

Tesis defendida por
Manuel Octavio Casillas Gaxiola
y aprobada por el siguiente comité

Dr. Salvador Villarreal Reyes
Director del Comité

Dr. Miguel Ángel Alonso Arevalo
Miembro del Comité

Dr. Roberto Conte Galván
Miembro del Comité

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Miembro del Comité

Dr. José Antonio García Macías
Miembro del Comité

Dr. César Cruz Hernández
*Coordinador del Programa de Posgrado
en Electrónica y Telecomunicaciones*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

07 de diciembre de 2012

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



Programa de Posgrado en Ciencias
en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones

Diseño de una red híbrida de dos saltos para aplicaciones de
redes de sensores en telemonitoreo y telemedicina

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

Presenta:
Manuel Octavio Casillas Gaxiola

Ensenada, Baja California, México
2012

Resumen de la tesis de Manuel Octavio Casillas Gaxiola, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones. Ensenada, Baja California, México. Diciembre 2012.

Diseño de una red híbrida de dos saltos para aplicaciones de
redes de sensores en telemonitoreo y telemedicina

Resumen aprobado por:

Dr. Salvador Villarreal Reyes
Director de Tesis

En los últimos años el telemonitoreo de variables fisiológicas de pacientes ha recibido una atención significativa por parte de la comunidad académica e industrial. Dependiendo de la aplicación y la condición patológica del paciente es necesario que los sensores reporten mediciones de diferentes variables fisiológicas. Debido a que los sensores se colocan en diferentes partes del cuerpo humano, a este tipo de redes se les conoce como redes inalámbricas de área corporal (WBAN). La información recolectada por esta red de sensores debe ser enviada al médico especialista, sin embargo, el alcance de transmisión de las WBANs es relativamente corto. Por lo tanto, es necesario transmitir los datos de los sensores más allá de los límites de la red de área corporal por medio de otro enlace de comunicación de más largo alcance.

En este trabajo se propone una arquitectura de red híbrida mediante la utilización de Bluetooth Low Energy para formar la red de área corporal y la tecnología inalámbrica IEEE 802.15.4 para enviar la información en el segundo salto. Al dispositivo que interconecta estas dos redes se le conoce como *punto*. Mediante el desarrollo de un modelo analítico del mecanismo de acceso al medio no ranurado de IEEE 802.15.4 se evalúan diferentes esquemas de empaquetado de datos para su implementación en el dispositivo tipo punto. En particular, se realiza un análisis sobre el retardo de los paquetes en los dos saltos de la red y la probabilidad de descartar paquetes para los diferentes esquemas de empaquetado. Además, se presentan resultados de la evaluación experimental de la arquitectura de red híbrida y se realiza la comparación con arquitecturas de red homogéneas propuestas previamente en la literatura. A partir de la evaluación experimental se demuestran las ventajas ofrecidas por la arquitectura de red propuesta.

Palabras Clave: red híbrida, WBAN, telemonitoreo, Bluetooth Low Energy, IEEE 802.15.4, CSMA/CA.

Abstract of the thesis presented by Manuel Octavio Casillas Gaxiola as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Telecommunications. Ensenada, Baja California, México. December 2012.

Two-tier hybrid network design for sensor networks
in telemonitoring and telemedicine applications

Abstract approved by:

Dr. Salvador Villarreal Reyes
Thesis Director

In recent years, physiological variables telemonitoring has gain wide attention from the industrial and academic community. Sensors must be able to report measurements from different physiological variables depending on the application and the pathological condition of a patient. Since sensors are placed around the patient's body, they form what is called a wireless body area network (WBAN). Subsequently, the information collected by the sensor network must be delivered to the healthcare provider. Therefore, it's necessary to transmit the sensors' data outside the limits of the body area network through a different communication link.

In this thesis, a hybrid network architecture is proposed using Bluetooth Low Energy to form the body area network and IEEE 802.15.4 wireless standard to transmit the information through the second hop. The device interconnecting both networks is known as *bridge*. With the development of an analytical model for the IEEE 802.15.4 unslotted medium access control mechanism, different framing schemes for the bridge are evaluated. In particular, an analysis of the two-hop network delay and the packet loss probability is done for the different framing schemes. Furthermore, experimental evaluation results are displayed and compared to homogeneous network architectures reported on previous works. Based on this experimental evaluation, the advantages offered by the proposed network architecture are discussed.

Keywords: hybrid network, WBAN, telemonitoring, Bluetooth Low Energy, IEEE 802.15.4, CSMA/CA.

*A mis padres,
que siempre me han ayudado
a cumplir todas mis metas.
Mis logros son los suyos.*

Agradecimientos

A mis padres y mis hermanas, por ofrecerme siempre su apoyo incondicional sin reservas. Gracias por estar siempre conmigo, a pesar de la distancia.

Al Dr. Salvador Villarreal Reyes por ofrecerme su conocimiento y guiarme durante el proceso de investigación. Por sus atinados consejos tanto en lo académico como en lo personal y sobre todo por brindarme su amistad.

A los miembros de mi comité de tesis: Dr. Miguel Ángel Alonso Arevalo, Dr. Roberto Conte Galván, Dr. David Hilario Covarrubias Rosales y Dr. José Antonio García Macías, por todos sus comentarios, observaciones y aportaciones que ayudaron a enriquecer el trabajo de investigación y mi formación académica.

A Beatriz, por acompañarme durante este recorrido y estar a mi lado a cada momento, tanto en los mejores como en los peores.

Al CICESE por brindarme la oportunidad de formar parte de esta gran familia y por proporcionarme las herramientas necesarias para mi crecimiento académico y profesional. A todo el personal académico, investigadores y personal administrativo por su excelente calidad profesional y servicio.

A mis compañeros de generación: Miriam, Martha, Lilia, Fernando, Arturo, Enrique, Shiro, Jorge, Ricardo, Raúl, Rodrigo, Antonio y Oscar, por todos los momentos que convivimos juntos. Me llevo en cada uno de ustedes a un amigo.

Al grupo de trabajo conformado por: Edwin, Christian y Pedro, que con sus observaciones y críticas fortalecieron este trabajo de investigación.

Al CONACYT, por la beca recibida a lo largo de los estudios de maestría.

Contenido

	Página
Resumen español	i
Resumen ingles	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Lista de Figuras	viii
Lista de Tablas	x
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.1.1 Tecnologías de redes inalámbricas de área personal	3
1.1.2 Dispositivo tipo puente	6
1.2 Planteamiento del problema.....	8
1.3 Objetivo general	15
1.4 Objetivos particulares	16
1.5 Metodología de la investigación	17
1.6 Organización de la tesis	18
2. Telemonitoreo de variables fisiológicas	20
2.1 Introducción.....	20
2.2 Electrocardiograma	22
2.3 Presión arterial	23
2.3 Oxímetro de pulso	24
2.5 Gasto Cardíaco	25
2.6 Temperatura.....	26
2.7 Discusión sobre las variables fisiológicas en telemonitoreo	26
3. Tecnologías de redes inalámbricas de área personal	29
3.1 Introducción.....	29
3.2 Bluetooth Low Energy	31
3.2.1 Arquitectura.....	32
3.2.2 Capa física	34
3.2.3 Capa de enlace de datos	35
3.2.4 Análisis del caudal eficaz máximo para Bluetooth Low Energy	40
3.3 IEEE 802.15.4	42
3.3.1 Arquitectura.....	43
3.3.2 Capa física	45
3.3.3 Sub-capas MAC.....	48

3.3.4 Análisis del caudal eficaz máximo para IEEE 802.15.4	53
3.4 Escenario de aplicación y arquitectura de red	56
4. Modelo analítico del mecanismo de acceso al medio no ranurado del estándar IEEE 802.15.4	61
4.1 Introducción	61
4.2 Ecuaciones del modelo de Markov del mecanismo de acceso al medio no ranurado del estándar IEEE 802.15.4	62
4.2.1 Distribución probabilística del tiempo de servicio	68
4.2.2 Discusión de resultados sobre tiempo de servicio del mecanismo de acceso al medio no ranurado de IEEE 802.15.4	71
4.3 Modelo de teoría de colas de la estación IEEE 802.15.4 y su análisis	73
4.3.1 Cola M/G/1 y algoritmo para el cálculo de métricas de desempeño	74
4.3.2 Evaluación de resultados del modelo de teoría de colas	76
4.4 Conclusiones sobre el modelo analítico del mecanismo de acceso al medio no ranurado de IEEE 802.15.4	80
5. Diseño de la red híbrida	82
5.1 Introducción	82
5.2 Arquitectura de la red híbrida	83
5.3 Primer salto en la red Bluetooth Low Energy	85
5.3.1 Parámetros de conexión	85
5.3.2 Análisis de retardo	88
5.4 Segundo salto en la red IEEE 802.15.4	89
5.4.1 Análisis de las métricas obtenidas con diferentes esquemas de empaquetados de datos	89
5.5 Diseño del dispositivo tipo puente	96
6. Desarrollo del dispositivo puente y de la red híbrida	101
6.1 Introducción	101
6.2 Equipo utilizado	101
6.2.1 Texas Instruments CC2540 USB	102
6.2.2 Texas Instruments CC2540 Keyfob	102
6.2.3 Bluegiga BLED112	103
6.2.4 Freescale MC13213-SRB	103
6.2.5 BeagleBoard C4	103
6.3 Implementación experimental del dispositivo tipo puente y la red híbrida	104
6.4 Descripción del escenario de prueba experimental	106
6.5 Evaluación de desempeño de la red híbrida	108
6.6 Conclusiones sobre el desarrollo de la red híbrida	116

7. Conclusiones y trabajo futuro	117
7.1 Introducción.....	117
7.2 Conclusiones.....	117
7.2.1 Sobre el diseño de la red híbrida.....	118
7.2.2 Sobre el desarrollo del dispositivo tipo puente y de la red híbrida.....	120
7.2.3 Sobre la evaluación de desempeño de la red híbrida.....	120
7.3 Trabajo a futuro	122
Referencias bibliográficas.....	124

Lista de figuras

Figura		Página
1	Características de las tecnologías inalámbricas de área personal	5
2	Esquema de un dispositivo tipo puente	7
3	Representación del sistema de telemonitoreo propuesto por González-Valenzuela (2011) p. 540.	10
4	Infraestructura del esquema de telemonitoreo propuesto por Corchado et al. (2010) p. 237.	12
5	Topología de red propuesta por Ullah et al. (2010) p. 9928.	13
6	Estructura de red propuesta por Misic et al. (2009) p. 435.	14
7	Electrocardiógrafo de 3 electrodos presentado en (Hartmann, 2003).	22
8	Esfigmomanómetro digital	23
9	Oxímetro de pulso	24
10	Sensor ultrasónico para la medición del gasto cardíaco	25
11	Termómetro electrónico médico	26
12	Diagrama de estados de los dispositivos Bluetooth Low Energy	33
13	Topología estrella para redes de Bluetooth Low Energy	34
14	Canales de radiofrecuencia del estándar Bluetooth Low Energy (Bluetooth SIG, 2010).	35
15	Canales de aviso y de datos del estándar Bluetooth Low Energy (Bluetooth SIG, 2010).	36
16	Proceso de establecimiento de conexión en Bluetooth Low Energy	38
17	Proceso de eventos de conexión en Bluetooth Low Energy (Bluetooth SIG, 2010)	38
18	Formato de paquete LLDU en Bluetooth Low Energy	39
19	Formato de PDU del canal de datos en Bluetooth Low Energy	40
20	Ejemplos de topología de red para IEEE 802.15.4	45
21	Bandas de frecuencia de operación de IEEE 802.15.4	46
22	Formato de PPDU en IEEE 802.15.4	48
23	Diagrama de bloques del algoritmo CSMA/CA no ranurado	51
24	Formato de MPDU en IEEE 802.15.4	52
25	Procedimiento de transmisión de una trama IEEE 802.15.4	53
26	Arquitectura de red híbrida propuesta	59
27	Modelo de Markov para el mecanismo de acceso al medio no ranurado de IEEE 802.15.4	63
28	Diagrama de transición de estados para transmisión en IEEE 802.15.4	69
29	PDFs de los tiempos de servicio MAC de IEEE 802.15.4	72
30	Valor esperado del tiempo de servicio MAC en IEEE 802.15.4	73
31	Ejemplo de cola M/G/1 en el dispositivo tipo puente	74

32	Diagrama de flujo del algoritmo para la solución del modelo analítico del mecanismo de acceso al medio no ranurado del estándar IEEE 802.15.4	75
33	Probabilidad de detectar el canal ocupado para una red IEEE 802.15.4	78
34	Retardo total de paquetes en la cola para una red IEEE 802.15.4	79
35	Probabilidad de paquetes descartados para una red IEEE 802.15.4	80
36	Arquitectura de la red híbrida BLE – IEEE 802.15.4	84
37	Esquema de empaquetado en el dispositivo tipo puente	84
38	Ejemplo de los eventos de conexión para los esclavos de la red BLE para electrocardiograma (ECG), oxímetro de pulso (OXM), presión arterial (PSA), gasto cardíaco (GAC), temperatura (TEM)	87
39	Probabilidad de detectar el canal ocupado para diferentes esquemas de empaquetado.	91
40	Tiempo de servicio MAC para diferentes esquemas de empaquetado	92
41	Retardo total de los paquetes en la cola para diferentes esquemas de empaquetado	93
42	Número de paquetes en cola promedio para diferentes esquemas de empaquetado	94
43	Probabilidad de descartar paquetes para diferentes esquemas de empaquetado	95
44	Ejemplo del proceso de empaquetado en el dispositivo tipo puente	97
45	Esquema de empaquetado propuesto para la red híbrida	98
46	Esquema experimental del dispositivo tipo puente	106
47	Ejemplo de eventos de conexión para los esclavos BLE en el desarrollo experimental para electrocardiograma (ECG), oxímetro de pulso (OXM) y temperatura(TEM)	107
48	Esquema de evaluación del Escenario 1	108
49	Probabilidad de paquetes perdidos para el Escenario 1 (7.392 kbps)	109
50	Histograma de tiempos de inter-arribo Escenario 1 empaquetado	110
51	Histograma de tiempos de inter-arribo Escenario 1 no empaquetado	111
52	Esquema de evaluación del Escenario 2	112
53	Probabilidad de paquetes perdidos para el Escenario 2 (15.536 kbps)	113
54	Esquema de evaluación del Escenario 3	114
55	Comparación de la probabilidad de paquetes perdidos para el Escenario 3 y el Escenario 1	115

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Características de transmisión de las variables fisiológicas	27
2	Bandas de frecuencia y parámetros de transmisión para IEEE 802.15.4	47
3	Caudal eficaz máximo en IEEE 802.15.4 para diferentes escenarios	56
4	Parámetros utilizados para la prueba de concepto	77
5	Intervalos de conexión para los esclavos en la red Bluetooth Low Energy	86
6	Retardos máximos de las muestras de los sensores	88
7	Valores utilizados para la solución del modelo analítico	90
8	Características de transmisión de las señales en el desarrollo experimental	107

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

La relevancia e importancia atribuida al cuidado de la salud ha ido en aumento en los últimos años y se espera que siga creciendo a un ritmo acelerado. Un estudio reciente muestra que para el 2020 el gasto en el cuidado de la salud se triplicará en dólares (Penders *et al.*, 2007), consumiendo el 16% del producto interno bruto (PIB) en los países pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), dentro de los cuales se encuentra México. Así mismo, en años recientes se ha incrementado el interés en utilizar tecnologías de la información y telecomunicaciones (TICs) para la prestación de servicios de medicina a distancia, concepto dentro del cual se encuentra la telemedicina.

Actualmente la telemedicina es considerada una herramienta tecnológica que permite un mejor despliegue de los servicios de atención en salud y habilita el acceso de servicios médicos a comunidades alejadas de núcleos urbanos, ahorrando tiempo y dinero tanto a pacientes como a instituciones y hospitales (Meystre, 2005). La telemedicina abarca un amplio campo de aplicaciones, desde intercambio de información médica, consultas, diagnóstico, tratamiento y educación de personal, hasta la realización de cirugías a distancia.

Una de las principales áreas de la telemedicina es el telemonitoreo de salud, de aquí en adelante referido como telemonitoreo, el cual consiste en utilizar diferentes

sensores y tecnologías para el monitoreo remoto del estado de un paciente (Kailas *et al.*, 2009). El escenario más utilizado es el de telemonitoreo en el hogar, en donde el paciente puede estar enviando información sobre su estado de salud a los médicos sin la necesidad de abandonar su casa. El telemonitoreo también es ampliamente utilizado dentro de hospitales para monitorear y llevar un registro del estado de diferentes pacientes. Otros escenarios incluyen el telemonitoreo en ambulancias, unidades de cuidado intensivo e incluso inmerso en la ropa en forma de trajes para misiones militares y al espacio (Meystre, 2005).

Dependiendo de la aplicación y la condición del paciente es necesario tener mediciones de diferentes variables fisiológicas (por ejemplo electrocardiograma, oxímetro de pulso, presión arterial, gasto cardíaco, temperatura) utilizando sensores especializados para cada tarea. Debido a que los sensores se colocan en diferentes partes del cuerpo humano, se requiere que éstos recolecten la información de manera no intrusiva. Es decir, se espera que los sensores no alteren o penetren el tejido humano, y sean capaces de transmitir la información inalámbricamente por un periodo prolongado de tiempo sin supervisión. Dependiendo del alcance de transmisión que tengan los sensores inalámbricos utilizados para telemonitoreo, las redes que forman pueden caer dentro de dos categorías: redes inalámbricas de área corporal (WBAN, "*Wireless Body Area Network*") o redes inalámbricas de área personal (WPAN, "*Wireless Personal Area Network*").

En la actualidad las redes inalámbricas de área corporal no han sido desplegadas ampliamente debido a que todavía existen varios retos por resolver. Dentro de los principales retos se encuentran el bajo consumo de potencia requerido para que los sensores puedan operar por un largo tiempo, la miniaturización de los sensores y el bajo costo para ser aceptados por el mercado (Penders *et al.*, 2007). Una gran parte de las soluciones que se encuentran actualmente en la literatura para desplegar redes de área corporal están realizadas con tecnologías de redes

de área personal (WPANs), que si bien no fueron diseñadas exclusivamente para este tipo de aplicaciones, pueden ser utilizadas para desarrollar algunas aplicaciones específicas para WBANs.

Bajo este marco y con los crecientes avances tecnológicos en los semiconductores para la miniaturización de dispositivos electrónicos, se ha visto un incremento en el interés de utilizar diferentes tecnologías inalámbricas para el cuidado de la salud como Bluetooth¹, ZigBee² y WiFi³.

1.1.1 Tecnologías de redes inalámbricas de área personal

Las aplicaciones que intentan cubrir este tipo de tecnologías inalámbricas son las de baja complejidad, bajo consumo de potencia y tasas de datos medianas o bajas, las cuales coinciden con los requerimientos para aplicaciones de redes de sensores para telemonitoreo. Aún y cuando existen varias tecnologías que permiten el establecimiento de redes de área corporal, actualmente no se tiene una tecnología inalámbrica predominante como es el caso de WiFi para redes inalámbricas de área local (WLAN, “*Wireless Local Area Network*”). En este contexto, la serie de estándares Bluetooth y los sistemas de capas superiores basados en el estándar IEEE 802.15.4 (e.g. Bluetooth, ANT, RF4CE) parecen emerger como los principales habilitadores para aplicaciones de WBANs.

En su origen, el estándar Bluetooth surgió de la idea de contar con una tecnología que permitiera conectar inalámbricamente un auricular o dispositivo manos libre con un teléfono celular. Sin embargo, han surgido una gran variedad de aplicaciones basadas en Bluetooth, las cuales han contado con una gran

¹ Bluetooth es un estándar para WPANs que trabaja en la banda de 2.4 GHz a una tasa de 3 Mbps.

² ZigBee es un estándar de transmisión y enrutamiento basado en IEEE 802.15.4 para redes de sensores. Trabaja en bandas sin licencia (como la de 2.4 GHz) a una tasa máxima de 250 kbps.

³ WiFi es el nombre de los productos que utilizan el estándar IEEE 802.11 para WLANs. Trabaja en la banda de 2.4 GHz con tasas de datos variables (de 6 a 300 Mbps).

penetración dentro del área de electrónica de consumo. Debido a su alcance de transmisión, Bluetooth puede ser considerado como un habilitador para el establecimiento de ambas WBANs o WPANs. De esta forma, Bluetooth ha sido ampliamente utilizado para el establecimiento de redes de área corporal (Rehman *et al.*, 2010), e incluso ha sido utilizado en escenarios de telemonitoreo (Sharma *et al.*, 2011) (Yu *et al.*, 2010) (Zhang *et al.*, 2009).

Otra tecnología habilitadora de WBANs es IEEE 802.15.4, la cual es ampliamente utilizada para el despliegue de redes de sensores en edificios, automatización y domótica (Nedelcu *et al.*, 2009) (Hameed *et al.*, 2008). Esta tecnología también ha resultado en una buena opción para el desarrollo de aplicaciones para el cuidado de la salud, debido a características tales como baja complejidad, bajo costo y consumo de potencia (Misic *et al.*, 2010) (Koh *et al.*, 2006). Incluso se han hecho investigaciones que comparan varias tecnologías inalámbricas (Bluetooth, IEEE 802.15.4/ZigBee y propietarias), indicando que IEEE 802.15.4/ZigBee es la tecnología más adecuada para aplicaciones en el campo del cuidado de la salud, debido principalmente a sus capacidades de mayor número de dispositivos conectados, mejor eficiencia en comunicación y menor consumo de potencia (Misic *et al.*, 2009) (Benocci *et al.*, 2009). Sin embargo, estos estudios fueron realizados teniendo en cuenta las anteriores especificaciones del estándar Bluetooth, el cual en su versión 4.0 (publicada en julio de 2010) incluye un modo de operación de baja potencia que cuenta con capacidades similares a las ofrecidas por IEEE 802.15.4/ZigBee.

El nuevo modo de operación de Bluetooth liberado en la especificación 4.0 del estándar es llamado “Bluetooth Low Energy” (BLE). BLE está principalmente enfocado para aplicaciones en el cuidado de la salud, deportes, estado físico, seguridad y entretenimiento en casa. Si bien esta nueva versión de Bluetooth tiene una tasa de datos menor comparada a las anteriores, incluye una gran mejora en el consumo de potencia que asemeja al ofrecido por el estándar IEEE

802.15.4/ZigBee. Similar a versiones previas del estándar Bluetooth, la arquitectura de BLE permite establecer fácilmente pico-redes con topología estrella, en las cuales se define un dispositivo maestro y varios esclavos. Sin embargo, una pico-red BLE puede contar con más de 7 dispositivos esclavos activos, que es el número máximo de esclavos activos soportado por versiones previas del estándar. Otra ventaja de BLE es que las versiones previas del estándar tienen una gran penetración en el mercado (Bluetooth SIG, 2010), por lo cual se espera que BLE esté integrado en la mayoría de las soluciones Bluetooth futuras. Finalmente, es importante mencionar que BLE no reemplaza versiones previas del estándar (por ejemplo la versión 2.0 o 3.0), sino que complementa estas versiones al enfocarse en aplicaciones específicas de redes inalámbricas de área corporal. Cada una de las tecnologías inalámbricas mencionadas anteriormente cuenta con diferentes capacidades de tasa de datos, alcance de transmisión y consumo de energía. Por lo tanto, estas tecnologías son utilizadas en diferentes tipos de aplicaciones según sean los requerimientos de las mismas. En la Figura 1 se muestra una comparación de las características de tecnologías para WPANs y la tecnología inalámbrica predominante para redes inalámbricas de área local (WiFi).

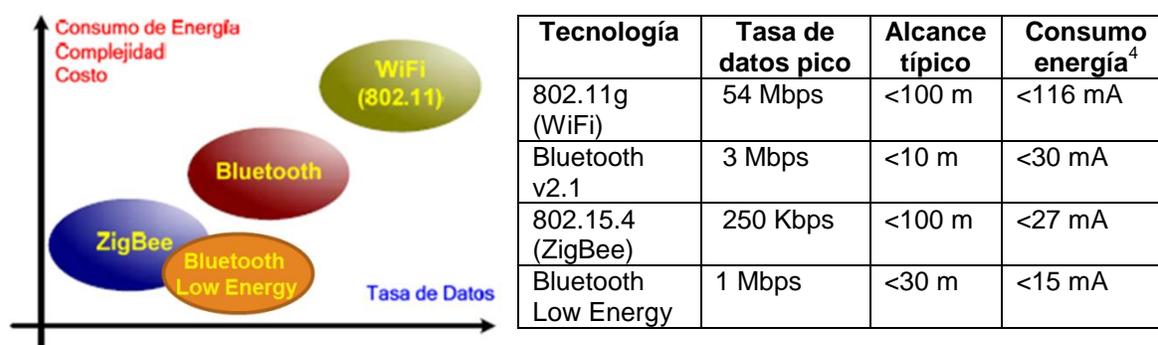


Figura 1. Características de las tecnologías inalámbricas de área personal

⁴ Phil Smith, CSR PLC. Comparing Low-Power Wireless Technologies. Recuperado en noviembre 2012. <http://www.digikey.com/Web%20Export/techzone/archive/techzone-magazine-tzw112-us.pdf>

Como se puede ver en la Figura 1, Bluetooth Low Energy (BLE) ofrece una tasa pico de transmisión de datos de mayor que IEEE 802.15.4/ZigBee y el menor consumo de energía de las cuatro tecnologías mostradas. Debido a esto y a la simplicidad de su arquitectura, en este trabajo se analizará la utilización de la tecnología BLE en el diseño de una red de sensores inalámbrica de área corporal para el telemonitoreo de las variables fisiológicas de un paciente. Debido a que el alcance de transmisión de los transceptores BLE puede ser reducido (cual corresponde a una WBAN), para poder implementar un sistema de telemonitoreo efectivo será necesario desarrollar un mecanismo que permita transmitir la información recolectada por los sensores BLE más allá del área de cobertura de la WBAN. Esto con el fin de poder analizar, procesar y desplegar los datos de cada uno de los sensores remotamente. Lo anterior se puede lograr mediante el diseño de un dispositivo que permita interconectar la WBAN con otra red de más largo alcance, la cual utilizará una tecnología diferente a BLE para transmitir la información (por ejemplo IEEE 802.15.4/ZigBee o WiFi). A los dispositivos que permiten interconectar dos redes que trabajan con tecnologías de comunicación diferentes (por ejemplo BLE e IEEE 802.15.4/ZigBee) se les conoce como dispositivos tipo puente.

1.1.2 Dispositivo tipo puente

En telecomunicaciones, se le conoce como puente a un dispositivo capaz de interconectar dos o más redes que están separadas física y lógicamente debido a la utilización de diferentes protocolos de comunicación. Al extender la transmisión de información el dispositivo tipo puente forma una red híbrida. Se le llama red híbrida debido a que la información que se requiere transmitir pasa por diferentes protocolos de comunicación. Usualmente los dispositivos tipo puente son utilizados cuando se desea extender el alcance de alguna red más allá de los límites de la misma (impuestos por el protocolo o por los alcances de transmisión

inalámbrica), o cuando se requiere “traducir” la información utilizando un protocolo diferente para habilitar la compatibilidad con otras redes.

Visto desde el modelo de referencia OSI, el dispositivo tipo puente funciona en la capa 2, la cual cumple con tareas de enlace de datos y control de acceso al medio (MAC). Por lo tanto, el puente debe contener los componentes de capa física (PHY) y capa de enlace de datos de las dos redes que se desean interconectar, tal y como se muestra en la Figura 2.

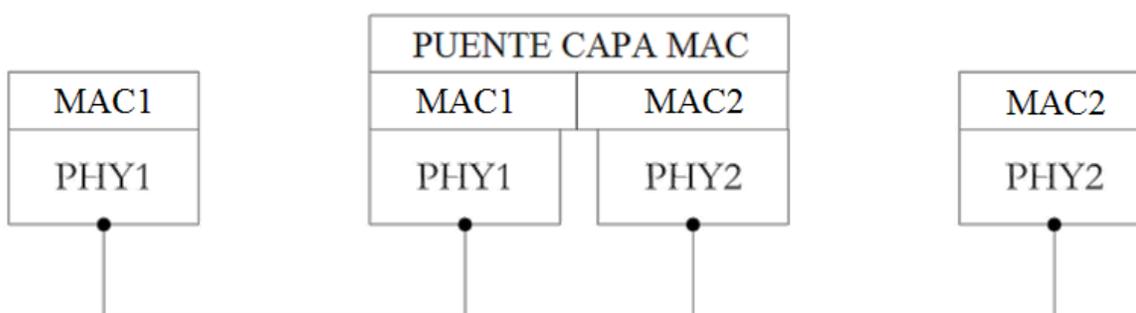


Figura 2. Esquema de un dispositivo tipo puente

Un dispositivo tipo puente común retransmite los datos recibidos desde una red hacia la otra modificando solamente el protocolo de transmisión. En este trabajo se explora la posibilidad de proveer al dispositivo tipo puente de un esquema de empaquetado de datos, con la finalidad de mejorar el desempeño de la red. Esto implica que en esta tesis se explora la opción de no retransmitir inmediatamente cada vez que se reciba un dato, sino esperar a tener un número considerable de datos para ser transmitidos juntos en un solo paquete hacia el siguiente enlace.

Para aplicaciones de telemonitoreo es necesario transmitir los datos recolectados por la WBAN hacia un resumidero de información remoto donde se procesará y analizará la información. Para lograr esto con una WBAN basada en BLE, es

necesario diseñar un dispositivo tipo puente que permita utilizar otra tecnología que ofrezca un alcance de transmisión mayor que el de BLE, como es el caso de IEEE 802.15.4 o WiFi. Aún y cuando WiFi ofrece tasas de transmisión mucho mayores que IEEE 802.15.4, el último es más adecuado para aplicaciones de telemonitoreo. Esto debido al bajo consumo de energía de los transceptores IEEE 802.15.4 comparados con los transceptores WiFi, lo cual es sumamente importante en el diseño de sistemas de telemonitoreo (Penders *et al.*, 2007). Cabe señalar que la unión de una red BLE con una red IEEE 802.15.4 no es para nada trivial, ya que se tienen que analizar y garantizar parámetros de calidad de servicio específicos para cada una de las diferentes señales biomédicas utilizadas en aplicaciones de telemonitoreo. Dentro de los parámetros de operación que se tienen que considerar al diseñar una red de telemonitoreo se puede mencionar el retardo, la pérdida de paquetes y caudal eficaz (Gallego *et al.*, 2005) (Vergados *et al.*, 2007) (Malindi *et al.*, 2011).

Este trabajo de investigación se enfoca en el diseño, desarrollo y evaluación de una red híbrida⁵ de dos saltos para aplicaciones de telemonitoreo. En particular se propone una arquitectura de red WBAN y se diseña un dispositivo tipo puente que permite transmitir la información de señales biomédicas hacia un resumidero de información remoto. Para el diseño de la red híbrida se toman en cuenta los requerimientos de transmisión de las señales biomédicas más importantes para el monitoreo de los signos vitales de un paciente.

1.2 Planteamiento del problema

En un escenario de telemonitoreo es común encontrar la necesidad de interconectar redes de datos que utilizan diferentes tecnologías inalámbricas

⁵ Una red híbrida se refiere a una arquitectura de red que transmite información utilizando tecnologías de comunicación diferentes, separadas física y lógicamente.

(Corchado *et al.*, 2010). Esto debido a que diferentes tecnologías ofrecen capacidades diferentes en términos de consumo de energía, alcance de transmisión y tasas pico de datos. Por ejemplo, no sería conveniente diseñar un termómetro con una interfaz WiFi ya que el consumo de energía sería elevado y se desperdiciaría grandemente el ancho de banda ofrecido por WiFi. Por lo tanto, es necesario seleccionar cuidadosamente la o las tecnologías a utilizar cuando se diseña un sistema de telemonitoreo, con el fin de satisfacer las necesidades de las diferentes señales biomédicas. Algunas de las primeras propuestas para escenarios de telemonitoreo utilizaban tecnología Bluetooth clásico (v2.1) (Vouyioukas *et al.*, 2007) (Zhang *et al.*, 2009). Sin embargo, Bluetooth clásico no es la tecnología ideal para este tipo de escenarios, debido a características tales como el límite máximo de hasta siete dispositivos conectados simultáneamente y un consumo de energía elevado cuando se considera el tipo de tráfico encontrado en los sistemas de telemonitoreo (Benocci *et al.*, 2009).

La mayoría de los estudios relacionados con escenarios de telemonitoreo no consideran una arquitectura de red híbrida, ya que utilizan la misma tecnología para transmitir los datos de los sensores hacia el resumidero de información (González-Valenzuela *et al.*, 2011), (Benocci *et al.*, 2009) (Koh *et al.*, 2006) (Sharma *et al.*, 2011) (Zhang *et al.*, 2009). Sin embargo, sí existen algunas propuestas que consideran la utilización de un dispositivo tipo puente para acoplar diferentes tecnologías en aplicaciones de telemonitoreo (Misic *et al.*, 2010) (Ullah *et al.*, 2010). Dado que ambos enfoques son importantes para contextualizar este trabajo de investigación, a continuación se presenta un resumen de los esfuerzos recientes más relevantes relacionados con el desarrollo de redes de sensores para escenarios de telemonitoreo.

Dentro de los estudios que no consideran una arquitectura de red híbrida, el trabajo reportado recientemente en (González-Valenzuela *et al.*, 2011) es bastante representativo. En dicho artículo se plantea la utilización de dispositivos IEEE

802.15.4 para monitorear los signos vitales de diferentes pacientes. Particularmente, se propone la utilización de diferentes canales de frecuencia IEEE 802.15.4 para formar redes de sensores independientes para cada uno de los pacientes. Debido a esto, solamente es posible monitorear tantos pacientes como canales de frecuencia estén disponibles para los transceptores IEEE 802.15.4, tal y como se muestra en la Figura 3. Para servir a muchos más pacientes se propone la reutilización de frecuencias siempre y cuando la interferencia mutua entre redes de sensores cercanas permanezca despreciable, lo cual no siempre sucede en escenarios reales.

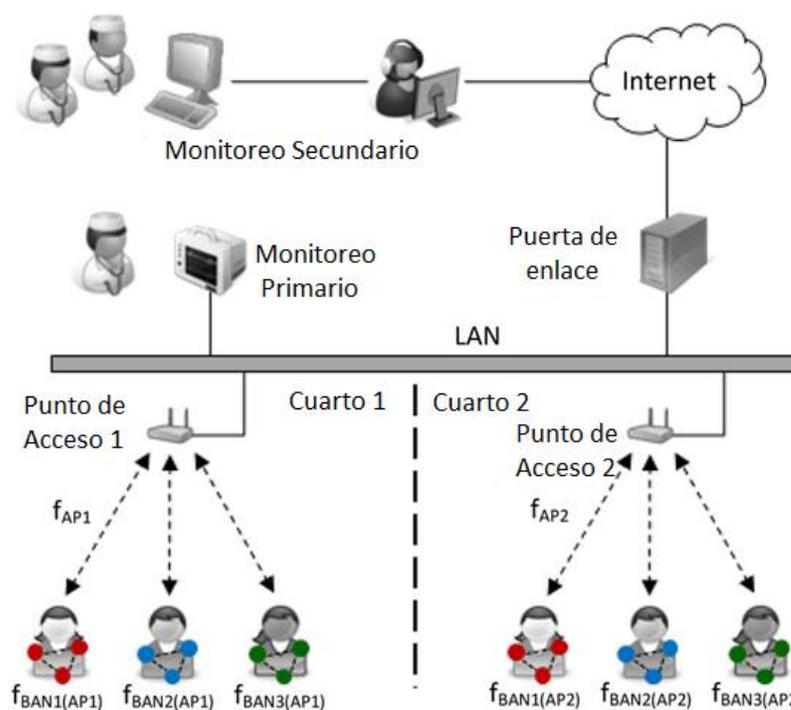


Figura 3. Representación del sistema de telemonitoreo propuesto por González-Valenzuela (2011) p. 540.

En (González-Valenzuela *et al.*, 2011) se menciona (sin hacer un análisis formal) que el caudal eficaz de IEEE 802.15.4 puede ser una limitante en el número de nodos que puede tener la WBAN, por lo cual los autores proponen pre-procesar

los datos en cada nodo antes de transmitirlos. Sin embargo, realizar este pre-procesado puede tener la desventaja de un incremento en el consumo de energía de cada nodo (Penders *et al.*, 2007). Es importante mencionar que en el trabajo de (González-Valenzuela *et al.*, 2011) no se estudian las características del tráfico a transmitir de las diferentes variables fisiológicas.

Otro de los trabajos relacionados que propone el uso de redes de sensores en aplicaciones de telemonitoreo es el introducido en (Corchado *et al.*, 2010) donde se presenta una plataforma orientada a servicios para integrar diferentes redes de sensores inalámbricas. Como tal, se propone un protocolo de capas superiores para integrar la información proveniente de diferentes sensores equipados con diferentes tecnologías de red inalámbricas, para después transmitir los datos vía la Internet hacia un resumidero de información remoto. En particular, el protocolo propuesto recolecta la información proveniente de redes Bluetooth 2.1 e IEEE 802.15.4/ZigBee, para después procesarla y transmitirla hacia los proveedores de servicios médicos a través de la Internet (ver Figura 4).

Aún y cuando en este trabajo se considera el intercambio de información entre las redes Bluetooth 2.1 e IEEE 802.15.4/ZigBee, este intercambio de información no se da en un dispositivo tipo puente, ya que se considera la utilización de un protocolo de aplicación llamado SYLPH para administrar y gestionar el intercambio de información entre ambas redes e incluso la Internet. A pesar de que (Corchado *et al.*, 2010) considera la transmisión de señales biomédicas, no se realiza un análisis de los requerimientos para la transmisión dichas señales. Además, no se establece el alcance máximo que tendría la red con la arquitectura propuesta y no se analiza el número máximo de usuarios que podría soportar el sistema.

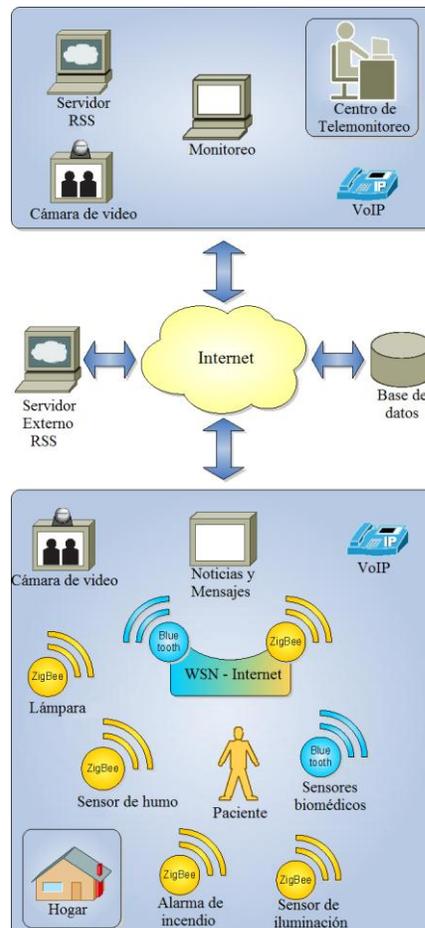


Figura 4. Infraestructura del esquema de telemonitorio propuesto por Corchado et al. (2010) p. 237.

En el trabajo de (Ullah et al., 2010) se discute la creación de una sola capa MAC para interconectar dos tecnologías inalámbricas de capa PHY diferentes para aplicaciones de telemonitorio. En particular, en (Ullah et al., 2010) se considera la interconexión de una red inalámbrica formada por sensores implantados en el cuerpo y otra red formada por nodos inalámbricos colocados alrededor del cuerpo. Los sensores para monitoreo alrededor del cuerpo operan en la banda Industrial, médica y científica (ISM) y/o Ultra Wideband (UWB) principalmente, mientras que los sensores dentro del cuerpo operan en la banda MICS (“*Medical Implant Communication Service*”). Normalmente, las redes inalámbricas que operan en estas bandas de frecuencia tienen capas MAC y PHY diferentes. Debido a esto,

en (Ullah *et al.*, 2010) se propone crear una sola capa MAC para todos los nodos, cada uno con su respectiva capa PHY e interconectarlos por medio de un dispositivo tipo puente. Un ejemplo de la topología de la red se muestra en la Figura 5. La modificación de la capa MAC en cualquiera de los sensores significaría des-estandarizar la tecnología, lo que haría a los sensores incompatibles con el resto de las soluciones estandarizadas. Por otro lado, la modificación de la capa MAC es complicada de llevar a la práctica, por lo que la mayoría de los trabajos que plantean esta idea sólo muestran resultados de simulación. Además, no se muestran los requerimientos de las diferentes variables fisiológicas que pueden monitorearse en el escenario propuesto.

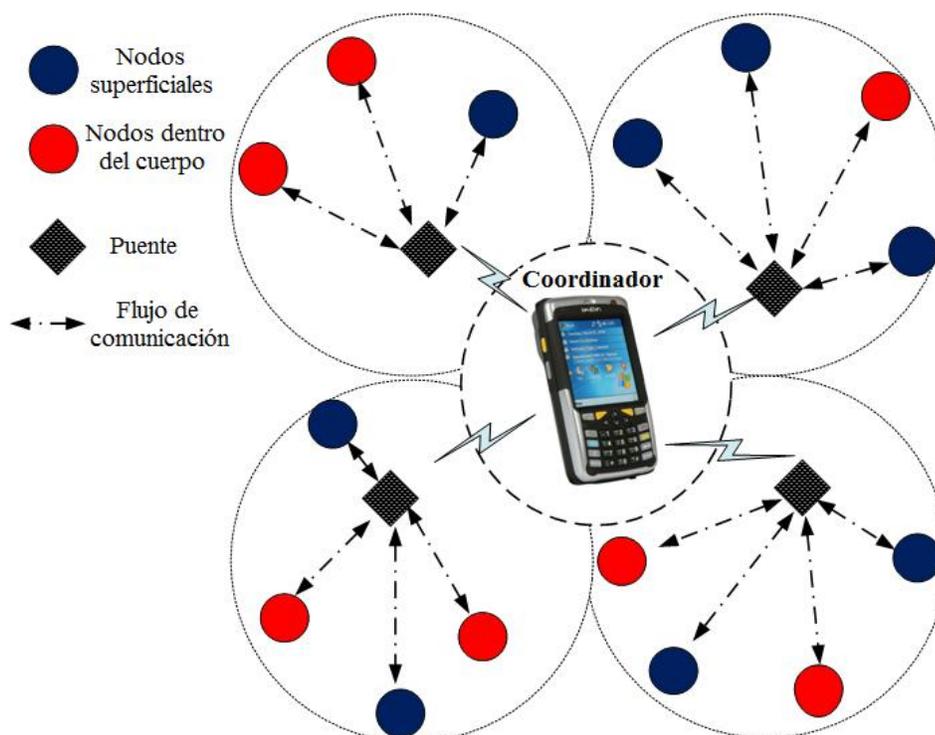


Figura 5. Topología de red propuesta por Ullah *et al.* (2010) p. 9928.

Por último, en el trabajo de (Misic *et al.*, 2009) se propone la creación de un dispositivo tipo puente entre redes IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11b para

aplicaciones de telemonitoreo multi-parámetro. Se muestra un estudio de la tasa de datos requerida de las señales a transmitir y un análisis matemático detallado utilizando cadenas de Markov para determinar diferentes estadísticas de la red. Es importante mencionar que el análisis y la arquitectura propuesta consideran el modo de operación “ranurado” de la capa MAC del estándar IEEE 802.15.4. La arquitectura propuesta en (Misic *et al.*, 2009) es similar a la de (González-Valenzuela *et al.*, 2011), sin embargo se utiliza IEEE 802.15.4 para cada red de sensores corporales e IEEE 802.11b para su transmisión hacia el resumidero de información. Un ejemplo de la arquitectura de la red se muestra en la Figura 6. Aunque IEEE 802.11b proporciona una tasa de datos elevada, no es conveniente su utilización cuando uno de los principales problemas es el consumo de potencia, como lo es en escenarios de telemonitoreo. Además, si no se ajusta la potencia de transmisión de la WBAN adecuadamente, es posible que exista interferencia mutua al tener varias redes de sensores IEEE 802.15.4 transmitiendo de forma concurrente dentro de una misma área.

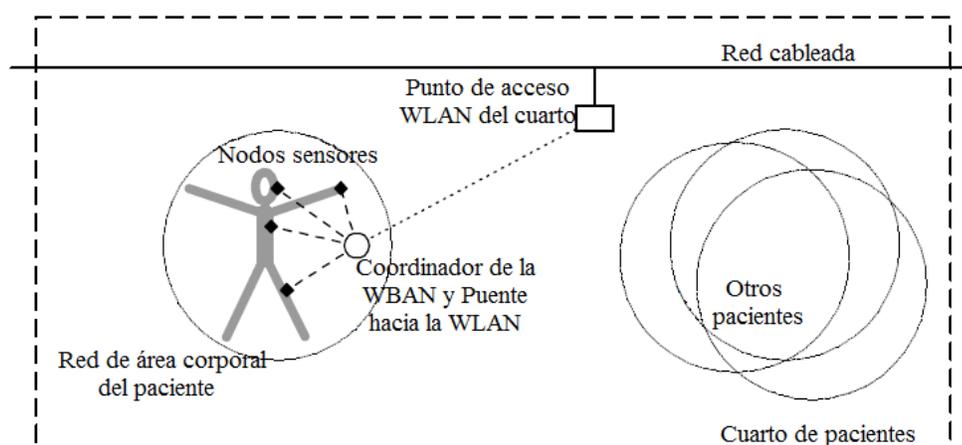


Figura 6. Estructura de red propuesta por Misic *et al.* (2009) p. 435.

Después de analizar la bibliografía, se puede concluir que existe trabajo por realizar en el diseño de redes inalámbricas para aplicaciones de telemonitoreo.

Esto debido a que todavía pueden existir contribuciones en áreas como el número de usuarios soportados, interoperabilidad de redes, área de cobertura, consumo de energía, etc. En este contexto, este trabajo de investigación propone una arquitectura de red híbrida que explote las ventajas que ofrece el estándar Bluetooth Low Energy para el establecimiento de WBANs y la utilización de un enlace IEEE 802.15.4 para conectar la WBAN con el resumidero de información. La arquitectura de red híbrida estará basada en el desarrollo de un dispositivo tipo puente que interconecte ambas redes, el cual se diseñará con la ayuda de un modelo analítico de la capa de acceso al medio del estándar IEEE 802.15.4. En particular, con el modelo analítico se obtendrán métricas que se utilizarán como guía de diseño del dispositivo tipo puente. Finalmente, se realizará una implementación experimental de una red híbrida que utilice el dispositivo tipo puente diseñado, con la finalidad de evaluar experimentalmente el desempeño de la arquitectura propuesta y compararlo con una arquitectura de red homogénea como las propuestas en la literatura.

1.3 Objetivo general

El objetivo de este proyecto de investigación consiste en diseñar, desarrollar y evaluar una plataforma de red de sensores híbrida Bluetooth Low Energy e IEEE 802.15.4 con la finalidad de permitir la incorporación de sensores y la transmisión de la información hacia un resumidero para su posterior procesamiento. Se busca que la arquitectura propuesta permita mejorar las prestaciones con respecto a la probabilidad de paquetes descartados, retardo de paquetes y cantidad de usuarios servidos en aplicaciones de telemonitoreo, comparado con arquitecturas de red homogéneas previamente propuestas.

1.4 Objetivos particulares

- Estudiar las características de las diferentes variables fisiológicas utilizadas en aplicaciones de telemonitoreo.
- Evaluar las capacidades de las tecnologías inalámbricas Bluetooth Low Energy e IEEE 802.15.4 para la transmisión de variables fisiológicas en escenarios de telemonitoreo.
- Diseñar un modelo matemático del algoritmo de acceso al medio en IEEE 802.15.4 para obtener diferentes métricas de desempeño de la red. Esto con el fin de utilizar el modelo como herramienta para el diseño de un dispositivo tipo puente.
- Diseñar un dispositivo tipo puente que permita interconectar una WBAN basada en BLE con una red IEEE 802.15.4.
- Utilizar el dispositivo tipo puente para desarrollar una arquitectura de red híbrida que permita: a) recolectar datos de variables fisiológicas mediante una red de sensores basada en el estándar BLE; y b) retransmitir los datos recolectados por la WBAN hacia un resumidero de información remoto utilizando un enlace IEEE 802.15.4.
- Realizar la evaluación de la red híbrida con el fin de determinar métricas que sirvan para el despliegue de redes híbridas en aplicaciones de telemonitoreo específicas. Esto con la finalidad de comparar el desempeño de la arquitectura propuesta con una arquitectura de red homogénea.
- Dar recomendaciones de diseño para aplicaciones que hagan uso de la arquitectura de red híbrida.

1.5 Metodología de la investigación

Definición de la información a transmitir

Debido a que se pretende que este desarrollo pueda ser utilizado en el establecimiento de redes de sensores orientados hacia telemonitoreo, se definieron las características principales de la información a transmitir, en particular la tasa de datos, susceptibilidad a retardos y tipo de tráfico.

Estudio bibliográfico de las redes inalámbricas consideradas

Se estudiaron las principales características de las tecnologías consideradas: Bluetooth Low Energy e IEEE 802.15.4. La finalidad de este estudio es contar con elementos suficientes para determinar las características que debe de poseer el dispositivo puente.

Modelo analítico de los saltos en la red

Se realizó un modelo analítico tomando en consideración las características anteriormente estudiadas. El modelo está basado en la teoría de probabilidad y procesos estocásticos y es utilizado para definir parámetros de diseño para mejorar el desempeño del dispositivo tipo puente y la red híbrida.

Diseño del dispositivo puente y de la red híbrida

Una vez elegidos los componentes necesarios para la transmisión de la información y tomando en cuenta la arquitectura de la red, se procedió a diseñar un dispositivo tipo puente que permite conectar y traspasar información de forma transparente en una red híbrida entre Bluetooth Low Energy e IEEE 802.15.4.

Prueba y Evaluación de Desempeño de la Red Híbrida

Se realizaron las pruebas pertinentes para observar el funcionamiento de la red híbrida en escenarios de telemonitoreo. Se obtuvieron métricas que sirven como base para la implementación de la red en aplicaciones específicas.

1.6 Organización de la tesis

En el Capítulo 2 se muestra un estudio de las principales señales biomédicas que son encontradas comúnmente en escenarios de telemonitoreo. Se revisó la literatura para determinar la frecuencia de muestreo, caudal eficaz requerido y sensibilidad al retardo de las diferentes señales.

En el Capítulo 3 se muestran las principales características de las tecnologías inalámbricas consideradas para desarrollar el dispositivo tipo puente (Bluetooth Low Energy e IEEE 802.15.4). Se estudiaron los estándares de estas dos tecnologías y se obtuvo la información esencial para realizar el diseño de la red híbrida.

En el Capítulo 4 se presenta un modelo analítico del mecanismo de acceso al medio CSMA/CA no ranurado de IEEE 802.15.4, con el cual es posible obtener diferentes estadísticos que fungen como parámetros de diseño para el dispositivo tipo puente y la red híbrida.

En el Capítulo 5 se describe el diseño de la red híbrida y todas sus implicaciones. Como primer aspecto se define la información a transmitir y se presenta el estudio bibliográfico de las variables fisiológicas más importantes en escenarios de telemonitoreo. A su vez se muestra la arquitectura de la red híbrida propuesta para cada uno de los saltos. Para el primer salto se presentan los parámetros de conexión de la red de Bluetooth Low Energy y un análisis del retardo para cada uno de los esclavos. En el segundo salto se utiliza el modelo analítico de CSMA/CA no ranurado de IEEE 802.15.4. Para finalizar se describe el modelo del dispositivo tipo puente y se presentan los resultados obtenidos.

En el Capítulo 6 se discute el desarrollo experimental de la red híbrida y el dispositivo tipo puente. Se muestran las características y limitaciones del equipo utilizado para el desarrollo. Además se presentan los resultados de la evaluación de desempeño de la red híbrida para diferentes escenarios.

Para finalizar, en el Capítulo 7 se muestran las discusiones, conclusiones y trabajo a futuro que surgen como fruto de este trabajo de investigación.

Capítulo 2

Telemonitoreo de variables fisiológicas

2.1 Introducción

La principal causa por la cual el telemonitoreo ha recibido tanta atención por parte de la comunidad académica e industrial es debido a que la población en muchos de los países del mundo está envejeciendo. Con ello se prevé un incremento sustancial en la demanda de servicios de cuidado de la salud para los adultos mayores. La población en México no se encuentra exenta de este fenómeno de cambio demográfico. Según datos del Consejo Nacional de Población (CONAPO) se estima que para el 2050 la cantidad de adultos mayores (65 años o más) aumente hasta 28.7 millones de habitantes⁶, siendo así el 22.6% del total de la población mexicana. La hipertensión (35.6%), diabetes (17.5) y las enfermedades del corazón (10.0%) figuran como las enfermedades crónicas con mayor prevalencia en adultos mayores en México. Estas enfermedades pueden ser eficientemente tratadas por especialistas de la salud con la ayuda de sistemas de telemonitoreo de variables fisiológicas como la presión arterial, oxigenación en la sangre, pulso cardíaco y electrocardiogramas (ECG).

El telemonitoreo de las variables fisiológicas vitales de un paciente es necesario en diferentes escenarios de cuidado de la salud, ya sea dentro o fuera de un hospital. Estos escenarios varían dependiendo de la aplicación deseada y

⁶ CONAPO (2011) Consejo Nacional de Población. La situación demográfica de México 2011: Diagnóstico socio-demográfico del envejecimiento en México. Consultado en noviembre 2012 http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Diagnostico_socio_demografico_del_envejecimiento_en_Mexico .

situación clínica del paciente, ya que cada enfermedad requiere del monitoreo de ciertas variables fisiológicas específicas. Si bien existen aplicaciones más críticas que otras, en este capítulo se introducen las variables fisiológicas más comúnmente utilizadas en escenarios de telemonitoreo dentro de hospitales y en el hogar (Vouyioukas *et al.*, 2007) (Gallego *et al.*, 2005) (Misic *et al.*, 2010) (Skorin-Kapov *et al.*, 2010).

Los sensores inalámbricos para el cuidado de la salud requieren contar con capacidades de procesamiento y comunicación, y ser lo suficientemente ligeros como para ser colocados sobre el cuerpo del paciente de forma no-intrusiva. En escenarios de telemonitoreo en hospitales o en casa, los sensores deben enviar los datos de manera inalámbrica hacia un resumidero de información para su posterior procesamiento y análisis. En un escenario donde el resumidero de información se encuentra en el mismo cuarto en el que está el paciente, y el paciente no tiene mucha movilidad, es posible transmitir la información utilizando una WBAN. En caso de que el paciente tenga movilidad y/o el resumidero de información se encuentre en una localidad remota, entonces será necesario contar con un mecanismo que permita conectar la WBAN con una red de mayor área de cobertura o en su defecto diseñar una red en la cual cada sensor tenga un alcance de transmisión lo suficientemente amplio para conectarse con el resumidero. En cualquiera de los casos mencionados anteriormente, para realizar un diseño adecuado del sistema de telemonitoreo es necesario conocer las características particulares de las señales a transmitir.

Las variables fisiológicas, siendo análogas por naturaleza, son caracterizadas por medio del conjunto de valores que pueden tomar y su correspondiente espectro en frecuencia. Cada variable fisiológica debe ser muestreada a una tasa mayor o igual al doble de su frecuencia más alta en el espectro y enviada en forma de muestras digitalizadas hacia un resumidero de información a través de la red

inalámbrica. A continuación se muestra un breve resumen de cada una de las variables consideradas en un escenario de telemonitoreo.

2.2 Electrocardiograma (ECG)

El electrocardiograma es una medición superficial del potencial eléctrico generado por la actividad eléctrica que controla la acción de bombeo de las fibras musculares cardíacas. El ECG es la herramienta principal para el diagnóstico de las enfermedades cardiovasculares, alteraciones metabólicas y la predisposición a una muerte súbita cardíaca. El monitoreo de ECG no-intrusivo involucra la medición de los pulsos cardíacos utilizando hasta 12 electrodos colocados en posiciones predeterminadas en el cuerpo del paciente. Para una aplicación mínima, sólo se requieren 3 electrodos posicionados en el pecho del paciente que pueden localizar un amplio número de arritmias cardíacas (Hartmann, 2003). Se les conoce como derivaciones a las mediciones del potencial eléctrico entre dos puntos corporales (e.g. brazo derecho y pierna izquierda). Así un ECG de 3 electrodos puede enviar datos de 3 derivaciones diferentes (Figura 7).

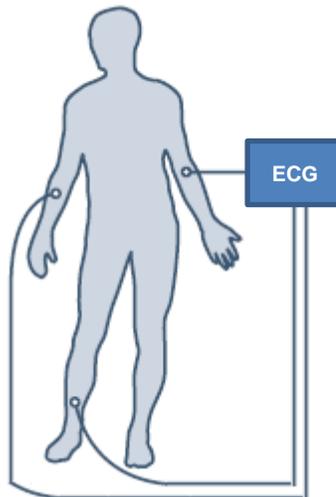


Figura 7. Electrocardiógrafo de 3 electrodos presentado en (Hartmann, 2003).

Para aplicaciones clínicas estándar el ECG tiene un ancho de banda de 0.05 Hz a 100 Hz. Con este intervalo de ancho de banda se puede concluir que la frecuencia de muestreo de un ECG es de 200 Hz. Se han realizado estudios que demuestran que no existe diferencia significativa al muestrear una señal de ECG a más de 250 Hz (Pizzut *et al.*, 1985). Por lo tanto si se utiliza esta frecuencia de muestreo y cada muestra es digitalizada con 16 bits, se tendrá una tasa de datos por cada electrodo (o canal) de ECG de $R_{ECG} = (250Hz)(16bits) = 4000$ bps.

2.3 Presión arterial

La presión arterial (o presión sanguínea) representa una medición de la fuerza que ejerce la sangre al circular sobre las paredes de los vasos sanguíneos. Durante cada latido del corazón la presión de la sangre varía entre una presión máxima (sistólica) y una presión mínima (diastólica). 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) (e.g. 120/80). La medición de la presión arterial representa la principal herramienta para el diagnóstico y tratamiento de la hipertensión y la diabetes.



Figura 8. Esfigmomanómetro digital ⁷

⁷ Imagen recuperada en noviembre 2012 de http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0d/Blutdruck_Handgelenk.jpg

La presión arterial puede ser medida de manera intrusiva y no-intrusiva. Aunque existen gran número de técnicas para la medición de presión arterial, la técnica no-intrusiva más ampliamente utilizada es mediante la utilización de un esfigmomanómetro. El esfigmomanómetro es un dispositivo en forma de brazalete inflable que se coloca en el brazo del paciente (Figura 8). Las mediciones son tomadas con una frecuencia de 120 Hz y digitalizadas a 16 bits dando un total de tasa de datos de $R_{PSA} = (120Hz)(16bits) = 1920 \text{ bps}$.

2.4 Oxímetro de pulso

Un oxímetro de pulso reporta el nivel de saturación de oxígeno de la hemoglobina en la sangre arterial de manera no-intrusiva, en lugar de medir la saturación de oxígeno directo de una muestra de sangre. Un oxímetro convencional cuenta con un par de diodos emisores de luz (LEDs) y un fotodiodo. El medio de propagación de la luz para llegar al fotodiodo es una porción del cuerpo del paciente, generalmente un dedo o el lóbulo de una oreja (Figura 9). Uno de los LED tiene una longitud de onda de 660 nm (rojo), mientras que el otro tiene una longitud de onda de 940 nm (infrarrojo). El nivel de oxígeno en la hemoglobina cambia las características de absorción de la luz, por lo tanto, se puede calcular el valor de saturación de oxígeno en la sangre de la relación entre la absorción de la luz roja e infrarroja.



Figura 9. Oxímetro de pulso ⁸

⁸ Imagen recuperada en noviembre 2012 de <http://www.medical-monitors.com/tripleoximeters.html>

El oxímetro de pulso es una herramienta básica para la detección y tratamiento de enfermedades del corazón. Como los niveles de oxígeno están relacionados al pulso cardiaco, el cambio en la absorción de la luz roja e infrarroja es muestreado a 60 Hz y digitalizado con 16 bits, dando una tasa de datos de $R_{OXI} = (60Hz)(16bits) = 960 \text{ bps}$.

2.5 Gasto cardiaco

El gasto cardiaco es una medición del volumen bombeada por el corazón, ya sea por el ventrículo derecho o izquierdo, en un intervalo de un minuto. Es igual al volumen de sangre bombeada por cada latido del corazón multiplicado por el pulso cardiaco. La medición del gasto cardíaco es de gran importancia en enfermedades como la hipertensión y diferentes fallas del corazón. Aunque existen métodos más sofisticados basados en ultrasonido (Figura 10), una de las formas más comunes de para la medición no-invasiva se realiza midiendo el pulso arterial, con dispositivos similares al mostrado en la Figura 8.



*Figura 10. Sensor ultrasónico para la medición del gasto cardíaco*⁹

⁹ Imagen recuperada en noviembre 2012 de http://www.healthcare.philips.com/in_en/products/ultrasound/Transducers/S5_1.wpd

La medición no-invasiva se realiza a una frecuencia de 40 Hz. Las muestras son digitalizadas con 16 bits resultando en una tasa de datos de $R_{OXI} = (40Hz)(16bits) = 640$ bps.

2.6 Temperatura

La medición de la temperatura corporal se realiza por medio de un termómetro electrónico (Figura 11). Se recomienda tomar muestras con una frecuencia de 0.2 Hz a 1 Hz y digitalizarlas a 16 bits por muestra, dando como resultado una tasa de datos de 2.4 bps a 16 bps.



Figura 11. Termómetro electrónico médico¹⁰

2.7 Discusión sobre las variables fisiológicas en telemonitoreo

En los párrafos anteriores se introdujeron brevemente las variables fisiológicas consideradas más relevantes para un escenario de telemonitoreo. Aunque existen

¹⁰ Imagen recuperada en noviembre 2012 de http://www.omegahealthcare.co.uk/images/Omron_Eco_Temp_Thermometer.jpg

muchas otras variables fisiológicas que pueden ser medidas en diferentes aplicaciones de telemonitoreo, las descritas en este capítulo son las que se encuentran más comúnmente en escenarios de telemonitoreo dentro de hospitales o en el hogar. En particular, el monitorear estas variables es importante para el tratamiento de enfermedades como hipertensión, diabetes, problemas del corazón y para el monitoreo de adultos mayores. Sin embargo, cabe señalar que dependiendo de la aplicación es posible agregar o descartar más variables en caso de que así se requiriese.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las principales características de transmisión de las variables fisiológicas consideradas en este trabajo de investigación. El total acumulado de la tasa de datos de todas las variables seleccionadas es de 15,536 bps. Cabe señalar que en la literatura la mayoría de las variables para telemonitoreo no se consideran sensibles al retardo (Malindi *et al.*, 2011). Una excepción es el ECG, el cual tiene una sensibilidad al retardo máxima de 1 segundo (Skorin-Kapov *et al.*, 2010).

Tabla 1. Características de transmisión de las variables fisiológicas

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	x16	NO	960
Gasto Cardíaco	40	x16	NO	640
Temperatura	1	x16	NO	16
TOTAL				15,536 bps

A partir de la información presentada en este capítulo es posible concluir que los requerimientos de transmisión de las variables fisiológicas pueden ser servidos por tecnologías de tasas de datos medianas y bajas. Además, en la mayoría de la literatura consultada se estipula que estas señales no tienen una sensibilidad al retardo crítica, a excepción del ECG. Esto permite considerar la implementación de esquemas de empaquetado de información para poder mejorar las prestaciones brindadas por la red. En el siguiente capítulo se describe el funcionamiento de tecnologías inalámbricas habilitadoras de redes de sensores de área corporal capaces de cubrir los requerimientos de transmisión de las variables fisiológicas presentadas en este capítulo.

Capítulo 3

Tecnologías de redes inalámbricas de área personal

3.1 Introducción

Tradicionalmente los sistemas de comunicaciones inalámbricos han operado bajo el modo de infraestructura fija en la cual el usuario es servido dentro de un área determinada. Los avances tecnológicos en el manejo de semiconductores han permitido la miniaturización de dispositivos electrónicos y disminuido el consumo de potencia de los mismos, estos avances han abierto un nuevo campo de oportunidad para las comunicaciones inalámbricas: el de las redes inalámbricas de área personal (WPAN).

Las WPAN son utilizadas para transmitir información a cortas distancias entre un grupo privado e íntimo de dispositivos participantes. Una conexión a través de una WPAN involucra poca o nula infraestructura y/o conectividad directa con redes fuera del enlace. Esto permite soluciones de reducido tamaño, eficientes en el consumo de potencia y económicas para ser implementadas en un gran número de dispositivos. Debido a estas características, diversas tecnologías de WPANs (por ejemplo Bluetooth o IEEE 802.15.4) han sido propuestas para habilitar redes de sensores de área corporal en escenarios de telemonitoreo (Benocci *et al.*, 2009) (Corchado *et al.*, 2010) (González-Valenzuela *et al.*, 2011) (Koh *et al.*, 2006) (Misic *et al.*, 2009) (Sharma *et al.*, 2011) (Zhang *et al.*, 2009).

Uno de los organismos encargados de la estandarización de las WPAN es el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Dentro de esta asociación se

creó el grupo de trabajo IEEE 802.15 en el cual se especifican los estándares para las WPAN. Este grupo de trabajo se divide a su vez en grupos específicos dedicados a un tema en particular dentro del marco de las WPAN, entre los más importantes para este trabajo de investigación destacan:

Grupo 1: WPAN / Bluetooth

Es un estándar basado en la tecnología Bluetooth que define las especificaciones de capa física (PHY) y control de acceso al medio (MAC) para conectividad inalámbrica con dispositivos fijos, portables y móviles dentro de lo que se denomina un espacio personal de operación. Este espacio personal de operación es una región que se mueve junto con la persona y abarca aproximadamente 10 metros (IEEE Standards Association, 2005).

Grupo 4: WPAN de baja tasa de datos

El grupo fue constituido para investigar una solución de baja tasa de datos, con duración de batería prolongada y muy baja complejidad. La primera versión del estándar IEEE 802.15.4 fue liberada en 2003 y posteriormente reemplazada por IEEE 802.15.4-2006. Varios protocolos de capa de red (estandarizados y propietarios) se utilizan sobre las capas definidas por IEEE 802.15.4. (e.g. ZigBee, WirelessHART, entre otros).

Grupo 6: Redes de área corporal

Este grupo, formado en 2007, está desarrollando un estándar de comunicación optimizado para dispositivos de bajo consumo de potencia con operación sobre, dentro o alrededor del cuerpo humano. Este estándar atenderá diversas aplicaciones incluyendo médicas, entretenimiento, electrónica de consumo, entre otras. Actualmente se cuenta con el borrador del estándar que se someterá a votación para su liberación (Kwak *et al.*, 2010).

Además de los grupos de trabajo y estándares IEEE previamente mencionados, el Bluetooth SIG liberó en 2010 la versión 4.0 del estándar de Bluetooth, la cual incorpora un nuevo modo de operación de bajo consumo de potencia llamado Bluetooth Low Energy (BLE). Debido a que el telemonitoreo es una de las principales aplicaciones por las que fue desarrollado este estándar, en este trabajo se utiliza Bluetooth Low Energy para la transmisión en los sensores de las diferentes variables fisiológicas. Además, al momento de realización de esta tesis, aún no existen esfuerzos reportados en la literatura para el despliegue de redes de sensores de telemonitoreo utilizando esta tecnología. Por lo tanto, BLE se utilizará para formar la WBAN encargada de recolectar las variables fisiológicas en el primer salto de red.

En este trabajo se propone utilizar el estándar IEEE 802.15.4 para enviar la información desde la WBAN hacia el resumidero de información por medio de un segundo salto de red. Esto, principalmente debido a su simplicidad, arquitectura y tasa de datos. Sin embargo, es necesario revisar las capacidades de las tecnologías inalámbricas seleccionadas con la finalidad de estudiar su utilización en un escenario de telemonitoreo. Por lo tanto, En este capítulo se describirán las características más importantes de Bluetooth Low Energy e IEEE 802.15.4.

3.2 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (BLE) es un conjunto de protocolos del estándar de telecomunicaciones Bluetooth, enfocado principalmente a aplicaciones de bajo consumo de potencia, baja tasa de datos y de corto alcance (hasta 50 metros). Originalmente desarrollado por Nokia en el 2004 bajo el nombre de Wibree, Bluetooth Low Energy fue incluido en la versión Bluetooth 4.0 del estándar liberado en julio del 2010.

El objetivo principal de esta tecnología inalámbrica es habilitar la transmisión de información en dispositivos con requerimientos de baja tasa de datos y bajo consumo de potencia en las áreas de cuidado de la salud, deporte, seguridad y entretenimiento en casa. Cabe señalar que el bajo consumo de potencia no es alcanzado por la tecnología implementada en el radio, sino por el diseño del protocolo para permitir ciclos de trabajo muy pequeños y tamaños de paquetes menores a los que se tendrían con la tecnología Bluetooth. De hecho, la circuitería del radio de Bluetooth Low Energy es la misma a la utilizada en Bluetooth y ambos operan en la banda ISM de 2.4 GHz basados en un esquema de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, “*Time Division Multiple Access*”).

3.2.1 Arquitectura

La arquitectura del estándar Bluetooth Low Energy define cuatro diferentes roles para los dispositivos:

- **Anunciante (Advertiser):** En un dispositivo que se está anunciando en diferentes canales como un dispositivo libre para poder establecer una conexión por medio de paquetes de anuncio.
- **Escáner (Scanner):** Este dispositivo busca en los diferentes canales a otros dispositivos que se están anunciando para establecer una conexión.
- **Maestro (Master):** Es el dispositivo central encargado iniciar y manejar todas las conexiones dentro de la red. Una de las tareas más importantes del maestro es mantener la sincronía entre todos los dispositivos para la correcta implementación de la técnica de acceso al medio TDMA.
- **Esclavo (Slave):** Es un dispositivo que está unido y sincronizado a la red creada por un maestro. Un esclavo puede recibir y enviar datos desde y hacia el maestro, sin embargo no puede comunicarse directamente con los demás esclavos en la red.

Un dispositivo que se encuentra en su estado de anuncio y recibe una petición de conexión se convierte automáticamente en esclavo, mientras que el dispositivo que decide iniciar la conexión se convierte en el maestro. En la Figura 12 se muestran en forma de diagrama de estados los diferentes tipos de dispositivos y los diferentes estados. Todos los dispositivos de Bluetooth Low Energy deben de tener la capacidad de asumir cualquier rol según sea necesario.

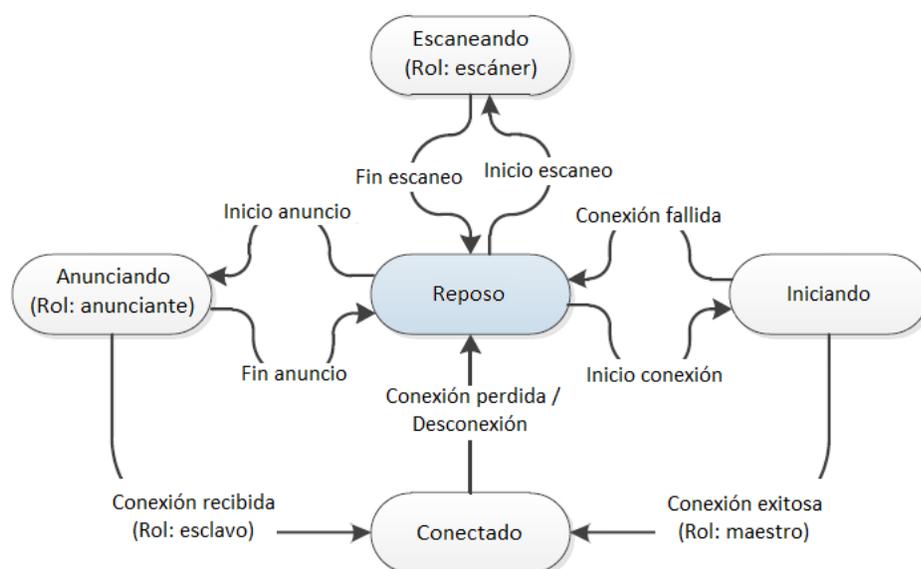


Figura 12. Diagrama de estados de los dispositivos Bluetooth Low Energy

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 (Figura 13). Si un esclavo requiere enviar información hacia otro en la red tiene que enviar la información al maestro y éste se encargará de direccionarla hacia el destino correcto.

Una vez que la conexión ha sido establecida un maestro debe tener la capacidad de escanear el canal en búsqueda de más dispositivos y de solicitar a un dispositivo anunciante (con previo conocimiento de su dirección y capacidades)

que se una a la red, siempre y cuando existan recursos disponibles para atenderlo.

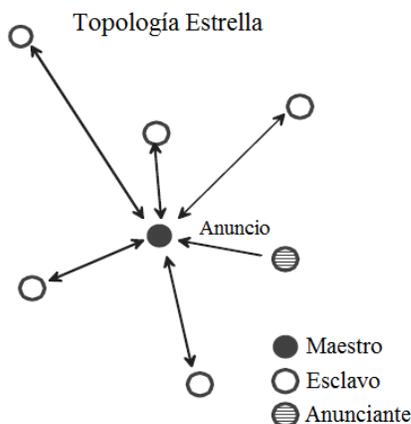


Figura 13. Topología estrella para redes de Bluetooth Low Energy

3.2.2 Capa física

Los dispositivos Bluetooth Low Energy operan en la banda ISM de 2.4 GHz. Un esquema adaptativo de espectro ensanchado por saltos en frecuencia (FHSS, “*Frequency Hopping Spread Spectrum*”) es utilizado por los transceptores para combatir la interferencia de otras tecnologías inalámbricas operando en la misma banda de frecuencia y convivir con otras redes y dispositivos Bluetooth.

Dentro del estándar se definen 40 canales de radiofrecuencia con una separación entre canales de 2 MHz. La frecuencia central de cada uno de ellos está dada por $2402 + k \cdot 2$ MHz, donde $k = 0, \dots, 39$. En la Figura 14 se muestran los 40 canales con sus respectivas frecuencias centrales.

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

Keying”), el cual es conocido por su baja complejidad, con una tasa de bits pico de 1 Mbps.

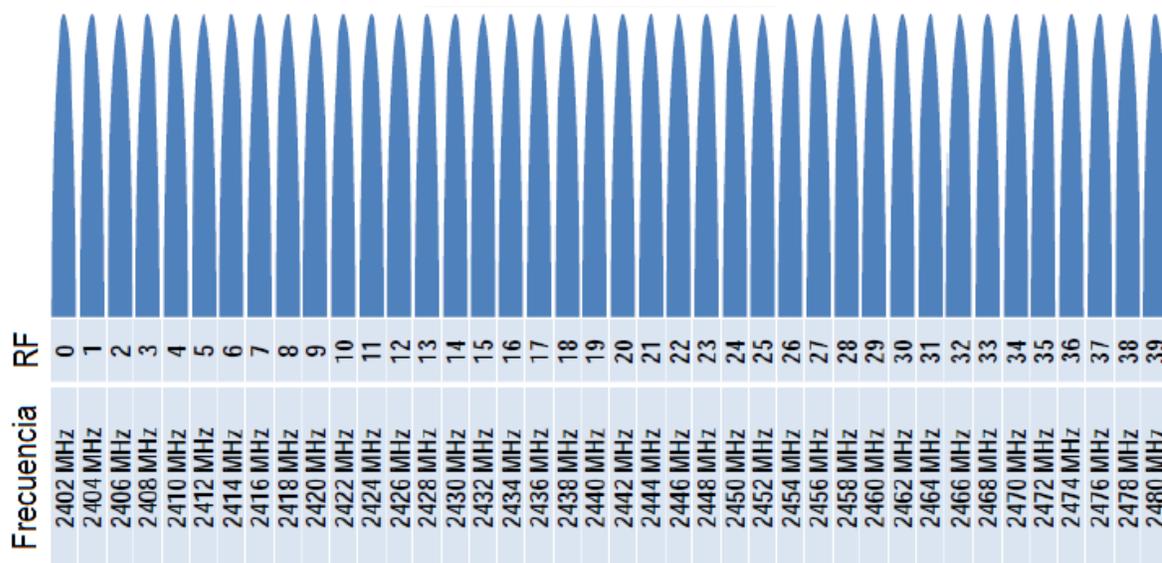


Figura 14. Canales de radiofrecuencia del estándar Bluetooth Low Energy (Bluetooth SIG, 2010).

3.2.3 Capa de enlace de datos

La capa de enlace de datos (LL, *Link Layer*) de Bluetooth Low Energy es la parte medular del estándar ya que es la encargada de:

- Manejar los procedimientos del diagrama de estados y los roles de los dispositivos (Figura 12).
- Controlar los eventos de conexión y desconexión en la topología de la red (Figura 13).
- Definir la secuencia pseudoaleatoria de saltos en los canales de FHSS.
- Definir los canales utilizados para el proceso de anuncio.

Dentro de una conexión los paquetes de datos son transmitidos en lo que se denomina eventos de conexión. El maestro es el encargado de avisar a cada uno de sus esclavos cada cuanto tiempo sucederá su respectivo evento de conexión (intervalo de conexión) y en qué canal podrán ser atendidos. En estos eventos de conexión el maestro y el esclavo intercambian información utilizando un mismo canal, el canal cambia al inicio de cada evento de conexión diferente.

Cuando un dispositivo requiere conectarse envía paquetes de anuncio saltando en los 3 canales destinados para ello. Los dispositivos que requieren formar una conexión con otros dispositivos buscan en estos 3 canales paquetes de anuncio y se les conoce como iniciadores. Una vez que el paquete de anuncio es recibido, el iniciador envía un paquete al anunciante de solicitud de conexión, el cual contiene los siguientes parámetros necesarios para el establecimiento de la conexión:

- **Mapa A-FHSS:** Indica la secuencia pseudoaleatoria de canales en los que el esclavo deberá estar saltando cada evento de conexión.
- **Ventana de transmisión:** Indica cuántos milisegundos después de haber recibido el paquete de solicitud de conexión dará lugar el primer evento de conexión.
- **Intervalo de conexión:** Indica cada cuanto tiempo sucederán los eventos de conexión con el dispositivo que se va a asociar, dependiendo de los requerimientos del mismo. Este valor es muy importante pues de él depende la cantidad de información que se puede intercambiar y la cantidad de esclavos que podrían ser servidos en la red. El intervalo de conexión varía de 7.5 ms hasta 4000 ms.

En la Figura 16 se muestra el proceso de establecimiento de conexión. Una vez iniciada la conexión el maestro puede ajustar los valores de la ventana de transmisión según lo vaya requiriendo.

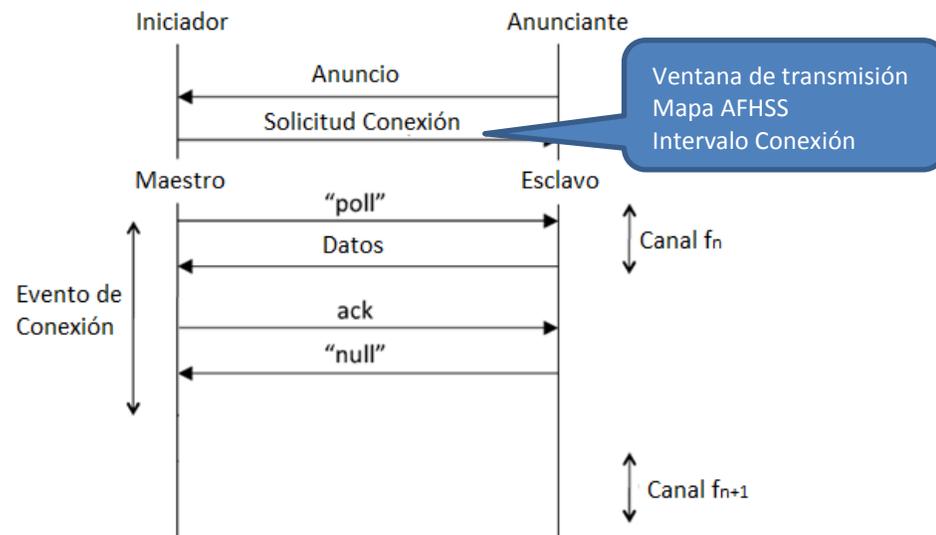


Figura 16. Proceso de establecimiento de conexión en Bluetooth Low Energy

En un evento de conexión un maestro y un esclavo pueden intercambiar todos los paquetes de datos que requieran antes de que dé inicio el siguiente evento de conexión del maestro (Figura 17).

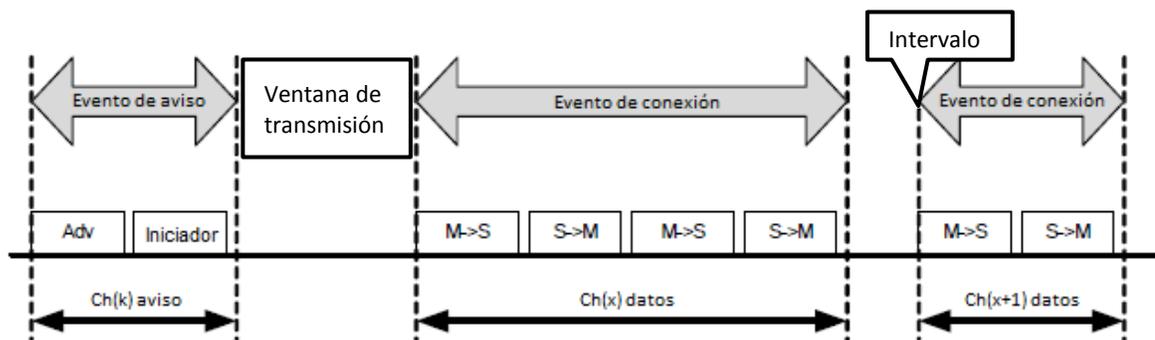


Figura 17. Proceso de eventos de conexión en Bluetooth Low Energy (Bluetooth SIG, 2010)

Formato de LLDU

Existe sólo un formato de unidad de datos de la capa de enlace (LLDU, Link Layer Data Unit) para los paquetes de anuncio y de datos. Cada paquete consiste de cuatro campos:

- **Preámbulo:** Utilizado en el receptor para mantener la sincronización del flujo de bits.
- **Dirección de acceso:** Es una dirección asociada a cada canal físico entre dos dispositivos de Bluetooth Low Energy, se utiliza para saber a qué dispositivos va dirigida la información. Su objetivo es mitigar los efectos de colisiones con otras redes Bluetooth transmitiendo en el mismo espacio.
- **Unidad de paquete de datos (PDU):** Contiene la carga útil variable, ya sea de un canal de aviso o de datos, que se requiere transmitir. Varía de 2 a 39 bytes.
- **CRC:** Se utiliza un código de 24 bits para detectar errores.

El tamaño total de un paquete de Bluetooth Low Energy varía desde 10 hasta 47 bytes (Figura 18).



Figura 18. Formato de paquete LLDU en Bluetooth Low Energy

La unidad de paquete de datos (PDU) del canal de datos es utilizada para intercambiar información entre maestro-esclavo y contiene los siguientes campos:

- **Encabezado:** Utilizado para saber si es un paquete de control o de datos, tener los números de secuencia, la longitud de los paquetes y saber si se transmitirán más paquetes en el evento de conexión.

- **Carga útil:** Es la información que se quiere transmitir. Variable de 0 hasta 27 bytes.
- **Comprobación de integridad de mensaje (MIC, “Message Integrity Check”):** Utilizado solamente cuando se habilita el esquema de seguridad.

Los tamaños de los campos del PDU del canal de datos se muestran en la Figura 19.



Figura 19. Formato de PDU del canal de datos en Bluetooth Low Energy

3.2.4 Análisis del caudal eficaz máximo para Bluetooth Low Energy

El caudal eficaz máximo en Bluetooth Low Energy es la tasa máxima de bits de carga útil que pueden ser transmitidos entre un maestro y un esclavo. A continuación se muestra un análisis de la tasa de transmisión máxima y los tiempos necesarios para la misma bajo el estándar de Bluetooth Low Energy.

El caudal eficaz máximo es calculado entre un maestro y un esclavo solamente que estén lo suficientemente cerca para considerar que no existen pérdidas por propagación y el canal es ideal. También se considera que no hay pérdidas por colisiones (ya que no hay otras redes transmitiendo en el mismo espacio), no hay paquetes descartados por sobrecarga del buffer y el nodo transmisor siempre tiene un paquete disponible para ser enviado.

Para calcular el caudal eficaz máximo dentro de un evento de conexión es necesario conocer el retardo requerido para transmitir un paquete con la máxima carga útil posible. Este retardo general consta del tiempo necesario para que el paquete sea transmitido más el tiempo de espacio inter-trama (*TIFS*), que se utiliza después de cada paquete para que la capa física pueda procesar los datos. El estándar Bluetooth Low Energy marca un tiempo de espacio inter-trama (*TIFS*) de $150 \mu\text{s}$. Entonces el caudal eficaz total está dado por:

$$CE_{BLE} = \frac{8 \cdot x}{T_M(x) + T_S(x) + 2TIFS} \quad (1)$$

Donde:

x representa el número de bytes del paquete enviado (carga útil).

$T_M(x)$ es el tiempo necesario para que el maestro transmita el paquete.

$T_S(x)$ es el tiempo necesario para que el esclavo transmita el paquete.

En la expresión anterior se considera que tanto como maestro y esclavo transmiten un paquete del mismo tamaño, es decir, es un tráfico simétrico. Por lo tanto maestro y esclavo tendrán el mismo tiempo de transmisión, entonces:

$$T_M(x) = T_S(x) = 8 \cdot \frac{L_{LLDU} + x}{R_{BLE}} \quad (2)$$

Donde:

L_{LLDU} representa la longitud de la sobrecarga del paquete LLDU (10 bytes).

R_{BLE} representa la tasa de transmisión de Bluetooth Low Energy (1 Mbps).

Con estos datos es posible resolver la ecuación (1) para tráfico simétrico en Bluetooth Low Energy y demostrar que el caudal eficaz máximo con tráfico simétrico es

$$CE_{BLE} = \frac{8 \cdot (27\text{Bytes})}{296\mu s + 296\mu s + 2(150\mu s)} = 242,152 \text{ bps} \quad (3)$$

Cuando se tiene en consideración tráfico asimétrico del esclavo hacia el maestro, el dispositivo maestro debe enviar un paquete sin carga útil cuando es su turno de transmitir. Por lo tanto $T_M(x) \neq T_S(x)$ y el caudal eficaz máximo para un esclavo es

$$CE_{BLE} = \frac{8 \cdot (27\text{Bytes})}{80\mu s + 296\mu s + 2(150\mu s)} = 319,526 \text{ bps} \quad (4)$$

La eficiencia máxima de transmisión en Bluetooth Low Energy es apenas del 31.9%, lo cual es debido principalmente a que la sobrecarga que contiene un paquete con carga útil máxima es del 27%. Con estos tamaños de paquetes pequeños y los limitados ciclos de trabajo es como Bluetooth Low Energy se convierte en un estándar de bajo consumo de potencia.

3.3 IEEE 802.15.4

El estándar de telecomunicaciones IEEE 802.15.4 es una solución para redes inalámbricas de área personal de baja tasa de datos (LR-WPAN), la más reciente versión del estándar fue liberada en 2006. Una LR-WPAN es una red simple y de bajo costo que permite conectividad inalámbrica en aplicaciones con requerimientos de consumo de potencia limitado y caudal eficaz moderado (menor a 250kpbs). Los principales objetivos de las LR-WPAN son facilidad de instalación,

transferencia de datos confiable, bajo alcance de operación, bajo costo y duración de batería razonable, manteniendo siempre un protocolo simple y flexible (IEEE Computer Society, 2006).

Algunas de las principales características de las LR-WPAN son las siguientes:

- Tasas de datos pico de 250 kbps, 100 kbps, 40 kbps y 20kbps.
- Topología estrella, igual-a-igual (peer-to-peer), malla y árbol.
- Direcciones cortas de 16-bit o extendidas de 64-bit.
- Modo de operación con paquetes fano y sin paquetes fano.
- Acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones (CSMA/CA) ranurado y no ranurado.
- Asignación opcional de ranuras de tiempo garantizadas (GTS) en el modo de operación con paquetes fano.
- Protocolo de acuse de recibo (ACK) para aplicaciones que requieren alta fiabilidad.
- 16 canales en la banda de 2450 MHz, 10 canales en la banda de 915 MHz y un canal en la banda de 868 MHz.

Como se mencionó anteriormente, el protocolo IEEE 802.15.4 define la capa PHY y la capa MAC para este tipo de redes, las cuales sirven como base para protocolos de capas superiores. Generalmente, IEEE 802.15.4 constituye la PHY/MAC de un protocolo mayor (e.g. ZigBee), donde las capas superiores proveen enrutamiento, topologías complejas y otras funcionalidades para desplegar redes de sensores a gran escala.

3.3.1 Arquitectura

Dentro de la arquitectura del estándar se definen dos tipos de dispositivos: dispositivo de funcionalidades completas (FFD, “*Full Function Device*”) y

dispositivo de funcionalidades reducidas (RFD, “*Reduced Function Device*”). Aparte de los tipos de dispositivos, se definen modos de operación, un FFD puede tener tres modos de operación diferentes:

- **Coordinador PAN:** Es el encargado de crear la red e identificarla. Selecciona el canal por el cual se transmitirá y el identificador de la red para que los demás nodos se asocien a la misma. Aparte realiza la tarea de sincronización completa de la red con cada uno de los nodos mediante la transmisión de paquetes faro (si estos están habilitados).
- **Coordinador:** Provee servicios de sincronización a otros dispositivos y coordinadores dentro de su área de alcance. Sólo puede existir un coordinador PAN en cada una de las redes.
- **Dispositivo (o Dispositivo Final):** Es un nodo que no cuenta con funcionalidades de coordinador y sólo se puede tener comunicación directa con algún coordinador o con el coordinador PAN.

Por otro lado, un RFD sólo puede operar bajo el modo de dispositivo final y está diseñado para tener una funcionalidad más simple con la finalidad de poder ser implementado utilizando baja capacidad de memoria y recursos mínimos. Por lo tanto, un FFD puede comunicarse con los RFD y otros FFD, mientras que un RFD puede comunicarse solamente con un FFD.

En el estándar se definen dos topologías de red: topología estrella y topología igual-a-igual (que puede ser extendida para desplegar redes tipo malla y árbol). En la topología estrella la comunicación se establece entre los dispositivos y el coordinador PAN como nodo central. Cabe señalar que la topología igual-a-igual se refiere a que cualquier dispositivo puede comunicarse con cualquier otro mientras se encuentre dentro de su área de alcance. Este modo de operación

permite la implementación de redes más complejas, como las redes con topología tipo malla y árbol, tal y como se muestra en la Figura 20.

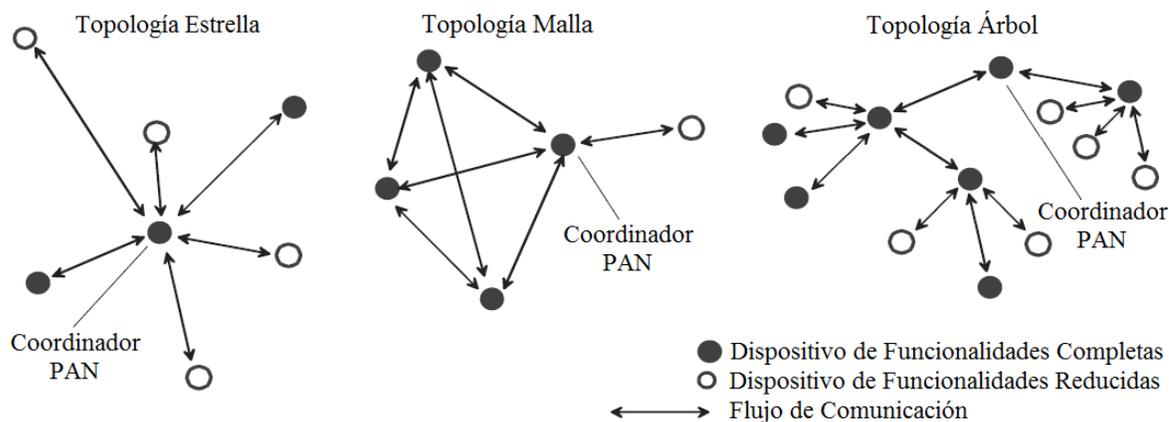


Figura 20. Ejemplos de topología de red para IEEE 802.15.4

3.3.2 Capa física

Las funciones de la capa física de IEEE 802.15.4 son las siguientes:

- Activación y desactivación del transceptor.
- Detección de energía (ED, “*Energy detection*”) dentro del canal actual.
- Evaluación de canal libre (CCA, “*Clear channel assessment*”) para acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones (CSMA/CA, “*Carrier sense multiple access with collision avoidance*”).
- Selección de frecuencia del canal.
- Transmisión y recepción de datos.

A nivel de capa física el radio opera en alguna de las siguientes bandas de frecuencia:

- 868-868.6 MHz (e.g. Europa)

- 902-928 MHz (e.g. Norte América)
- 2400-2483.5 MHz (e.g. a nivel mundial)

En todas las bandas de frecuencia se utiliza la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) con la finalidad de mitigar la interferencia de otras redes y tener mayor robustez frente al ruido. Sin embargo, en cada una de estas bandas se definen diferentes características de operación como lo son el ancho de banda, número de canales, tasa de bits, modulación, parámetros de ensanchado, entre otros. Por ejemplo, en la banda de 868 MHz se define un solo canal con un ancho de aproximadamente 600 kHz a una tasa de 20 kbps, en la banda de 915 MHz se define un total de 10 canales cada uno con un ancho de 2 MHz a una tasa de 40 kbps, mientras que en la banda de 2450 MHz se definen 16 canales cada uno con un ancho de 2 MHz a una tasa de 250 kbps (Figura 21).

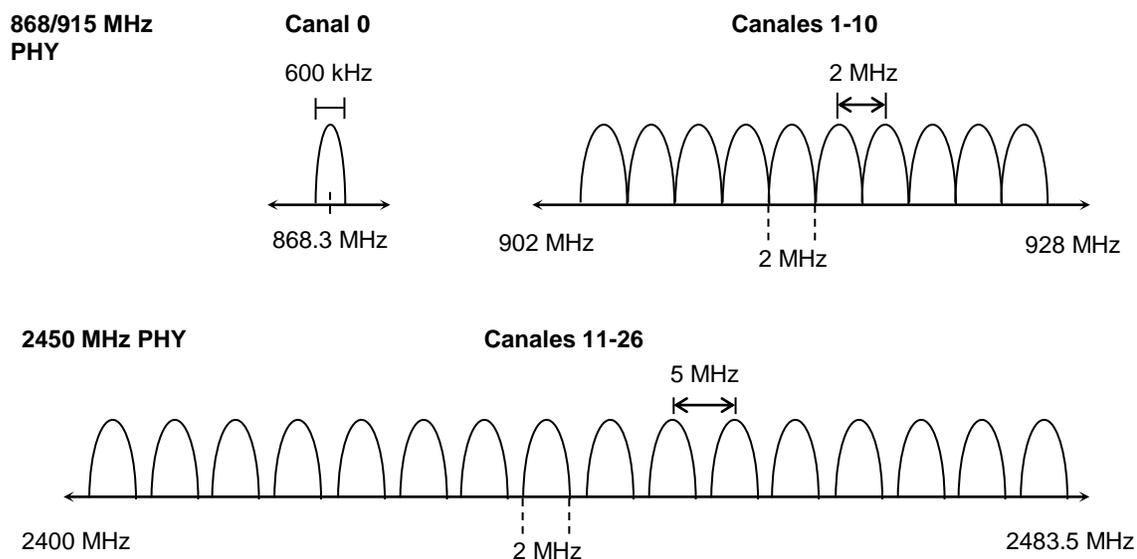


Figura 21. Bandas de frecuencia de operación de IEEE 802.15.4

Algunas de las características principales de cada una de estas bandas de frecuencia se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Bandas de frecuencia y parámetros de transmisión para IEEE 802.15.4

PHY (MHz)	Banda de Frecuencia (MHz)	Parámetros de ensanchado		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

Formato de PPDU

La estructura de la unidad de datos del protocolo PHY (PPDU, “*PHY protocol data unit*”) consiste de los siguientes componentes:

- Un encabezado de sincronización (SHR, “*Synchronization header*”), el cual permite la sincronización con el flujo de bits. Está constituido por dos partes: un campo de preámbulo, utilizado por el transceptor para lograr la sincronía con los chips/símbolos y el delimitador de inicio de trama (SFD, “*Start-of-frame delimiter*”), el cual indica el final del SHR y el inicio del paquete de datos.
- Un encabezado PHY (PHR, “*PHY header*”) el cual contiene la longitud de la trama.
- La carga útil de la capa PHY con una longitud variable dependiendo de la trama de la sub-capa MAC, llamada unidad de datos para servicio PHY (PSDU, “*PHY service data unit*”). El tamaño máximo de la PSDU es de 127 bytes.

La estructura del paquete unidad de datos del protocolo PHY (PPDU) se muestra en la Figura 22.

		Octetos		
		1	variable	
Preámbulo	SFD	Longitud de trama (7 bits)	Reservado (1 bit)	PSDU
SHR		PHR		Carga útil PHY

Figura 22. Formato de PPDU en IEEE 802.15.4

3.3.3 Sub-capa MAC

Las tareas que realiza la sub-capa MAC son: gestión de paquetes faro (“*beacons*”), acceso al canal, gestión de ranuras de tiempo garantizadas (GTS), validación de tramas, distribución de tramas ACK, asociación y des-asociación.

El acceso al canal se puede realizar por dos modos de operación diferentes: con paquetes faro (“*beacon-enabled*”) y sin paquetes faro (“*non beacon-enabled*”).

- En el modo de operación con paquetes faro se utiliza una estructura de supertrama, la cual está delimitada por paquetes faro enviados periódicamente por el coordinador, los cuales sirven para sincronizar a todos los dispositivos que se encuentran dentro de la PAN. La supertrama está constituida por un periodo activo y un periodo inactivo. Durante el periodo activo las estaciones contienen por acceder al canal utilizando el mecanismo de CSMA/CA ranurado, además es posible reservar ranuras de tiempo (GTS) para dispositivos que requieran transmisión de servicios garantizados. Durante el periodo inactivo de la supertrama el coordinador no interactúa con los demás dispositivos, lo que les permite entrar en un modo de operación de bajo consumo de potencia.

- En el modo de operación sin paquetes fano no se utiliza la estructura de supertrama y no hay periodos de inactividad, por lo que el acceso al canal se realiza mediante el mecanismo de CSMA/CA no ranurado.

En trabajos de investigación similares a este se utiliza un modelo analítico basado en el modo de operación con paquetes fano, principalmente debido a que se requieren servir algunas señales biomédicas con la utilización de ranuras de tiempo garantizadas y solamente se utiliza para la red de sensores de área corporal (Misic *et al.*, 2009). Por lo tanto, se modela el algoritmo de acceso al medio CSMA/CA en su versión ranurada. En contraste, en este trabajo se requiere probar esta tecnología a sus máximas capacidades de transmisión, ya que IEEE 802.15.4 se utiliza en el enlace del segundo salto en la red donde la prioridad es poder servir a un mayor número de usuarios. Es por esto que no es necesaria la utilización del formato de supertrama ni la habilidad de entrar en un periodo inactivo. Entonces, debido a que una de las prioridades en este trabajo es poder incrementar el número de usuarios siendo servidos en la red del segundo salto, se utiliza IEEE 802.15.4 en el modo de operación sin paquetes fano y la banda de 2.4 GHz, ya que esta última presenta la mayor tasa de transmisión y un mayor número de canales.

Algoritmo de CSMA/CA del estándar IEEE 802.15.4

Dependiendo del modo de operación elegido, ya sea con paquetes fano o sin paquetes fano, el algoritmo de acceso al medio será CSMA/CA ranurado o CSMA/CA no ranurado, respectivamente. Los dos algoritmos son implementados utilizando unidades de tiempo llamadas periodos de desistimiento (“*backoff periods*”), donde cada periodo de desistimiento equivale a *aUnitBackoffPeriod* símbolos.

Cuando se utiliza CSMA/CA ranurado los límites de los periodos de desistimiento de cada dispositivo de la PAN están alineados los límites de las ranuras de la

supertrama del coordinador, es decir, los periodos de desistimiento de todos los dispositivos están sincronizados. Por el contrario, cuando se utiliza CSMA/CA no ranurado, los periodos de desistimiento de un dispositivo no necesitan estar sincronizados con los de los demás.

Cada dispositivo tiene las siguientes tres variables principales:

- **NB**: Inicializado en 0 para cada intento de transmisión, indica el número de veces que el algoritmo de CSMA/CA tuvo que desistir al intentar realizar una transmisión y pasar a la siguiente etapa de desistimiento. El número máximo de etapas de desistimiento está dado por $macMaxCSMABackoff$.
- **BE**: Es el exponente de desistimiento ("*backoff exponent*") asociado con el número de periodos de desistimiento un dispositivo debe esperar antes de intentar acceder al canal. El intervalo de valores que puede abarcar el exponente de desistimiento están definidos por $[macMinBE, macMaxBE]$ como valor mínimo y máximo, respectivamente.
- **CW**: Es la longitud de la ventana de contención, la cual establece el número de periodos de desistimiento que el canal debe de estar libre de actividad antes de que el dispositivo pueda realizar una transmisión.

En la Figura 23 se muestra un diagrama de bloques del algoritmo de acceso al medio CSMA/CA no ranurado. En el momento en el que se desea realizar una nueva transmisión, las variables *NB* y *BE* son inicializadas (paso 1). La sub-capas MAC debe esperar por un número aleatorio de periodos de desistimiento uniformemente distribuido (paso 2) en el intervalo de $[0, 2^{BE} - 1]$. Después del tiempo de espera, la capa física (PHY) debe realizar una evaluación de canal libre (CCA) (paso 3). Si el canal está libre (paso 4) la sub-capas MAC comienza la transmisión de inmediato.

Al término de cada transmisión es necesario esperar un tiempo de espacio inter-trama (IFS, "*Inter-frame space*"), debido a que la sub-capas MAC necesita un

tiempo finito de tiempo para procesar los datos obtenidos de la capa PHY. En la Sección 3.3.4 se muestran a detalle los tiempos necesarios para la transmisión de una trama.

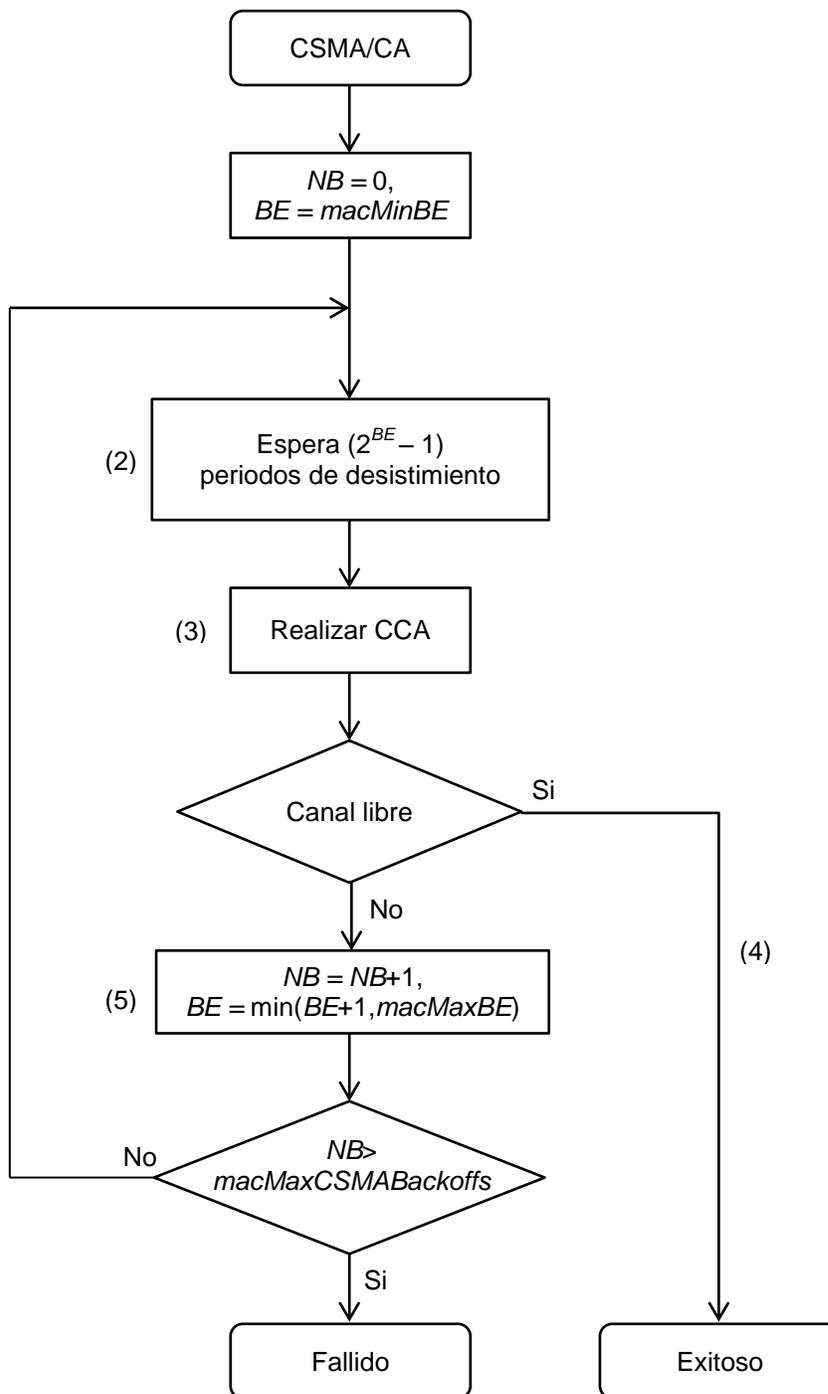


Figura 23. Diagrama de bloques del algoritmo CSMA/CA no ranurado

En caso de que canal se encuentra ocupado (paso 5) después de realizar la evaluación del canal libre (CCA), la sub-capa MAC deberá incrementar los valores de NB y BE (cuidando siempre que BE no sea mayor a *macMaxBE*). Si el valor de NB es menor o igual que *macMaxCSMABackoffs*, el algoritmo de CSMA/CA deberá regresar al paso 2, de caso contrario el algoritmo deberá terminar con el estado de acceso al canal fallido.

Formato de MPDU

La estructura de la unidad de datos del protocolo MAC (MPDU, “*MAC protocol data unit*”) es encapsulada en la PSDU de la capa física y consiste de los siguientes cuatro componentes:

- Un encabezado MAC (MHR, “*MAC header*”) el cual contiene el campo de control de trama (FCF), el número de secuencia, identificador de la PAN, direcciones de fuente y destino, y un encabezado de seguridad (opcional).
- La carga útil MAC, la cual contiene la información a transmitir.
- Un pie de MAC (MFR, “*MAC footer*”) el cual contiene una secuencia de chequeo de trama (FCS), para la detección de bits erróneos.

La estructura general de la trama MAC se muestra en la Figura 24. El tamaño de los campos de direcciones puede variar desde 0, cuando se está enviando un paquete de ACK, hasta 20 bytes, ya que es posible utilizar direcciones cortas y direcciones largas.

Ocetos 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 24. Formato de MPDU en IEEE 802.15.4

3.3.4 Análisis del caudal eficaz máximo para IEEE 802.15.4

Se define como caudal eficaz máximo para IEEE 802.15.4 a la tasa de transmisión máxima de bits de datos provenientes de una capa superior (e.g. capa de red). A continuación se muestra un 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 fijo que utiliza el algoritmo de CSMA/CA no ranurado.

Se realizarán las mismas consideraciones que en la Sección 3.2.4: el tráfico es punto a punto, el canal es ideal, no hay colisiones ni interferentes y no hay sobrecarga del búfer.

El retardo general para transmitir un paquete con la máxima carga útil posible consta del tiempo necesario para que el paquete sea transmitido más todos los elementos del algoritmo necesarios para su transmisión. Es necesario esperar un tiempo aleatorio requerido por el mecanismo de desistimiento. Además, si el mecanismo de acuse de recibo se encuentra habilitado es necesario esperar un tiempo para que el transceptor cambie de transmisor a receptor (conocido como tiempo T.A.) y el tiempo de transmisión del ACK. Para finalizar, es necesario esperar un tiempo de espacio inter-trama (IFS) que depende del tamaño del paquete. Para paquetes mayores de 18 bytes se utiliza un tiempo IFS de 640 μ s. En la Figura 25 se muestra el procedimiento completo de una transmisión.

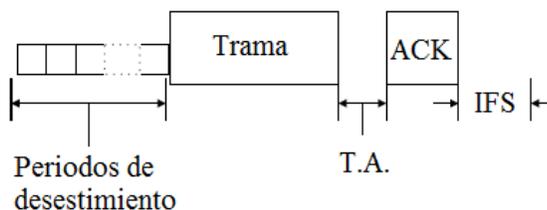


Figura 25. Procedimiento de transmisión de una trama IEEE 802.15.4

Entonces el caudal eficaz total es la carga útil efectiva dividida entre el tiempo total para la transmisión de la trama y está dado por:

$$CE_{802.15.4} = \frac{8 \cdot x}{retardo(x)} \quad (5)$$

Donde x representa el número de bytes del paquete enviado (carga útil). Y $retardo(x)$ es una función que representa el retardo total necesario para transmitir dicho paquete, el cual se define en la siguiente expresión:

$$retardo(x) = T_{CSMA} + T_{trama}(x) + T_{TA} + T_{ACK} + T_{IFS} \quad (6)$$

En la cual:

T_{CSMA} es el tiempo promedio requerido por el mecanismo de desistimiento.

$T_{trama}(x)$ es el tiempo de transmisión de una trama de x bytes de carga útil.

T_{TA} es el tiempo que el radio necesita para cambiar de transmisor-receptor.

T_{ACK} es el tiempo de transmisión de una trama de ACK.

T_{IFS} es el tiempo del espacio inter-trama (640 μ s)

El tiempo promedio requerido por el mecanismo de desistimiento está definido por el número de periodos de desistimiento necesarios para transmitir un paquete en la siguiente relación:

$$T_{CSMA} = P_{BO} \cdot T_{P_{BO}} \quad (7)$$

Donde:

P_{BO} es el número de periodos de desistimiento

$T_{P_{BO}}$ es el tiempo de un periodo de desistimiento (320 μ s)

El número de periodos de desistimiento es una variable aleatoria uniformemente distribuido en el intervalo de $[0, 2^{BE} - 1]$, donde el valor mínimo para BE es $macMinBE = 3$. Dado que se considera que sólo una estación está conteniendo por el medio, el valor de BE siempre no cambiará en cada transmisión, por lo tanto el número de periodos de desistimiento puede ser representado por la media de la variable aleatoria $(2^3 - 1) / 2 = 3.5$ periodos de desistimiento.

El tiempo de transmisión de una trama de x bytes de carga útil está relacionado con los formatos de paquetes presentados en las Secciones 3.3.1 y 3.3.2 y dado por la expresión:

$$T_{trama}(x) = 8 \cdot \frac{L_{PHY} + L_{MAC} + L_{direccion} + x}{R_{datos}} \quad (8)$$

Donde:

L_{PHY} es la sobrecarga de la capa PHY, 6 bytes en total.

L_{MAC} es la sobrecarga de la capa MAC, 5 bytes en total.

$L_{direccion}$ el tamaño de los campos de direcciones, variable entre 0 y 20 bytes

R_{datos} es la tasa pico de transmisión de datos (250 kbps).

Para transmitir una trama de ACK no se consideran los campos de direcciones, por lo tanto su tiempo de transmisión está dado por:

$$T_{ACK} = \frac{L_{PHY} + L_{MAC}}{R_{datos}} \quad (9)$$

En el caso de que no se utilicen ACK, T_{TA} y T_{ACK} son omitidos en (5). Con los datos anteriores es posible resolver (5) y calcular el caudal eficaz considerando diferentes escenarios como la utilización de direcciones cortas (16 bits) o direcciones largas (64 bits) y la utilización del esquema de ACK. En el caso de que se utilicen direcciones cortas el tamaño máximo de carga útil es de 114 bytes y en el caso de que se utilicen direcciones largas el tamaño máximo de carga útil es de 102 bytes. En la Tabla 3 se muestran los resultados del caudal eficaz para los diferentes escenarios considerados.

Tabla 3. 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

El máximo caudal eficaz que se puede alcanzar es al utilizar direcciones cortas sin el esquema de ACK, sin embargo aun así la eficiencia es baja (60.6%), esto debido principalmente a los tamaños de paquetes pequeños impuestos por el estándar.

3.4 Escenario de aplicación y arquitectura de red

En este capítulo se presentaron las capacidades de las tecnologías de WPANs que serán utilizadas para formar la red híbrida. A partir del análisis presentado, se podría concluir que el caudal eficaz máximo de Bluetooth Low Energy es lo

suficientemente alto para cubrir las necesidades de transmisión de cada una de las señales presentadas en la Tabla 1. Sin embargo, los cálculos anteriores están realizados para la transmisión entre dos dispositivos. Debido a la técnica de acceso al medio TDMA, los tiempos de acceso al canal se dividirán entre el número de esclavos que se vayan agregando a la red. Como consecuencia, el caudal eficaz percibido por cada sensor irá disminuyendo conforme se agregan esclavos a la red. Por lo tanto, para cubrir las necesidades de transmisión de cada esclavo es necesario asignar debidamente los parámetros de intervalo de conexión y ventana de transmisión a cada uno de ellos.

Debido a la topología estrella utilizada en BLE y a su área de cobertura, su utilización es adecuada en escenarios de telemonitoreo donde el resumidero de información se encuentre en la misma habitación en donde se encuentra el usuario. Sin embargo, para escenarios donde se tenga un resumidero de información remoto o se tenga movilidad del usuario, es necesario considerar algún mecanismo que permita retransmitir la información recolectada por la red BLE hacia dicho resumidero de información. Además, para servir a más usuarios y conectarlos al mismo resumidero de información utilizando una sola red BLE sería necesario asignar a cada sensor de cada usuario un intervalo de conexión específico. Eventualmente, las ranuras de tiempo para servir a los sensores se agotarían debido al tiempo mínimo de intervalo de conexión de 7.5 ms. Otra opción, sería que cada usuario formara una red BLE independiente. Esto es factible debido a que el mecanismo de saltos en frecuencia (FHSS) implementado en BLE busca reducir la interferencia mutua entre redes BLE transmitiendo de manera concurrente. Sin embargo, aún con esta solución se seguiría teniendo el problema de movilidad y además el resumidero de información tendría que contar con varios dispositivos BLE trabajando de manera independiente por cada usuario (esto para lograr tener redes BLE independientes). Por lo mencionado anteriormente en este trabajo se propone la implementación de un dispositivo que interconecte la red de área corporal BLE con un resumidero de información remoto

a través de una red IEEE 802.15.4. Esta arquitectura permitiría reducir el alcance de transmisión de los transceptores BLE, con lo cual se mejoraría aún más el consumo de energía y se reducirían los niveles de interferencia mutua (incrementando así el número de usuario que pueden ser servidos).

Por otro lado, con el caudal eficaz máximo de IEEE 802.15.4 es posible transmitir el total de la tasa de transmisión de las variables fisiológicas consideradas en la Tabla 1. Al igual que en BLE, al ir aumentando el número de dispositivos el caudal eficaz disponible para cada uno de ellos va disminuyendo. Esta disminución en el caudal eficaz se debe a la técnica de acceso al medio de IEEE 802.15.4. Por lo tanto, si se diseña una aplicación de telemonitoreo en la cual cada usuario porte varios sensores IEEE 802.15.4, al tener más de un usuario en un área común se tendrían altos niveles de interferencia mutua, lo cual podría afectar el desempeño de la red. Es por esta razón que en el trabajo de (González-Valenzuela *et al.*, 2011) se propone utilizar canales separados para cada usuario, esto con el fin de tener un número reducido de dispositivos IEEE 802.15.4 operando concurrentemente en el mismo canal. Por lo tanto, es conveniente contar con una solución que recolecte la información de los sensores sin hacer uso de transceptores IEEE 802.15.4, para después transmitir la información recopilada a través de un enlace IEEE 802.15.4. Con esta arquitectura se busca incrementar el número de usuarios en el sistema de telemonitoreo.

En este trabajo de investigación se propone la utilizar una arquitectura de red híbrida con el objetivo de mejorar las prestaciones ofrecidas por redes homogéneas BLE o IEEE 802.15.4 en escenarios de telemonitoreo. En particular, se busca disminuir la tasa de paquetes descartados y aumentar el número de usuarios que pueden ser servidos. Como se mencionó anteriormente, el esquema de saltos en frecuencia (FHSS) de BLE permite reducir significativamente la interferencia mutua entre redes BLE operando concurrentemente en un área común. Para reducir aún más la probabilidad de interferencia, se propone ajustar

el alcance de BLE para no transmitir más allá de los límites de la red de área corporal. Dado que el alcance de transmisión de la red BLE será corto, es necesario diseñar un dispositivo tipo puente que permita enviar la información recolectada hacia el resumidero de información. En esta tesis se propone diseñar un dispositivo tipo puente entre Bluetooth Low Energy e IEEE 802.15.4 con la finalidad de utilizar un enlace IEEE 802.15.4 para transmitir la información recolectada por la WBAN hacia el resumidero. La arquitectura propuesta se muestra en la Figura 26. El escenario de aplicación consiste en tener 5 esclavos BLE (cada uno para cada variable fisiológica) que envíen la información de los sensores al dispositivo tipo puente. Posteriormente, el dispositivo tipo puente reenviará dicha información hacia el resumidero mediante un enlace IEEE 802.15.4.

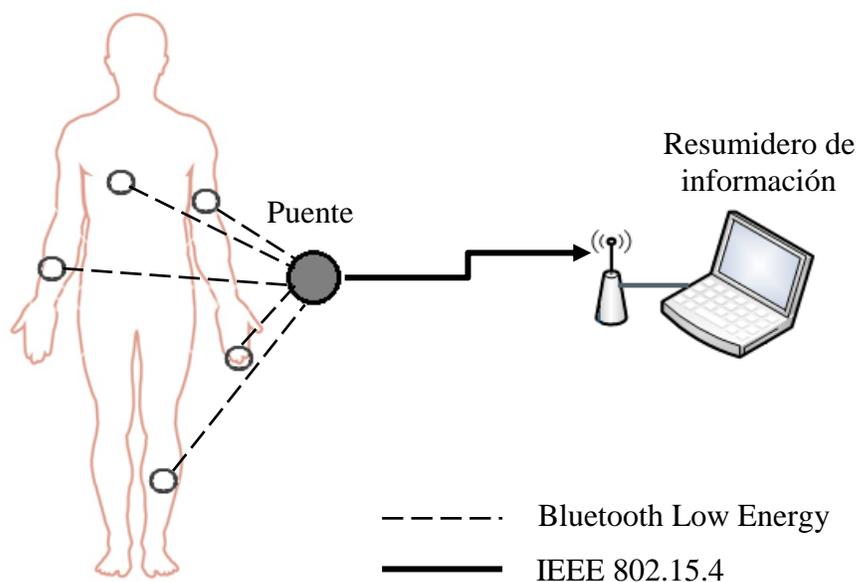


Figura 26. Arquitectura de red híbrida propuesta

La utilización de esta arquitectura es factible dado que el tráfico agregado de las variables monitoreadas es de 15,536 bps, por lo que un transceptor IEEE 802.15.4 puede proveer el caudal eficaz suficiente (Tabla 3) para reenviar los datos de

todos los sensores de la WBAN. Sin embargo, es necesario disponer de una herramienta analítica que permita analizar de una mejor manera el comportamiento del algoritmo CSMA/CA de IEEE 802.15.4 cuando se varía el número de usuarios y el tráfico ofrecido por cada uno de ellos. Dado que el algoritmo CSMA/CA no ranurado incluye un proceso aleatorio para el tiempo de espera de acceso al medio, el algoritmo puede ser modelado mediante la utilización de la teoría de probabilidad y procesos estocásticos, lo cual se plantea en el capítulo siguiente.

Otro aspecto importante al momento de desarrollar este tipo de redes es conocer cómo afecta el porcentaje de sobrecarga de cada uno de los paquetes. Por ejemplo, si se deseara transmitir una sola muestra de cada variable fisiológica por paquete, la sobrecarga sería del 86% lo cual degradaría notablemente el caudal eficaz percibido. Para disminuir esta sobrecarga se propone esperar a recolectar más muestras hasta poder formar un paquete con tamaño máximo para su transmisión, a este proceso se le conoce como esquema de empaquetado. Mediante la utilización del modelo analítico de CSMA/CA, es posible evaluar el desempeño de diferentes esquemas de empaquetado, en conjunto con el número de usuarios que pudieran llegar a ser servidos.

En conclusión, para poder diseñar de adecuadamente el dispositivo tipo puente y la red híbrida es necesario contar con un modelo analítico del algoritmo de acceso al medio CSMA/CA. El objetivo de este modelo es obtener métricas que sirvan como parámetros de diseño en el desarrollo de la red híbrida. En el siguiente capítulo se muestra el modelo analítico de CSMA/CA no ranurado del estándar IEEE 802.15.4.

Capítulo 4

Modelo analítico del mecanismo de acceso al medio no ranurado del estándar IEEE 802.15.4

4.1 Introducción

El algoritmo de acceso al medio no ranurado del estándar IEEE 802.15.4 definido en la Sección 3.3.3, es una técnica de acceso múltiple aleatoria basada en contención. Debido a su comportamiento aleatorio es posible que algunos paquetes sean descartados cuando los dispositivos encuentran la red muy ocupada. Además, calcular el retardo de los paquetes se vuelve complicado cuando existen varios dispositivos conteniendo por el canal. Para obtener estas métricas se han utilizado modelos analíticos basados en cadenas de Markov que reflejan el comportamiento aleatorio del algoritmo de acceso al medio del estándar IEEE 802.15.4.

Un modelo analítico basado en cadenas de Markov para CSMA/CA fue propuesto por primera en (Bianchi, 2000). En este trabajo se realiza una evaluación de desempeño de la capa MAC de IEEE 802.11. Existen trabajos que proponen un modelo de CSMA/CA para IEEE 802.15.4 en su modo de operación ranurado (Misic *et al.*, 2009) (Pollin *et al.*, 2008). Debido a que el modo de operación ranurado produce mayor sobrecarga en la red debido a la utilización de paquetes fano y la existencia de periodos inactivos, en este trabajo no se considera su utilización. Por otro lado, en el trabajo de (Kim *et al.*, 2008) se propone un modelo para el modo de operación CSMA/CA no ranurado de IEEE 802.15.4. Sin

embargo, en este trabajo no se realiza el análisis de la función generadora de probabilidad (PGF) para determinar la distribución del tiempo de servicio del mecanismo de acceso al medio. En esta tesis se propone un modelo analítico para el esquema CSMA/CA no ranurado utilizado en IEEE 802.15.4 que incluye el análisis de la distribución del tiempo de servicio. Este análisis está basado en el análisis propuesto por (Zhai *et al.*, 2004) para el mecanismo de acceso al medio de IEEE 802.11b.

Para modelar el tráfico en el dispositivo IEEE 802.15.4 es posible utilizar un modelo de teoría de colas regido por un proceso de arribo y una distribución de tiempo de servicio. Dado que el algoritmo CSMA/CA de IEEE 802.15.4 utiliza como unidad de tiempo base las ranuras de desistimiento (“*backoff slots*”), es posible caracterizarlo con la utilización de una cadena discreta de Markov bidimensional. Una vez caracterizada la distribución del tiempo de servicio de la capa MAC es posible utilizarla como disciplina de servicio en el modelo de teoría de colas. Con el modelo de colas completo se pueden obtener métricas del número promedio de paquetes en la cola, el retardo total de los paquetes, la ocupación del canal y la probabilidad de paquetes descartados. A continuación se muestra el desarrollo del modelo analítico para el esquema CSMA/CA no ranurado utilizado en estándar IEEE 802.15.4 propuesto en esta tesis de investigación. Este modelo analítico es una de las principales aportaciones de este trabajo.

4.2 Ecuaciones del modelo de Markov del mecanismo de acceso al medio no ranurado del estándar IEEE 802.15.4

Dentro del algoritmo de acceso al medio CSMA/CA no ranurado de IEEE 802.15.4 (Figura 23) existen dos procesos principales: el proceso de espera al disminuir el conteo de periodos de desistimiento y el proceso de ir incrementando las etapas de desistimiento cuando el canal se encuentra ocupado. La elección del número

de periodos de desistimiento para cada etapa se rige por la selección aleatoria de un número entero en el intervalo de $[0, 2^{BE} - 1]$. Para cada estación, el valor de BE aumenta conforme se va incrementando el número de etapas de desistimiento. Una vez que el conteo de periodos de desistimiento llega a 0, el inicio de la transmisión depende de determinar el estado del canal. Si el canal está libre es posible transmitir, sino se esperará otra etapa de desistimiento. Esta determinación del estado del canal se puede representar como una variable aleatoria. De manera similar a lo realizado en (Zhai *et al.*, 2004) para el análisis de la capa MAC del estándar 802.11b, es posible representar el proceso de desistimiento de IEEE 802.15.4 como una cadena discreta de Markov bidimensional tal como se muestra en la Figura 27. A continuación se explicara detalladamente el proceso de solución para la cadena de Markov descrita.

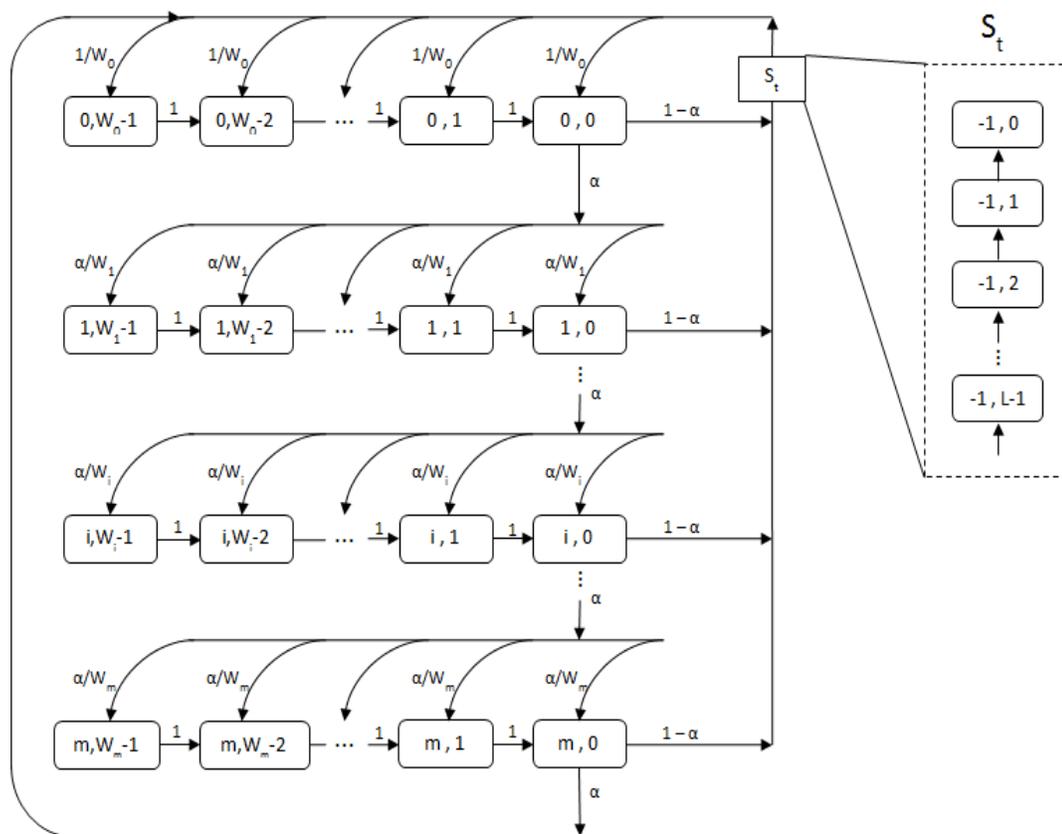


Figura 27. Modelo de Markov para el mecanismo de acceso al medio no ranurado de IEEE 802.15.4

Se define como $b(t)$ al proceso estocástico que representa el conteo de desistimiento en cada estación y $s(t)$ al proceso estocástico que representa las etapas de desistimiento ($s(t) \in \{0, \dots, m\}$) en el tiempo t . El valor de m es el número máximo de etapas de desistimiento (equivalente a $macMaxCSMABackoffs$ en el estándar). El estado de transmisión se define como ($s(t) = -1$).

Además, se define como α a la probabilidad de que una estación encuentre el medio ocupado cuando quiere acceder al mismo. Una vez que se llega al estado de transmisión, se deben de contar L ranuras, donde L es la duración de transmisión de un paquete en ranuras de tiempo. Se considera que la probabilidad de comenzar a monitorear el canal es constante e independiente de los demás dispositivos. Entonces $\{s(t), b(t)\}$ es la cadena de Markov bidimensional mostrada en la Figura 27 en la cual se definen las siguientes probabilidades de transición:

$$P\{i, k \mid i, k + 1\} = 1 \quad k \geq 0 \quad i \leq m \quad (10)$$

$$P\{0, k \mid i, 0\} = (1 - \alpha) / W_0 \quad k \leq W_0 - 1 \quad 0 \leq i \leq m - 1 \quad (11)$$

$$P\{i, k \mid i - 1, 0\} = \alpha / W_i \quad k \leq W_i - 1 \quad 1 \leq i \leq m \quad (12)$$

$$P\{0, k \mid m, 0\} = 1 / W_0 \quad k \leq W_0 - 1 \quad (13)$$

El valor de la ventana de contención en cada etapa de desistimiento, W_i , es inicialmente $W_0 = 2^{aMinBE}$ y aumenta en cada etapa hasta $W_i = W_{max} = 2^{aMaxBE}$ con $(aMaxBE - aMinBE) \leq i \leq m$. Para el funcionamiento predeterminado por el estándar de IEEE 802.15.4 se tiene que $aMinBE = 3$, $aMaxBE = 5$ y $m = 4$. Esto indica que se tendrán un máximo de 5 intentos de transmisión de un paquete con las ventanas de contención $W_0 = 8$, $W_1 = 16$, $W_2 = 32$, $W_3 = 32$, $W_4 = 32$.

La ecuación (10) indica la condición de disminuir el conteo de desistimiento y la duración de la transmisión de un paquete en una ranura. La ecuación (11)

representa el hecho de encontrar libre el canal, transmitir y continuar con el siguiente paquete a transmitir en la etapa de desistimiento inicial. La ecuación (12) hace referencia a encontrar el medio ocupado al querer acceder al canal y continuar con la siguiente etapa de desistimiento. La ecuación (13) representa la probabilidad de iniciar un nuevo intento de transmisión después de abandonar la última etapa de desistimiento permitida. Nótese que después de la última etapa de desistimiento un paquete es transmitido o descartado y se continuará con el siguiente paquete en la etapa inicial.

Para obtener las ecuaciones que definen las probabilidades en la cadena de Markov, es necesario utilizar las probabilidades en estado estable de la cadena:

$$\pi_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\} \quad i \in [-1, m], \quad k \in [0, \max(L - 1, W_i - 1)] \quad (14)$$

Entonces utilizando las ecuaciones (10), (11), (12), (13) y las probabilidades en estado estable, es posible analizar el proceso $b(t)$ para $0 \leq k \leq W_i - 1$ y obtener:

$$\begin{aligned} \pi_{i,W_i-1} &= \pi_{i-1,0} \frac{\alpha}{W_i} \\ \pi_{i,W_i-2} &= 2\pi_{i-1,0} \frac{\alpha}{W_i} \\ \pi_{i,W_i-3} &= 3\pi_{i-1,0} \frac{\alpha}{W_i} \\ &\vdots \\ \pi_{i,k} &= \frac{W_i - k}{W_i} \alpha \pi_{i-1,0} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\pi_{i,0} = \alpha \pi_{i-1,0} \quad (16)$$

Ahora analizando en el proceso $s(t)$ para $0 \leq i \leq m$ se tiene que:

$$\begin{aligned}
\pi_{1,0} &= \alpha\pi_{0,0} \\
\pi_{2,0} &= \alpha^2\pi_{0,0} \\
\pi_{3,0} &= \alpha^3\pi_{0,0} \\
&\vdots \\
\pi_{i,0} &= \alpha^i\pi_{0,0}
\end{aligned} \tag{17}$$

Sustituyendo las ecuaciones (16) y (17) en (15) se puede demostrar que:

$$\pi_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \pi_{i,0} \tag{18}$$

para $0 \leq i \leq m$, $0 \leq k \leq W_i - 1$.

Considerando la condición de normalización de las probabilidades en estado estable de una cadena de Markov:

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} \pi_{i,k} + \sum_{k=0}^{L-1} \pi_{-1,k} \tag{19}$$

y sabiendo que $W_i = 2^i W_0$ podemos obtener una expresión para $\pi_{0,0}$ de la siguiente manera:

$$\pi_{0,0} = \frac{2}{W_0 \sum_{i=0}^{d-1} (2\alpha)^i + \frac{1 - \alpha^{m+1}}{1 - \alpha} + \frac{2^d W_0 (\alpha^d - \alpha^{m+1})}{1 - \alpha} + 2L(1 - \alpha^{m+1})} \tag{20}$$

donde d es el número de etapas de desistimiento con incremento exponencial y está dado por $d = macMaxBE - macMinBE + 1$.

Como la transmisión ocurre cuando el contador de desistimiento llega a cero, independientemente de la etapa de desistimiento, la probabilidad τ que una estación monitoree el canal en una ranura aleatoria es

$$\tau = \sum_{i=0}^m \pi_{i,0} = \frac{1 - \alpha^{m+1}}{1 - \alpha} \pi_{0,0} \quad (21)$$

Entonces sustituyendo 19 en 20 tenemos que

$$\tau = \frac{2(1 - \alpha^{m+1})}{(1 - \alpha)W_0 \sum_{i=0}^{B-1} (2\alpha)^i + 1 - \alpha^{m+1} + 2^B W_0 (\alpha^B - \alpha^{m+1}) + 2L(1 - \alpha^{m+1})(1 - \alpha)} \quad (22)$$

Cabe recordar que probabilidad de monitorear el canal en una ranura de tiempo aleatoria, τ , es independiente e idénticamente distribuida entre todos los nodos. Una vez que se obtiene la expresión para la probabilidad de acceder al medio en una ranura aleatoria, es necesario obtener una ecuación para la probabilidad, α , de que una estación encuentre el medio ocupado cuando quiere acceder al mismo. La probabilidad α de que una estación monitoreando el canal lo encuentre ocupado es igual a la probabilidad de que alguna de los $n - 1$ estaciones monitoree el canal, lo encuentre libre y transmita:

$$\alpha = L(1 - \alpha)(1 - [1 - (1 - p_0)\tau]^{n-1}) \quad (23)$$

donde p_0 es la probabilidad de que no existan paquetes listos para transmitir en una estación.

Cuando $p_0 = 1$ significa que siempre existe un paquete para ser transmitido en la estación y se le conoce como el caso saturado. Para el caso no saturado es necesario calcular esta probabilidad utilizando un análisis de cola M/G/1 tal y como se muestra más adelante en la Sección 4.3.1. Para el caso saturado es posible observar que las ecuaciones (22) y (23) forman un sistema de ecuaciones no lineal que puede ser resuelto utilizando un algoritmo recursivo. Para determinar p_0 , en el caso no saturado, es necesario primero analizar el tiempo de servicio de la MAC.

4.2.1 Distribución probabilística del tiempo de servicio

Existen dos procesos básicos cuando la capa MAC transmite un paquete: el proceso de decremento del contador de desistimiento y el proceso de transmisión del paquete. El tiempo de servicio de la MAC es entonces el intervalo desde el instante de tiempo en el que el paquete se convierte en el primero de la cola y empieza a contender por la transmisión, hasta el intervalo de tiempo en el que el paquete fue transmitido en su totalidad o descartado por la capa MAC.

El tiempo de transmisión de un paquete se puede representar como una variable aleatoria y podemos definir la función generadora de probabilidad (PGF) de la duración de una transmisión como:

$$S_t(z) = z^{ifs+L} \quad (24)$$

donde ifs es la duración del espacio inter-trama en ranuras y L es la duración de la transmisión del paquete en ranuras. Para los tamaños de carga útil mayores a 18 bytes se utiliza un ifs de $640 \mu s$ (2 ranuras). Para IEEE 802.15.4 en la banda de los 2.4 GHz a 250 kbps es posible transmitir 10 bytes en una ranura de tiempo. Suponiendo que todos los paquetes que arriban para ser transmitidos tienen un

tamaño fijo de T_{bytes} (incluyendo carga útil y encabezados de PHY y MAC), entonces la duración de la transmisión de un paquete en ranuras de tiempo es:

$$L = \frac{T_{bytes}}{10 \text{ bytes por ranura}} \quad (25)$$

Si se considera un esquema de acuse de recibo (ACK) es necesario agregar 3 ranuras más a cada transmisión de un paquete, las cuales representan el tiempo de espera por un ACK y la duración de la transmisión del mismo. Tomando como referencia el análisis de la cadena Markov es posible dibujar el diagrama de transición de estados para el proceso de transmisión de un paquete, tal y como se muestra en la Figura 28.

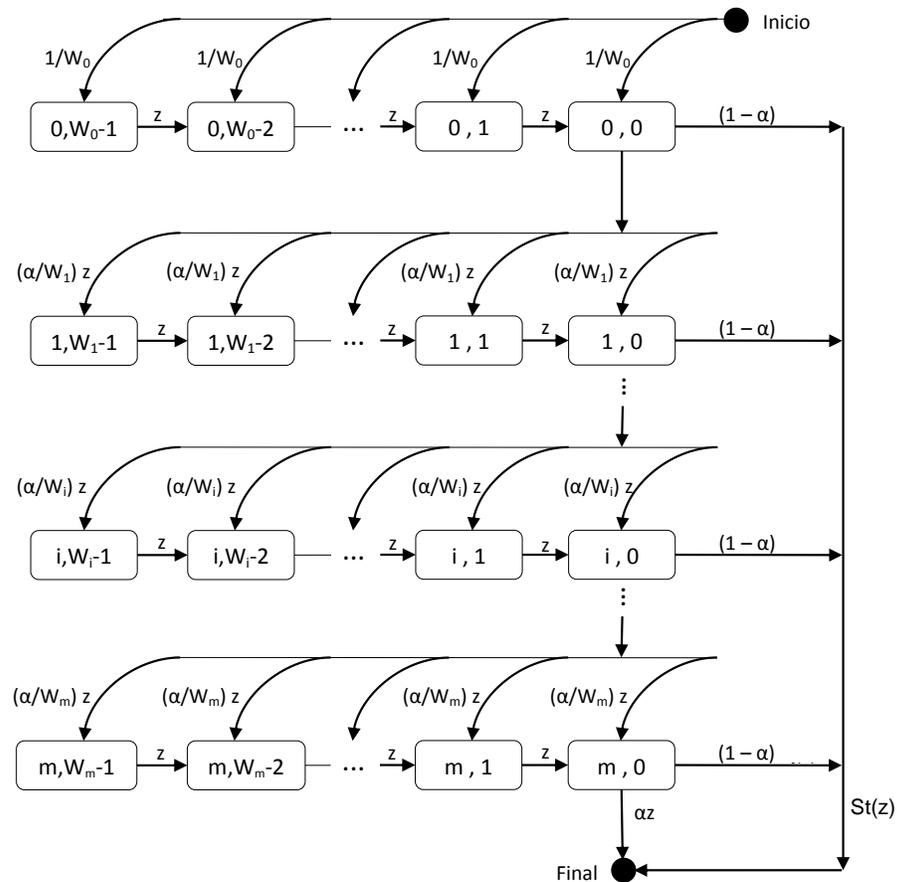


Figura 28. Diagrama de transición de estados para transmisión en IEEE 802.15.4

A partir del diagrama de transición de estados anterior y utilizando la fórmula de Mason es posible definir la función generadora de probabilidad (PGF) que para una sola etapa de desistimiento como:

$$HW_i(z) = \sum_{j=0}^{2^i W_0 - 1} \frac{z^j}{2^i W_0} \quad 0 \leq i \leq d \quad (26)$$

$$HW_i(z) = \sum_{j=0}^{2^B W_0 - 1} \frac{z^j}{2^B W_0} \quad d < i \leq m$$

El tiempo de servicio MAC es una variable aleatoria dada por la duración en tiempo de la transición de estados desde el estado inicial (comenzando a ser servido) al estado final (ser transmitido o descartado después de un número de intentos máximos $m + 1$). Entonces la PGF del tiempo de servicio, denotada como $T(z)$, es simplemente la función de transferencia desde el estado inicial hasta el estado final (Figura 28) dada por:

$$T(z) = (1 - \alpha)S_t(z) \sum_{i=0}^m (\alpha z)^i \prod_{j=0}^i HW_j(z) + (\alpha z)^{m+1} \prod_{j=0}^m HW_j(z) \quad (27)$$

Como $T(z)$ puede ser expandida en serie de potencias:

$$T(z) = \sum_{i=0}^{\infty} P(T_S = i) z^i \quad (28)$$

entonces es posible obtener fácilmente la distribución de probabilidad discreta y diferentes estadísticas del tiempo de servicio utilizando las propiedades de la

función generadora de probabilidad (PGF), por ejemplo el valor esperado del tiempo de servicio está dado por:

$$E[T_S] = \left. \frac{dT(z)}{dz} \right|_{z=1} \quad (29)$$

Utilizando las ecuaciones (28) y (29) es posible obtener diferentes métricas para observar el comportamiento del tiempo de servicio del mecanismo de acceso al medio CSMA/CA no ranurado.

4.2.2 Discusión de resultados sobre tiempo de servicio del mecanismo de acceso al medio no ranurado de IEEE 802.15.4

Con el análisis presentado en la sección anterior es posible comprobar el comportamiento que tiene la distribución del tiempo de servicio (PDF) utilizando la ecuación (28) y dando valores preliminares a la probabilidad de detectar el canal ocupado, α , con un tamaño de paquete máximo de 120 bytes.

Se puede observar de la Figura 29 que al ir incrementando la ocupación del canal, la probabilidad de que la MAC sirva un paquete en el intervalo cercano a 5 ms va disminuyendo y se va distribuyendo en tiempos superiores. El tiempo de 4.48 ms es la duración de transmisión de un paquete de 120 bytes. La desviación que se aprecia de 4.48 ms a 7.04 ms es debida al mecanismo aleatorio de acceso al medio en la primera etapa de desistimiento (elegir de 0 a 7 periodos de desistimiento para comenzar a transmitir). Sin embargo, aun cuando la ocupación del canal es del 0.50 la probabilidad de servir un paquete en la primera etapa de desistimiento sigue siendo la más alta.

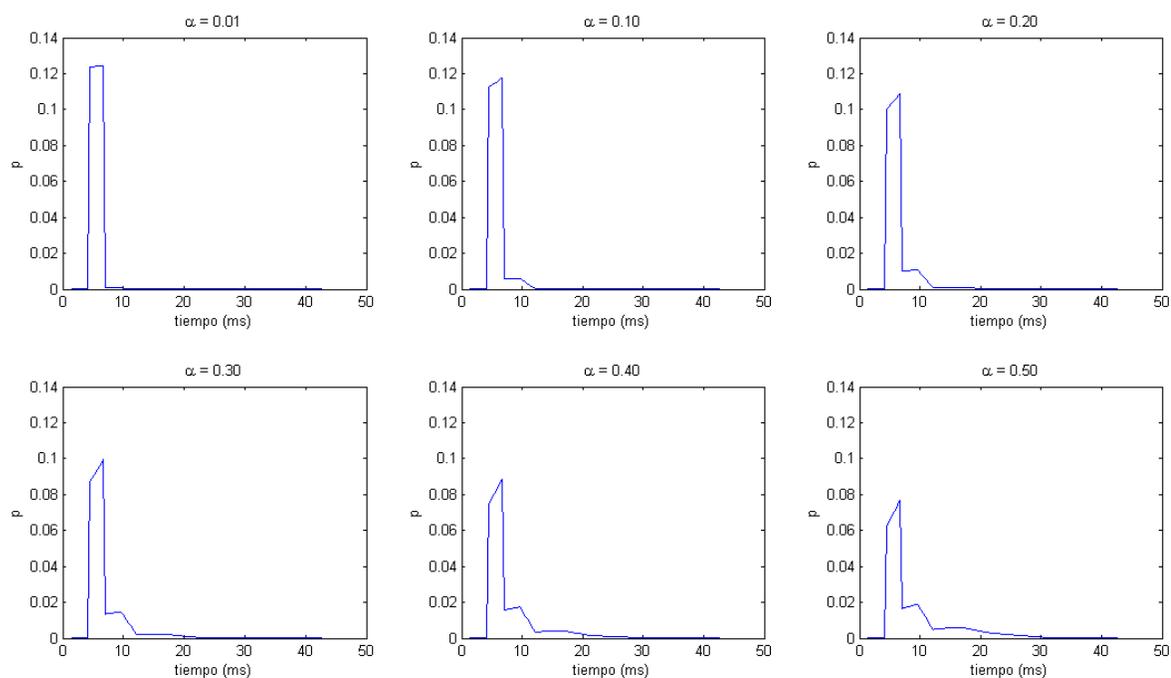


Figura 29. PDFs de los tiempos de servicio MAC de IEEE 802.15.4

De la misma manera se puede comprobar el comportamiento del valor esperado del tiempo de servicio utilizando la ecuación (29). En la Figura 30 se observa que el valor esperado del tiempo de servicio se incrementa exponencialmente mientras aumenta la ocupación del canal. Por lo tanto, es posible determinar que el tiempo de servicio está en función de la probabilidad de detectar el canal ocupado.

Dado que la probabilidad de detectar el canal ocupado, α , no se conoce, es necesario introducir un modelo de teoría de colas para poder realizar un análisis de cómo es el comportamiento del nodo transmisor IEEE 802.15.4 bajo diferentes condiciones de tráfico ofrecido.

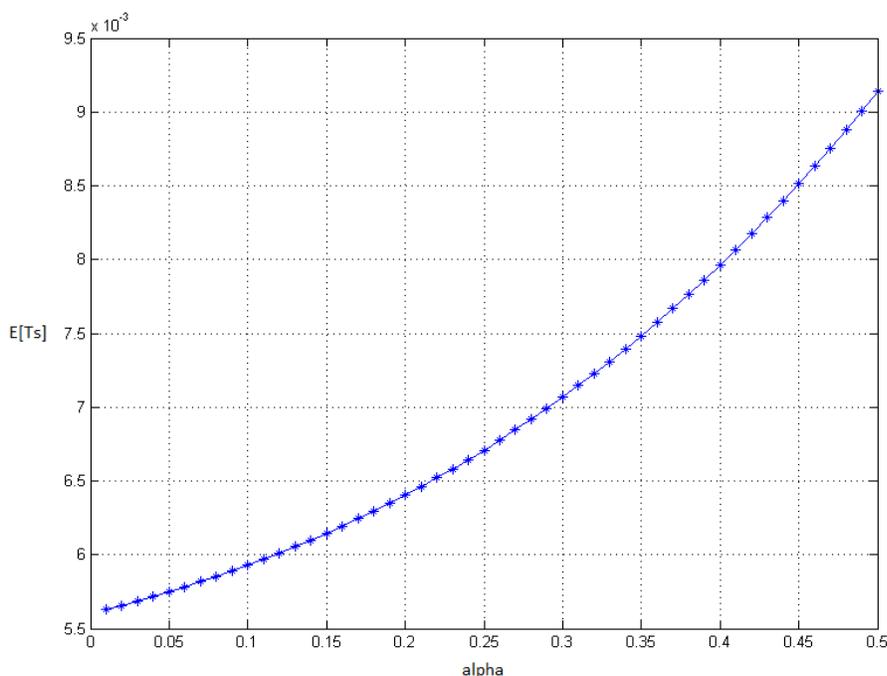


Figura 30. Valor esperado del tiempo de servicio MAC en IEEE 802.15.4

4.3 Modelo de teoría de colas de la estación IEEE 802.15.4 y su análisis

Una vez que es caracterizado el tiempo servicio de la MAC es posible utilizarlo como la distribución de servicio de un proceso de colas. Se dice que la disciplina de servicio es general (simbolizado con la letra G) cuando no se conoce la distribución probabilística del tiempo de servicio. Además, es necesario contar con proceso de arribo de paquetes a la cola que corresponda con la tasa de transmisión y con el tamaño de los paquetes. En esta sección se representa un nodo IEEE 802.15.4 como una cola M/G/1 y se da solución al sistema de ecuaciones no lineales para obtener diversas métricas de desempeño.

4.3.1 Cola M/G/1 y algoritmo para el cálculo de métricas de desempeño

Cuando se maneja transmisión de datos que son sensibles al retardo es necesario estudiar los modelos de teoría de colas para obtener las métricas adecuadas que sirvan como parámetros de diseño de la red. Un modelo de cola puede ser caracterizado por el proceso de arribo y la distribución del tiempo de servicio con una disciplina de servicio definida. En la Sección 4.2.1 se caracterizó el tiempo de servicio de la capa MAC. Si se considera que el proceso de arribo a cada estación sigue una distribución Poisson con una tasa λ , entonces es posible modelar el retardo que percibe un paquete en cada nodo/puente IEEE 802.15.4 para poder ser transmitido como una cola M/G/1, tal como se muestra en la Figura 31.

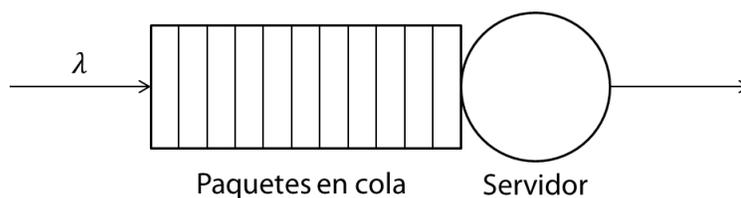


Figura 31. Ejemplo de cola M/G/1 en el dispositivo tipo puente

El tamaño de la cola (búfer) en cada uno de los nodos se considera infinito debido a que cada uno de los nodos puede contar con un búfer de memoria lo suficientemente grande en relación al tráfico ofrecido. Además, como se requiere analizar la probabilidad de pérdida de paquetes por el mecanismo de acceso CSMA/CA, no es de interés analizar el caso de probabilidad de bloqueo que considera un búfer finito.

La tasa de arribo de paquetes λ está directamente relacionada con el tamaño del paquete y el tráfico ofrecido T_{off} a cada uno de los nodos.

$$\lambda = \frac{T_{bytes} \cdot 8}{T_{off}} \quad (30)$$

Para una cola M/G/1 la probabilidad de que no existan paquetes en la cola para este sistema es

$$p_0 = 1 - \rho \quad (31)$$

donde ρ es la intensidad del tráfico y está dada por $\rho = \lambda E[T_s]$. Con esto es posible calcular α para diferentes valores de λ y n con las ecuaciones (22), (23) y (30), utilizando el algoritmo recursivo mostrado en la Figura 32 donde ε representa un valor de convergencia pequeño (e.g. $\varepsilon = 0.0001$).

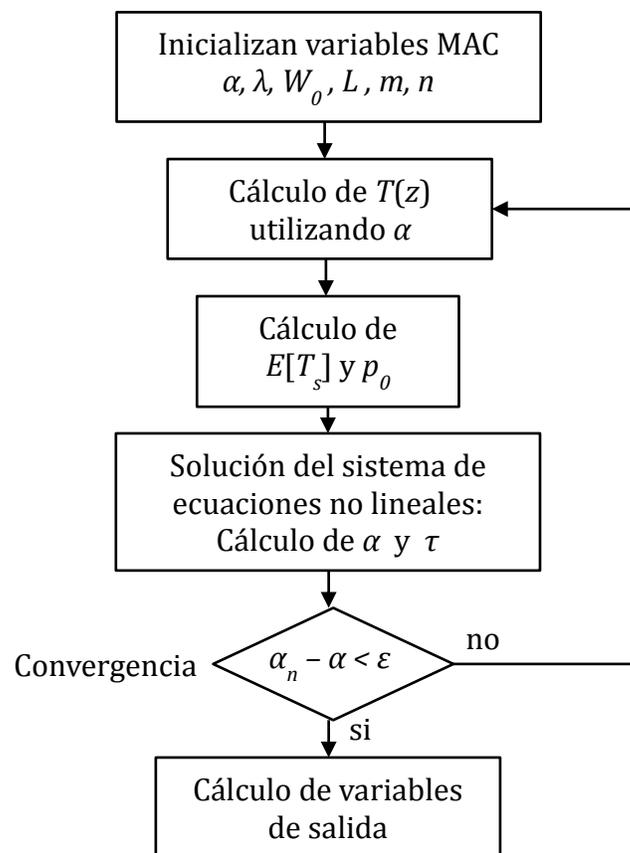


Figura 32. Diagrama de flujo del algoritmo para la solución del modelo analítico del mecanismo de acceso al medio no ranurado del estándar IEEE 802.15.4

4.3.2 Evaluación de resultados del modelo de teoría de colas

La solución del modelo analítico planteado en este capítulo permite obtener métricas que sirven para el despliegue de redes IEEE 802.15.4. Con la utilización de este modelo es posible definir escenarios con tamaños de paquetes, tráfico ofrecido y número de nodos específicos. Los parámetros más importantes obtenidos a partir de este modelo son la probabilidad de detectar ocupado el canal, la probabilidad de paquetes descartados y el retardo total de los mismos. Por lo tanto, es posible evaluar diferentes esquemas de empaquetado de datos en cada una de las fuentes modificando el tamaño de los paquetes y manteniendo la misma tasa de tráfico ofrecido.

Como prueba de concepto, en esta sección se resuelve el modelo analítico para una red IEEE 802.15.4 con el tráfico de un electrocardiograma solamente (12,000 bps). En esta prueba se proponen dos esquemas de empaquetado, uno con un tamaño de paquete relativamente pequeño y otro que pueda contener el máximo de muestras de ECG posibles:

- 31 bytes en total (18 de carga útil) el cual contiene 3 muestras de cada uno de los tres canales de ECG.
- 115 bytes en total (102 de carga útil) el cual contiene 17 muestras de cada uno de los tres canales de ECG.

Los parámetros utilizados para la solución del sistema de ecuaciones no lineales son los valores predeterminados de IEEE 802.15.4 tal cual se muestran en la Tabla 4. A continuación se describen las principales métricas que pueden ser obtenidas de la solución del modelo analítico.

Tabla 4. Parámetros utilizados para la prueba de concepto

Parámetro	Valor
macMinBE	3
macMaxBE	5
macMaxCSMABackoffs (m)	4
<i>ifs</i>	2
<i>Toff</i> (bps)	12,000
<i>Tbytes</i>	31, 115
Número de nodos (n)	2-14

La probabilidad de detectar el canal ocupado, α , indica el porcentaje de ocupación del canal. Esta métrica ayuda a conocer qué tan saturado se puede encontrar el canal inalámbrico y cómo se comporta con el aumento del número de usuarios. En la Figura 33 se observa comportamiento de α para los dos esquemas empaquetados descritos.

Es posible observar que el esquema de empaquetado con menor tamaño de paquetes para el ECG presenta, para cualquier número de nodos, mayor ocupación del canal. Esto se debe a que en el esquema de empaquetado menor se realizan más transmisiones en el canal que, aunque son más cortas (en comparación con la de mayor tamaño de paquetes), saturan en mayor medida el canal inalámbrico. En particular, el aumento en los intentos de transmisión es debido a disminuir el tamaño de los paquetes que como consecuencia incrementa la tasa de arribo de paquetes a cada nodo.

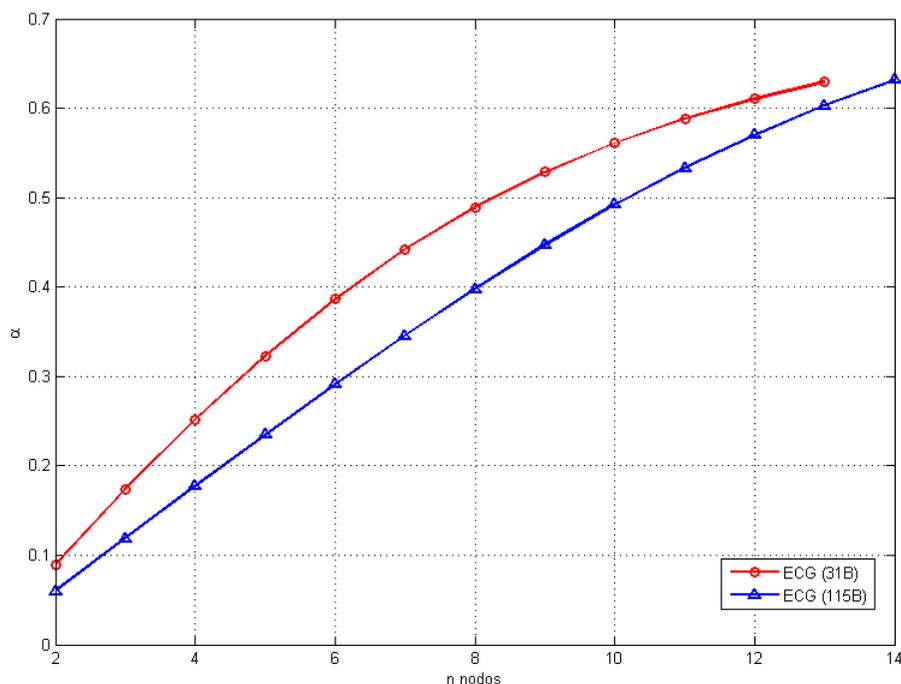


Figura 33. Probabilidad de detectar el canal ocupado para una red IEEE 802.15.4

El retardo total de los paquetes en la cola es una métrica que indica el tiempo que tarda un paquete desde que llega a la cola hasta que es servido. Este retardo incluye el tiempo de espera en la cola y el tiempo que tarda en ser servido por el algoritmo de CSMA/CA. En la Figura 34 se muestra el retardo total de los paquetes para los dos esquemas de empaquetado. El análisis de esta métrica es fundamental para comprender cómo afecta al retardo la ocupación del canal de los diferentes esquemas de empaquetado. Normalmente se pensaría que el menor retardo lo tienen los paquetes con menor tamaño, lo cual es cierto cuando la ocupación del canal es relativamente baja, es decir, cuando no existen muchos nodos conteniendo por el medio. Al aumentar el número de nodos el algoritmo de acceso al medio tarda más en servir a los paquetes y por lo tanto los paquetes que van llegando pasan un mayor tiempo de espera en la cola. Para el caso específico de esta aplicación, a partir de 6 nodos o más el retardo de los paquetes es mayor utilizando el esquema de empaquetado menor (31 bytes).

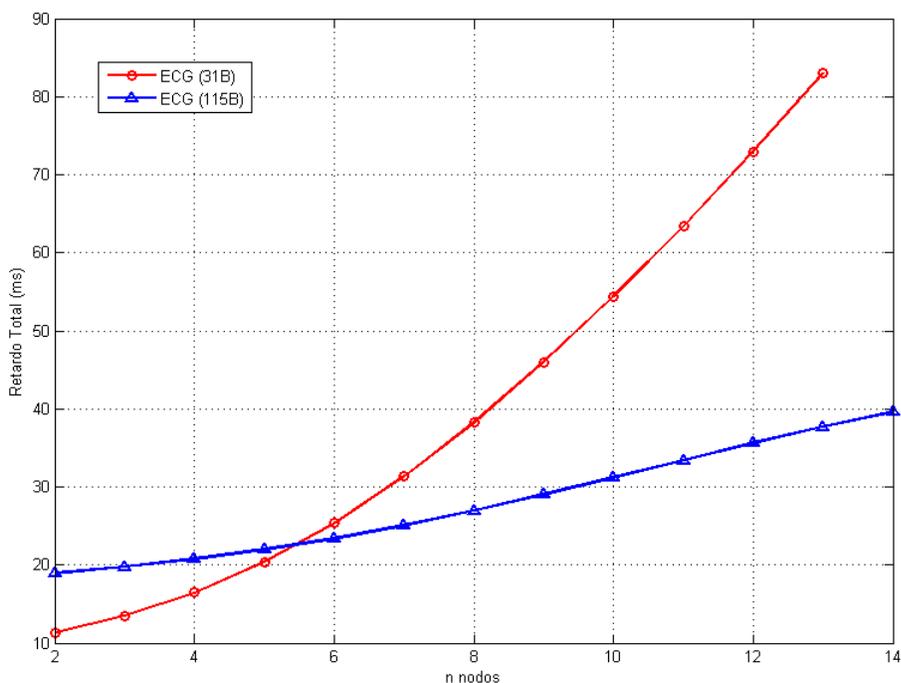


Figura 34. Retardo total de paquetes en la cola para una red IEEE 802.15.4

Por último, una de las métricas más importantes a considerar para el despliegue de este tipo de redes es la probabilidad de paquetes descartados. Cabe señalar que la probabilidad de paquetes descartados obtenida con el modelo matemático solo considera pérdidas causadas por el mecanismo de acceso al medio, debido a que para derivar el modelo se consideró que el canal es ideal y no se realizó un análisis de pérdidas por colisiones. En el algoritmo CSMA/CA se dice que se “descarta” o pierde un paquete cuando se detecta el canal ocupado $macMaxCSMABackoffs + 1$ veces (5 veces con los valores predeterminados por el estándar IEEE 802.15.4) en el momento de querer realizar la transmisión. En la Figura 35 se muestra la probabilidad de paquetes descartados para los dos esquemas de empaquetado. Se aprecia que el esquema de paquetes con tamaño mayor (115 bytes). A partir de éste parámetro es posible definir una arquitectura de red con una tolerancia de tasa de paquetes descartados para un determinado número de

nodos. Por ejemplo, en el escenario evaluado si se quisiese un porcentaje de paquetes descartados menor al 5%, entonces se podrían tener hasta 9 nodos simultáneamente utilizando el esquema de empaquetado menor. En contraste, para el mismo porcentaje de paquetes descartados (5%), al utilizar el esquema de empaquetado mayor podrían tenerse hasta 12 nodos simultáneamente.

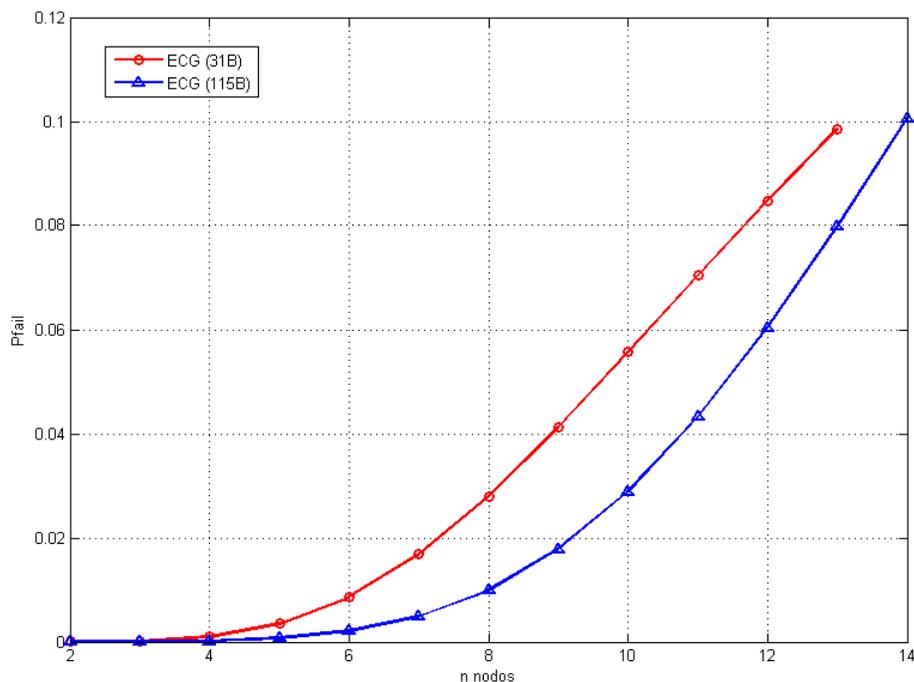


Figura 35. Probabilidad de paquetes descartados para una red IEEE 802.15.4

4.4 Conclusiones sobre el modelo analítico del mecanismo de acceso al medio no ranurado de IEEE 802.15.4

Una de las principales aportaciones de este trabajo es el desarrollo del modelo analítico presentado en este capítulo. Hasta el momento de escritura de esta tesis, no se encontró en la literatura un modelo para el mecanismo de acceso al medio

no ranurado de IEEE 802.15.4 que analice la función generadora de probabilidad para determinar el tiempo de servicio.

Por otro lado, los resultados del modelo pueden influir en la toma de decisiones para el desarrollo de redes IEEE 802.15.4 y la implementación de un esquema de empaquetado de datos en los dispositivos. Este modelo será utilizado en el siguiente capítulo para el diseño de la red híbrida Bluetooth Low Energy/IEEE 802.15.4.

Capítulo 5

Diseño de la red híbrida

5.1 Introducción

Dentro de la arquitectura de la red híbrida existe un dispositivo que recolecta los datos de los diferentes sensores y envía estos datos sobre un enlace de mayor alcance hacia un punto de acceso. A este dispositivo que une a las dos redes se le conoce como dispositivo tipo puente.

En este capítulo se muestra la arquitectura de red propuesta, el diseño del dispositivo tipo puente y una evaluación analítica de la red. Se considera el diseño de una red híbrida de dos saltos entre Bluetooth Low Energy (BLE) e IEEE 802.15.4. Cada uno de los sensores (esclavos) reporta valores de una variable fisiológica al dispositivo tipo puente (maestro), el cual a su vez accede al enlace IEEE 802.15.4 y envía los paquetes al punto de acceso o resumidero de información (coordinador). Se muestra un análisis de los retardos generados por la técnica de acceso TDMA en la red Bluetooth Low Energy (primer salto) y se utiliza el modelo analítico del mecanismo CSMA/CA presentado en el Capítulo 4 para calcular los retardos y pérdida de paquetes en la red IEEE 802.15.4 (segundo salto). También se explora la posibilidad de considerar esquemas de empaquetado de información y evaluar analíticamente el desempeño de cada uno de estos esquemas, esto con la finalidad de definir cuál es el más conveniente para la arquitectura aquí presentada. Los resultados de este modelo de red híbrida servirán como parámetros de diseño en el desarrollo experimental del dispositivo tipo puente que se muestra en el Capítulo 6.

5.2 Arquitectura de la red híbrida

Se propone utilizar la tecnología de Bluetooth Low Energy para la red inalámbrica de área corporal (WBAN) en la que los dispositivos esclavos estarán midiendo las 5 diferentes variables fisiológicas (presentadas en el Capítulo 2) y reportándolas al dispositivo tipo puente que actuará como maestro de la red BLE. El puente es al mismo tiempo un dispositivo final en una red de IEEE 802.15.4 y envía los datos que recibe de los sensores al punto de acceso que actúa como coordinador de la red.

Bluetooth Low Energy fue originalmente diseñado para redes inalámbricas de área personal (WPAN) con un alcance de hasta 50 metros. Sin embargo, una WPAN puede ser transformada en una WBAN disminuyendo su potencia de transmisión. Esta es la primera consideración de diseño que se toma para la red, ya que al disminuir el alcance de transmisión para la red BLE a unos cuantos metros se reducirá aún más probabilidad de interferencia mutua con otras WBANs (tal como se explica en la Sección 3.4). La arquitectura de la red es similar a la que se muestra en (González-Valenzuela *et al.*, 2011), con la inclusión de BLE para la red de área corporal. Con esta arquitectura híbrida es posible incluir más WBANs dentro de la misma área de operación sin que exista interferencia mutua entre redes BLE gracias al esquema FHSS y el alcance de transmisión reducido. En la Figura 36 se muestra la arquitectura de red propuesta.

Un dispositivo tipo puente común solamente re-direcciona el tráfico de una red hacia otra, manipulando los encabezados e intercambiando las direcciones a nivel de capa MAC pero sin tocar la carga útil. Es decir, en el momento en que llega un paquete este es re-direccionado instantáneamente a la siguiente red. En este trabajo se propone implementar un esquema de empaquetado en el dispositivo tipo puente para encapsular la información generada por varios sensores. Por lo tanto, la información proveniente de la red de Bluetooth Low Energy será

encapsulada en un paquete de IEEE 802.15.4 antes de ser transmitida. El desempeño de dicho esquema se comparará con el desempeño mostrado por un dispositivo tipo puente común, en base a métricas de pérdida de paquetes y retardo de la información. En la Figura 37 se muestra el esquema del dispositivo tipo puente propuesto habilitado con la función de empaquetado.

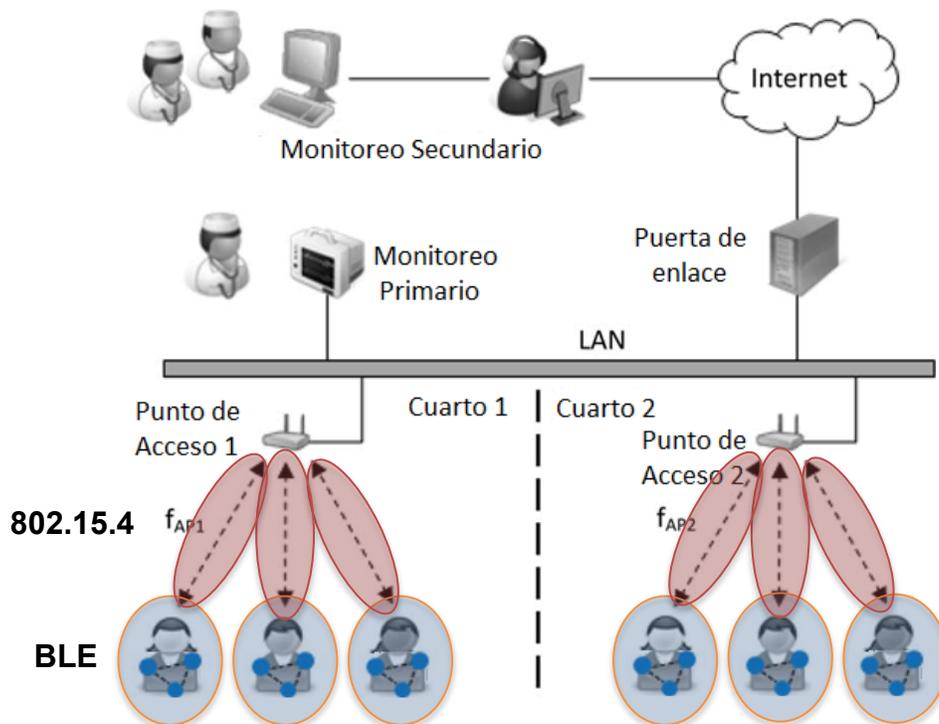


Figura 36. Arquitectura de la red híbrida BLE – IEEE 802.15.4

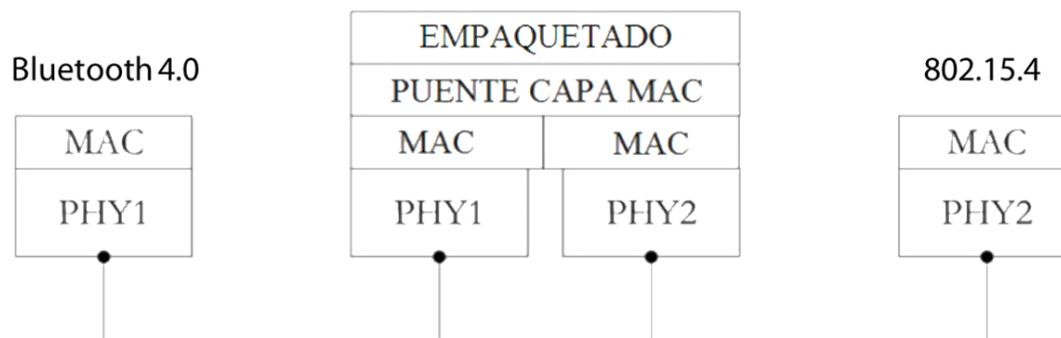


Figura 37. Esquema de empaquetado en el dispositivo tipo puente

5.3 Primer salto en la red Bluetooth Low Energy

En la red de Bluetooth Low Energy se tienen 5 esclavos, uno para cada una de las variables fisiológicas mencionadas en el Capítulo 2. El dispositivo tipo puente es el maestro de la red, el cual se encarga de establecer la conexión con cada uno de los esclavos y define el intervalo de conexión con el cual estarán siendo servidos. Este intervalo depende de los requerimientos de cada una de las variables. A continuación se presentan los parámetros de conexión para cada uno de los esclavos de la red BLE y un análisis del retardo para cada una de las muestras.

5.3.1 Parámetros de conexión

En Bluetooth Low Energy todos los nodos que forman parte de la red están sincronizados y el mecanismo de acceso al medio es TDMA. Por lo tanto, solamente es necesario señalar a cada uno de los esclavos los tiempos en los que va a poder ser servido por el maestro. El parámetro que define la frecuencia con la que un esclavo puede ser servido es el intervalo de conexión, el cual tiene un intervalo de 7.5 ms hasta 4000 ms (Sección 3.2.3). Al momento de asignar estos intervalos de conexión se debe ser cuidadoso ya que se tiene que asegurar que los tiempos en los que son servidos los esclavos no se traslapen.

Debido a la limitante de 7.5 ms como intervalo de conexión mínimo, es imposible enviar una muestra inmediatamente cada vez que está disponible en el sensor, por lo que no se podría servir a todos los sensores dentro de la red. Es por esto que existe un pequeño búfer en cada esclavo que almacena varias muestras para ser enviadas en un solo paquete. Se eligieron los intervalos de tiempo según los requerimientos de transmisión de cada uno de los esclavos, de tal forma que no se traslaparan los eventos de conexión y se enviaran el mayor número de muestras posibles por evento de conexión. En la Tabla 5 se muestran los intervalos de

conexión para cada uno de los esclavos y el número de muestras por evento de conexión que tienen que ser enviadas para alcanzar la tasa de transmisión requerida.

Tabla 5. Intervalos de conexión para los esclavos en la red Bluetooth Low Energy

Parámetro	Int. de conexión	# de muestras por evento	# de Bytes por evento	Caudal eficaz (bps)
ECG	15 ms	12	24	12,800
Presión arterial	150 ms	18	36	1,920
Oxímetro de pulso	150 ms	9	18	960
Gasto Cardíaco	150 ms	6	12	640
Temperatura	1000 ms	1	2	16
			TOTAL	16,336 bps

Nótese que en el diseño de la red híbrida se aumentó el caudal eficaz del ECG de 12,000 bps a 12,800 bps, con respecto al establecido anteriormente en la Tabla 1. Este aumento se corresponde con un incremento en la frecuencia de muestreo por canal de ECG de 250 Hz a 266.6 Hz. La razón de realizar este incremento en la tasa de bits del ECG se debe a la limitante de tener intervalos de conexión múltiplos de 7.5 ms. En particular, si se utiliza la tasa de 12,000 bps, en algunos eventos de conexión se tendrían que enviar 11 muestras por paquete, mientras que en otros se tendrían que enviar 12 muestras por paquete. Además, esta adecuación se realiza debido a que cada muestra se corresponde con la lectura de un solo canal. Al tener tres canales de ECG se necesitan tener 3 muestras (una por cada canal) para tener la lectura correspondiente. Por lo tanto, una “muestra ECG” completa consistirá de 3 muestras, una por cada canal. Con la tasa de 12,800 bps, siempre se tendrán 12 muestras por evento de conexión. Con lo cual

se garantiza el transmitir 4 muestras ECG completas cada vez que se transmite un paquete ECG. Sin embargo, debido a este aumento en la tasa del ECG, la tasa total de generación de datos fisiológicos se elevará de 15,536 bps a 16,336 bps. Esta será la tasa utilizada de aquí en adelante para el diseño de la red híbrida presentado en este capítulo.

Si se elige el parámetro correcto de ventana de transmisión al momento de hacer la conexión con el esclavo, es posible asegurar que ninguno de los eventos de conexión se traslape con otro. En la Figura 38 se muestra un ejemplo de esto, tomando como tiempo de referencia el evento de conexión con el esclavo de ECG. Con esto se comprueba que cada esclavo tendrá un tiempo específico para transmitir su información dentro de la técnica de acceso al medio TDMA.

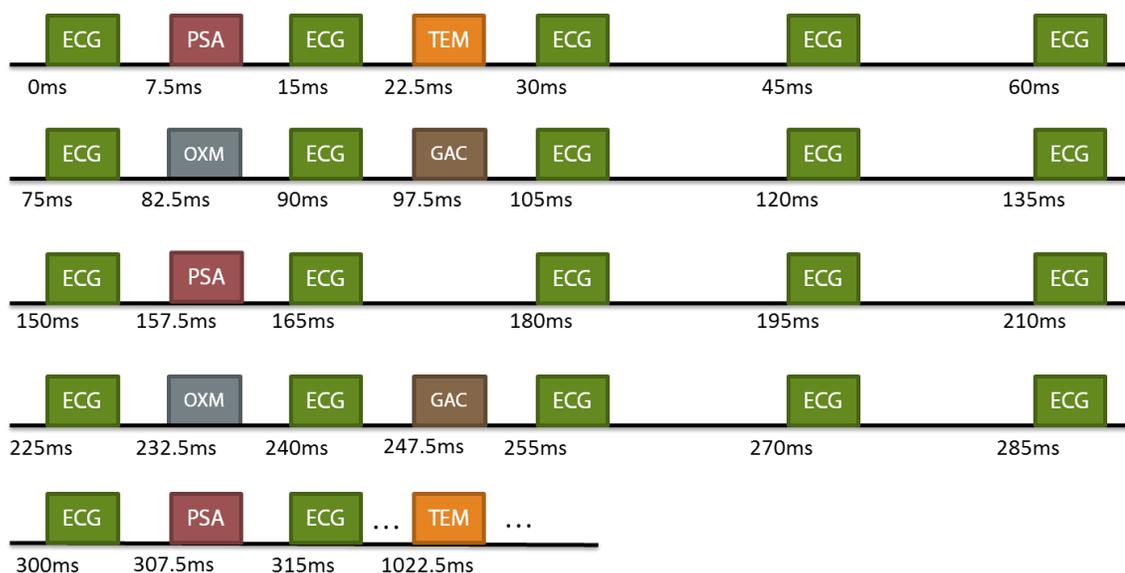


Figura 38. Ejemplo de los eventos de conexión para los esclavos de la red BLE para electrocardiograma (ECG), oxímetro de pulso (OXM), presión arterial (PSA), gasto cardíaco (GAC), temperatura (TEM)

5.3.2 Análisis de retardo

Debido a que la técnica de acceso al medio es TDMA, el esclavo ya tiene un tiempo asignado para ser servido. Entonces, solamente es necesario calcular el retardo determinístico de las muestras que están siendo almacenadas para ser enviadas en un evento de conexión. Para calcular este retardo se toma como referencia la primera muestra que llega al sensor para ser enviada en el próximo evento de conexión, las demás muestras tendrán un retardo menor. Por lo tanto, el retardo máximo es el tiempo que tiene que esperar la primera muestra a las demás antes del evento de conexión y está dado por:

$$retardo_{BLE} = \frac{(mpe - 1)}{freqm} \quad (32)$$

Donde:

mpe es el número de muestras por evento de conexión del esclavo

$freqm$ es la frecuencia de muestreo de la variable fisiológica (Hz)

En la Tabla 6 se encuentran los retardos máximos que sufrirán las muestras de cada una de los sensores considerados.

Tabla 6. Retardos máximos de las muestras de los sensores

Parámetro	Int. de conexión	# de muestras	Retardo máx. (ms)
ECG	15 ms	12	13.75
Presión arterial	150 ms	18	141.67
Oxímetro de pulso	150 ms	9	133.34
Gasto Cardíaco	150 ms	6	125
Temperatura	1000 ms	1	0

5.4 Segundo salto en la red IEEE 802.15.4

Una vez que los paquetes de la red Bluetooth Low Energy son recibidos, el dispositivo tipo puente debe enviarlos hacia el punto de acceso en un enlace de IEEE 802.15.4. En este caso el puente es considerado como un dispositivo final y el punto de acceso como coordinador de la red. El coordinador a su vez sirve a otros puentes que se encuentran en su área de cobertura (Figura 36). En esta sección se utiliza el modelo analítico del algoritmo de acceso al medio CSMA/CA definido en el Capítulo 4 para la obtención de métricas como el tiempo de servicio, la probabilidad de descartar un paquete y el retardo total de paquetes en una red IEEE 802.15.4 para diferentes esquemas de empaquetado de datos.

5.4.1 Análisis de las métricas obtenidas con diferentes esquemas de empaquetados de datos

Para el análisis se utilizaron los parámetros por defecto del estándar IEEE 802.15.4, donde a cada nodo se le asigna un tráfico ofrecido de 16,336 bps (el total acumulado de tráfico proveniente de la red BLE). Se consideraron 3 tamaños de paquetes diferentes con el objetivo de determinar cuál esquema de empaquetado en el dispositivo tipo puente muestra el mejor desempeño. El primer esquema de empaquetado considera un tamaño de paquete mínimo. Esto representa el caso de no empaquetar y reenviar la información tal cual está llegando de la red Bluetooth Low Energy. El segundo esquema considera un tamaño de paquete mediano, mientras que el tercer esquema considera la utilización del tamaño de paquete máximo que permite IEEE 802.15.4. Para la solución del modelo analítico se utilizó el software Wolfram Mathematica 8. En la Tabla 7 se muestran los valores utilizados para solución del modelo analítico, algunos de estos son valores predeterminados por el estándar IEEE 802.15.4.

Tabla 7. Valores utilizados para la solución del modelo analítico

Parámetro	Valor
macMinBE	3
macMaxBE	5
macMaxCSMABackoffs (m)	4
<i>lfs</i>	2
<i>Toff</i> (bps)	16,336
<i>Tbytes</i>	37, 60, 120
Número de nodos (n)	2-12

Utilizando el algoritmo de la Figura 32 es posible resolver completamente el sistema de ecuaciones no lineales y obtener métricas para cada uno de los esquemas de empaquetado con diferente número de nodos/puentes transmitiendo. En las gráficas de las métricas que se muestran a continuación las líneas punteadas representan el escenario en que la transmisión de ACK está habilitada.

Probabilidad de detectar el canal ocupado (α): En la Figura 39 se muestra la probabilidad de detectar el canal ocupado para los 3 diferentes esquemas de empaquetado. Para cualquier número de nodos el esquema de empaquetado que presenta menor ocupación de canal es el tamaño de paquete máximo. Seguido por el tamaño de paquete medio. Por otro lado el esquema de paquete mínimo (o tamaño de paquete de red BLE) es el que presenta la mayor ocupación del canal. Normalmente se supondría que el tamaño de paquete mínimo representaría la menor ocupación del canal debido a que el tiempo de transmisión de un paquete es mucho menor comparado con los otros dos esquemas. Sin embargo, la tasa de

arribo de paquetes en este esquema es mucho más alta que las demás, por lo tanto la ventaja de tener menor tiempo de transmisión no tiene un impacto significativo en la probabilidad de ocupación del canal. Esto se debe a que una mayor tasa de arribo significa tener más paquetes queriendo ser servidos más rápidamente y por consiguiente una mayor ocupación del canal. En el caso de ACKs habilitados, la ocupación del canal en los tres esquemas aumenta ya que se requiere un tiempo extra en cada transmisión para la espera del paquete de ACK.

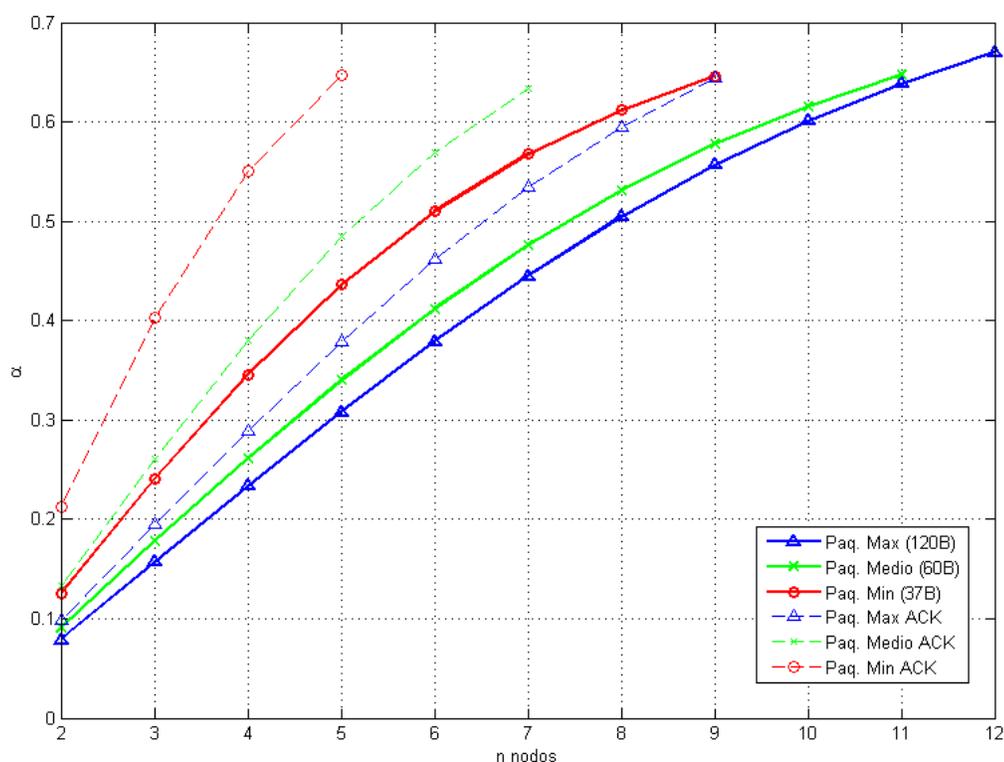


Figura 39. Probabilidad de detectar el canal ocupado para diferentes esquemas de empaquetado.

Tiempo de servicio de la MAC ($E[T_S]$): Cabe señalar que cuando se dice que un paquete es servido puede ser que haya sido transmitido o descartado. El tiempo de servicio de la MAC es entonces el tiempo en el que un paquete fue transmitido o descartado. En la Figura 40 se aprecian los tiempos de servicio para los tres diferentes esquemas.

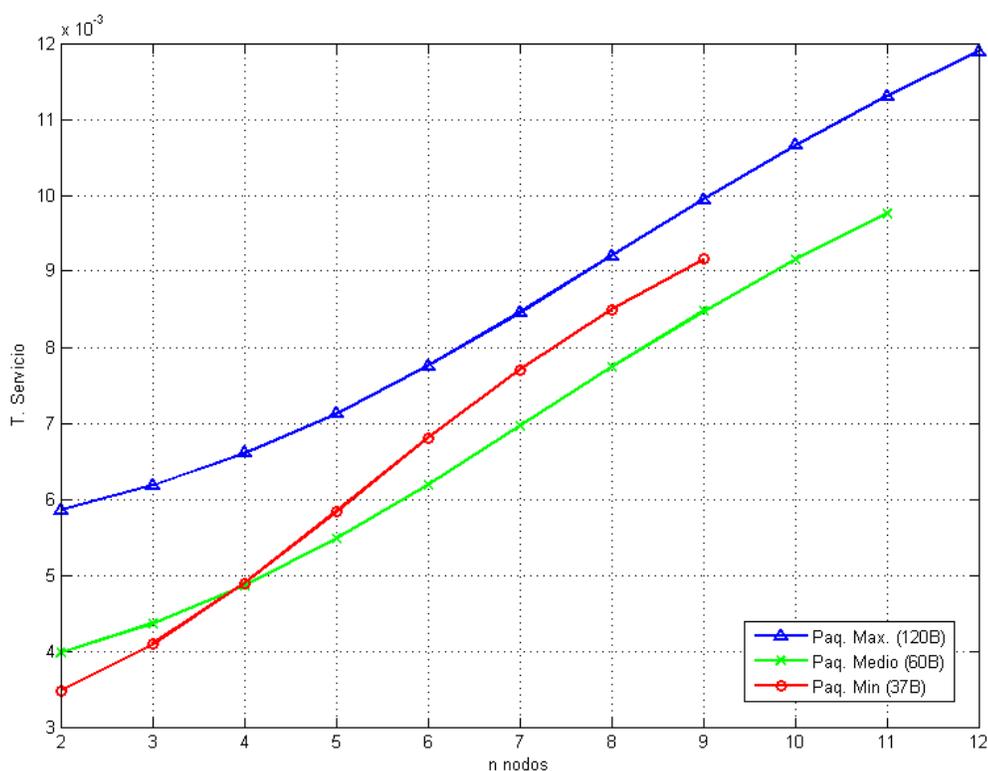


Figura 40. Tiempo de servicio MAC para diferentes esquemas de empaquetado

Como es de esperarse para un número pequeño de nodos (menor a 4) el esquema que presenta menor tiempo de servicio es el de paquete mínimo (no empaquetado), esto debido al menor tiempo requerido para transmitir un paquete. Sin embargo, al aumentar el número de nodos el tiempo de servicio de la MAC del esquema de paquete mínimo supera al tiempo de servicio del esquema de empaquetado con tamaño de paquete medio. Este incremento es debido a la mayor contención que representa tener una mayor tasa de arribo de paquetes. El esquema con tamaño de paquete máximo es el que presenta mayor tiempo de servicio. Sin embargo, esto no quiere decir que sea el que presente los paquetes con mayor retardo, ni el que tenga la mayor probabilidad de descartar un paquete. Debido a que se está observando solamente el tiempo transcurrido una vez que un paquete llega a la MAC a ser servido, es necesario observar también el tiempo

que los paquetes pasan en la cola antes de ser servidos para determinar cuál esquema es el que presenta los paquetes con mayor retardo.

Retardo total de los paquetes en la cola: Este retardo incluye el tiempo de servicio de la MAC y el tiempo que los paquetes esperan en cola. Se observa en la Figura 41 que al aumentar el número de nodos a 4 o más el esquema de no empaquetado tiene mayor retardo en los paquetes que los otros dos esquemas. Incluso a partir 8 nodos el esquema de empaquetado que tiene menor retardo es el esquema de empaquetado máximo. Aunque se podría pensar que el retardo debería ser mayor en este caso, con los resultados de la Figura 41 se demuestra que el retardo en comparación a paquetes más pequeños es menor en el esquema de empaquetado máximo. Este retardo es debido al número de paquetes en la cola que están esperando por ser servidos, lo cual se muestra a continuación.

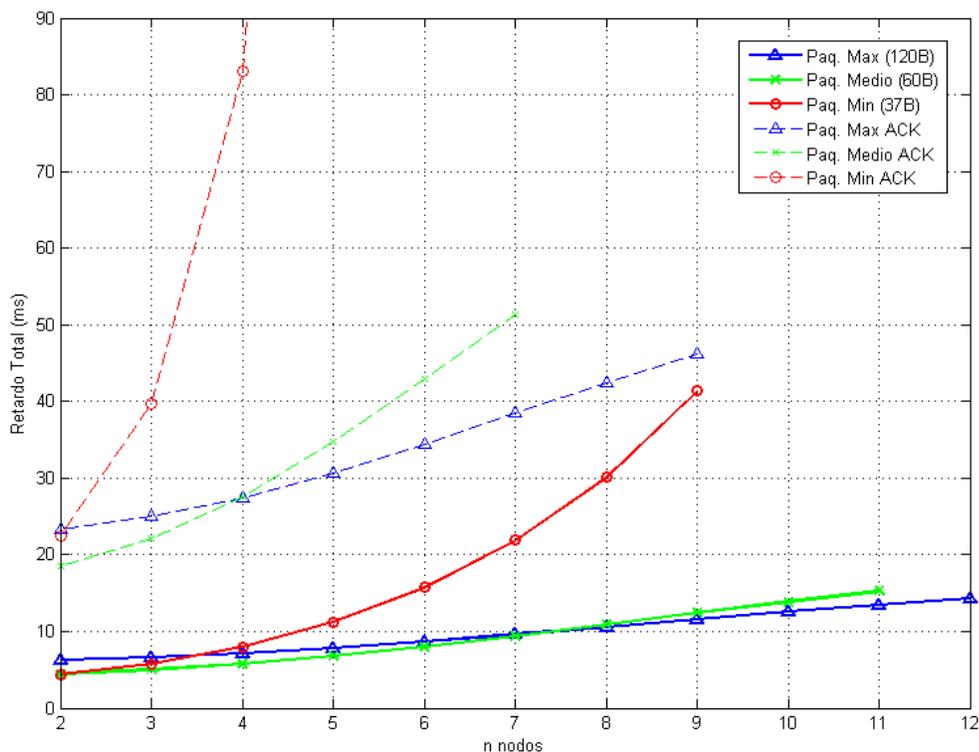


Figura 41. Retardo total de los paquetes en la cola para diferentes esquemas de empaquetado

Número de paquetes en cola promedio: Indica el número de paquetes promedio que se encuentran en cola para ser servidos si se observara el sistema en cualquier instante de tiempo. En la Figura 42 se aprecia que desde un número de nodos pequeños el esquema de paquete mínimo (no empaquetado) va incrementando exponencialmente en su número de paquetes en cola. Por esta razón el retardo total de los paquetes en la cola también incrementa drásticamente. Se observa también que el número de paquetes en cola correspondiente al tamaño de paquete mediano tiene una pendiente hacia arriba más pronunciada que la correspondiente al tamaño de paquete máximo. Este comportamiento hace que el esquema de paquete mediano tenga mayor retardo total que el esquema de empaquetado máximo, cual se observa en la Figura 41.

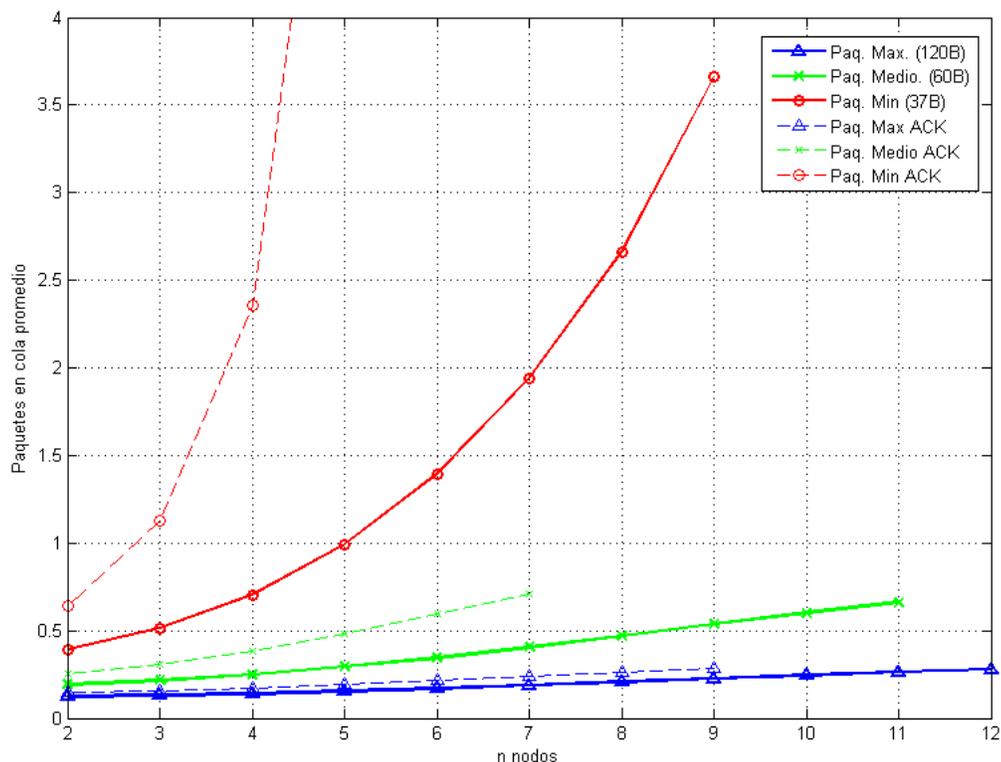


Figura 42. Número de paquetes en cola promedio para diferentes esquemas de empaquetado

Probabilidad de descartar un paquete: Uno de los parámetros más importantes para desplegar una red es la probabilidad de descartar un paquete en la capa MAC. La MAC descarta un paquete después encontrar el canal ocupado 5 veces seguidas al momento que querer transmitir un paquete (valor predeterminado por IEEE 802.15.4). En la Figura 43 se puede apreciar que para cualquier número de nodos el esquema que presenta la menor probabilidad de paquetes descartados es el esquema con empaquetado máximo. Esto es debido a la menor contención y menor ocupación del canal presentado por este esquema en comparación a los demás. La utilización de ACKs presenta un peor desempeño en cuanto a la probabilidad de descartar un paquete en la capa MAC. Sin embargo, implementar un esquema de acuse de recibo podría representar una ventaja en cuanto a la tasa de paquetes descartados por efectos del canal radio, que en este trabajo se considera ideal.

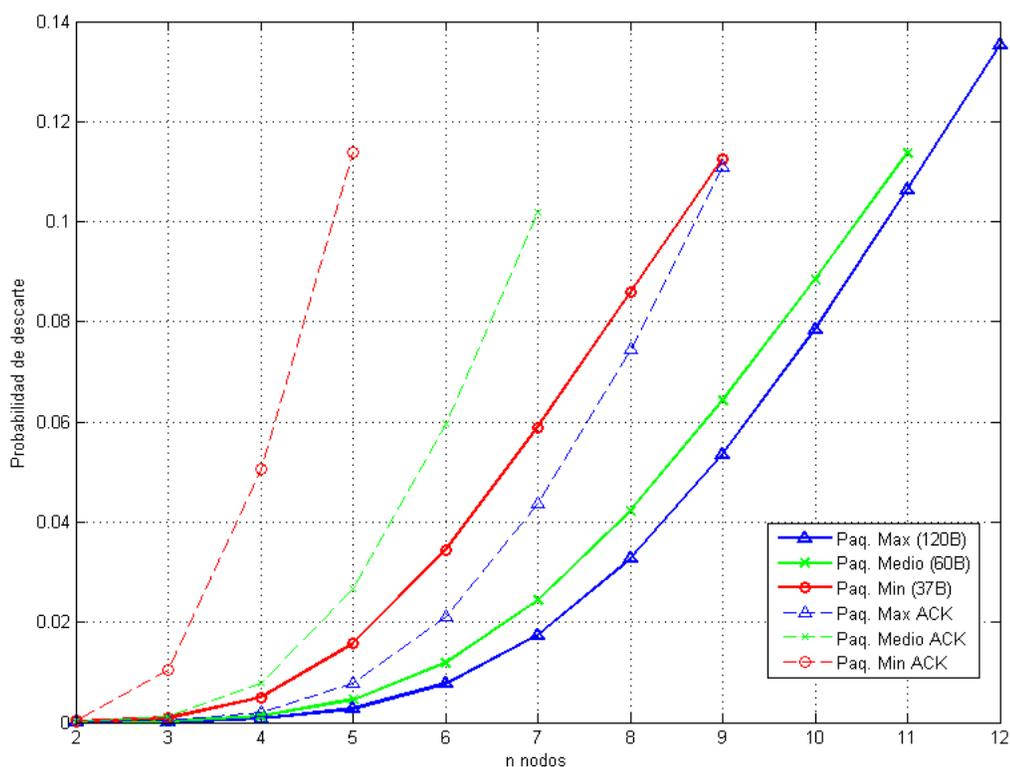


Figura 43. Probabilidad de descartar paquetes para diferentes esquemas de empaquetado

5.5 Diseño del dispositivo tipo puente

Con los resultados obtenidos en la sección anterior es posible determinar que la utilización de un esquema de empaquetado con tamaño de paquete máximo presenta el mejor desempeño en la transmisión de las variables fisiológicas consideradas. Por lo tanto, en este trabajo se propone implementar un dispositivo tipo puente que empaquete los datos de las variables fisiológicas hasta formar un paquete cuyo tamaño este lo más cercano posible al tamaño de paquete máximo de IEEE 802.15.4, esto sin que se requiera hacer una segmentación de los paquetes entregados por la red BLE.

Para explicar de una mejor manera la filosofía utilizada en el diseño del esquema de empaquetado de la red híbrida, considere que solo se van a transmitir muestras de ECG en la red. Se escogió esta señal ya que es la única sensible al retardo dentro de las señales que están siendo consideradas en este trabajo de investigación. Dado que se tienen 3 canales de ECG y se está muestreando cada canal por separado con una tasa de muestreo de 266.6 Hz, entonces se generarán 3 muestras de 2 bytes cada 3.75 ms. Esto equivale a una tasa de transmisión total de 12,800 bps para el ECG. De acuerdo a lo mostrado en la Sección 5.3.1, la red BLE entregará un paquete de 24 bytes cada 15 ms. Por lo tanto se puede realizar un esquema de empaquetamiento para la transmisión sobre IEEE 802.15.4 agrupando 4 paquetes de la red BLE, dando un total de 96 bytes de carga útil para el paquete IEEE 802.15.4. Este esquema de empaquetamiento se muestra en la Figura 44. Este ejemplo corresponde a la carga útil IEEE 802.15.4 máxima que se puede lograr utilizando un esquema de empaquetado para la transmisión de la señal de ECG.

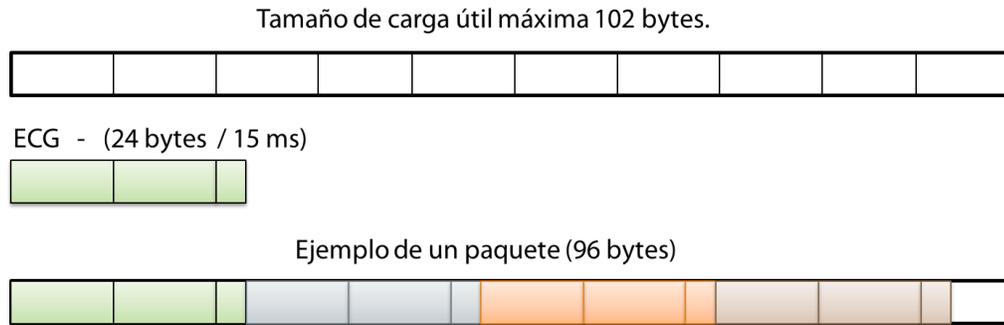


Figura 44. Ejemplo del proceso de empaquetado en el dispositivo tipo puente

Con la ayuda del modelo analítico descrito en el Capítulo 4 es posible analizar un escenario completo según sean los requerimientos de la aplicación, con el fin de buscar un compromiso entre número de nodos, probabilidad de paquetes descartados, retardo total de paquetes y esquema de empaquetado. Por ejemplo, si se tiene un escenario de 10 nodos transmitiendo señales ECG como el mencionado anteriormente (Figura 4), entonces utilizando el modelo analítico se puede encontrar que el retardo para el tamaño de paquete con carga útil de 96 bytes de IEEE 802.15.4 será de 31.27 ms. Con esto se tendrá un retardo de red total igual a:

$$\begin{aligned} ret_{Total} &= ret_{BLE} + ret_{802.15.4} \\ &= 60 \text{ ms} + 31.27 \text{ ms} = 91.27 \text{ ms} \end{aligned} \quad (33)$$

para la primera muestra ECG recolectada por la red de área corporal BLE.

En comparación, si no se realiza el empaquetado en el dispositivo tipo puente se transmitirá un paquete IEEE 802.15.4 con carga útil de 24 bytes proveniente de la red BLE. Considerando los mismos 10 nodos transmitiendo señales de ECG se puede encontrar que el retardo es de 52.84 ms. Con esto se tendría un retardo de red total de:

$$\begin{aligned}
 ret_{Total} &= ret_{BLE} + ret_{802.15.4} \\
 &= 15 \text{ ms} + 52.84 \text{ ms} = 67.87 \text{ ms}
 \end{aligned}
 \tag{34}$$

El retardo total con el esquema de no empaquetado es menor por 23.4 ms en comparación con el retardo del esquema de empaquetado máximo. Sin embargo, si se considera que para el esquema de no empaquetado la probabilidad de descartar paquetes es de $\alpha = 0.078$ mientras que con el esquema de empaquetado dicha probabilidad es de $\alpha = 0.033$, conviene realizar el empaquetamiento de datos en el puente de tal forma que se tenga el máximo tamaño de paquete posible en el segundo salto. Esto debido a que ambos esquemas cumplen con requerimiento de tener retardos menores a 1 segundo para la transmisión de señales ECG. Por lo tanto, en este trabajo se propone utilizar el esquema de acomodo de los eventos de conexión de la red de área corporal basada en BLE mostrado en la Figura 45.

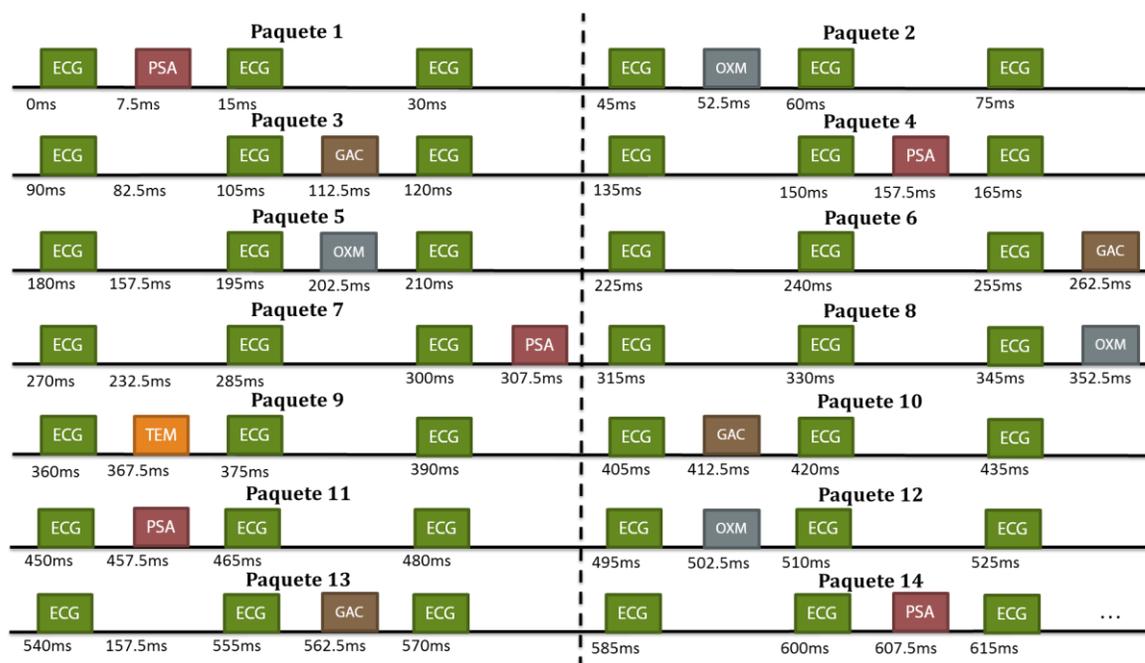


Figura 45. Esquema de empaquetado propuesto para la red híbrida

La finalidad de utilizar el acomodo propuesto en la Figura 45 es tener como referencia 3 paquetes BLE de ECG y un paquete de cualquier otra variable fisiológica encapsulados en un paquete IEEE 802.15.4. Además, con este esquema de empaquetado el tamaño de los paquetes IEEE 802.15.4 no tiene una variación significativa. Debido a que se enviarán siempre 3 paquetes BLE de ECG, el tamaño de los paquetes IEEE 802.15.4 será de 92 bytes en promedio.

Nótese que para este esquema de empaquetado se tiene una tasa de transmisión de 16,336 bps. Por lo tanto, haciendo un análisis para este esquema con 10 nodos y un tamaño de carga útil promedio de 92 bytes (3 paquetes ECG y uno de otro sensor) tenemos que el retardo total para la primera muestra ECG será de:

$$\begin{aligned} ret_{Total} &= ret_{BLE} + ret_{802.15.4} \\ &= 45 \text{ ms} + 40.27 \text{ ms} = 85.27 \text{ ms} \end{aligned} \quad (35)$$

con una la probabilidad de descarte de paquetes de $\alpha = 0.088$. Como comparación, si se considera un sistema de no empaquetado en el cual se transmite un flujo de información a 16,336 bps utilizando una carga útil promedio de 23 bytes (promedio de los tamaños de los paquetes de la red BLE). Se tiene que el retardo de la primera muestra de ECG será de:

$$\begin{aligned} ret_{Total} &= ret_{BLE} + ret_{802.15.4} \\ &= 15 \text{ ms} + 131.83 \text{ ms} = 146.83 \text{ ms} \end{aligned} \quad (36)$$

mientras que la probabilidad de descarte de paquetes será de $\alpha = 0.113$. En conclusión, con el esquema de empaquetado se logra tener un buen compromiso entre retardo y probabilidad de descarte de paquetes.

La evaluación analítica e implementación de un esquema de empaquetado en el dispositivo tipo puente es una de las principales contribuciones de este trabajo. Con el fin de evaluar experimentalmente el desempeño de la red híbrida y compararlo con una arquitectura de red homogénea, se realizaron pruebas en un ambiente de interferencia controlada. En el siguiente capítulo se explica la metodología para la realización de dichas pruebas y los resultados obtenidos.

Capítulo 6

Desarrollo del dispositivo tipo puente y de la red híbrida

6.1 Introducción

En los capítulos anteriores se discutieron las capacidades de las tecnologías de redes inalámbricas de área personal y el diseño de una red híbrida para telemonitoreo utilizando estas tecnologías. En este capítulo se muestra el desarrollo experimental y evaluación de desempeño del dispositivo tipo puente y de la red híbrida Bluetooth Low Energy / IEEE 802.15.4, teniendo en consideración lo estipulado en los capítulos anteriores.

A continuación se describe brevemente el equipo utilizado para el desarrollo de la red híbrida, sus características, alcances y el trabajo realizado con cada uno de ellos. Además se describe la metodología seguida para la creación del dispositivo tipo puente y la evaluación de desempeño de la red híbrida. Para finalizar se realiza una comparación de la red híbrida propuesta contra un red genérica en la aplicación de telemonitoreo propuesta.

6.2 Equipo utilizado

Para el desarrollo del dispositivo tipo puente fueron utilizados plataformas y transceptores de diferentes fabricantes. A continuación se describe brevemente el trabajo desarrollado en cada uno de ellos.

6.2.1 Texas Instruments CC2540 USB

Es un dispositivo Bluetooth Low Energy USB que puede comunicarse vía interfaz serial con otro dispositivo e intercambiar mensajes de control para realizar diversas acciones de la pila de protocolos de BLE. Para su programación se utiliza IAR Embedded Workbench (Lenguaje C).

Limitaciones: Como maestro sólo es posible conectar hasta 3 esclavos simultáneamente. Para conectar dos o tres esclavos se tienen las siguientes restricciones:

- Mínimo intervalo de conexión 25 ms.
- Los demás intervalos de conexión deben de ser iguales al mínimo o múltiplos del mismo (e.g. múltiplos de 25 ms).
- Sólo 1 paquete de 20 bytes máximo de carga útil por evento de conexión.

Trabajo desarrollado: Se estableció como el maestro de la red BLE y se habilitó la comunicación vía puerto serial (UART) para intercambiar mensajes de control con el dispositivo tipo puente.

6.2.2 Texas Instruments CC2540 Keyfob

Es un dispositivo BLE en forma de llavero habilitado con un acelerómetro de tres ejes, bocina, botones y las demás características del CC2540 USB.

Limitaciones: Las mismas que CC2540 USB.

Trabajo desarrollado: Se estableció como esclavo y se desarrolló código para habilitar la transmisión de un mensaje predeterminado cada cierto intervalo de tiempo al presionar un botón. El mensaje predeterminado es de 20 bytes cada 25 ms para emular tráfico del ECG y de 18 bytes cada 150 ms para emular tráfico del oxímetro de pulso.

6.2.3 Bluegiga BLED112

Es una solución de Bluetooth Low Energy en forma de llave USB que integra toda la pila de protocolos. Provee comunicación vía puerto serial y programación de aplicaciones en el módulo utilizando scripts de código (BGScript).

Limitaciones: No permite la conexión a más de un dispositivo BLE.

Trabajo desarrollado: Se desarrolló un script (BGScript) para habilitar la lectura de temperatura por medio del ADC interno conectado al sensor incluido en el módulo. Además se creó un perfil BLE personalizado para establecerlo como esclavo en la red habilitar el envío por medio de notificaciones de la información de temperatura.

6.2.4 Freescale MC13213-SRB

Es una tarjeta de evaluación que cuenta con un transceptor IEEE 802.15.4 y soporta la pila de protocolos completa. Además cuenta con un acelerómetro de tres ejes, sensor de temperatura, botones, conexión USB para comunicación serial y puertos de entrada/salida para propósito general. Para su programación se utiliza CodeWarrior IDE (Lenguaje C).

Trabajo desarrollado: Se desarrollaron dos programas uno para el dispositivo final y otro para el coordinador. El programa del dispositivo final es capaz de enviar paquetes de tamaño variable definidos por el usuario que son recibidos a través de la interfaz serial. El programa del coordinador crea la red, recibe paquetes de los demás dispositivos conectados y los envía hacia el resumidero de información a través de la interfaz serial.

6.2.5 BeagleBoard C4

Es una plataforma de desarrollo de hardware y software libre de bajo consumo de potencia con un procesador ARM Cortex-A8, puerto USB, RS232, S-Video, HDMI,

y ranura SD/MMC capaz de cargar sistemas operativos diseñados para ARM. Esta plataforma se utilizó como dispositivo tipo puente de la red, su función es interactuar con el transceptor maestro de la red BLE y el dispositivo final de la red IEEE 802.15.4, los cuales están conectados a la misma a través de una interfaz UART. Se utilizó una distribución de Linux para ARM como sistema operativo de la plataforma.

Trabajo desarrollado: Se desarrolló un programa en ANSI C, el cual sirve como base en la transmisión, generación, captura y empaquetado de datos desde una red Bluetooth Low Energy hacia una red IEEE 802.15.4.

6.3 Implementación experimental del dispositivo tipo puente y la red híbrida

Para la implementación física del dispositivo tipo puente y el esquema de empaquetado se utilizó una Beagleboard C4. La comunicación entre los transceptores inalámbricos y la plataforma Beagleboard se realiza utilizando los puertos UART, sin embargo, el código puede ser extendido para utilizar un protocolo de comunicaciones diferente (e.g. USB, SPI, I2C). El código maneja a los transceptores Bluetooth Low Energy Mini Development Kit (CC2540 USB y Keyfob) de Texas Instruments y las plataformas de desarrollo IEEE 802.15.4 MC1321x-SRB y MC1321x-NCB de Freescale.

Al ejecutar el programa se puede seleccionar cualquiera de los siguientes modos de operación:

- **Puente BLE – IEEE 802.15.4 (Empaquetado):** Provee la funcionalidad de puente al sistema con el fin de crear la red híbrida. Se realiza la configuración del transceptor y el establecimiento de la red Bluetooth con hasta 3 esclavos conectados simultáneamente. Adicionalmente, se reciben

diferentes datos de los esclavos y una vez que los datos recibidos son los suficientes para completar un paquete IEEE 802.15.4 de tamaño máximo, éstos son enviados hacia el enlace IEEE 802.15.4 establecido.

- **Puente BLE – IEEE 802.15.4 (NO Empaquetado):** Contiene las mismas funcionalidades del modo de operación anterior, sin embargo, los datos recibidos de los esclavos son enviados inmediatamente hacia el enlace IEEE 802.15.4. Es decir, no se realiza el proceso de empaquetado de datos.
- **Generador de tráfico IEEE 802.15.4:** En este modo de operación es posible generar una tasa de transmisión específica con diferentes tamaños de paquete para enviarlos a través de un puerto hacia el transceptor inalámbrico IEEE 802.15.4. El usuario debe de ingresar el tamaño de los paquetes a generar y el intervalo de generación en milisegundos entre los mismos.
- **Captura de paquetes:** Funciona del lado del coordinador de la red para capturar todos los paquetes que están siendo enviados de los diferentes dispositivos y llevar un registro con la finalidad de almacenar información sobre los paquetes recibidos en un archivo de texto. A partir de este registro es posible obtener estadísticas de pérdida de paquetes, calidad del enlace y tiempo de inter-arribo de paquetes.

En la Figura 46 se muestra el esquema experimental del dispositivo tipo puente con el equipo utilizado para su formación.

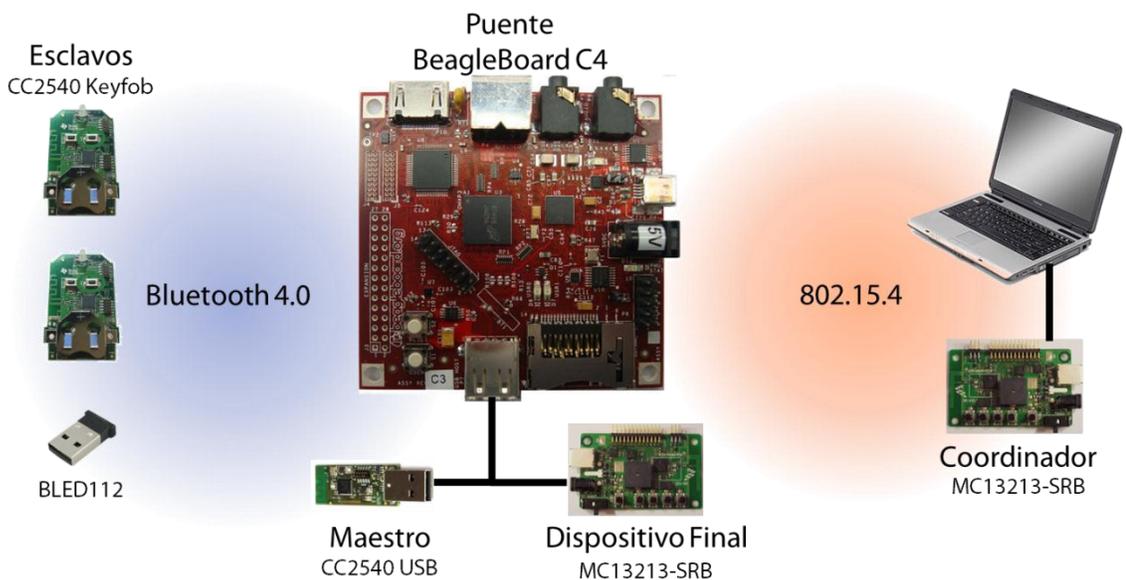


Figura 46. Esquema experimental del dispositivo tipo puente

6.4 Descripción del escenario de prueba experimental

Debido a que Bluetooth Low Energy es una tecnología de reciente liberación los dispositivos que actualmente se encuentran en el mercado no cumplen exactamente con lo que estipulado en el estándar. A causa de las limitantes presentadas anteriormente de los dispositivos Bluetooth Low Energy no es posible realizar la red con los 5 nodos esclavos como se analizó en la Sección 5.3. Por esta razón sólo se pueden tener 3 esclavos conectados con un tamaño de paquete máximo de 20 bytes cada 25 ms. Se eligieron 3 variables fisiológicas para ser transmitidas: una con la mayor tasa de transmisión posible (ECG), otra con una tasa de transmisión media (Oxímetro) y la última con la menor tasa de transmisión (Temperatura). En la Tabla 8 se muestran los intervalos de conexión, frecuencia de muestreo y tasa de transmisión de las tres variables seleccionadas para realizar la cama de pruebas experimental.

Tabla 8. Características de transmisión de las señales en el desarrollo experimental

Parámetro	Muestras por segundo (Hz)	Bits por muestra	Int. de conexión	Bytes por paquete BLE	Tasa de datos
ECG	400	x16	25 ms	20	6,400 bps
Oxímetro de pulso	60	x16	150 ms	18	960 bps
Temperatura	1	x32	1000 ms	4	32 bps
TOTAL					7,392 bps

Un ejemplo de los eventos de conexión de las tres variables seleccionadas en la red de Bluetooth Low Energy se muestra en la Figura 47.

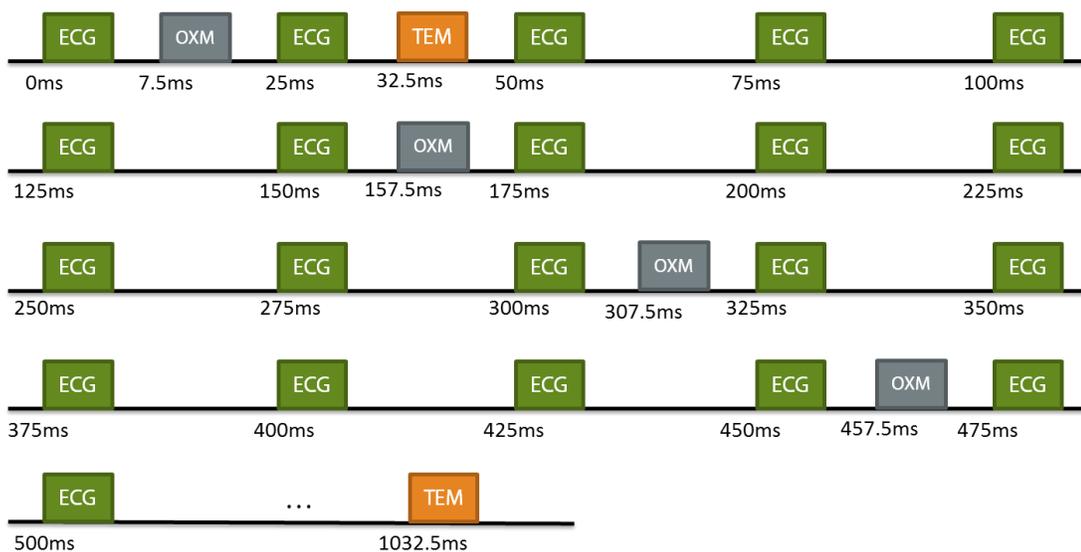


Figura 47. Ejemplo de eventos de conexión para los esclavos BLE en el desarrollo experimental para electrocardiograma (ECG), oxímetro de pulso (OXM) y temperatura(TEM)

6.5 Evaluación de desempeño de la red híbrida

Para evaluar el desempeño de la red se tomó en cuenta la tasa total de paquetes perdidos y el tiempo de inter-arribo entre los paquetes. Las pruebas fueron realizadas dentro de una jaula de Faraday para disminuir lo mejor posible cualquier tipo de interferencia en la misma banda de 2.4 GHz (e.g. WiFi). Se consideran tres diferentes escenarios los cuales se definen a continuación.

Escenario 1

Este es el escenario planteado en la Sección 6.2 donde se cuenta con el dispositivo tipo puente conectado a 3 sensores y a un punto de acceso. Cabe señalar que sólo se utiliza un dispositivo tipo puente que está transmitiendo a 7,392 bps en total. Los demás dispositivos IEEE 802.15.4 emulan el tráfico del dispositivo tipo puente tal y como se muestra en la Figura 48.

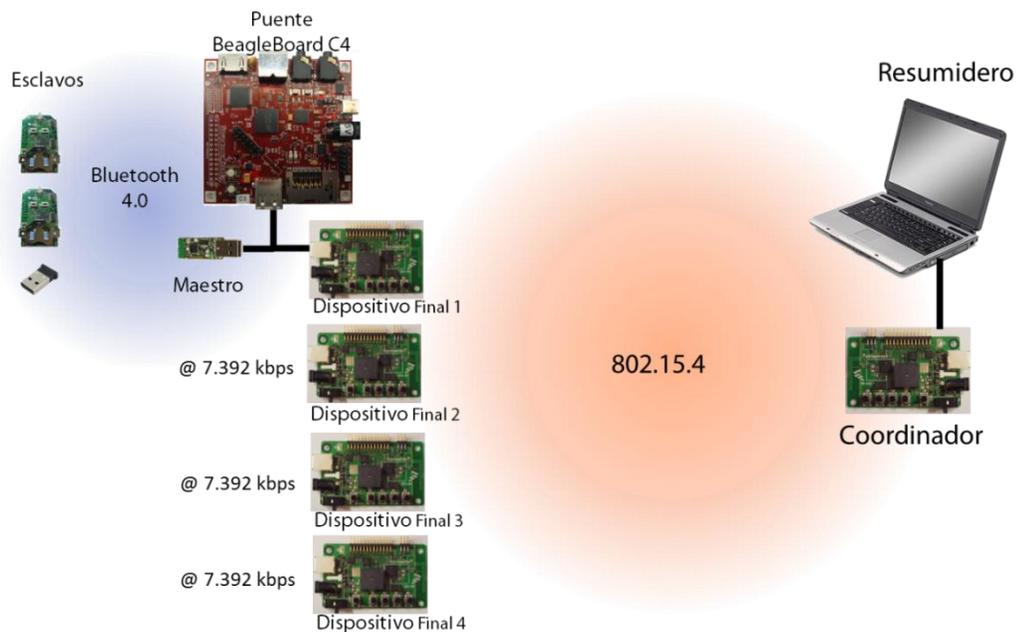


Figura 48. Esquema de evaluación del Escenario 1

Al realizar las pruebas se consideraron dos esquemas de empaquetado: tamaño de paquete máximo posible y no empaquetado. En la Figura 49 se muestran los resultados de la probabilidad de paquetes perdidos para cada uno de los dos esquemas de empaquetado.

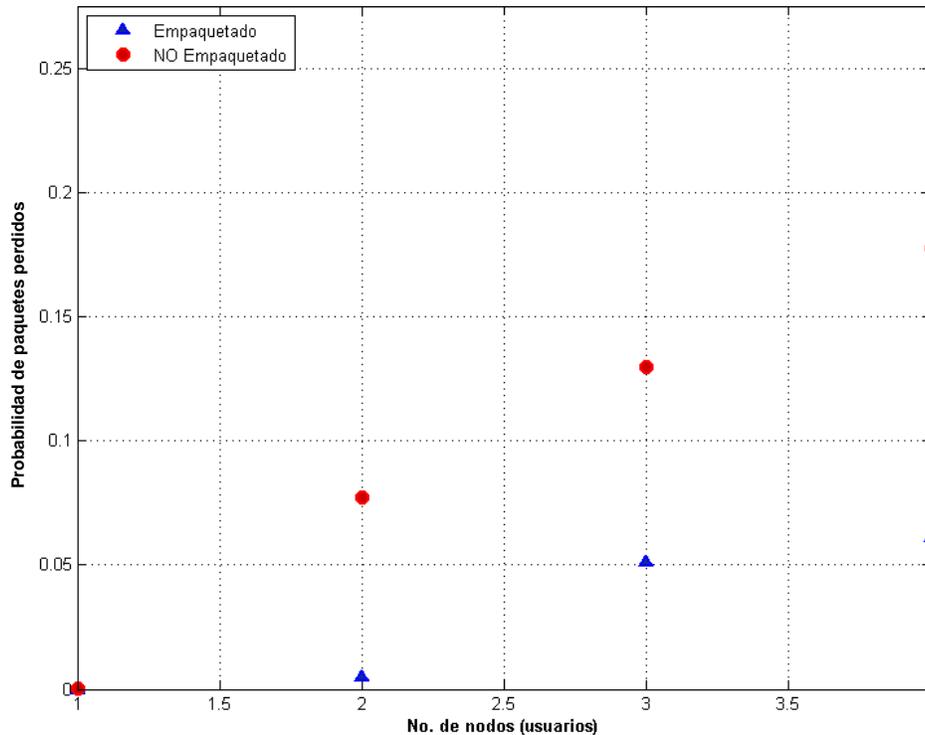


Figura 49. Probabilidad de paquetes perdidos para el Escenario 1 (7.392 kbps)

Se puede observar que cuando solamente se encuentra un nodo/puente transmitiendo en la red, utilizar cualquiera de los dos esquemas no representa gran diferencia debido a que no existe contención por el canal. Sin embargo, a partir de dos nodos el esquema de empaquetado máximo presenta un mejor desempeño y utilizarlo disminuye la probabilidad de paquetes perdidos. Por ejemplo, para 3 nodos con el esquema de no empaquetado la probabilidad de paquetes perdidos es de 0.132, mientras que con el esquema de empaquetado baja a 0.053. Es decir, por cada 100 paquetes con el esquema de no

empaquetado se pierden 13 paquetes, mientras que con el esquema de empaquetado se pierden 5 paquetes. Por lo tanto, utilizar el esquema de empaquetado mejora el desempeño a más del doble con relación a la tasa de paquetes perdidos en comparación con no utilizar el esquema de empaquetado.

En la Figura 50 y la Figura 51 se muestran los histogramas de los tiempos de inter-arribo para el esquema de empaquetado y no empaquetado, respectivamente. El tiempo de inter-arribo no es el tiempo de servicio de la capa MAC, es la diferencia entre los tiempos de arribo de paquetes consecutivos. Por lo tanto los tiempos de arribo después de la media son paquetes que fueron retrasados por el mecanismo de acceso al medio. Los que están antes de la media son de paquetes que fueron transmitidos enseguida de un paquete que fue retrasado por el mecanismo de acceso al medio.

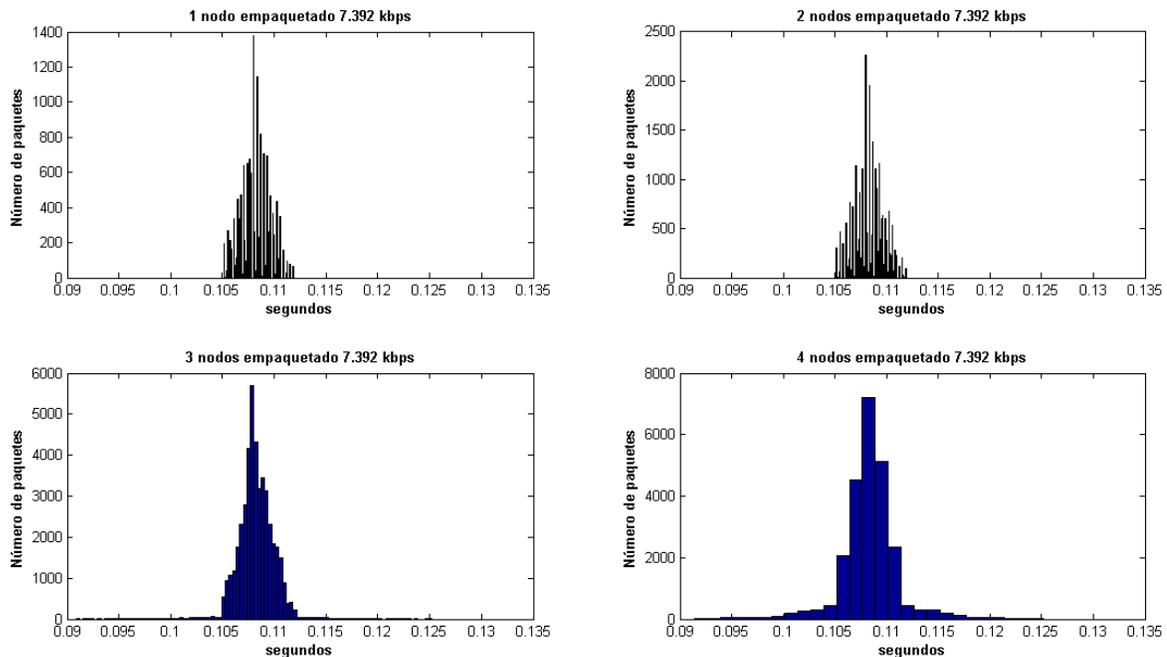


Figura 50. Histograma de tiempos de inter-arribo Escenario 1 empaquetado

En las gráficas de la Figura 50 se observa que para el esquema de empaquetado conforme aumenta el número de usuarios la desviación estándar de los tiempos de inter-arribo va aumentando. Es decir, más paquetes están siendo retrasados por el mecanismo de acceso al medio. Sin embargo, cuando se utiliza el esquema de empaquetado al ir incrementando el número de nodos la desviación estándar aumenta más drásticamente, cual se puede constatar en la Figura 51. Este aumento es debido a la mayor ocupación del canal que representa la utilización del esquema de no empaquetado.

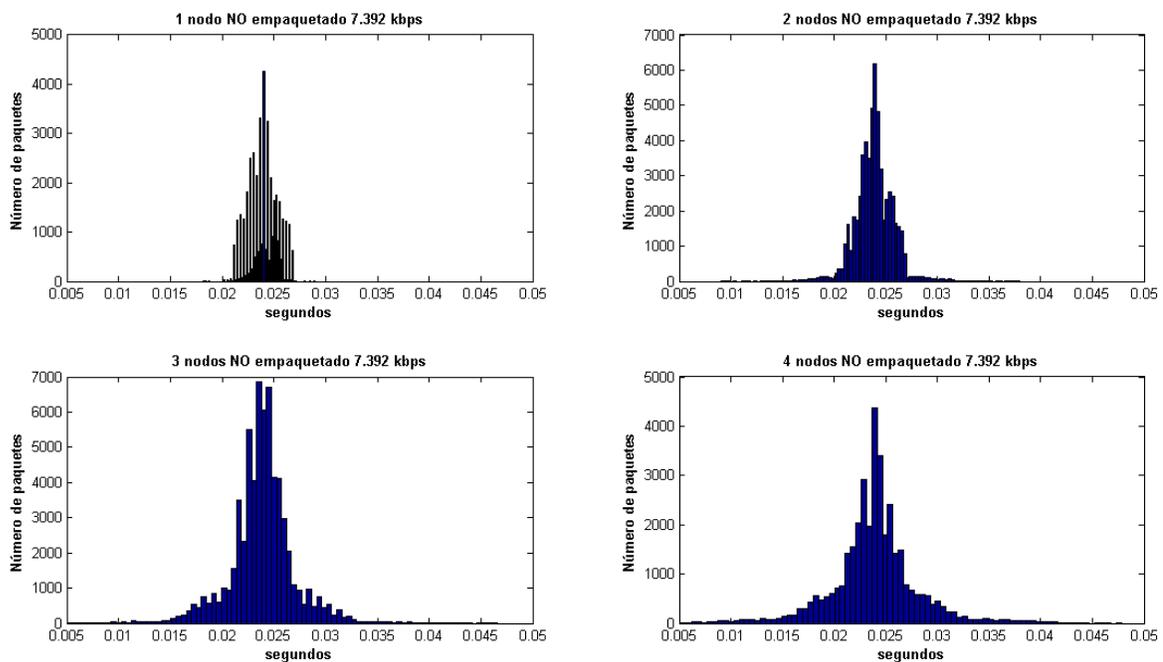


Figura 51. Histograma de tiempos de inter-arribo Escenario 1 no empaquetado

Escenario 2

Este escenario, planteado en la Sección 5.3, considera que hay 5 sensores en la red BLE conectados al dispositivo tipo puente transmitiendo con una tasa total de 16,336 bps (Tabla 5). Debido a las limitaciones de los dispositivos BLE mencionadas anteriormente no fue posible incorporar un dispositivo tipo puente en

esta red. Por lo tanto el tráfico de cada uno de los nodos es emulado. El esquema de este escenario se muestra en la Figura 52.

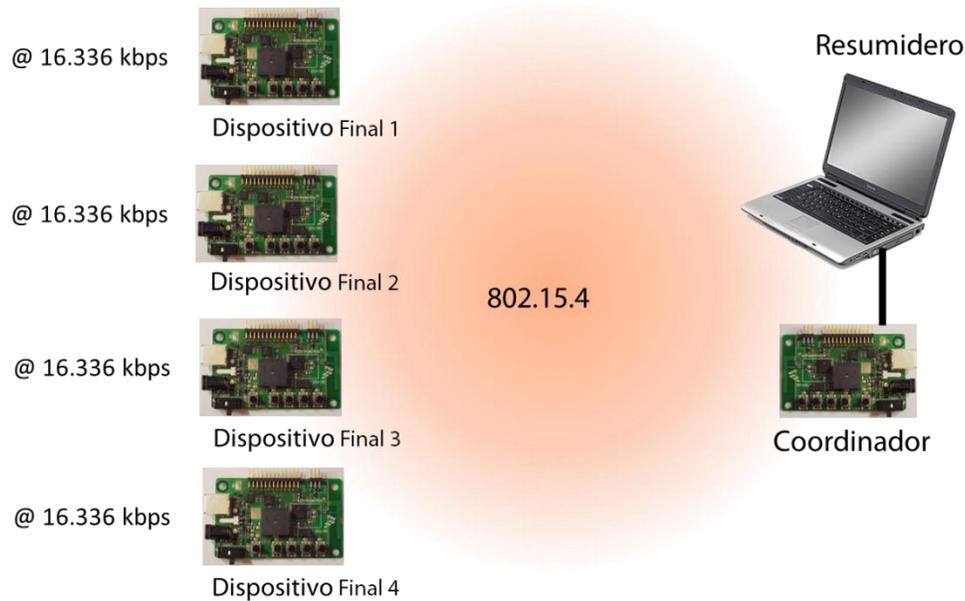


Figura 52. Esquema de evaluación del Escenario 2

De la misma manera que el escenario 1, se consideró el esquema de empaquetado con tamaño de paquete máximo y el esquema de no empaquetado. En la Figura 53 se muestran los resultados obtenidos con estas dos configuraciones. En dicha figura se observa un comportamiento similar al observado en el escenario 1, sin embargo, el tráfico ofrecido para cada nodo es mayor. Debido a esto el tráfico total en la red es mucho mayor al del escenario 1 y por lo tanto se tiene una probabilidad de paquetes perdidos más alta. Al estar trabajando en una red con cuatro nodos utilizando el esquema de no empaquetado se obtiene un porcentaje de paquetes perdidos mayor al 25%, lo cual es inviable para cualquier tipo de aplicación. Otra observación importante es que los resultados de tasas de paquetes perdidos son superiores a las mostradas en los resultados del modelo analítico (Sección 5.4.1). Esto se debe a que en el

modelo analítico se hace un estudio exclusivo de la capa MAC. Por lo tanto, una vez que el paquete ha sido mandado a la capa física se considera transmitido y no se toman en cuenta los efectos del canal radio ni las colisiones que podrían llegar a suceder en el mismo.

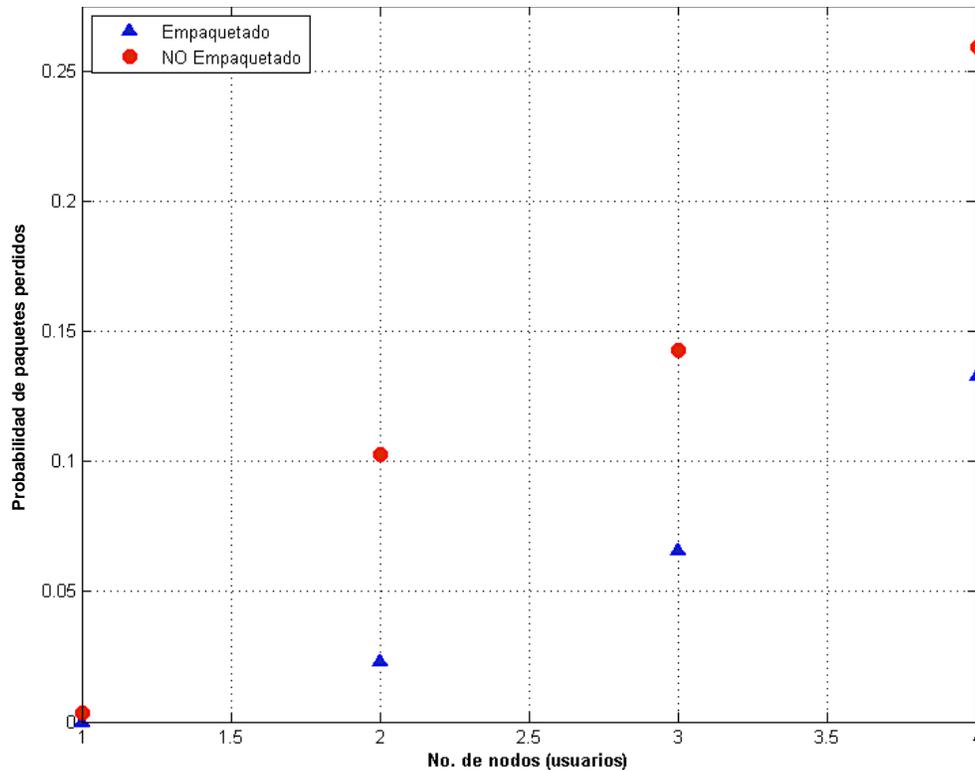


Figura 53. Probabilidad de paquetes perdidos para el Escenario 2 (15.536 kbps)

Escenario 3

Para analizar las ventajas ofrecidas de una red híbrida con la utilización de un dispositivo tipo puente se realizó un tercer escenario, en el cual se considera una arquitectura de red homogénea. En este escenario todos los sensores de las variables fisiológicas se conectan directamente con el punto de acceso a través de

un enlace IEEE 802.15.4. Las tasas de transmisión de cada uno de los sensores fueron las mismas que para el escenario 1 (Tabla 8). El esquema para la evaluación de este escenario se muestra en la Figura 54.

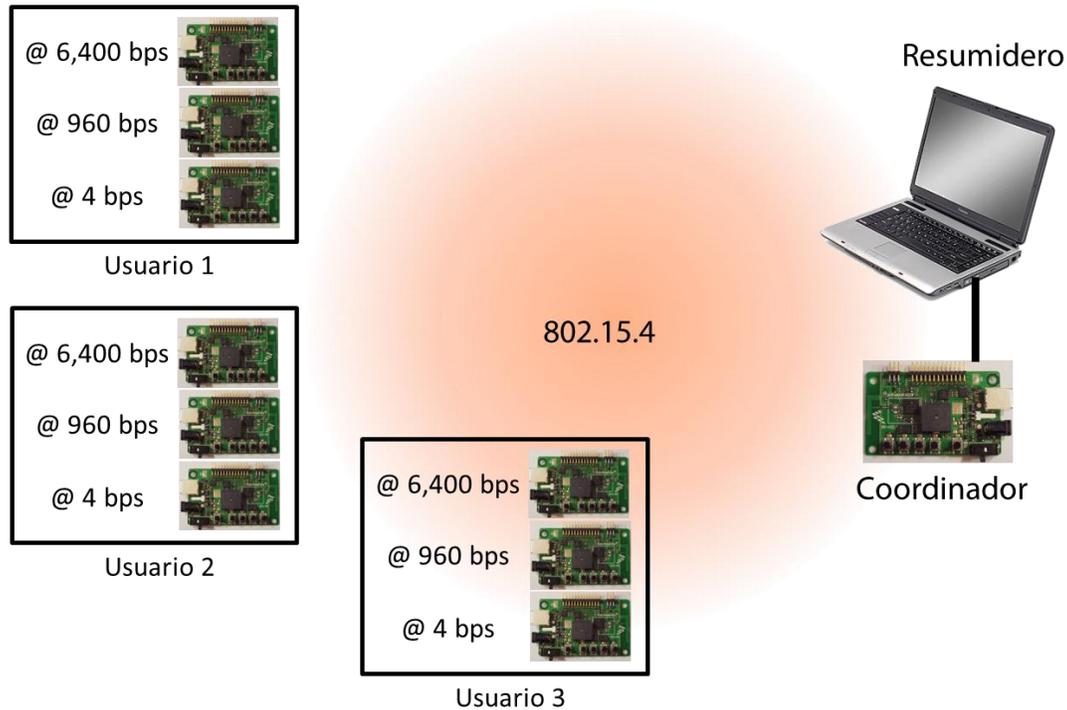


Figura 54. Esquema de evaluación del Escenario 3

Se utilizaron los resultados del escenario 1 para comparar el desempeño de la red homogénea con el desempeño de la red híbrida. En la Figura 55 se muestra la comparación de los resultados obtenidos para ambos escenarios. Se puede observar que la arquitectura que presenta peor desempeño en todos los casos es la red homogénea. Esto se debe a que para servir a cada usuario se tienen que utilizar 3 dispositivos IEEE 802.15.4 que, aunque tengan una tasa de transmisión pequeña, representan una mayor contención por el canal. En particular, se puede observar que la probabilidad de paquetes perdidos utilizando la red híbrida disminuye para cualquier número de nodos en comparación con utilizar una red

homogénea. Por ejemplo, para 3 nodos se tiene que la probabilidad de paquetes perdidos de la red homogénea es de 0.147, mientras que para la red híbrida se tiene una probabilidad de paquetes perdidos de 0.132 sin utilizar un esquema de empaquetado y de 0.052 utilizando un esquema de empaquetado. Entonces, por cada 100 paquetes la red homogénea descarta alrededor de 15 paquetes, mientras que la red híbrida descarta 13 paquetes sin utilizar un esquema de empaquetado y 5 paquetes utilizando un esquema de empaquetado. Por lo tanto, se demuestra que con la implementación de una red híbrida en conjunto con un esquema de empaquetado se puede mejorar la tasa de paquetes perdidos a casi el triple comparado con la arquitectura de red homogénea.

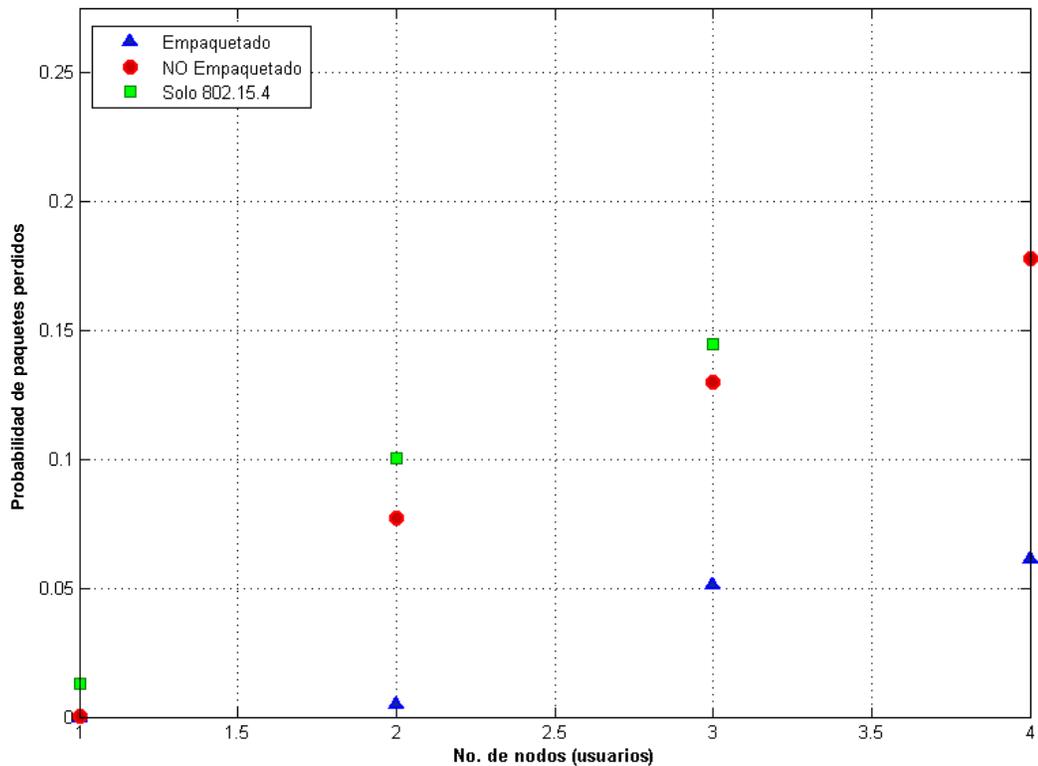


Figura 55. Comparación de la probabilidad de paquetes perdidos para el Escenario 3 y el Escenario 1

Otro aspecto que es importante señalar es el número de usuarios siendo servidos. Por ejemplo, si se requiere implementar una red con una probabilidad de paquetes perdidos menor o igual a 0.10, con una arquitectura de red homogénea IEEE 802.15.4 podrían ser servidos sólo dos usuarios. En contraste, con una arquitectura de red híbrida y un esquema de empaquetado podrían llegar a ser servidos hasta cuatro usuarios. Por lo tanto, se comprueba que es posible doblar el número de usuarios que pueden ser servidos en una red homogénea IEEE 802.15.4 con la implementación de una arquitectura de red híbrida BLE/IEEE 802.15.4 y un esquema de empaquetado.

6.6 Conclusiones sobre el desarrollo de la red híbrida

Los resultados del escenario 3 presentados en la Figura 55 permiten comprobar experimentalmente que el número de usuarios siendo servidos puede ser doblado utilizando la arquitectura de red híbrida propuesta, en comparación con arquitecturas de red homogéneas previamente reportadas en la literatura (González-Valenzuela *et al.*, 2011). Esta es una de las principales aportaciones del trabajo de investigación.

Los resultados tanto analíticos como experimentales plasman de forma clara y concisa las ventajas de utilizar una arquitectura de red híbrida en aplicaciones de telemonitoreo. Además muestran los beneficios de la selección de un esquema de empaquetado de datos para mejorar las prestaciones de la red.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo a futuro

7.1 Introducción

Durante el desarrollo de este trabajo de investigación fueron surgiendo diversos cuestionamientos a los cuales se les dio la mejor solución posible utilizando las herramientas conocidas y las adquiridas a lo largo del proceso. El objetivo de este capítulo es explicar brevemente los cuestionamientos que surgieron, las herramientas utilizadas y las soluciones planteadas. Así como también discutir dichas soluciones y proponer sus mejoras con trabajo a futuro.

Las aportaciones plasmadas en este trabajo establecen una metodología para el diseño, desarrollo y evaluación de una plataforma de red de sensores híbrida con aplicación en sistemas de telemonitoreo y telemedicina. Con esto se cumple en su totalidad con el objetivo principal de esta tesis. Además, se generaron aportaciones que no fueron contempladas al inicio de la investigación, como la implementación de un esquema de empaquetado en un dispositivo tipo puente.

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 de la red híbrida y el dispositivo tipo puente.

7.2.1 Sobre el diseño de la red híbrida

Se investigó en la literatura las necesidades de redes de sensores en aplicaciones de telemonitoreo, las capacidades de las tecnologías inalámbricas utilizadas en estas aplicaciones y las arquitecturas de red necesarias para cubrir los diferentes servicios. A partir de este estudio se desarrolló un modelo analítico que sirviera como herramienta para el diseño de la red híbrida. En particular con el modelo se obtuvieron diversas métricas que se utilizaron como guías de diseño para obtener un mejor desempeño de red. A continuación se muestran las principales conclusiones a las que se llegaron sobre el diseño de la red híbrida.

- La tasa de datos y capacidades requeridas por los sensores en escenarios de telemonitoreo es relativamente baja en comparación a las exigidas actualmente por los servicios más utilizados (e.g. voz, video, datos multimedia). Sin embargo, esto no implica que el diseño de sistemas y redes de telecomunicaciones para la transmisión de este tipo de señales sea trivial.
- Aún y cuando ha sido común proponer la utilización de dispositivos basados en estándares como Bluetooth y ZigBee para el desarrollo de sistemas de telemonitoreo y redes inalámbricas de área corporal (WBAN), estos estándares no fueron específicamente desarrollados para estas aplicaciones. Sin embargo del estudio que se realizó, se puede concluir que Bluetooth Low Energy cumple con los requerimientos para la implementación de WBANs y que IEEE 802.15.4 provee la capacidades necesarias para transmitir los datos de los sensores fuera de los límites de la red de área corporal hacia el resumidero de información en una arquitectura de red híbrida BLE/IEEE 802.15.4.

- El modelo analítico basado en cadenas de Markov y teoría de colas para el mecanismo de acceso al medio no ranurado de IEEE 802.15.4 establece métricas que permiten observar más claramente el comportamiento del mismo en condiciones específicas. Debido a la flexibilidad de las variables que pueden modificarse en el modelo analítico, es posible extender el modelo a cualquier escenario deseado con tan solo modificar algunos parámetros.
- El modelo para el modo de operación no ranurado de la capa MAC del estándar IEEE 802.15.4 propuesto en esta tesis permite determinar la distribución probabilística del tiempo de servicio. Esta es una herramienta bastante útil para el diseño de redes IEEE 802.15.4 que no ha sido reportada en la literatura. Este modelo es una de las principales aportaciones de este trabajo.
- Con el modelo analítico de acceso al medio para IEEE 802.15.4 se comprobó que la utilización de un esquema de empaquetado con tamaño de paquete máximo presenta un mejor desempeño en cuanto a la probabilidad de paquetes descartados, en comparación con un dispositivo tipo puente común.
- Los paquetes con tamaño máximo presentan menor retardo conforme el número de nodos va aumentando, lo cual puede parecer contra-intuitivo en un inicio (ver Figura 34).
- Con los resultados del Capítulo 5 en la Figura 41 y Figura 43, se demostró analíticamente que la utilización de un esquema de empaquetado en un dispositivo tipo puente permite mejorar las prestaciones brindadas por una red híbrida, con respecto al número de usuarios que pueden ser servidos. Esta propuesta es una de las aportaciones que se generaron y que no estaban contempladas en el objetivo inicial del trabajo.

7.2.2 Sobre el desarrollo del dispositivo tipo puente y de la red híbrida

Una vez definida la información a transmitir, las tecnologías utilizadas para su transmisión y el diseño de la red híbrida, se procedió a buscar soluciones para desarrollar físicamente el dispositivo tipo puente y la red híbrida. Al respecto podemos mencionar las siguientes conclusiones como las más importantes:

- El desarrollo de una red híbrida completa no es trivial. Debido a que Bluetooth Low Energy es un estándar de reciente liberación, las soluciones que ofrecen actualmente los fabricantes no cumplen con lo estipulado en el estándar (por ejemplo, en el número de esclavos conectados). En este contexto, existe una gran brecha entre lo que puede analizarse en la teoría y lo que puede ser llevado a la práctica utilizando las soluciones BLE disponibles actualmente.
- Debido a que la comunicación entre los transceptores y el dispositivo tipo puente se realiza mediante el puerto UART, es necesario utilizar una palabra de sincronía con la finalidad de obtener correctamente las lecturas.

7.2.3 Sobre la evaluación de desempeño de la red híbrida

Para obtener una visión más amplia del desempeño de la red híbrida se realizaron diferentes escenarios de evaluación. A continuación se muestran las principales conclusiones con respecto a los resultados de la evaluación de desempeño de la red híbrida.

- En un inicio las pruebas experimentales de la red híbrida se realizaron en un entorno de oficina, sin embargo, la interferencia era lo suficientemente grande como para alterar de manera significativa los resultados de las transmisiones. Entonces se procedió a realizar las pruebas en una jaula de Faraday para evitar lo mejor posible la interferencia con otras redes en la banda de 2.4 GHz y controlar los niveles de interferencia. Esta decisión mejoró significativamente los resultados de las pruebas en cuanto a su consistencia. Por lo tanto, la utilización de una jaula de Faraday es necesaria en escenarios donde se requiere tener la interferencia controlada entre un número de nodos específico.
- Tanto en el modelo analítico como en las pruebas experimentales, utilizar un esquema de empaquetado con tamaño de paquetes máximo fue el que presentó un mejor desempeño. Por lo tanto, se puede concluir que al diseñar una red híbrida es conveniente incluir un esquema de empaquetado en el dispositivo tipo puente a cambio de utilizar un esquema de retransmisión de la información sin empaquetado.
- El modelo analítico, aunque no es cien por ciento consistente con las probabilidades obtenidas en la implementación experimental debido a que es un análisis exclusivo de la capa MAC, sirvió como guía para el diseño de: la red híbrida, el dispositivo tipo puente y el esquema de empaquetado.
- Se implementó una red homogénea IEEE 802.15.4 y se compararon los resultados con los de la red híbrida (ver Figura 55). En base a esta comparación, se pudo demostrar que con la implementación de una red híbrida BLE/IEEE 802.15.4 en conjunto con un esquema de empaquetado se puede mejorar la tasa de paquetes perdidos a casi el triple comparado con arquitecturas de red homogéneas IEEE 802.15.4 propuestas previamente en la literatura.

- Para finalizar, se demostró que es posible doblar el número de usuarios que pueden ser servidos en una red homogénea IEEE 802.15.4 con la implementación de una arquitectura de red híbrida BLE/IEEE 802.15.4 y un esquema de empaquetado. Esta es una de las principales aportaciones que se generaron con el desarrollo de este trabajo.

7.3 Trabajo a futuro

Aún existen áreas de oportunidad que pueden explorarse para el despliegue de redes de sensores en escenarios de telemonitoreo. En esta sección se muestran las recomendaciones para trabajo a futuro que pueden extenderse a partir de este trabajo de investigación.

- Extender el análisis del modelado de la red utilizando un modelo conjunto de capa MAC y capa PHY con la finalidad de observar los efectos del canal radio que afectan en la transmisión de cada uno de los diferentes esquemas de empaquetado.
- Desarrollar y evaluar el desempeño de la red con otros modos de operación de IEEE 802.15.4 (e.g. con paquetes faro, GTS).
- Realizar simulaciones para observar de mejor manera el comportamiento del modelo analítico de CSMA/CA con la finalidad de extender el análisis a escenarios más complejos.
- Realizar un estudio completo del consumo de potencia en la arquitectura de red híbrida y compararlo con una arquitectura de red homogénea.

- Reducir los componentes utilizados en la implementación práctica. Es posible portar el código desarrollado en la Beagleboard a una de las plataformas de evaluación IEEE 802.15.4 ya que posee los requerimientos de procesamiento para realizar las tareas de un dispositivo tipo puente.

Referencias bibliográficas

Benocci, M.y Farella, E. (2009) Optimizing ZigBee for data streaming in body-area bio-feedback applications. *Advances in sensors and Interfaces. IWASI 2009. 3rd International Workshop*. 150 – 155 p.

Bianchi, G. (2000) Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas of Communication*. 18(3): 535 - 547.

Bluetooth SIG. (2010) Bluetooth Core Especification V.4.0. Recuperado en noviembre 2012.

http://developer.bluetooth.org/KnowledgeCenter/TechnologyOverview/Documents/Core_SPEC.pdf

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

Gallego, J.R.,Hernandez-Solana, A., Canales, M., Lafuente, J., Valdovinos, A. y Fernandez-Navajas, J. (2005) Performance analysis of multiplexed medical data transmission for mobile emergency care over the UMTS channel. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*. 9(1): 13 - 22.

González-Valenzuela, S.,Chen, M. y Leung, V. C. M. (2011) Mobility Support for Health Monitoring at Home Using Wearable Sensors. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*. 15(4): 539 - 549.

Hameed, M.,Trsek, H., Graeser, O. y J. Jasperneite. (2008) Performance investigation and optimization of IEEE802.15.4 for industrial wireless sensor networks. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2008*. 1016 - 1022.

Hartmann, E. (2003) ECG front-end design is simplified with microconverter. *Analog Dialogue*. 37(11): 1 - 5.

IEEE Computer Society. (2006) Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). 323 p.

IEEE Standards Association. (2005) IEEE Std 802.15.1-2005 – Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs). 600 p.

- Kailas, A. y Ingram, M. A. (2009) Wireless Aspects of Telehealth. *Springer Wireless Personal Communications*. 51(4): 673 - 686.
- Kim, T.O., Park, T.R., Chong, H.K., Kim, K.J. y 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. y Kong, P. Y. (2006) Performance Study on ZigBee-Based Wireless Personal Area Networks for Real-Time Health Monitoring. *ETRI Journal*. 28(4): 537 - 540.
- Kwak, K.S., Ullah, S. y Ullah, N. (2010) An Overview of IEEE 802.15.6 Standard. *Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL), 2010 3rd International Symposium*. 1 - 6.
- Malindi, P., Gruschew, G., Rakowsky, S. (2011) Telemedicine Techniques and Applications (QoS in Telemedicine). *InTech*. 119 - 138.
- Meystre, S. (2005) The Current State of Telemonitoring: A Comment on the Literature. *Telemedicine and e-Health*. 11(1): 63 - 69.
- Misic, J. y Misic, V.B. (2009) Bridging Between IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11b Networks for Multiparameter Healthcare Sensing. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 27(4): 435 - 449.
- Misic, J. y Misic, V. (2010) Bridge performance in a multitier wireless network for healthcare monitoring. *IEEE Wireless Communications*. 17(1): 90 - 95.
- Nedelcu, A.V., Sandu, F., Machedon-Pisu, Alexandru, M. y P. Ogrutan. (2009) Wireless-based remote monitoring and control of intelligent buildings. *IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments. ROSE 2009*. 47 - 52.
- Park, T.R., Kim, T.H., Choi, J.Y., Choi, S. y Kwon W.H. (2005) Throughput and energy consumption analysis of IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA. *IEEE Electronics Letters*. 41(8): 1 - 2.
- Penders, J., Gyselinckx, B., Vullers, R., Rousseaux, O., Berekovic, M., De Nil, M., Van Hoof, C., Ryckaert, J., Yazicioglu, R.F., Fiorini, P. y Leonov, V. (2007) HUMAN++: Emerging Technology for Body Area Networks. *Research Trends in VLSI and Systems on Chip*. 249: 377 - 397.
- Pizzut, G.P., Cifaldi, S. y Nolfo, G. (1985) Digital sampling rate and ECG analysis. *PubMed Journal of biomedical engineering*. 7(3): 247 - 250.

- Pollin, S., Ergen, M., Ergen, S. C., Bougard, B., Van der Perre, L., Moerman, I., Bahai, A., Varaiya P. y Catthoor, F. (2008) Performance Analysis of Slotted Carrier Sense IEEE 802.15.4 Medium Access Layer. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 7(9): 3359 - 3371.
- Rehman, M., Gao, Y., Wang, Z., Zhang, J., Alfadhl, Y., Chen, X., Parini, C.G., Ying, Z., y Bolin, T. (2010) Investigation of on-body Bluetooth transmission. *Microwaves, Antennas & Propagation, IET*. 4(7): 871 - 880.
- Sharma, S., Vyas, A.L., Thakker, B., Mulvaney, D., Datta, S. (2011) Wireless Body Area Network for health monitoring. *Biomedical Engineering and Informatics (BMEI)*. 4: 2183 - 2186.
- Skorin-Kapov, L. y 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: 1 - 18.
- Supriyanto, E., Satria, H., Mulyadi, I. H. y Putra, E. H. (2009) A novel low cost telemedicine system using wireless MESH network. *3rd SEATUC Symposium Proceeding*. 382 - 388.
- Ullah, S., Khan, P., Ullah, N. y Kwak, K. S. (2010) MAC-Bridging for Multi-PHYs Communication in BAN. *Sensors*. 10: 9919 - 9934.
- Vergados, D. (2007) Simulation and Modeling Bandwidth Control in Wireless Healthcare Information Systems. *SIMULATION, Society for Computer Simulation International*. 83(4): 347 - 364.
- Vouyioukas, D., Maglogiannis, I. y Komnakos, D. (2007) Emergency m-Health Services through High-Speed 3G Systems: Simulation and Performance Evaluation. *SIMULATION The Society for Modeling and Simulation International*. 83(4): 329 - 345.
- Yu, B., Yang, L. y Chong, C. (2010) ECG Monitoring over Bluetooth: Data Compression and Transmission. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. 1 - 5.
- Zayani, M., Gauthier, V. y Zeglache, D. (2011) A joint model for IEEE 802.15.4 physical and medium access control layers. *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International*. 814 - 819.
- Zhai, H., Kwon, Y. y Fang, Y. (2004) Performance analysis of the IEEE 802.11 MAC protocols in wireless LANs. *Wiley Wireless Communications and Mobile Computing*. 4: 917 - 931.

Zhang, Y.y Xiao,H. (2009) Bluetooth-Based Sensor Networks for Remotely Monitoring the Physiological Signals of a Patient. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*. 13(6): 1040 - 1048.