

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



**Programa de Posgrado en Ciencias en Electrónica y
Telecomunicaciones**

**Diseño de un protocolo para la transmisión de variables
fisiológicas sobre redes heterogéneas con saltos múltiples**

Tesis

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

Presenta:

Erick Paul Calixto Sánchez

Ensenada, Baja California, México
2015

Tesis defendida por

Erick Paul Calixto Sánchez

y aprobada por el Comité

Dr. Salvador Villarreal Reyes
Codirector del Comité

Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda
Codirector del Comité

Dr. Miguel Ángel Alonso Arévalo
(miembro del comité)

Dr. Roberto Conte Galván
(miembro del comité)

Dr. Raúl Rivera Rodríguez
(miembro del comité)

Dra. Ana Isabel Martínez García
(miembro del comité)



Autoridades

Dr. Miguel Ángel Alonso Arévalo
Coordinador del Posgrado en Electrónica y
Telecomunicaciones

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de Posgrado

Erick Paul Calixto Sánchez © 2015

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el debido permiso del autor

Resumen de la tesis que presenta **Erick Paul Calixto Sánchez** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones

Diseño de un protocolo para la transmisión de variables fisiológicas sobre redes heterogéneas con saltos múltiples

Resumen elaborado por:

Erick Paul Calixto Sánchez

En los últimos años la importancia del cuidado de la salud ha tenido un crecimiento acelerado, provocando un gasto excesivo tanto a los pacientes como a las instituciones de salud pública y privada. La telemedicina representa una alternativa para satisfacer la alta demanda de servicios de salud, habilitando el acceso de servicios médicos a comunidades alejadas de los núcleos urbanos, ahorrando tiempo y dinero. Una de las principales áreas de la telemedicina es el monitoreo remoto de pacientes (MRP), el cual consiste en utilizar diferentes sensores y tecnologías para el monitoreo remoto del estado de salud de un paciente. Los escenarios de MRP modernos están compuestos por arquitecturas de red heterogéneas para transmitir la información correspondiente a las variables fisiológicas de los pacientes, una de las características principales de las redes heterogéneas es presentar diferentes capacidades (i. e. ancho de banda, retardo, protocolos de comunicación), debido a las diferentes tecnologías que las componen. Uno de los retos más importantes del MRP consiste el diseño de protocolos de transporte que permitan la transmisión de variables fisiológicas sobre redes heterogéneas garantizando la integridad de las señales a lo largo del enlace de comunicaciones.

En este trabajo de investigación se propone el diseño de un nuevo protocolo de transporte (RTPC) para la transmisión de variables fisiológicas sobre redes heterogéneas, así como también un tercer salto a la red híbrida propuesta en (Casillas, 2012) compuesto por Ethernet, el protocolo tiene como propósito reducir el retardo y la pérdida de paquetes en los tres saltos que componen red heterogénea. Se realiza una evaluación con la ayuda de una herramienta de simulación (OPNET) para observar el desempeño del protocolo sobre la red heterogénea. En los resultados de la evaluación se observan las ventajas ofrecidas por el nuevo protocolo de transporte propuesto en comparación con RTP.

Palabras clave: red heterogénea, telemedicina, MRP, Ethernet, RTPC, RTP, OPNET.

Abstract of the thesis presented by **Erick Paul Calixto Sánchez** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Telecommunications.

Design of a protocol for transmission of physiological variables over heterogeneous networks with multiple hops

Abstract by:

Erick Paul Calixto Sánchez

In recent years the importance of health care has had an accelerated growth, causing overspending both patients and institutions of public and private health. Telemedicine is an alternative to meet the high demand for health services, enabling doctors to access remote communities of the urban services, saving time and money. One of the main areas of telemedicine is remote patient monitoring (RPM), which consists of using different sensors and technologies for remote monitoring of the health status of a patient. Modern RPM consist of heterogeneous network architectures to transmit the information of the physiological variables of the patients, one of the main characteristics of heterogeneous networks is to present different capacities (i. e. bandwidth, delay, communications protocols) due to the different technologies that compose them. One of the most important challenges of the RPM is the design of transport protocols that allow the transmission of physiological variables on heterogeneous networks ensuring the integrity of the signals along the communications link.

In this thesis is proposed the design of a new transport protocol (RTPC) for transmitting physiological variables on heterogeneous networks as well as a third hop to the heterogeneous network proposed in (Casillas, 2012) composed by Ethernet the protocol aims to reduce the delay and packet loss in the three hops that make up heterogeneous network. An assessment is performed with the aid of a simulation tool (OPNET) to observe the performance of the protocol over heterogeneous network. In the evaluation results are observed the advantages offered by the new transport protocol proposed compared with RTP.

Keywords: heterogeneous network, telemedicine, RMP, Ethernet, RTPC, RTP, OPNET.

Dedicatorias

*A mi familia y amigos,
que siempre me han ayudado
a cumplir todas mis metas.*

Agradecimientos

A mis padres Mario Calixto y Rita Sánchez gracias por el apoyo que me han brindado y por los grandes esfuerzos que han realizado para hacer de mí una persona de bien.

A mi abuela Dominga Bobadilla, muchísimas gracias por sus consejos, bendiciones y por esas platicas largas que siempre me sacan una sonrisa.

A mis tíos: Rosalina Sánchez, Alberto Sánchez y Joaquín Sánchez gracias por inculcarme el valor del trabajo y su gran apoyo a lo largo de mi vida.

Un agradecimiento especial a mis abuelos María Sánchez, Rafael Calixto y Joaquín Sánchez que aunque ya no se encuentran conmigo siempre los tengo presentes.

A mis amigos José Piña y Raúl Martínez gracias por continuar con nuestra amistad, compartir excelentes momentos desde la prepa y a pesar de la distancia.

A mis compañeros: Genaro, Sergio, Gaspar (Chezpi), Ernesto, Rogelio, Roilhi. Rafael, Carlos, Giovanni, Gabriel y Anela, gracias por los momentos que convivimos juntos y brindarme su amistad.

A mis codirectores de tesis Dr. Salvador Villarreal y Dr. Alejandro Galaviz por brindarme su confianza y haberme guiado a lo largo de este trabajo de investigación. Agradezco también los miembros de mi comité de tesis por sus consejos y aportaciones que me ayudaron a desarrollar este trabajo de investigación.

Al grupo de trabajo ARTS conformado por: Manuel, Shiro, Enrique, Pedro, Christian y Edwin. Que con sus observaciones y críticas fortalecieron este trabajo de investigación.

Al CICESE por brindarme la oportunidad de alcanzar esta meta.

Al CONACyT por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

Tabla de contenido

	Página
Resumen español	i
Resumen ingles	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Lista de Figuras	viii
Lista de Tablas	xi
Capítulo 1	
Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.1.1 Redes heterogéneas	3
1.1.2 Transmisión de variables fisiológicas	4
1.2 Planteamiento del problema	7
1.3 Objetivo General.....	10
1.4 Objetivos particulares	11
1.5 Metodología de la investigación	11
1.6 Organización de la tesis	13
Capítulo 2	
Monitoreo remoto de variables fisiológicas	14
2.1 Introducción	14
2.2 Actividad eléctrica del corazón	15
2.3 Presión arterial	16
2.4 Oxígeno en la sangre	17
2.5 Señal de fonocardiograma.....	17
2.6 Discusión sobre las variables fisiológicas en el monitoreo remoto ..	19
Capítulo 3	
Arquitectura de red heterogénea	21
3.1 Introducción	21
3.2 Tecnologías de redes inalámbricas de área personal	22
3.2.1 Bluetooth low energy	23
3.2.1.1 Arquitectura	24
3.2.1.2 Capa física.....	24
3.2.1.3 Capa de enlace de datos.....	25

Tabla de contenido (continuación)

3.2.1.4	Caudal eficaz máximo	26
3.2.2	IEEE 802.15.4.....	27
3.2.2.1	Arquitectura	28
3.2.2.2	Capa física.....	28
3.2.2.3	Sub-capa MAC	29
3.2.2.4	Caudal eficaz máximo	31
3.3	Redes de área local.....	32
3.3.1	Ethernet.....	33
3.3.1.1	Tecnología y velocidad	33
	100 Mbit/s.....	33
3.3.1.2	Formato de trama Ethernet.....	34
3.4	Redes de área amplia.....	35
3.4.1	Clasificación.....	36
3.4.2	Internet	37
3.5	Red heterogénea propuesta	37
Capítulo 4	Transmisión de datos sobre redes heterogéneas	40
4.1	Introducción	40
4.2	IP	41
4.3	UDP	42
4.4	RTP	43
4.4.1	Estructura del encabezado	43
4.5	Transmisión sobre redes heterogéneas	44
4.6	Discusión acerca de los protocolos de red comúnmente utilizados.	47
Capítulo 5	Diseño de un nuevo protocolo de transporte sobre una arquitectura de red heterogénea.....	48
5.1	Introducción	48
5.2	RTP sobre arquitecturas heterogéneas	48
5.3	RTPC en el primer salto de la arquitectura heterogénea propuesta: Bluetooth Low Energy.....	51
5.4	RTPC en el segundo salto en la arquitectura heterogénea propuesta: IEEE 802.15.4.....	52
5.5	RTPC en el tercer salto en la arquitectura heterogénea propuesta: Ethernet	55

Tabla de contenido (continuación)

5.6	Conclusiones sobre el diseño de RTPC como un nuevo protocolo de transporte para redes heterogéneas	56
Capítulo 6	Evaluación del nuevo protocolo de transporte sobre la red heterogénea propuesta	60
6.1	Introducción	60
6.2	Metodología de evaluación	60
6.3	Evaluación de desempeño	63
6.3.1	Escenario 1	65
6.3.2	Escenario 2	74
6.4	Conclusiones sobre el desempeño del nuevo protocolo de transporte	79
Capítulo 7	Conclusiones y trabajo futuro	82
7.1	Introducción	82
7.2	Conclusiones	82
7.2.1	Sobre el diseño del nuevo protocolo de transporte	82
7.2.2	Sobre la evaluación desempeño del nuevo protocolo de transporte en la red heterogénea	84
7.3	Trabajo futuro	85
	Lista de referencias	87

Lista de figuras

Figura	Página
Figura 1 Dispositivo tipo puente	3
Figura 2 Comparación de las características de las tecnologías inalámbricas de área personal	5
Figura 3 Escenario de MRP propuesto por (Khan, Yuce, & Karami, 2008)	7
Figura 4 Red heterogénea multisaltos presentada en (Javaid, Yaqoob, Khan, Khan, Javaid, & Khan, 2013).....	8
Figura 5 Sistema de MRP propuesto en (Kang, Ryu, Hur, & Sha, 2013)	9
Figura 6 Electrocardiograma	15
Figura 7 Esfigmomanómetro digital	16
Figura 8 Oxímetro de pulso	17
Figura 9 Ocurrencia de los sonidos cardiacos dentro de un ciclo cardiaco (Echeverry, López, & López, 2007)	18
Figura 10 Red heterogénea genérica	21
Figura 11 Primeros dos saltos en la red heterogénea	23
Figura 12 Topología estrella para redes de Bluetooth Low Energy	24
Figura 13 Procesos de eventos de conexión en Bluetooth Low Energy. Anu (Anunciante), M (Master), S (Slave). (SIG, 2010).....	25
Figura 14 Formato del paquete LLDU y PDU	26
Figura 15 Ejemplos de topología de red para IEEE 802.15.4.....	28
Figura 16 Formato MPDU.....	31
Figura 17 Formato de trama Ethernet	34
Figura 18 Red heterogénea propuesta.....	38
Figura 19 Arquitectura de red basada en el modelo OSI.....	40
Figura 20 MTU de IP	42
Figura 21 Encabezado UDP	43

Lista de figuras (continuación)

Figura 22 Encabezado RTP	43
Figura 23 Proceso de transmisión de variables fisiológicas sobre redes heterogéneas	45
Figura 24 Paquete de datos a través de la red heterogénea propuesta si se utiliza RTP como protocolo de transporte	49
Figura 25 Ejemplo de recolección de variables fisiológicas en el puente BLE/IEEE 802.15.4, electrocardiograma (ECG), presión en la sangre (PES), oxígeno en la sangre (OXS)	49
Figura 26 Empaquetado de las muestras en el puente BLE/IEEE 802.15.4	50
Figura 27 Primer salto	51
Figura 28 Empaquetado en cada sensor BLE	51
Figura 29 Segundo salto	53
Figura 30 Proceso de empaquetado en el dispositivo puente	53
Figura 31 Paquete de audio cardíaco	54
Figura 32 Empaquetado en el segundo salto	54
Figura 33 Tercer salto	55
Figura 34 Empaquetado en el tercer salto	55
Figura 35 Proceso de transmisión de variables fisiológicas sobre redes heterogéneas utilizando RTPC como protocolo de transporte	57
Figura 36 Paquete de datos a través de la red heterogénea propuesta utilizando RTPC	58
Figura 37 Saltos en la red heterogénea propuesta	61
Figura 38 Escenario de evaluación del tercer salto	63
Figura 39 Esquema de evaluación del escenario 1 (Segundo salto)	65
Figura 40 Porcentaje de paquetes descartados por el algoritmo de backoff	66
Figura 41 Porcentaje de paquetes perdidos por colisiones	67
Figura 42 Ejemplo de cálculo del tiempo de interarribo de paquetes	68

Lista de figuras (continuación)

Figura 43 Porcentaje de paquetes descartados por el algoritmo de backoff al transmitir audio cardiaco	69
Figura 44 Porcentaje de paquetes perdidos por colisiones al transmitir audio cardiaco.....	69
Figura 45 Esquema de evaluación del tercer salto	70
Figura 46 Retardo total.....	71
Figura 47 Porcentaje de paquetes perdidos totales	71
Figura 48 Troughput total	72
Figura 49 Retardo total al transmitir audio cardiaco	73
Figura 50 Porcentaje de paquetes perdidos totales al transmitir audio cardiaco	73
Figura 51 Troughput total al transmitir audio cardiaco.....	74
Figura 52 Esquema de evaluación del escenario 2 (Segundo salto).....	75
Figura 53 Esquema de evaluación del tercer salto.....	75
Figura 54 Retardo total.....	76
Figura 55 Porcentaje de paquetes perdidos totales	76
Figura 56 Troughput total	77
Figura 57 Retardo total al transmitir audio cardiaco	78
Figura 58 Porcentaje de paquetes perdidos totales al transmitir audio cardiaco	78
Figura 59 Troughput total al transmitir audio cardiaco.....	79

Lista de tablas

Tabla	Página
Tabla 1 Duración y contenido frecuencial de los principales ruidos cardiacos. Tomado de (Castorena, 2012)	18
Tabla 2 Características de transmisión de las variables fisiológicas (Casillas, 2012).....	19
Tabla 3 Caudal eficaz máximo para el tráfico simétrico y asimétrico en Bluetooth Low Energy	27
Tabla 4 Bandas de frecuencia y parámetros de transmisión para IEEE 802.15.4	29
Tabla 5 Caudal eficaz máximo en IEEE 802.15.4 para diferentes escenarios	32
Tabla 6 Los tipos más comunes de cableado Ethernet.....	33
Tabla 7 Características principales de cada salto en la red	62
Tabla 8 Tamaños de paquetes en el segundo salto	62
Tabla 9 Tamaños de paquetes en el tercer salto	63
Tabla 10 Cama de pruebas	66
Tabla 11 Cama de pruebas	74

Capítulo 1 Introducción

1.1 Antecedentes

Los sistemas de salud (SS) de la mayoría de los países en vías de desarrollo enfrentan retos importantes para brindar acceso efectivo y oportuno a la población (Wulf, 2014). Por ejemplo, en México existen principalmente dos SS: el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) y el Seguro popular, con más de 50 millones de derechohabientes cada uno (Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, 2014). Esto impone problemáticas importantes a dichos SS para satisfacer la demanda de recursos humanos, financieros y tecnológicos necesarios para dar atención médica a todos sus usuarios (Nigenda-López, Juárez-Ramírez, Ruiz-Larios, & Herrera, 2013).

Por otro lado, en los últimos años el perfil epidemiológico de la población en México (y en Latinoamérica) ha sufrido una transición hacia las enfermedades crónico-degenerativas. Las cuales requieren acciones de salud periódicas, provocando que el volumen de pacientes que requieren atención haya ido en aumento (Dantés, Sesma, Becerril, Knaul, Arreola, & Frenk, 2011)

Debido lo anterior, es necesario buscar alternativas de atención que permitan mejorar el acceso y la calidad de los servicios ofrecidos por los SS, así como el uso de los recursos (OPS, 2009). En este contexto, el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) en los SS puede ayudar a responder a esta demanda creciente por servicios de salud eficientes (Hernández, Sánchez, Sandoval, Ramírez, & Gómez., 2010).

Particularmente, la telemedicina representa una alternativa a los servicios tradicionales que permite aumentar la cobertura y accesibilidad de los SS con aplicaciones como tele-consulta, tele-monitoreo y tele-educación.

La telemedicina se define como “el uso de las TICs para apoyar el cuidado de la salud cuando la distancia separa a los participantes” (Rooney, 1999). En la actualidad, se

puede concebir a la telemedicina como una área multidisciplinaria que combina diferentes saberes, capacidades y tecnologías para llevar a cabo sus funciones (Hernández, Sánchez, Sandoval, Ramírez, & Gómez., 2010).

En los últimos años ha existido un gran interés en el desarrollo de tecnología enfocada al área de telemedicina. Los escenarios de aplicación de este tipo de tecnología son múltiples, incluyendo desde el cuidado preventivo en hogares de ancianos hasta pre-diagnósticos remotos en casos de emergencia (Ludwig, y otros, 2012).

Uno de los servicios más importantes que surge a partir de la telemedicina es el tele-monitoreo o monitoreo remoto de pacientes (MRP). El MRP consiste utilizar las TICs para monitorizar de manera periódica las variables fisiológicas de los pacientes para determinar su estado físico (Giger, y otros, 2015).

En el MRP, se prevé que el flujo de información atravesará diferentes redes de comunicaciones que ofrecen capacidades heterogéneas en términos de prestaciones de la red (anchos de banda, calidad de servicio, latencia) y topología (Sneha & Varshney, 2013). Adicionalmente, se espera que un sistema de MRP incluya flujos de información de diversas fuentes como audio, video y señales biométricas. Las cuales tendrán diferentes requerimientos en términos de las prestaciones ofrecidas por las redes de telecomunicaciones (Casillas, 2012).

Debido a lo anterior, entre los retos más relevantes para el despliegue exitoso de sistemas de MRP está el diseño de protocolos de transporte. Esto para permitir la transmisión eficiente de las variables fisiológicas sobre redes heterogéneas. El diseño de un protocolo de transporte para redes heterogéneas no es trivial, ya que se requiere que el protocolo garantice la integridad de la señal sobre todo el enlace de comunicaciones. Para lo cual es posible que sea necesario diseñar mecanismos (ej. códigos correctores de errores y de retransmisión de datos) especialmente para este tipo de redes.

1.1.1 Redes heterogéneas

Una red heterogénea es la que está compuesta por diferentes tecnologías (saltos) y protocolos de comunicaciones para llevar a cabo la transmisión de información desde la fuente hasta el destino. Para lograr interconectar los diferentes protocolos de enlace de datos de las tecnologías que conforman a una red heterogénea son necesarios dispositivos llamados puentes (Ver Figura 1). Los puentes ajustan el tamaño y encabezados del paquete proveniente de un segmento (ej. S_1) para que cumpla con el formato requerido por el siguiente segmento (ej. S_2) de la red heterogénea.

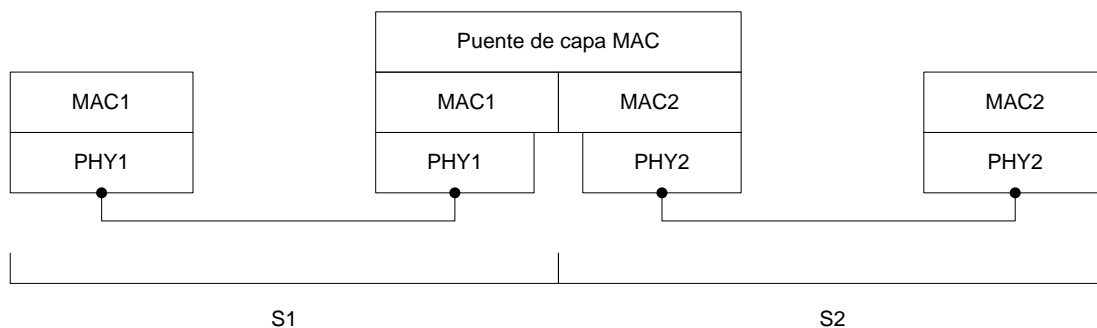


Figura 1 Dispositivo tipo puente

Es importante resaltar que comúnmente la tasa de transferencia (TT) de los diferentes saltos (ej. S_1 y S_2) de la red heterogénea es distinto. Por lo tanto, si la TT S_2 es mayor que el del segmento del que proviene el paquete (S_1), en el dispositivo puente se debe tomar la decisión de esperar varios paquetes o enviarlos conforme arriban al puente. En el caso contrario, el paquete debe ser fragmentado para ser enviado hacia S_2 .

De lo anterior se puede establecer que la interconexión de los distintos saltos de una red heterogénea en escenarios de MRP no es nada trivial. Esto debido a que se tienen que analizar y garantizar los parámetros de calidad de servicio (i. e. retardo, pérdida de paquetes y caudal eficaz) para cada una de las variables fisiológicas a transmitir considerando el paso de la información por los distintos saltos de la red.

La arquitectura de red heterogénea para los sistemas de MRP modernos está compuesta por lo general de tres saltos (Choi, Krause , Seo, Capitan, & Chung, 2006): 1) una WBAN/WPAN que será la encargada de realizar la medición de las variables fisiológicas; 2) una LAN/WLAN que amplíe el rango de transmisión de la WBAN/WPAN; y 3) la transmisión de la información recolectada hacia el resumidero de información remoto donde se encuentra el médico.

Este trabajo de tesis está basado también en un arquitectura de red heterogénea de tres saltos. Para los primeros dos segmentos se considerará el trabajo realizado en (Casillas, 2012). Esto es, el primer salto corresponde a una red inalámbrica de área corporal (WBAN) basada en Bluetooth Low Energy (BLE), encargada de la medición de las variables fisiológicas. Utilizando un dispositivo tipo puente se conectó como segundo salto una red inalámbrica de área personal (WPAN) basada en IEEE 802.15.4 para darle libertad de movimiento al paciente.

Para transmitir las variables fisiológicas recolectadas y de esa manera completar el escenario de MRP, en este trabajo de tesis se propone utilizar el estándar Ethernet. Esto debido a sus prestaciones en términos de caudal eficaz, velocidad y aceptación en el mercado.

1.1.2 Transmisión de variables fisiológicas

La parte medular de los escenarios de MRP es la transmisión de variables fisiológicas debido a que son indispensables para determinar es estado de salud de un paciente. Se debe hacer notar que la transmisión de este tipo de variables a través de los sistemas de comunicación actuales representa un reto importante. Esto debido a la cantidad de saltos que la información tiene que atravesar para llegar a su destino.

En el contexto de los sistemas de MRP el proceso de transmisión de las variables fisiológicas está dividido en 4 etapas principales que tiene una relación estrecha con la arquitectura de red: 1) la digitalización de los signos vitales medidos; 2) la recolección

de las muestras digitalizadas por una WBAN/WPAN; 3) conexión con una LAN/WLAN; y su 4) posterior transmisión a través del internet.

En este sentido, dos de los factores claves para la transmisión eficiente de las variables fisiológicas en los sistemas de MRP son las técnicas de digitalización y los protocolos de comunicación. Respecto la digitalización de las variables fisiológicas, actualmente existen varios fabricantes que han desarrollado diversas implementaciones digitales eficientes de equipo médico (e.g. Thinklabs, 3M, etc) usados en aplicaciones de MRP. .

En relación a los protocolos de comunicación para la transmisión de las variables fisiológicas, para las primeras capas de la arquitectura se ha propuesto el uso de tecnologías como ZigBee, Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi, Ethernet, etc. Cuyos estándares han sido ya definidos y son ampliamente aceptados por la comunidad científica, académica e industrial.

Estas tecnologías cuentan con diferentes capacidades respecto a cobertura, tasa de transferencia, consumo de energía, etc. (Ver Figura 2). Por lo que la selección de la tecnología depende de la aplicación específica. Particularmente, conocer las características de las señales a transmitir en términos del perfil de tráfico y su tolerancia al retardo es de suma importancia.

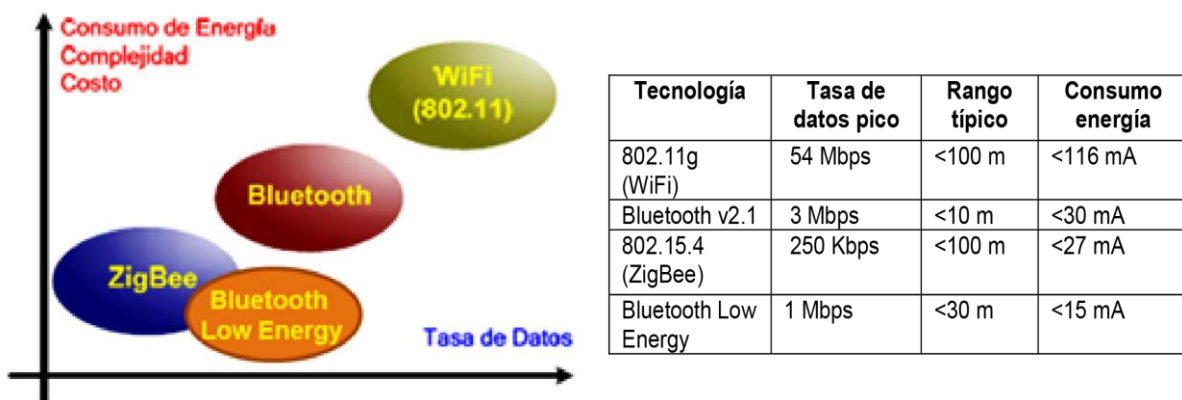


Figura 2 Comparación de las características de las tecnologías inalámbricas de área personal

Para realizar el envío de paquetes a través de internet existen principalmente dos protocolos de transporte actualmente, RTP (Real-Time Transport Protocol) y TCP

(Transmission Control Protocol). Debido a que TCP garantiza que los datos serán entregados sin errores y en el mismo orden en el que se transmitieron, es el más utilizado (Bentham, 2000). TCP se compone de tres etapas: establecimiento de conexión, transferencia de datos y fin de la conexión (Ahmed, Zaidi, & Ahmed, 2004, June). Para que TCP realice la gestión de la conexión (establecimiento y mantenimiento de la conexión, garantizar el orden de los paquetes, etc.) es necesario añadir información a los paquetes a enviar. Por lo tanto, la carga útil que se podrá enviar en cada paquete se verá disminuida. Además cabe la posibilidad de que al utilizar TCP en el escenario de MRP que se plantea en este trabajo exista un aumento en el retardo de los datos. Lo anterior debido a los encabezados que TCP agrega a cada paquete de datos.

Por otro lado RTP (Real-time Transport Protocol) es un protocolo no orientado a conexión utilizado para el envío de información en tiempo real a través de la red. RTP cuenta con dos características principales, el uso de un número de secuencia y un registro del tiempo en el que fue enviado cada paquete (Frederick, Jacobson, & Design, 2003).

Es importante mencionar que RTP no fue diseñado para ser utilizado en escenarios basados en una heterogénea. No obstante, RTP presenta características relevantes que pueden ser de utilidad en escenarios de MRP. Por ejemplo, es posible reducir la sobrecarga producida por el encabezado de RTP sin alterar sus características principales, debido a lo anterior, en este trabajo se propone el diseño de un nuevo protocolo de transporte específicamente para el envío de variables fisiológicas a través una red heterogénea basado en RTP.

Por lo anterior, se puede inferir que es posible utilizar RTP en escenarios de MRP. Sin embargo, utilizarlo de la manera convencional puede representar un bajo rendimiento en cuestión de pérdidas de paquetes y retardo.

1.2 Planteamiento del problema

Como se ha venido mencionando, en los escenarios de MRP modernos es necesario interconectar redes de datos que utilizan diferentes tecnologías y protocolos de comunicaciones (Scott, Mars, Scott, & Mars, 2015). En la mayoría de los estudios realizados se utiliza el protocolo de transporte TCP y en ocasiones RTP. Es necesario mencionar que tanto TCP como RTP no fueron diseñados para transmitir variables fisiológicas y tampoco para ser usados en arquitecturas que consideran la interconexión de diferentes tipos de tecnología de red. Por lo tanto, estos protocolos enfrentan retos importantes al utilizarlos en una arquitectura heterogénea. Lo cual se puede traducir en un bajo desempeño de la red en términos de pérdidas de paquetes y retardo.

Dentro de los estudios que consideran utilizar TCP como protocolo de transporte en escenarios de MRP se encuentra el trabajo reportado en (Khan, Yuce, & Karami, 2008). En dicho trabajo se propone utilizar una WBAN formada por dispositivos IEEE 802.15.4 para la recolección de las variables fisiológicas de los pacientes y que la misma se conecte a la infraestructura de red de un hospital para transmitir la información a través de internet tal y como se muestra en la Figura 3 tomada de (Khan, Yuce, & Karami, 2008).

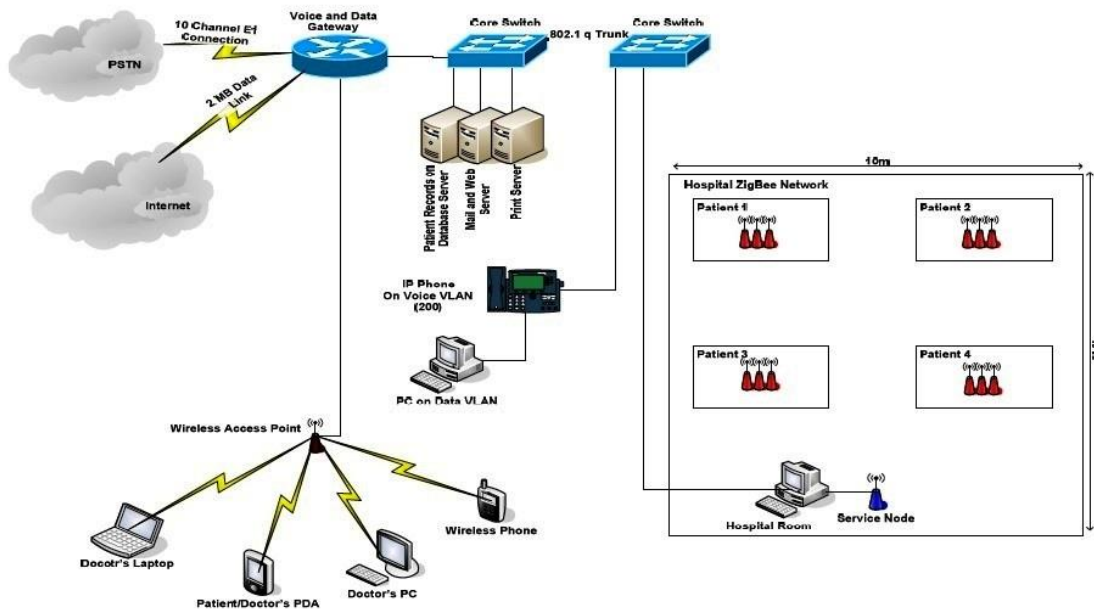


Figura 3 Escenario de MRP propuesto por (Khan, Yuce, & Karami, 2008)

En (Khan, Yuce, & Karami, 2008) se llega a la conclusión de que transmitir las variables fisiológicas de manera separada sería ineficiente por lo que se propone agregarlas todas a un paquete TCP para su posterior transmisión. En los resultados obtenidos se observa que los encabezados que TCP agrega a cada paquete de datos produce un aumento en el retardo durante la transmisión.

Otro de los trabajos relacionados en el que se propone la utilización del protocolo TCP en escenarios de MRP es el presentado en (Javaid, Yaqoob, Khan, Khan, Javaid, & Khan, 2013). En este trabajo se propone utilizar ZigBee para la red de nodos ubicados en el cuerpo del paciente (WBAN). Posteriormente se proponen tres opciones para conectar la WBAN a un resumidero de información remoto, i. e. (WiFi, WiMAX y UMTS) (Ver Figura 4 tomada de (Javaid, Yaqoob, Khan, Khan, Javaid, & Khan, 2013)).

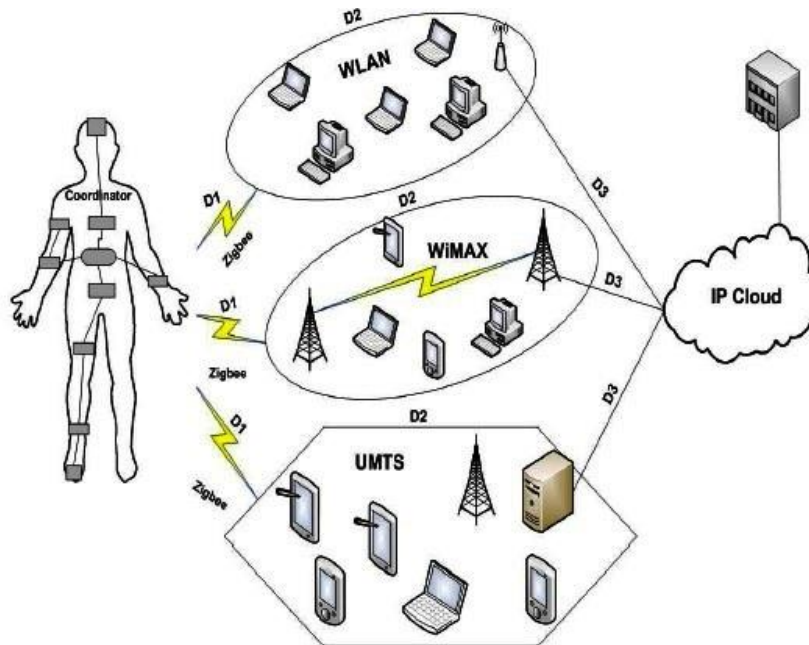


Figura 4 Red heterogénea multisaltos presentada en (Javaid, Yaqoob, Khan, Khan, Javaid, & Khan, 2013)

En (Javaid, Yaqoob, Khan, Khan, Javaid, & Khan, 2013) se propone la transmisión de una sola variable fisiológica. Este trabajo está enfocado a calcular el retardo para cada trayectoria, considerando como primer salto ZigBee, segundo cualquiera de las tres

tecnologías antes mencionadas y tercero a la nube IP. En (Javaid, Yaqoob, Khan, Khan, Javaid, & Khan, 2013) no mencionan el máximo número de usuarios que podría soportar el sistema, ni tampoco el desempeño de la red en cuestión de pérdida de paquetes. Debido a la falta de información, no es posible determinar si la arquitectura de red propuesta es lo suficientemente confiable para ser implementada en un escenario de MRP.

En (Kang, Ryu, Hur, & Sha, 2013) se propone un sistema inalámbrico para el MRP en tiempo real, con un sistema de corrección de errores FEC en la capa física de una arquitectura AADL (Architecture Analysis & Design Language). La arquitectura AADL es usada para la recolección de la señal de electrocardiograma (ECG) proveniente de un solo paciente. Dicha señal se transmite de manera inalámbrica a una estación base, para después ser transmitida vía alámbrica hacia la estación de monitoreo como se muestra en la Figura 5 tomada de (Kang, Ryu, Hur, & Sha, 2013).

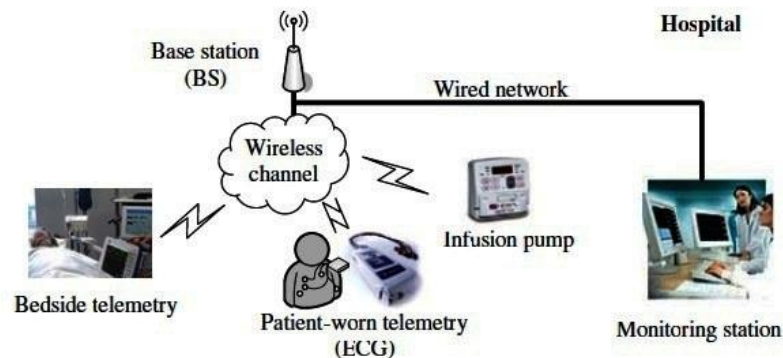


Figura 5 Sistema de MRP propuesto en (Kang, Ryu, Hur, & Sha, 2013)

En (Kang, Ryu, Hur, & Sha, 2013) concluyen que es necesario establecer un compromiso entre el grado de codificación de la señal, la energía total consumida y el retardo. Específicamente, el grado de codificación debe de ser suficiente para que la calidad de la señal no se vea alterada. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que si es demasiado alto el consumo de energía y el retardo serán mayores. Para la transmisión de la señal de ECG se utiliza el protocolo RTP desde el primer salto. Esto aumenta el retardo producido por la codificación debido a que el tamaño del paquete aumenta, al igual que el consumo de energía en los sensores.

De la revisión de la literatura se puede observar que en la mayoría de las propuestas revisadas no se brinda información acerca del porcentaje de paquetes perdidos. Por lo tanto no se puede garantizar la integridad de la señal a lo largo de las arquitecturas de red propuestas. Adicionalmente, las propuestas que utilizan TCP muestran un aumento en el retardo durante la transmisión de los datos.

Por otro lado, si bien RTP ofrece una reducción del retardo durante la transmisión respecto a TCP, existe la posibilidad de modificar el protocolo RTP. Reduciendo la cantidad de encabezados que RTP agrega a la carga útil se prevé que permitirá, además de reducciones en el retardo, una reducción en las pérdidas de paquetes. Por lo anterior, se puede establecer que el protocolo de transporte es sumamente relevante en el desempeño del sistema de MRP. Por lo tanto, un mejor diseño del protocolo de transporte, enfocado a sistemas de MRP puede tener un impacto significativo en el desempeño de la red y por ende del sistema de MRP.

En este contexto, este trabajo de investigación propone el diseño de un nuevo protocolo de transporte basado en RTP. Adicionalmente, aumentar el área de cobertura de la red heterogénea propuesta en (Casillas, 2012) con la propuesta de un tercer salto. De esta manera se busca explotar al máximo las capacidades ofrecidas por las tecnologías que componen a dicha red.

1.3 Objetivo General

Diseñar un protocolo de transporte que permita la transmisión de audio cardiaco y otras señales biomédicas sobre redes heterogéneas con saltos múltiples y tasas de datos bajas/medianas.

1.4 Objetivos particulares

- Definir la estrategia de empaquetamiento de las señales fisiológicas digitalizadas.
- Evaluar el desempeño del esquema de empaquetado en términos del retardo y el jitter.
- Evaluar el efecto del retardo, la latencia y el jitter sobre el desempeño del esquema red seleccionado
- Evaluar la transmisión de audio cardíaco y otras señales biomédicas como ECG, oximetría y presión arterial simultáneamente utilizando el protocolo propuesto bajo esquemas clásicos de calidad de servicio.

1.5 Metodología de la investigación

Definición de la información a transmitir

Se realizó un estudio mediante el cual se definieron las principales características de las variables fisiológicas a transmitir, en particular la tasa de datos, sensibilidad al retardo y tipo de tráfico

Estudio bibliográfico de los componentes del escenario de evaluación

Se realizó un estudio profundo de la literatura existente relacionado con protocolos de transporte en escenarios de MRP. Esto incluyó los trabajos de tesis anteriores realizadas dentro del grupo ARTS (Castorena, 2012) y (Casillas, 2012), las características principales de las tecnologías a utilizar y familiarización con la herramienta de simulación.

Diseño de la arquitectura de la red heterogénea base

Una vez elegidas las tecnologías a utilizar, se propuso una arquitectura de red heterogénea base y se simularon los primeros dos saltos en dicha red. A su vez se estudiaron los distintos protocolos de transporte utilizados para elegir el que tomaremos como base para el diseño del nuestro.

Diseño del protocolo de transporte que atienda el compromiso entre calidad – ahorro de ancho de banda.

Debido a las ventajas ofrecidas por RTP se tomó como base para diseñar a diseñar el nuevo protocolo de transporte tomando en cuenta los tamaños de paquetes permitidos por cada tecnología de la red heterogénea multisaltos.

Diseño del escenario de evaluación.

Se extrajeron los datos del tráfico provenientes de los primeros dos saltos en la red para después importarlos en el tercer salto y de esa manera tener implementada la red completa en el simulador.

Evaluar el protocolo en la red propuesta y analizar los resultados obtenidos.

Teniendo implementada la red en el simulador, se procedió a evaluar el protocolo propuesto sobre ella para después extraer las métricas obtenidas y obtener resultados a partir de ellas.

1.6 Organización de la tesis

En el Capítulo 2 se muestra el estudio de las variables fisiológicas consideradas en este trabajo, las cuales a su vez son las que se encuentran comúnmente en escenarios de monitoreo remoto de pacientes.

En el Capítulo 3 se muestran las principales características de las tecnologías de redes inalámbricas de área personal que componen los primeros dos saltos de la red heterogénea (Bluetooth Low Energy e IEEE 802.15.4) así como también el estándar de redes de área local más utilizado (Ethernet), los componentes y características de las redes de área amplia para transmitir información a través de internet y de esa manera tener una propuesta de red heterogénea para la transmisión de variables fisiológicas.

En el Capítulo 4 se describen los protocolos de transporte utilizados actualmente para la transmisión de datos en tiempo real, los cuales serán utilizados como base para realizar el nuestro.

En el Capítulo 5 se describe el diseño del protocolo de transporte propuesto para la transmisión de variables fisiológicas a través la red heterogénea multisaltos propuesta.

En el Capítulo 6 se muestra la evaluación del protocolo de transporte propuesto analizando la pérdida de paquetes y el retardo en cada uno de los saltos de la red heterogénea.

Por último, en el Capítulo 7 se muestran las conclusiones y el trabajo futuro que surgen de este trabajo de investigación.

Capítulo 2 Monitoreo remoto de variables fisiológicas

2.1 Introducción

La incorporación de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) a los sistemas de salud (SS) actuales puede ayudar a que estos sean más eficientes sin requerir mayor acceso a recursos humanos o financieros (Wang, Lin, & Chiang, 2014). Por ejemplo, se estima que la incorporación de las TICs a los sistemas de salud en México podría significar un ahorro de hasta 3.8 billones de dólares en los costos de monitoreo, tratamiento, diagnóstico y prevención de enfermedades (PWC, 2013).

Particularmente el área de convergencia de las TICs y los SS, conocida como telemedicina (Ekeland, Bowes, & Flottorp, 2010), puede brindar a los especialistas en el cuidado de la salud una manera eficiente para tratar enfermedades crónico-degenerativas como la diabetes, el cáncer y enfermedades respiratorias, las cuales representan las principales causas de muerte no solo en México si no en el mundo (OMS, 2008) (Núñez, 2013).

El monitoreo de las variables fisiológicas (ej. presión arterial, oxígeno en la sangre o ritmo cardíaco) es indispensable para determinar el estado físico de un paciente (Davis, Freeman, Kaye, Vuckovic, & Buckley, 2014). Debido a lo anterior particularmente en el contexto de la telemedicina, el monitoreo remoto de variables fisiológicas es una de las aplicaciones más importantes (Adibi, 2015).

Una parte esencial del proceso de transmisión de información sobre una red es determinar las características, en términos del tráfico ofrecido, de las señales que se deberán transmitir. Por lo tanto, en este capítulo se describen las variables fisiológicas comúnmente utilizadas en escenarios de monitoreo remoto para posteriormente determinar el perfil de tráfico de las señales a transmitir.

Aunque existen diversas variables fisiológicas generadas por los humanos, en este trabajo se consideran las más comúnmente utilizadas en la literatura (Murgia, y otros,

2012) (Kim, Oh, Cho, Lee, & Kim, 2012). Específicamente las variables fisiológicas consideradas son: actividad eléctrica del corazón, presión arterial, oxígeno en la sangre y la señal de fonocardiograma.

2.2 Actividad eléctrica del corazón

Para realizar la medición de la actividad eléctrica generada por el corazón debido a la circulación de la sangre a través de sus válvulas en cada latido (Zhang & Lian, 2009) se utiliza una técnica denominada electrocardiograma (ECG). Dado que dicha actividad eléctrica puede ser detectada en la superficie del cuerpo, para la obtención del ECG se colocan en el paciente una serie de electrodos en partes específicas del mismo como se muestra en la Figura 6. Mientras más electrodos o canales se utilicen para la medición la cantidad de información a transmitir crecerá. Para una aplicación mínima, solo se requieren tres electrodos posicionados en el pecho del paciente (Hartmann, 2003). El monitoreo y análisis del ECG es esencial para el diagnóstico temprano de enfermedades cardiacas.

Una señal de electrocardiografía presenta un ancho de banda de .05 Hz a 100 Hz en aplicaciones clínicas, considerando el criterio de Nyquist y retomando el trabajo de (Casillas, 2012) dicha señal será muestreada a 250 Hz. Si se utiliza esta frecuencia de muestreo y cada muestra es digitalizada con 16 bits, la tasa de datos por cada canal de ECG es de $R_{ECG} = (250 \text{ Hz}) (16 \text{ bits}) = 4000 \text{ bps}$.



Figura 6 Electrocardiograma¹

¹ Imagen recuperada en enero 2015 de http://www.sanitas.es/media/imagenes/Imagen_cardio_electroc/ximagelectrocardiograma.jpg.pagespeed.i.c.fcSmCunuru.webp

2.3 Presión arterial

La presión arterial es la fuerza ejercida por la sangre en las paredes de los vasos sanguíneos debido a la continua contracción y dilatación del corazón. La presión arterial se compone de dos valores: la presión sistólica y la presión diastólica. La fuerza que se ejerce por la presión de la sangre en las arterias cuando el corazón se contrae es conocida como presión sistólica. Por otro lado, la presión diastólica es el valor mínimo de presión que ejerce la sangre en las arterias cuando el corazón se relaja. La presión arterial de una persona es expresada en términos de presión sistólica sobre presión diastólica y es medida en unidades de milímetros de mercurio (mmHg) (Nitzan, 2011).

Existen técnicas intrusivas y no intrusivas para la medición de presión arterial, la técnica más utilizada es la que utiliza un esfigmomanómetro (Ver Figura 7). La señal correspondiente a la presión arterial generalmente se muestrea a 120 Hz y se digitaliza a 16 bits (Misic & Misic, 2009), la tasa de datos total es de $R_{PA} = (120 \text{ Hz}) (16 \text{ bits}) = 1920 \text{ bps}$.



Figura 7 Esfigmomanómetro digital²

² Imagen recuperada en enero 2015 de http://www.electrodomesta.es/imagenes/articulos/original/tensiometro_beurer_bc44_715.jpg

2.4 Oxígeno en la sangre

Para medir la cantidad de oxígeno en las arterias se utiliza una técnica no invasiva denominada oximetría de pulso, dicha técnica utiliza un instrumento llamado oxímetro de pulso para realizar la medición (Ver Figura 8), el cual mide la cantidad de luz transmitida a través de los tejidos y la convierte a un valor digital representando porcentajes de hemoglobina saturada con oxígeno (Bautista, 2010). El oxímetro cuenta con un led rojo y uno infrarrojo, cada uno cuenta con la siguiente tasa de transmisión $R_{Ox} = (60 \text{ Hz}) (16 \text{ bits}) = 920 \text{ bps}$ (Misic & Misic, 2009).



Figura 8 Oxímetro de pulso³

2.5 Señal de fonocardiograma

Se trata de una señal mecánica sonora generada por el funcionamiento del corazón y es tomada con un dispositivo médico llamado estetoscopio. Los sonidos capturados describen el comportamiento o acción mecánica de las válvulas del corazón, las cuales son compuertas que abren o cierran sistemáticamente para dar paso a la regulación de la sangre a través de las venas y arterias (Abbas & Bassam, 2009). El corazón humano puede generar cuatro sonidos durante la actividad de un ciclo cardiaco, conocidos como S1, S2, S3 y S4, y tienen la peculiaridad de que no son todos audibles (Djebbari,

³ Imagen recuperada en enero de 2015 de http://www.medical-simulator.com/img/productos/APH10_0.jpg

1999). El conjunto de sonidos mencionado constituye una señal llamada fonocardiograma (PCG, "Phonocardiogram").

En una persona con una condición de salud normal, solo son audibles los sonidos S1 y S2, aunque en ocasiones también se pueden presentar los sonidos S3 y S4.

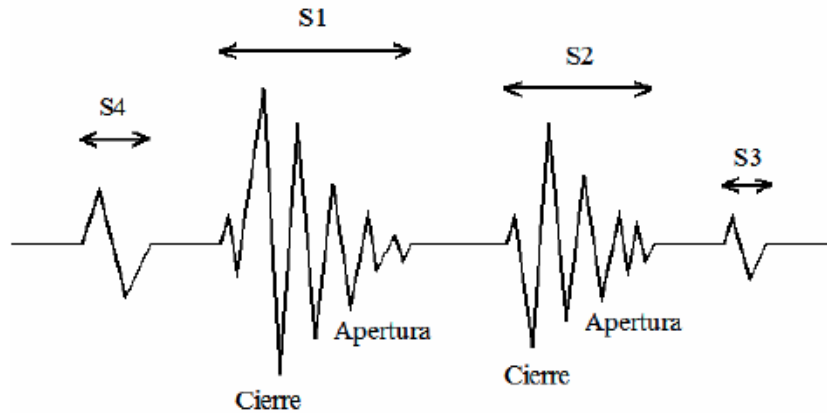


Figura 9 Ocurrencia de los sonidos cardíacos dentro de un ciclo cardíaco (Echeverry, López, & López, 2007)

Las características de frecuencia de los sonidos cardíacos se describen en la Tabla 1

Tabla 1 Duración y contenido frecuencial de los principales ruidos cardíacos. Tomado de (Castorena, 2012)

Ruido	Duración	Contenido frecuencial (Hz)
S1	.1 – 0.12	20 – 150
S2	0.08 – 0.12	50 – 60
S3	0.04 - 0.05	20 – 50
S4	0.04 - 0.05	<25

En (Castorena, 2012) se concluyó que es posible comprimir la señal de fonocardiograma empleando el códec MP3@8KHz-16 bpm y después transmitirla a través de una red con tasas de datos bajas/medianas. MP3 ofrece tramas de longitud fija, lo cual facilita el proceso de empaquetado.

2.6 Discusión sobre las variables fisiológicas en el monitoreo remoto

En este capítulo se han descrito las variables fisiológicas consideradas en este trabajo de tesis las cuales a su vez son las que se encuentran comúnmente en escenarios de monitoreo remoto de pacientes.

Para la transmisión de la señal de fonocardiograma se seguirá la recomendación hecha en (Castorena, 2012), la cual consiste en dividir las tramas generadas por el códec MP3 en paquetes de 90 bytes con una tasa de datos de 128 kbps. Realizar la transmisión de la señal de fonocardiograma en conjunto con las demás variables fisiológicas no sería posible debido a los tamaños de paquetes máximos de los primeros dos saltos en la red heterogénea. Por lo que en este trabajo de tesis la transmisión del audio cardiaco se hará de manera independiente, es decir, la transmisión del audio cardiaco no se realizará en conjunto con las otras variables fisiológicas consideradas (i.e. saturación de oxígeno, presión arterial y ECG).

En la Tabla 2 se muestran las principales características de transmisión de las otras variables fisiológicas consideradas y se puede observar que el total acumulado de la tasa de datos es de 15,840 bps y que solo el ECG presenta sensibilidad al retardo máxima de 1 segundo.

Tabla 2 Características de transmisión de las variables fisiológicas (Casillas, 2012)

Parámetro	Muestras por segundo (Hz)	Bits por muestra	Sensibilidad Retardo	Tasa de datos (bps)
ECG	250 (x3 Ch.)	x12 – x16	< 1 s	9, 000 – 12,000
Presión arterial	120	x16	NO	1,920
Oxímetro de pulso	60 (x2 Ch.)	x16	NO	1,920
			TOTAL	15,840 bps

La información presentada en este capítulo nos permite concluir que las variables fisiológicas descritas pueden ser transmitidas a través de redes con tasas de datos bajas/medianas. En el siguiente capítulo se describirá el funcionamiento de las

tecnologías inalámbricas de redes de área personal así como también los estándares necesarios para que este tipo de información pueda ser transmitida a través de internet.

Capítulo 3 Arquitectura de red heterogénea

3.1 Introducción

En un escenario de MRP es común encontrar la necesidad de interconectar redes de datos que utilizan diferentes tecnologías de capa física y de acceso al medio. Las cuales ofrecen múltiples capacidades en términos de consumo de energía, rango de transmisión y tasas pico de datos. A esta interconexión de tecnologías se le denomina red heterogénea.

Una red heterogénea en escenarios de MRP generalmente consta de tres partes (Pawar, Jones, Van Beijnum, & Hermens, 2012) como se muestra en la Figura 10.

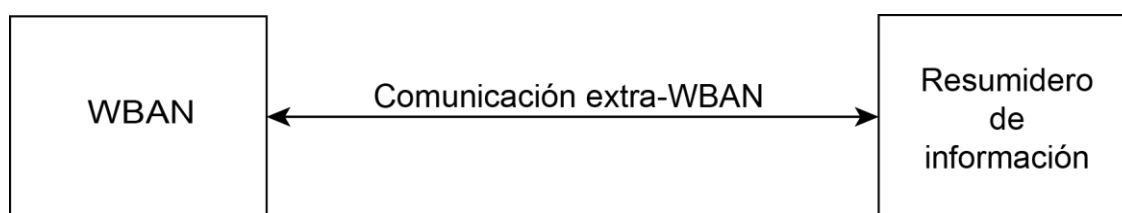


Figura 10 Red heterogénea genérica

La red de área corporal (WBAN) se compone de los sensores encargados de realizar la medición de las variables fisiológicas del paciente. Estas señales serán transmitidas vía una comunicación extra-WBAN hacia el resumidero de información para ser revisadas por un profesional de la salud.

Particularmente en este trabajo la WBAN será habilitada a través de BLE. El estándar IEEE 802.15.4 será el segundo salto de la red (comunicación extra-WBAN). Adicionalmente, se considerará que el destino de la información se encuentra en una ubicación geográfica lejana respecto a los dos primeros saltos. Por lo tanto, se propone agregar un tercer salto compuesto por Ethernet para transmitir las variables fisiológicas hacia un resumidero de información a través de internet.

Como se mencionó anteriormente interconectar los diferentes saltos de la red heterogénea no es una tarea trivial. Esto debido a las diferentes características de la capa física (PHY) como de la capa de acceso al medio (MAC) de cada tecnología. Por lo que es sumamente importante el conocer las particularidades de cada tecnología, i.e. caudal eficaz, tecnología de PHY, protocolos de MAC, etc. Por lo tanto, en este capítulo se describirán las características más importantes relacionadas a la PHY y MAC de cada uno de los tres saltos en la red ya mencionados.

3.2 Tecnologías de redes inalámbricas de área personal

Las WPANs (*Wireless Personal Area Networks*) son redes que cubren distancias pequeñas de alrededor de decenas de metros con bajos índices de transmisión de datos y bajo consumo de energía (Monteagudo, Moreno, García , & Reig, 2004), por lo cual se han convertido en uno de los componentes básicos de los sistemas de MRP modernos (Khan, Yuce, & Karami, 2008) (Kang, Ryu, Hur, & Sha, 2013) (Javaid, Yaqoob, Khan, Khan, Javaid, & Khan, 2013).

El grupo de trabajo IEEE 802.15 trabaja en estandarizar las especificaciones para la capa física y MAC para WPANs. Derivado de los esfuerzos de este grupo se han obtenido estándares relevantes como el IEEE 802.15.1, basado en las especificaciones del SIG de Bluetooth (Barriga Vázquez & Zúñiga Calle , 2006). Otros estándares relevantes son el IEEE 802.15.2 enfocado en asegurar la coexistencia entre WLAN y WPAN; el IEEE 802.15.3 que establece las normas para WPAN's de alta velocidad; y por último el estándar IEEE 802.15.4 que investiga y desarrolla soluciones para aplicaciones que requieren una baja transmisión de datos.

En los siguientes párrafos se describirán las principales características de las tecnologías que conforman los dos primeros saltos de la arquitectura utilizada en este trabajo de tesis (Ver Figura 11). Es decir, BLE y IEEE 802.15.4.

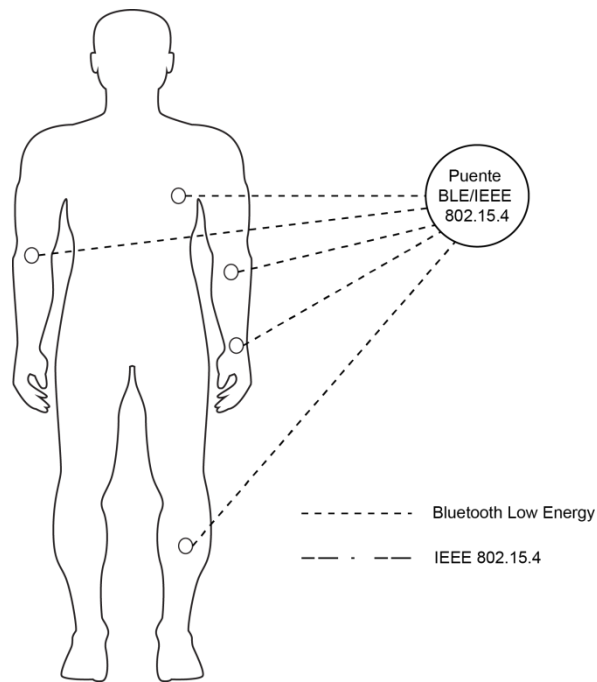


Figura 11 Primeros dos saltos en la red heterogénea

3.2.1 Bluetooth low energy

BLE es una tecnología inalámbrica emergente desarrollada por el Grupo de Interés Especial Bluetooth (SIG) para la comunicación de corto alcance. En contraste con las versiones anteriores de Bluetooth, BLE ha sido diseñado como una solución de bajo consumo de energía para aplicaciones de control y monitoreo. BLE es el rasgo distintivo de la especificación Bluetooth 4.0 (SIG, 2010).

La principal característica de BLE es servir a dispositivos con requerimientos de baja tasa de datos y corto alcance con un muy bajo consumo de energía. Principalmente en las áreas del cuidado de la salud, deporte, seguridad y entretenimiento en casa (Gomez, Oller, & Paradells, 2012). Las conexiones entre dispositivos BLE pueden ser establecidas rápidamente y liberadas tan pronto como el intercambio de datos haya terminado. Debido a esto y a los tamaños de paquetes pequeños, se logra una reducción en el consumo de energía del trancceptor de radio (Yu, Xu, & Li, 2012).

3.2.1.1 Arquitectura

La arquitectura del estándar Bluetooth Low Energy define cuatro diferentes roles para los dispositivos: Anunciante (Advertiser); Escáner (Scanner); Maestro (Master) y Esclavo (Slave).

La única topología de red soportada por el estándar es la topología tipo estrella, en donde todos los esclavos envían directamente datos al maestro y no entre ellos mismos como se observa en la Figura 12 (SIG, 2010).

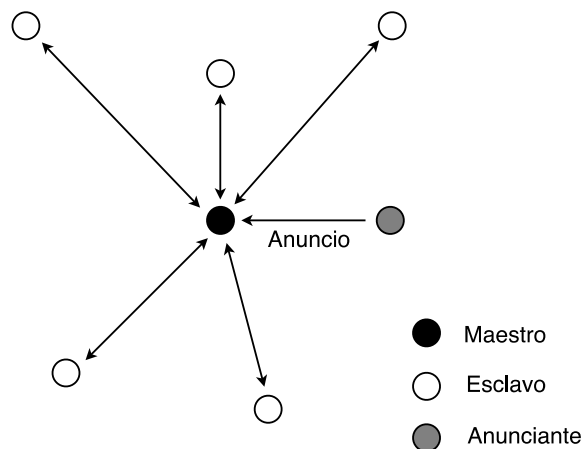


Figura 12 Topología estrella para redes de Bluetooth Low Energy

3.2.1.2 Capa física

Los dispositivos Bluetooth Low Energy operan en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) de 2.4 GHz. Utilizan esquema adaptativo de espectro esparcido por saltos en frecuencia (FHSS, "*Frequency Hopping Spread Spectrum*") para combatir la interferencia de otras tecnologías inalámbricas operando en la misma banda de frecuencia. Dentro del estándar se definen 40 canales de RF con una separación de 2 MHz.

El esquema de modulación utilizado en Bluetooth Low Energy es modulación por desplazamiento de frecuencia gaussiana (GFSK, "*Gaussian Frequency Shift Keying*").

La configuración de la PHY para BLE le permite alcanzar una tasa de bits pico de 1 Mbps.

3.2.1.3 Capa de enlace de datos

La capa de enlace de datos (LL, *Link Layer*) de Bluetooth Low Energy es la parte central del estándar ya que es la encargada de la paquetización de los datos controlar el estado de los dispositivos. Dichos dispositivos pueden entrar en estado de anuncio, escaneo, inicialización, conexión y desconexión.

Proceso de conexión

Los canales de anuncio habilitan el descubrimiento de dispositivos disponibles, cuando se solicita una conexión, estos mismos canales de anuncio sirven para conectar a los dispositivos. Una vez conectados, los dispositivos utilizan los canales de datos para la comunicación (Perrey, 2012).

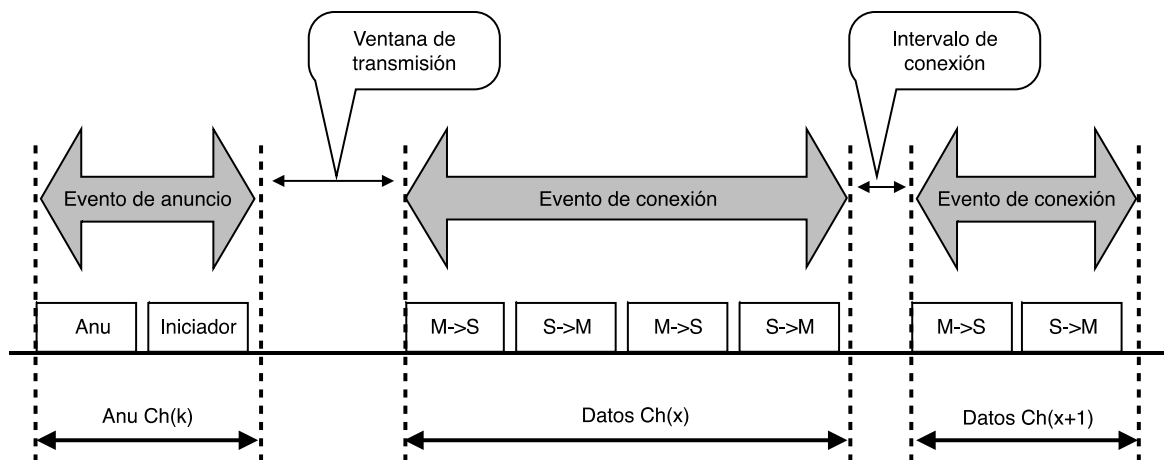


Figura 13 Procesos de eventos de conexión en Bluetooth Low Energy. Anu (Anunciante), M (Master), S (Slave). (SIG, 2010)

Una vez que se ha establecido conexión, el dispositivo de escaneo se convierte en maestro y el anunciante en esclavo. Los datos son intercambiados durante lo que se le denomina eventos de conexión (Ver Figura 13) utilizando el esquema de saltos en frecuencia FHSS. El maestro inicia cada evento de conexión, aunque el maestro o el

esclavo pueden terminar la comunicación en cualquier momento. Durante los eventos de conexión el maestro y el esclavo intercambian información utilizando el mismo canal, aunque dicho canal cambia al inicio de cada evento de conexión diferente debido al esquema A-FHSS (“Adaptative-FHSS”) (Gupta, 2013).

LLDU Y PDU

Los paquetes que son transmitidos a través del canal inalámbrico por BLE son denominados unidad de datos de la capa de enlace (LLDU, “Link Layer Data Unit”) y varían desde 10 hasta 47 bytes como se muestra en la Figura 14 (SIG, Bluetooth Core Especification V.4.0, 2010).

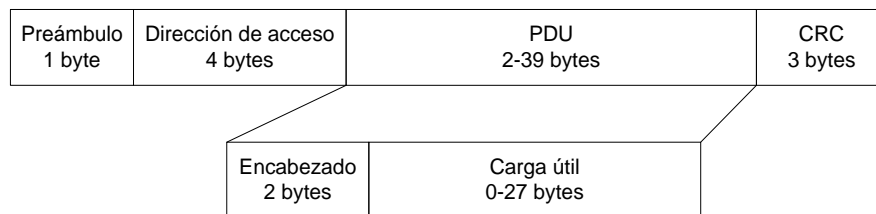


Figura 14 Formato del paquete LLDU y PDU

En el campo denominado unidad del paquete de datos (PDU, “Packet Data Unit”) es donde BLE encapsula la información que se requiere transmitir, ver Figura 14 (Collotta & Pau, 2015).

3.2.1.4 Caudal eficaz máximo

El caudal eficaz máximo en BLE es la tasa máxima de bits de carga útil que pueden ser transmitidos entre un maestro y un esclavo. En (Casillas, 2012, pág. 40) se muestra el análisis de la tasa de transmisión máxima y los tiempos necesarios para la misma bajo el estándar de BLE.

El cálculo del caudal eficaz máximo se realizó tomando en cuenta que la distancia entre un maestro y un esclavo sea lo suficientemente corta para no considerar las pérdidas por propagación y asumir que el canal es ideal. También se considera que no hay

pérdidas por colisiones, no hay paquetes descartados por sobrecarga del buffer y el nodo transmisor siempre tiene un paquete disponible para ser enviado.

Los resultados se pueden observar en la Tabla 3, donde se aprecia que la eficiencia máxima de transmisión de Bluetooth Low Energy es apenas del 31.9, lo cual se debe principalmente a que la sobrecarga que contiene un paquete con carga útil máxima es del 27% (sin utilizar el esquema de seguridad).

Tabla 3 Caudal eficaz máximo para el tráfico simétrico⁴ y asimétrico en Bluetooth Low Energy

Tráfico	Simétrico	Asimétrico
Caudal eficaz (bps)	242, 152	319, 526

3.2.2 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 es un estándar de redes de área personal (WPANs) que tiene como objetivo proporcionar un estándar para los dispositivos de bajo costo y muy baja potencia (Jurcik, Koubâa, Alves, Tovar, & Hanzalek, 2007).

En IEEE 802.15.4 se utilizan dos modos de operación denominados no ranurado y ranurado. El primero se prefiere generalmente en pequeñas redes en las que se espera que la probabilidad de colisión de los paquetes sea baja. El modo ranurado se utiliza ampliamente para las aplicaciones que requieren que diferentes dispositivos puedan comunicarse de manera periódica (como el monitoreo) y que por tanto la probabilidad de colisión de los paquetes es más alta (Okdem, 2015). En este trabajo se considera el modo no ranurado.

⁴ Por tráfico simétrico se entiende que tanto el maestro como el esclavo transmiten un paquete del mismo tamaño, donde la carga útil de paquete es máxima (27 bytes). Al contrario en el tráfico asimétrico el maestro y el esclavo transmiten paquetes de diferente tamaño, donde el maestro envía un paquete sin carga útil.

3.2.2.1 Arquitectura

En el estándar IEEE 802.15.4 existen dos tipos de dispositivos (i Serra, y otros, 2010): Dispositivo de funcionalidades completas (FFD, “Full Function Device”) y dispositivo de funcionalidades reducidas (RFD, “Reduced Function Device”)

Dentro de la arquitectura del estándar se permite la formación de dos posibles topologías de red: estrella e igual-igual, con esta última pueden implementarse redes tipo malla y árbol como se muestra en la Figura 15 (Gutierrez, 2004). Para este trabajo de tesis se considera la topología estrella.

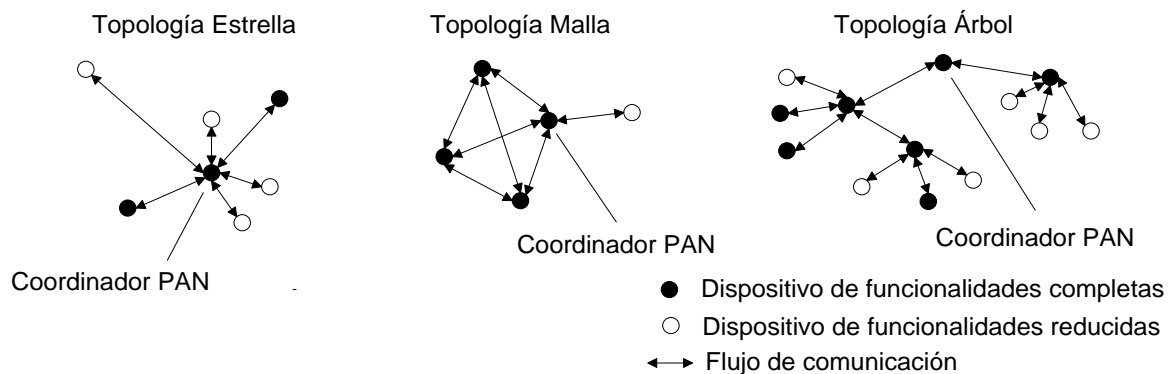


Figura 15 Ejemplos de topología de red para IEEE 802.15.4

3.2.2.2 Capa física

En esta capa recaen algunas de las funciones más importantes en el estándar como lo es el control del flujo de datos, selección del canal y la frecuencia en la que se desea transmitir.

A nivel de capa física IEEE 802.15.4 opera en alguna de las siguientes bandas de frecuencia:

- 868-868.6 MHz (Europa)
- 902-928 MHz (Norte América)
- 2400-2483.5 MHz (a nivel mundial)

Se utiliza la técnica de espectro esparcido por secuencia directa (DSSS, “Direct Sequence Spread Spectrum”) para combatir la interferencia de otras tecnologías inalámbricas en cada banda de frecuencia. Los parámetros de transmisión se observan en la Tabla 4 (Zheng & Lee, 2004).

Tabla 4 Bandas de frecuencia y parámetros de transmisión para IEEE 802.15.4

PHY (MHz)	Banda de Frecuencia (MHz)	Parámetros de esparcimiento		Parámetros de transmisión		
		Tasa de chips (kchips/s)	Modulación	Tasa de bits (kb/s)	Tasa de símbolos (ksímbolos/s)	Símbolos
868/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	Binaria
	902-928	600	BPSK	40	40	Binaria
2450	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	Ortogonal

3.2.2.3 Sub-capa MAC

La sub-capa MAC de IEEE 802.15.4 es la encargada de realizar las siguientes tareas:

- Generar paquetes faro (“beacons”) si el dispositivo es un coordinador.
- Sincronización de la red de acuerdo a los paquetes faro.
- Apoyar en la asociación y des-asociación de la WPAN.
- Emplear el mecanismo de acceso al medio CSMA/CA (“Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance”).
- Manipulación y mantenimiento de ranuras de tiempo garantizadas (GTSs, “Guaranteed Time Slots”).
- Proporcionar una conexión fiable entre los dispositivos.

Existen dos modos diferentes de acceder al canal:

- Con paquetes faro (“beacon-enabled”), en este modo el coordinador de la WPAN puede delimitar el tiempo en el que se accede al canal usando una estructura de supertrama. Una supertrama está delimitada por la transmisión de paquetes faro, la cual cuenta con un periodo activo y un periodo inactivo. Durante el periodo inactivo el coordinador entra en un modo de operación de bajo consumo de potencia. Durante el periodo activo, cualquier dispositivo que desee transmitir contienda por el canal utilizando el algoritmo CSMA/CA ranurado. Para aplicaciones de bajo retardo es posible utilizar GTSs para transmitir.
- Sin paquetes faro (non beacon-enabled), no hay periodos de inactividad y el acceso al canal se realiza utilizando el algoritmo CSMA/CA no ranurado.

En (Casillas, 2012) se demostró que utilizando IEEE 802.15.4 en el segundo salto en la red heterogénea propuesta, empleando el modo de operación sin paquetes faro se puede aumentar el número de usuarios servidos en la red, ya que cuenta con un mayor número de canales y mayor tasa de transmisión. Dado que en este trabajo existe el interés de servir al mayor número de usuarios en la red simultáneamente también se utilizara el mismo modo de acceso al canal.

Algoritmo de CSMA/CA del estándar IEEE 802.15.4

Dependiendo del modo de operación elegido, el algoritmo de acceso al medio será CSMA/CA ranurado o CSMA/CA no ranurado.

En CSMA/CA no ranurado cada vez que un dispositivo requiere transmitir, espera un tiempo aleatorio denominado periodo de desistimiento y después verifica el estado del canal. Si el canal está desocupado, se realiza la transmisión de los datos, si el canal está ocupado, el dispositivo espera otro periodo de desistimiento antes de volver a transmitir.

Cuando se utiliza CSMA/CA ranurado los periodos de desistimiento de cada dispositivo están sincronizados con el fin de transmitir los datos solo en los límites de las ranuras de la supertrama del coordinador.

MPDU

La unidad de datos del protocolo MAC (MPDU, “MAC protocol data unit”) es el paquete en el cual se encapsula la carga útil de estándar IEEE 802.15.4, el cual consiste de un encabezado MAC (MHR, “MAC header”), la carga útil en sí y un pie de MAC (MFR, “MAC footer”) que consiste en una secuencia de chequeo de trama para la detección de errores (Ver Figura 16).

Octetos 2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	0/5/6/10/14	variable	2
Control de trama	Número de secuencia	Identificador PAN destino	Dirección destino	Identificador PAN fuente	Dirección fuente	Encabezado de seguridad auxiliar	Carga útil	FCS
		Campos de direcciones						
MHR							Carga MAC	MFR

Figura 16 Formato MPDU

3.2.2.4 Caudal eficaz máximo

Para IEEE 802.15.4 el caudal eficaz máximo se define como la tasa de transmisión máxima de bits de datos provenientes de una capa superior, en este caso la capa de red. En (Casillas, 2012, pág. 53) se muestra el análisis de la tasa de transmisión a nivel de capa MAC para IEEE 802.15.4 en la banda de 2.4 GHz en el modo de operación sin paquetes fano que utiliza el algoritmo de CSMA/CA no ranurado.

Se asumen las mismas consideraciones que en la Sección 3.2.1: el tráfico es punto a punto, el canal es ideal, no hay colisiones ni interferentes y no hay sobrecarga del búfer.

En la Tabla 5 se muestran los resultados del caudal eficaz para los diferentes escenarios considerados. Se puede observar que el caudal eficaz máximo se puede alcanzar al utilizar direcciones cortas sin el esquema de ACK.

Tabla 5 Caudal eficaz máximo en IEEE 802.15.4 para diferentes escenarios

Direcciones	ACK	Caudal eficaz máximo (bps)	Eficiencia máxima (%)
Cortas (16 bits)	ACK	139,024	55.6
	No ACK	151,596	60.6
Largas (64 bits)	ACK	124,390	49.8
	No ACK	135,638	54.8

3.3 Redes de área local

Una red de área local (LAN, “Local Area Network”) provee capacidades de red a un grupo de equipos dentro de un área geográfica pequeña, como en un edificio de oficinas, una escuela o un hogar (Pahlavan, 2011). Se utilizan ampliamente para conectar computadoras personales y estaciones de trabajo para intercambiar recursos e intercambiar información (Tanenbaum, 2003).

Una LAN puede estar constituida por dos o más dispositivos dependiendo de la aplicación. Dos de las tecnologías ampliamente usadas para habilitar las LAN son Ethernet (redes alámbricas) y WiFi (redes inalámbricas) (Goldsmith, 2005). En el presente trabajo se utilizará a Ethernet como tercer salto en la red heterogénea debido a que cuenta con mayores prestaciones en términos de caudal eficaz y velocidad que WiFi.

3.3.1 Ethernet

Es el estándar más popular de redes de área local actualmente debido a que permite un buen equilibrio entre velocidad, costo y facilidad de instalación. Estos puntos fuertes, combinados con la amplia aceptación en el mercado y la habilidad de soportar virtualmente todos los protocolos de red populares hacen de Ethernet una buena opción para el tercer salto en la red heterogénea. En el estándar IEEE 802.3 especifica la capa física y el control de acceso al medio en a nivel de la capa de enlace de datos del modelo OSI para Ethernet

La tasa de datos soportada por Ethernet ha evolucionado desde 10Mbits/s en 1985 (IEEE 802.3a) hasta 100 Gbits/s en 2010 (Law, Dove, D'Ambrosia, Hajduczenia, Laubach, & Carlson, 2013). Para realizar las conexiones en Ethernet se hace uso de cable coaxial, par trenzado, o fibra óptica, ya sea directamente, o mediante el uso de concentradores, conmutadores y routers (Fedyk & Allan, 2008).

3.3.1.1 Tecnología y velocidad

Como se mencionó anteriormente la capa física de Ethernet ha ido evolucionando considerablemente con el paso del tiempo, en sus inicios se utilizaba cable coaxial para la interconexión de los equipos y actualmente se utiliza cable de par trenzado o fibra óptica como medio físico dependiendo del estándar que se desea utilizar (Hankins, 2014) , como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6 Los tipos más comunes de cableado Ethernet

Nombre	Estándar	Velocidad	Cable	Seg. Máx.
10Base5	802.3	10 Mbit/s	Coaxial grueso	500 m
100Base-T	802.3 (21)	100 Mbit/s	Par trenzado	100 m
1000Base-T	802.3 (40)	1 Gbit/s	Par trenzado	100 m
10GBase-LR	802.3ae	10 Gbit/s	Fibra óptica	10 Km
10GBase-ER	802.3ae	10 Gbit/s	Fibra óptica	40 Km
40GBase-LR4	802.3ba	40 Gbit/s	Fibra óptica	10 Km
100GBase-ER4	802.3ba	100 Gbit/s	Fibra óptica	40 Km

El control de acceso al medio en los estándares Ethernet es llevado a cabo por el mecanismo acceso múltiple por censado de portadora con detección de colisiones (CSMA/CD, "Carrier Sense Multiple Acces With Collision Detection") y su objetivo es reducir el número de colisiones al comprobar la existencia de portadora en el canal antes de intentar una transmisión (Palmer, 2012). La indicación de presencia o no de portadora cumple dos funciones básicas:

- Informar al transmisor de la disponibilidad del canal.
- Establecer el principio y fin de un paquete en recepción.

3.3.1.2 Formato de trama Ethernet

La capa de enlace de datos de una red basada en Ethernet utiliza paquetes de datos para transmitir información (Ferrero & Wilson, 1996). Es decir esta capa es la encargada de dividir en la información en pequeñas partes llamadas paquetes, darle el formato necesario para posteriormente ser transmitidos y reensamblados en el otro extremo de la red (Lian, Moyne, & Tilbury, 2001). Dichos paquetes se componen de tres elementos principales (Figura 17) (Tanenbaum, 2003): un par de direcciones, los datos en sí, y un campo de comprobación de errores:

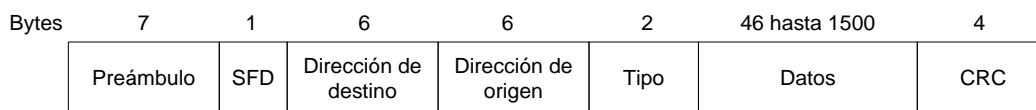


Figura 17 Formato de trama Ethernet

- **Preámbulo.** Cada trama inicia con una secuencia de 8 bytes, cada uno de los cuales contiene un patrón de 8 bits 10101010 utilizado para sincronizar y estabilizar el medio físico antes de iniciar la transmisión.
- **SFD (Start Frame Delimiter).** Campo de 1 byte que contiene la secuencia 10101011 que indica cuando ha terminado el preámbulo y comienza una trama de datos.

- **Dirección de destino.** Campo de 6 bytes que contiene la dirección MAC a la que se envía la trama. Existen tres tipos de direcciones MAC destino:
 - *Unicast* (Dirección MAC de una tarjeta de red específica. La trama Ethernet es procesada solo por esa tarjeta)
 - *Multicast* (Dirección MAC que hace referencia a un grupo de dispositivos)
 - *Broadcast* (Dirección MAC con todos los bits en 1, es decir, FF:FF:FF:FF:FF:FF. La trama Ethernet es procesada por todas las tarjetas de red que lo reciben)

El bit más a la izquierda del campo indica cuando la dirección es unicast (indicado por un 0), multicast (indicado por un 1) o broadcast si todos los bits del campo son 1.

- **Dirección de origen.** 6 bytes que contienen la dirección MAC del dispositivo que envía la trama. La dirección de origen siempre es unicast y el bit más a la izquierda siempre es 0. Con ella el receptor sabe a quién debe dirigir las respuestas del mensaje
- **Tipo.** Consta de 16 bits los cuales indican el tipo de protocolo y permiten identificar el formato de datos de la capa superior, para saber cómo deben de ser procesados.
- **Datos.** Campo de 46 hasta 1500 bytes. Contiene los datos a transferir entre el origen y el destino. Si este campo fuera menor a 46 bytes se añade un campo de relleno para mantener el tamaño mínimo de paquete.
- **CRC (Cyclical Redundancy Check).** Campo de 4 bytes de longitud que consiste de un valor calculado por el emisor que resume todos los datos de la trama. El receptor calcula nuevamente el valor y, si coincide con el de la trama, entiende que la transmisión se ha realizado sin errores. El CRC es generado sobre los campos de direcciones, el tipo y datos.

3.4 Redes de área amplia

También conocidas como WANs (“Wide Area Networks”) son redes que abarcan un área geográfica extensa, como pueden ser países o incluso continentes. Aunque las WANs tienen un propósito similar a las LANs, están estructuradas y operadas de manera muy diferente (Pecar, 1993). El usuario de una red WAN generalmente no posee las líneas de comunicación que conectan los sistemas informáticos remotos; En cambio, el usuario se suscribe a un servicio a través de un proveedor de telecomunicaciones (Terplan & Morreale, 2010). A diferencia de las redes LAN, las WAN no suelen enlazar equipos individuales, sino que se utilizan para conectar redes de área local (Acampora, 2013).

3.4.1 Clasificación

Las WAN se pueden clasificar en dos, dependiendo de las restricciones presentadas para poder acceder a ellas:

- **Redes privadas:** Son redes de costo elevado debido a que requieren equipos de conmutación y de comunicaciones propios, se utilizan generalmente en compañías o instituciones en las cuales la seguridad es un factor importante. Este tipo de red puede ser configurada de tal manera que los dispositivos fuera de la red no pueden acceder a ella. Sólo un conjunto seleccionado de los dispositivos puede acceder a este tipo de red en función de la configuración en los routers y puntos de acceso de red.
- **Redes públicas:** A diferencia de las redes privadas, cualquier persona puede acceder a ellas. Se utilizan recursos pertenecientes a un proveedor de telecomunicaciones ofrecidos a través de una suscripción generalmente mensual. Debido a las pocas o nulas restricciones para los usuarios, en este tipo de redes se necesita tener cuidado con posibles riesgos de seguridad al acceder a ellas.

3.4.2 Internet

El internet es la WAN pública más grande que existe, en la cual se utiliza la pila de protocolos TCP/IP para llevar a cabo la comunicación entre millones de dispositivos alrededor del mundo (Fall & Stevens, 2011).

El desarrollo del internet ha representado una evolución de la manera en la que las personas se comunican actualmente, también representa una ventana para la investigación en el área de la telemedicina, debido a que permite acortar las distancias existentes entre los profesionales de la salud y los pacientes con la implementación de escenarios de MRP obteniendo beneficios ya mencionados en capítulos anteriores.

3.5 Red heterogénea propuesta

En este capítulo se presentaron las capacidades de las tecnologías WBAN, WPAN, LAN y WAN que serán utilizadas para formar la red heterogénea multisaltos. El punto de partida para la arquitectura heterogénea presentada en este trabajo de tesis se basa en la propuesta realizada en (Casillas, 2012). En (Casillas, 2012) se propone una red híbrida formada por BLE e IEEE 802.15.4 como primero y segundo salto respectivamente. Esto con la finalidad de que más usuarios pudieran ser servidos simultáneamente en un escenario de MRP aprovechando las características que presentan las dos tecnologías anteriormente mencionadas trabajando en forma conjunta. A partir de los resultados presentados en (Casillas, 2012), se puede concluir que es posible aumentar el número de usuarios servidos en comparación con una red homogénea.

Tomando como base lo anterior, en este trabajo se propone un tercer salto en la red heterogénea compuesto por Ethernet como se muestra en la Figura 18. Al utilizar dicho estándar no se tiene interferencia con las dos primeras tecnologías que conforman los saltos anteriores. De esta manera, se aprovecha al máximo el ancho de banda. Este tercer salto otorga la posibilidad de tener un escenario de MRP completo debido a que

las variables fisiológicas recolectadas por la WPAN pueden ser transmitidas a través de internet para ser analizadas por un profesional de la salud en un sitio remoto.

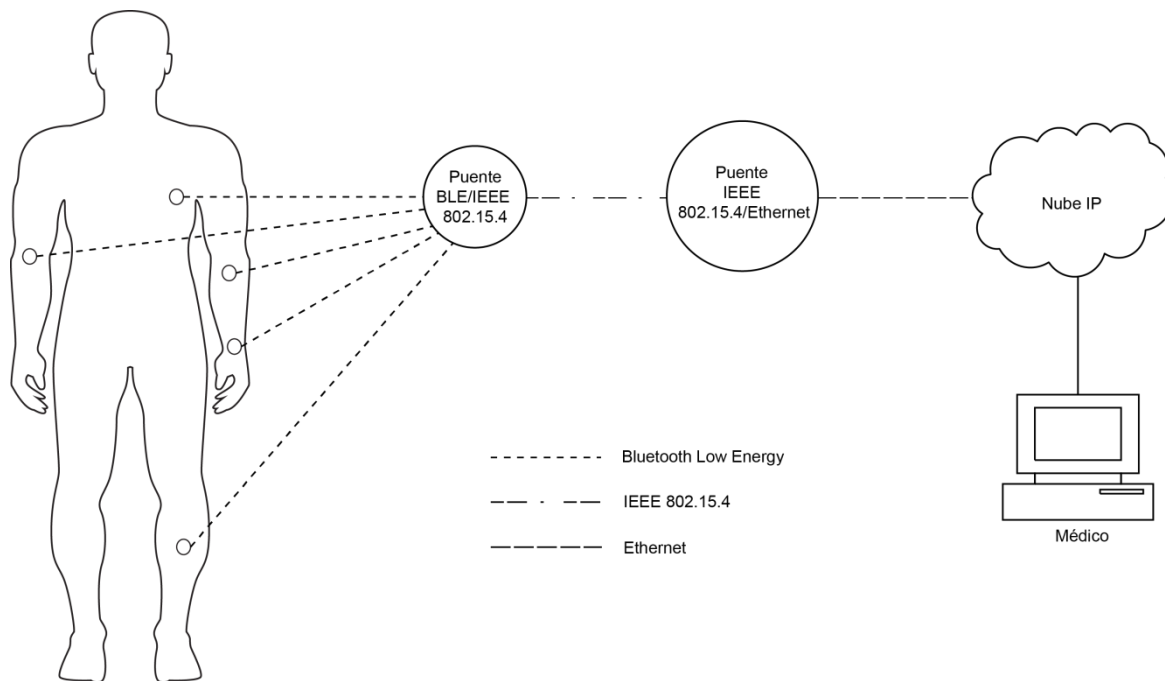


Figura 18 Red heterogénea propuesta

Utilizar la arquitectura de red propuesta es posible debido a que el tráfico de las variables fisiológicas a monitorear recolectado por los sensores BLE es de 128 Kbps para el audio cardíaco y 15,840 bps para las otras variables fisiológicas consideradas. Los cuales están dentro de la capacidad de transmisión tanto IEEE 802.15.4 como de Ethernet. En este contexto, es importante mencionar las diferencias en el caudal eficaz de los diferentes saltos. Esto plantea la interrogante si los paquetes provenientes de un salto cuyo caudal eficaz es menor deben ser enviados conforme arriban o es preferible empaquetarlos. Con el fin de contestar esta interrogante, se evaluarán diferentes esquemas de empaquetado con tal de evitar la sobrecarga de la red y aumentar el número de usuarios que puedan ser servidos simultáneamente.

Es importante tomar en cuenta que debe existir un compromiso entre el retardo y el porcentaje de paquetes perdidos, para que una transmisión sea considerada en tiempo real es necesario que el retardo no sea mayor a 150 ms y las pérdidas sean menores al 1% (Kaschel & Enrique San Juan, 2006).

Otro aspecto importante y en el cual se centra este trabajo de investigación es el protocolo de comunicación que se utilizará para realizar la transmisión de las variables fisiológicas a través de internet. Debido a que ninguno de los protocolos de comunicaciones actuales fueron diseñados para transmitir este tipo de señales sobre redes heterogéneas, es necesario diseñar un nuevo protocolo para realizar la transmisión de variables fisiológicas que sea compatible con una arquitectura de red heterogénea y de esa manera tener un escenario de MRP eficiente. En el siguiente capítulo se muestra el protocolo base para el desarrollo del nuevo protocolo que atienda las necesidades anteriormente mencionadas.

Capítulo 4 Transmisión de datos sobre redes heterogéneas

4.1 Introducción

Debido a la gran complejidad que conlleva el proceso de comunicación, los sistemas de comunicaciones tienen una arquitectura basada en capas. Esto permite diseñar protocolos de comunicación que rigen el proceso de intercambio de información entre capas iguales de los equipos conectados en una red. Por ejemplo, "Internet protocol" (IP) para la capa 3, "User Datagram Protocol" (UDP) para la capa de transporte, etc.

El modelo de arquitectura para la interconexión de redes más utilizado es el modelo de referencia OSI (Open Systems Interconnection). La estructura del modelo OSI permite visualizar de manera detallada como viaja la información a través del enlace de comunicaciones (Wetteroth, 2002).

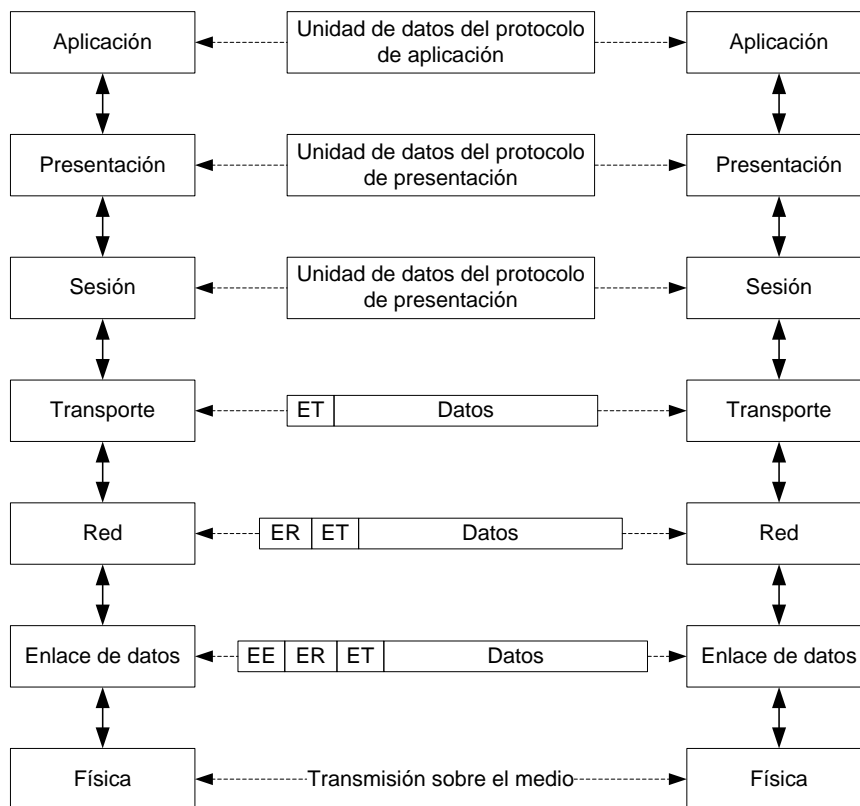


Figura 19 Arquitectura de red basada en el modelo OSI

Como se puede ver en la Figura 19, los protocolos de comunicación están enfocados a la comunicación igual-igual (“Peer-to-peer”-P2P), enfocándose a las tareas propias de la capa para la cual el protocolo fue diseñado. Este es un enfoque eficiente en sistemas de comunicación homogéneos. No obstante, en redes heterogéneas esto puede ser un inconveniente debido a que en cada salto los paquetes deben formatearse para poder ser transmitidos. Es decir nuevos encabezados deben agregarse, lo que incrementa la sobrecarga de control y por lo tanto el retardo de los paquetes.

En este sentido, los sistemas de MRP actuales además de estar basados en arquitecturas de red heterogéneas, requieren que la información sea transmitida en tiempo real (Jones, y otros, 2014). Adicionalmente, se deben considerar también las diferentes tasas de datos con las que cuenta cada tecnología que conforma la red heterogénea.

En este capítulo se presentan las particularidades más relevantes de los protocolos de comunicación involucrados en el proceso de transmisión de variables fisiológicas en tiempo real.

4.2 IP

IP (Internet Protocol) es un protocolo orientado a no conexión ampliamente utilizado en internet para transmitir paquetes de información, denominados datagramas (Bentham, 2000). Funcionalmente IP está situado en la capa 3 del modelo de referencia OSI.

IP es el protocolo responsable de enrutar cada datagrama en la red a través del camino más corto. IP emplea la técnica del mejor esfuerzo para realizar la entrega de paquetes, es decir, no garantiza calidad de servicio o prioridad para los paquetes transmitidos. Adicionalmente, en los paquetes IP solo se especifican las direcciones de fuente y destino, por lo que los paquetes pueden transmitirse por diferentes trayectorias, con el consecuente impacto en la variabilidad del retardo y la probabilidad de recepción.

La unidad máxima de transferencia (MTU por sus siglas en inglés) en IP es de 65635 bytes, incluyendo los 20 bytes del encabezado (Ver Figura 20). Este valor de MTU

contrasta con el de capas inferiores. Por ejemplo, cuando se utiliza Ethernet, el MTU de la capa MAC es de 1500 bytes (Garcia, Freire, & Monteiro, 2008). Por lo tanto IP tiene la capacidad de dividir la información proveniente de capas superiores en varios datagramas, que luego serán reorganizados en el destino (Hunt, 2002).

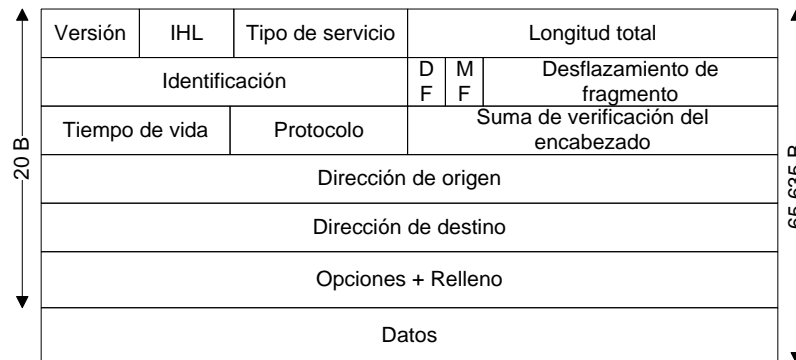


Figura 20 MTU de IP

4.3 UDP

UDP (Protocolo de Datagramas de Usuario) (Postel, 1980) es un protocolo de capa de transporte definido para su uso con el protocolo de capa de red IP sin tener que establecer una conexión (Liu, Meng, Ye, & Gu, 2002). UDP es recomendable para tráfico sensible al retardo (voz, video) ya que no utiliza reconocimientos ni retransmisiones (Douglas E. Comer, 1996). Lo que permite transmitir la información de manera fluida, aunque sin garantía de arribo al destino.

UDP transmite segmentos de datos que consisten en un encabezado de 8 bytes seguido por la carga útil (Ver Figura 21). UDP proporciona dos servicios no soportados por IP: números de puerto para ayudar a distinguir diferentes peticiones de los usuarios y opcionalmente, una capacidad de comprobación para verificar que los datos llegaron intactos (Larzon, Degermark, & Pink, 1999). Sin los campos de puerto, la capa de transporte no sabría qué hacer con el paquete. Con ellos, entrega los segmentos de manera correcta (Tanenbaum, 2003).

Puerto de origen	Puerto de destino
Longitud UDP	Suma de verificación UDP

Figura 21 Encabezado UDP

4.4 RTP

RTP (Real-time Transport Protocol) (Schulzrinne, Fokus, Casner, Frederick, & Jacobson, 1996) es un protocolo utilizado para la transmisión de información en tiempo real, como por ejemplo audio y vídeo en una video-conferencia.

La función básica de RTP es multiplexar varios flujos de datos generados tiempo real en un solo flujo de paquetes UDP. El flujo UDP se puede enviar a un solo destino (unicast) o a múltiples destinos (multicast) (Hallivuori, 2000). Debido a que RTP utiliza UDP, sus paquetes no son tratados de manera especial, a menos que se habiliten algunas características de calidad de servicio IP. En particular, no hay garantías especiales acerca de la entrega, fluctuación del retardo, etc. (Tanenbaum, 2003).

4.4.1 Estructura del encabezado

La información en el encabezado RTP le dice al receptor cómo reconstruir los datos y describe cómo se empaquetan los flujos de bits (Ver Figura 22), consiste de tres palabras de 4 bytes y de algunas extensiones.

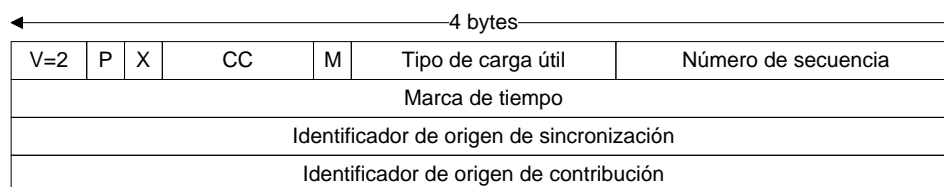


Figura 22 Encabezado RTP

Los componentes principales del encabezado RTP son:

- **Número de secuencia**, que se utiliza para detectar la pérdida de paquetes.

- **Tipo de carga útil**, que indica cuál algoritmo de codificación (e. g. MP3, M-PEG-4, etc...) se ha utilizado.
- **Marca de tiempo**, que indica el inicio y el final de cada paquete.
- **Identificador de origen de sincronización**, indica a cuál flujo pertenece el paquete. Es el método utilizado para multiplexar y demultiplexar varios flujos de datos en un solo flujo de paquetes UDP.
- **Identificador de origen de contribución (opcional)**, se utilizan cuando hay mezcladores en el enlace. En ese caso, el mezclador es el origen de sincronización, y los flujos que se mezclan se enlistan aquí.

4.5 Transmisión sobre redes heterogéneas

Como se ha venido mencionando, la transmisión de variables fisiológicas a través de redes heterogéneas es un proceso complejo, debido a las diferentes tecnologías que componen a dichas redes.

En la Figura 23 se observa el proceso que se sigue para realizar la transmisión de variables fisiológicas a través sobre redes heterogéneas si se utiliza RTP como protocolo de transporte.

Datos ilustrativos:

vf: variable fisiológica

IP: encabezado de IP

UDP: encabezado de UDP

pkt: Empaquetado en el segundo salto

MTU: máxima unidad de transferencia del segundo salto en bytes

bridge1: dispositivo tipo puente entre WBAN y WPAN

bridge2: dispositivo tipo puente entre WPAN y LAN

rinf: Lugar remoto donde se encuentra el médico

usr: Usuario

inicio

1. **Medición** de vf's
2. **Digitalización** de vf's
3. **Transmisión** de muestras hacia bridge1
4. **Recepción** en bridge1 (segundo salto)
5. **Empaquetamiento** de las muestras
6. **Agregar** encabezado de RTP a cada pkt
7. **Transmisión** de pkt's hacia bridge2
8. **Recepción** de pkt's en bridge2 (tercer salto)
9. **Agregar** UDP e IP a cada pkt
10. **Transmisión** de pkts hacia una ubicación geográfica remota
11. **Recepción** de paquetes en rinf
12. **Ordenamiento** de pkt's de acuerdo al usr
13. **Desempaquetado** de las muestras (vf's)
14. **Ordenamiento** de las muestras
15. **Despliegue** de los datos

fin

Figura 23 Proceso de transmisión de variables fisiológicas sobre redes heterogéneas

En los pasos 1 y 2 del proceso de transmisión es necesario conocer a detalle el perfil de tráfico las variables fisiológicas a monitorear, con base a lo anterior se podrán seleccionar las tecnologías más adecuadas a ser parte de la red heterogénea con las que se realizará la transmisión.

Una vez realizado el proceso de digitalización, el siguiente paso es realizar la transmisión de las variables fisiológicas hacia el dispositivo tipo puente entre las WBAN y WPAN (segundo salto), en este punto se realiza el empaquetamiento de los datos, es decir, el dispositivo tipo puente forma un paquete que se adapta al tamaño de la MTU de la WPAN con varias muestras de distintas variables fisiológicas. Siguiendo esta

estrategia es posible aumentar el número de usuarios conectados de manera concurrente a la red (Casillas, 2012).

Cabe la posibilidad de que al agregar los encabezados correspondientes a RTP a cada muestra desde el primer salto se disminuya la eficiencia del sistema, esto debido a que los recursos en cuestión de tamaños de paquetes y capacidad de procesamiento de los nodos de la WBAN por lo regular son limitados. Por lo que, En la figura anteriormente mencionada se puede notar que RTP es utilizado hasta el punto número 5, es decir, cuando las muestras correspondientes a las variables fisiológicas han sido recibidas en el segundo salto.

Una vez agregado el encabezado correspondiente al protocolo RTP, la información es empaquetada y transmitida hacia un dispositivo puente entre WPAN y LAN (tercer salto), en este punto a cada paquete se le agregan los encabezados correspondientes a los protocolos UDP e IP para posteriormente realizar la transmisión de la información hacia la ubicación remota donde se encuentra el médico para su análisis.

Agregar el encabezado de RTP en el dispositivo tipo puente del segundo salto, es útil para identificar que de que usuario proviene la información, pero es ineficiente debido a que al realizar el proceso de empaquetado identificar que variables componen a cada paquete sería un proceso complicado, debido a que no habría un delimitador del inicio y el final de cada variable fisiológica en el paquete. Además, es posible que se supere la MTU del segundo salto, lo cual produciría sobrecarga, aumento en el retardo y pérdida de paquetes en la red. Por otro lado, si RTP es agregado en el tercer salto de la red, es decir, cuando los paquetes ya fueron recibidos en el dispositivo tipo puente entre las WPAN y LAN, identificar de que usuario proviene la información y las variables que componen a cada paquete no sería un procedimiento práctico, esto produciría un aumento en el retardo debido al arribo constante de los paquetes.

En el proceso de transmisión se pueden observar la cantidad de saltos que debe atravesar la información antes de llegar a su destino, es necesario tener un protocolo de transporte capaz de adaptarse a los diferentes tamaños de paquetes y velocidades propios de cada salto en la red heterogénea.

4.6 Discusión acerca de los protocolos de red comúnmente utilizados.

La implementación de escenarios de MRP modernos, no es trivial, debido a que la información atraviesa por diferentes tecnologías de red antes de llegar a su destino, provocando que las características de la red no sean constantes a lo largo del enlace (i. e. retardo, protocolos de acceso al medio, tamaños de paquete, etc.) (Wang, Le, Cheng, & Xie, 2014).

Partiendo de la literatura revisada (Khan, Yuce, & Karami, 2008) (Kang, Ryu, Hur, & Sha, 2013) (Javaid, Yaqoob, Khan, Khan, Javaid, & Khan, 2013), se puede determinar, que es posible utilizar los protocolos de transporte existentes ya mencionados en capítulos anteriores en escenarios de MRP. Pero debido a que no fueron diseñados para este tipo de escenarios, utilizarlos trae consigo un aumento en el número de encabezados, disminuyendo la carga útil en cada paquete y por lo tanto el retardo en la transmisión de los mismos aumenta

Debido a lo anterior surge la necesidad de diseñar un protocolo de transporte específicamente para escenarios de MRP que haga buen uso de las capacidades de la red y además garantice la integridad de la señal sobre todo el enlace de comunicaciones.

RTP resulta una alternativa confiable para tomar como base para el diseño del nuevo protocolo, debido a que es posible reducir al mínimo la cantidad de encabezados que son agregados a la carga útil sin alterar sus características principales, las cuales en el contexto de escenarios de MRP servirían para identificar el paciente al que pertenecen las variables fisiológicas recolectadas, distinguir que variable es la que se está monitoreando y reordenar los paquetes que llegaron en diferente instante de tiempo al receptor, todo lo anterior en cada salto de la red heterogénea.

Capítulo 5 Diseño de un nuevo protocolo de transporte sobre una arquitectura de red heterogénea

5.1 Introducción

En este capítulo se describe el protocolo de transporte para variables fisiológicas sobre redes heterogéneas propuesto. Como se detallará más adelante en este capítulo, el diseño del protocolo considera algunas las características de RTP útiles en redes heterogéneas (i. e. numero de secuencia y marca de tiempo).

El protocolo de transporte propuesto (RTPC) fue diseñado específicamente para redes heterogéneas. Dos de las consideraciones claves en RTPC son: 1) los paquetes generados no sobrepasan el tamaño de la unidad de transferencia máxima de cada una de las tecnologías que forman a la red heterogénea; y 2) RTPC no es orientado a conexión. De esa manera se disminuye la información de control necesaria para rearmar los paquetes en cada extremo. Mejorando el aprovechamiento de las capacidades de cada salto de la red sin sobrecargarla y ofreciendo una solución a la problemática mencionada en el capítulo anterior.

Los principales objetivos de RTPC son disminuir la pérdida de paquetes y el retardo en la red ocasionados por la sobrecarga de control cuando RTP es utilizado. Como se explica a detalle en este capítulo la mejora en el desempeño del protocolo propuesto respecto a los protocolos más comúnmente usados en la literatura se obtiene con el diseño adecuado de los encabezados incluidos en los paquetes a lo largo de los tres saltos que componen la red heterogénea.

5.2 RTP sobre arquitecturas heterogéneas

Comúnmente para realizar la transmisión de datos en tiempo real a través de internet se utiliza el protocolo RTP (Westerlund, 2015), el cual ha demostrado ser una buena opción para la transmisión multimedia en tiempo real a través de internet en redes homogéneas (Diallo, Rodrigues, & Sene, 2012) (Jennings, Hardie, & Westerlund, 2013). No obstante, como ya se mencionó en capítulos anteriores, la cantidad de encabezados

que RTP utiliza para llevar a cabo sus funciones puede impactar de manera negativa cuando se implementa en redes heterogéneas

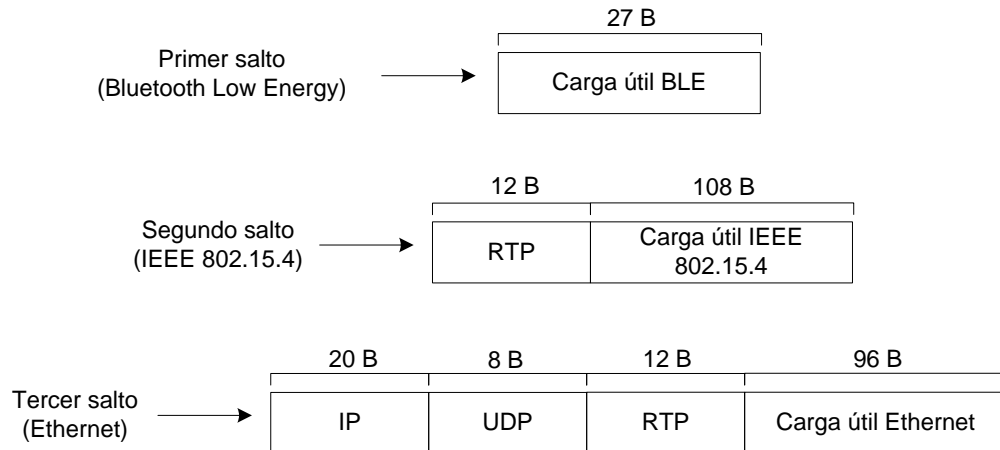


Figura 24 Paquete de datos a través de la red heterogénea propuesta si se utiliza RTP como protocolo de transporte

En la Figura 24 se observa el proceso que sigue un paquete de datos a través de la red heterogénea propuesta si se utiliza RTP como protocolo de transporte, se puede observar que el espacio para la carga útil en IEEE 802.15.4 (segundo salto) debe ser reducido de 108 bytes a 96 bytes debido al encabezado de RTP. Lo que lleva a la reducción del caudal eficaz en ese salto, y por lo tanto del desempeño de la red.

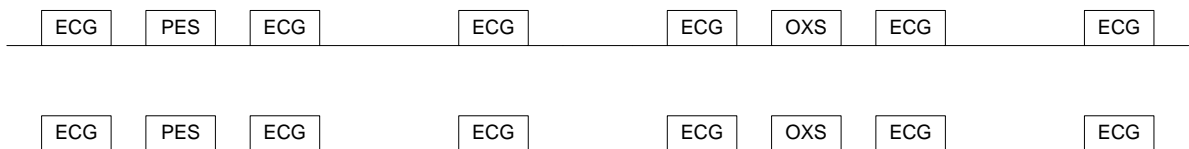


Figura 25 Ejemplo de recolección de variables fisiológicas en el puente BLE/IEEE 802.15.4, electrocardiograma (ECG), presión en la sangre (PES), oxígeno en la sangre (OXS)

Es importante mencionar que sincronizar el orden en que los dispositivos para la obtención de las variables fisiológicas envían la información hacia el concentrador BLE es una tarea compleja y poco práctica. Esto debido a la baja capacidad de procesamiento de dichos dispositivos, a lo que se suma la diferencia en los

requerimientos de transmisión de cada variable. Por lo tanto, es necesario entregar las muestras enviadas desde los dispositivos al puente BLE/IEEE 802.15.4 conforme arriban al concentrador BLE (Ver Figura 25). Por lo que si se decide empaquetar la información proveniente del primer salto en el puente BLE/IEEE 802.15.4 debería agregarse un encabezado por cada muestra (variable fisiológica) para poder identificarla en los siguientes saltos (Ver Figura 26). Utilizar el protocolo RTP para lo anteriormente mencionado claramente disminuye la eficiencia del sistema al incrementar de manera notable la sobrecarga por información de control.

Por lo anterior, se hace evidente la necesidad de un protocolo de transporte que considere la problemática descrita para ofrecer mejores prestaciones. En las siguientes secciones se detalla las propuestas de solución a los problemas observados en cada salto de la arquitectura propuesta. Es decir, se presenta el protocolo RTPC propuesto en este trabajo de tesis.

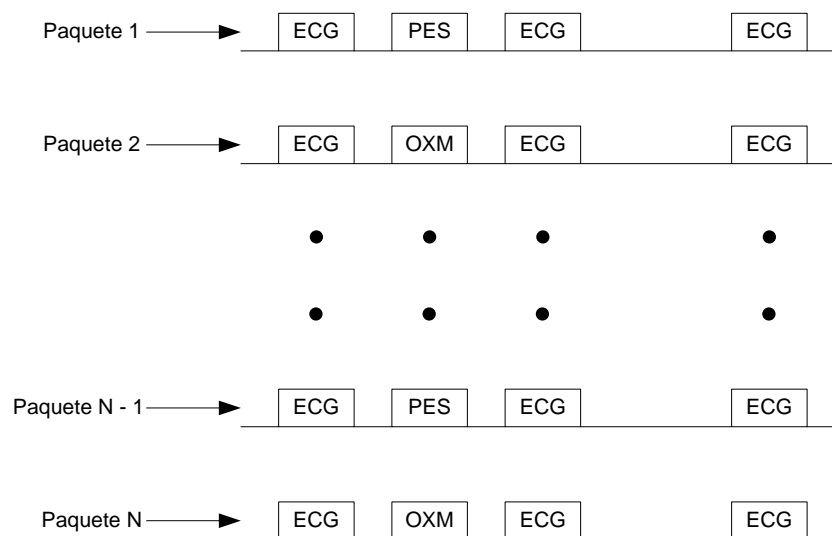


Figura 26 Empaquetado de las muestras en el puente BLE/IEEE 802.15.4

5.3 RTPC en el primer salto de la arquitectura heterogénea propuesta: Bluetooth Low Energy

Se parte de la propuesta realizada en (Casillas, 2012) para los primeros dos saltos de la red heterogénea. La WBAN correspondiente al primer salto de la red está basada en Bluetooth Low Energy (BLE). Posteriormente la información recopilada por los sensores del primer salto se transmite hacia un dispositivo tipo puente entre BLE e IEEE 802.15.4 (Ver Figura 27).

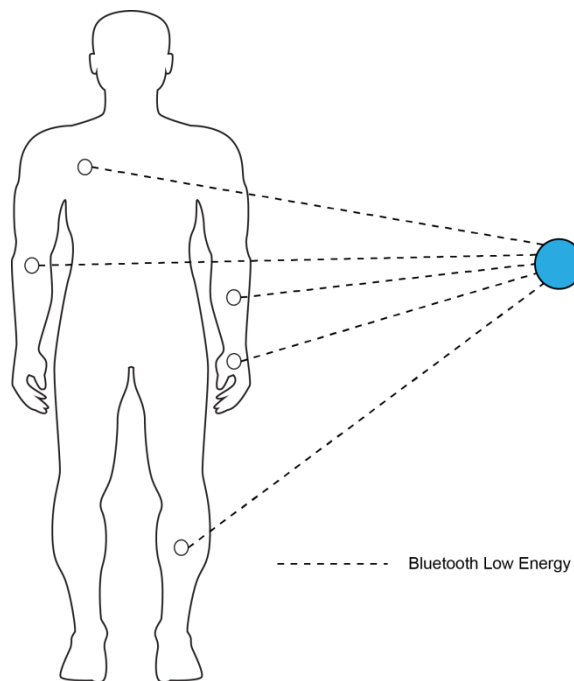


Figura 27 Primer salto

En este trabajo de tesis se propone que los datos provenientes de cada sensor cuenten con los siguientes dos encabezados:

L	NS	Datos
---	----	-------

Figura 28 Empaquetado en cada sensor BLE

- **L** (1 byte), Número de bytes a leer dependiendo de cada variable
- **NS** (2 bytes), Numero de secuencia de cada paquete transmitido.

Debido a que la longitud de los datos es conocida **L** permite identificar que variable es la que se está monitoreando y con ayuda de **NS** es posible reordenar los paquetes recibidos.

Con estos encabezados se busca tener un mejor control de los paquetes que son transmitidos desde el primer salto en la red, permitiendo identificar de manera precisa a que variable fisiológica pertenece cada paquete. Todo lo anterior sin superar la carga útil máxima en BLE.

5.4 RTPC en el segundo salto en la arquitectura heterogenea propuesta: IEEE 802.15.4

Como se mencionó, los datos recolectados por los sensores BLE son transmitidos hacia un puente IEEE 802.15.4 (Ver Figura 29), permitiéndole al usuario un mayor grado de movilidad debido al radio de cobertura de IEEE 802.15.4.

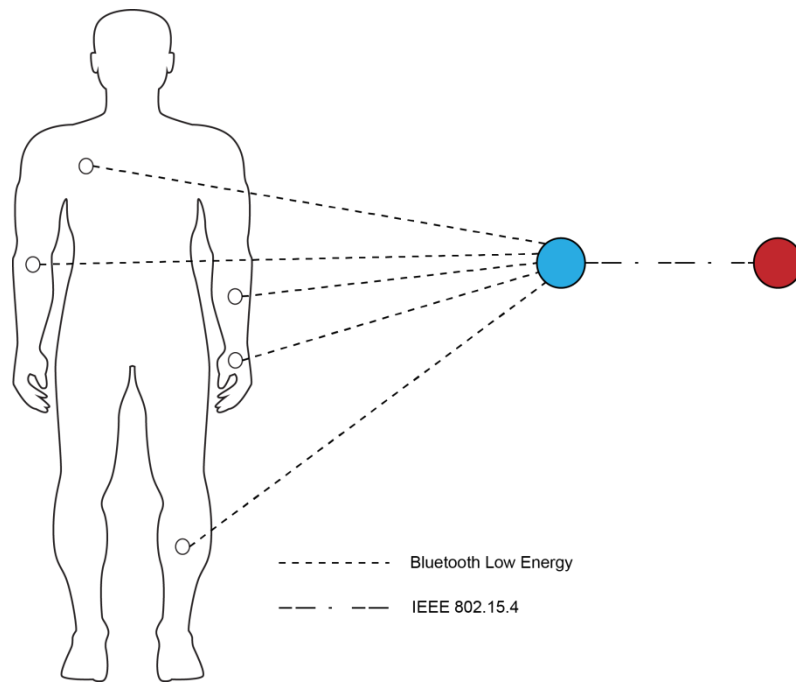


Figura 29 Segundo salto

De los signos vitales que se plantean medir en este trabajo, el ECG es el único que presenta sensibilidad al retardo (Ver Capítulo 2). Por esto es necesario entregar con una frecuencia mayor las muestras correspondientes al ECG. Para cumplir con esta restricción se propone que en un paquete IEEE 802.15.4 se encapsularán 3 paquetes BLE de ECG y un paquete de cualquier otra variable, (i. e. oxígeno en la sangre, presión arterial) (Ver Figura 25).

Agregando los encabezados mostrados en la Figura 28 a cada variable en el primer salto, al realizar el proceso de empaquetado se tendrá un tamaño máximo promedio de 104 bytes (Ver Figura 30). Dicha cantidad no supera a la carga útil disponible en cada paquete IEEE 802.15.4, la cual es de 108 bytes.

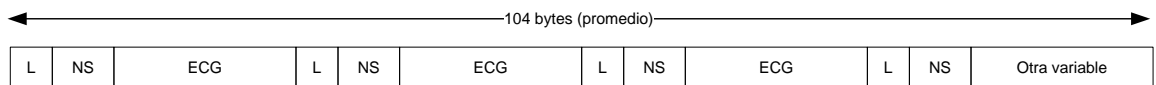


Figura 30 Proceso de empaquetado en el dispositivo puente

Al realizar el proceso de empaquetado en el dispositivo tipo puente del segundo salto, los encabezados que son agregados por los sensores BLE permiten identificar fácilmente cuales son las variables que componen a dicho empaquetado.

Por otro lado para realizar la transmisión de audio cardiaco se sigue la recomendación propuesta en (Castorena, 2012), la cual consiste en la utilización del códec MP3 para comprimir el audio y dividirlo en tramas de 90 bytes. Una vez dividido se agregan los encabezados propuestos en esta sección para ser transmitidos al dispositivo tipo puente BLE-IEEE 802.15.4. En la Figura 31 se muestra el paquete de audio cardiaco transmitido por los sensores BLE y recibido en el dispositivo tipo puente.

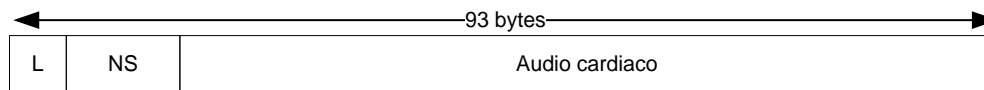


Figura 31 Paquete de audio cardiaco

Una vez teniendo los datos empaquetados en el dispositivo puente BLE e IEEE 802.15.4, en este trabajo se propone agregar 1 byte de ID (Ver Figura 32) antes de ser transmitidos hacia el tercer salto en la red heterogénea propuesta. Dicho encabezado permitirá saber de qué usuario proviene la información.

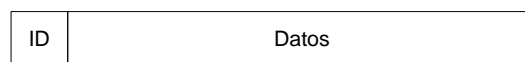


Figura 32 Empaquetado en el segundo salto

Agregando el encabezado anteriormente mencionado, la carga útil de los paquetes IEEE 802.15.4 será de 94 bytes si se transmite audio cardiaco o de 105 bytes en promedio si se transmiten las otras variables fisiológicas. Cualquiera que sea el caso no se superará la carga útil máxima soportada por IEEE 802.15.4, permitiendo en mantener el retardo y la probabilidad de descarte de paquetes al mínimo.

5.5 RTPC en el tercer salto en la arquitectura heterogénea propuesta: Ethernet

Como ya se había mencionado en el Capítulo 3, en el presente trabajo se propone implementar Ethernet como tercer salto de la red heterogénea para transmitir las variables fisiológicas a través de internet (Ver Figura 33).

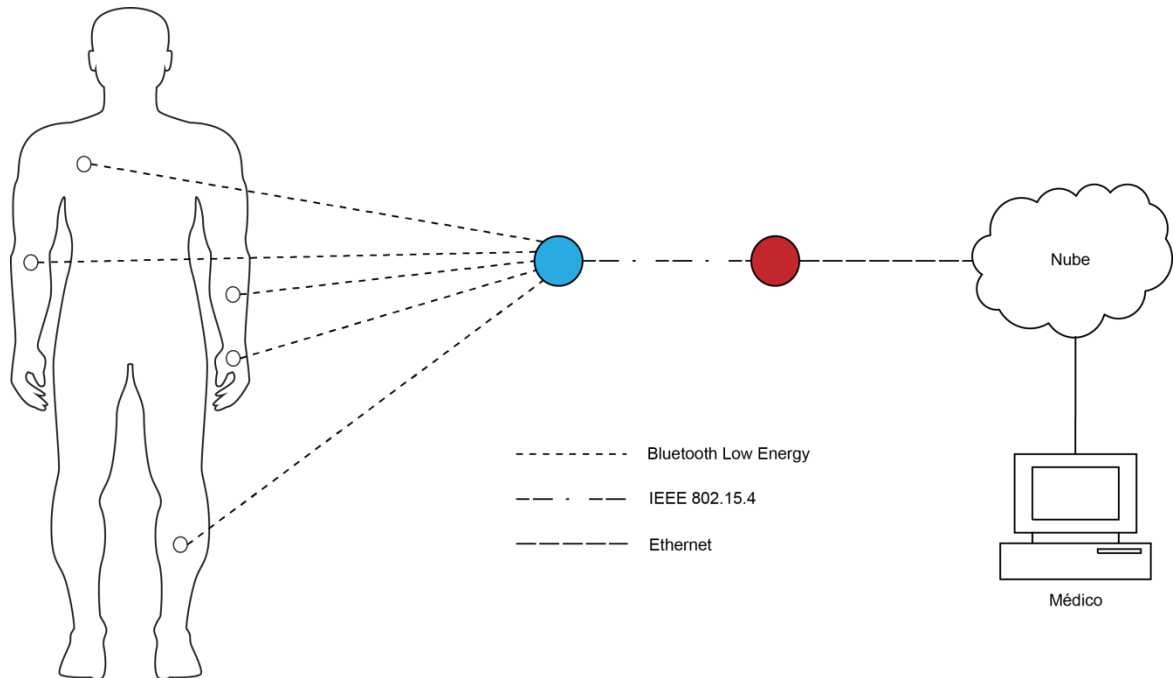


Figura 33 Tercer salto

Los datos serán transmitidos desde el puente BLE-IEEE 802.15.4 hacia un puente IEEE 802.15.4-Ethernet. Una vez recibidos en el puente Ethernet será necesario agregarles los encabezados correspondientes a los protocolos UDP e IP para ser transmitidos a través de internet (Ver Figura 34).

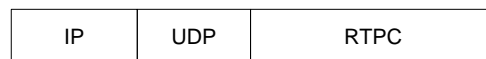


Figura 34 Empaquetado en el tercer salto

5.6 Conclusiones sobre el diseño de RTPC como un nuevo protocolo de transporte para redes heterogéneas

El principal aporte de este trabajo es el diseño del protocolo de transporte desarrollado en este capítulo. Hasta el momento de la escritura de esta tesis no se encontró en la literatura la propuesta de un protocolo de transporte para variables fisiológicas sobre redes heterogéneas.

En la Figura 35 se observa el proceso que se sigue para realizar la transmisión de variables fisiológicas a través sobre la red heterogénea utilizada en este trabajo de tesis si se utiliza RTPC como protocolo de transporte.

Como se había mencionado en capítulos anteriores, conocer el perfil de tráfico de las variables fisiológicas a monitorear es necesario, debido a que en base a ello se podrán seleccionar las tecnologías más adecuadas para formar a la red heterogénea.

Datos ilustrativos:

vf: variable fisiológica

IP: encabezado de IP

UDP: encabezado de UDP

NS: Numero de secuencia

L: Longitud

ID: Identificador

pkt: Empaquetado en el segundo salto

MTU: máxima unidad de transferencia del segundo salto en bytes

bridge1: dispositivo tipo puente entre BLE y IEEE 802.15.4

bridge2: dispositivo tipo puente entre IEEE 802.15.4 y Ethernet

rinf: Lugar remoto donde se encuentra el médico

usr: Usuario

inicio16. **Medición** de vf's17. **Digitalización** de vf's18. **Agregar** encabezado de NS a cada muestra19. **Agregar** encabezado de L a cada muestra20. **Transmisión** de muestras hacia bridge121. **Recepción** en bridge1 (segundo salto)22. **Empaquetamiento** de las muestras23. **Agregar** encabezado de ID a cada pkt24. **Transmisión** de pkt's hacia bridge225. **Recepción** de pkt's en bridge2 (tercer salto)26. **Agregar** UDP e IP a cada pkt27. **Transmisión** de pkts hacia una ubicación geográfica remota28. **Recepción** de paquetes en rinf29. **Ordenamiento** de pkt's de acuerdo al usr30. **Desempaquetado** de las muestras (vf's)31. **Ordenamiento** de las muestras32. **Despliegue** de los datos**fin**

Figura 35 Proceso de transmisión de variables fisiológicas sobre redes heterogéneas utilizando RTPC como protocolo de transporte

Los sensores BLE son los encargados de realizar los pasos 1 y 2 del proceso de transmisión mostrado en la Figura 35 de acuerdo al perfil de tráfico de cada variable fisiológica. Teniendo las muestras digitalizadas es posible agregar encabezados observados en los pasos 3 y 4 del proceso de transmisión de la figura anterior sin superar el MTU de BLE, posteriormente el paso 5 consiste en transmitir las muestras digitalizadas al dispositivo tipo puente BLE/IEEE 802.15.4.

Cuando las muestras digitalizadas son recibidas en el puente del segundo salto (paso 6), se realiza el proceso de empaquetado de datos (paso 7). Los encabezados agregados en los pasos 3 y 4 servirán como delimitadores, es decir, indicarán el inicio y el final de cada variable fisiológica que compone a cada paquete. Una vez que el proceso de empaquetado se ha llevado a cabo, a cada paquete se le agrega un encabezado de ID, el cual servirá para identificar de que usuario provienen los datos que son transmitidos hacia el tercer salto (paso 9).

En el paso 10 los datos son recibidos en el dispositivo tipo puente IEEE 802.15.4/Ethernet, en este punto se le agregan a cada paquete los encabezados correspondiente a los protocolos UDP e IP (paso 11), posteriormente se realiza la transmisión de las variables fisiológicas a través de la nube.

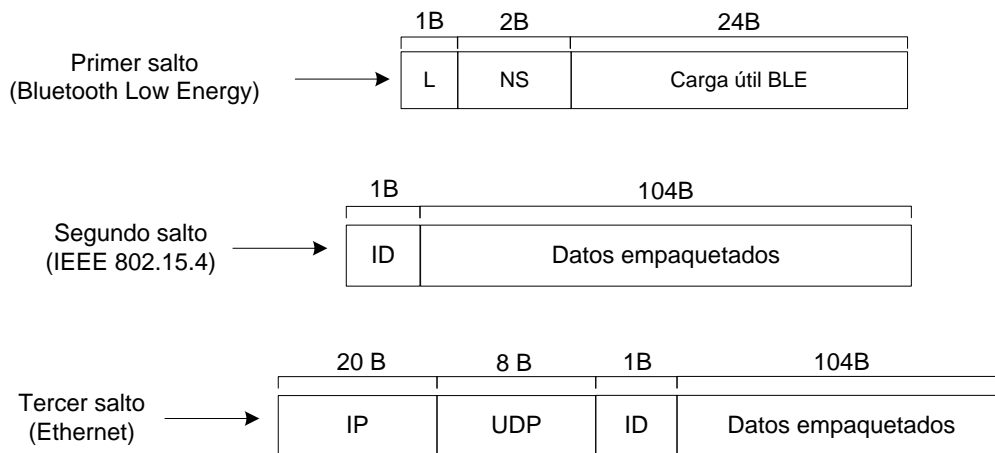


Figura 36 Paquete de datos a través de la red heterogénea propuesta utilizando RTPC

Cuando los datos son recibidos en la ubicación remota, los paquetes son ordenados de acuerdo al usuario correspondiente con ayuda del encabezado ID, teniendo los paquetes ordenados de acuerdo al criterio anterior se realiza el proceso de desempaqueado. El encabezado L, indica el inicio de cada variable (segmento) en el paquete y brinda información acerca número de bytes que componen a cada variable,

de esa manera se identifica el final de cada segmento. Teniendo identificadas las variables que componen al paquete, el encabezado NS permite ordenarlas de acuerdo

A diferencia de cuando se utiliza RTP (Ver Figura 23) se puede observar en la Figura 35 que los encabezados correspondientes al protocolo RTPC pueden ser utilizados desde el primer salto en la red, lo que permite que al emplear el protocolo de transporte propuesto se espera que se podrán aprovechar al máximo las características de cada una de las tecnologías seleccionadas para cada salto de la red heterogénea propuesta en el Capítulo 3, reduciendo el retardo y la pérdida de paquetes en cada uno de los saltos. En el siguiente capítulo se mostrará la evaluación del nuevo protocolo de transporte sobre la red heterogénea propuesta.

Capítulo 6 Evaluación del nuevo protocolo de transporte sobre la red heterogénea propuesta

6.1 Introducción

En los capítulos anteriores se discutió: 1) las capacidades de las tecnologías de redes inalámbricas de área personal y el proponer un tercer salto a la red heterogénea implementada en (Casillas, 2012); 2) los protocolos de comunicaciones utilizados en escenarios de MRP reportados en la literatura; y 3) el diseño un nuevo protocolo de transporte para la transmisión de variables fisiológicas sobre redes heterogéneas en escenarios de MRP.

En este capítulo se muestra la evaluación del protocolo RTPC sobre la red heterogénea. Para validar los resultados obtenidos, el desempeño de RTPC es comparado con el protocolo más comúnmente usado en la literatura en escenarios de MRP, i.e. RTP. Para realizar dicha evaluación se propusieron diferentes escenarios en el modelador de red OPNET. Los cuales se describen en este capítulo.

De manera adicional, de acuerdo a la revisión de la literatura realizada para este trabajo de tesis, no existe un modelador de red que incluya el escenario completo requerido para la evaluación protocolos de comunicación en escenarios de MRP. Por lo tanto, en este capítulo también se describe la metodología desarrollada para la evaluación de RTPC vs. RTP en escenarios de MRP. Finalmente, se presentan las gráficas obtenidas de la comparación del protocolo de transporte propuesto y RTP.

6.2 Metodología de evaluación

Es de especial interés comparar el desempeño de la red heterogénea cuando los signos vitales se transmiten utilizando RTP y cuando el protocolo propuesto (RTPC) es utilizado. Específicamente desde la perspectiva de la capacidad de la red y el retardo punto a punto. Por lo tanto, el protocolo desarrollado en la sección anterior es evaluado

considerando un escenario de MRP en el que es posible atender a un número variable de usuarios.

Debido a que OPNET no cuenta con el dispositivo tipo puente entre IEEE 802.15.4 y Ethernet. Los escenarios de evaluación que serán explicados con mayor detalle más adelante en este capítulo son divididos en dos partes, la primer parte corresponde a la simulación del segundo salto en la red y la segunda parte a la simulación del tercer salto (Ver Figura 37).

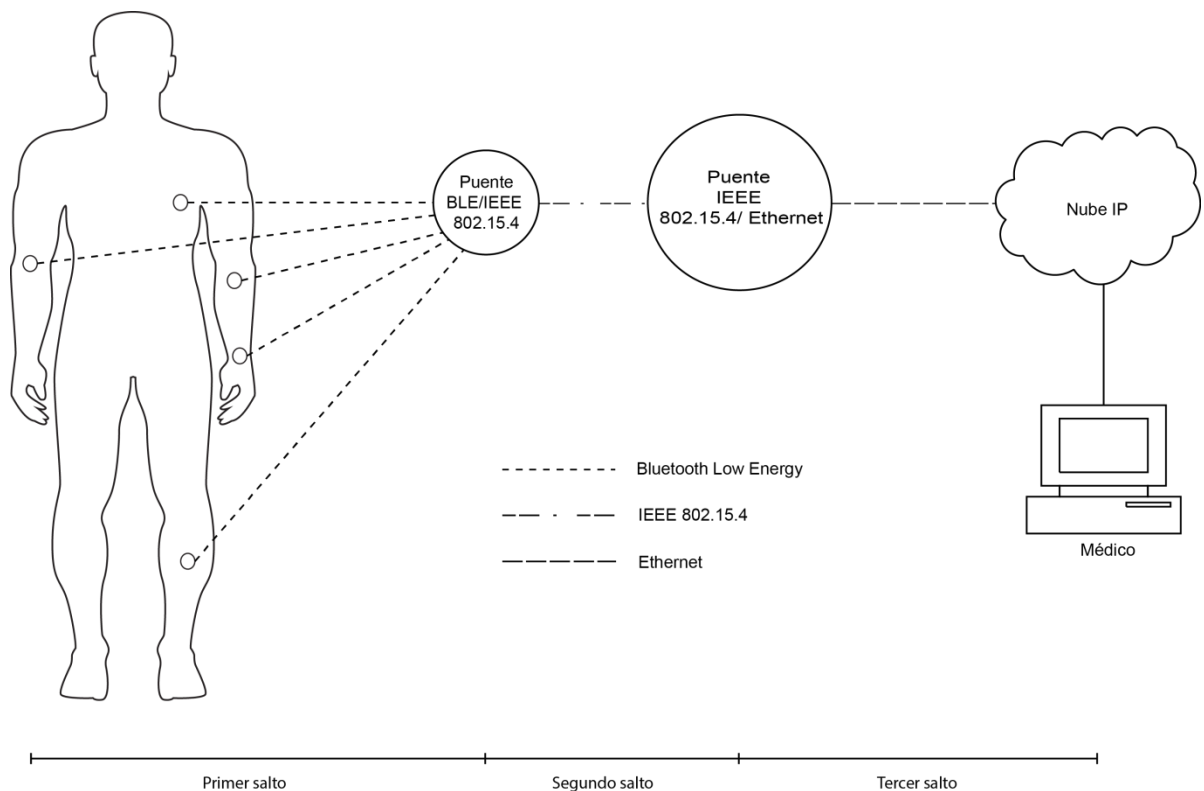


Figura 37 Saltos en la red heterogénea propuesta

El tráfico generado en la simulación del segundo salto es exportado y posteriormente importado en la simulación del tercer salto. De esa forma se soluciona el problema de no contar con el dispositivo tipo puente entre IEEE 802.15.4 y Ethernet. Cada usuario es representado por un coordinador IEEE 802.15.4, en el cual está situado el dispositivo tipo puente BLE/IEEE 802.15.4.

Tabla 7 Características principales de cada salto en la red

Salto	Tasa de datos	Método de acceso al medio	Frecuencia de operación
Bluetooth Low Energy	1 Mbps	FHSS	2.4 GHz
IEEE 802.15.4	250 kbps	CSMA/CA	2.4 GHz
Ethernet	100 Mbps	CSMA/CD	

Se envía el empaquetado que representa a la señal de ECG, oxígeno en la sangre y presión arterial, con un tamaño máximo de 127 bytes y uno mínimo de 60 bytes, ambos tamaños deben cumplir con la tasa de transmisión de 15,840 bps como se describe en la Tabla 2. Por otro lado, el audio cardiaco se envía en paquetes de 90 bytes máximo y 45 bytes mínimo, con una tasa de transmisión de 128 kbps como se sugiere en (Castorena, 2012).

Tabla 8 Tamaños de paquetes en el segundo salto

Empaquetado (ECG, oxígeno en la sangre y presión arterial)	
Paquete máximo (bytes)	Paquete mínimo (bytes)
127	60
Audio cardiaco	
Paquete máximo (bytes)	Paquete mínimo (bytes)
90	45

La simulación del tercer salto consiste de un área de servidores (usuarios) conectados a la nube IP y posteriormente a un área de clientes (médico) (Ver. Figura 38). En el área de servidores se importa el tráfico del segundo salto, en este punto se le agregan los encabezados de IP y UDP a la información. Posteriormente la información se transmite a través de la nube hasta un área de clientes donde se encuentra el receptor correspondiente al médico.



Figura 38 Escenario de evaluación del tercer salto

Tabla 9 Tamaños de paquetes en el tercer salto

Empaquetado (ECG, oxígeno en la sangre y presión arterial)			
Protocolo RTPC		Protocolo RTP	
Paquete máximo (bytes)	Paquete mínimo (bytes)	Paquete máximo (bytes)	Paquete mínimo (bytes)
141	74	136	69
Audio cardiaco			
Protocolo RTPC		Protocolo RTP	
Paquete máximo (bytes)	Paquete mínimo (bytes)	Paquete máximo (bytes)	Paquete mínimo (bytes)
122	77	118	73

6.3 Evaluación de desempeño

Las métricas de desempeño consideradas en este trabajo de tesis son:

- **Retardo punto a punto.**

El retardo punto a punto en este trabajo de tesis se considera el tiempo transcurrido desde que un paquete es transmitido desde el los sensores del primer salto hasta que son recibidos en el lugar remoto donde se encuentra el médico.

- **Pérdida de paquetes:**

- ***Paquetes descartados por el algoritmo de backoff (P_b)***

Este tipo de pérdidas ocurre cuando es superado el número de intentos para transmitir la información en el segundo salto, debido a que el canal está ocupado.

$$P_b = P_{Gn} - P_{Tx} \quad (1)$$

Donde:

P_{Gn} es el número de paquetes generados

P_{Tx} es el número de paquetes transmitidos

- ***Paquetes perdidos por colisiones (P_c)***

Este tipo de pérdidas suceden cuando dos o más usuarios realizan la transmisión de paquetes al medio en instantes de tiempo muy similares y los paquetes colisionan en el medio.

$$P_c = P_{Tx} - P_{Rx} \quad (2)$$

Donde:

P_{Tx} es el número de paquetes transmitidos

P_{Rx} es el número de paquetes recibidos

- ***Paquetes perdidos totales (P_T)***

Es la suma de los paquetes perdidos a lo largo de los tres saltos de la red heterogénea.

$$P_T = P_b + P_c + P_{c3} \quad (3)$$

Donde:

P_b es el número de paquetes descartados por el algoritmo de backoff en el segundo salto

P_c es el número de paquetes perdidos por colisiones en el segundo salto

P_{c3} es el número de paquetes perdidos por colisiones en el tercer salto

- **Throughput**

Es una medida que indica la cantidad de tráfico que es recibido exitosamente por unidad de tiempo (bps) y con ella se puede determinar la eficiencia de la red durante un periodo determinado.

Para evaluar el desempeño del nuevo protocolo de transporte sobre la red heterogénea se tomó en cuenta el retardo, el porcentaje de paquetes perdidos y el throughput hasta el tercer salto. Se consideran dos diferentes escenarios los cuales se definen a continuación.

6.3.1 Escenario 1

En la primer parte de este escenario se realiza un barrido desde 1 hasta 10 usuarios transmitiendo hacia un solo resumidero de información, el cual representado por un coordinador IEEE 802.15.4 tal y como se muestra en Figura 39. En este conjunto de pruebas todos los usuarios transmiten en el mismo canal y contienden por el medio cada que desean transmitir, la cama de pruebas utilizada se muestra en la Tabla 10.

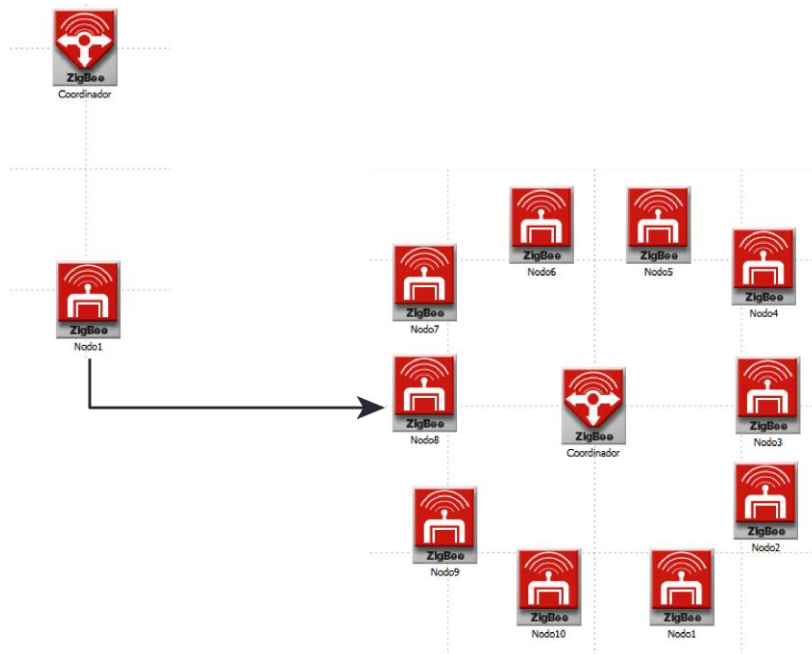


Figura 39 Esquema de evaluación del escenario 1 (Segundo salto)

Tabla 10 Cama de pruebas

Número de nodos (usuarios)		Tamaño de paquete (Bytes)		Tasa de datos	
Mín	Máx	Mín	Máx	ECG, Ox y PA	Audio Cardíaco
1	10	60	127	15,840 bps	128 kbps

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el escenario descrito anteriormente. Los resultados son divididos en dos conjuntos, primero se mostrarán los resultados correspondientes al empaquetado de variables fisiológicas (ECG, oxígeno en la sangre y presión arterial); para posteriormente mostrar las gráficas correspondientes a la señal de fonocardiograma (audio cardíaco).

En la Figura 40 y Figura 41 se muestra el porcentaje de paquetes perdidos (PPP) por el algoritmo de backoff y el PPP por colisiones cuando se transmite el empaquetado de variables fisiológicas (ECG, oxígeno en la sangre y presión arterial) conforme se incrementa el número de usuarios transmitiendo cuando se utiliza RTP y RTPC con los dos tamaños de paquete considerados (ver Tabla 8).

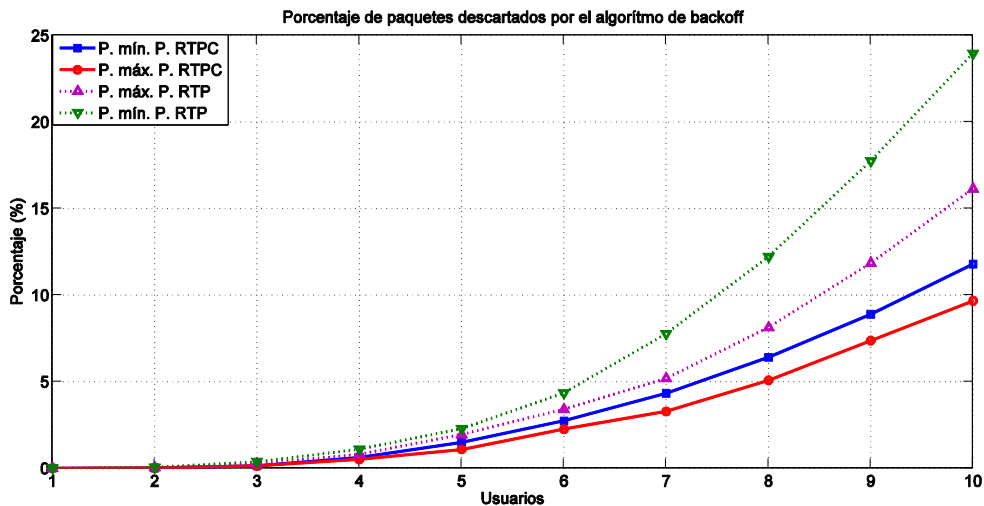


Figura 40 Porcentaje de paquetes descartados por el algoritmo de backoff

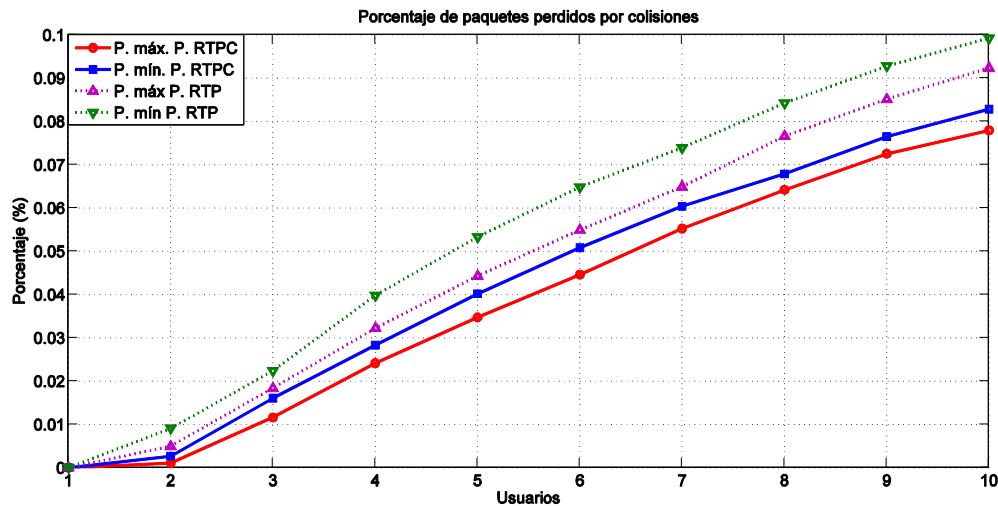


Figura 41 Porcentaje de paquetes perdidos por colisiones

En las gráficas de las Figura 40 y Figura 41 se puede observar que conforme se incrementa el número de usuarios el PPP se incrementa para RTP y RTPC. Esto es esperado debido a que se utiliza un método de acceso al medio basado en contención. Sin embargo, para todos los casos RTPC muestra una menor cantidad de paquetes perdidos debido a que la cantidad de encabezados que se usan permiten tener una carga útil más grande en comparación con RTP y con ello evitar la sobrecarga de la red conforme el número de usuarios aumenta.

Los paquetes con carga útil mayor permiten aumentar el tiempo de interarribo de los mismos para lograr la tasa de datos requerida, que en este caso es de 15,840 bps como se muestra en la Tabla 2. Esto permite a RTPC sobrecargar en menor medida la red y de esa manera lograr un menor porcentaje de pérdidas (Ver Figura 42).

Para realizar el cálculo del tiempo de interarribo de paquetes para una tasa de datos data se utiliza la siguiente ecuación:

$$t_{intb} = \frac{CU}{TD} \quad (4)$$

Donde:

CU es la carga útil en bits de cada paquete

TD es la tasa de datos en bps de la o las variables a transmitir

$$t_{intb}(RTPC PMAX) = \frac{864 \text{ bits}}{15,840 \text{ bps}} = 54.54 \text{ mseg}$$

$$t_{intb}(RTP PMAX) = \frac{736 \text{ bits}}{15,840 \text{ bps}} = 46.46 \text{ mseg}$$

$$t_{intb}(RTPC PMAX) > t_{intb}(RTP PMAX)$$

Figura 42 Ejemplo de cálculo del tiempo de interarribo de paquetes

En la Figura 43 y Figura 44 se muestran los resultados correspondientes a la transmisión de audio cardiaco. El audio cardiaco no se empaqueta con las otras variables debido a que si se realiza la transmisión en conjunto se superaría la MTU en el segundo salto y además no se cumpliría con la sensibilidad al retardo que requiere el ECG. En dichas figuras se pueden observar las gráficas correspondientes al PPP por el algoritmo de backoff y el PPP por colisiones respectivamente. En ambas gráficas se observa la comparación entre RTPC y RTP conforme se incrementa el número de usuarios, cada uno con los dos tamaños de paquete considerados (ver Tabla 8).

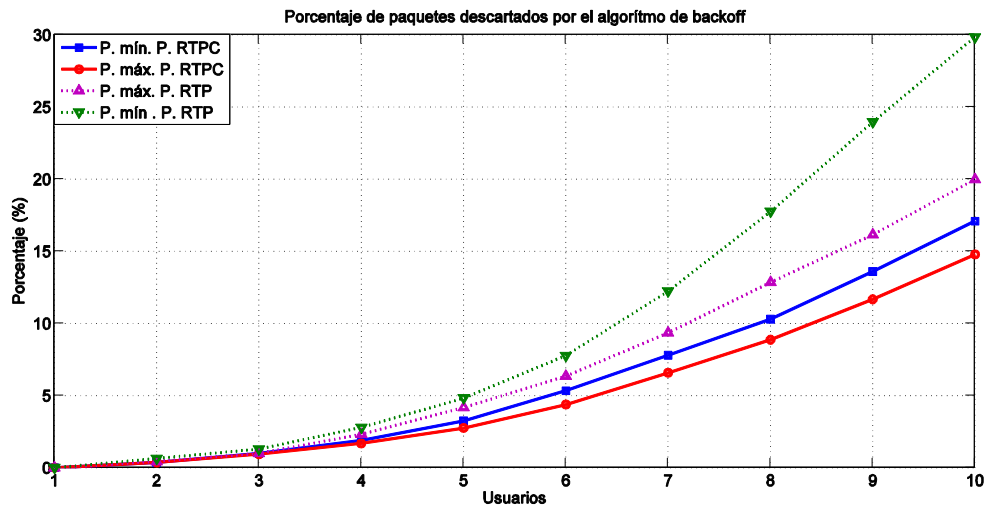


Figura 43 Porcentaje de paquetes descartados por el algoritmo de backoff al transmitir audio cardiaco

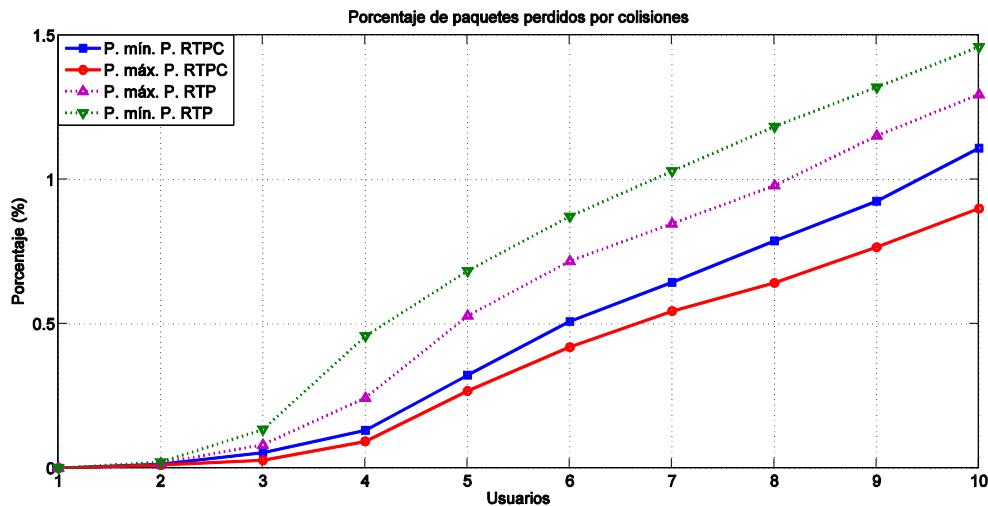


Figura 44 Porcentaje de paquetes perdidos por colisiones al transmitir audio cardiaco

Se puede notar en las gráficas de las Figura 43 y Figura 44 que, ya sea que se transmita audio cardiaco o las otras variables fisiológicas, cuándo el número de usuarios aumenta el PPP aumenta. También se puede observar que cuando solamente se encuentra un usuario transmitiendo en la red, utilizar cualquiera de los dos protocolos y tamaños de paquete no representa gran diferencia debido a que no existe contención por el medio. Sin embargo, a partir de dos usuarios RTPC con un empaquetado máximo presenta un mejor desempeño, debido a que la carga útil en esos paquetes es más grande evitando la sobrecarga de la red. Al igual que con el empaquetado de variables fisiológicas, tener una carga útil más grande en cada paquete permite aumentar el tiempo de interarribo

para una tasa de transmisión dada, a partir de lo anterior se logra disminuir la sobrecarga de la red y por lo tanto las pérdidas.

En la Figura 45 se observa el esquema de evaluación del tercer salto para este escenario, en el área de servidores se encuentra uno al que se le importa el tráfico proveniente del segundo salto y de esa manera transmitir los datos correspondientes a las variables fisiológicas a través de la nube IP, hasta llegar al área de clientes, en la cual se encuentra un equipo correspondiente al médico.



Figura 45 Esquema de evaluación del tercer salto

A continuación se muestran los resultados del Escenario 1 completo. Al igual que en segundo salto, primero se muestran los resultados obtenidos para el empaquetado de variables fisiológicas (ECG, oxígeno en la sangre y presión arterial) y después los correspondientes al audio cardíaco.

En la Figura 46, Figura 47 y Figura 48 se observan las gráficas correspondientes al retardo total, el PPP totales y el throughput total conforme incrementa el número de usuarios transmitiendo. Al igual que en el salto anterior se realiza una comparación entre RTPC y RTP con los dos tamaños de paquete considerados (ver Tabla 9).

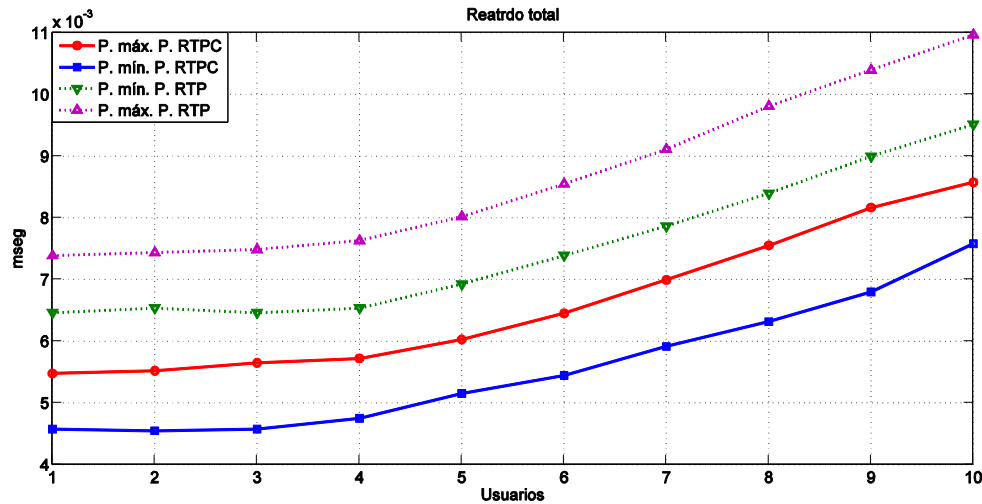


Figura 46 Retardo total

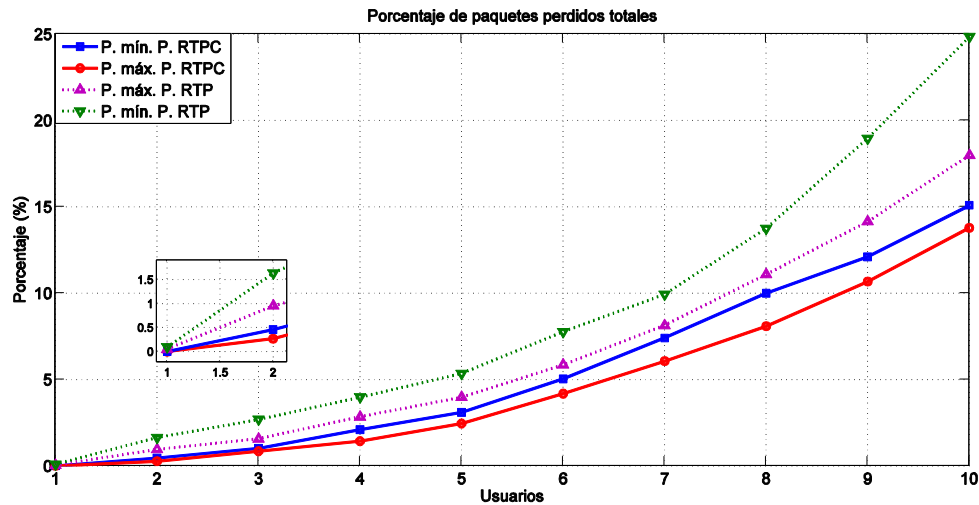


Figura 47 Porcentaje de paquetes perdidos totales

En las gráficas de las Figura 46 y Figura 47, se puede observar que al igual que en el salto anterior conforme el número de usuarios aumenta, el retardo y el PPP aumentan también. En la Figura 46 se puede notar que RTPC con el paquete de tamaño mínimo presenta un mejor desempeño en cuestiones de retardo, debido a que los paquetes pequeños duran menos en procesarse y por lo tanto menos en transmitirse.

En la Figura 47 donde se muestra el PPP totales, RTPC presenta un mejor desempeño para ambos tamaños de paquete. Esto es debido a que con los encabezados de RTPC el espacio para la carga útil aumenta provocando que la red se sature en menor medida

en comparación con RTP. En la misma figura se puede notar que al utilizar el protocolo RTPC con el tamaño de paquete máximo es posible atender a dos usuarios al mismo tiempo en la red, debido a que con ese número de usuarios no se supera el límite del 1% de pérdidas para considerar a la transmisión como en tiempo real y que con RTP solo es posible atender a uno.

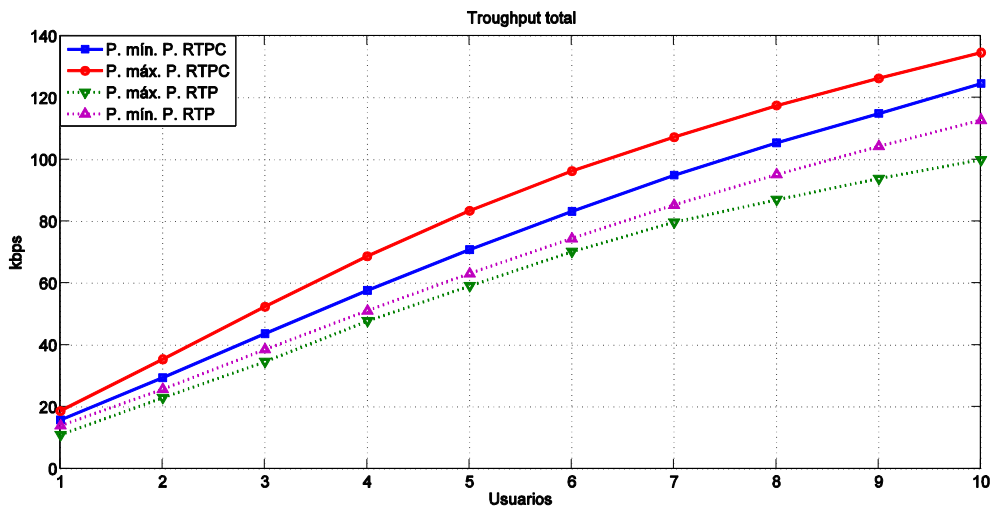


Figura 48 Troughput total

Como consecuencia de tener menor PPP totales con el tamaño de paquete máximo, en la Figura 48 donde se muestra el troughput total, se obtiene un mejor desempeño a lo largo de toda la red utilizando el mismo tamaño de paquete en conjunto con el protocolo RTPC, lo que quiere decir que el ancho de banda a lo largo de toda la red heterogénea es aprovechado de mejor manera en este caso.

A continuación, en la Figura 49, Figura 50 y Figura 51 se muestran los resultados obtenidos al transmitir audio cardiaco, al igual que en los resultados anteriores se realiza una comparación entre RTPC y RTP con los dos tamaños de paquete (ver Tabla 9).

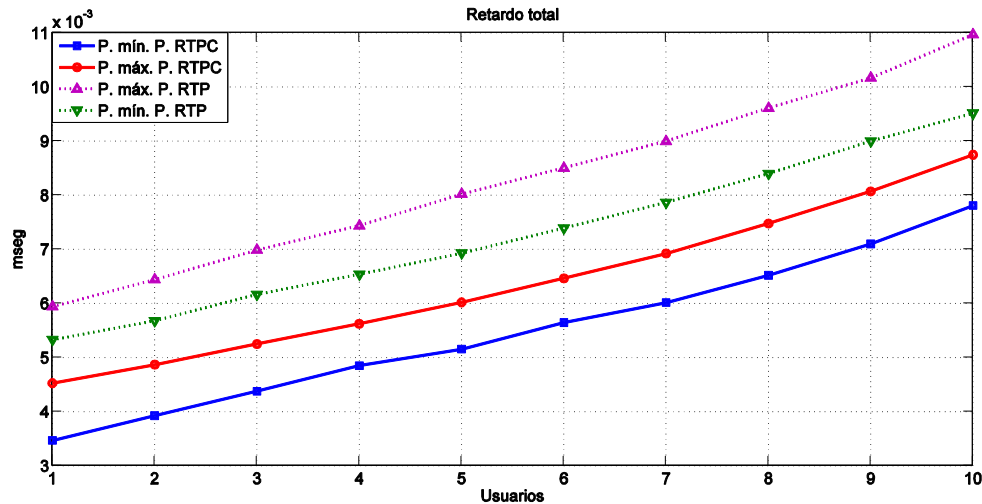


Figura 49 Retardo total al transmitir audio cardiaco

En las gráficas de la Figura 49, Figura 50 y Figura 51 se puede notar que existe un comportamiento similar al transmitir audio cardiaco o las otras variables fisiológicas. Se puede observar que solo utilizando el protocolo RTPC se puede atender por lo menos a un usuario en la red antes de superar el 1% en el porcentaje de pérdidas, mostrando además un mejor comportamiento en comparación con RTP.

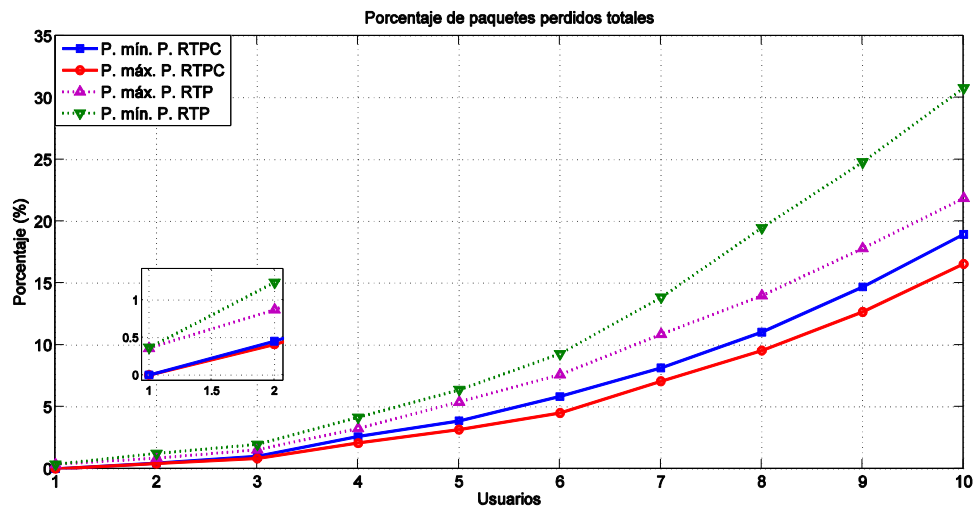


Figura 50 Porcentaje de paquetes perdidos totales al transmitir audio cardiaco

En la Figura 51 se puede observar nuevamente que al utilizar el tamaño de paquete máximo en conjunto con el protocolo RTPC se aprovechan de una manera más eficiente los recursos ofrecidos por las tres tecnologías que forman a la red

heterogénea, debido a la menor cantidad de PPP en comparación con RTP. Lo anterior debido a que RTPC utiliza una menor cantidad de información de control en cada paquete, lo que permite tener una carga útil más grande en comparación con RTP

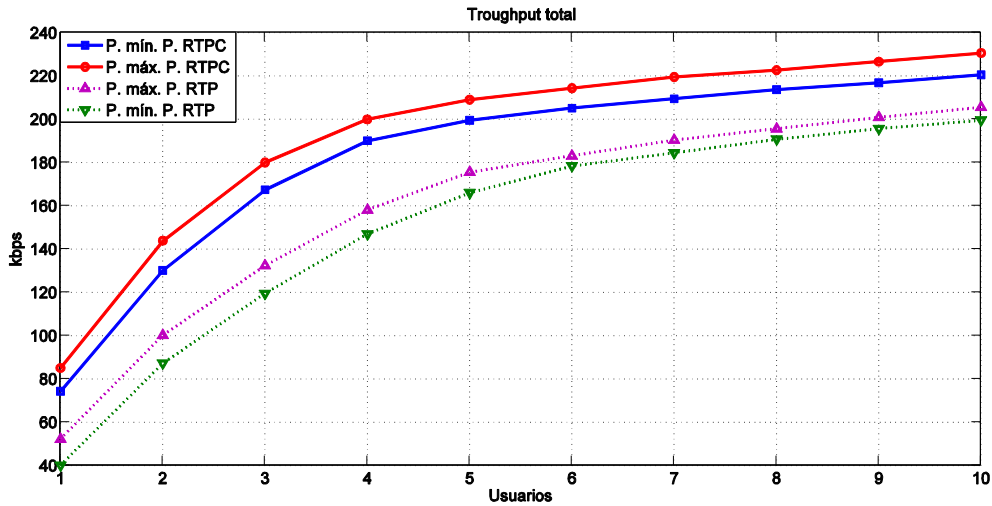


Figura 51 Troughput total al transmitir audio cardiaco

6.3.2 Escenario 2

En la primer parte de este escenario se realiza un barrido desde 1 hasta 10 usuarios, transmitiendo en diferente canal como se muestra en la Figura 52. Al transmitir cada usuario en un canal distinto no se tiene interferencia con los demás usuarios, es decir, que no existe contención por el medio. Debido a lo anterior, en el segundo salto de este escenario no existen pérdidas al utilizar cualquiera de los dos protocolos y tamaños de paquetes utilizados. La cama de pruebas es la misma del Escenario 1 (Ver Tabla 11) con la diferencia anteriormente mencionada.

Tabla 11 Cama de pruebas

Número usuarios		Tamaño de paquete (Bytes)		Tasa de datos	
Mín	Máx	Mín	Máx	ECG, Ox y PA	Audio Cardiaco
1	10	60	127	15,840 bps	128 kbps

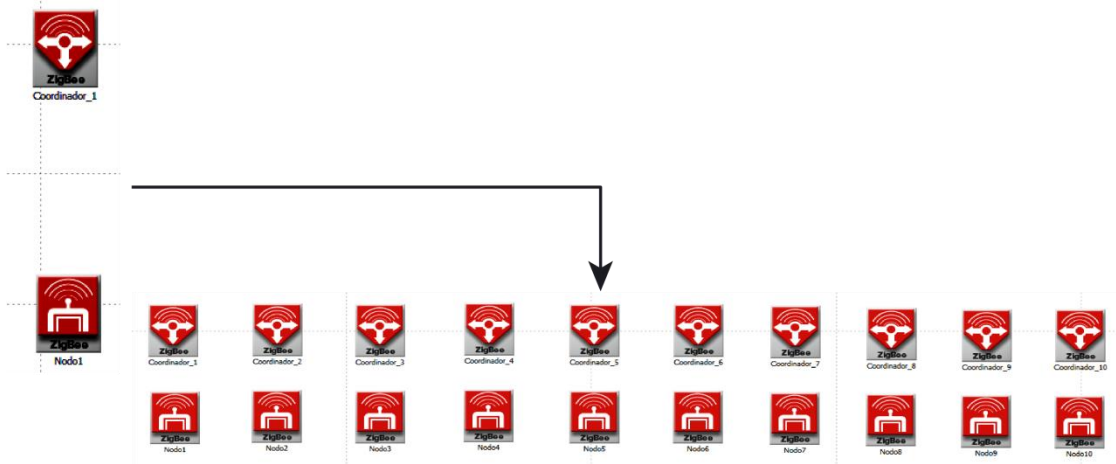


Figura 52 Esquema de evaluación del escenario 2 (Segundo salto)

En la Figura 53 se muestra el esquema de evaluación para el tercer salto en este escenario, al igual que en el Escenario 1, en el área de servidores se importa el tráfico proveniente del segundo salto, con la diferencia de que el tráfico de cada usuario se importa de forma independiente, debido a que cada usuario transmite en un canal distinto en el segundo salto del Escenario 2.



Figura 53 Esquema de evaluación del tercer salto

A continuación se muestran los resultados obtenidos a lo largo de los tres saltos de la red heterogénea, primero se muestran los resultados de la transmisión del empaquetado de variables fisiológicas y posteriormente los resultados correspondientes a la transmisión de la señal de audio cardiaco.

En la Figura 54, Figura 55 y Figura 56 se observan las gráficas correspondientes al retardo total, el PPP totales y el throughput total cuando se transmite el empaquetado de variables fisiológicas conforme incrementa el número de usuarios transmitiendo. Al

igual que en el salto anterior se realiza una comparación entre RTPC y RTP con los dos tamaños de paquete considerados (ver Tabla 9).

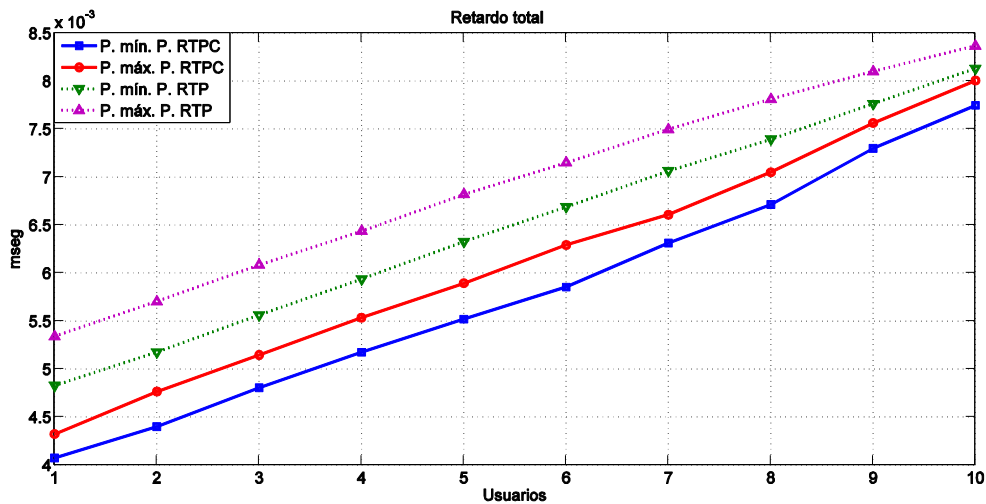


Figura 54 Retardo total

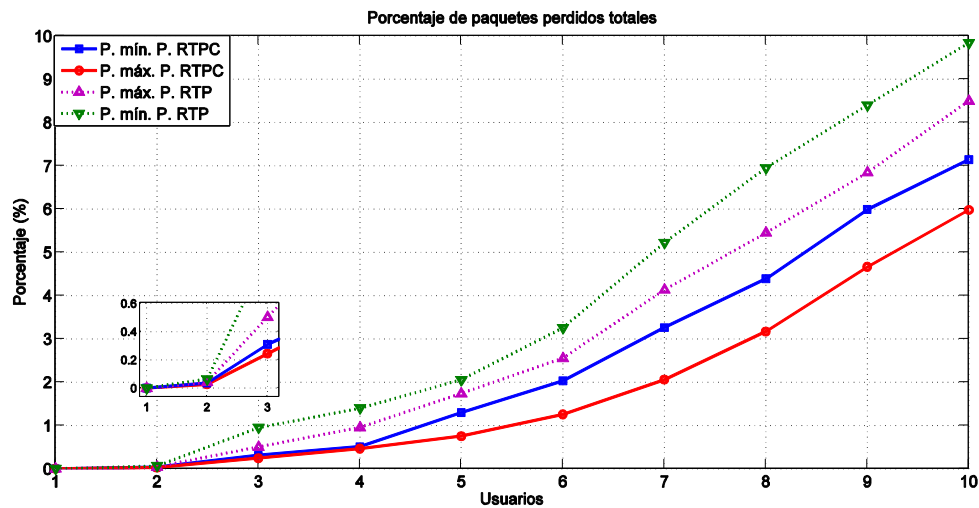


Figura 55 Porcentaje de paquetes perdidos totales

En las gráficas de la Figura 54 y Figura 55 se puede observar que conforme aumenta el número de usuarios aumenta el retardo y el PPP para RTP y RTPC, este tipo de pérdidas suceden debido a las colisiones con los demás paquetes provenientes de los usuarios conectados a la red y presentan un aumento exponencial mientras el número de usuarios conectados se incrementa. Sin embargo, se puede observar que al transmitir por canales distintos en el segundo salto utilizando el protocolo RTPC en conjunto con el tamaño de paquete máximo, es posible aumentar a cinco el número de

usuarios que pueden ser servidos al mismo tiempo antes de alcanzar el 1% en el PPP para ser considerada como una transmisión en tiempo real. RTPC muestra un mejor desempeño debido a que se utilizan encabezados pequeños permitiendo aumentar la carga útil de cada paquete en comparación con RTP.

En la gráfica de la Figura 56 se puede observar que se logra tener un aumento en el throughput total al emplear RTPC con el tamaño de paquete máximo, es decir, se hace un mejor uso de las capacidades de la red a diferencia de utilizar RTP con cualquiera de los dos tamaños de paquete considerados.

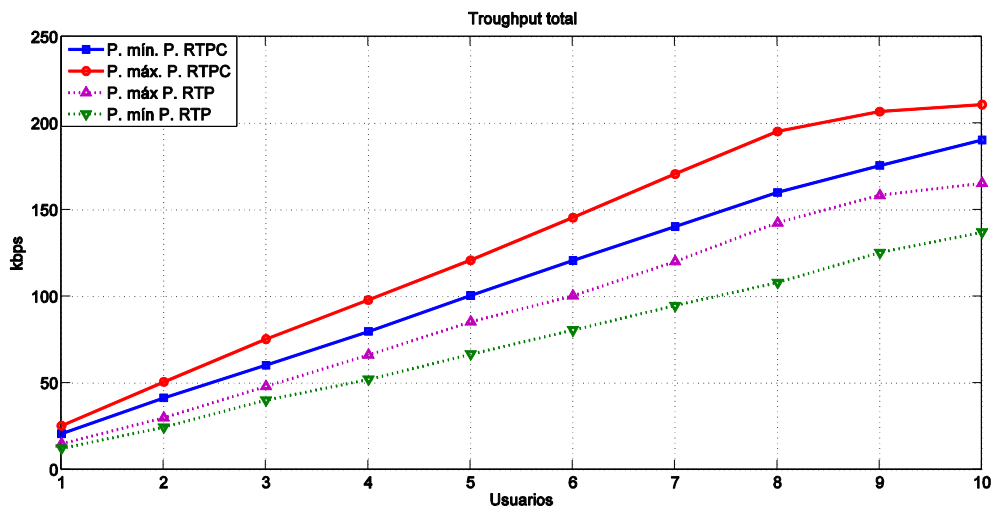


Figura 56 Troughput total

A continuación, en la Figura 57, Figura 58 y Figura 59 se muestran los resultados obtenidos al transmitir audio cardiaco, al igual que en los resultados anteriores se realiza una comparación entre RTPC y RTP con los dos tamaños de paquete considerados (ver Tabla 9).

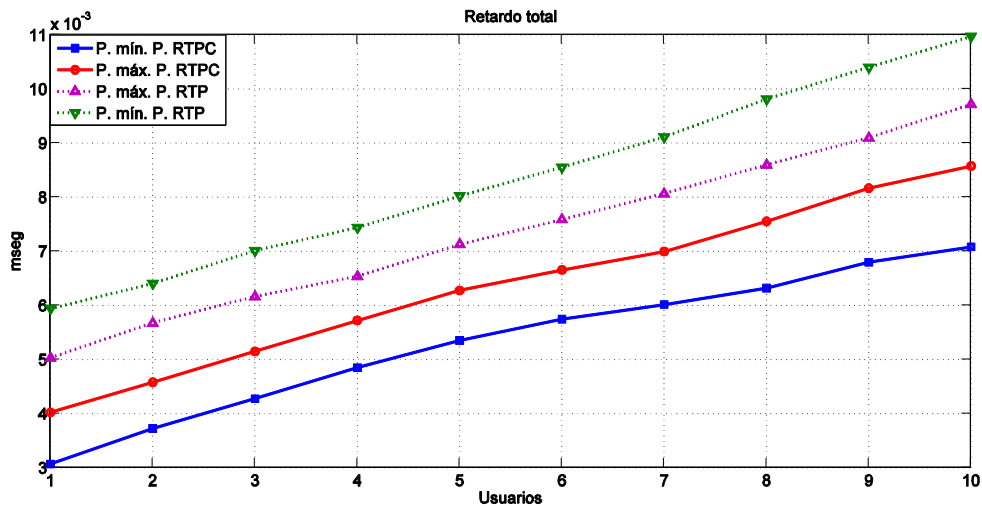


Figura 57 Retardo total al transmitir audio cardiaco

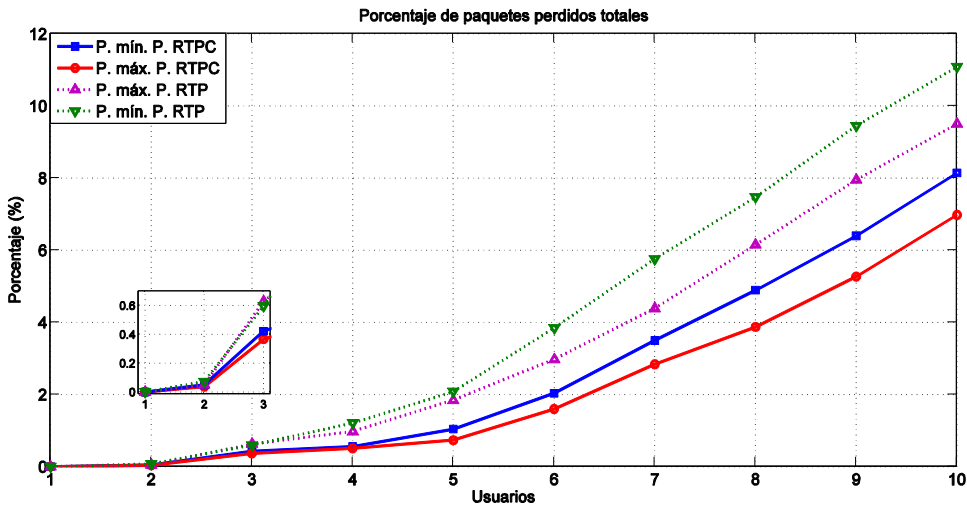


Figura 58 Porcentaje de paquetes perdidos totales al transmitir audio cardiaco

En las gráficas de la Figura 57 y Figura 58 se puede observar que un comportamiento similar al de la transmisión de las otras variables fisiológicas, es decir, conforme aumenta el número de usuarios, aumenta el retardo y el PPP aumenta de manera exponencial debido a las colisiones existentes. Particularmente en la Figura 58 se puede notar que utilizando RTPC con el tamaño de paquete máximo, es posible atender a cuatro usuarios al mismo tiempo en la red heterogénea sin superar el límite del 1% en el PPP para poder ser considerada como una transmisión en tiempo real y que con RTP es posible atender a tres usuarios.

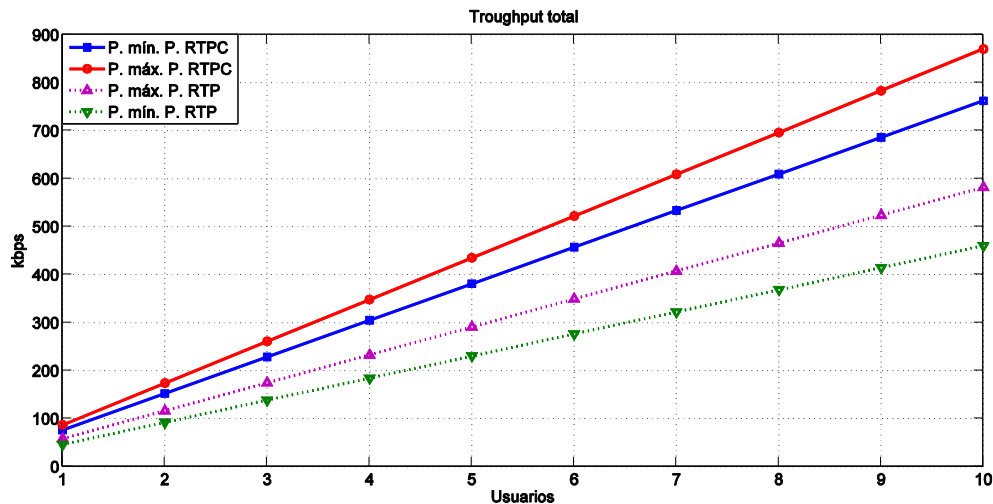


Figura 59 Troughput total al transmitir audio cardiaco

En la gráfica de la Figura 59 se puede observar que se hace un mejor uso de las capacidades de la red al utilizar el paquete máximo con el protocolo RTPC en comparación con RTP, debido a la menor cantidad de pérdidas que presenta y a mantener el retardo controlado.

6.4 Conclusiones sobre el desempeño del nuevo protocolo de transporte

En los resultados obtenidos en el Escenario 1 se puede observar que la mayoría de las pérdidas ocurren en el segundo salto (IEEE 802.15.4) debido a que los usuarios contenden por acceder al medio utilizando. Sin embargo, para todos los casos presentados RTPC muestra una menor cantidad de paquetes perdidos debido a que la cantidad de encabezados que se utilizan permiten tener una carga útil más grande, lo anterior permite aumentar el tiempo de interarribo para las tasas de datos consideradas en comparación con RTP, debido a lo anterior se logra evitar la sobrecarga de la red conforme el número de usuarios aumenta. En este contexto, el número de usuarios que pueden ser servidos se puede duplicar al utilizar el protocolo RTPC cuando se utiliza el tamaño de paquete máximo, en comparación con RTP al utilizar el mismo tamaño de paquete. El PPP disminuye 1%, lo anterior permite aumentar el throughput 5 Kbps y mantener el retardo controlado entre los 150 ms permitidos para que una transmisión se considere como de tiempo real.

Particularmente, en los resultados correspondientes a la transmisión de audio cardíaco en el Escenario 1 se puede observar que al utilizar el protocolo RTPC es posible atender a solo un usuario conectado en la red sin superar los niveles de pérdidas y retardo permitidos para que dicha transmisión se considere en tiempo real (Hernández E. O.). Al utilizar el protocolo RTP no es posible atender a ningún usuario cumpliendo con los requerimientos de retardo y pérdidas, debido a que cuando se tiene conectado un usuario en la red se pierden 1.5% de los paquetes que se transmiten, de lo anterior se puede concluir que el protocolo RTPC presenta un mejor comportamiento cuando se transmite audio cardíaco a través de la red heterogénea propuesta.

En los resultados obtenidos en el Escenario 2 se observa que la cantidad de pérdidas se puede reducir considerablemente al utilizar un canal diferente para cada usuario en el segundo salto de la red heterogénea, el PPP disminuye 1.5%, lo cual permite aumentar a 4 el número de usuarios servidos hasta el tercer salto cuando se utiliza el protocolo RTPC con el tamaño de paquete máximo en comparación con RTP con el mismo tamaño de paquete. Debido a lo anterior el throughput aumenta 20 Kbps y el retardo se mantiene entre los 150 ms permitidos.

Al realizar la transmisión de audio cardíaco en el Escenario 2 se puede observar en los resultados que al utilizar el protocolo RTP es posible atender a tres usuarios conectados en la red debido a que cuando existen 4 usuarios el porcentaje de paquetes perdidos se incrementa a 1%. Aunque es posible utilizar el protocolo RTP para realizar la transmisión de audio cardíaco a través de la red heterogénea propuesta, cuando se utiliza el protocolo RTPC es posible aumentar el número de usuarios que pueden ser servidos de 2 a 3. Con lo dicho anteriormente se logra uno de los principales objetivos de este trabajo de tesis, el cual consiste en incrementar el número de usuarios que pueden ser servidos al mismo tiempo en un enlace de comunicaciones heterogéneo..

Los resultados en ambos escenarios permiten comprobar que el protocolo propuesto tiene un mejor desempeño en comparación con el protocolo RTP en escenarios de MRP. Los encabezados que componen a RTPC permiten mantener controlado el retardo, reducir el porcentaje de paquetes perdidos y de esa manera aumentar el

throughput a lo largo de los tres saltos que componen a la red heterogénea. Todo lo anterior sin sobrepasar la carga útil máxima permitida por los primeros dos saltos de la red heterogénea.

La transmisión de audio cardíaco en ambos escenarios se realizó de manera exitosa en ambos escenarios utilizando el protocolo RTPC, lo anterior permite alcanzar uno de los objetivos particulares planteados para este trabajo de tesis. Además de lo anterior, se puede observar que es posible aumentar el número de usuarios servidos al utilizar el protocolo de transporte propuesto en este trabajo de tesis.

Capítulo 7 Conclusiones y trabajo futuro

7.1 Introducción

A lo largo de este trabajo de investigación surgieron diversos problemas a los cuales se les dio la mejor solución posible reforzando conocimientos y aprendiendo a manejar nuevas herramientas a lo largo del proceso. El objetivo de este capítulo es explicar los problemas que surgieron y las soluciones propuestas. Así como también proponer mejoras con trabajo a futuro.

La principal aportación de este trabajo de tesis recae en el diseño, desarrollo y evaluación de un nuevo protocolo de transporte para realizar la transmisión de variables fisiológicas sobre redes heterogéneas. Con lo cual se cumple en su totalidad con el objetivo principal de la tesis.

7.2 Conclusiones

En esta sección se presentan las principales conclusiones y aportaciones desarrolladas durante el proceso de investigación para el diseño, desarrollo y evaluación del nuevo protocolo de transporte sobre la red heterogénea.

7.2.1 Sobre el diseño del nuevo protocolo de transporte

Se investigó en la literatura lo referente a los protocolos de transporte utilizados para la transmisión de variables fisiológicas en escenarios de MRP actuales. A partir de este estudio se propuso el diseño de un nuevo protocolo de transporte para este tipo de escenarios. En el desarrollo de dicho protocolo es necesario considerar las capacidades de cada salto en la red heterogénea por la que se va a transmitir la información. A continuación se muestran las principales conclusiones a las que se llegaron sobre el diseño del nuevo protocolo de transporte.

- El diseño de un nuevo protocolo de transporte para escenarios de MRP no es trivial, debido a que cuentan con arquitecturas de red heterogéneas, las cuales cuentan con tasas de datos y capacidades diferentes en cada uno de sus saltos.
- Aún y cuando el protocolo RTP puede ser utilizado en escenarios de MRP, dicho protocolo no fue diseñado para ser utilizado en enlaces de comunicaciones heterogéneas. Sin embargo, como se demostró, RTP puede ser modificado sin alterar sus características principales, reduciendo el número de encabezados que son agregados a la carga útil de los paquetes y de esa manera aprovechar al máximo las características de las redes heterogéneas utilizadas en escenarios de MRP modernos.
- RTPC se diseñó tomando en cuenta las capacidades de cada tecnología que conforma cada salto en la red heterogénea y el perfil de tráfico de las variables fisiológicas a transmitir. Esto permitió reducir la información de control agregada a cada paquete aumentando la carga útil de los mismos, lo anterior trae consigo una reducción en el PPP en comparación con RTP.
- Tomar en cuenta que la información atravesará diferentes tecnologías para llegar a su destino es una de las características más importantes de RTPC.
- Otra de las características más importantes de RTPC recae en los encabezados pequeños que lo forman, lo anterior permite aumentar la carga útil de cada paquete reduciendo la información de control en ellos en comparación con RTP.
- La simplicidad en el diseño del nuevo protocolo de transporte (RTPC) lo convierte en una alternativa viable para ser utilizado en el escenario de MRP propuesto en este trabajo de tesis, el cual presenta una arquitectura de red heterogénea en el enlace de comunicaciones.

7.2.2 Sobre la evaluación desempeño del nuevo protocolo de transporte en la red heterogénea

Teniendo definida la propuesta del nuevo protocolo de transporte (RTPC) y la propuesta del tercer salto en la red heterogénea propuesta en (Casillas, 2012), se procedió a realizar la evaluación mediante diferentes escenarios implementados en OPNET.

- Aún y cuando existen modeladores de red como OPNET, los cuales cuentan con grandes capacidades, evaluar un enlace de comunicaciones homogéneo requiere conocimientos sólidos sobre la tecnología a evaluar. Realizar la evaluación de un sistema de comunicaciones heterogéneo es aún más complicado, debido a las diferentes tecnologías que lo conforman. Comúnmente los protocolos de interconexión de los dispositivos tipos puente para las diferentes tecnologías no se encuentran implementados en el modelador de red, lo cual es una problemática importante. Debido a lo anterior se propuso una metodología de evaluación para enlaces de comunicaciones heterogéneos, haciendo de esto una de las contribuciones más importantes de este trabajo de tesis.
- Las características en el diseño RTPC mencionadas en la sección anterior, permiten obtener mejoras visibles en los resultados en ambos de escenarios de evaluación. Por ejemplo, en el Escenario 1 disminuir 1% el PPP, aumentar el throughput 5 Kbps y mantener el retardo controlado entre los 150 ms.
- En general, el protocolo propuesto en este trabajo de tesis presentó un mejor desempeño en comparación con RTP, pero los mejores se resultados en cuestión de desempeño se obtuvieron con el tamaño de paquete máximo.
- Al utilizar diferentes frecuencias para transmitir la información se logran mitigar las pérdidas en el segundo salto de la red heterogénea debido a que no se

contiene por el medio para realizar la transmisión, lo anterior permite aumentar el número de usuarios conectados al mismo tiempo en la red.

- Utilizar diferentes canales (frecuencias) para realizar la transmisión de variables fisiológicas trae consigo un aumento en los dispositivos que son utilizados en enlace, debido a que para cada usuario es necesario tener un coordinador. Lo anterior requiere un aumento en los recursos económicos necesarios para la implementación de la red.

7.3 Trabajo futuro

Una vez cumplidos los objetivos planteados inicialmente, se considera que aún existen oportunidades de desarrollo en el área de la transmisión de variables fisiológicas en escenarios de MRP. A continuación se muestran las recomendaciones relacionadas con este trabajo investigación para trabajo futuro que puede llevarse a cabo.

- Investigar si es posible implementar los mismos escenarios de simulación realizados en este trabajo de tesis en una plataforma de software libre, para no tener limitaciones en cuestiones de licencias y permisos.
- Desarrollar una plataforma de simulación con múltiples modelos de propagación en los primeros dos saltos, para tener en cuenta los efectos del canal radio.
- Implementar físicamente la red heterogénea multisaltos y el nuevo protocolo de transporte, con la finalidad de observar los efectos de los dispositivos y el canal que pueden afectar la transmisión.
- Investigar si es posible comprimir la información referente a las variables fisiológicas con algún codificador existente, para posteriormente realizar diferentes escenarios de simulación y verificar su desempeño.

- Investigar e implementar el código de canal más adecuado, con la finalidad de detectar y corregir errores en la transmisión.

Lista de referencias

- Abbas , A. K., & Bassam, R. (2009). Phonocardiography signal processing. *Synthesis Lectures on Biomedical Engineering*, 4(1), 1-194.
- Acampora, A. S. (2013). *An introduction to broadband networks: LANs, MANs, ATM, B-ISDN, and optical networks for integrated multimedia telecommunications*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- Adibi, S. (2015). *Mobile Health: A Technology Road Map (Vol. 5)*. Springer.
- Ahmed, A., Zaidi, S., & Ahmed , N. (2004, June). Performance evaluation of Transmission Control Protocol in mobile ad hoc networks. *In Networking and Communication Conference, 2004. INCC 2004. International* (págs. 13-18). IEEE.
- Bangale, K., Gupta, N., Parihar, S. S., Nadhe, K., & Mankar, G. (2014). Remote data collection server: E-Health care. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 2(2), 2938-42.
- Barriga Vázquez, W. E., & Zúñiga Calle , F. P. (2006). *Tecnologías inalámbricas de corto alcance: zigbee y bluetooth*. Doctoral dissertation.
- Bautista, M. d. (2010). *Oximetría remota via fibras ópticas para aplicación en telemedicina*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autonoma de México, Facultad de ingeniería, México, D. F.
- Benocci, M., Farella, E., Benini, L., & Vanzago, L. (2009). Optimizing ZigBee for data streaming in body-area bio-feedback applications. *Advances in sensors and Interfaces. IWASI 2009. 3rd International Workshop on* (págs. 150 – 155). IEEE.
- Bentham, J. (2000). *TCP/IP Lean: Web servers for embedded systems (Vol. 6600)*. Lawrence, KS: CMP books.
- Bianchi, G. (2000). Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 18(3), 535-547.
- Bickley, L., & Szilagyi, P. G. (2012). *Bates' guide to physical examination and history-taking*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Brunetti, F., Moreno, J., Ceres, R., Calderón, L., & Pons, J. (2004). *Redes inalámbricas de área personal al servicio de los discapacitados y las personas mayores*.
- Casillas, M. O. (2012). *Diseño de una red híbrida de dos saltos para aplicaciones de redes de sensores en telemonitoreo y telemedicina*. Tesis de maestría, Centro de

Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California.

Castorena, L. (2012). *Análisis y adaptación de codecs para la transmisión de audio cardíaco sobre redes inalámbricas con tasas de datos bajas/medias*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California.

Choi, Y., Krause, J., Seo, H., Capitan, K., & Chung, K. (2006). Telemedicine in the USA: standardization through information management and technical applications. *Communications Magazine, IEEE*, 44(4), 41-48.

Collotta, M., & Pau, G. (2015). Bluetooth for Internet of Things: A fuzzy approach to improve power management in smart homes. *Computers & Electrical Engineering*.

Corchado, J., Bajo, J., Tapia, D., & Abraham, A. (2010). Using Heterogeneous Wireless Sensor Networks in a Telemonitoring System for Healthcare. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, 14(2), 234-240.

CSR plc. (2010). Bluetooth 4.0: Low Energy. Obtenido de <http://www.chapters.comsoc.org/vancouver/BTLER3.pdf>

Dantés, O., Sesma, S., Becerril, V., Knaul, F., Arreola, H., & Frenk, J. (2011). Sistema de salud de México. *salud pública de méxico*, 53, s220-s232.

Davis, M., Freeman, M., Kaye, J., Vuckovic, N., & Buckley, D. (2014). A Systematic Review of Clinician and Staff Views on the Acceptability of Incorporating Remote Monitoring Technology into Primary Care. *Telemedicine and e-Health*, 20(5), 428-438.

Diallo, O., Rodrigues, J. J., & Sene, M. (2012). Real-time data management on wireless sensor networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(3), 1013-1021.

Djebbari, A. (1999). *Synthèse des méthodes d'analyse temporelle, spectrale et spectro-temporelle du signal phonocardiogramme*. Electronic magister thesis of signals and systems, Departement of electronics, faculty of science engineering, university Aboubekr belkaid Tlemcen, Algeria, 18-24.

Douglas E. Comer, H. A. (1996). *Redes globales de información con Internet y TCP/IP*. Prentice Hall.

- Echeverry, J. D., López, A. F., & López, J. (2007). Reconocimiento de valvulopatías cardíacas en señales de fonocardiografía empleando la transformada Gabor. *Scientia et Technica*, 1(34).
- Ekeland, A., Bowes, A., & Flottorp, S. (2010). Effectiveness of telemedicine: a systematic review of reviews. *International journal of medical informatics*, 79(11), 736-771.
- Fall, K. R., & Stevens, W. R. (2011). *TCP/IP illustrated, volume 1: The protocols*. addison-Wesley.
- Fedyk, D., & Allan, D. (2008). Ethernet data plane evolution for provider networks [next-generation carrier ethernet transport technologies]. *Communications Magazine, IEEE*, 46(3), 84-89.
- Ferrero, A., & Wilson, S. S. (1996). *Evolving Ethernet: Data Communications and Networking Series*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- Field, M. J. (1996). *Telemedicine: A guide to assessing telecommunications for health care*. National Academies Press.
- Frederick, R., Jacobson, V., & Design, P. (2003). RTP: A transport protocol for real-time applications. *IETF RFC3550*.
- Gallego, J., Hernandez-Solana, A., Canales, M., Lafuente, J., Valdovinos, A., & Fernandez-Navajas, J. (2005). Performance analysis of multiplexed medical data transmission for mobile emergency care over the UMTS channel. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, 9(1): 13 - 22., 9(1), 13-22.
- Garcia, N. M., Freire, M. M., & Monteiro, P. P. (2008). The Ethernet Frame Payload Size and Its Effect on IPv4 and IPv6 Traffic. In *Information Networking, 2008. ICOIN 2008. International Conference on* (págs. 1-5). IEEE.
- Giger, J., Pope, N., Vogt, H., Gutierrez, C., Newland, L., Lemke, J., y otros. (2015). Remote patient monitoring acceptance trends among older adults residing in a frontier state. *Computers in Human Behavior*, 44, 174-182.
- Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. (2014). *Segundo Informe de Gobierno 2013 - 2014. Anexo Estadístico*. México D. F.
- Goldsmith, A. (2005). *Wireless communications*. Cambridge university press.
- Gomez, C., Oller, J., & Paradells, J. (2012). Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology. *Sensors*, 12(9), 11734-11753.

- González-Valenzuela, S., Chen, M., & Leung, V. C. (2011). Mobility Support for Health Monitoring at Home Using Wearable Sensors. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, 15(4), 539-549.
- Goode, B. (2002). Voice over internet protocol (VoIP). *Proceedings of the IEEE*, 90(9), 1495-1517.
- Gupta, N. (2013). *Inside bluetooth low energy*. Artech house.
- Gutierrez, J. A. (2004). On the use of IEEE 802.15. 4 to enable wireless sensor networks in building automation. In Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004. *PIMRC 2004. Vol. 3*, págs. 1865-1869. IEEE.
- Gyselinx, B., Vullers, R. J., Van Hoof, C., Ryckaert, J., Yazicioglu, R. F., Fiorini, P., y otros. (2006). Human++: Emerging Technology for Body Area Networks. In *VLSI-SoC*, (págs. 175-180).
- Hallivuori, V. (2000). Real-time Transport Protocol (RTP) security. In *Seminar on Network Security Tik (Vol. 1101501)*.
- Hameed, M., Trsek, H., Graeser, O., & Jasperneite, J. (2008). Performance investigation and optimization of IEEE802. 15.4 for industrial wireless sensor networks. In *Emerging Technologies and Factory Automation, 2008. ETFA 2008. IEEE International Conference on* (págs. 1016-1022). IEEE.
- Hankins, G. (2014). Evolution of ethernet speeds what's new and what's next. *APRICOT 2014*.
- Hartmann, E. (2003). ECG front-end design is simplified with microconverter. *Analog Dialogue*, 37(4), 1-5.
- Hernández, E. O. (s.f.). *Transmisión de datos en Tiempo Real, Síntesis de protocolos y redes para transmisión en tiempo real*. Archivo disponible en: [http://www.disca.upv.es/enheror/pdf/Doctorado2Credit os. pdf](http://www.disca.upv.es/enheror/pdf/Doctorado2Credit%20os.pdf), 35-37.
- Hernández, J., Sánchez, M., Sandoval, E., Ramírez, C., & Gómez., M. (2010). Transferencia tecnológica y capacidades de innovación en el sector salud: el caso de telemedicina en México.
- Hu, F., Jiang, M., Celentano, L., & Xiao, Y. (2008). Robust medical ad hoc sensor networks (MASN) with wavelet-based ECG data mining. *Ad Hoc Networks*, 6(7), 986-1012.
- Hubbs, P., Rindfleisch, T., Godin, P., & Melmon, K. (1998). Medical information on the Internet. *JAMA*, 280(15), 1363-1363.

- Hunt, C. (2002). *TCP/IP network administration (Vol. 2)*. O'Reilly Media, Inc.
- i Serra, J. C., Aspas, J. P., Ibáñez, L. C., i Augé, A. C., Serra, X. H., Martínez, V. B., y otros. (2010). *Redes de comunicaciones. De la telefonía móvil a internet*. Univ. Politèc. de Catalunya.
- Istepanian, R., Laxminarayan, S., & Pattichis, C. (2006). *M-health*. Springer Science+ Business Media, Incorporated.
- Javaid, N., Yaqoob, M., Khan, M., Khan, M., Javaid, A., & Khan, Z. (2013). Analyzing delay in wireless multi-hop heterogeneous body area networks. *arXiv preprint arXiv*, 1304.1059.
- Jennings, C., Hardie, T., & Westerlund, M. (2013). Real-time communications for the web. *Communications Magazine, IEEE*, 51(4), 20-26.
- Jones, K. H., Ford, D. V., Jones, C., Dsilva, R., Thompson, S., Brooks, C. J., y otros. (2014). A case study of the secure anonymous information linkage (SAIL) gateway: A privacy-protecting remote access system for health-related research and evaluation. *Journal of biomedical informatics*, 50, 196-204.
- Jurcik, P., Koubâa, A., Alves, M., Tovar, E., & Hanzalek, Z. (2007). A simulation model for the IEEE 802.15. 4 protocol: delay/throughput evaluation of the GTS mechanism. In *Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 2007. MASCOTS'07. 15th International Symposium on* (págs. 109-116). IEEE.
- Kailas, A., & Ingram, M. A. (2009). Wireless Aspects of Telehealth. *Wireless personal communications*, 51(4), 673-686.
- Kang, K., Ryu, J., Hur, J., & Sha, L. (2013). Design and QoS of a wireless system for real-time remote electrocardiography. *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 17(3), 745-755.
- Kaschel, H., & Enrique San Juan, U. (2006). *Consideraciones Técnicas para Elaborar un Estándar Definitivo VoIP*.
- Khan, J., Yuce, M., & Karami, F. (2008). Performance evaluation of a wireless body area sensor network for remote patient monitoring. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2008. EMBS 2008. 30th Annual International Conference of the IEEE* (págs. 1266-1269). IEEE.
- Kim, M. J., Oh, M. W., Cho, M. E., Lee, H., & Kim, J. T. (2012). A critical review of user studies on healthy Smart Homes. *Indoor and Built Environment*, 1420326X12469733.

- Kim, T., Park, J. S., Chong, H., Kim, K., & Choi, B. D. (2008). Performance analysis of IEEE 802.15. 4 non-beacon mode with the unslotted CSMA/CA. *IEEE Communications Letters*, 12(4), 238-240.
- Koh, B. K., & Kong, P. Y. (2006). Performance Study on ZigBee-Based Wireless Personal Area Networks for Real-Time Health Monitoring. *ETRI journal*, 28(4), 537-540.
- Kozlovsky, M., Kovacs, L., & Karoczkai, K. (2015). Cardiovascular and Diabetes Focused Remote Patient Monitoring. In *VI Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2014* (págs. 568-571). Paraná, Argentina 29, 30 & 31 October 2014: Springer International Publishing.
- Kwak, K., Ullah, S., & Ullah, N. (2010). An Overview of IEEE 802.15.6 Standard. In *Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL), 2010 3rd International Symposium on*. 1 - 6, págs. 1-6. IEEE.
- Larzon, L. A., Degermark, M., & Pink, S. (1999). *UDP lite for real time multimedia applications*. Hewlett-Packard Laboratories.
- Law, D., Dove, D., D'Ambrosia, J., Hajduczenia, M., Laubach, M., & Carlson, S. (2013). Evolution of ethernet standards in the IEEE 802.3 working group. *Communications Magazine, IEEE*, 51(8), 88-96.
- Lian, F. L., Moyne, J. R., & Tilbury, D. M. (2001). Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet. *Control Systems, IEEE*, 21(1), 66-83.
- Liu, P. X., Meng, M., Ye, X., & Gu, J. (2002). An UDP-based protocol for internet robots. In *Intelligent Control and Automation, 2002. Proceedings of the 4th World Congress on (Vol. 1, pp. 59-65)*. IEEE.
- Lu, Z., & Yang, H. (2012). *Unlocking the power of OPNET modeler*. Cambridge University Press.
- Ludwig, W., Wolf, K. H., Duwenkamp, C., Gusew, N., Hellrung, N., Marschollek, M., y otros. (2012). Health-enabling technologies for the elderly—an overview of services based on a literature review. *Computer methods and programs in biomedicine*, 106(2), 70-78.
- Malindi, P. (2011). *QoS in telemedicine*. INTECH Open Access Publisher.
- Meystre, S. (2005). The Current State of Telemonitoring: A Comment on the Literature. *Telemedicine Journal & e-Health*, 11(1), 63-69.

- Misic, J., & Misic, V. (2009). Bridging between IEEE 802.15. 4 and IEEE 802.11 b networks for multiparameter healthcare sensing. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 27(4), 435-449.
- Misic, J., & Misic, V. B. (2010). Bridge performance in a multitier wireless network for healthcare monitoring. *Wireless Communications, IEEE*, 17(1), 90-95.
- Monteagudo, J., Moreno, O., García, J., & Reig, J. (2004). Redes inalámbricas para los nuevos servicios personales de e-salud basados en tecnologías de inteligencia ambiental. *I+S: Informática y Salud*.
- Murgia, F., Cotognini, C., Montemitro, E., Cilli, M., Renzetti, E., Lucidi, V., y otros. (2012). Evaluation of compliance to telehomecare (THC) in a group of patients with cystic fibrosis (CF) in a period of 2 years. *La Clínica terapéutica*, 163(3), e111.
- Nedelcu, A., Sandu, F., Machedon-Pisu, M., Alexandru, M., & Ogrutan, P. (2009). Wireless-based remote monitoring and control of intelligent buildings. *In Robotic and Sensors Environments, 2009. ROSE 2009. IEEE International Workshop on* (págs. 47-52). IEEE.
- Nigenda-López, G., Juárez-Ramírez, C., Ruiz-Larios, J., & Herrera, C. (2013). Social participation and quality of health care: the experience of citizens' health representatives in Mexico. *Revista de Saúde Pública*, 47(1), 44-51.
- Nitzan, M. (2011). Automatic noninvasive measurement of arterial blood pressure. *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*, 14(1), 32-37.
- Nunemacher, G. (1997). *Introducción a las redes de área local*. Thomson-Paraninfo.
- Núñez, D. R. (2013). *Incremento de enfermedades crónicas en el 2013*. PwC México.
- Okdem, S. (2015). A real-time noise resilient data link layer mechanism for unslotted IEEE 802.15. 4 networks. *International Journal of Communication Systems*.
- OMS/OPS. (2005). *Estrategia de cooperación con el país: México*.
- OPS. (2009). *Situación de salud en las Américas: Indicadores básicos 2009*. OMS.
- Pahlavan, K. (2011). *Principles of wireless networks: A unified approach*. John Wiley & Sons, Inc.
- Palmer, M. (2012). *Hands-on Networking Fundamentals*. Cengage learning.

- Park, T. R., Kim, T. H., Choi, J. Y., Choi, S., & Kwon, W. H. (2005). Throughput and energy consumption analysis of IEEE 802.15. 4 slotted CSMA/CA. *Electronics Letters*, 41(18), 1017-1019.
- Pawar, P., Jones, V., Van Beijnum, B., & Hermens, H. (2012). A framework for the comparison of mobile patient monitoring systems. *Journal of biomedical informatics*, 45(3), 544-556.
- Pecar, J. A. (1993). *The McGraw-Hill Telecommunications Factbook*. McGraw-Hill Osborne Media.
- Perkins, C. (2010). *IP mobility support for IPv4, revised*.
- Perrey, H. (2012). The Concept of Bluetooth Low Energy with Merkle's Puzzle. *Ausarbeitung Masterkurs, Projekt, 1*.
- Pizzut, G., Cifaldi, S., & Nolfi, G. (1985). Digital sampling rate and ECG analysis. *Journal of biomedical engineering*, 7(3), 247-250.
- Pollin, S., Ergen, M., Ergen, S. C., Bougard, B., Van der Perre, L., Moerman, I., y otros. (2008). Performance analysis of slotted carrier sense IEEE 802.15. 4 medium access layer. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 7(9), 3359-3371.
- Postel, J. (1980). *User datagram protocol*. Ixi.
- PWC. (2013). *Socio-economic impact of mHealth An assessment report for Brazil and Mexico*.
- Ramírez, C., & Hernández, M. (s.f.). Procesamiento en tiempo real de variables Fisiológicas. *Universidad Nacional de Experimental de Táchira, Decanato de Investigación, Grupo de Biomédica*.
- Rehman, M. U., Gao, Y., Wang, Z., Zhang, J., Alfadhl, Y., Chen, X., y otros. (2010). Investigation of on-body bluetooth transmission. *IET microwaves, antennas & propagation*, 4(7), 871-880.
- Rooney, C. D. (1999). Standing At The Millennium's Dawn: Telemedicine Leads Our Health Care System Into The Twenty-First Century. *Compensation and Benefits Management*, 15, 42-48.
- Schulzrinne, H., Fokus, G., Casner, S., Frederick, R., & Jacobson, V. (1996). *RTP: A transport protocol for real-time applications*. RFC 1889.
- Scott, R., Mars, M., Scott, R., & Mars, M. (2015). Telehealth in the developing world: current status and future prospects. *OncoTargets and Therapy*, 8, 289-294.

- Sharma, S., Vyas, A., Thakker, B., Mulvaney, D., & Datta, S. (2011). Wireless Body Area Network for health monitoring. *In Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), 2011 4th International Conference on*. 4, págs. 2183-2186. IEEE.
- SIG, B. (2010). *Bluetooth Core Especification V.4.0*.
- Sikdar, B. (2013). A study of the environmental impact of wired and wireless local area network access. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 59(1), 85-92.
- Skorin-Kapov, L., & Matijasevic, M. (2010). Analysis of QoS requirements for e-health services and mapping to evolved packet system QoS classes. *International journal of telemedicine and applications*, 2010, 9.
- Sneha, S., & Varshney, U. (2013). A framework for enabling patient monitoring via mobile ad hoc network. *Decision Support Systems*, 55(1), 218-234.
- Supriyanto, E., Satria, H., & Putra, E. H. (2009). *A novel low cost telemedicine system using wireless MESH network*.
- Tanenbaum, A. S. (2003). *Redes de computadoras*. Pearson Educación.
- Terplan, K., & Morreale, P. A. (2010). *The telecommunications handbook*. CRC Press.
- Ullah, S., Khan, P., Ullah, N., & Kwak, K. S. (2010). MAC-Bridging for Multi-PHYs Communication in BAN. *Sensors*, 10(11), 9919-9934.
- Vajrsar, P., Hosek, J., Molnar, K., & Bartl, M. (s.f.). Advanced trajectory management techniques for mobile nodes in OPNET Modeler environment. *In Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2012 35th International Conference on* (págs. 348-353). IEEE.
- Vergados, D. D. (2007). Simulation and modeling bandwidth control in wireless healthcare information systems. *Simulation*, 83(4), 347-364.
- Vouyioukas, D., Maglogiannis, I., & Komnakos, D. (2007). Emergency M-Health services through high-speed 3G systems: simulation and performance evaluation. *Simulation*, 83(4), 329-345.
- Wang, M., Lin, J., & Chiang, M. (2014). Innovation of telehomecare service industry: A patent-based assessment. *In Management of Engineering & Technology (PICMET), 2014 Portland International Conference* (págs. 3481-3491). IEEE.
- Wang, X., Le, D., Cheng, H., & Xie, C. (2014). All-IP wireless sensor networks for real-time patient monitoring. *Journal of biomedical informatics*, 52, 406-417.

- Westerlund, J. (2015). Forward Error Correction in Real-time Video Streaming Applications.
- Wetteroth, D. (2002). *OSI reference model for telecommunications*. New York: McGraw-Hill.
- Wulf, A. (2014). Sistema fallido. La salud es un bien mundial y público que debe ser tomado en cuenta en los objetivos de desarrollo post 2015/Health is a global public good and should be taken into account in the post 2015 development goals. *Medicina Social*, 8(2), 62-64.
- Yu, B., Xu, L., & Li, Y. (2012). Bluetooth low energy (BLE) based mobile electrocardiogram monitoring system. In Information and Automation (ICIA). *IEEE*, 763-767.
- Yu, B., Yang, L., & Chong, C. C. (2010). ECG monitoring over bluetooth: data compression and transmission. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2010 IEEE* (págs. 1-5). IEEE.
- Zayani, M. H., Gauthier, V., & Zeghlache, D. (2011). A joint model for IEEE 802.15. 4 physical and medium access control layers. In *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International* (págs. 814-819). IEEE.
- Zhai, H., Kwon, Y., & Fang, Y. (2004). Performance analysis of IEEE 802.11 MAC protocols in wireless LANs. *Wireless communications and mobile computing*, 4(8), 917-931.
- Zhang, F., & Lian, Y. (2009). QRS detection based on multiscale mathematical morphology for wearable ECG devices in body area networks. *Biomedical Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, 3(4), 220-228.
- Zhang, Y., & Xiao, H. (2009). Bluetooth-based sensor networks for remotely monitoring the physiological signals of a patient. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, 3(6), 1040-1048.
- Zheng, J., & Lee, M. J. (2004). A comprehensive performance study of IEEE 802.15. 4.