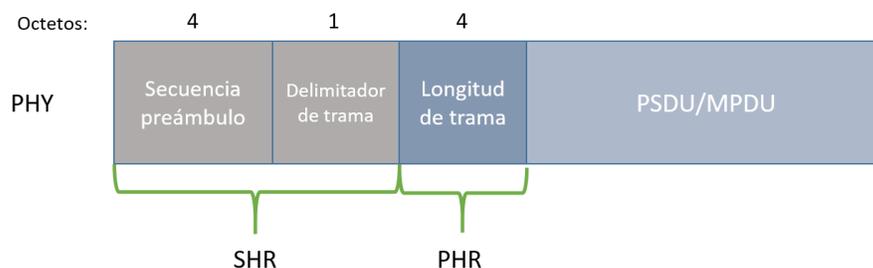


Figura 7. Formato de PDU de la PHY de IEEE 802.15.4.

3.2.3 Capa MAC

La capa MAC es la encargada de tareas como: la transmisión de paquetes faro (*beacons*), el acceso al canal, la asignación de las Ranuras de Tiempo Garantizadas (GTS, por sus siglas en inglés), comprobación y validación de las tramas, transmisión de los Acuses de Recibo (ACK, por sus siglas en inglés), establecimiento de los procesos de asociación y disociación (escaneo activo/pasivo del canal).

El estándar IEE 802.15.4 define dos modos de operación para el acceso al canal: con paquetes faro (*beacon-enable*) y sin paquetes faro (*non beacon-enable*).

- El modo de operación con paquetes faro utiliza una estructura de supertrama como se muestra en la figura 8. La supertrama se encuentra delimitada por los paquetes faro enviados periódicamente por el coordinador de la PAN, los cuales son utilizados para la sincronización de todos los dispositivos que se encuentran asociados a la red. La supertrama está conformada por un periodo activo y un periodo inactivo definidos por medio de los parámetros: Orden del Paquete faro (BO, por sus siglas en inglés) y Orden de la Supertrama (SO, por sus siglas en inglés) donde $0 \leq SO \leq BO \leq 14$. El periodo activo a su vez se divide en dos partes: el Periodo de Acceso por Contención (CAP, por sus siglas en inglés) y el Periodo Libre de Contención (CFP, por sus siglas en inglés). Durante el periodo acceso por contención, los nodos contienden por acceder al canal utilizando el mecanismo de CSMA/CA ranurado (es decir, se establecen ranuras de tiempo gracias a la sincronización por medio de los paquetes faro del coordinador). Durante el periodo libre de contención, se tiene la posibilidad de reservar ranuras de tiempo (GTS) para los dispositivos que requieran tener una transmisión garantizada. Durante el periodo inactivo de la supertrama los dispositivos dentro de la red incluido el coordinador, dejan de interactuar entre ellos, lo que les permite entrar en un modo de operación de bajo consumo de energía.
- En el modo de operación sin paquetes faro, no se utiliza la estructura de supertrama y no se cuenta con periodos de inactividad, por lo que el acceso al canal se realiza mediante el mecanismo CSMA/CA no ranurado, es decir, no se cuenta con sincronización por parte del coordinador debido a que no hay transmisión periódica de los paquetes faro.

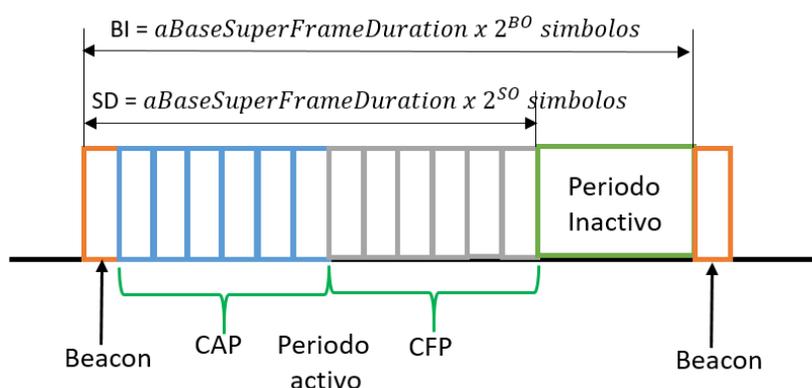


Figura 8. Estructura de la supertrama.

Dependiendo del modo de operación elegido (con paquetes fero o sin paquetes fero), el acceso al medio se realiza por medio del algoritmo CSMA/CA ranurado o no ranurado, respectivamente. Los dos algoritmos son implementados utilizando unidades de tiempo llamadas periodos de desistimiento (*backoff periods*), donde cada periodo equivale a $aUnitBackoffPeriod$ símbolos, variable dependiente de la banda de frecuencia de operación. Cuando se utiliza CSMA/CA ranurado los periodos de desistimiento de cada dispositivo dentro de la PAN están alineados con los límites de las ranuras de la supertrama indicados por los paquetes fero de los coordinadores, es decir, los periodos de desistimiento de cada dispositivo están sincronizados. Por el contrario, cuando se trabaja en el modo sin paquetes de fero, se utiliza CSMA/CA no ranurado, donde los periodos de desistimiento de los dispositivos no están sincronizados con los de los demás.

Las principales variables para el algoritmo CSMA/CA son las siguientes:

- NB: Etapas de desistimiento, inicializado en 0 para cada uno de los intentos de transmisión. Esta variable indica el número de veces que el algoritmo tuvo que desistir al intentar acceder al canal para realizar una transmisión y pasar a la siguiente etapa de desistimiento. El número máximo de intentos o etapas de desistimiento está dado por *macMaxCSMABackoff*.
- BE: Es el exponente de desistimiento (*backoff exponent*) asociado con el número de periodos de desistimiento que un dispositivo debe esperar antes de intentar acceder al canal. El intervalo de valores que puede tener el exponente de desistimiento está definido por [*macMinBE*, *macMaxBE*], los cuales corresponden al valor mínimo y máximo del exponente de desistimiento respectivamente.
- CW: La ventana de contención (*Contention Window*) Es la longitud de la ventana de contención, en la cual se establece el número de periodos de desistimiento que el canal debe de estar libre de actividad antes de que el dispositivo pueda realizar una transmisión.
- IFS: Espacio Inter-Trama (*Inter-Frame Spacing*) Al finalizar cada transmisión, es necesario esperar un tiempo de espacio denominado inter-trama, debido a que la capa MAC necesita un espacio de tiempo para procesar los datos obtenidos de la capa PHY y además el radio necesita un tiempo para pasar del estado de transmisión al de recepción.

En la figura 9 se muestra un diagrama de flujo del algoritmo de acceso al medio CSMA/CA no ranurado. Cuando un dispositivo desea realizar una nueva transmisión, las variables NB y BE son inicializadas, posteriormente, la capa MAC espera un número aleatorio de periodos de desistimiento

uniformemente distribuidos en el intervalo de $[0, 2^{BE} - 1]$ de acuerdo con el estándar. Después del periodo de espera, la capa PHY realiza la evaluación del canal libre (CCA) para determinar si el canal se encuentra libre, si el canal está libre durante el CCA, la capa MAC comienza la transmisión de inmediato. Posterior a cada transmisión es necesario esperar un IFS, debido a que la capa MAC necesita un periodo de tiempo para procesar los datos obtenidos de la capa PHY y realizar el cambio del radio TX/RX.

Para el caso en el que el canal se encuentre ocupado al momento de realizar el CCA, la capa MAC incrementa los valores de NB y BE, verificando que el valor de BE no sea mayor a $macMaxBE$. Por su parte, si el valor de NB es menor o igual que $macMaxCSMABackoffs$, el algoritmo CSMA/CA regresa al paso 2, de lo contrario el algoritmo termina con el estado de acceso al canal fallido y descarta el paquete.

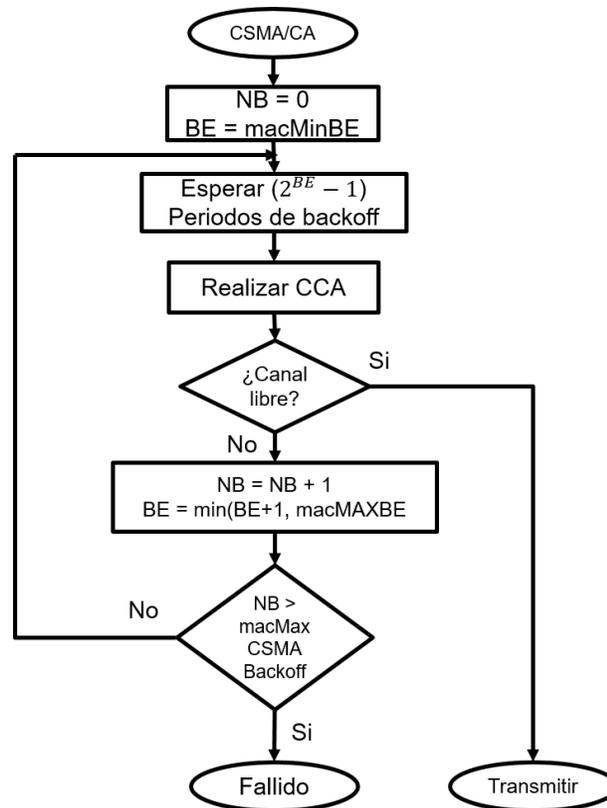


Figura 9. Diagrama de flujo del algoritmo CSMA/CA no ranurado.

La estructura de la Unidad de Datos del Protocolo MAC (MPDU, por sus siglas en inglés) es encapsulada en la PSDU correspondiente a la capa física y consiste en los siguiente cuatro componentes (figura 10):

- Encabezado MAC (MHR, por sus siglas en inglés) el cual contiene el Campo de Control de Trama (FCF, por sus siglas en inglés), el número de secuencia, identificador de la PAN origen y destino, direcciones (cortas o extendidas) origen y destino, y un encabezado de seguridad opcional.
- La Unidad de Datos de Servicio MAC (MSDU, por sus siglas en inglés) o carga útil de la capa MAC, la cual contiene la información a transmitir que puede provenir de capas superiores.
- El Pie de MAC (MFR, por sus siglas en inglés) el cual contiene una secuencia para la comprobación de la trama (FCS, por sus siglas en inglés) para la detección de bits erróneos.

La estructura general de la trama MAC se puede observar en la figura 10. El tamaño de los campos de direcciones para los paquetes de datos y de control pueden variar dependiendo del tipo de direccionamiento utilizado. Cuando se utilizan direcciones cortas, los campos de direcciones únicamente se forman con 32 bits (16 bits dirección origen y 16 bits para la dirección destino). El direccionamiento extendido se suele utilizar cuando los paquetes de datos van dirigidos a una PAN externa, por lo tanto, se agregan 16 bits de identificación para la PAN origen y 16 bits para la PAN destino, además se utilizan direcciones de 64 bits para el campo de origen y destino, dando un total de 20 bytes de longitud máxima en los campos de direcciones. El campo FCS consta de 2 bytes, mientras que la carga útil puede ser variable con una longitud máxima que depende del tipo de direccionamiento utilizado, ya que se debe respetar la longitud máxima de 127 bytes para el MPDU.

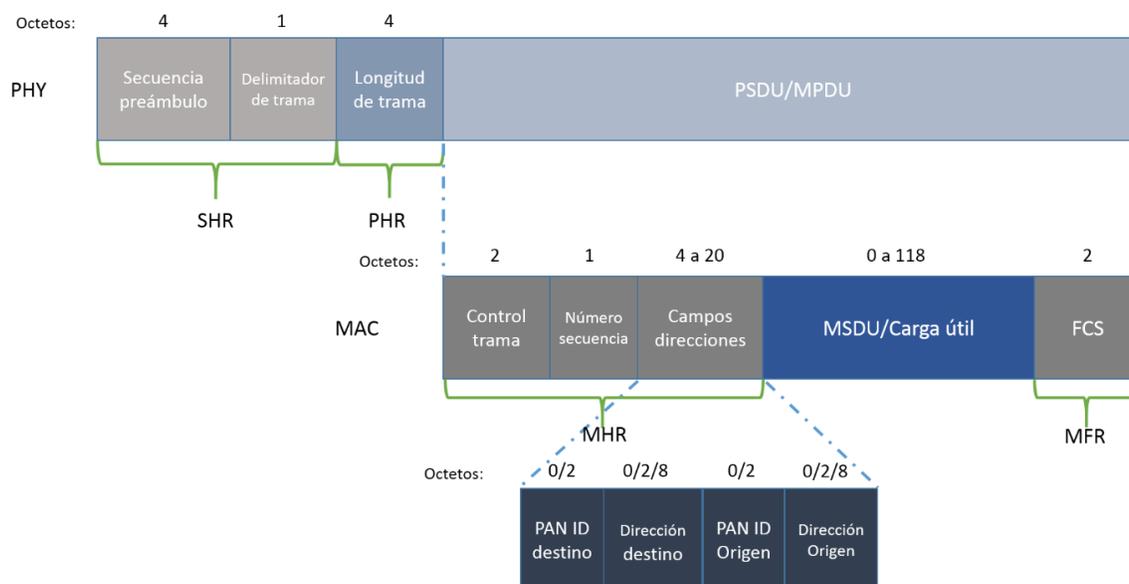


Figura 10. Formato de los encabezados MAC de IEEE 802.15.4.

Para el caso de los acuses de recibo, la estructura del paquete se muestra en la figura 11. Los encabezados PHY son los mismos para cualquier tipo de paquete, mientras que los encabezados correspondientes a la capa MAC únicamente se conforman por el campo de control de trama, número de secuencia y el pie de MAC. Esto da un total de 11 bytes que conforman una trama de acuse de recibo.

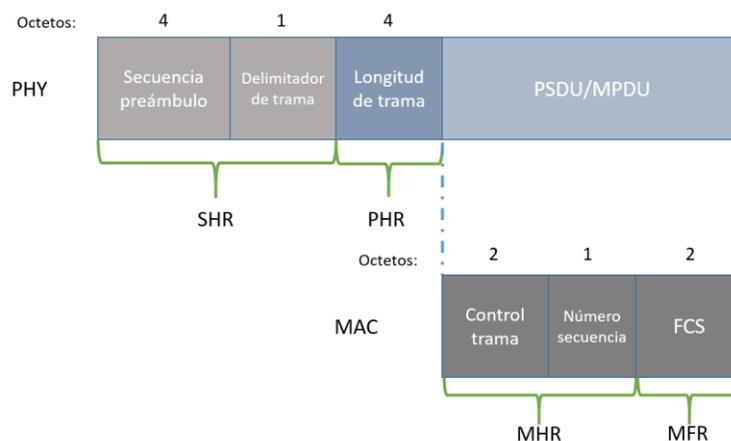


Figura 11. Formato de los encabezados para un ACK.

3.3 Traspaso entre resumideros de una red IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 no considera la movilidad del usuario, por lo que no define algún mecanismo de traspaso o algo similar que ayude a mitigar los problemas que ocurren cuando el usuario cambia de cobertura entre resumideros. Por lo tanto, el estándar únicamente define el proceso que debe seguir un dispositivo para asociarse a una PAN, es decir, para asociarse al coordinador de la PAN y por otra parte, el proceso que debe seguir el dispositivo para lograr la disociación de la red cuando este o el coordinador lo soliciten.

El proceso de asociación se muestra en la figura 12 y se puede iniciar de dos formas: mediante un escaneo activo o uno pasivo. El escaneo activo se lleva a cabo cuando el dispositivo envía peticiones de paquetes faro (*beacon request*) en los canales de la banda donde está operando y realiza un tiempo de espera para la recepción de un paquete faro en el caso de que se encuentre algún coordinador operando en dicho canal, de lo contrario, el dispositivo salta de canal y realiza el mismo procedimiento. Al final del escaneo activo, el dispositivo elige con cuál de los coordinadores que encontró realizará el proceso de

asociación. Por otra parte, en el escaneo pasivo, el dispositivo realiza el tiempo de espera en cada uno de los canales de la banda de operación en la que se encuentra para la recepción de paquetes faro (sin realizar la petición de paquete faro) por parte algún coordinador, este tipo de escaneo se realiza cuando el modo de operación es *beacon-enable*. El proceso de asociación consta de tres pasos:

- Petición de asociación (*Association Request*): realizada por el dispositivo para indicar al coordinador que desea asociarse a la PAN en cuestión. El coordinador tiene un tiempo *macResponseWaitTime* para determinar si cuenta con recursos suficientes para albergar a otro dispositivo dentro de la red, de ser así el coordinador responde con un paquete de acuse de recibo.
- Petición de datos (*Data Request*): Cuando el dispositivo recibe el ACK correspondiente a la petición de asociación, realiza la petición de datos que le indica al coordinador que debe responder con los parámetros del funcionamiento de la red. El coordinador primeramente debe responder a esta petición con un acuse de recibo.
- Respuesta de asociación (*Association Response*): Es el paquete de respuesta por parte del coordinador que contiene la información de la PAN como el modo de operación, es decir, los valores de SO y BO, si se maneja seguridad en la red, el tipo de direccionamiento (corto o extendido) y de manejarse direccionamiento corto, el coordinador asigna la dirección corta al dispositivo mediante este paquete. El dispositivo debe responder con un acuse de recibo y de esta manera se completa el proceso de asociación.

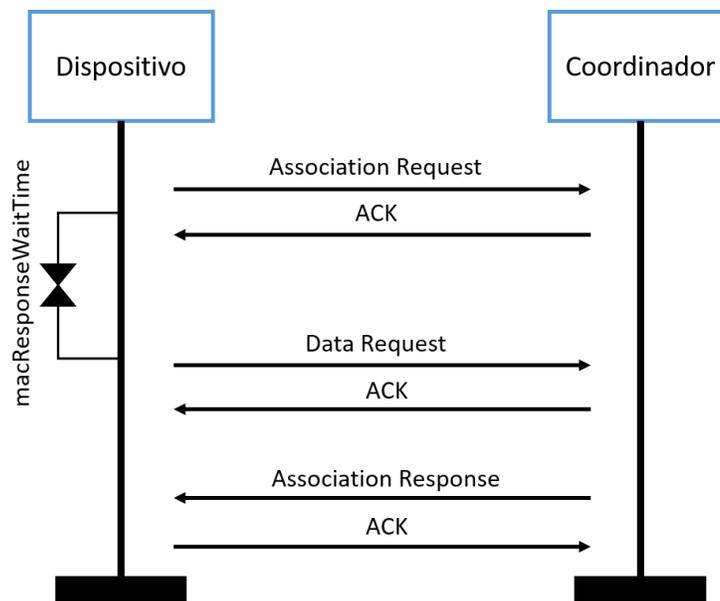


Figura 12. Proceso de asociación de IEEE 802.15.4.

El proceso de disociación puede iniciarse tanto de parte del coordinador como del dispositivo, dependiendo de quién solicite la disociación (ver figura 13). Este proceso se conforma únicamente de un paso:

- Notificación de disociación (*Disassociation Notification*): Este paquete de control contiene únicamente un campo que indica la razón de la disociación y puede tener dos valores: uno para cuando el dispositivo es el que quiere dejar la PAN y otro para cuando el coordinador es el que realiza la petición. Posterior a la recepción de una notificación de disociación, se debe responder con un acuse de recibo y de esta manera queda finalizado el proceso de disociación.

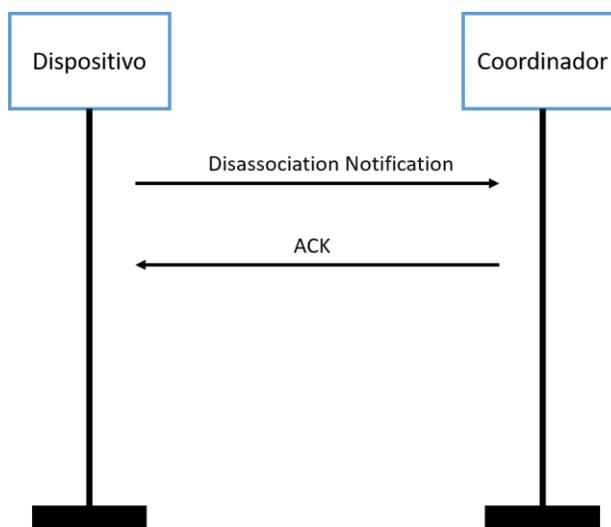


Figura 13. Proceso de disociación de IEEE 802.15.4.

Por lo tanto, para realizar un traspaso de acuerdo con el estándar IEEE 802.15.4 de un dispositivo que se encuentra operando dentro de una PAN, es necesario primeramente realizar la disociación a su PAN con la finalidad de liberar recursos y posteriormente realizar la asociación a la nueva PAN. Este trabajo se enfoca en realizar un análisis del proceso de traspaso siguiendo los mecanismos que define el estándar, de manera que se pueda determinar los parámetros que afectan en mayor medida al rendimiento de una aplicación de telemedicina, sin embargo, este análisis se puede escalar a cualquier otro tipo de aplicación.

En este trabajo se considera el modo de operación sin paquetes fono habilitados, de manera que el único esquema de acceso al medio es CSMA/CA no ranurado, por lo que el radio permanece encendido

todo el tiempo utilizando la máxima capacidad de la tecnología. La transmisión de los paquetes se realiza sin el esquema de acuse de recibo para lograr un caudal eficaz mayor, además de que este tipo de aplicaciones no requiere establecer una comunicación confiable a nivel MAC, dejando esta tarea para las capas superiores. Se opera en la banda de 2.4GHz con una tasa de transmisión de 250 kbps y se utiliza una topología estrella, por lo que se trata de una red de un único salto. El mecanismo de traspaso se conforma únicamente con los procesos que define el estándar (descritos anteriormente) y se utiliza el RSSI de los paquetes como métrica de decisión para realizar el cambio de resumidero.

Capítulo 4. Validación de la capa MAC del estándar IEEE 802.15.4

4.1 Introducción

En este trabajo se propone utilizar un modelo de simulación para determinar los cuales son los factores que afectan el traspaso en el estándar IEEE 802.15.4. Para determinar que el modelo de simulación funciona correctamente y de acuerdo con el estándar es necesario validarlo a través de una implementación o un modelado analítico. En este trabajo se validó el modelo de simulación de la capa MAC de IEEE 802.15.4 utilizando el modelo analítico de (Casillas, 2012) y una cama de pruebas experimental desarrollada como parte de este trabajo de tesis. Es importante remarcar que realizar un análisis completo (p.ej., que incluya un mayor número de nodos) es una tarea complicada y no trivial.

Por ejemplo, considere la figura 14, donde se muestra una transmisión exitosa entre dos nodos utilizando el mecanismo CSMA/CA no ranurado. En este ejemplo no hay contención por el canal ya que solamente se cuenta con un nodo transmitiendo. Por lo tanto, al término del periodo de espera de desistimiento, el nodo transmisor determinará que el canal se encuentra libre, por lo que empieza la transmisión. El receptor recibe el paquete y espera un tiempo IFS que puede ser corto (SIFS, por sus siglas en inglés) para responder con el correspondiente acuse de recibo. Una vez que el nodo transmisor recibe el ACK espera un tiempo, el cual es determinado por la longitud del paquete que transmitió (SIFS o LIFS) y posteriormente si tiene algún paquete en la cola inicia nuevamente el mecanismo CSMA/CA no ranurado.

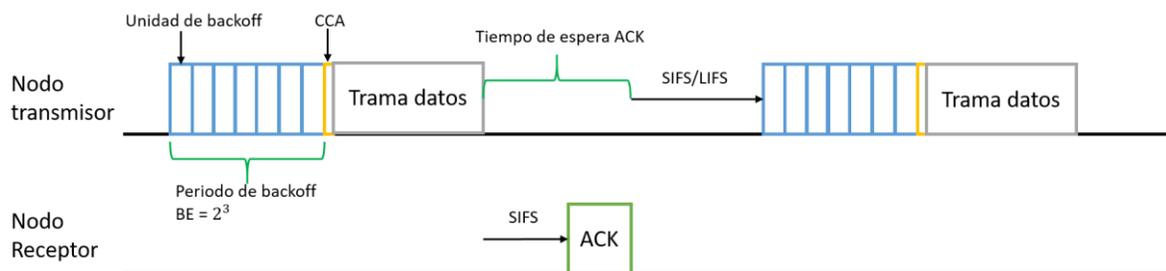


Figura 14. Ejemplo de transmisión exitosa.

En la figura 15 se muestra otro ejemplo de una transmisión utilizando CSMA/CA. En este caso la transmisión fue fallida en el primer intento debido a que ocurrió una colisión. Si dos nodos evalúan el canal al mismo tiempo y lo detectan como libre, se dará una transmisión simultánea lo que ocasiona una colisión

ya que las señales de los dos nodos transmisores interfieren entre sí, lo cual genera que el receptor no pueda distinguir los paquetes enviados. Por lo que en un esquema sin acuse de recibo sería un paquete perdido y los dos nodos continuarían con el siguiente paquete de su correspondiente cola. Sin embargo, en un esquema con ACK los nodos al agotar el tiempo de espera por el acuse de recibo, repiten el mecanismo de acceso al medio para realizar una retransmisión. La figura 15 muestra que, para el intento de retransmisión, los nodos tienen diferente tiempo de espera de desistimiento, por lo que el primer nodo inicia la transmisión. Durante la transmisión del nodo 1, el nodo 2 evalúa el canal y lo detecta ocupado, por lo que pasa a la siguiente etapa de desistimiento. Una vez que el receptor recibe el paquete del nodo 1, espera el tiempo (SIFS) y realiza la transmisión del ACK; el nodo 1 recibe el ACK y espera su correspondiente tiempo inter-trama. Durante el tiempo de espera inter-trama del nodo 1, es muy probable que ocurra la evaluación por segunda vez del nodo 2 y esta vez lo detecte libre, realizando una transmisión exitosa.

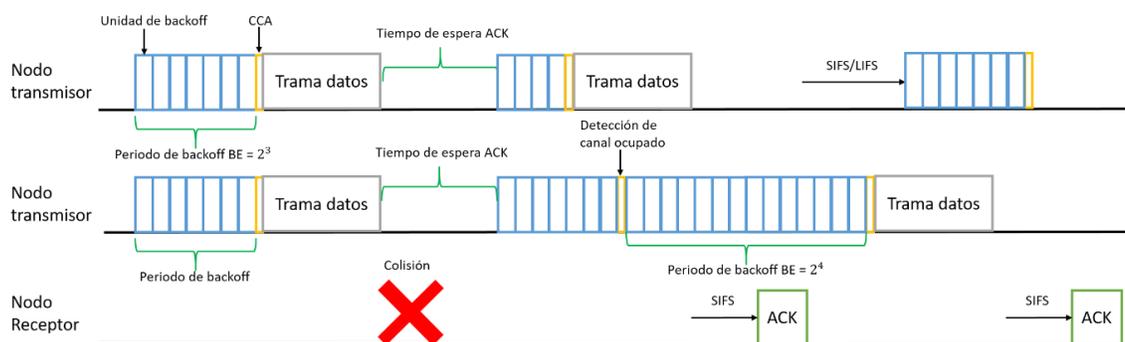


Figura 15. Ejemplo de transmisión fallida debido a colisiones.

En este capítulo se realiza un análisis y se describe la metodología utilizada para la validación del modelo de simulación utilizado.

Se retomó el trabajo realizado en (Casillas, 2012) como base para realizar la validación del modelo de simulación utilizado en este trabajo complementándola con la implementación del mismo escenario mediante una cama de pruebas, tal como se muestra en la figura 16. La validación de estas herramientas resulta importante debido se puede caer en la situación en la que los resultados de la simulación difieran de forma significativa con los de una posible implementación. Lo anterior debido a que no hizo uso de modelos verificados para un funcionamiento de acuerdo con lo establecido en los estándares de comunicación. Un ejemplo de resultados que divergen de manera representativa se encuentra en (Touati

et al., 2016) donde los resultados de la implementación divergen con los de la simulación, justificando que las diferencias son debido a procesos de la electrónica de los dispositivos físicos que el simulador no contempla. Esto es resultado de tratar con escenarios complejos con una cantidad considerable de variables y parámetros que hay que ajustar de acuerdo con el estándar y modelos validados para garantizar resultados correctos en relación con lo que se pretende evaluar.

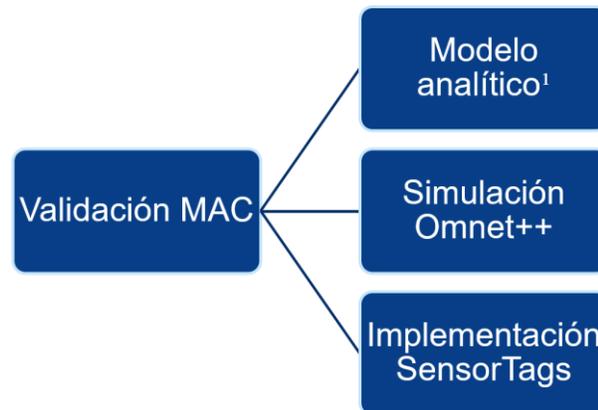


Figura 16. Elementos para la validación a nivel MAC.

4.2 Modelo analítico CSMA/CA para el acceso al medio no ranurado de IEEE 802.15.4

De manera general, en la literatura se puede encontrar que la capa MAC puede ser modelada mediante procesos estocásticos y en particular con Cadenas de Markov. El modelado empieza desde la vista de un nodo para un mejor entendimiento y posteriormente se establece una visión amplia de la red en donde se tiene el estado de cada nodo para cada instante de tiempo establecido. Esta es una poderosa herramienta para la obtención de métricas relacionadas con el acceso al medio en una red con contención. Las variantes en los modelos que se encuentran se deben al tipo de mecanismo MAC que se modela, el modo de transmisión (con paquetes fijo, sin paquetes fijo, con ACKs, sin ACKs, etc.), la topología que se maneja y algunas otras características que se asuman. Pero todos toman como punto de partida el análisis y modelado que realizó Bianchi en (Bianchi, 2000).

En (Pollin et al., 2008) se menciona que los esquemas de acceso al medio, sobre todo en redes de sensores son diseñados para el ahorro de energía. Para esto, se tienen mecanismos en donde el nodo entre en modo de bajo consumo (minimizar la escucha del canal) o apague y encienda el radio, es decir,

ciclos de trabajo cortos con la finalidad de consumir lo menos posible de sus baterías. En cuanto al modelado analítico, se menciona que se basa en el trabajo de Bianchi pero sin las mismas características que él asume, esto debido a las diferencias en el compartimiento de 802.11 DFC y 802.15.4, como el monitoreo continuo del canal en 802.11, lo que resulta en un continuo conocimiento del estado del canal. Entre lo que se asume se tiene la probabilidad de cada nodo de evaluar el canal es independiente y la duración de los slots de tiempo es fijo de tal manera que el sistema está sincronizado. Con esto ellos mejoran el modelo en comparación con otros trabajos que mencionan en donde ellos asumen las mismas características que Bianchi.

Por lo tanto, asumiendo ciertas características similares a las de (Pollin et al., 2008) es posible realizar un modelo analítico que permita analizar la capa de acceso al medio de IEEE 802.15.4 con la finalidad de obtener métricas para determinar el comportamiento de la red bajo ciertas condiciones. En el siguiente apartado se retoma el trabajo de (Casillas, 2012) y se realiza un resumen breve del análisis que realizó, por lo que se omiten algunos pasos y ecuaciones.

4.2.1 Modelo de Markov

En modelo de Markov para el mecanismo CSMA/CA no ranurado mostrado en la figura 17 y ecuaciones en esta sección se derivan del trabajo de (Casillas, 2012). Casillas plantea un modelo de tráfico en una red IEEE 802.15.4 mediante teoría de colas que se rige por un proceso de arribo y una distribución de tiempo de servicio. En la figura 17 se puede apreciar dos procesos principales: el proceso de selección aleatoria del número de periodos de desistimiento de espera y el proceso de incremento de las etapas de desistimiento. Como ya se mencionó anteriormente, la elección del número de periodos de desistimiento para cada etapa viene dada por la selección aleatoria de un número entero en el intervalo de $[0, 2^{BE} - 1]$ (de acuerdo con el estándar) y a su vez el valor de BE aumenta conforme se va incrementando el número de etapas de desistimiento debido a que se encontró el canal ocupado. Cuando el conteo de espera de los periodos de desistimiento llega a 0, se realiza el proceso CCA para determinar el estado del canal; si el canal se encuentra libre se inicia la transmisión, de lo contrario se pasa a la siguiente etapa de desistimiento. La determinación del estado del canal se puede representar como una variable aleatoria. Casillas plantea que el proceso de servicio de la capa MAC de IEEE 802.15.4 puede ser representado como una cadena discreta de Markov bidimensional gracias a la que la unidad de tiempo se puede establecer en ranuras de desistimiento. La cadena de Markov se define por dos procesos estocásticos:

- El proceso estocástico $b(t)$ que representa el conteo de desistimientos en cada nodo.
- El proceso estocástico $s(t)$ que representa las etapas de desistimiento $s(t) \in \{0, 1, \dots, m\}$ en el tiempo t . Donde m es el número máximo de etapas de desistimiento, definido en el estándar por *macMaxCSMABackoffs*. Mientras que el estado de transmisión se define como $s(t) = -1$.

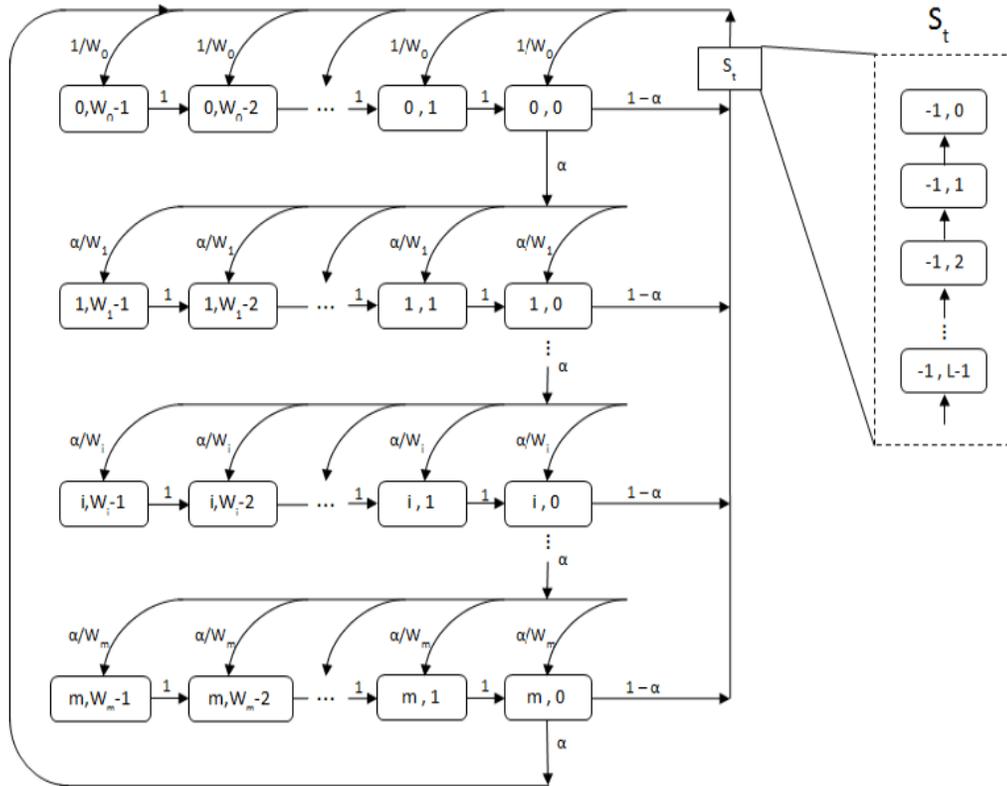


Figura 17. Modelo de Markov para el mecanismo CSMA/CA no ranurado de IEEE 802.15.4 (Casillas, 2012).

El valor de la ventana de contención en cada etapa de desistimiento W_i se inicia con un valor de $W_0 = 2^{aMinBE}$ y cada vez que se evalúa el canal y se encuentra ocupado, aumenta hasta que $W_i = W_{max} = 2^{aMaxBE}$, donde: $(aMaxBE - aMinBE) \leq i \leq m$. Como primer paso en el modelo, se definen las probabilidades de transición de los estados de la cadena. En la figura 17 se pueden apreciar las siguientes probabilidades:

$$P \{i, k | i, k + 1\} = 1 \quad k \geq 0, \quad i \leq m \quad (1)$$

$$P \{0, k | i, 0\} = (1 - \alpha) / W_0 \quad k \leq W_0 - 1, \quad 0 \leq i \leq m - 1 \quad (2)$$

$$P \{i, k | i - 1, 0\} = \alpha / W_i \quad k \leq W_i - 1, \quad 0 \leq i \leq m \quad (3)$$

$$P \{0, k | m, 0\} = 1 / W_0 \quad k \leq W_0 - 1 \quad (4)$$

La ecuación (1) indica la probabilidad de disminuir el conteo de los periodos de desistimiento. La ecuación (2) indica que se encuentra el canal libre, se transmite y regresa a la etapa de desistimiento inicial para continuar con el siguiente paquete. La ecuación (3) representa cuando se encuentra el canal ocupado al realizar el CCA y por lo tanto se continúa con la siguiente etapa de desistimiento. La ecuación (4) describe la probabilidad de iniciar un nuevo intento de transmisión después de haber alcanzado la última etapa de desistimiento permitida.

Para obtener las ecuaciones que definen las probabilidades de la cadena de Markov se utilizan las probabilidades en estado estable de la cadena, que se definen por:

$$\pi_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\} \quad i \in [-1, m], \quad k \in [0, \max(L - 1, W_i - 1)] \quad (5)$$

Utilizando las ecuaciones con las probabilidades de transición (1-4) y las probabilidades en estado estable definidas en (5), se puede analizar el proceso $b(t)$ para $0 \leq k \leq W_0 - 1$ obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$\pi_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \alpha \pi_{i-1,0} \quad (6)$$

$$\pi_{i,0} = \alpha \pi_{i-1,0} \quad (7)$$

De la misma manera se realiza el análisis para el proceso $s(t)$ cuando $0 \leq i \leq m$, obteniendo:

$$\pi_{i,0} = \alpha^i \pi_{0,0} \quad (8)$$

Teniendo como consideración la condición de normalización de las probabilidades en estado estable de una cadena de Markov se puede obtener una expresión para $\pi_{0,0}$, además, como la transmisión ocurre cuando el contador de desistimientos llega a cero y es independiente de la etapa de desistimiento en la que se encuentre, se puede definir a τ como la probabilidad de que una estación monitoree el canal en una ranura aleatoria de tiempo y se encuentra dada por:

$$\tau = \sum_{i=0}^m \pi_{i,0} = \frac{1 - \alpha^{m+1}}{1 - \alpha} \pi_{0,0} \quad (9)$$

Esta probabilidad τ es independiente e idénticamente distribuida entre todos los nodos. Una vez que obtenemos τ , se puede obtener una ecuación que defina la probabilidad de que una estación encuentre el medio ocupado cuando quiere acceder a éste para realizar una transmisión. Esta probabilidad α es igual a la probabilidad de que alguno de los $n - 1$ nodos haya monitoreado el canal, lo haya encontrado libre y se encuentre transmitiendo:

$$\alpha = L(1 - \alpha)[1 - (1 - (1 - p_0)\tau)^{n-1}] \quad (10)$$

Donde p_0 es la probabilidad de que no existan paquetes listos para transmitir en un nodo y por lo tanto, cuando $p_0 = 1$ significa que siempre existe un paquete para ser transmitido en el nodo; a este caso se le conoce como estado saturado. Cuando se trata del estado no saturado es necesario realizar el cálculo de esta probabilidad utilizando teoría de colas, analizando el tiempo de servicio MAC.

El tiempo de servicio MAC se define como el intervalo de tiempo desde el instante en el que el paquete se convierte en el primero de la cola y empieza a ejecutar el algoritmo de CSMA/CA para intentar ser transmitido, hasta el intervalo de tiempo en que el paquete fue transmitido en su totalidad o descartado debido al límite de intentos de transmisión. Este tiempo de transmisión de un paquete puede representarse como una variable aleatoria y podemos definir la Función Generadora de Probabilidad (PGF, por sus siglas en inglés) de la duración como:

$$S_t(z) = z^{ifs+L} \quad (11)$$

Donde ifs , como ya se vio anteriormente, es la duración del espacio inter-trama pero esta vez en ranuras y L es la duración de la transmisión del paquete de igual manera en ranuras de tiempo. En el estándar IEEE 802.15.4 operando en la banda de 2.4GHz, se puede transmitir 10 bytes en una ranura de tiempo, por lo que para paquetes de tamaño fijo T_{bytes} se puede calcular la duración de la transmisión como:

$$L = \frac{T_{bytes}}{10 \text{ bytes por ranura}} \quad (12)$$

Con lo anterior se puede definir que el tiempo de servicio MAC es una variable aleatoria que se encuentra dada por la duración en tiempo de la transición desde el estado inicial (cuando comienza el algoritmo CSMA/CA) hasta el estado final (cuando terminó de ser transmitido o el paquete fue

descartado). Entonces la PGF del tiempo de servicio $T(z)$ se define como la función de transferencia desde el estado inicial hasta el estado final y se encuentra dado por:

$$T(z) = \sum_{i=0}^{\infty} P(T_s = i)z^i \quad (13)$$

Por medio de (13) se puede obtener la distribución de probabilidad discreta utilizando las propiedades de la PGF como el valor esperado del tiempo de servicio que se encuentra dado por:

$$E[T_s] = \left. \frac{dT(z)}{dz} \right|_{z=1} \quad (14)$$

Utilizando la ecuación (14) es posible obtener métricas para observar el comportamiento del tiempo de servicio del mecanismo CSMA/CA no ranurado, sin embargo, para un mejor análisis se puede usar (14) dentro de un modelo de colas.

4.2.2 Cola M/G/1 para la generación de paquetes

Los modelos de teoría de colas sirven como una herramienta para la obtención de métricas para el diseño de la red. Un modelo de colas se puede caracterizar por el proceso de arribo y el tiempo de servicio junto con la disciplina de servicio. Si se establece que la generación de paquetes en la capa de aplicación de cada nodo sigue una distribución de Poisson con tasa λ y como tiempo de servicio la definida por el modelo de Markov (como se muestra en la figura 18), se puede modelar el retardo de los paquetes para ser transmitidos dentro de una red IEEE 802.15.4.

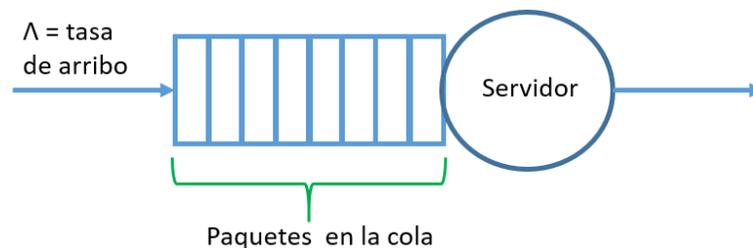


Figura 18. Cola M/G/1 para el análisis.

Se realizan consideraciones para el análisis como que cada nodo cuenta con memoria lo suficientemente grande para determinar que el tamaño del buffer es infinito. La tasa de arribo de paquetes λ se encuentra relacionada con el tamaño del paquete y el tráfico que genera el nodo T_{off} , de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{T_{bytes} \cdot 8}{T_{off}} \quad (19)$$

Para la cola M/G/1 de la figura 18, la probabilidad de que no existan paquetes esperando a ser atendidos es de:

$$p_0 = 1 - \rho \quad (20)$$

Donde ρ es la intensidad del tráfico y se encuentra definida por $\rho = \lambda \cdot E[T_s]$. Con esta información se puede calcular la probabilidad α de encontrar el canal ocupado para diferentes valores de nodos n y de tasas de arribo de paquetes λ .

4.3 Simulación en el modelador de red OMNeT++

Para evaluar el comportamiento de redes que involucran una gran cantidad de parámetros y de protocolos en las diferentes capas del modelo OSI, resulta necesario contar con un simulador que contenga los modelos que describan cada uno de los elementos que interactúan dentro de la red.

4.3.1 Modelador de red OMNeT++

OMNeT++ es una herramienta de arquitectura abierta que sirve para el modelado y simulación, que se encuentra compuesta por módulos clasificados de acuerdo con la capa del modelo OSI que le corresponde. Este simulador cuenta con una interfaz gráfica de usuario amigable que permite observar las transiciones de cada uno de los nodos, así como la interacción que tiene la pila de protocolos establecida por nodo (OMNeT++, 2017). Este simulador de eventos discretos fue creado por Andrés Varga en el 2003 para aplicaciones principalmente en redes de comunicaciones, sin embargo, gracias a su arquitectura y la flexibilidad que ofrece, ha sido utilizada para múltiples aplicaciones sustentada por una comunidad activa

que genera y publica módulos con protocolos de enrutamiento, de movilidad, redes ad-hoc, transporte entre otras. Esto ha dado pauta a la creación de distintos marcos de referencia que constan de un conjunto de protocolos para áreas específicas. Dentro de los marcos de referencia más usados se encuentran: INET (contiene protocolos para redes cableadas, inalámbricas y móviles) (INET, 2017), MiXiM (MiXiM, 2017) (enfocado a redes inalámbricas y móviles) que en su última versión formo se incorporó a INET, Veins (Veins, 2017) (suite de protocolos para redes vehiculares).

OMNeT++ se compone de módulos que están programados en C++. Estos módulos se agrupan y son ensamblados en modelos más grandes utilizando un lenguaje de alto nivel (NED), este lenguaje proporciona una GUI que permite una integración fácil para el diseño de aplicaciones a manera de bloques con la posibilidad de crear módulos propios que interactúen con los ya existentes (Varga & Hornig 2008). Un ejemplo de la GUI para la integración de los módulos se muestra en la figura 19.

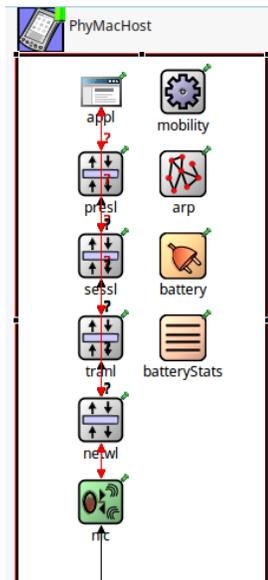


Figura 19. Integración de los módulos en OMNET++.

4.3.2 Modelo CSMA/CA en MiXiM

MiXiM es un marco de referencia diseñado principalmente para el modelado de redes inalámbricas móviles como lo son las redes de sensores, redes ad-hoc y redes vehiculares. Este marco de referencia es una suite de modelos entre los que se incluyen: modelos de propagación de canal, interferencia, consumo de energía, capa física, capa MAC, movilidad, entre otros (MiXiM, 2017).

Dentro de los modelos que componen a MiXiM, se cuenta con un modelo MAC de IEEE 802.15.4. Este modelo cuenta con las siguientes propiedades:

- Opera en modo sin paquetes fijo.
- Soporta el modo de operación con y sin acuses de recibo.
- Implementa el algoritmo CSMA/CA como una máquina de estados finita.
- Implementa dos tarjetas de red con las cuales fue validado en una cama de pruebas: TI CC1100 y TI CC2420.
- Puede trabajar modularmente con protocolos de movilidad y de capas superiores que estén adaptados para trabajar dentro del marco de referencia de MiXiM.
- Se encuentra basado en las especificaciones del estándar IEEE 802.15.4 en su versión del 2006.
- No cuenta con las rutinas implementadas para realizar el proceso de asociación y disociación.

A pesar de que se menciona que el modelo MAC de IEEE 802.15.4 dentro de MiXiM fue validado en una cama de pruebas, los resultados de las primeras simulaciones del escenario que se describe en la siguiente sección no fueron favorables, por lo que se tuvo la necesidad de evaluar si la implementación del algoritmo CSMA/CA no ranurado fue el correcto, y además realizar una comprobación de los parámetros que involucran a la capa MAC. La tabla 4 muestra los parámetros que se usaron para ajustar las simulaciones de este trabajo; estos parámetros son los que definen el estándar IEEE 802.15.4 para operar en la banda de frecuencia de 2.4GHz.

Tabla 4. Parámetros utilizados del estándar IEEE 802.15.4 para la banda de 2.4GHz.

Parámetro	Valor	Descripción
aUnitBackoffPeriod	20 símbolos	El número de símbolos que forman el periodo de tiempo básico usado por el algoritmo CSMA/CA.
aMaxSIFSFrameSize	18 bytes	El máximo tamaño de un MPDU, en octetos que puede ser seguido de un periodo SIFS. (Frame MAC total)
aTurnaroundTime	12 símbolos	Tiempo máximo en símbolos para el cambio de RX-a-TX o TX-a-RX en el radio.
macMaxFrameRetries	3	El número máximo de reintentos permitidos después de una transmisión fallida.
macMaxCSMABackoffs	4	El número máximo de <i>backoffs</i> que el algoritmo CSMA/CA intenta antes de declarar una falla en el canal.
macMinBE	3	El valor mínimo del exponente de <i>backoff</i> del algoritmo CSMA/CA.
macMaxBE	5	El valor máximo del exponente de <i>backoff</i> del algoritmo de CSMA/CA.
macMinSIFSPeriod	12 símbolos	El número mínimo de símbolos que forman un periodo SIFS.
macMinLIFSPeriod	40 símbolos	El número mínimo de símbolos que forman un periodo LIFS.
ccaDetectionTime	8 símbolos	El número de símbolos mínimos que se debe sensar el canal para declararlo como libre.
phySHRDuration	160 μ s	La duración en símbolos del encabezado SHR para la sincronización.
phySymbolsperOctect	32 μ s/16 μ s= 2	El número de símbolos por octeto.
macACKWaitDuration	$aUnitBackoffPeriod + macSIFSPeriod + phySHRDuration + Ceiling(6 * phySymbolsperOctect)$ = 20 + 12 + 10 + 12 = 54 símbolos	El número máximo de símbolos a esperar por un mensaje de acuse de recibo, seguido de la transmisión de una trama de datos.
aMaxPHYPacketSize	127 bytes	Máximo tamaño del PSDU que la capa física puede recibir.

4.3.2 Escenario de simulación

El escenario que se utilizó para validar la capa MAC del modelo de MiXiM se muestra en la figura 20. Se tiene una red con topología estrella donde el coordinador de la PAN toma el papel como el resumidero de información, mientras que el número de nodos transmisores varía de 1 a 14. Se realizaron 10 simulaciones por cada variación en el número de nodos transmisores, es decir, se realizaron un total

de 140 simulaciones con un tiempo de simulación de 600 segundos para cada una. El escenario de simulación se formó a partir de las siguientes consideraciones:

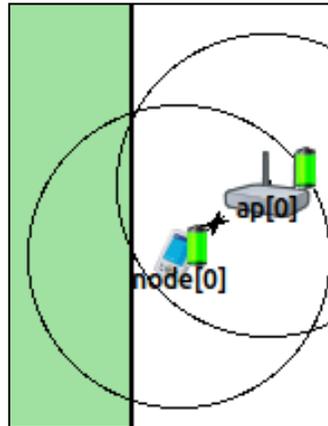


Figura 20. Escenario para la validación de la capa MAC.

- Todos los nodos se escuchan entre ellos, es decir, cuando un nodo se encuentra realizando una transmisión, cualquier otro nodo dentro de la red que evalúe el canal lo detectará ocupado. Por lo tanto, no ocurre el fenómeno del nodo oculto que pueda provocar colisiones.
- No existen pérdidas por propagación o interferencia: Los nodos se encuentran lo suficientemente cerca del nodo resumidero de tal manera que no existen pérdidas por propagación o alguna red externa generando interferencia. Para garantizar que no haya pérdidas se utilizó únicamente el modelo de Friis.
- Los nodos se encuentran estáticos, por lo que no existe algún efecto extra que altere la transmisión.

Los parámetros completos establecidos para la simulación se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros para las simulaciones de la validación MAC.

Parámetro	Valor
Tiempo de simulación	600s
No. de simulaciones	10
Número de nodos	1-14
Velocidad de los nodos	Movimiento estático
Modelo de propagación	Simple (Modelo de Friis)
Protocolo PHY/MAC	IEEE 802.15.4 non beacon-enable (CSMA/CA)
Potencia de transmisión	1mW
Frecuencia transmisión	2.4Ghz
Área de simulación	10x10m
Paquetes (con header MAC)	31 y 115 Bytes
Tasa de transmisión por nodo	12kbps

4.4 Implementación

Para la implementación del escenario correspondiente para la comparación con el modelo analítico y la simulación, se utilizó una tarjeta de evaluación que se describe a continuación. Además, se realizó una cama de pruebas de tal manera que las condiciones del escenario fueran las más parecidas al escenario de simulación.

4.4.1 Texas Instruments SensorTag CC2650

Es una tarjeta de evaluación (figura 21) de bajo costo que cuenta con un procesador ARM Cortex-M3 y un transceptor IEEE 802.15.4 que soporta la pila completa de protocolos del estándar, además soporta la pila de protocolos de Bluetooth Low Energy, ZigBee y 6LoWPAN utilizando ContikiOS (Contiki, 2016). Este dispositivo cuenta con un sensor de movimiento de nueve ejes (acelerómetro, giroscopio y magnetómetro), sensor de temperatura, sensor de humedad, barómetro y un sensor óptico. Este dispositivo se alimenta por medio de una pila de reloj.

Para su programación se utiliza el IDE *IAR Embedded Workbench* con lenguaje C junto con el *debugger DevPack*, el cual es una tarjeta que agrega capacidades para la programación y depuración de código por medio de una interfaz USB para la computadora (Texas Instruments, 2017).

Texas Instruments (TI) provee a sus dispositivos la pila de protocolos del estándar IEEE 802.15.4 llamada TIMAC; dentro de los archivos que viene con la instalación de TIMAC se encuentran algunos proyectos ejemplo para el uso de los sensores y del establecimiento de comunicación simple. Un proyecto de TIMAC consta de dos partes: la pila de protocolos y la aplicación. TI ofrece una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, por sus siglas en inglés) que permite utilizar las funciones de la pila de protocolos dentro de la aplicación de una manera más simple, por lo que los programas desarrollados durante este trabajo se hicieron utilizando la API y su correspondiente documentación (Texas Instruments, 2017).

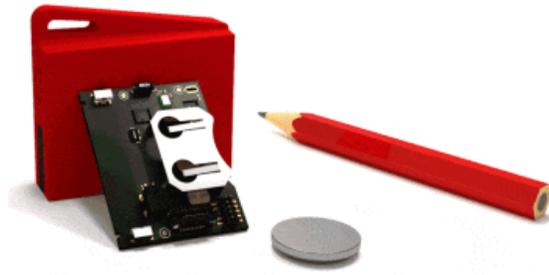


Figura 21. SensorTag CC2650 (Texas Instruments, 2017).

4.4.2 Cama de pruebas basada en el SensorTag CC2650

El esquema de la cama de pruebas realizada con los SensorTags se muestra en la figura 22. Por una parte, se tiene los nodos transmisores que para este caso varían entre 1 y 8 debido a que únicamente se contaba con 9 dispositivos. Se tiene el coordinador PAN que funciona como resumidero conectado a una computadora para la obtención de las métricas. Además, se incorporó una tarjeta de evaluación SmartRF05 de Texas Instruments para realizar la tarea de *sniffer* y capturar todos los paquetes transmitidos durante las pruebas con la finalidad de analizarlos para observar que todos los nodos estuvieran transmitiendo correctamente los paquetes y al finalizar las pruebas obtener las métricas de los nodos transmisores. Este *sniffer* se encuentra conectado a la computadora y mediante el programa *Packet Sniffer* que proporciona de manera gratuita TI se realiza la captura de paquetes.

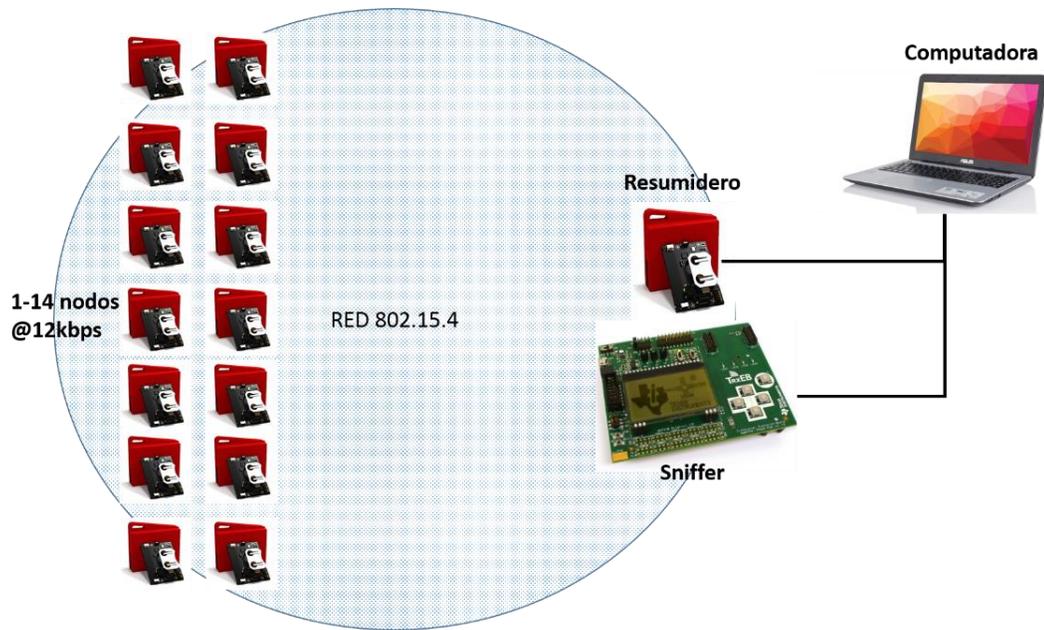


Figura 22. Cama de pruebas para la validación MAC.

Se realizaron 10 pruebas por cada variación en el número de nodos transmisores, dando un total de 80 pruebas. Los resultados se promediaron para obtener las métricas finales. Es importante mencionar que revisé que los parámetros de la API de TIMAC estuvieran definidos de acuerdo con el estándar (tabla 4).

4.5 Análisis de los resultados obtenidos para la validación de la capa MAC

Se utilizó el modelo analítico como base para la validación de la capa MAC, en específico la métrica de paquetes perdidos. Para realizar la validación se consideró el tráfico de un ECG de 12 kbps junto con dos esquemas de empaquetamiento, uno de tamaño pequeño y otro de tamaño grande que contenga la mayor cantidad de muestras posibles dentro de una trama IEEE 802.15.4:

- Empaquetado pequeño: 31 bytes de la trama (18 bytes de carga útil) el cual contiene 3 muestras de cada canal del ECG.
- Empaquetado grande: 115 bytes de la trama (102 bytes de carga útil) el cual contiene 17 muestras de cada canal del ECG.

Una de las métricas más importantes que deben de considerarse en el despliegue de este tipo de redes es la probabilidad de paquetes descartados. Esta probabilidad solamente considera las pérdidas causadas por el mecanismo de acceso al medio al no poder realizar la transmisión de la trama en cuestión al detectar el canal ocupado $macMaxCSMABackoffs + 1$ veces. Esta métrica se puede obtener mediante los tres elementos de la validación (modelo analítico, simulación e implementación). Adicional a esto, también se evalúa la métrica de paquetes perdidos para la simulación e implementación. La tasa de paquetes perdidos se define como el número de paquetes recibidos en el resumidero entre el número total de paquetes generados por los nodos transmisores de la PAN.

Para realizar un mejor análisis de los resultados de esta sección, la tabla 6 se definen las características del tráfico generado por nodo. Se puede observar las diferencias de tráfico para los dos esquemas de empaquetamiento. Para el esquema de paquetes pequeños es necesario enviar una mayor cantidad de paquetes por segundo y debido a que cada paquete que se genera debe llevar los campos de los encabezados, tiene como consecuencia una mayor cantidad de bits generados por segundo que a su vez aumenta el tráfico total generado por nodo. El sobreencabezado que genera este esquema de empaquetamiento representa el 72% del tráfico del ECG, dando un total de 20.666 kbps de tráfico que genera cada nodo. Por otra parte, el esquema de empaquetamiento pequeño genera 14.70 paquetes por segundo; esto representa únicamente 1.5 kbps de sobreencabezado, dando un total de 13.5288 kbps de tráfico que genera cada nodo.

A partir de esta tabla se pueden ver las diferencias entre los esquemas de empaquetamiento y como el sobreencabezado puede afectar el desempeño de la red. La diferencia entre los esquemas de empaquetamiento es de 7.13 kbps de sobreencabezado por nodo, lo que puede implicar un desperdicio de los recursos que ofrece la red.

Tabla 6. Parámetros del tráfico generado.

Parámetros ECC @12kbps	Paquetes 31 bytes	Paquetes de 115 bytes
Payload	18 bytes	102 bytes
Paquetes/seg	83.33	14.70
Encabezado MAC	13 bytes	13 bytes
Sobreencabezado MAC	8666.32 bps (72%)	1528.8 bps (12%)
Tráfico total x nodo	20.666 kbps	13.5288 kbps

En la figura 23 se aprecia que el esquema de empaquetamiento que presenta un mejor desempeño es el que corresponde a los paquetes de mayor tamaño. Con los resultados de la figura 23 y la tabla 7 se puede determinar que con el esquema de empaquetado de menor tamaño se tiene una mayor contención por el medio debido a la tasa de generación de paquetes. Al generar una mayor cantidad de paquetes, se tiene que utilizar una mayor cantidad de tiempos inter-trama (como los de la figura 14) y la evaluación del canal se debe hacer con mayor frecuencia por parte de los nodos de la red, sumado a la cantidad de tráfico que genera cada nodo, lo que implica una mayor probabilidad de que el canal esté ocupado. Al tener una mayor contención por el canal, la probabilidad de evaluar el canal y encontrarlo ocupado consecutivamente por hasta 5 intentos aumenta, dando como resultado un paquete descartado.

Es importante observar que en la figura 23 los resultados de los tres elementos evaluados siguen el mismo comportamiento con diferencias poco significativas. La curva del modelo analítico y de la simulación prácticamente se empalman obteniendo resultados similares. Por su parte, la curva de la implementación sigue el mismo comportamiento para el esquema de empaquetamiento de mayor tamaño, traslapándose con la de su correspondiente simulación, mientras que para el esquema de empaquetamiento de menor tamaño se mantiene el comportamiento con una diferencia que no es tan significativa.

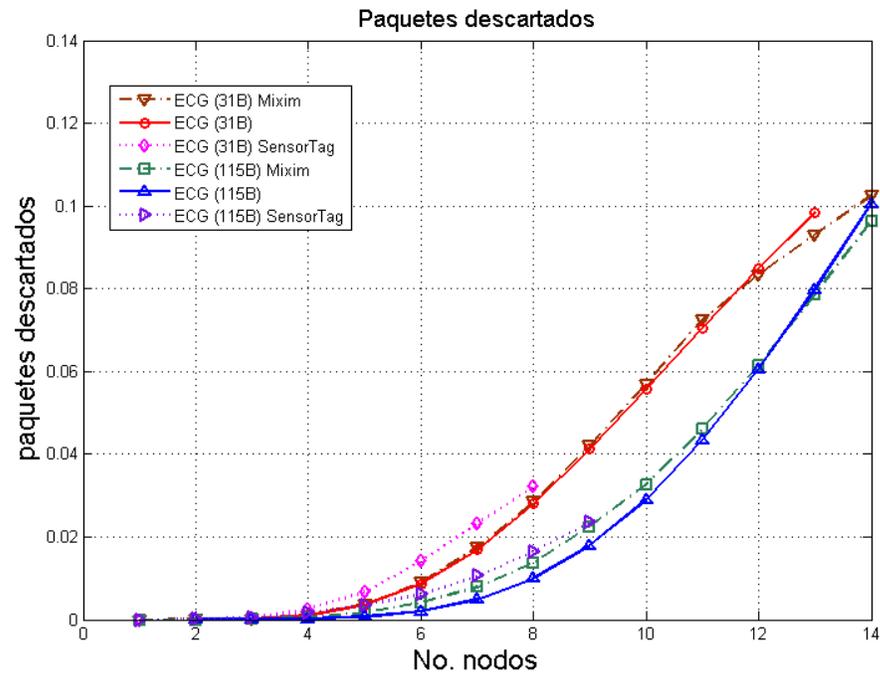


Figura 23. Resultados de paquetes descartados.

La figura 24 muestra los resultados de la tasa de pérdida de paquetes correspondientes a la simulación e implementación. Se puede observar que los dos elementos siguen el mismo comportamiento con una diferencia del 2.5% que no es tan significativa y que posiblemente se pudiera ajustar mejor al realizar más experimentos en la implementación. Respecto a la pérdida de paquetes, el esquema de empaquetamiento de mayor tamaño presenta un mejor comportamiento que el empaquetado de menor tamaño. Esta diferencia en el desempeño más representativa que para los paquetes descartados, esto se puede atribuir principalmente a la cantidad de paquetes que se transmiten por segundo, en el empaquetado de menor tamaño se generan casi 5 veces más paquetes que en el empaquetado de mayor tamaño. Esto genera una mayor probabilidad de que ocurran colisiones entre los nodos que se encuentran transmitiendo lo que da como resultado que el nodo receptor no pueda recibir correctamente el paquete.

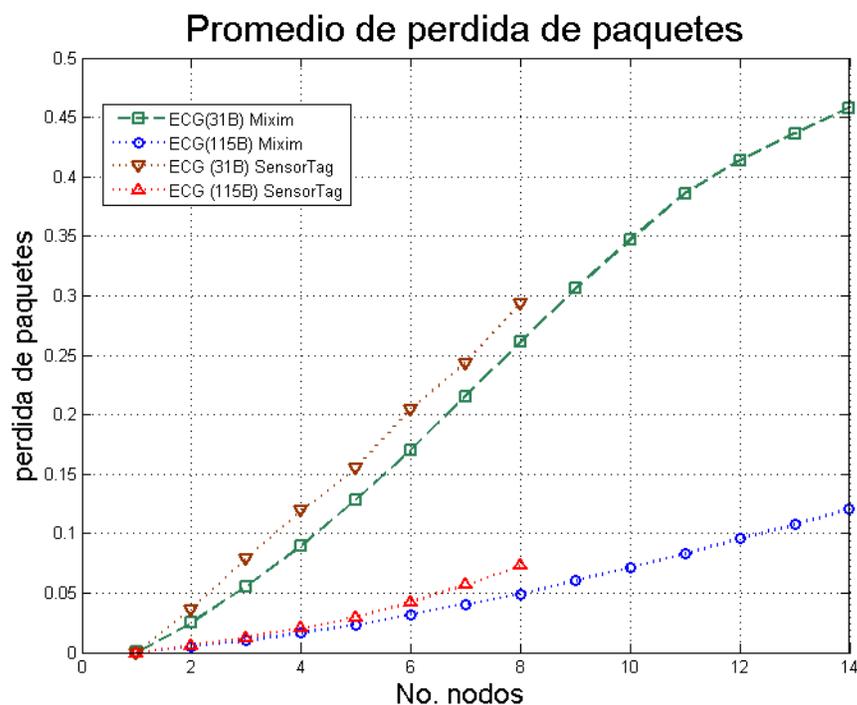


Figura 24. Resultados pérdida de paquetes.

4.6 Conclusiones sobre la validación de la capa MAC

Con los resultados de este capítulo se puede definir una arquitectura de red con cierta tolerancia de tasa de paquetes descartados y perdidos que se determina por la cantidad de usuarios dentro de la red. De manera que, si se busca tener una aplicación con una tolerancia de paquetes perdidos menor al 5%, entonces se podrían tener únicamente dos nodos en la red utilizando el empaquetamiento pequeño, mientras que para el empaquetamiento grande se puede tener hasta 6 nodos simultáneamente (analizando los resultados de la simulación e implementación).

Los resultados de las figuras 23 y 24 demuestran que el modelo de simulación de la capa MAC de MiXiM con los ajustes realizados son similares que los correspondientes al modelo analítico y la implementación; de esta manera, al tener un comportamiento similar se puede establecer que el modelo de simulación se encuentra validado y representa una herramienta importante para el diseño de escenarios con una mayor cantidad de elementos y consideraciones que puedan resultar complicados de modelar matemáticamente, como es el caso del escenario planteado en el capítulo 2.

Cuando se trabaja con herramientas de modelado y simulación como OMNeT++, resulta importante contar con modelos que previamente han sido analizados y comprobados con ayuda de un modelo analítico o de una implementación. El trabajo mostrado en este capítulo representa una importante contribución y la base del trabajo de la tesis, debido a que se garantiza la obtención de resultados significativos y que están sustentados por el análisis realizado.

Capítulo 5. Análisis de los factores más relevantes que afectan el traspaso en una red IEEE 802.15.4

5.1 Introducción

Determinar cuáles son los factores que más afectan el traspaso entre resumideros en una red IEEE 802.15.4 no es sencillo. Se debe considerar la aleatoriedad de factores como el radio de cobertura y su efecto en factores como el tiempo de traspaso y traspasos ping-pong. En este sentido, con modelos de simulación validados basados en modeladores de red como OMNeT++ se pueden plantear escenarios que permitan capturar la interacción de diversos factores. Sin embargo, para determinar los factores más relevantes que afectan el traspaso entre resumideros de información es necesario un análisis que permita conocer la contribución específica de cada uno de los factores considerados.

En este capítulo se presenta la descripción detallada del escenario de telemonitoreo que se propone para la evaluación del mecanismo de traspaso siguiendo los procesos del estándar IEEE 802.15.4. Posteriormente, se describen los factores que se consideraron relevantes durante el proceso de traspaso, así como los valores que se tomaron para cada uno de ellos. Los valores de cada factor se configuraron tanto en la simulación como en la cama de pruebas correspondiente a la implementación. Las simulaciones realizadas para esta sección se hicieron tomando como base el modelo de IEEE 802.15.4 validado en la sección anterior y se agregaron modelos simples de canal y movilidad que se mencionan en secciones posteriores. Con los resultados de las simulaciones se realizó un análisis estadístico denominado 2^k factorial, que permiten obtener los factores más relevantes que afectan el proceso de traspaso. La metodología para realizar este análisis estadístico se describe en la sección 5.3 haciendo énfasis en los factores considerados relevantes, además se enlistan las métricas utilizadas y las ecuaciones correspondientes a estas.

El análisis estadístico se llevó a cabo con los resultados obtenidos de la simulación Montecarlo (ver figura 25). Por un parte se tienen los modelos en el simulador y el archivo de configuración con los valores de cada factor a evaluar, y por otra parte, usando Matlab se procesan los archivos con los resultados y se incorporan a las ecuaciones del análisis factorial para obtener el porcentaje de variación de cada factor. Los resultados de la implementación se utilizaron a manera de comparación. Esto debido a que para un escenario con una serie de características como las que se mencionan en las siguientes secciones, se vuelve difícil realizar una réplica fiel que permita realizar una comparación adecuada. Sin embargo, se pueden

obtener resultados que en conjunto permita un análisis más completo y aproximado a lo que se encuentra en un escenario real.

Los resultados tanto de las simulaciones como del análisis estadístico sirven como base para presentar en la sección de conclusiones de este capítulo y a manera de consideraciones, una serie de puntos que ayuden para el planteamiento y diseño de un mecanismo de traspaso enfocado a aplicaciones de telemonitoreo. No obstante, estas consideraciones, así como la metodología pueden ser usadas para el diseño de mecanismos de traspaso para una amplia variedad de aplicaciones en donde los requerimientos se encuentren establecidos y se busque un mejor desempeño en algunas de las métricas evaluadas. Teniendo en cuenta que la arquitectura de la red puede cambiar de acuerdo con la aplicación y por lo tanto se pueden considerar más o menos factores para el diseño del mecanismo de traspaso en cuestión.

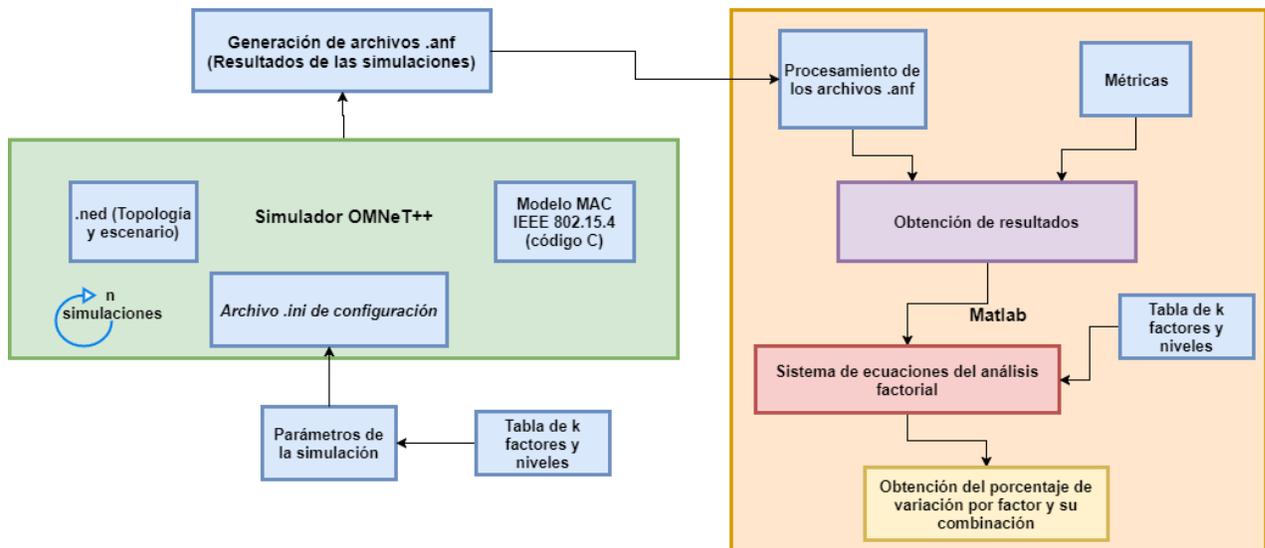


Figura 25. Proceso de simulación-análisis.

5.2 Descripción del escenario propuesto de telemonitoreo

La arquitectura y el escenario de telemonitoreo propuesto se muestran en la figura 26. Se puede observar que se cuenta con dos resumideros de información que tienen un porcentaje del área de la cobertura que se traslapan entre sí. La PAN del primer resumidero únicamente inicia con el nodo móvil que se encuentra desplazándose de manera lineal en dirección al área de cobertura del segundo

resumidero. La PAN del segundo resumidero cuenta con variaciones en el número de usuarios, estos usuarios se encuentran estáticos y transmitiendo tasas de datos fijas. Las dos redes PAN se encuentran operando dentro de la misma frecuencia, de manera que se plantea que la contención por el canal varíe dependiendo del periodo de los paquetes faro y del número de usuarios que se encuentren en el segundo resumidero. Lo anterior con la finalidad de analizar cómo el aumento de la contención puede afectar el proceso de traspaso.

El objetivo del escenario propuesto en la figura 26 es evaluar los factores que afectan el desempeño del proceso de traspaso desde la perspectiva de un solo nodo en movimiento, para facilitar el análisis posterior. El nodo móvil realizará su trayectoria con las velocidades definidas en la sección siguiente. Este nodo se encontrará enviando los paquetes de datos de acuerdo con el tráfico configurado y recibiendo los paquetes faro de los resumideros con los que se tenga cobertura. El nodo estará evaluando la calidad del enlace con el resumidero al que se encuentra asociado mediante los paquetes faro. Cuando el nodo móvil comienza a recibir los paquetes faro del segundo resumidero, compara la calidad del enlace y decide si se mantiene asociado a su resumidero actual o ejecuta el proceso de traspaso. Una vez que el nodo móvil decide realizar el traspaso, tiene que realizar el proceso de disociación (de su resumidero actual) y asociación (al nuevo resumidero). Estos procedimientos corresponden al estándar IEEE 802.15.4 que se describieron en el capítulo 3 (figura 13 y 14). Dentro de los planteamientos del escenario se considera que, si el nodo no puede completar correctamente el proceso de disociación, no puede establecer una nueva conexión con otro resumidero, por lo se le considera un traspaso fallido.

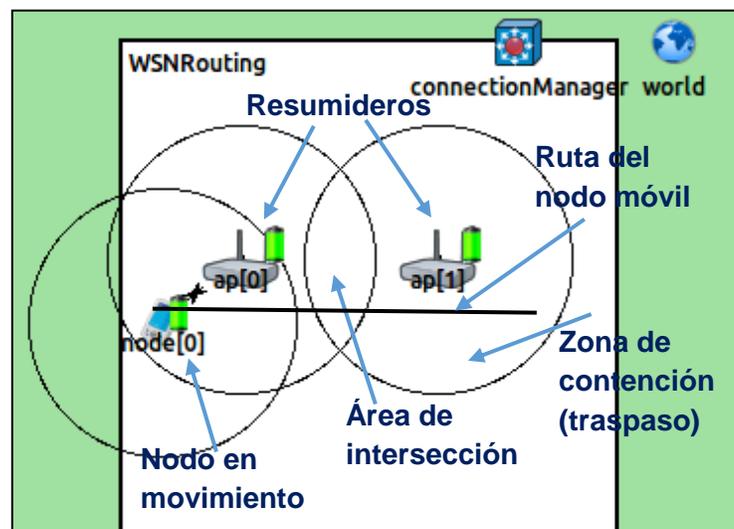


Figura 26. Escenario propuesto de telemonitoreo.

Durante el proceso de traspaso, el nodo móvil encola todos los paquetes que la capa de aplicación genere hasta que se encuentre asociado a un nuevo resumidero. Una vez que el traspaso se completa exitosamente, la capa MAC atiende mediante una disciplina del Primero que Entra, Primero que Sale (FIFO, por sus siglas en inglés) a todos los paquetes encolados. Adicional a esto, se considera una cola infinita por lo que la única forma en que la capa MAC puede descartar paquetes es mediante el límite de intentos de transmisión del algoritmo CSMA/CA.

5.3 Factores a considerar

Una parte importante para evaluar un escenario de cualquier red de sensores son los factores que intervienen y afectan el comportamiento de esta. A mayor cantidad de factores involucrados, mayor la complejidad del análisis. Los factores se deben determinar de acuerdo con el proceso o componentes del escenario que se requiere analizar. Para el caso del mecanismo de traspaso, los factores que se consideraron para el análisis estadístico tienen cierta relevancia en la pérdida de paquetes, en algunos casos cuando se combinan más de un factor, esto a su vez afecta de manera directa al intercambio de los mensajes de control del mecanismo de traspaso. Estos factores se enlistan a continuación y se desarrollan más adelante:

- Velocidad del nodo en movimiento.
- Número de nodos dentro de la segunda PAN.
- Periodo de envío de los paquetes faro.
- Tasa de datos.
- Modelo de propagación
- Área de intersección de cobertura.

La evaluación del canal por parte del nodo se realiza mediante el Indicador de Fuerza de la Señal Recibida (RSSI, por sus siglas en inglés) que proporciona la capa física. Esta métrica de decisión se puede ver afectada por características como el tipo de canal o interferencia, debido a esto, en la sección siguiente se plantea el uso de dos canales diferentes con la finalidad de determinar el impacto que este factor tiene sobre el proceso de traspaso. Un RSSI con mucha variación entre paquetes faros puede ocasionar

traspasos consecutivos e innecesarios (efecto *ping-pong*) que generen retardo adicional en los paquetes encolados.

Métricas consideradas

Las métricas consideradas para la evaluación del escenario propuesto se describen a continuación junto con las ecuaciones utilizadas para la obtención de las mismas. Se utilizaron métricas que se encuentran directamente relacionadas en términos de calidad de servicio con los requerimientos de un escenario como el propuesto. Estas métricas son ampliamente utilizadas para la evaluación y comparación de mecanismos de traspaso, ya que permiten identificar los puntos positivos y negativos de estos.

Pérdida de paquetes:

La tasa de paquetes que no se recibieron en los resumideros, respecto a los paquetes generados por los nodos.

$$p_l = 1 - \frac{\sum_{j=1}^Q p_{r_j}}{p_t} \quad (21)$$

Donde:

p_l tasa de pérdida de paquetes

p_{r_j} paquetes recibidos en el j -ésimo resumidero

p_t paquetes transmitidos por el nodo en movimiento

Q número de resumideros en el escenario

Retardo en el traspaso:

Tiempo desde que se recibe un paquete por parte de un resumidero, hasta que se termina el intercambio de los paquetes correspondientes al proceso de asociación y disociación.

$$r_T = t_n - t_c \quad (22)$$

Donde:

r_T es el retardo en el traspaso

t_n es el tiempo en que se recibió el Association Response (nuevo resumidero) del último traspaso realizado

t_c es el tiempo en que se recibió un paquete fano con mejor RSSI (primer traspaso)

Retardo extremo-a-extremo:

Tiempo desde que se genera el paquete (capa de aplicación) hasta que llega a su destino (capa de aplicación), medido únicamente en el segundo resumidero. Lo mismo se aplica para los paquetes que se encolan durante el proceso de traspaso.

$$r_p = t_n - t_c \quad (23)$$

Donde:

r_p retardo extremo-a-extremo del paquete

t_n es el tiempo en el que se recibió el paquete

t_c es el tiempo de creación del paquete

Para la obtención del promedio por simulación:

$$e2eDelay_{simulacion} = \frac{1}{Q} \sum_{j=1}^Q r_{p_j} \quad (24)$$

Donde:

r_{p_j} es el retardo extremo-a-extremo del j -ésimo paquete recibido.

Q es el número total de paquetes recibidos.

Se hace una distinción en el retardo extremo-a-extremo para los paquetes encolados y el de los paquetes transmitidos. Es decir, se genera una métrica del retardo extremo-a-extremo para los paquetes transmitidos de manera estable y otra para los paquetes generados durante el proceso de traspaso que se encolan. Lo anterior con la finalidad de que el tiempo que el paquete pasa en la cola, que puede ir desde milésimas de segundos hasta el orden de segundos, no afecte el promedio de ambos. Además de que una vez que el nodo realizó el traspaso exitosamente, enviará los paquetes encolados en una especie de ráfaga.

Adicional a las métricas anteriores, también se consideraron las siguientes dos métricas como complemento para la evaluación de los factores que afectan el retardo en el traspaso y la pérdida de paquetes. El número de traspasos tiene un efecto directo en el retardo en el traspaso, mientras que los traspasos fallidos se ven reflejados en la cantidad de paquetes que no pueden transmitirse debido a que no existe una conexión con algún resumidero.

- **Número de traspasos.** Es la cantidad de traspasos realizados por el nodo en movimiento durante la duración de un experimento o prueba.
- **Traspasos fallidos.** La cantidad de traspasos que no fueron exitosos debido a que no se pudo establecer correctamente y de manera estable la conexión al segundo resumidero.

5.4 Metodología para realizar el análisis 2^K factorial

Un análisis factorial permite investigar todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores que intervienen en un ensayo o experimento. Este análisis es ampliamente utilizado en experimentos en los que intervienen varios factores a estudiar y la interacción de estos en conjunto (Fogue et al., 2013). Una importante característica de los análisis factoriales es que permiten ser aplicados a una amplia variedad de áreas. Sobre todo, para áreas experimentales que requieren de un análisis amplio, es decir, que abarque la interacción de varios elementos. El análisis factorial se ha aplicado para la

optimización de procesos de fabricación, de reacción de materiales en el área química y es ampliamente utilizado en el estudio de redes inalámbricas, específicamente para determinar los factores más relevantes de ellas en un escenario práctico.

Uno de los más importantes se genera cuando se tiene k factores y cada factor cuenta con dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos, como lo es un valor de temperatura, la tasa de transmisión o número de usuarios, y también pueden ser cualitativos como la ausencia de movimiento o de cobertura. Para realizar un análisis de este tipo, es necesario recopilar la información de 2^k observaciones o experimentos (Law et al., 1991).

El enfoque básico de este método se ilustra en la figura 27. La primera parte consiste en determinar los factores a analizar. Estos factores se describieron en la sección anterior y son la base del análisis. En el siguiente paso, los factores toman valores extremos y son etiquetados con -1 para el valor bajo o correspondiente a condiciones favorables y con +1 para los valores altos o que corresponden a condiciones de carga para la red que propicien un desempeño bajo en la aplicación. Posteriormente se realizan los 2^k experimentos y se obtienen los resultados. Mediante un modelo de regresión no lineal se obtiene un sistema de ecuaciones que describe la interacción de $\binom{k}{2}$ factores, $\binom{k}{3}$ factores, etc., dependiendo el tipo de análisis que se esté buscando (en este trabajo se realiza el análisis de hasta $\binom{k}{2}$). El último paso consiste en resolver el sistema de ecuaciones para obtener el porcentaje de variación de cada uno de los factores y de la combinación de estos. A continuación, se desarrollan los pasos del análisis realizado.

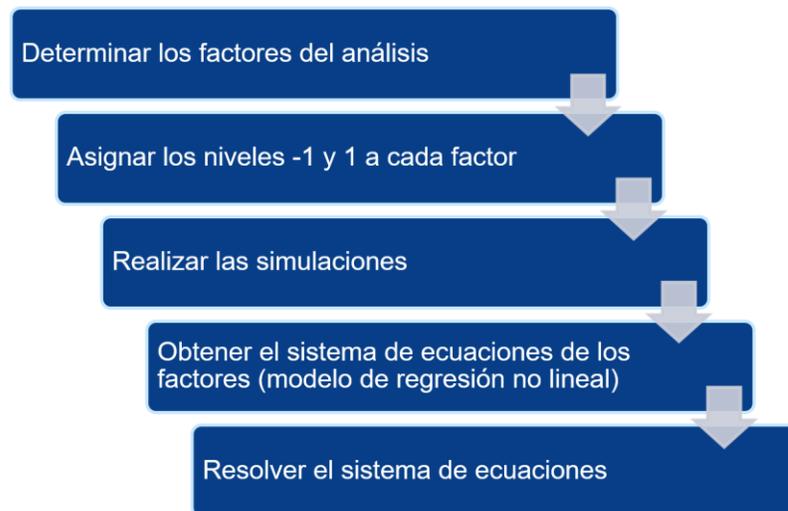


Figura 27. Metodología para el análisis 2^k factorial.

Los factores se determinaron en la sección 5.3. La selección de estos factores se dio debido a la importancia en algún aspecto relacionado con el desempeño tanto del mecanismo de traspaso como de la aplicación de telemonitoreo. La asignación de los niveles para cada factor se enlista de la siguiente manera:

Tasa de datos

La tasa de datos genera cierta contención en la red. Como ya se vio anteriormente, el estándar IEEE 802.15.4 tiene una limitante en cuanto al tamaño máximo de paquete posible (127 bytes), por lo tanto, a mayor tasa de datos, mayor será la generación de paquetes. Esto tiene como resultado un incremento en la contención por el canal lo que a su vez aumenta la probabilidad de paquetes descartados y paquetes perdidos por colisión. Por una parte, se tienen señales fisiológicas como temperatura (tasa baja) que no representan un problema para su transmisión en redes WPAN y otras señales como ECG (tasa alta) que produce un reto el ser transmitida con un buen desempeño en este tipo de redes.

En un escenario de telemonitoreo real se puede tener una serie de usuarios con los mismos o distintos sensores, lo que puede generar diferentes tasas de transmisión por usuario. Sin pérdida de generalidad se considera para el escenario propuesto que todos los usuarios se encuentran transmitiendo la misma cantidad de información con la misma tasa de generación de paquetes.

Tasa de datos (x_A). Basado en la tabla 1 se escogió temperatura (2.4 bps) como el nivel -1 y el ECG (9600 bps) como el nivel 1, debido a que la temperatura es la señal fisiológica que representa una menor carga para la red, mientras que el ECG puede ocasionar una sobresaturación si se tiene una gran cantidad de nodos transmitiendo a esa tasa de datos. La asignación de niveles para la tasa de datos se define en la ecuación siguiente:

$$x_A \begin{cases} -1 & \text{si tasa de datos} = TEM \\ 1 & \text{si tasa de datos} = ECG \end{cases} \quad (25)$$

Número de nodos en la segunda PAN

El número de usuarios o nodos dentro de una red de sensores es un factor muy importante debido a las limitantes de ancho de banda y tasa de datos baja. En el capítulo 3 se mostraron resultados de paquetes descartados (figura 23) y pérdida de paquetes (figura 24) para la transmisión de un ECG con variación en el número de nodos. En estos resultados se puede observar que se trata de un factor esencial a considerar en el despliegue del escenario propuesto. Una mayor cantidad de nodos transmitiendo implica una mayor cantidad de contención por el canal, lo que a su vez afecta el intercambio de los paquetes necesarios para llevar a cabo el mecanismo de traspaso.

Número de usuarios o nodos (x_B). De acuerdo con los resultados obtenidos en el capítulo 4, donde la figura 24 mostró que una pérdida de paquetes menor al 5% para el esquema de empaquetamiento de mayor tamaño se tiene cuando el número de nodos en la red es menor a 8. Se estableció que el nivel -1 corresponde a la ausencia de nodos transmitiendo en el segundo resumidero y el nivel 1 para 8 nodos conteniendo por el canal. La asignación de niveles se muestra en la siguiente ecuación:

$$x_B \begin{cases} -1 & \text{si nodos} = 8 \\ 1 & \text{si nodos} = 0 \end{cases} \quad (26)$$

Velocidad del nodo en movimiento

La movilidad del usuario es pieza fundamental de las redes de sensores hoy en día. Garantizar al usuario la conectividad en cualquier instante de tiempo se ha convertido en uno de los retos de diseño y desarrollo de aplicaciones con altos requerimientos, como es el caso del telemonitoreo hospitalario. Para el escenario planteado en la figura 26, se considera movimientos lineales y a velocidad constante, es decir, los usuarios no realizan caminatas aleatorias y se trasladan en línea recta de un punto a otro sin variaciones en su velocidad de movimiento.

En (Bohannon, 1997) se realizó un estudio a 230 personas de distintas edades, estatura, peso y género para determinar su velocidad de caminata en dos casos: caminata cómoda que consiste en realizar una caminata sin mucho esfuerzo físico, y caminata forzada, en donde la persona realiza un mayor esfuerzo al caminar sin llegar al punto de empezar a correr. Un resumen de las menores y mayores velocidades de caminata tanto con ritmo cómodo como forzado se muestran en la tabla 7 clasificadas por género:

Tabla 7. Velocidades de caminata y su desviación estándar.

Tipo de caminata	Mujeres		Hombres	
	Velocidad (m/s)	σ (m/s)	Velocidad (m/s)	σ (m/s)
Cómoda	1.27	0.21	1.33	0.19
Forzada	2.46	0.25	2.53	0.29

Con el estudio de (Bohannon, 1997) y el resumen de la tabla 7, se utilizó la velocidad de caminata más baja para el nivel -1 y la más alta para el nivel 1, debido a que una velocidad alta representa un menor tiempo para el intercambio de los paquetes necesarios para el traspaso. La asignación queda definida por la siguiente ecuación:

$$x_c \begin{cases} -1 & \text{si velocidad} = 1.27 \text{ m/s} \\ 1 & \text{si velocidad} = 2.53 \text{ m/s} \end{cases} \quad (27)$$

Periodo de envío de los paquetes faro

El intervalo de tiempo con el que los resumideros envían los paquetes faro tiene un impacto directo en el número de traspasos innecesarios y tiempo de desconexión prolongado; como se ha reportado en (Fotouhi et al., 2012) y (Salayma & Mardini, 2013). Resultados muestran que con un periodo de envío de paquetes faro corto se tiene una mayor tasa de éxito en el traspaso, sin embargo, genera un mayor efecto ping-pong, desperdiciando recursos de la red. Por otra parte, con un periodo paquete faro largo, se tiene un mayor tiempo de desconexión debido a que el nodo tarda en recibir el paquete faro que dispare el mecanismo de traspaso. Este parámetro se encuentra relacionado con el tiempo que el nodo pasa en el área crítica para el traspaso, es decir, el área en donde se traslapan los rangos de cobertura de dos o más resumideros.

Para el escenario propuesto, los tiempos de intervalo de los paquetes faro se utilizaron respecto al estándar IEEE 802.15.4 basados en el modo *Beacon-enable*. En el capítulo 2 (figura 10) se mostró que la estructura de la supertrama para este modo comienza con un paquete faro, en donde el valor BO es el que establece el periodo de envío de dicho paquete mediante la siguiente ecuación:

$$BI = aBaseSuperFrameDuration \cdot 2^{BO} \text{ símbolos} \quad (28)$$

Cuando se opera en la banda de frecuencia de 2.4GHz (tabla 4) se tiene que:

$$aBaseSuperFrameDuration = 16 \text{ slots} \quad (29)$$

$$aBaseSlotDuration = 60 \text{ símbolos} \quad (30)$$

$$\text{símbolo (@ 2.4GHz)} = 16 \mu s \quad (31)$$

Sustituyendo las ecuaciones (29), (30) y (31) en (28) se obtiene que el intervalo de los paquetes faro es:

$$BI = (16 \text{ slots} \cdot 60 \text{ símbolos} \cdot 2^{BO} \text{ símbolos}) 16 \mu s \quad (32)$$

Para $0 \leq BO \leq 14$. La tabla 8 muestra los distintos tiempos que BI puede tomar para los posibles valores BO.

Tabla 8. Tiempo de intervalo de paquetes faro para distintos valores de BO.

BO	Tiempo BI (s)
0	0.01536
1	0.03072
2	0.06144
3	0.12288
4	0.24576
5	0.49152
6	0.98304
7	1.96608
8	3.93216
9	7.86432
10	15.72864
11	31.45728
12	62.91456
13	125.82912
14	251.65824

Con base en la tabla 8, seleccionó el tiempo más bajo para el nivel -1 de manera que intente garantizar el traspaso a pesar de la velocidad o área de intersección. Para el nivel 1 se seleccionó el tiempo de BI correspondiente $BO = 6$, debido a que para una PAN con un promedio de alcance de cobertura de 30 metros representa casi el 10% del área recorrida por segundo a la velocidad mayor seleccionada. Esto

quiere decir que aproximadamente cada que se recorra un 10% del área de cobertura se recibirá un paquete faro por parte del resumidero. La asignación de niveles para este factor se define de la siguiente manera:

$$x_D \begin{cases} -1 & \text{si Periodo del paquete faro} = 15.36 \text{ ms} \\ 1 & \text{si Periodo del paquete faro} = 983.04 \text{ ms} \end{cases} \quad (33)$$

Modelo de propagación

El canal juega un papel importante en las comunicaciones, en especial cuando se trata de comunicaciones inalámbricas. La ecuación 34 describe la relación entre la potencia recibida y la potencia transmitida, también conocida como la fórmula de Friis para las pérdidas por propagación en el espacio libre (Spanó et al., 2016).

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \left[\frac{d_0}{d} \right]^\gamma \quad (34)$$

Donde:

G_t y G_r son la ganancia de las antenas de transmisión y recepción respectivamente. (adimensionales)

$\lambda = c/f$ es la longitud de onda de la señal. Calculada como la velocidad de la luz entre la frecuencia de la señal.

d es la distancia entre el transmisor y el receptor

P_t es la potencia de transmisión

P_r es la potencia recibida

d_0 es la distancia de referencia respecto a la antena

γ es el coeficiente de propagación

En la literatura como por ejemplo en (Braem & Moerman, 2011) se pueden encontrar referencias a tablas con una serie de coeficientes de propagación que han sido obtenidos mediante la caracterización de distintos ambientes y que se encuentran relacionados con la frecuencia de operación del sistema.

Por otra parte, se pueden considerar modelos de canal que resulten más acorde a escenarios reales y en específico que concuerde con el que se plantea. En (Nechayev et al., 2010; Desimone et al., 2015; Handayani et al., 2015) se menciona que un modelo de canal adecuado para edificios o interiores es el lognormal. Este modelo contiene una parte determinista dada en función de la distancia y otra parte aleatoria que sigue una función de probabilidad normal, pero en escala logarítmica, tal como se muestra en la ecuación 35. Para este modelo, es común encontrar que la media sea cero y la variancia tome un valor que dependa de las condiciones del ambiente en donde se desarrolla la comunicación, como puede ser: la cantidad de vegetación, número y grosor de las paredes, obstáculos de otro tipo, etc.

$$f_x(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (35)$$

La ecuación 36 describe las pérdidas por propagación en decibeles del modelo lognormal. La primera parte de la ecuación $P_L(d)$ compone la parte determinista y se encuentra dada por la fórmula de Friis (ecuación 34) en escala logarítmica. La segunda parte es la variable aleatoria lognormal X_σ .

$$P_L(d)[db] = P_L(d) + X_\sigma \quad (36)$$

La fórmula de Friis consiste en las pérdidas ideales de propagación, mientras que un modelo lognormal representa a un escenario con pérdidas por propagación que podemos encontrar en casos más apegados a la realidad. En (Desimone et al., 2015; Handayani et al., 2015) se menciona que una desviación estándar para la parte aleatoria del modelo lognormal se encuentra en el rango de [2.4, 3.2] decibeles para escenarios en el interior de edificios. Por lo tanto, se seleccionó un modelo de Friis que representa el caso ideal de transmisión para el nivel -1 y lognormal como un modelo más realista para el nivel 1. La asignación de niveles para el modelo de propagación se define en la ecuación siguiente:

$$x_E \begin{cases} -1 & \text{si modelo de propagación} = \text{Friis} \\ 1 & \text{si modelo de propagación} = \text{Lognormal} \end{cases} \quad (36)$$

Área de intersección de cobertura

Como se mencionó anteriormente, el área crítica dentro de un mecanismo de traspaso es donde se encuentra el traslape de la cobertura de los resumideros. El tiempo que un nodo pasa dentro de esa área está relacionado con el tipo de movimiento que este genera y la velocidad con la que lo ejecuta. Por lo tanto, a una mayor velocidad de movimiento, el nodo pasa menor tiempo en el área crítica lo que indica un menor tiempo para que se realice el traspaso. Si el área de intersección es pequeña y la velocidad del nodo lo suficiente mente alta para que no se pueda realizar el intercambio de mensajes del mecanismo de traspaso, la conexión al nuevo resumidero será fallida. Por otra parte, si el área de intersección es amplia y la velocidad del nodo en movimiento es baja, el tiempo que el nodo pasa dentro del área crítica se vuelve mayor, lo que puede ocasionar que el nodo se encuentre en una sección con una elevada contención. Además, se pueden incrementar la cantidad de traspasos innecesarios.

El área de intersección se encuentra dada por el alcance de los dispositivos utilizados para el despliegue del escenario y de características de los transeptores como la potencia de transmisión y la sensibilidad del radio en la recepción. Se seleccionó un 50% del alcance de cobertura de los resumideros como el nivel -1 debido a que corresponde a un caso donde se tiene una mayor área para realizar el traspaso. Mientras que un 20% de alcance representa un área limitada respecto a la velocidad para lograr un traspaso exitoso. La asignación de niveles para este factor se define de la siguiente manera:

$$x_F \begin{cases} -1 & \text{si área de intersección} = 50\% \\ 1 & \text{si área de intersección} = 20\% \end{cases} \quad (37)$$

El resumen de la asignación de los niveles -1 y 1 para el análisis factorial se muestra en la tabla 9. Estos valores se utilizan en las secciones posteriores tanto para las simulaciones como la implementación.

Con $k = 6$ factores a evaluar, se tiene que el análisis factorial consiste en 2^6 experimentos relacionados con los niveles de cada factor. La tabla 10 del anexo enlista los experimentos $y_1, y_2, \dots, y_{63}, y_{64}$ y sus correspondientes valores para los factores x_A, x_B, x_C, x_D, x_E y x_F .

Tabla 9. Factores y valores considerados para el análisis estadístico.

Parámetro	Nivel -1	Nivel 1
No. Nodos (A)	0	8
Tasa de datos (B)	Temperatura (2.4 bps)	ECG (9,600 bps)
Velocidad (C)	1.27 m/s	2.53 m/s
Periodo del paquete faro (D)	0.01536s	0.98304s
Modelo de propagación (E)	Friis ($\gamma=3.2$)	LogNormal ($\gamma=3.2, \sigma=2.7$)
Área de intersección de los resumideros (F)	50%	20%

5.3.1 Simulación

El modelo de la capa MAC de IEEE 802.15.4 de MiXiM no contiene las subrutinas correspondientes al proceso de asociación y disociación. Por lo tanto, fue necesario implementar ambos procesos junto con las partes necesarias para completar el mecanismo de traspaso. El diagrama de flujo que se describe en la figura del anexo B, muestra el proceso que debe seguir un nodo para realizar el traspaso entre dos resumideros.

Una vez que un nodo recibe un paquete faro se evalúa si se encuentra asociado a un resumidero. De no encontrarse asociado pasa directamente a la subrutina que contiene el proceso de asociación y una vez completado el proceso exitosamente se cambia el estado del nodo a asociado. Si el nodo, al recibir el paquete faro se encuentra asociado a un resumidero, revisa la dirección MAC origen del paquete. Si se trata de un paquete transmitido por su resumidero actual, el nodo actualiza la variable que almacena el RSSI del último paquete faro recibido. Cuando el paquete faro proviene de un resumidero diferente, el nodo compara el RSSI con el del último paquete faro recibido por parte de su resumidero actual. Si el RSSI del paquete faro recibido es mayor, el nodo comienza el proceso de disociación de su resumidero actual. Una vez completada exitosamente la disociación, actualiza su estado a no asociado y procede a ejecutar la asociación con el nuevo resumidero. Al finalizar este proceso, el nodo actualiza su estado a asociado y se marca como concluido el proceso global de traspaso.

El proceso de asociación se puede observar como una subrutina del mecanismo de traspaso de la figura del anexo B. Este proceso se muestra a manera de diagrama de flujo de la figura del anexo C. Este proceso es iniciado por el nodo que desea realizar la asociación a un resumidero mediante el paquete de control *AssociationRequest*, posteriormente se comprueba que el envío fue exitoso. Es importante

mencionar que se considera como exitoso el envío de los paquetes de control cuando es recibido su correspondiente ACK, esto de acuerdo con lo establecido en el estándar. Seguido del envío exitoso del *AssociationRequest* se envía el paquete *DataRequest* y una vez que se comprueba que fue recibido, se espera hasta un tiempo *ResponseWaitTime* para recibir el paquete *AssociationResponse* y responder con su correspondiente ACK. En este punto queda concluido el proceso de asociación.

El proceso de disociación implementado en el simulador se muestra a manera de diagrama de flujo en la figura 28 y forma parte de los subprocesos del mecanismo de traspaso de la figura del anexo B. Para el escenario propuesto, el proceso de disociación es iniciado de parte del nodo mediante el envío del paquete *DisassociationNotification* y concluye cuando es recibido su correspondiente acuse de recibo.

Adicionalmente al mecanismo de traspaso, fue necesario la implementación del paquete faro, ya que como se ha mencionado anteriormente, el modelo de MiXiM trabaja en modo sin paquetes faro. Este paquete se adaptó de tal manera que los resumideros al ser coordinadores de una PAN ejecuten un temporizador para que cada cierto tiempo (configurable) envíe un paquete emulando ser el paquete faro.

Los parámetros de simulación utilizados son los de la tabla 11, adicionales a los valores de los factores correspondientes a la tabla 9. El tiempo de simulación se ajusta de acuerdo con la velocidad del nodo, ya que se busca este realice un traspaso por cada simulación, es decir, que recorra del extremo izquierdo del área de cobertura del primer resumidero al extremo derecho del área de cobertura del segundo resumidero (figura 29).

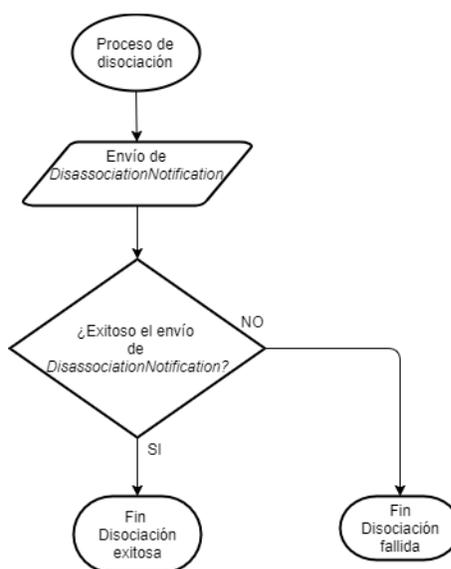


Figura 28. Diagrama de flujo del proceso de disociación.

La potencia de transmisión corresponde a 0dbm que es ampliamente utilizada como la potencia por defecto en los dispositivos comerciales como los SensorTags de TI o los Waspote de Libelium (Libelium, 2017). Por otra parte, la sensibilidad del radio de -97dbm se encuentra definida en el estándar y debido a esto fue la que se decidió utilizar y al igual que la potencia de transmisión, es la sensibilidad utilizada por defecto en los radios que se pueden encontrar en el mercado.

Tabla 10. Parámetros para las simulaciones del escenario propuesto.

Parámetro	Valor
Tiempo de simulación	80s y 93s
No. de simulaciones	5000
Número de nodos estáticos	0 y 8
Velocidad de los nodos	Movimiento lineal (2.53 y 1.23 m/s)
Modelo de propagación	Modelo de Friis ($\gamma=3.2$) y Lognormal ($\gamma=3.2$, $\sigma=2.7$)
Protocolo PHY/MAC	IEEE 802.15.4 <i>non beacon-enable</i> (CSMA/CA)
Potencia de transmisión	1mW
Frecuencia transmisión	2.4Ghz
Sensibilidad del radio	-97dbm
Área de simulación	50x100m
Periodo de envío de los paquetes faro	0.01536s y 0.98304s
Tasa de transmisión por nodo	9.6 kbps y 2.4 bps

La arquitectura de la red en el simulador se muestra en la figura 29. El rango de cobertura tanto de los resumideros como de los nodos se validó mediante la realización de experimentos con los radios utilizados para la implementación a lo largo de este trabajo de tesis. Este rango de cobertura varió en las diferentes pruebas, sin embargo, se obtuvo un promedio de 35 metros con una desviación estándar de 4 metros. Con este valor se obtuvo el coeficiente de propagación ($\gamma=3.2$) que para la sensibilidad utilizada se obtiene el rango de cobertura deseado. Con los datos anteriores se puede determinar la posición de los resumideros para lograr el área de intersección de 20% y 50% respectivamente. Para lograr un área de intersección del 20%, los resumideros deben de estar separados 63 metros uno del otro, mientras que para un 50% de área de intersección es necesario que se encuentren separados por 35 metros.

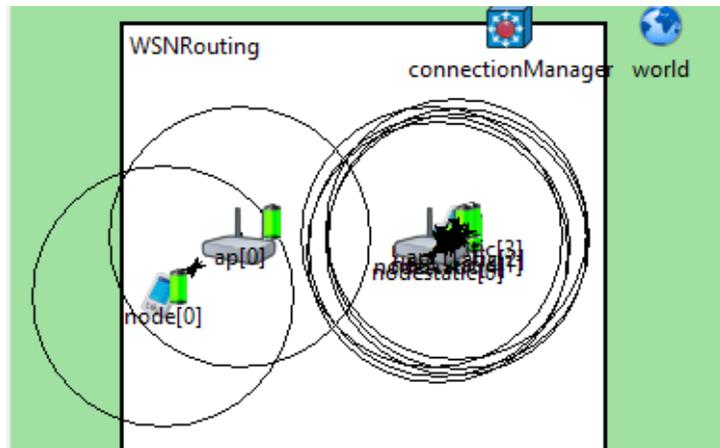


Figura 29. Escenario en el simulador OMNeT++.

Para cada uno de los 64 experimentos se promediaron los resultados de las 5000 simulaciones. Estos resultados se presentan en la tabla 12 para cada una de las métricas evaluadas. La numeración de los experimentos corresponde a los definidos en la tabla 10.

5.3.2 Implementación

La cama de pruebas que corresponde a la implementación del escenario propuesto se ilustra en la figura 30. Se tienen dos resumideros separados de acuerdo con lo mencionado en la sección anterior para cada una de las dos áreas de cobertura utilizadas. Los nodos estáticos se ubican en el área de cobertura del segundo resumidero. El nodo móvil realiza su recorrido del área de cobertura del primer resumidero hacia la del segundo resumidero a una velocidad aproximada a las definidas en la tabla 9. Al igual que en el capítulo 3, se utiliza la tarjeta de evaluación SmartRF05 para capturar los paquetes de cada experimento. Esta tarjeta se sitúa en el centro del área de intersección de los resumideros, con la finalidad de garantizar la captura de los paquetes relacionados con el traspaso.

El área en donde se llevaron a cabo los experimentos consistió en una zona exterior con edificios y árboles a los costados. Ningún obstáculo se encuentra dentro del escenario, procurando que exista siempre línea de vista entre los nodos y los resumideros. Es importante mencionar que para la implementación no se tiene control sobre las condiciones del canal más que las mencionadas

anteriormente. Por lo tanto, el modelo de canal es un factor que se omite dentro de los experimentos realizados en esta sección.

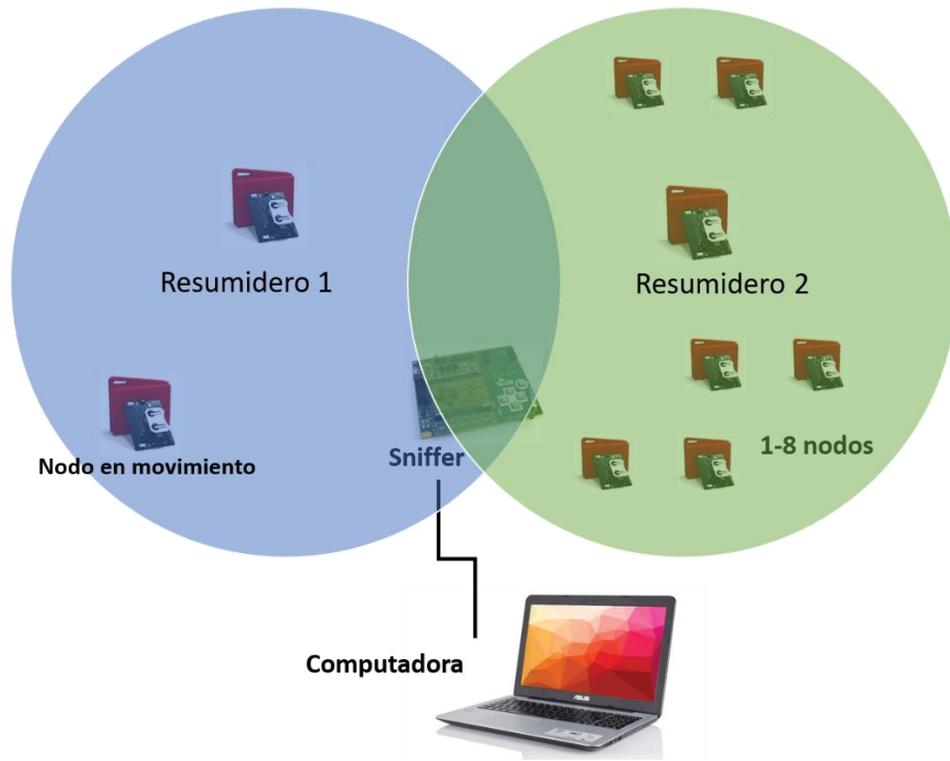


Figura 30. Cama de pruebas del escenario propuesto.

Debido al tiempo requerido para ejecutar cada uno de los 32 experimentos restantes una cantidad de veces que resulte significativa para la obtención de promedios; se decidió omitir el tiempo de intervalo de los paquetes fano, estableciendo un valor fijo correspondiente al nivel -1 (0.01536s). De esta manera se realizaron 10 repeticiones de cada uno de los 16 experimentos restantes, promediando los resultados para cada métrica. Estos resultados se presentan en la tabla 13 del anexo. Para permitir la comparación de los resultados de las simulaciones con los respectivos de la implementación, se utilizó el mismo esquema de la tabla 10 para la definición de los experimentos. Se consideró el modelo de propagación como lognormal, ya que es el más cercano a las condiciones de la cama de pruebas y que el modelo de Friis representa un escenario ideal.

Las métricas de retardo extremo-a-extremo se sustituyeron por el tiempo inter-arribo de paquetes medido en el lado del receptor, de igual manera haciendo la distinción de los paquetes recibidos en situación estable y los encolados debido al traspaso. Se procuró que no hubiera interferencias electromagnéticas provenientes de otras tecnologías inalámbricas como WiFi o Bluetooth que operan en la misma banda de frecuencia. Por lo que se utilizó el canal 15 de IEEE 802.15.4 (figura 8), ya que se encuentra en el espacio entre los canales 1 y 6 de IEEE 802.11 que corresponden a los canales más utilizados por esta tecnología junto con el 11. Esto quiere decir que cualquier red IEEE 802.11 que se encuentre operando en los canales 1 y 6 no genera interferencia en el canal 15 de IEEE 802.15.4

Sin embargo, replicar el escenario en la implementación de manera fiel al de la simulación se vuelve una tarea difícil ya que no se tiene control de factores como los atmosféricos que varían día con día y que afectan en distinta forma al canal de comunicación. Las pruebas de esta sección se realizaron a lo largo de dos semanas y durante distintas horas del día. La diferencia más significativa respecto a la simulación se puede observar en el retardo en el traspaso, debido a que los tiempos se mantuvieron bajos en relación con el número de traspasos realizados.

5.4 Resultados del análisis estadístico

El resultado de las métricas y correspondiente a un análisis para la interacción hasta 2 factores, puede ser obtenido mediante un modelo de regresión no lineal de la forma:

$$y = q_0 + q_A x_A + q_B x_B + q_C x_C + q_D x_D + q_E x_E + q_F x_F + q_{AB} x_A x_B + q_{AC} x_A x_C + q_{AD} x_A x_D + q_{AE} x_A x_E + q_{AF} x_A x_F + q_{BC} x_B x_C + q_{BD} x_B x_D + q_{BE} x_B x_E + q_{BF} x_B x_F + q_{CD} x_C x_D + q_{CE} x_C x_E + q_{CF} x_C x_F + q_{DE} x_D x_E + q_{DF} x_D x_F + q_{EF} x_E x_F \quad (39)$$

Sustituyendo los 21 experimentos de la tabla 10 correspondientes a las ecuaciones (32) a la (38) (2 niveles por cada factor) en (39), se tiene un sistema de 22 ecuaciones que puede ser resuelto de manera única para las 22 variables desconocidas, donde q_0 representa la media de la métrica en cuestión. La relevancia de un factor depende de la métrica de total de variación. El total de variación de y se conoce también como el Total de la Suma de los Cuadrados (SST, por sus siglas en inglés) y puede ser calculada de la siguiente forma:

$$Total\ de\ variaci3n\ de\ y = SST = \sum_{i=1}^{2^6} (y_i - \bar{y})^2 \quad (40)$$

Donde \bar{y} representa la media del total de los experimentos. Con la ecuaci3n (40) se puede obtener la fracci3n de variaci3n que corresponde a cada factor y a las $\binom{k}{2}$ combinaciones de estos, tal como se muestra en la siguiente ecuaci3n.

$$Fracci3n\ de\ variaci3n\ de\ X = \frac{SSX}{SST} = \frac{2^6 q_X^2}{SST} \quad (41)$$

Donde X representa cada una de las variables obtenidas del sistema de ecuaciones en (39), con excepci3n de q_0 que como ya se mencion3, representa la media de los experimentos. Utilizando la ecuaci3n (41) se puede obtener el porcentaje de variaci3n de cada factor para cada una de las m3tricas estudiadas. Mientras mayor es el porcentaje de variaci3n, mayor relevancia o impacto tiene el factor en la m3trica medida en cuesti3n. Estos resultados se presentan en la tabla 14.

Tabla 11. Resultados del an3lisis estadístico 2^k factorial.

Factor	Retardo en el traspaso	N3mero de traspasos	Traspasos fallidos	P3rdida de paquetes	Retardo E2E	Retardo E2E encolados
A	0.02	0.14	0.06	2.9669	84.3406	44.0885
B	0.00	0.01	0	5.4129	7.3516	27.5454
C	12.45	7.04	2.38	0.004	0	0.0339
D	21.73	27.99	38.90	22.4314	0.3748	1.14E-04
E	0.21	1.81	2.15	35.4754	0.0306	4.1161
F	15.83	13.92	7.78	3.0287	0.0076	0.1266
AB	0	0	0	3.0956	7.8335	21.3573
AC	0	0	0	0.0179	0	0.0425
AD	0	0	0	2.9498	0	0.0216
AE	0.03	0.14	0.08	0.0667	0	2.2425
AF	0	0	0	2.8889	0.0076	0.0015
BC	0	0	0	0.0083	0	2.66E-05
BD	0	0	0	0.0792	0	0.1021
BE	0	0.01	0	0.007	0.0076	0.0425
BF	0	0	0	0.0484	0	0.009
CD	0	0	0	7.51E-04	0	0
CE	12.42	7.04	2.41	0.0654	0	0.1555
CF	0	0	0	0.0137	0	1.23E-06
DE	21.53	27.99	38.06	0.0857	0.0306	0.0239
DF	0	0	0	1.284	0.0076	4.91E-06
EF	15.78	13.92	8.16	20.0692	0.0076	0.0907

Los resultados resaltados en negritas corresponden a los porcentajes de mayor variación. A continuación, se enlistan las conclusiones obtenidas del análisis estadístico, desglosadas para cada una de las métricas evaluadas y con enfoque al proceso de traspaso:

Retardo en el traspaso: la velocidad del nodo en movimiento tiene un 12.45% de variación, la combinación de la velocidad del nodo y el modelo de propagación tienen un 12.42%, la combinación del intervalo de envío de los paquetes faro y el modelo de propagación corresponden al mayor porcentaje de variación para esta métrica con un 21.53%. Por último, la combinación del modelo de propagación y el área de intersección tienen el segundo porcentaje más alto de variación con un 15.77%. El retardo en el traspaso se ve afectado en mayor medida por la velocidad del nodo, el intervalo de envío de los paquetes faro y el área de intersección de manera individual. El modelo de canal en combinación con los tres factores anteriores respectivamente tiene un impacto en el desempeño de esta métrica. Esto quiere decir que por una parte, la velocidad del nodo puede beneficiar al traspaso cuando este pasa lo suficientemente rápido el área de intersección para que se complete el traspaso de manera exitosa. No se generan tantos trasposos innecesarios que provocan retardo debido a que, como se mencionó anteriormente, el retardo en el traspaso se mide desde que comienza el mecanismo de traspaso hasta que se realiza el último traspaso y se establece una comunicación estable con el nuevo resumidero (se termina el efecto ping-pong). Cuando se tiene un modelo de canal diferente al de Friis, la combinación de este factor con el modelo de canal tiene 12.42% de relevancia. El intervalo de envío de los paquetes faro cuando se combina con un modelo de canal aleatorio, tiene una relación directa con el número de trasposos que se realizan, lo que provoca un que haya un mayor retardo para un intervalo corto y un menor retardo con un intervalo largo de envío de los paquetes faro. Relacionado con lo anterior, se tiene el área de intersección de cobertura de los resumideros. Por una parte, se busca que el área de intersección sea grande para garantizar el traspaso, sin embargo, para un canal muy variante esto puede provocar una gran cantidad de trasposos a mayor área de intersección, lo que se ve reflejado en el retardo que tiene el traspaso.

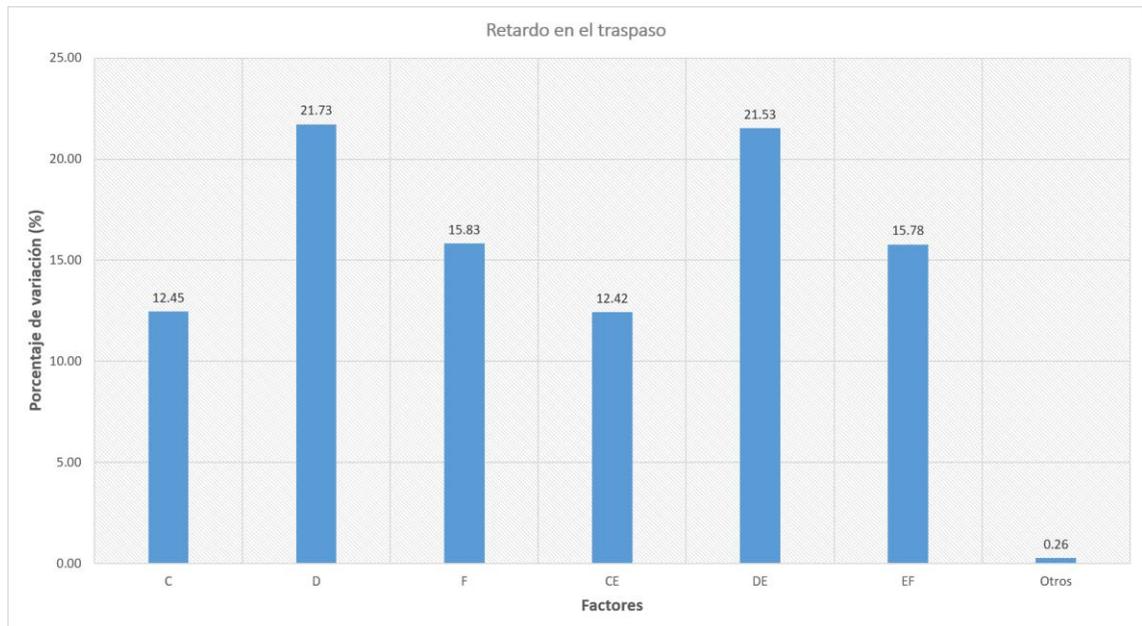


Figura 31. Porcentaje de variación de los factores para el retardo en el traspaso.

Número de traspasos (efecto ping-pong): Los factores que mayor porcentaje de variación tienen para esta métrica son los mismos que para el retardo en el traspaso, pero con diferente porcentaje, 7.03%, 7.03%, 27.98% y 13.92% respectivamente. Como se mencionó anteriormente, el efecto ping-pong observado se debe a la variabilidad del RSSI de los paquetes faro recibidos por el nodo que provoca un alto grado de efecto ping-pong durante el traspaso. A su vez, esto se liga con el tercer y cuarto factor más relevante para esta métrica que son el área de intersección y la combinación de esta con el modelo de canal respectivamente. Por lo tanto, cuando se tiene un canal aleatorio y un área amplia donde se están recibiendo constantemente paquetes faro de dos resumideros distintos, aumenta la probabilidad de realizar traspasos innecesarios que únicamente generan retardo en la comunicación del nodo y mayor contención en la red.

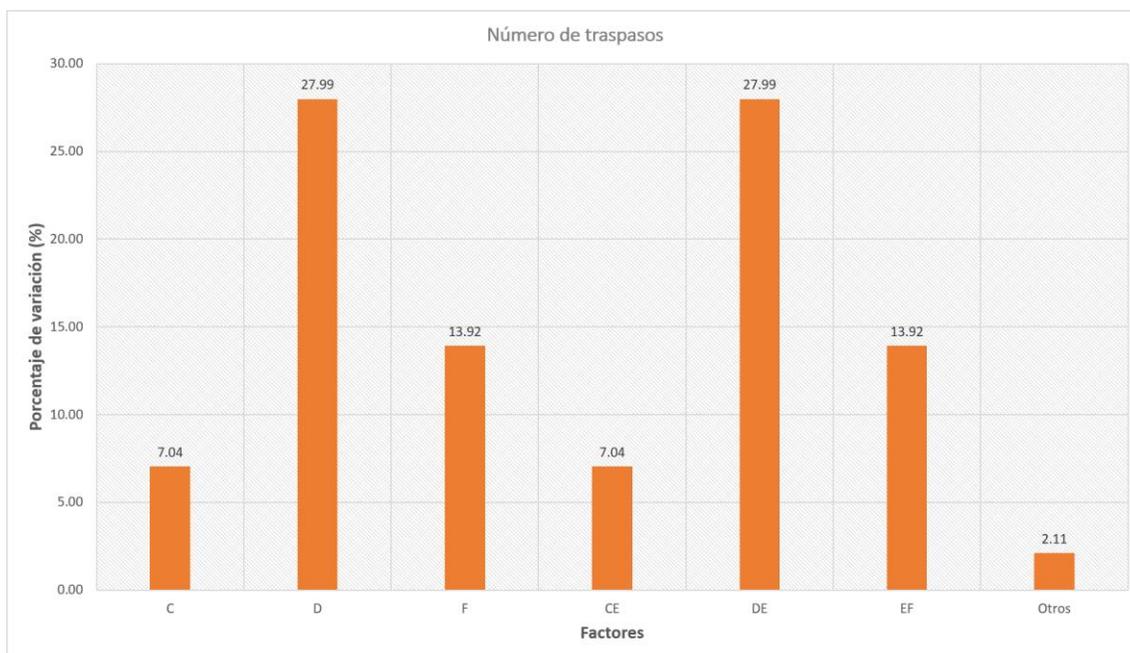


Figura 32. Porcentaje de variación de los factores para el número de traspasos.

Traspasos fallidos: Esta métrica, al igual que las dos anteriores, tiene los mismos factores con mayor porcentaje de variación. Esto se debe a que las tres métricas están relacionadas entre sí y un desempeño deficiente en una lleva consigo un mal desempeño en las otras dos. Los porcentajes de mayor variación son, 2.38%, 2.40%, 38.06% y 8.16% respectivamente. Los traspasos fallidos y de manera similar a la métrica anterior, se ven afectados principalmente por el intervalo de los paquetes faro, su combinación con el canal y el área de intersección. Esto se debe a que por una parte, si tenemos un área de intersección pequeña y un canal aleatorio, la probabilidad de realizar un traspaso exitoso disminuye debido a la contención y a que las condiciones del canal no permitan el intercambio de los paquetes necesarios para llevar a cabo el proceso de asociación y disociación. Si el efecto ping-pong es alto, aumenta la probabilidad de que algún proceso no se complete correctamente y se pierda la conexión con ambos resumideros.

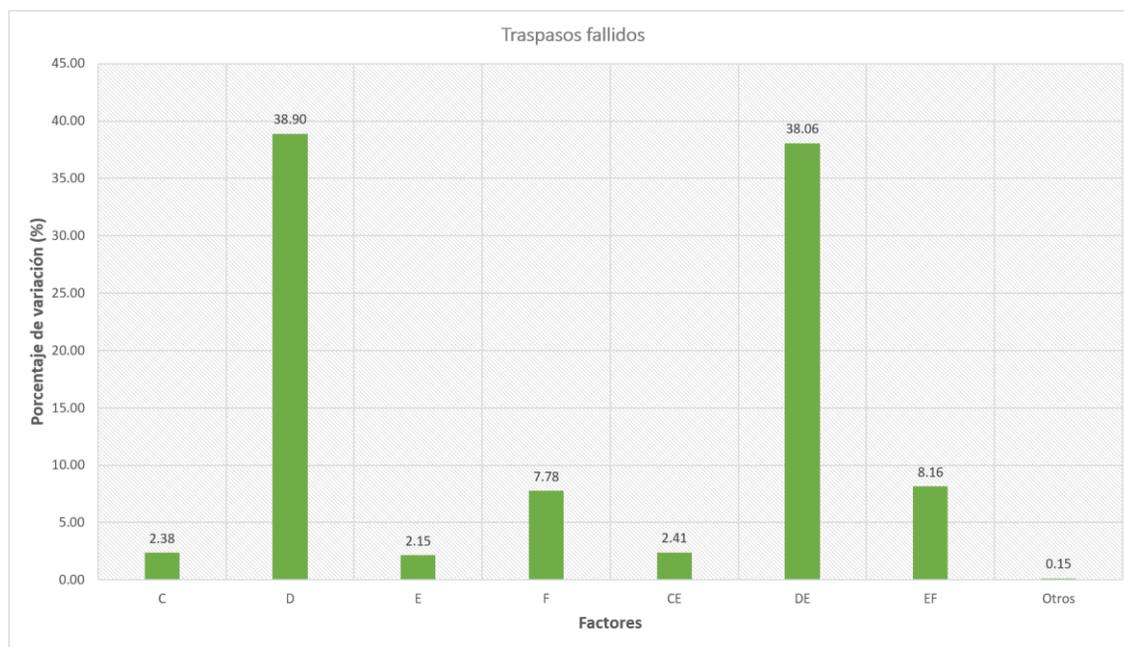


Figura 33. Porcentaje de variación de los factores para los trasposos fallidos.

Pérdida de paquetes: Esta métrica cuenta varios factores con porcentajes de variación superior al 1%. Sin embargo, los 3 factores con mayor porcentaje son, el intervalo de envío de los paquetes faro con 22.43%, el modelo de canal con 35.47% y la combinación del modelo de canal y el área de intersección con un 20.06%. La métrica anterior tiene repercusiones directas en la pérdida de paquetes, ya que al no completar el proceso de traspaso y establecer una conexión estable con el segundo resumidero, no se puede continuar con el envío de los paquetes de información y los paquetes generados se siguen encolando. Por lo tanto, estos paquetes se consideran como perdidos. Además de la pérdida de paquetes resultado de los paquetes descartados y de las colisiones, cada vez que hay un traspaso fallido, se tiene cerca del 50% de los paquetes perdidos debido a que el nodo pasa aproximadamente la mitad de la simulación en el área de cobertura del primer resumidero y la otra mitad en el segundo.

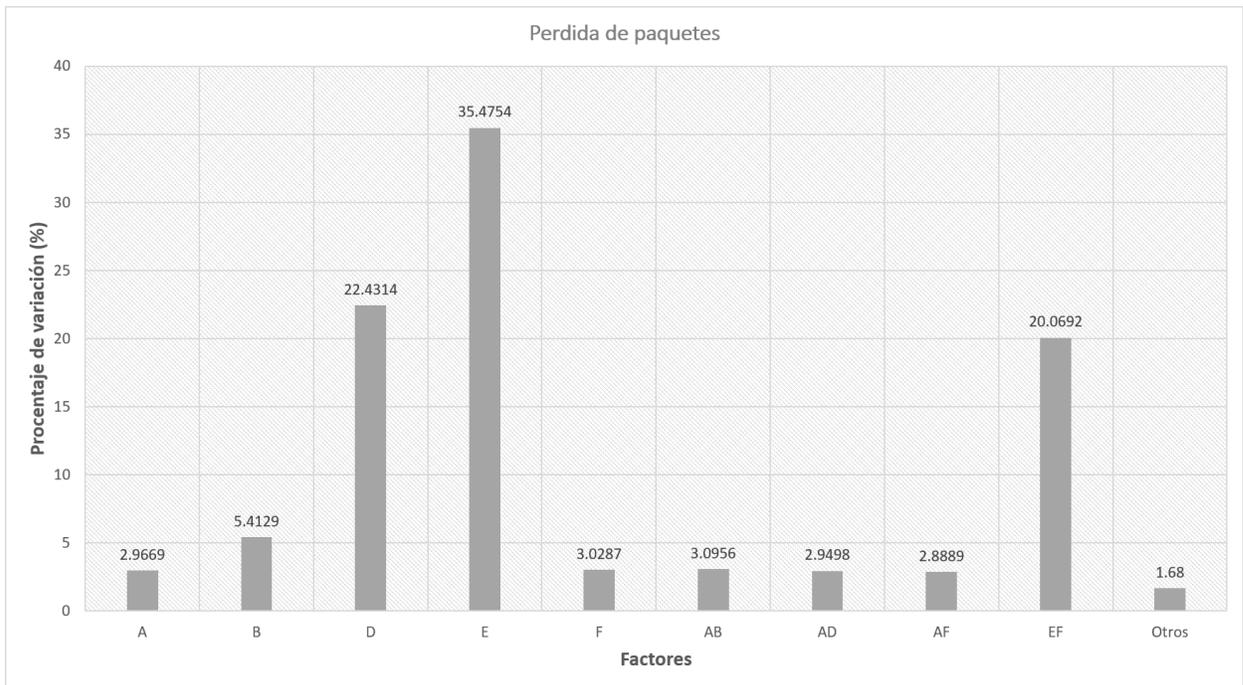


Figura 34. Porcentaje de variación de los factores para los paquetes perdidos.

Retardo extremo-a-extremo: Se ve afectado un 84% por la tasa de datos, un 7% por el número de nodos y por la combinación de estos dos factores. Para esta métrica queda claro que la tasa de datos tiene una mayor importancia. Esto se debe a que, para el caso de temperatura, la contención por el canal es muy poca inclusive cuando se tienen 8 usuarios en la red. Mientras que, para el ECG, la contención es mucho mayor y aumenta considerablemente a medida que aumenta el número de usuarios. El aumento en la contención ocasiona que la transmisión no siempre se lleve a cabo en el primer intento por acceder al canal, pasando a las siguientes etapas de desistimiento, dando resultado un retardo en la transmisión.

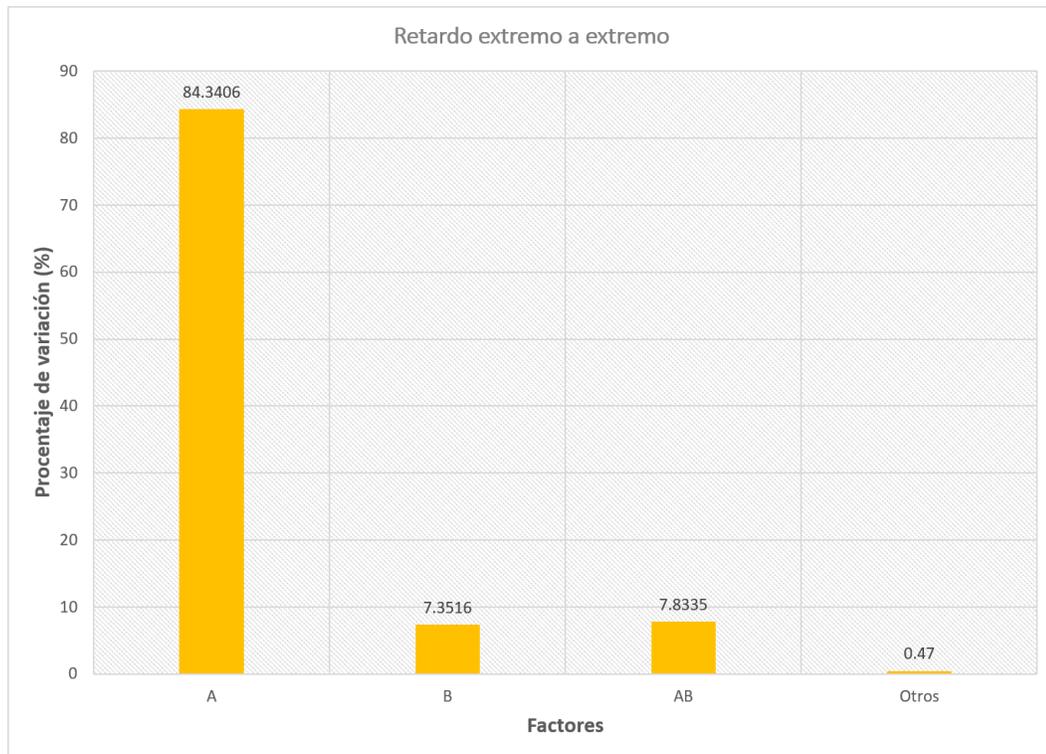


Figura 35. Porcentaje de variación de los factores para el retardo extremo-a-extremo.

Retardo extremo-a-extremo de los paquetes encolados: Los paquetes encolados se ve afectado por los mismos factores que el retardo extremo-a-extremo medido normal. Sin embargo, el porcentaje de variación de cada uno de los factores es distinto: 44%, 27% y 21% respectivamente, además muestra un 2% para el modelo de canal. Estos resultados indican que cuando la red a la que se quiere realizar el traspaso tiene una contención por el canal elevado, el proceso de traspaso tiene un mayor retardo lo que provoca que acumulen una mayor cantidad de paquetes en la cola esperando la nueva contención. Mientras más se prolongue el traspaso o mayor sea el efecto ping-pong, los paquetes permanecen un mayor tiempo en la cola. Cuando se logra establecer la conexión, estos paquetes se envían de forma consecutiva (a manera de ráfaga) como el canal lo permita.

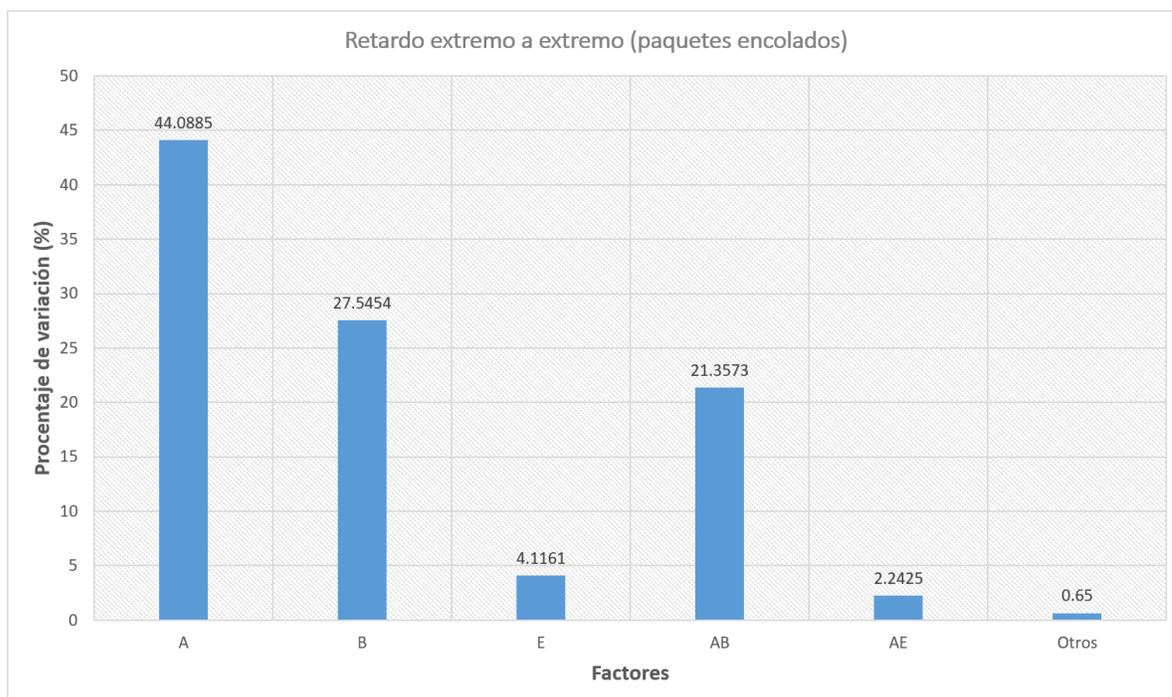


Figura 36. Porcentaje de variación de los factores para el retardo extre-a-extremo de los paquetes encolados.

5.5 Conclusiones del análisis estadístico

Los resultados del escenario propuesto de telemonitoreo presentados en las tablas 12 y 13 constituyen una gran cantidad de información para ser analizada y poder obtener conclusiones de un panorama que abarque todos los puntos tratados a lo largo de este capítulo. Por lo que se vuelve complicado inclusive presentar los datos en gráficas que permita una reflexión que resalte los puntos más importantes de este trabajo. Es por eso por lo que, el análisis factorial se vuelve una herramienta fundamental para la parte final del trabajo de esta tesis. Permite utilizar la información cruda proveniente de los resultados de las simulaciones para obtener las partes más relevantes teniendo en cuenta la interacción de los factores considerados.

Los resultados del análisis estadístico que se presentaron en la tabla 14 permiten realizar un análisis que detalla en el capítulo 6, donde se abordan las conclusiones y consideraciones que hay que tomar para el diseño de un nuevo mecanismo de traspaso, que depende en gran medida de la aplicación y sus requerimientos de esta. Los resultados tanto de las simulaciones como los de la implementación

plasman de forma clara que la cantidad de factores involucrados en el proceso de traspaso son los suficientes para volver complejo su análisis y que es necesario utilizar una metodología igual o similar a la seguida en este trabajo. Esto se ve recalcado en las diferencias de los resultados entre la simulación y la cama de pruebas implementada donde, pese a que se trató de replicar, se identificó otros factores involucrados en los resultados que únicamente en un laboratorio especializado se podrían mitigar o controlar.

Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Introducción

Durante los capítulos anteriores surgieron diversos problemas y cuestionamientos que se tuvieron que resolver mediante investigación, herramientas conocidas y algunas otras adquiridas a lo largo de este trabajo. Se requirió de tiempo para aprender a utilizar herramientas como el modelo de MiXiM y el simulador OMNeT++. El objetivo de este capítulo es presentar las conclusiones más relevantes obtenidas de la discusión de los resultados de la realización de este trabajo. De manera adicional, los resultados obtenidos del análisis factorial son la base para establecer los puntos de mayor relevancia para el diseño de mecanismos de traspaso enfocados al telemonitoreo hospitalario, lo que constituye un siguiente paso o trabajo a futuro.

Las aportaciones de este trabajo permiten establecer parte de una metodología para la evaluación de mecanismos de traspaso en escenarios de telemonitoreo. Sin embargo, el análisis realizado no se limita a mecanismos de traspaso y a escenarios de telemonitoreo; es decir, es posible trasladar la metodología para evaluar otros procesos en redes inalámbricas como protocolos de enrutamiento, mecanismos de cross-layer, etc. Además, se puede aplicar a escenarios distintos como lo son escenarios para redes vehiculares o cualquier otra red de sensores.

6.2 Conclusiones

En esta sección se describen las conclusiones y aportaciones obtenidas durante el proceso de investigación y desarrollo de cada una de las etapas de este trabajo. Se hace énfasis en las conclusiones del análisis factorial debido a que constituye el objetivo principal de la tesis, sin embargo, se resaltan las herramientas que se validaron y que pueden ser de gran utilidad para trabajos futuros relacionados con el estándar IEEE 802.15.4.

Sobre la validación MAC del estándar IEEE 802.15.4

Como se ha observado, existen en la literatura trabajos que presentan diferencias en órdenes de magnitud entre el modelo analítico, simulaciones e implementación. Por lo tanto, resulta necesario llevar a cabo una validación de las herramientas previo al diseño del escenario. Respecto a la validación del modelo MAC se pueden mencionar las siguientes conclusiones:

- Se realizó la validación del modelo de simulación mediante un modelo analítico y una cama de pruebas con la finalidad de determinar si se encuentra implementado correctamente. El modelo validado puede ser de utilidad para otras investigaciones o desarrollos que incorporen redes IEEE 802.15.4.
- Existe una gran cantidad de procesos y parámetros que define el estándar IEEE 802.15.4 para la capa MAC, entre los cuales se encuentra los de la tabla 4 de la sección 4.3.2 que dependen de la frecuencia de operación. Por esta razón fue importante verificar que estuvieran establecidos correctamente al momento de incorporar el modelo MAC a la simulación. Para esto fue necesario profundizar en el documento técnico del estándar, estudiar y entender los procesos que se definen en él.
- La API de TI que implementa los mecanismos del estándar se encuentra validada. Esto se debe a que es un producto comercial, y dentro de sus características cuenta con el soporte necesario para un uso de acuerdo con el estándar. Sin embargo, no posee ciertas rutinas como el uso de las funciones para la disociación o mecanismos que permitan implementar el envío de paquetes faro o el uso de modo promiscuo que no realice un filtro a nivel MAC de los paquetes recibidos. Por esto por lo que se tuvieron que implementar las siguientes rutinas en los dispositivos: envío periódico de paquetes faro en modo non beacon-enable, proceso de disociación, proceso de evaluación de los paquetes faro y registro de métricas.
- Dentro de las consideraciones del escenario propuesto para la validación se encuentran: comunicación ideal, es decir, no existen pérdidas ocasionadas por el canal, todos los nodos se escuchan entre si y no existe interferencia de otras redes o tecnologías. Para la implementación con los SensorTags se desarrolló una cama de pruebas que cumpliera lo mejor posible con dichas consideraciones.
- Contar con un modelo de simulación validado de capa MAC del estándar IEEE 802.15.4 para el simulador OMNeT++ resulta de gran importancia para trabajos futuros a realizar sobre esta tecnología. Es posible seguir desarrollando modelos de capas superiores que

se adapten a este modelo, por ejemplo: la capa de adaptación de LoWPAN (6LoWPAN), protocolos de enrutamiento, transporte o de capa de aplicación para redes de sensores.

Sobre el escenario de telemonitoreo propuesto

Los resultados de este trabajo tienen relación directa con el escenario de telemonitoreo propuesto, ya que dicho escenario se diseñó para facilitar la evaluación de un único nodo realizando el traspaso. Con respecto al escenario propuesto, se establecieron las siguientes conclusiones:

- Se desarrolló un escenario de simulación que permitiera evaluar el mecanismo de traspaso con los procesos que define el estándar IEEE 802.15.4. Este escenario permitió observar el comportamiento de la red y en específico del nodo realizando el traspaso bajo condiciones específicas.
- Se hizo una revisión de la literatura para determinar los factores y características que conlleva un escenario de telemonitoreo. Se describieron arquitecturas, perfil de tráfico y tecnologías utilizadas en escenarios para este tipo de aplicaciones con la finalidad de diseñar un escenario de simulación con condiciones más cercanas a las existentes dentro de un telemonitoreo hospitalario.
- El escenario fue diseñado tomando en consideración las métricas definidas para la evaluación del traspaso. Para la obtención de resultados de cada métrica sobre los que se pudieran realizar conclusiones, fue necesaria la interacción de herramientas como Matlab y OMNeT++ que mediante la creación de rutinas permitiera el registro, procesamiento y despliegue de dichos resultados.

Sobre el análisis estadístico 2^k factorial

Para facilitar el análisis de los resultados de las simulaciones, el análisis estadístico permite cuantizar la relevancia que tienen los factores evaluados en el proceso de traspaso para el escenario propuesto. A continuación, se enlistan las conclusiones obtenidas del análisis estadístico y también se establecen ciertas consideraciones que basadas en los resultados se deben tener para el diseño de un nuevo mecanismo.

- La realización de la simulación Montecarlo se convierte en una herramienta de gran utilidad cuando se plantean escenarios con una serie de factores, ya que se vuelven difíciles de modelar matemáticamente como un sistema en conjunto.
- Se obtuvieron los factores de mayor relevancia para cada una de las métricas evaluadas. Esto permitió analizar cada una de ellas de manera individual, así como la interacción de ellas. Al conocer los factores que más afectan al proceso de traspaso se puede determinar las limitantes de las redes WBAN/WPAN y del estándar IEEE 802.15.4 en específico para la implementación en escenarios de telemonitoreo.
- Para las métricas de retardo en el traspaso, número de traspasos y traspasos fallidos, los factores de mayor relevancia fueron: la velocidad del nodo, el modelo de propagación y la combinación de ambos factores. Con estos resultados, se pudo determinar que los tres factores anteriores provocan en gran medida el efecto ping-pong, que tiene repercusiones altamente negativas en el retardo en el traspaso.
- El efecto ping-pong puede mitigarse con un intervalo adecuado de envío de paquetes fono y un mecanismo que procure garantizar que el proceso de traspaso se inicia cuando el enlace con el nuevo resumidero es estable. De esta manera se trata de evitar que el canal ocasione traspasos innecesarios.
- La pérdida de paquetes se ve afectada principalmente por: el intervalo de envío de los paquetes fono, el modelo de canal y la combinación del modelo de canal y el área de intersección. Estos factores ocasionan la pérdida de paquetes por colisiones y por paquetes descartados debido a que el mecanismo CSMA/CA encontró ocupado el canal en cada etapa de desistimiento. Una tasa alta de pérdida de paquetes debida a los factores anteriores propicia la perdida de paquetes de control propios del proceso de traspaso, lo que puede ocasionar fallos en la conexión con algún resumidero (al no completarse el traspaso) lo que conlleva que los paquetes encolados no puedan ser transmitidos a su destino.
- El análisis factorial mostró que los factores que más afectan el desempeño del retardo extremo-a-extremo son: la tasa de datos, el número de nodos y la combinación de ambos factores. El primer factor con un 84% lo que resalta una de las limitantes de la tecnología. Para el caso de los paquetes encolados fueron los mismos factores los que tuvieron mayor relevancia, pero con un porcentaje no tan cargado para la tasa de datos, es decir, que el número de nodos tiene mayor relevancia en los paquetes que se encolan durante el proceso de traspaso que en los paquetes que se transmiten en un modo de conexión

estable con el resumidero. Un retardo extremo-a-extremo elevado puede ocasionar un retardo en el intercambio de los paquetes de control del traspaso de manera que el nodo salga del área de cobertura del su resumidero actual y no pueda completar el traspaso correctamente. Por su parte, un retardo extremo-a-extremo elevado puede ocasionar que el desempeño de la aplicación no sea adecuado para variables fisiológicas sensibles al retardo.

- Es necesario contar con un mecanismo de traspaso que sea eficiente al momento de realizar la disociación del resumidero actual y la asociación al nuevo resumidero. Es decir, realizar el proceso de traspaso con el menor intercambio de mensajes posible, pero garantizando que el traspaso se haga cuando sea necesario y de esta manera evitar el efecto ping-pong que tiene repercusiones en muchas de las métricas evaluadas en este trabajo.
- Los resultados del análisis factorial muestran los factores más relevantes que pudieran ser utilizados para el diseño de un nuevo mecanismo de traspaso que se ajuste a los requerimientos de la aplicación de telemonitoreo.

6.3 Trabajo futuro

Este trabajo permite conocer los factores que afectan el comportamiento y desempeño del mecanismo de traspaso con los elementos y procesos que define el estándar IEEE 802.15.4. Este análisis permite funcionar como una guía para el diseño de un mecanismo de traspaso que se ajuste a los requerimientos de calidad de servicio de una aplicación de telemonitoreo. Con el diseño de un nuevo mecanismo de traspaso se pueden obtener mejores métricas de acuerdo con la arquitectura de la red y esto permitiría contar con una aplicación de telemonitoreo más robusta ante la movilidad, cantidad de usuarios y tasas de datos en ella. Al contar con estos elementos, se puede brindar mejores servicios de salud como los mencionados en el capítulo 1 (monitoreo continuo en hospitales y casas de asistencia), beneficiando a la población adulta y a los pacientes que debido a enfermedades crónicas pueden recurrir dentro de los hospitales. Además, un sistema que garantice el cumplimiento de los requerimientos de la aplicación en términos de calidad de servicio y calidad de experiencia permite que tanto el paciente como el médico adopten con más seguridad y facilidad la tecnología.

En esta sección se enlistan los puntos en los que este trabajo de investigación se puede extender y las áreas de oportunidades relacionadas:

- Diseño de un escenario de telemonitoreo que contemple distintos factores para comparar los resultados con el propuesto en este trabajo. Por ejemplo, el uso de otras tecnologías, modos de operación o arquitecturas de red y modelos de movilidad.
- Replicar el escenario propuesto en un laboratorio que permita tener las condiciones apropiadas para obtener resultados que puedan compararse con los de la simulación.
- Ampliar el análisis a otras métricas como el consumo de potencia y uso de recursos computacionales.
- El esquema de empaquetamiento utilizado tiene un impacto directo en el desempeño de la red. Por tal motivo se vuelve necesario hacer una evaluación de los requerimientos de la aplicación en términos de retardo de la información, de manera que se puedan empaquetar la mayor cantidad de muestras posibles con la finalidad de generar una menor contención por el canal y mitigar las colisiones y paquetes descartados.
- Utilizar el escenario propuesto para evaluar diversos mecanismos de traspasos que se encuentran en la literatura y determinar cual tiene un mejor rendimiento para aplicaciones de telemonitoreo hospitalario.
- Diseño e implementación de un nuevo mecanismo de traspaso que contemple los requerimientos de calidad de servicio para un telemonitoreo hospitalario.

Literatura citada

- Adibi, S. (2012). Link Technologies and BlackBerry Mobile Health (mHealth) Solutions: A Review. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 16(4), 586–597. <http://doi.org/10.1109/TITB.2012.2191295>
- American Hospital Association. (2016). Telehealth: Helping Hospitals Deliver Cost-Effective Care. Issue Brief. 1-7 p.
- Bianchi, G. (2000). Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(3), 535–547. <http://doi.org/10.1109/49.840210>
- Bohannon, R. W. (1997). Comfortable and maximum walking speed of adults aged 20-79 years: Reference values and determinants. *Age and Ageing*, 26(1), 15–19. <http://doi.org/10.1093/ageing/26.1.15>
- Bradai, N., Fourati, L. C., & Kamoun, L. (2015). WBAN data scheduling and aggregation under WBAN/WLAN healthcare network. *Ad Hoc Networks*, 25, 251–262. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2014.10.017>
- Caldeira, J. M. L. P., Rodrigues, J. J. P. C., & Lorenz, P. (2012). Toward ubiquitous mobility solutions for body sensor networks on healthcare. *IEEE Communications Magazine*, 50(5), 108–115. <http://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6194390>
- Caldeira, J. M. L. P., Rodrigues, J. J. P. C., & Lorenz, P. (2013). Intra-Mobility Support Solutions for Healthcare Wireless Sensor Networks; Handover Issues. *IEEE Sensors Journal*, 13(11), 4339–4348. <http://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2267729>
- Caldeira, J. M. L. P., Rodrigues, J. J. P. C., Lorenz, P., & Ullah, S. (2015). Impact of sensor nodes scaling and velocity on handover mechanisms for healthcare wireless sensor networks with mobility support. *Computers in Industry*, 69, 92–104. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2014.09.002>
- Casillas Gaxiola, M.O. (2012). Diseño de una red híbrida de dos saltos para aplicaciones de redes de sensores en telemonitoreo y telemedicina. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 127pp.
- Casillas, M., Villarreal-Reyes, S., González, A. L., Martínez, E., & Pérez-Ramos, A. (2015). Design Guidelines for Wireless Sensor Network Architectures in mHealth Mobile Patient Monitoring Scenarios. In S. Adibi (Ed.), *Mobile Health: A Technology Road Map* (pp. 401–428). Cham: Springer International Publishing. http://doi.org/10.1007/978-3-319-12817-7_18
- Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60–67. <http://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743>
- Company-Bosch E. & Hartmann, E. (2003) ECG front-end design is simplified with microconverter. *Analog Dialogue*. 37(11): 1 - 5. <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/ecg-front-end-design-simplified.html>
- Contiki. Contiki: The open source operating system for the internet of things. Consultado el 20 de noviembre de 2016, de <http://www.contiki-os.org>

- Desimone, R., Brito, B. M., & Baston, J. (2015). Model of indoor signal propagation using log-normal shadowing. In 2015 Long Island Systems, Applications and Technology (pp. 1–4). <http://doi.org/10.1109/LISAT.2015.7160217>
- Dilmaghani, R. S., Bobarshad, H., Ghavami, M., Choobkar, S., & Wolfe, C. (2011). Wireless Sensor Networks for Monitoring Physiological Signals of Multiple Patients. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 5(4), 347–356. <http://doi.org/10.1109/TBCAS.2011.2114661>
- Dishongh, T. J., & McGrath, M. (2010). *Wireless sensor networks for healthcare applications*. Artech House.
- Elhadj, H. Ben, Elias, J., Chaari, L., & Kamoun, L. (2016). A Priority based Cross Layer Routing Protocol for healthcare applications. *Ad Hoc Networks*, 42, 1–18. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2015.10.007>
- Fogue, M., Garrido, P., Martinez, F. J., Cano, J.-C., Calafate, C. T., & Manzoni, P. (2013). Identifying the key factors affecting warning message dissemination in VANET real urban scenarios. *Sensors (Basel)*, 13(4), 5220–5250. <http://doi.org/10.3390/s130405220>
- Fotouhi, H., Zuniga, M., Alves, M., Koubaa, A., & Marrón, P. (2012). Smart-HOP: A Reliable Handoff Mechanism for Mobile Wireless Sensor Networks. In G. Pietro Picco & W. Heinzelman (Eds.), *Wireless Sensor Networks: 9th European Conference, EWSN 2012, Trento, Italy, February 15-17, 2012. Proceedings* (pp. 131–146). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. http://doi.org/10.1007/978-3-642-28169-3_9
- Ghaleb, S. M., Subramaniam, S., Zukarnain, Z. A., & Muhammed, A. (2016). Mobility management for IoT: a survey. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016(1), 165. <http://doi.org/10.1186/s13638-016-0659-4>
- Gohar, M., Choi, J. G., Koh, S. J., Naseer, K., & Jabbar, S. (2015). Distributed Mobility Management in 6LoWPAN-Based Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015. <http://doi.org/10.1155/2015/620240>
- González, L., Galavíz-Mosqueda, A., Villarreal-Reyes, S., Magana, R., Rivera, R., Casillas, M., & Villasenor, L. (2014). Current Situation and Challenges for mHealth in the Latin America Region. In *mHealth Multidisciplinary Verticals* (pp. 413–432). <http://doi.org/10.1201/b17724-24>
- González-Valenzuela, S., Chen, M., & Leung, V. C. M. (2011). Mobility Support for Health Monitoring at Home Using Wearable Sensors. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 15(4), 539–549. <http://doi.org/10.1109/TITB.2010.2104326>
- Gregorio, L. (2010). LOBIN : E-Textile and Wireless-Sensor-Network- Based Platform for Healthcare Monitoring in Future Hospital Environments, 14(6), 1446–1458.
- Handayani, P., Mubarokah, L., & Hendratoro, G. (2015). Pathloss and shadowing characteristics in indoor environment at 2.4 GHz band. In 2015 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA) (pp. 423–428). <http://doi.org/10.1109/ISITIA.2015.7220018>
- Henderson, C., Knapp, M., Fernández, J.-L., Beecham, J., Hirani, S. P., Cartwright, M., ... Newman, S. P. (2013). Cost effectiveness of telehealth for patients with long term conditions (Whole Systems Demonstrator telehealth questionnaire study): nested economic evaluation in a pragmatic, cluster randomised controlled trial. *BMJ*, 346. <http://doi.org/10.1136/bmj.f1035>

- Hiremath, S., Yang, G., & Mankodiya, K. (2015). Wearable Internet of Things: Concept, architectural components and promises for person-centered healthcare. Proceedings of the 2014 4th International Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare - "Transforming Healthcare Through Innovations in Mobile and Wireless Technologies", MOBIHEALTH 2014, 304–307. <http://doi.org/10.1109/MOBIHEALTH.2014.7015971>
- Hussain, F. B., & Pyun, J.-Y. (2013). Coordinator Discovery and Association in Beacon-Enabled IEEE 802.15.4 Network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013(10), 1–11. <http://doi.org/10.1155/2013/635234>
- IEEE Standards Association. (2005) IEEE Std 802.15.1-2005 – Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs). 600 p.
- IEEE Standards Association. (2011). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006), 1–314. <http://doi.org/10.1109/IEEESTD.2011.6012487>
- INET Framework. An open-source OMNeT++ model suite for wired, wireless and mobile networks. INET evolves via feedback and contributions from the user community. Consultado el 10 de enero del 2017, de <https://inet.omnetpp.org/>
- Khan, P., Hussain, A., & Kwak, K. S. (2009). Medical Applications of Wireless Body Area Networks. *Int. J. Digital Content Technol. Appli*, 3(3), 185–193. <http://doi.org/10.4156/jdcta.vol3.issue3.23>
- Khan, P., Ullah, N., Ullah, S., & Kwak, K. S. (2011). Seamless Interworking Architecture for WBAN in Heterogeneous Wireless Networks with QoS Guarantees. *Journal of Medical Systems*, 35(5), 1313–1321. <http://doi.org/10.1007/s10916-011-9756-4>
- Khanafer, M., Guennoun, M., & Mouftah, H. T. (2014). A Survey of Beacon-Enabled IEEE 802.15.4 MAC Protocols in Wireless Sensor Networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 16(2), 856–876. <http://doi.org/10.1109/SURV.2013.112613.00094>
- Latré, B., Braem, B., Moerman, I., Blondia, C., & Demeester, P. (2011). A survey on wireless body area networks. *Wireless Networks*, 17(1), 1–18. <http://doi.org/10.1007/s11276-010-0252-4>
- Law, A. M., Kelton, W. D., & Kelton, W. D. (1991). *Simulation modeling and analysis* (Vol. 2). New York: McGraw-Hill.
- Libelium. Waspote. Consultado el 25 de enero de 2017, de <http://www.libelium.com/products/waspote/>
- Mikhaylov, K., Plevritakis, N., & Tervonen, J. (2013). Performance Analysis and Comparison of Bluetooth Low Energy with IEEE 802.15.4 and SimpliciTI. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2(3), 589–613. <http://doi.org/10.3390/jsan2030589>
- Misra, S., Mahapatro, J., Mahadevappa, M., & Islam, N. (2015). Random room mobility model and extra-wireless body area network communication in hospital buildings. *IET Networks*, 4(1), 54–64. <http://doi.org/10.1049/iet-net.2014.0009>

- MiXiM. 2011. MiXiM project (mixed simulator) is a simulation framework for wireless and mobile networks using the OMNeT++ simulation engine. Consultado el 12 de enero de 2017, de <http://mixim.sourceforge.net/>
- Nechayev, Y., Hu, Z. H., & Hall, P. (2010). Fading of the transmission channel between two wireless body area networks in an office at 2.45 GHz and 5.8 GHz. In 2010 Loughborough Antennas Propagation Conference (pp. 489–492). <http://doi.org/10.1109/LAPC.2010.5666196>
- OMNeT++ Discrete Event Simulator. (2017). OMNeT++ is an extensible, modular, component-based C++ simulation library and framework, primarily for building network simulators. Consultado el 15 de marzo de 2017, de <https://omnetpp.org/>
- Papadopoulos, G. Z., Kotsiou, V., Gallais, A., Chatzimisios, P., & Noël, T. (2015). Optimizing the handover delay in mobile WSNs. In Internet of Things (WF-IoT), 2015 IEEE 2nd World Forum on (pp. 210–215). <http://doi.org/10.1109/WF-IoT.2015.7389054>
- Petäjäjärvi, J., & Karvonen, H. (2011). Soft handover method for mobile wireless sensor networks based on 6LoWPAN. In 2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS) (pp. 1–6). <http://doi.org/10.1109/DCOSS.2011.5982208>
- Pollin, S., Ergen, M., Ergen, S. C., Bougard, B., Perre, L. V. Der, Moerman, I., ... Catthoor, F. (2008). Performance Analysis of Slotted Carrier Sense IEEE 802.15.4 Medium Access Layer. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(9), 3359–3371. <http://doi.org/10.1109/TWC.2008.060057>
- Salayma, M., & Mardini, W. (2013). Optimal Beacon and Superframe Orders in WSNs. ... 2013, The Fifth ..., (1), 49–55. Retrieved from http://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=future_computing_2013_2_40_30077
- Silow-Carroll, S., Edwards, J. N., & Rodin, D. (2012). Using electronic health records to improve quality and efficiency: the experiences of leading hospitals. *Issue Brief (Commonw Fund)*, 17, 1-40.
- Silva, R., Silva, J. S., & Boavida, F. (2012). A proposal for proxy-based mobility in WSNs. *Computer Communications*, 35(10), 1200–1216. <http://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.03.005>
- Spanó, E., Pascoli, S. Di, & Iannaccone, G. (2016). Low-Power Wearable ECG Monitoring System for Multiple-Patient Remote Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 16(13), 5452–5462. <http://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2564995>
- Sthapit, P., & Pyun, J. Y. (2014). Handover strategies in beacon-enabled mobile sensor network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014. <http://doi.org/10.1155/2014/186402>
- Suhonen, J., Kohvakka, M., Kaseva, V., Hämäläinen, T. D., & Hännikäinen, M. (2012). Low-Power Wireless sensor networks. Springer. Springer US. <http://doi.org/10.1007/978-1-4614-6381-8>
- Teo, K. H., Subramaniam, S., & Sinniah, G. R. (2015). Node Mobility Support Between Multi-hop 6LoWPAN Networks Based on Proxy Mobile IPv6. *Wireless Personal Communications*, 85(3), 959–986. <http://doi.org/10.1007/s11277-015-2820-5>
- Texas Instruments. (2017). SimpleLink™ Bluetooth low energy/Multi-standard SensorTag. Consultado el 25 de enero de 2017, de <http://www.ti.com/tool/cc2650stk>

- Touati, F., & Tabish, R. (2013). U-Healthcare System: State-of-the-Art Review and Challenges. *Journal of Medical Systems*, 37(3), 9949. <http://doi.org/10.1007/s10916-013-9949-0>
- Varga, A., & Hornig, R. (2008). An Overview of the OMNeT++ Simulation Environment. In *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops* (p. 60:1--60:10). ICST, Brussels, Belgium, Belgium: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering). Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1416222.1416290>
- Veins Vehicles in Network Simulation. The open source vehicular network simulation framework. Consultado el 25 de enero del 2017, de <http://veins.car2x.org/>
- Wang, X. (2016). A Mobility Frame for 6LoWPAN WSN. *IEEE Sensors Journal*, 16(8), 2755–2762. <http://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2514411>
- Welch Allyn. (2014). Telemetry Monitoring On The Medical/Surgical Floor. Consultado el 28 de marzo de 2017, de <https://www.welchallyn.com/content/dam/welchallyn/documents/upload-docs/Product-Literature/Brochure/MC11587%20Telemetry%20MedSurg.pdf>

Anexo A

Tabla. Combinaciones de los valores de los factores.

Experimento	A	B	C	D	E	F	y
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	y1
2	-1	-1	-1	-1	-1	1	y2
3	-1	-1	-1	-1	1	-1	y3
4	-1	-1	-1	-1	1	1	y4
5	-1	-1	-1	1	-1	-1	y5
6	-1	-1	-1	1	-1	1	y6
7	-1	-1	-1	1	1	-1	y7
8	-1	-1	-1	1	1	1	y8
9	-1	-1	1	-1	-1	-1	y9
10	-1	-1	1	-1	-1	1	y10
11	-1	-1	1	-1	1	-1	y11
12	-1	-1	1	-1	1	1	y12
13	-1	-1	1	1	-1	-1	y13
14	-1	-1	1	1	-1	1	y14
15	-1	-1	1	1	1	-1	y15
16	-1	-1	1	1	1	1	y16
17	-1	1	-1	-1	-1	-1	y17
18	-1	1	-1	-1	-1	1	y18
19	-1	1	-1	-1	1	-1	y19
20	-1	1	-1	-1	1	1	y20
21	-1	1	-1	1	-1	-1	y21
22	-1	1	-1	1	-1	1	y22
23	-1	1	-1	1	1	-1	y23
24	-1	1	-1	1	1	1	y24
25	-1	1	1	-1	-1	-1	y25
26	-1	1	1	-1	-1	1	y26
27	-1	1	1	-1	1	-1	y27
28	-1	1	1	-1	1	1	y28
29	-1	1	1	1	-1	-1	y29
30	-1	1	1	1	-1	1	y30
31	-1	1	1	1	1	-1	y31
32	-1	1	1	1	1	1	y32
33	1	-1	-1	-1	-1	-1	y33
34	1	-1	-1	-1	-1	1	y34
35	1	-1	-1	-1	1	-1	y35
36	1	-1	-1	-1	1	1	y36

37	1	-1	-1	1	-1	-1	y37
38	1	-1	-1	1	-1	1	y38
39	1	-1	-1	1	1	-1	y39
40	1	-1	-1	1	1	1	y40
41	1	-1	1	-1	-1	-1	y41
42	1	-1	1	-1	-1	1	y42
43	1	-1	1	-1	1	-1	y43
44	1	-1	1	-1	1	1	y44
45	1	-1	1	1	-1	-1	y45
46	1	-1	1	1	-1	1	y46
47	1	-1	1	1	1	-1	y47
48	1	-1	1	1	1	1	y48
49	1	1	-1	-1	-1	-1	y49
50	1	1	-1	-1	-1	1	y50
51	1	1	-1	-1	1	-1	y51
52	1	1	-1	-1	1	1	y52
53	1	1	-1	1	-1	-1	y53
54	1	1	-1	1	-1	1	y54
55	1	1	-1	1	1	-1	y55
56	1	1	-1	1	1	1	y56
57	1	1	1	-1	-1	-1	y57
58	1	1	1	-1	-1	1	y58
59	1	1	1	-1	1	-1	y59
60	1	1	1	-1	1	1	y60
61	1	1	1	1	-1	-1	y61
62	1	1	1	1	-1	1	y62
63	1	1	1	1	1	-1	y63
64	1	1	1	1	1	1	y64

Anexo B

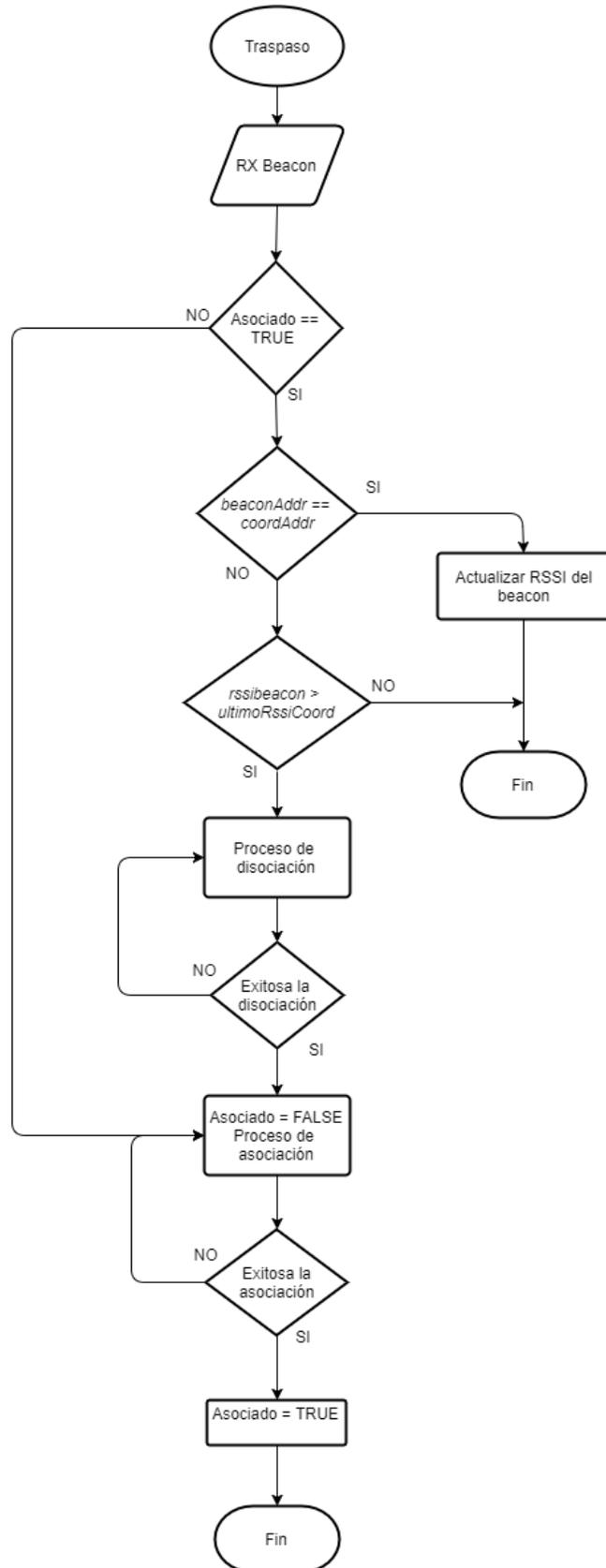


Figura. Diagrama de flujo del mecanismo de traspaso.

Anexo C

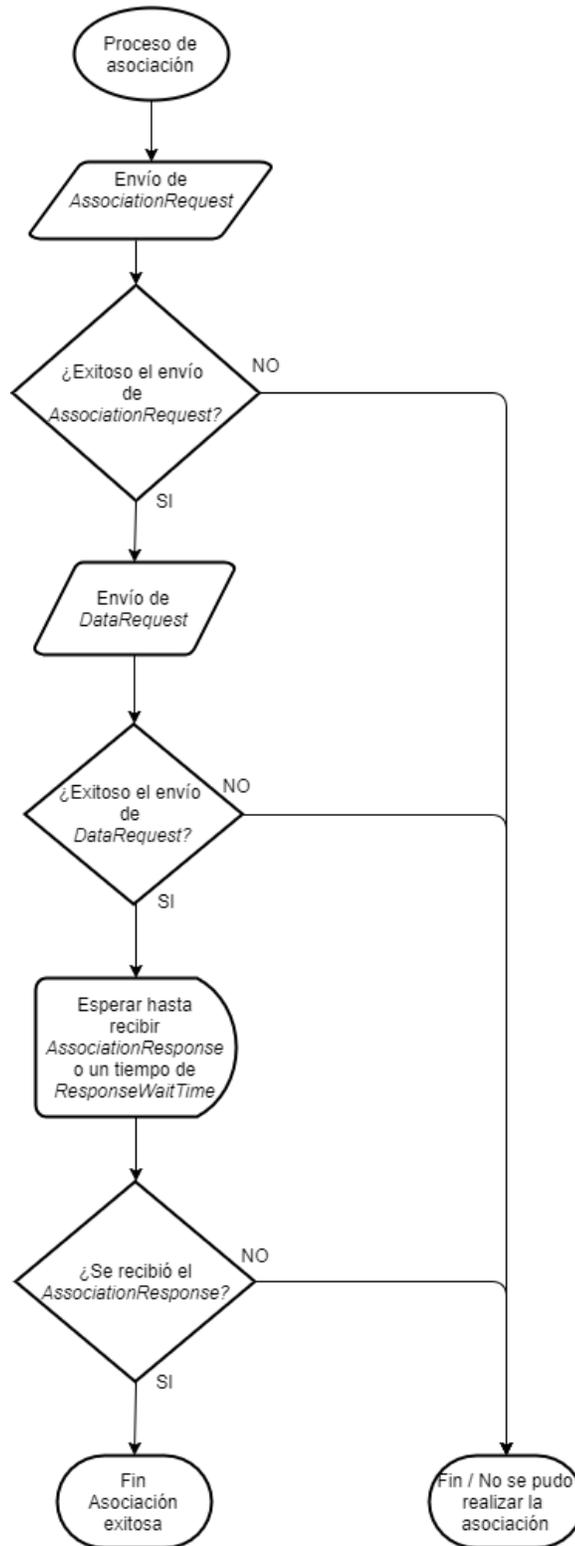


Figura. Diagrama de flujo del proceso de asociación.

Anexo D

Tabla. Resultados de las simulaciones para los 64 experimentos.

y	Retardo en el traspaso (s)	No. Traspasos	No. Traspasos Fallidos	Perdida de paquetes	E2E delay (s)	E2E delay encolados (s)
y1	0.0414	1	0	0.0752	0.0042	0.0001
y2	0.0388	1	22	0.0276	0.0041	1.86E-04
y3	15.2093	131.9676	1820	0.1247	0.0044	0.0229
y4	5.7763	41.5512	1000	0.2645	0.0044	0.0113
y5	0.0191	1	0	9.46E-04	3.90E-03	0.00E+00
y6	0.0191	1	2	7.46E-04	3.90E-03	0.00E+00
y7	4.1708	3.7653	2	0.0382	0.0039	0.0168
y8	1.3177	1.7462	1572	0.179	0.0042	0.0372
y9	0.0414	1	0	0.0802	0.0042	0.0001
y10	0.0383	1	24	0.0277	0.0041	1.43E-04
y11	6.842	67.6811	1363	0.119	0.0044	0.0076
y12	2.7588	23.0373	990	0.2881	0.0044	0.0059
y13	0.0191	1	0	0.0048	0.0039	0.00E+00
y14	0.0186	1	131	0.0129	0.0039	0.00E+00
y15	1.187	2.017	2	0.0447	0.0039	0.0062
y16	0.319	1.1523	2242	0.2415	0.0042	0.0129
y17	0.0506	1	0	0.0882	0.0042	0.0038
y18	0.039	1	19	0.0498	0.0041	2.11E-04
y19	15.2021	129.3468	1814	0.1342	0.0043	0.0346
y20	5.782	39.0193	1005	0.2803	0.0042	0.0129
y21	0.0192	1	0	2.17E-03	0.0039	0.0161
y22	0.0191	1	2	1.86E-03	0.0039	0.0139
y23	4.1395	3.6858	0	0.0451	0.0039	0.0356
y24	1.3564	1.7482	1463	0.194	0.004	0.0459
y25	0.0415	1	0	0.097	0.0042	0.004
y26	0.039	1	24	0.0357	0.0041	1.52E-04
y27	6.8066	66.296	1335	0.1304	0.0043	0.0155
y28	2.7521	22.3923	997	0.2989	0.0042	0.006
y29	0.0192	1	0	0.0073	0.0039	0.0165
y30	0.0185	1	160	0.0245	0.0039	0.014
y31	1.1858	2.0144	2	0.0578	0.0039	0.0258
y32	0.3159	1.1709	2160	0.2571	0.004	0.0267
y33	0.0411	1	0	0.1485	0.0078	0.0083
y34	0.0365	1	19	0.0298	0.0078	0.0099
y35	14.7801	122.9835	1735	0.1872	0.008	0.0892
y36	5.7238	47.9825	891	0.2721	0.0092	0.0913
y37	0.02	1	0	0.0024	0.0075	0.0025
y38	0.0199	1	4	8.46E-04	0.0075	0.0025
y39	4.0103	3.6411	2	0.0434	0.0075	0.0961
y40	1.3272	1.7249	1579	0.1831	0.0078	0.1515

y41	0.0404	1	0	0.1591	0.0078	0.0163
y42	0.0367	1	17	0.0296	0.0078	0.0088
y43	6.6224	63.2547	1305	0.2138	0.008	0.0557
y44	2.7338	24.3891	990	0.2769	0.0091	0.0638
y45	0.02	1	0	0.0054	0.0075	0.0025
y46	0.0199	1	153	0.0157	0.0075	0.0024
y47	1.1504	1.977	1	0.0755	0.0075	0.0478
y48	0.3197	1.1624	2279	0.2416	0.0076	0.0669
y49	0.1065	1	16	0.2351	0.011	0.1913
y50	0.0954	1	63	0.1174	0.0097	0.0468
y51	13.7955	60.0863	901	0.2902	0.0111	0.5165
y52	5.2946	24.4507	869	0.3644	0.0096	0.237
y53	0.0955	1	1	0.0885	0.0101	0.1628
y54	0.0807	1	146	0.0653	0.0093	0.1429
y55	3.4447	2.95	3	0.1178	0.0102	0.3081
y56	1.163	1.3042	1469	0.2498	0.0093	0.3221
y57	0.107	1	13	0.2184	0.0154	0.0996
y58	0.0892	1	47	0.1179	0.0097	0.0285
y59	6.2338	31.376	1244	0.366	0.0111	0.2579
y60	2.4234	12.5811	829	0.3893	0.0096	0.1785
y61	0.0988	1	1	0.1253	0.0102	0.1619
y62	0.0844	1	1203	0.1447	0.0094	0.1406
y63	0.9253	1.6584	3	0.1582	0.0102	0.2193
y64	0.4733	1.0471	2538	0.4851	0.0094	0.2115

Anexo E

Tabla. Resultados de la implementación para los 16 experimentos

y	Retardo en el traspaso (s)	No. Traspasos	No. Traspasos fallidos	Perdida de paquetes	Tiempo inter-arribo (s)	Tiempo inter-arribo cola (s)
y3	0.0109121	34.44	0	0.0208333	7.2162046	0
y4	0.0094092	31.5	1	0.0931818	8.4649695	0
y11	0.0370364	39.8	1	0.1403296	4.2849293	0
y12	0.0207672	15.88888889	1	0.1229230	3.5316450	11.81988
y19	0.0690378	49.5	2	0.2627976	6.8441810	12.16309
y20	0.0530041	57.5	4	0.24	4.6347602	0
y27	0.0122453	17.2	2	0.2	5.3976467	0
y28	0.0244412	13.8	3	0.2122222	8.5597807	0
y35	0.0072846	31	0	0.0968705	0.9144693	0
y36	0.0068010	29.6	1	0.1284526	0.1369226	0
y43	0.0332281	32.77	0	0.1139688	0.1401400	0
y44	0.0077946	28	1	0.1611958	0.1601525	0
y51	0.0206512	21.5	3	0.3908581	0.3247453	0.03019299
y52	0.0189431	10.33	5	0.4649666	0.3226257	0.02153576
y59	0.0261419	16.5	2	0.3882763	4.1150525	0.02238020
y60	0.0222082	11.75	3	0.4437775	0.1638874	0.02200042