

**EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CAPA  
CRUZADA PARA EL MANEJO EFICIENTE DE  
ENERGÍA EN REDES INALÁMBRICAS DE  
ÁREA CORPORAL APLICADAS EN  
TELEMEDICINA**

**JUAN CAMILO CORREA CHICA**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN TELECOMUNICACIONES APLICADAS,  
GITA**

**DIRECTORA: NATALIA GAVIRIA GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA**

**MEDELLÍN**



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

1803

**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES**



**Trabajo de Investigación**

**EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CAPA CRUZADA PARA EL  
MANEJO EFICIENTE DE ENERGÍA EN REDES INALÁMBRICAS DE  
ÁREA CORPORAL APLICADAS EN TELEMEDICINA**

Autor

**JUAN CAMILO CORREA CHICA**

Directora

**NATALIA GAVIRIA GÓMEZ**

Medellín, Colombia

2015

## CONTENIDO

1. Introducción .....	5
1.1 Planteamiento del problema .....	9
1.2 Objetivos .....	10
1.2.1 Objetivo General .....	10
1.2.2 Objetivos Específicos.....	10
1.3 Estructura de la tesis .....	11
2. Marco teórico del trabajo de investigación .....	12
2.1 Estándar de comunicación IEEE802.15.4 .....	12
2.2 Estrategias de Capa Cruzada (Cross-layer) .....	15
2.3 Consumo de energía y QoS en WBAN.....	18
2.3.1 Calidad de Servicio (QoS) en WBAN .....	18
2.3.2 Fuentes de pérdidas y manejo ineficiente de energía en WBAN.....	20
2.4 Caracterización del canal y modelo de movilidad del cuerpo humano para WBAN.....	23
2.5 Revisión de estrategias de capa cruzada para WBAN .....	31
2.6 Trabajo futuro en el diseño de capa cruzada.....	39
3. Escogencia de la estrategia de capa cruzada y planteamiento del experimento .....	42
3.1 Análisis de aportes y falencias de las estrategias de capa cruzada.....	42
3.2 Simulador OMNeT++ para WBAN .....	45
3.2.1 Frameworks de OMNeT++ para redes inalámbricas de bajo consumo .....	48
3.3 Canal y modelo de movilidad para WBAN .....	49
3.4 Estrategias de capa cruzada candidatas para la comparación.....	54
3.5 Elección de la estrategia para la comparación.....	61
3.5.1 Implementación en el simulador de la estrategia de capa cruzada seleccionada .....	61
3.6 Planteamiento del experimento .....	70
3.6.1 Unidad experimental.....	71
3.6.2 Factores .....	71
3.6.3 Variables respuesta .....	72
3.6.4 Tratamientos .....	74
3.6.5 Número de réplicas y aleatorización de los tratamientos .....	74
3.7 Hipótesis preliminares del experimento .....	75

3.8 Configuración de las simulaciones en OMNeT++ .....	76
4. Resultados .....	79
4.1 Capa cruzada - IEEE802.15.4 Unslotted .....	80
4.1.1 Latencia Extremo a Extremo .....	80
4.1.2 Tasa de Pérdida de Paquetes .....	85
4.1.3 Goodput .....	87
4.1.4 Consumo de energía .....	89
4.2 Capa cruzada - IEEE802.15.4 Slotted.....	92
4.2.1 Latencia Extremo a Extremo .....	92
4.2.2 Tasa de Pérdida de Paquetes .....	94
4.2.3 Goodput .....	97
4.2.4 Consumo de energía .....	100
4.3 Potencia de transmisión.....	102
5. Conclusiones.....	106
Apéndice A: Implementación del protocolo de capa cruzada en el simulador OMNeT++ .....	108
Referencias.....	133

# Figuras

---

Figura 1. Modos No Ranurado y Ranurado del protocolo CSMA/CA .....	14
Figura 2. Estructura de súper-trama del protocolo CSMA/CA .....	15
Figura 3. Diseños de capa cruzada .....	18
Figura 4. Interacciones de capa cruzada .....	18
Figura 5. Cálculo de posiciones en .....	25
Figura 6. Topología implementada para evaluar el protocolo CICADA .....	33
Figura 7. Modelo de red en OMNeT++ .....	48
Figura 8. MAC, PHY y Canal Inalámbrico .....	50
Figura 9. Configuración de los modelos de propagación (Analogue Models) en OMNeT++ .....	52
Figura 10. Estructura del modelo de movilidad MoBAN .....	53
Figura 11. Interfaz gráfica simulación WBAN con MoBAN.....	54
Figura 12. Estrategia de movilidad de Cicada .....	57
Figura 13. Estrategia de movilidad del protocolo de Nabi et. al.....	60
Figura 14. Solución al problema del protocolo de capa cruzada .....	70
Figura 15. Unidad experimental.....	71
Figura 16. WBAN conformada por 12 nodos .....	77
Figura 17. WBAN conformada por 5 nodos .....	77
Figura 18. Prueba de normalidad estadística variable Latencia Extremo a Extremo (Modo no ranurado).....	81
Figura 19. Prueba gráfica de normalidad variable Latencia Extremo a Extremo (Modo no ranurado) .....	81
Figura 20. Prueba estadística de homogeneidad de varianzas variable Latencia Extremo a Extremo (Modo no ranurado).....	82
Figura 21. Prueba gráfica de homogeneidad de varianzas e independencia variable Latencia Extremo a Extremo (Modo no ranurado).....	83
Figura 22. Tabla Análisis de Varianza ANOVA variable Latencia Extremo a Extremo (Modo no ranurado).....	83
Figura 23. Diagrama de cajas efecto Protocolo y Nodos en Latencia Extremo a Extremo .....	84
Figura 24. Gráfico de medias de Latencia Extremo a Extremo debido factores Protocolo y Nodos. 85	
Figura 25. Diagrama de cajas efecto Protocolo, Nodos y Tráfico en la Tasa de Pérdida de Paquetes .....	86
Figura 26. Gráfico de medias de la Tasa de Pérdida de Paquetes respecto a los factores .....	87
Figura 27. Interacciones entre los factores con respecto a la variable respuesta Tasa de Pérdida de Paquetes.....	87
Figura 28. Diagrama de cajas efecto Protocolo, Nodos y Tráfico en el Goodput .....	88
Figura 29. Gráfico de medias de Goodput respecto a los factores .....	89
Figura 30. Diagrama de cajas efecto Protocolo, Nodos y Tráfico en el Consumo de Energía .....	91
Figura 31. Gráfico de medias del Consumo de Energía respecto a los factores .....	91

Figura 32. Interacción factores Protocolo y Nodos en el Consumo de Energía .....	92
Figura 33. Diagrama de cajas efecto Protocolo, Nodos y Tráfico en la Latencia Extremo a Extremo .....	93
Figura 34. Diferencia de medias de la Latencia Extremo a Extremo debida al factor Protocolo .....	94
Figura 35. Diagrama de cajas efecto Protocolo, Nodos y Tráfico en la Tasa de Pérdida de Paquetes .....	95
Figura 36. Gráfico de medias de la Tasa de Pérdida de Paquetes respecto a los factores .....	96
Figura 37. Interacciones entre los pares Protocolo-Tráfico y Protocolo-Nodos .....	97
Figura 38. Diagrama de cajas efecto Protocolo, Nodos y Tráfico en el Goodput .....	98
Figura 39. Diferencia de medias para el Goodput debido a los factores del experimento .....	99
Figura 40. Interacciones entre los pares Tráfico-Nodos, Protocolo-Tráfico y Protocolo-Nodos para la variable respuesta Goodput .....	99
Figura 41. Diagrama de cajas efecto Protocolo, Nodos y Tráfico en el Consumo de Energía .....	101
Figura 42. Gráfico de medias del Consumo de Energía respecto a los factores .....	101
Figura 43. Interacciones entre los pares Tráfico-Nodos, Protocolo-Tráfico y Protocolo-Nodos para la variable respuesta Consumo de Energía .....	102
Figura 44. Potencia de transmisión WBAN 5 nodos y transmisiones cada 30 segundos.....	103
Figura 45. Potencia de transmisión WBAN 5 nodos y transmisiones cada 5 minutos.....	103
Figura 46. Potencia de transmisión WBAN 12 nodos y transmisiones cada 30 segundos.....	104
Figura 47. Potencia de transmisión WBAN 12 nodos y transmisiones cada 5 minutos.....	104

# Tablas

---

Tabla 1. Tabla resumen requerimientos QoS discriminados por capas.....	20
Tabla 2. Comparación entre topología estrella y topología multi-salto respecto a algunas características en WBAN .....	23
Tabla 3. Parámetros de pérdida por trayectoria hallados en [24] .....	28
Tabla 4. Parámetros mean delay excess y rms delay spread hallados en [24] .....	28
Tabla 5. Parámetros caracterización del canal en distintos escenarios y partes del cuerpo .....	29
Tabla 6. Parámetros para la caracterización del canal hallados en [25] .....	30
Tabla 7. Reducción de latencia en la entrega de paquetes usando WASP .....	32
Tabla 8. Energía promedio remanente en la red en [29] .....	36
Tabla 9. Niveles de potencia de transmisión y consumo de corriente en la batería de los módulos CC2420 .....	66
Tabla 10. Factores del experimento.....	72
Tabla 11. Tratamientos del experimento .....	74
Tabla 12. Orden de las réplicas de los tratamientos .....	75
Tabla 13. Configuraciones generales de los modelos de simulación .....	78
Tabla 14. Resultados para Latencia Extremo a Extremo (Modo no ranurado) .....	80
Tabla 15. Resultados para Tasa de Pérdida de Paquetes (Modo no ranurado) .....	85
Tabla 16. Resultados para Goodput (Modo no ranurado) .....	88
Tabla 17. Resultados para Consumo de energía (Modo no ranurado) .....	90
Tabla 18. Resultados para Latencia Extremo a Extremo (Modo ranurado) .....	93
Tabla 19. Resultados para Tasa de Pérdida de Paquetes (Modo ranurado) .....	95
Tabla 20. Resultados para Goodput (Modo ranurado) .....	97
Tabla 21. Resultados para Consumo de energía (Modo ranurado) .....	100

# 1. Introducción

---

Las redes inalámbricas de sensores, en general, están sujetas a un conjunto de restricciones de funcionamiento debido a la alta complejidad de las aplicaciones para las que están diseñadas y los escasos recursos con los que cuenta cada nodo sensor. Las redes inalámbricas de área corporal (WBAN, por sus siglas en inglés) son un sub-conjunto particular dentro de las redes inalámbricas de sensores (WSN, por sus siglas en inglés), su particularidad se debe al contexto en el que son aplicadas, monitoreo de signos vitales y el espacio donde deben ser instalados los nodos, el cuerpo humano. Habiendo mencionado lo anterior cabe resaltar que a pesar de contar con las mismas restricciones y demandas que las redes de sensores convencionales, este tipo de redes acrecientan esas necesidades y propician la aparición de otras nuevas; por ejemplo un nodo que está instalado en un árbol y envía señales que registran cuándo llueve, es diferente de un nodo instalado al interior de un paciente que lo usa para transmitir señales que contienen información acerca de su enfermedad o condición de salud. Los datos de una red inalámbrica cualquiera no tienen la misma importancia ni la misma urgencia de ser transmitidos que los que registra una WBAN, ni los sensores tienen la misma necesidad de manejo eficiente y autónomo de la batería.

De modo que las WBAN, además de ser redes inalámbricas de sensores, están sujetas a restricciones adicionales de funcionamiento; dicho esto, los protocolos y esquemas de comunicación de otras redes (cableadas e inalámbricas) no están provistos entonces de las características necesarias para suplir tales restricciones. Es por esa razón que los diseñadores de protocolos están enfocando esfuerzos en el desarrollo de protocolos y estrategias de comunicación exclusivas para WBAN, muchas de ellas más orientadas en obtener beneficios y mejoras en el desempeño que en la capacidad de implementación. Es por ello que al día de hoy no hay evidencia de dispositivos electrónicos físicos que implementen WBAN; los sistemas de WBAN existentes se implementan usando tecnología de otros estándares, es el caso del IEEE802.15.4 que fue diseñado para redes inalámbricas de área personal (WPAN) y desde luego las comparaciones y evaluaciones que se hacen entre protocolos diseñados y protocolos adaptados para WBAN tienen que ser realizadas a través de modelos de simulación, programas lineales, heurísticas y modelos predictivos en general.

A pesar de que se han hecho esfuerzos en materia de diseño de protocolos específicos para WBAN, muchos de estos protocolos al estar orientados en la satisfacción de alguna métrica en particular y no de suplir como tal el balance entre consumo de energía y métricas de calidad de servicio, se quedan cortos para ser implementados en un dispositivo real, ya que al ser evaluados y contrastados se puede evidenciar que solo reflejan un desempeño óptimo en escenarios particulares y con parámetros de funcionamiento determinados. En este

contexto toma entonces relevancia contrastar esas nuevas estrategias con las implementaciones reales y en escenarios que de verdad reten y obliguen a que se pueda apreciar todo el potencial que estos nuevos diseños pueden ofrecer.

## **1.1 Planteamiento del problema**

Avances recientes en redes inalámbricas de sensores (WSN) y computación ubicua han revelado un amplio espectro de aplicación de dichas tecnologías en ambientes hospitalarios y/o de atención médica, particularmente en escenarios de atención médica domiciliaria y vigilancia remota de enfermedades y signos vitales. Es importante dar a entender que en los escenarios que se mencionaron anteriormente los nodos (sensores) que componen las redes inalámbricas se instalan en (o al interior) del cuerpo humano, dando lugar a nueva noción en el campo de las redes inalámbricas de sensores: las redes inalámbricas de sensores de área corporal (WBAN). Las WBAN traen enormes posibilidades y beneficios para la implementación de estrategias de vigilancia remota de pacientes, entre los que se destaca mejorar la calidad de vida del paciente ya que puede recibir tratamiento en la comodidad de su propio hogar.

Inicialmente, se podría pensar que las WBAN acarrearán las mismas limitaciones energéticas, de procesamiento y despliegue con las que cuentan las WSN, y a pesar de estar en lo correcto esta concepción se queda corta ya que no debe olvidarse que las WBAN se instalan en el cuerpo humano. Por tanto, limitaciones como el consumo de potencia, el control de la potencia a la que pueden irradiar los transmisores inalámbricos y los efectos derivados del canal de transmisión (los músculos y tejidos humanos en este caso) se ven maximizados en escenarios de WBAN; por ejemplo, las baterías en un sensor implantado deben durar lo suficiente como para que no sea necesario reemplazarlas en un periodo de tiempo bastante largo.

Además, es necesario evitar que los dispositivos que conforman los sensores inalámbricos puedan inducir calentamiento o excesiva radiación electromagnética a la zona del cuerpo donde estén instalados. La información que se genera y almacena en un escenario de hospitalización domiciliaria puede ser bastante crítica e inclusive de ella puede depender la vida de un paciente, luego es necesario que las métricas de calidad de servicio (QoS) se mantengan en niveles altos para un adecuado manejo y transmisión de ese tipo de información. Las baterías de los nodos deben ser pequeñas en su geometría ya que la experiencia de un paciente va a depender de la comodidad que le represente llevar instalados los sensores, una limitación de esta naturaleza podría afectar la capacidad de almacenamiento de energía de las baterías. Caracterizaciones del canal inalámbrico constituido por el cuerpo humano han evidenciado que éste induce pérdidas en las transmisiones a baja potencia debido a efectos de reflexión, ensombrecimiento y desvanecimiento de la señal.

Las aplicaciones para WBAN que se han desarrollado hasta la fecha han recurrido al uso del estándar para redes inalámbricas de área personal (WPAN) IEEE802.15.4. Este estándar define las capas física y de acceso al medio para dispositivos de comunicación inalámbrica de bajo consumo de potencia y baja tasa de transmisión de datos. Con el fin de alcanzar un balance aceptable entre consumo de energía (potencia) y satisfacción de los niveles de calidad de servicio que requieren las WBAN, muchos trabajos en el estado del arte se han encargado de profundizar en el mejoramiento del funcionamiento del IEEE802.15.4, en sus dos modos (Slotted y Un-slotted) mientras que otras investigaciones se han enfocado en el desarrollo de nuevas concepciones y modelos de comunicación que permitan explotar nuevas dinámicas y características que contribuyan a mejores resultados en el proceso de alcanzar dicho balance entre consumo de energía y calidad de servicio.

Dentro de esas nuevas investigaciones se encuentran los protocolos de capa cruzada, que proponen abandonar el modelo actual de protocolos con capas que se comunican entre ellas basadas en un orden jerárquico. Luego estas estrategias permiten que capas no adyacentes del modelo de comunicación puedan compartir información y de ese modo reducir los efectos de algunas fuentes de consumo energía en transmisiones (ejem: sobre-escucha, retransmisiones, sobre-encabezamiento, colisiones, etc) y mejorar en métricas de calidad de servicio como la pérdida de paquetes (packet delivery ratio), el retraso extremo a extremo (end to end delay) y el rendimiento en la transmisión de datos (throughput y goodput).

Por tanto, para desarrollar aplicaciones de WBAN orientadas a escenarios de vigilancia remota y atención domiciliaria, se cuenta tanto con el estándar IEEE802.15.4 y con protocolos de capa cruzada. Con este proyecto se busca hacer un experimento a partir de una simulación de modo que los resultados que se obtengan permitan realizar una comparación justa entre el estándar IEEE802.15.4 y una estrategia de capa cruzada en un escenario con características similares a las de una WBAN en un ambiente de atención domiciliaria con una caracterización del canal y un modelo de movilidad adecuados.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Evaluar el desempeño en consumo de energía y satisfacción de métricas de calidad de servicio de una estrategia de capa cruzada en el entorno de una red inalámbrica de área corporal -WBAN- (teniendo en cuenta movilidad de la red y caracterización del canal), mediante una comparación justa y objetiva con respecto al desempeño del protocolo IEEE802.15.4 en el mismo entorno.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

1. Definir requerimientos para una red inalámbrica de área corporal en términos de calidad de servicio y consumo de energía.

2. Revisar y analizar estrategias de capa cruzada para WBAN y seleccionar para la simulación y comparación una que se satisfaga la mayor cantidad de requerimientos de calidad de servicio y ofrezca el mejor desempeño en cuanto a consumo de energía.
3. Especificar las características de movilidad, caracterización del canal y métricas de calidad de servicio a satisfacer para un escenario de prueba (simulación) para las estrategias de comunicación.
4. Escoger un simulador y simular las estrategias bajo los parámetros y características del escenario de prueba.
5. Con los resultados de la simulación realizar un estudio comparativo entre la estrategia de capa cruzada y el estándar IEEE802.15.4, en términos del consumo de energía y la satisfacción de las métricas de QoS seleccionadas.

### **1.3 Estructura de la tesis**

En el capítulo 2 se describen los protocolos del estándar IEEE802.15.4 y el protocolo de capa cruzada, se agrega una breve revisión del estado del arte de protocolos de capa cruzada para WBAN y además se describen modelos para la movilidad de los nodos en las WBAN y la caracterización del canal para la propagación inalámbrica en el cuerpo humano.

En el capítulo 3 se discuten las estrategias de capa cruzada y se escoge una estrategia para comparar su desempeño con el de los protocolos del estándar IEEE802.15.4. También se describe el experimento que se lleva a cabo para hacer la comparación y el desarrollo de la simulación en el simulador de eventos discretos.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos al realizar los experimentos, adicionalmente se interpretan los resultados y se presentan conclusiones preliminares a partir de las observaciones realizadas.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas en el trabajo de investigación.

# 2. Marco teórico del trabajo de investigación

---

## 2.1 Estándar de comunicación IEEE802.15.4 [1, 2]

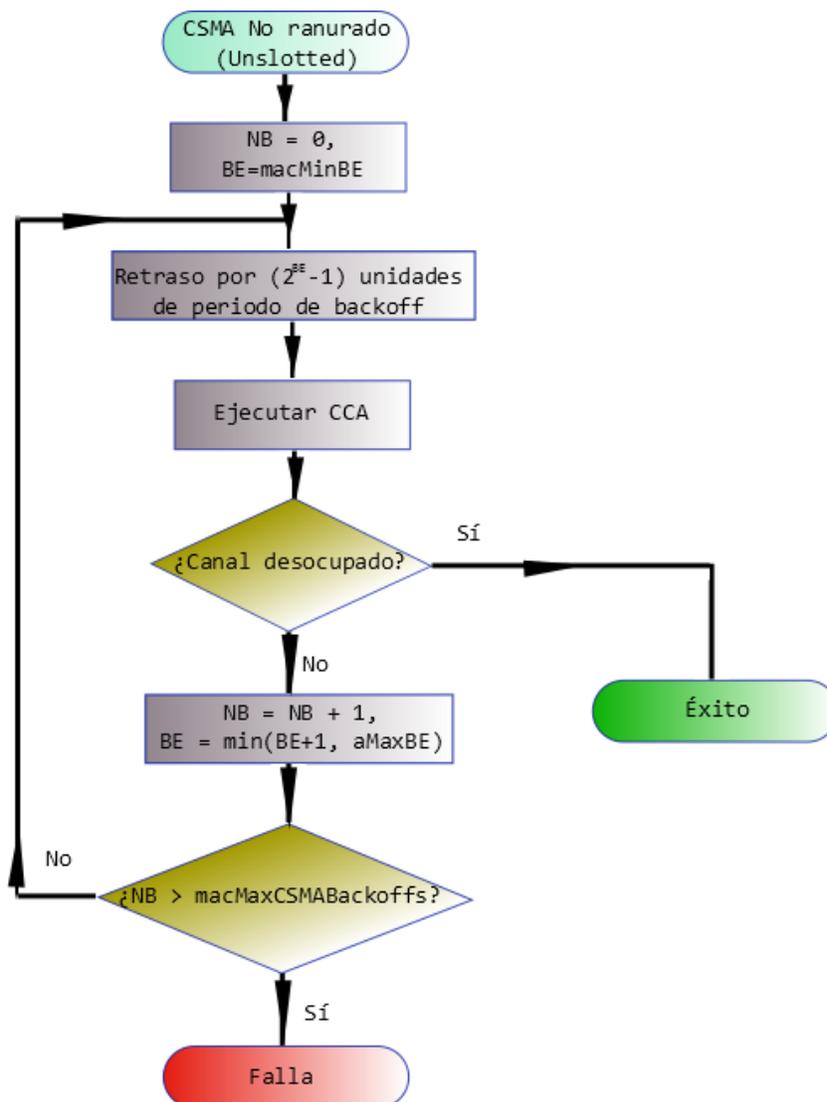
IEEE802.15.4 es un estándar para la conectividad entre dispositivos de baja complejidad, bajo costo, bajo consumo de energía y baja tasa de datos en redes inalámbricas de área personal (WPAN). En las redes WPAN existen 2 tipos de topologías: estrella y punto a punto. En la topología estrella, uno de los dispositivos de la red se encarga de controlar todas las comunicaciones entre los dispositivos que hacen parte de la red, mientras que en la topología punto a punto cualquier dispositivo puede comunicarse con otro que se encuentre en su rango de alcance sin necesidad de un controlador central.

Este estándar se encarga de especificar las capas física (PHY) y de acceso al medio (MAC) para las WPAN. En la capa física el estándar define mecanismos para la activación y desactivación de los transceptores, la detección del nivel de energía del canal, indicar la calidad de enlace de los paquetes recibidos, ejecutar el Clear Channel Assessment (CCA) para el protocolo CSMA/CA, seleccionar la frecuencia del canal y realizar la transmisión y recepción de datos. Para que un dispositivo cumpla con el estándar debe operar en una de las siguientes bandas del espectro electromagnético: 2.4GHz, 915MHz y 868MHz. La banda de 2.4GHz consiste de 16 canales con una tasa de datos de 250kbps y modulación ortogonal en cuadratura OQPSK. La banda de 915MHz utilizada en U.S.A. y Canadá tiene 10 canales a 40kbps y modula usando BPSK. La banda de 868MHz solo tiene un canal con una tasa de datos de 20kbps y modulación BPSK. Todas las bandas realizan las transmisiones utilizando la codificación de secuencia directa de espectro disperso con tasas de chip de 200, 600 y 300 kcps respectivamente.

La capa de acceso al medio (MAC) se encarga del acceso de los dispositivos al canal de comunicaciones, mantener un enlace confiable entre los dispositivos, sincronizar, asociar y desasociar los dispositivos y hacer uso de un mecanismo o protocolo de acceso al medio. Para el acceso al medio en WPAN se puede hacer uso de dos mecanismos, uno con beacons (beacon-enabled) y otro sin beacons (nonbeacon-enabled).

En el acceso al medio sin beacons (non-beacon enabled) los dispositivos emplean el protocolo CSMA/CA en el modo no ranurado (unslotted), en el cual los dispositivos escuchan el canal por un periodo de tiempo antes de realizar una transmisión, si encuentran el canal libre entonces transmiten, si lo encuentran ocupado vuelven a repetir la escucha para transmitir cuando el canal se encuentre libre de nuevo, un dispositivo puede notificarse de que ocurrió una colisión en su transmisión al no recibir un acuso de recibido (ACK) desde el dispositivo receptor.

Para el acceso al medio con beacons (beacon-enabled) se utiliza el protocolo CSMA/CA en el modo ranurado (slotted) (ver Figura 1) y es necesario un dispositivo coordinador que emita los beacons periódicamente para que mediante estos beacons se sincronicen los dispositivos de la red y se definan las ranuras (slots) de tiempo en las que los dispositivos pueden transmitir. En el modo ranurado de CSMA/CA se utiliza una estructura llamada súper-trama (ver Figura 2) que está limitada por los beacons que transmite el coordinador. Cada súper-trama está compuesta de una parte activa en la cual los nodos compiten por el canal en el periodo de acceso por contienda (CAP) o dependiendo de la aplicación pueden tener unas ranuras de tiempo garantizadas (GTS) en las que pueden transmitir sin necesidad de escuchar el canal ni competir con los demás dispositivos de la red, a ese periodo de ranuras garantizadas se le llama periodo libre de contienda (CFP). En la parte inactiva de la súper-trama los dispositivos pueden entrar en modo de bajo consumo para ahorrar energía.



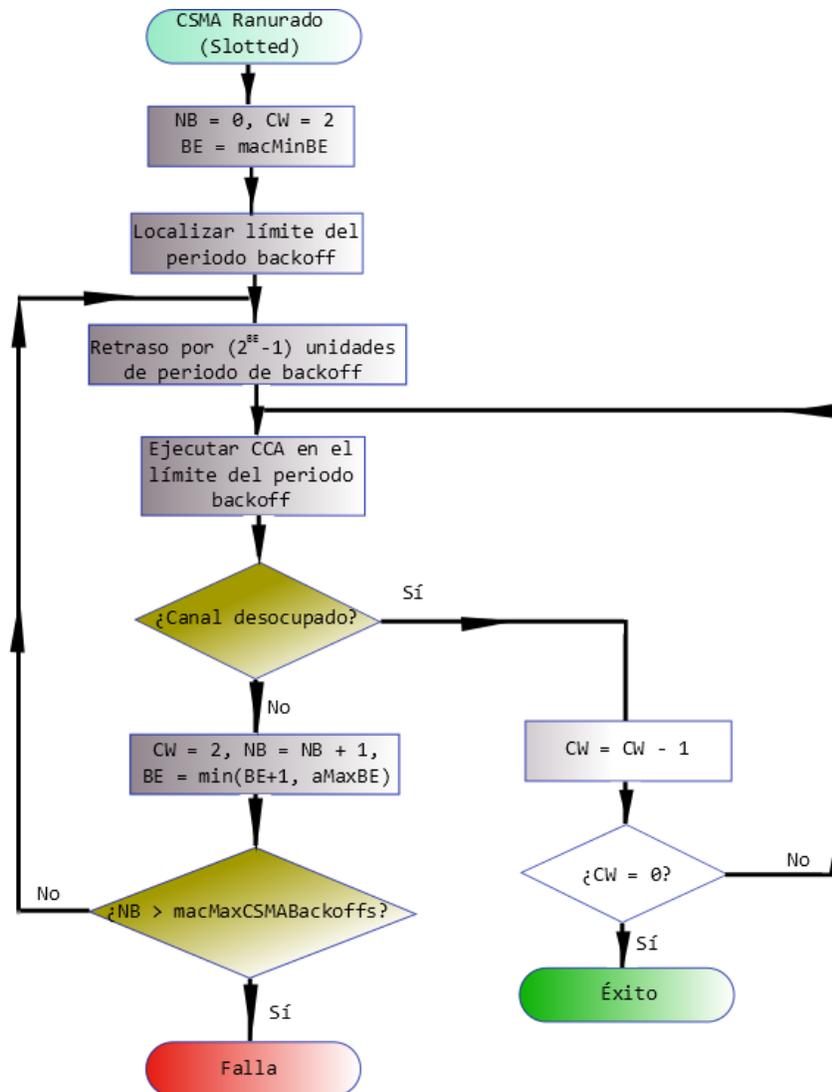


Figura 1. Modos No Ranurado y Ranurado del protocolo CSMA/CA [2]

El protocolo CSMA/CA en el modo no ranurado (unslotted) (ver Figura 1) empieza configurando los parámetros número de backoffs (NB) y exponente backoff (BE) en 0 y macMinBE respectivamente, de acuerdo al estándar el valor de macMinBE está en el rango de 0 a 3 con valor por defecto 3. Luego el dispositivo escoge un número aleatoriamente un número de periodos de backoff, del intervalo  $[0, 2^{BE}-1]$  que debe esperar antes de realizar un CCA, si el canal se encuentra libre entonces el dispositivo transmite. Si el canal no se encuentra libre entonces se debe realizar otro CCA cuando se termine el periodo de backoff, luego se incrementa NB y se incrementa BE, observando que BE no supere  $aMaxBE = 5$ . Un dispositivo realiza este procedimiento cada que encuentra el canal ocupado, pero solo lo hace hasta que el parámetro NB alcanza el valor macMaxCSMABackoff, que está en el rango de 0 a 5 con valor por defecto 4. Cuando NB

alcanza el límite se considera que la transmisión falló entonces el dispositivo debe comenzar una nueva transmisión.

En el modo beacon (beacon-enabled) el CSMA/CA se utiliza en el periodo CAP y os nodos solo pueden transmitir en los límites de un periodo de backoff, que es el tiempo requerido para transmitir 8 símbolos, luego  $aUnitBackoffPeriod = 8$  símbolos. A diferencia de en el modo no ranurado, los dispositivos realizan dos CCA uno para detectar el canal libre y otro antes de que la transmisión comience. Una ventana de contienda CW con valor 2 se configura de modo que cada que un CCA confirma que el canal está libre CW se decrementa en 1, cuando  $CW=0$  entonces la transmisión puede hacerse, de otro modo se debe esperar otro periodo de backoff.

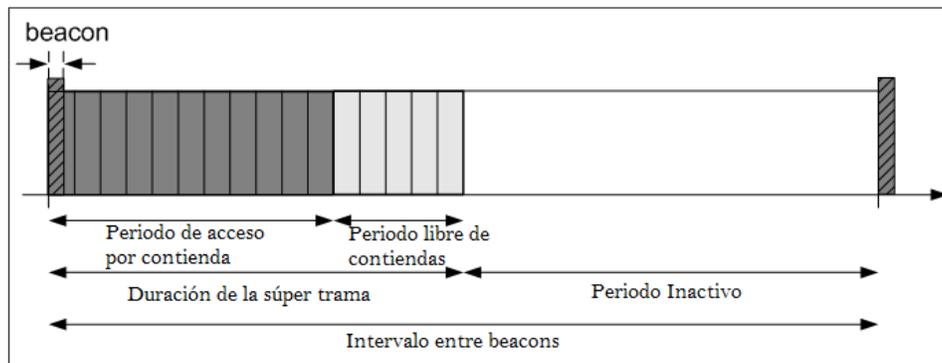


Figura 2. Estructura de súper-trama del protocolo CSMA/CA [1]

## 2.2 Estrategias de Capa Cruzada (Cross-layer) [3]

El diseño de capa cruzada se refiere al desarrollo de protocolos que permiten obtener mejor desempeño mediante el aprovechamiento de la dependencia entre los protocolos de las diferentes capas del modelo de comunicaciones; al contrario de los protocolos del modelo OSI que son independientes en cada capa. Es importante mencionar que una de las principales motivaciones para el diseño de capa cruzada se debe a la naturaleza de los enlaces en las redes inalámbricas de sensores. Los enlaces inalámbricos y en general el canal inalámbrico introduce problemas que no pueden manejarse adecuadamente con protocolos que no comparten información entre las distintas capas. También vale la pena anotar que los enlaces inalámbricos ofrecen nuevas oportunidades en las comunicaciones tales como el aprovechamiento oportunista del canal o la cooperación entre nodos pertenecientes a la red.

Se han identificado 4 situaciones que merecen atención con respecto al diseño de capa cruzada:

1. Existen definiciones variadas del concepto de capa cruzada, situación que al parecer se debe a que la investigación de capa cruzada es realizada independientemente por parte de investigadores que trabajan en distintos contextos y enfocados en capas distintas del modelo de comunicación, lo cual no permite una unificación adecuada del concepto de capa cruzada.
2. A pesar de que existen muchos diseños de capa cruzada propuestos en el estado del arte de redes inalámbricas, muchos de estos están basados en diseños previos de capa cruzada y conforme aparecen nuevos trabajos estos se enfocan en mejorar el desempeño de los diseños existentes, luego se deja de trabajar en problemas fundamentales que no han sido abordados directamente.
3. Existe un desbalance preocupante entre desempeño e implementación de diseños de capa cruzada. Existen muchos trabajos que proponen mejoras en las comunicaciones a partir de estrategias de capa cruzada pero no tienen en cuenta como esos diseños pueden implementar esas interacciones entre capas sin agregar complejidad extrema en el diseño general del sistema.
4. Falta encauzar mayores esfuerzos en las oportunidades y modalidades de comunicación que puede ofrecer el medio inalámbrico, de modo que los diseños de capa cruzada trasciendan el concepto de solo interacciones entre las capas.

Se considera que la definición más ajustada de diseño de capa cruzada corresponde a que este tipo de diseño se constituye como una alternativa para la construcción de protocolos del modelo de comunicación que se basan en la violación de un modelo de referencia, en general, el modelo OSI. Dicha violación permite la comunicación directa entre protocolos de diferentes capas, el paso de variables entre las capas y el alejamiento del concepto de capas organizadas en pilas.

A continuación se enumeran las principales propuestas para el diseño de capa cruzada:

Creación de nuevas interfaces: Nuevas interfaces entre capas son utilizadas para compartir información en tiempo de ejecución. Existen tres interacciones debidas a la creación de nuevas interfaces: 1) el flujo de información hacia arriba, se da cuando un protocolo de una capa superior necesita información de una capa inferior, entonces se implementa una interfaz desde la capa inferior en dirección a la capa superior; 2) el flujo de información hacia abajo, igual a la anterior solo que la interfaz se implementa desde la capa superior en dirección a la capa inferior; 3) flujo de información de ida y vuelta, se crean dos interfaces entre las capas que a la postre funcionan como un lazo cerrado de retroalimentación de parámetros entre las capas involucradas (ver Figura 3).

Mezcla de capas adyacentes: Esta propuesta consiste en la fusión de dos o más capas adyacentes de forma que los servicios proporcionados por la nueva súper-capa sean la unión de los servicios de las capas que la constituyen (ver Figura 3).

Diseño de acoplamiento sin necesidad de nuevas interfaces: Se acoplan dos o más capas en tiempo de diseño, es decir, si una de las capas se rediseña entonces las capas que hacen parte del acople se deben rediseñar también para que haya un desempeño adecuado de la arquitectura del sistema de comunicaciones en tiempo de ejecución (ver Figura 3).

Calibración vertical a través de capas: Se refiere a un ajuste de parámetros que se extiende a lo largo de las capas. Puede lograrse de dos formas: 1) una configuración de parámetros en todas las capas en tiempo de diseño con miras en la optimización de una métrica específica en tiempo de ejecución; 2) dinámicamente en tiempo de ejecución se puede implementar como una pila de capas flexible que responde y se ajusta a las variaciones de las condiciones de la red (tráfico, canal, etc.) (ver Figura 3).

Propuestas para la implementación de las interacciones de capa cruzada:

Comunicación directa entre capas: Consiste en hacer visibles las variables o la información de una capa con respecto a las otras en tiempo de ejecución, puede lograrse a través de los encabezados de los protocolos o la implementación de paquetes internos de extra-información entre capas (ver Figura 4).

Base de datos compartida a través de capas: Sugiere el almacenamiento y extracción de información desde una nueva interfaz o base de datos común a todas las capas, es necesario entonces diseñar interacciones e interfaces entre las capas y la base de datos (ver Figura 4).

Abstracción completamente nueva: Comprende modelos de organización de las capas distintos a la pila, se pueden aprovechar novedosas interacciones entre los bloques que conformen el nuevo modelo, pero este tipo de aproximaciones implican complejas implementaciones a nivel sistemático ya que los protocolos no interactúan según el modelo jerárquico que propone la pila (ver Figura 4).

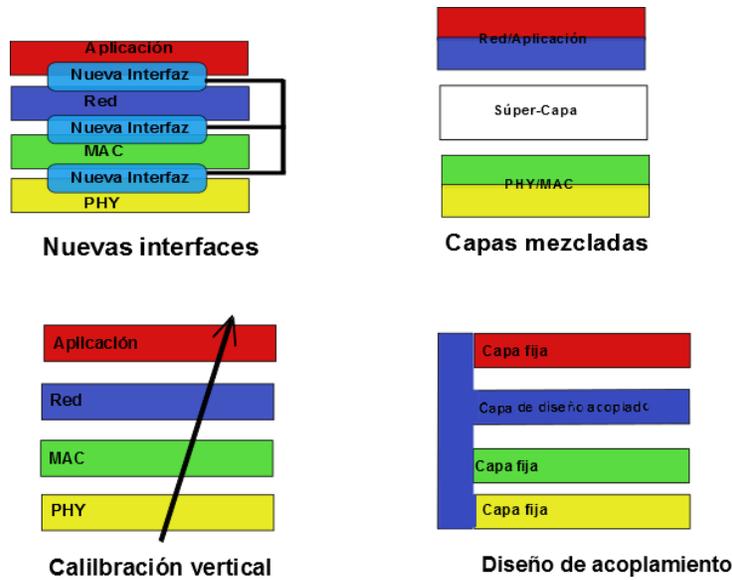


Figura 3. Diseños de capa cruzada [3]

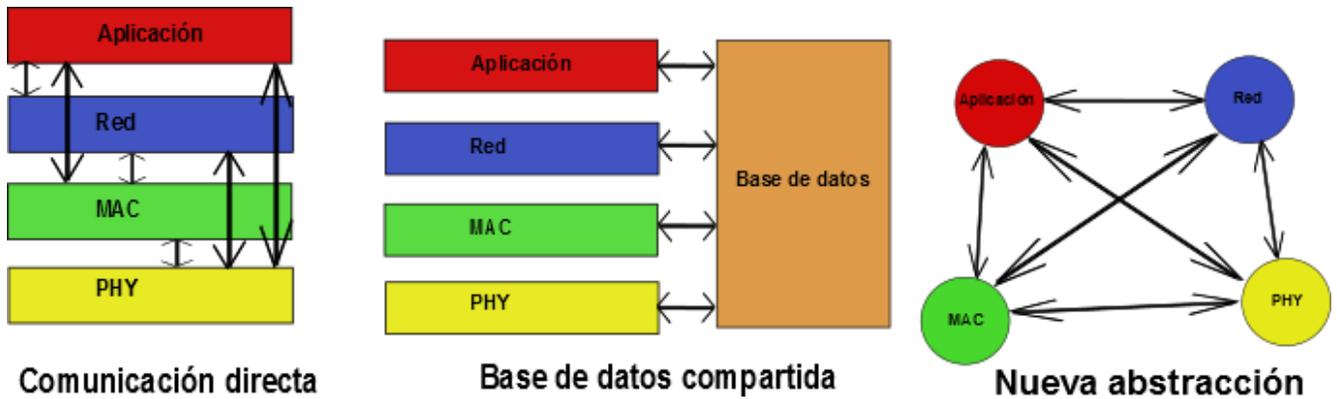


Figura 4. Interacciones de capa cruzada [3]

## 2.3 Consumo de energía y QoS en WBAN

### 2.3.1 Calidad de Servicio (QoS) en WBAN [4, 5, 6, 7, 8]

A continuación se hace una breve descripción de los principales requerimientos de calidad de servicio (QoS) en redes inalámbricas de área corporal (WBAN).

Conectividad de la red: Cada nodo debe tener conexión con el nodo coordinador de la WBAN en cualquier instante de tiempo, sea a través de un enlace directo o de saltos. No deben existir nodos aislados.

Tasa de entrega de paquetes: La pérdida de paquetes puede ser causada por fallas en el acceso al canal, colisiones entre paquetes, errores de transmisión debidos al ruido térmico y a interferencias externas. La tasa de entrega de paquetes para un nodo dado es la razón entre el número de paquetes recibidos exitosamente en el nodo central de la red con respecto al número de paquetes que envió dicho nodo.

Retraso extremo a extremo: Los paquetes deben ser entregados al nodo central en un tiempo establecido de acuerdo al tipo de aplicación de la red. El retraso extremo a extremo es la diferencia de tiempo entre el momento en que un paquete es enviado por un nodo hasta el momento en que llega al nodo central (por enlace directo o a través de saltos).

Mapeo de prioridades: A nivel de capa de enlace, es la clasificación de los servicios en clases diferentes de acuerdo a sus parámetros para facilitar su acceso al medio. Datos con más alta prioridad deben tener mayor oportunidad de acceder al medio y por el contrario los de menor prioridad menores chances de acceder al medio.

Asignación de recursos: Determina la cantidad de recursos, ancho de banda y tiempo que se le asigna al tráfico. Un esquema de QoS debe tener en cuenta los parámetros de QoS disponibles y los recursos de red disponibles durante la asignación de los recursos. Fijar y asignar los recursos sin tener en cuenta esas características, como en las redes tradicionales, puede gastar recursos del sistema y degradar el desempeño. Luego, durante la asignación de recursos se debe dar atención a la asignación dinámica y la óptima utilización de los recursos disponibles.

Control de admisión: El control de admisión QoS es el responsable de determinar la cantidad y los tipos de tráfico que serán admitidos en el sistema en forma tal que el QoS del tráfico nuevo y el existente no se vea degradado. El control de admisión QoS en WBAN debe admitir las solicitudes basándose en los parámetros QoS, energía disponible y la utilización de los recursos.

Control de errores: Los esquemas de control de errores se encargan de transmitir datos redundantes adicionales a los datos originales de manera que la consistencia de los datos enviados se pueda verificar y corregir.

Fiabilidad de transmisión: Esquemas adaptativos de retransmisión que trabajen en función de las características del canal y del nivel de QoS deben proporcionarse en WBAN.

Conciencia de la energía: La prioridad de transmisión debe tener en cuenta el nivel de energía de los nodos. Los nodos con recursos energéticos escasos deben permanecer mayor tiempo en modos de bajo consumo limitando al máximo la cantidad de participaciones en el proceso de comunicación de información (transmisiones y enrutamiento de datos de otros nodos).

Goodput: En general se define como el número de bits transmitidos exitosamente por unidad de tiempo (bits que salen de un nodo hacia el coordinador).

Eficiencia energética: A nivel de nodo y a nivel de red. Esta métrica debe conservarse de modo que se maximice el tiempo de vida de la red y que se llegue al nivel de servicio (duración de los nodos) que exige una aplicación de WBAN.

Tabla resumen requerimientos QoS discriminados por capas:

Capa	Requerimientos QoS
Aplicación	-Tiempo de vida del sistema -Tiempo de respuesta -Novedad de los datos -Fiabilidad de los datos
Transporte	-Fiabilidad -Ancho de banda -Latencia -Costo
Red	-Latencia de ruta -Mantenimiento del enrutamiento -Reducción de la probabilidad de congestión -Robustez del enrutamiento -Eficiencia energética
Enlace	-Rango de comunicación -Rendimiento -Fiabilidad de la transmisión -Eficiencia energética
Física	-Capacidades físicas para cumplir los requerimientos de QoS de las otras capas.

Tabla 1. Tabla resumen requerimientos QoS discriminados por capas

### 2.3.2 Fuentes de pérdidas y manejo ineficiente de energía en WBAN [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]

PHY:

-En la capa física los gastos energéticos más comunes se presentan cuando los transceptores conmutan entre los distintos modos de funcionamiento (idle, transmisión, recepción, bajo consumo).

-Esquemas de modulación y codificación ineficientes también agregan gasto energético extra en las transmisiones.

-La ganancia de las antenas se reduce por las pérdidas en los tejidos corporales.

-La comunicación directa (P2P) entre dos implantes resulta afectada por las pérdidas de trayectoria, luego es mejor utilizar estrategias donde exista un nodo central o un nodo que sirva de relevo en las transmisiones.

-Las pérdidas por trayectoria para varios tipos de antenas para comunicación on-body muestran que para la mayoría de posiciones de la antena y posturas corporales las antenas monopolo presentan las menores pérdidas. Sin embargo los monopolos de alambre delgado suelen dañarse fácilmente, por tanto para las bandas ISM y UWB se diseñan antenas en forma de botones.

-Las pérdidas por trayectoria varían conforme a los cambios en las posturas corporales.

-Generalmente en las redes inalámbricas se asume que la potencia de transmisión decrece en un factor  $d^n$ , donde  $d$  representa la distancia entre transmisor y receptor, y  $\eta$  es el coeficiente de pérdida por trayectoria (coeficiente de propagación), otras fuentes de desvanecimiento incluyen la pérdida por múltiples trayectorias, comúnmente en el aire  $\eta \approx 2$  (en el intervalo [3, 7] en el cuerpo humano) y el shadowing lognormal.

-Las ondas electromagnéticas se ven considerablemente atenuadas en los tejidos humanos antes de alcanzar el destino, ya que los tejidos están mayormente constituidos por agua.

-También se consideran como fuentes de atenuación en la comunicación entre sensores la forma del cuerpo, y el movimiento de las extremidades, se considera que la atenuación inducida por el movimiento de las extremidades supera los 30dB.

-Debido a las pérdidas por trayectoria se experimenta una mayor pérdida cuando la antena está muy cerca del cuerpo.

-Las transmisiones NLOS (sin línea de vista) no son posibles en el cuerpo humano ya que por lo general las ondas se difractan en el cuerpo y no lo atraviesan, por tanto se sugieren transmisiones en línea de vista (LOS) o transmisiones multi-salto. Las pérdidas en nodos ubicados en posiciones opuestas del cuerpo son las mayores.

-En la banda de 2.4Ghz la pérdida por trayectoria sigue un patrón de decrecimiento exponencial cerca del perímetro del cuerpo. La distribución Ricean se aplica para representar el desvanecimiento a pequeña escala en esta banda, mientras que el retardo de propagación se representa con una distribución normal.

-En los canales entre dos sensores implantados se observan pérdidas por trayectoria entre 35dB y 40dB mientras que en canal entre un implante y un nodo en la superficie del cuerpo exhibe pérdidas entre 47dB y 49dB.

-La rotación de los sensores, más específicamente de las antenas causa cambios en la dirección del patrón de radiación y en la polarización. Y poco espacio entre la antena y el cuerpo causa desajustes en la impedancia y la distorsión del patrón de radiación.

MAC:

-Fuentes principales de gasto energético en el acceso al medio: colisiones entre paquetes, escucha ociosa del canal, sobre-escucha de transmisiones dirigidas a otros nodos y sobre-encabezamiento de paquetes de control.

-Colisiones: Cuando más de un nodo transmite datos al mismo tiempo, luego los paquetes colisionados se deben retransmitir y se consume más energía.

-Escucha ociosa: Sucede en situaciones en las que los nodos terminan escuchando un canal sin transmisiones, esto puede deberse a una mala sincronización de la red o a un desajuste en los ciclos de trabajo de los nodos.

-Sobre-escucha: Los nodos gastan energía encendiendo sus circuitos de RF para escuchar transmisiones que no van dirigidas a ellos. Se debe a razones similares a las de la escucha ociosa.

Sobre-encabezamiento: Se aumenta el gasto energético al transmitir con frecuencia tramas que agregan muchos datos a sus encabezados.

-Ciclos de trabajo desajustados.

-El protocolo CSMA/CA tiene problemas de colisiones en redes de muchos nodos y con alto tráfico.

-En el protocolo TDMA los nodos necesitan energía extra para los periodos de sincronización, los sensores tienen que recibir periódicamente paquetes de control para sincronizar sus relojes.

-Agregar esquemas de seguridad en capa MAC agrega costos computacionales, de comunicación y de manejo, induciendo gasto energético extra.

En la tabla 2, tomada de [15], se puede observar una comparación entre el comportamiento del consumo de energía y de algunas características de funcionamiento de las WBAN dependiendo de la topología de la WBAN, en este caso topología estrella y topología multi-salto.

<b>Criterio de comparación</b>	<b>Topología estrella</b>	<b>Topología multi-salto</b>
Consumo de energía	Los nodos más cercanos al coordinador requieren consumir menos potencia en las transmisiones que los nodos que	Los nodos más cercanos al coordinador son los que más potencia consumen ya que éstos además de transmitir su

	están más lejanos.	propia información deben retransmitir también la de otros nodos.
Retraso en transmisión	El retraso en transmisiones es inferior al de otras topologías ya que hay un solo salto entre nodo y coordinador.	Depende de la configuración de la red (número de saltos), las transmisiones de los nodos más cercanos al coordinador experimentan menos retrasos que las de los nodos que están a varios saltos del coordinador.
Interferencia	La interferencia que experimentan los nodos que están más alejados del coordinador es mayor ya que tienen que transmitir a mayor potencia.	Como los nodos transmiten a los vecinos más cercanos entonces mantienen los niveles de potencia bajos de modo que mitigan los efectos de la interferencia.
Falla de nodos y movilidad	Los nodos que experimentan desconexión debido a la movilidad son los únicos afectados y no comprometen las transmisiones de otros nodos.	Cuando un nodo falla puede hacer que los nodos de la zona donde está ubicado fallen, por tanto se necesita un mecanismo de reconfiguración de la red. Induce sobre-encabezamiento.

Tabla 2. Comparación entre topología estrella y topología multi-salto respecto a algunas características en WBAN [15]

## 2.4 Caracterización del canal y modelo de movilidad del cuerpo humano para WBAN

En el diseño de protocolos para WBAN, tanto bajo la metodología de diseño de capa cruzada como IEEE802.15.4 u otros estándares de comunicaciones para redes inalámbricas de sensores es común observar con frecuencia como los diseñadores se enfocan en alcanzar mejoras en el desempeño con respecto a protocolos existentes más que en la implementación y en las posibles efectos debidos a factores externos no contemplados con rigurosidad que en un escenario hipotético de implementación real podrían arrojar resultados completamente distintos a los que se proponía alcanzar al momento del diseño.

Otra situación que se observa en repetidas ocasiones es como los investigadores en aras de comprobar a satisfacción los beneficios y mejoras que ofrecen sus diseños evitan hacer simulaciones o implementaciones en escenarios consecuentes con el medio al que está enfocada la red, de modo que el desempeño de su diseño no se vea degradado.

Es inminente tener en cuenta este tipo de situaciones cuando el diseño de un protocolo está enmarcado en el entorno de las WBAN, ya que como se ha mencionado anteriormente las WBAN funcionan en el cuerpo humano, las transmisiones se realizan en un canal que poco se ha caracterizado y cuyos efectos en las transmisiones no son fijos sino que varían continuamente debido a las dinámicas a las que está sometida la red cuando está instalada en una persona, movimientos (lentos y rápidos), diferentes texturas corporales de una persona a otra, características corporales propias de cada individuo, etc. Lo mencionado anteriormente arroja como conclusión que para verificar o comparar el desempeño de un protocolo orientado a WBAN es necesario recurrir a una caracterización adecuada de un canal inalámbrico sometido a interferencias, pérdidas, desvanecimientos y reflexiones inducidos por el cuerpo de la persona que porta la red. Y además se debe apropiarse un modelo de movilidad del cuerpo humano que aporte esa variación continua en las condiciones del canal y que al mismo tiempo garantice que una futura implementación del diseño no se va a ver afectada por las actividades cotidianas de quien la porta y que portar la red no se va a convertir en un símbolo de incomodidad e inestabilidad.

A continuación se contextualizan algunos trabajos que ofrecen aportes en ambos aspectos, la caracterización del canal inalámbrico en el cuerpo humano y el modelo de movilidad del cuerpo humano para WBAN.

Los modelos revisados con mayor frecuencia por los investigadores para modelar la movilidad en WBAN son Reference Point Group Mobility Model (RPGM) [16], Random Waypoint Mobility Model (RWPM) [17], Random Walk Mobility Model (RWMM) [18], Random Gauss Markov Model (RGMM), Random Direction Mobility Model (RDMM) [19], algunos modelos comportamentales de especies y partículas (bandadas de pájaros, dispersión de partículas), entre otros.

En [20], se presenta un framework de movilidad para redes WBAN llamado MoBAN, que fue diseñado para funcionar sobre el software de simulación de redes OMNeT++ [21]. En este trabajo se asevera que la calidad del canal y el nivel de conectividad entre los nodos depende de manera directa de la movilidad de los nodos que componen la red y que simular un protocolo para WBAN que no cuente con un modelo adecuado de movilidad no es lo más pertinente para proponer soluciones a problemas de las WBAN tales como el consumo eficiente de energía. MoBAN está diseñado a partir de dos premisas principales que son: 1) El movimiento a nivel local del nodo y 2) El movimiento colectivo de la WBAN como un todo y que influye significativamente el movimiento individual de los nodos.

MoBAN está construido a partir de dos unidades de control básicas que son el selector de postura y un módulo de movimiento global. Cuando el selector de postura selecciona una postura estable entonces se espera que se agote el tiempo en esa posición y se selecciona una nueva posición, en cambio si la postura es dinámica se espera hasta que el movimiento de la postura alcance un punto de destino a una velocidad que va a depender del escenario y

del tipo de movimiento y así iterativamente se siguen seleccionando y ejecutando las posiciones.

Para modelar el movimiento local de los nodos, MoBAN aprovecha el modelo RWMM y modela el movimiento como un vector que visita un punto en una esfera de movimiento a una velocidad determinada. La estrategia de selección de posturas queda en manos de un modelo de transiciones en cadenas de Markov, entonces con la ayuda de una matriz de probabilidad de transiciones se define la postura siguiente. Para la movilidad de grupo MoBAN se basa en el modelo RPGM donde un centro lógico (por lo general el nodo central de la red) lidera el movimiento de toda la WBAN.

Un modelo para calcular las distancias de los nodos hacia el nodo central (coordinador) en escenarios de movilidad humana se detalla en [22] y al igual que MoBAN es modelado a partir de 2 fases básicas, una fase de selección de postura y una segunda fase de movimiento de los nodos. Entonces a partir de una probabilidad, obtenida a partir de trazas reales de cambios de postura en humanos, se selecciona una postura de entre un conjunto de posturas y de acuerdo a la postura se ajusta la posición individual de los nodos.

Para las diferentes posturas corporales se calcula la distancia de un nodo ubicado en el codo y un nodo ubicado en la rodilla con respecto al nodo central ubicado en el pecho. La posición normal de un nodo se caracteriza por una terna  $P(\rho, \theta, \phi)$ , que representa la distancia normal al nodo central y los ángulos polar y azimutal respectivamente. La Figura 5 condensa las formulas para los cálculos de las posiciones para diferentes posturas.

### Posiciones: Sentado y acostado

$$\rho_e(t) = \rho_e(t-1) + (\eta_e \times rand(1) \times \zeta_e).$$

$$\eta_e = \begin{cases} [-1 \ 0] & \text{if } \rho_e(t) = \rho_{emax}, \\ [0 \ 1] & \text{if } \rho_e(t) = \rho_{emin}, \\ [-1 \ 1] & \text{if } \rho_{emin} < \rho_e(t) < \rho_{emax}. \end{cases}$$

### Posiciones: Caminando y corriendo

$$\rho_s(t) = \rho_o + tu.$$

$$\rho_e(t) = \rho_e + \eta_e d_e.$$

$$d_e = \rho_e^{front} - \rho_e = \rho_e^{back} - \rho_e.$$

Figura 5. Cálculo de posiciones en [22]

$\rho_e(t)$  es la posición del nodo (codo o rodilla) en cualquier instante de tiempo, en las posiciones sentado y acostado depende de la posición anterior,  $\eta_e$ , que controla el acercamiento o alejamiento del nodo con respecto al nodo central.  $\zeta_e$  es un tamaño de paso que cambia de acuerdo al escenario de aplicación. En las posiciones caminando y corriendo se calcula la posición del nodo central  $\rho_s$  de acuerdo a la posición inicial  $\rho_o$  y a la velocidad  $\mu$  de movimiento, luego la posición de los nodos se calcula teniendo en cuenta el centro de la curvatura  $\rho_e$  que caracteriza el movimiento y los puntos máximos del movimiento hacia adelante o hacia atrás de ese nodo en particular.

En [23] identifican las siguientes características de los patrones de movilidad en WBAN:

- 1) Los nodos instalados en un paciente se consideran como un todo y la movilidad global de ese todo se puede representar con un modelo aleatorio de Gauss-Markov.
- 2) El modelo de movilidad debe restringir el rango de movimiento de los nodos con respecto a un centro lógico (nodo central).
- 3) Como los movimientos de las extremidades exhiben patrones repetitivos con respecto al centro lógico, entonces un modelo estocástico debería usarse para modelar ese tipo de repetición.
- 4) Correlaciones entre movimientos de extremidades se ignoran por su dificultad para ser modeladas correctamente.
- 5) La movilidad de las WBAN presenta una aleatoriedad restringida ya que la mayoría de los movimientos son arbitrarios e irregulares en la vida cotidiana.

El modelo está fundamentado a partir de dos de los modelos citados anteriormente, el RGMM para modelar el movimiento de la WBAN completa y el RPGM apoyado en un algoritmo a partir del movimiento colectivo de pájaros e insectos ayuda a modelar el movimiento individual de los nodos.

Luego son calculadas la velocidad y la dirección de la movilidad de grupo con las siguientes ecuaciones:

$$V_{group}(t) = \alpha * V_{group}(t - 1) + (1 - \alpha) * V_{avg} + \sqrt{1 - \alpha^2} * V_{rand} \quad (1)$$

$$\theta_{group}(t) = \alpha * \theta_{group}(t - 1) + (1 - \alpha) * \theta_{avg} + \sqrt{1 - \alpha^2} * \theta_{rand} \quad (2)$$

Donde  $\alpha$  es un parámetro de ajuste para variar la aleatoriedad,  $V_{avg}$  y  $\Theta_{avg}$  son los valores medios de la velocidad y la dirección cuando  $t$  tiende a infinito,  $V_{rand}$  y  $\Theta_{rand}$  son variables aleatorias gaussianas de media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ .

A partir del comportamiento de las bandadas de pájaros o las colonias de insectos es modelada la movilidad individual de los nodos de modo que se logra una separación entre ellos al tiempo que se refuerza un nivel de cohesión que garantiza la cobertura de toda la región.

$$\rho_{node}(t) = \rho_{normal} + R_{BAN} * \omega(t)_{c/s} \quad (3)$$

En (3) se caracteriza la posición individual de un nodo, donde  $\rho_{normal}$  es la distancia normal al centro lógico,  $R_{BAN}$  es el radio de movimiento dentro de la BAN y  $\omega(t)_{c/s}$  es un peso aleatorio que caracteriza la tendencia de la distancia con respecto al centro lógico, cuando un nodo está cerca al centro lógico este peso tiende a alejarlo y en caso contrario tiende a acercarlo. Dicho peso está descrito por una variable aleatoria de media cero y varianza  $(1/\rho(t-1) - \rho_{normal})$ .

La dirección del nodo relativa al centro lógico se caracteriza como:

$$\Theta_{node}(t) = \Theta_{normal} + r * \Delta\Theta_{max} \quad (4)$$

Donde  $\Theta_{normal}$  es la dirección normal relativa al centro del grupo,  $r$  es una variable aleatoria distribuida uniformemente en  $[-1; 1]$  y  $\Delta\Theta_{max}$  es la máxima desviación del ángulo.

Finalmente la posición individual de un nodo en cualquier instante de tiempo es caracterizada como:

$$X_{node}(t) = X_{group}(t) + \min\{\rho_{node}(t), R_{BAN} * \cos(\Theta_{node}(t))\} \quad (5)$$

$$Y_{node}(t) = Y_{group}(t) + \min\{\rho_{node}(t), R_{BAN} * \sin(\Theta_{node}(t))\} \quad (6)$$

En cuanto a la caracterización del canal, en el trabajo presentado en [24] se tomaron mediciones con un analizador vectorial de redes (VNA) en varias partes del cuerpo luego fue calculada la respuesta al impulso con una transformada inversa rápida de Fourier y adicionalmente se utilizó un modelo anatómico del cuerpo humano en el software de simulación SEMCADX. El desvanecimiento de la señal por trayectoria es modelado con la

fórmula de Friis (Ecuación 7), donde  $P_{0,dB}$  es la pérdida a una distancia base  $d_0=10\text{cm}$ , de modo que se calcula el coeficiente de pérdida por trayectoria  $\eta$ . La Tabla 3 condensa algunos de los parámetros hallados para la pérdida por trayectoria.

$$P_{dB} = P_{0,dB} + 10\eta \log \frac{d}{d_0} \quad (7)$$

Parámetro	Brazo	Pierna	Espalda	Torso	Cuerpo
$d_0[\text{cm}]$	10	10	10	10	10
$P_{0,dB}[\text{dB}]$	32.2	32.5	36.8	41.2	35.2
$\eta[-]$	3.35	3.45	2.18	3.23	3.11
$\sigma[\text{dB}]$	4.1	5.3	5.6	6.1	6.1

Tabla 3. Parámetros de pérdida por trayectoria hallados en [24]

Para completar la caracterización un nivel de variabilidad en las pérdidas es atribuido al Power Delay Profile (PDP) entre distintos componentes de señal, con base en los resultados se sugiere que esta variabilidad se ajusta con mayor precisión a una distribución lognormal, los parámetros que obtuvieron en este caso son el mean delay excess y el rms delay spread (ver Tabla 4).

	Parámetro	Brazo	Pierna	Espalda	Torso
$P_{dB}$	$\sigma[\text{dB}]$	3.4	5.9	5.2	5.5
	$\mu[\text{dB}]$	-0.2	-0.3	0.0	-0.7
$\tau_0$	$\sigma[\text{ns}]$	1.12	2.03	1.89	1.91
	$\mu[\text{ns}]$	-0.05	0.0	-0.06	0.0
$\tau_{rms}$	$\sigma[\text{ns}]$	0.98	2.53	1.34	1.39
	$\mu[\text{ns}]$	-0.04	0.25	0.01	0.0

Tabla 4. Parámetros mean delay excess y rms delay spread hallados en [24]

El modelo de canal quedó descrito por la ecuación:

$$p_{r,dB}^j(d_{i,j}) = p_{s,dB}^i - P_{dB}(d_{i,j}) - X_{\sigma,dB} \quad [dBW] \quad (8)$$

Donde  $P_{dB}$  es el valor predicho por el modelo estacionario de pérdida por trayectoria, el componente de variabilidad  $X_{\sigma,dB}$  es una variable aleatoria gaussiana de media cero y desviación estándar especificada por el modelo estacionario de pérdida por trayectoria  $p_{s,dB}^i$  es la potencia en el nodo transmisor  $i$ . La conectividad entre dos nodos es calculada como una probabilidad de que la potencia en el receptor  $p_{r,dB}^j$  se mayor a un umbral de potencia  $Con(i; j) = P[p_{r,dB}^j > p_{th}]$ .

La caracterización en [ref mov12] fue realizada haciendo una comparación de la ganancia por trayectoria (Path Gain) del canal en dos escenarios distintos (para destacar la influencia del ruido ambiental), el primer escenario corresponde a mediciones de una WBAN en exteriores y al interior de edificios, mientras que para el segundo escenario las mediciones se tomaron en una cámara anecoica (para absorber las reflexiones de las ondas).

Usando estimadores de máxima verosimilitud fueron ajustados los canales medidos a distribuciones estadísticas conocidas, coincidiendo finalmente en que ninguna de las distribuciones modela acertadamente un canal corporal y en que no es posible derivar una fórmula matemática que permita describir estadísticamente el canal.

Para poder ajustar los datos a una distribución conocida, fue reducida la potencia de la prueba  $\chi^2$  al usar solo un subconjunto del total de los datos recolectados. En la Tabla 5 se muestran algunos de los parámetros que obtuvieron tras la realización de las mediciones para distintos canales en el cuerpo humano para transmisiones a 2.45Ghz.

Ubicación del Receptor	Escenario	$\mu$	$\sigma$	Distribución
Cabeza	Casa	-51.5	6.5	Gamma
	Carro	-41.6	5.6	Rayleigh
Muñeca	Calle	-45.4	4	Rician
	Anecoica	-49.4	7.6	Gamma
Tobillo	Facultad	-55.0	5.7	Gamma
	Carro	-45.2	5.2	Nakagami

Tabla 5. Parámetros caracterización del canal en distintos escenarios y partes del cuerpo [24]

El modelo de canal on-body presentado en [25] es evaluado a partir del número de réplicas de los componentes multi-trayectoria y de la distribución del retraso de propagación rms (delay spread rms) que corresponde al segundo momento del PDP (Power Delay Profile).

El modelo propuesto es construido a partir del comportamiento estadístico de la propagación de las ondas electromagnéticas en el torso humano.

Luego de obtener la respuesta al impulso en el dominio temporal se caracterizó la pérdida por trayectoria estacionaria con la ya reseñada fórmula de Friis. En la tabla 6 se muestran los parámetros que obtenidos en las mediciones en distintas partes del cuerpo, tanto para los componentes por difracción alrededor del torso como para los componentes obtenidos por reflexión de las ondas en el piso.  $\mu$  y  $\sigma$  corresponden a la media y desviación estándar de la  $P_{dB}$ ,  $\lambda$  es la tasa de decaimiento de la potencia de los bins y corresponde a la correlación entre bins adyacentes.

<b>Componentes</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Frontal</b>	<b>Lateral</b>	<b>Trasera</b>
Difracción	$\mu$ [dB]	-1.1	-1.8	-1.6
	$\sigma$ [dB]	5.4	6.7	4.6
	$\lambda$ [dB/bin]	-7.2	-5.7	-4.7
	P	0.83	0.86	0.8
Reflexión	$\mu$ [dB]	-34	-39.7	-44.3
	$\sigma$ [dB]	4.6	3.9	3.9
	$\lambda$ [dB/bin]	-5.0	-5.6	-6.3
	P	0.77	0.71	0.66

Tabla 6. Parámetros para la caracterización del canal hallados en [25]

Dividiendo los clúster de señal recibida en bins de tiempo con una resolución de 0,5ns se ajustó el parámetro PDP a una función de decrecimiento exponencial al medir la potencia promedio de los bins.

Los datos obtenidos en las mediciones se contrastaron con distribuciones estadísticas usando estimadores de máxima verosimilitud y el criterio de información de Akaike, concluyendo entonces que los componentes por difracción y los componentes por reflexión en las extremidades pueden ajustarse a una distribución lognormal. Los resultados fueron validados graficando la distribución de los datos y superponiéndolos a las gráficas generales de las distribuciones conocidas.

El primer modelo de canal fue generado usando un vector  $X$  de  $N_b$  (número total de bins) variables aleatorias normales de media cero, varianza unitaria y no correlacionadas. Luego se multiplica dicho vector por una matriz  $C$  que agrega la correlación y la varianza, se resta un vector  $M$  que contiene las amplitudes medias de la potencia de cada bin y se resta también la pérdida por trayectoria como función de la distancia entre los nodos transmisor y receptor, ecuación 9. Donde  $G_{k,dB}$  es la ganancia del bin  $k$  expresada en dB y  $chol(C)$  es la factorización triangular (superior) de Cholesky de la matriz de correlación y varianzas. Ya que la energía promedio de cada bin decae casi linealmente en el dominio log fue propuesto un modelo simplificado en el que se reemplaza a  $M$  por  $\mu$  que es la energía promedio del primer bin y  $\lambda$  que es la tasa de decaimiento de la energía. Y se reemplaza a  $C$  por  $\rho$ , factor de correlación entre bins sucesivos y desviación estándar  $\sigma$ , resultando las ecuaciones 10 y 11:

$$G_{k,dB} = Xchol(C) - M - P_{dB}(d) \quad (9)$$

$$G_{k,dB} = \sigma g_k - P_{dB}(d) + \mu + \lambda(k - 1) \quad (10)$$

$$g_k = \rho g_{k-1} + \eta_k \sqrt{1 - \rho^2} \quad (11)$$

Donde  $k$  es una variable aleatoria normal de media cero y varianza unitaria. Los resultados de los modelos fueron contrastados ambos con resultados obtenidos en simulación para la respuesta discreta al impulso y ambos exhibieron resultados satisfactorios en el modelamiento del canal.

## 2.5 Revisión de estrategias de capa cruzada para WBAN

Braem et al [26] proponen una aproximación de capa cruzada entre las capas de enlace y de red, dicha estrategia es conocida como The Wireless Autonomous Spanning Tree Protocol (WASP) que usa una topología de árbol expandido para el control de acceso al medio y el enrutamiento en la red. Cada nodo en el árbol le comunica a sus nodos hijos (los que están a un salto) las ranuras de tiempo en las que tienen permiso para enviar datos, dicha comunicación se realiza a través de un mensaje especial que se conoce como esquema WASP.

Cada nodo envía un esquema WASP a sus hijos para informarles cuando tienen permitido transmitir y los nodos hijos responden enviando su propio esquema en la ranura de tiempo que les corresponde. El proceso hasta el momento en que el nodo más alejado envía un paquete de datos hacia el coordinador se denomina un ciclo. El ciclo comienza cuando el

coordinador envía el esquema a sus hijos en la primera ranura de tiempo. En las siguientes ranuras los hijos, a un solo salto del coordinador, llamados hijos del nivel 1, envían sus datos al coordinador y envían sus esquemas a sus hijos, hijos de nivel 2. En las siguientes ranuras el coordinador se queda en silencio mientras que los hijos del nivel 2 envían sus datos y el esquema, y los hijos del nivel 1 entran en una ranura de contienda para permitir que nuevos nodos se unan a la red. En las siguientes ranuras los nodos padre transmiten los datos de sus hijos hacia el coordinador y la última ranura es la ranura de contienda del coordinador.

Este enfoque contribuye al ahorro de energía ya que los nodos pueden dormir durante las ranuras de silencio y además los nodos ahorran energía en el enrutamiento, ya que sólo enrutan datos hacia el nodo padre. La sobre-escucha y las colisiones son evitadas debido al mecanismo de ranuras de tiempo para acceder al medio. Tres deficiencias principales se identifican en este enfoque: 1) que carece de un cálculo óptimo de la longitud de la ranura de tiempo lo que puede causar que los nodos terminen en escucha ociosa y se introduce latencia en el enrutamiento de los paquetes; 2) los nodos que son padres para muchos nodos hijos son propensos a dormir menos lo que provoca que su energía se agote con mayor rapidez, y 3) la topología de árbol en WASP no está diseñada para soportar movilidad, lo cual es una restricción para su aplicación en WBAN.

El desempeño de WASP fue comparado con los resultados obtenidos usando una combinación entre un esquema de acceso al medio CSMA (Carrier Sense Multiple Access) y un protocolo de enrutamiento fijo, en un escenario compuesto por un coordinador y 13 nodos en topología de árbol expandido. La combinación mencionada mostró una pérdida de paquetes cercana al 30% e inclusive algunos nodos no tuvieron éxito al enviar sus paquetes al coordinador, mientras que con WASP no se experimentó pérdida de paquetes. En cuanto a las latencias en la transmisión, con WASP se evidencio una latencia máxima de 0.35 segundos mientras que con el protocolo de comparación en algunos casos las latencias superaron los 0.8 segundos. En la Tabla 7 se observa una comparación de las latencias de extremo a extremo en la transmisión de diferentes cantidades de paquetes para un nodo ubicado en el nivel menor de jerarquía en el árbol. Se compara el protocolo WASP con una combinación entre CSMA y un enrutamiento fijo (CSMA-EF).

Protocolo	Número de paquetes			
	100	200	300	400
WASP	0.24s	0.24s	0.24s	0.24s
CSMA-FE	0.43s	0.71s	0.35s	0.6s

Tabla 7. Reducción de latencia en la entrega de paquetes usando WASP [26]

En [27] Latrè et al presentan el diseño de un protocolo de capa cruzada llamado CICADA (Cascading Information retrieval by slot Controlling Access with Distributed slot Assignment). Este protocolo acomoda los nodos en un árbol expandido y divide el tiempo en ranuras para evitar colisiones y escucha ociosa, los datos se envían en ciclos y las ranuras de tiempo se asignan en cada ciclo. El ciclo se divide en un periodo de control y un periodo de datos. En el periodo de control los nodos padre envían esquemas de control y de datos, y asignan las ranuras de tiempo para transmisión a sus hijos. El esquema de control

refleja el orden en el que los hijos deben enviar sus esquemas, mientras que el esquema de datos muestra el momento en el que se pueden enviar datos en el periodo de datos del ciclo. Las ranuras de tiempo finales en el ciclo se usan para la contienda de nuevos nodos que van a ingresar a la red.

En el periodo de datos los nodos reciben datos de sus hijos y la transmiten a sus padres. Cuando un nodo envía un paquete, adicionalmente envía información donde menciona su periodo de datos y su periodo de espera. En caso de que un nodo no tenga datos para enviar en su periodo de datos, éste debe enviar por lo menos dicha información adicional. Al paquete con solo información adicional se le conoce como paquete HELLO, que ayuda a que un nodo padre sepa si sus hijos están conectados, de tal modo que si en dos periodos de datos un nodo padre no ha recibido un paquete HELLO de un nodo hijo entonces se asume ese hijo como desconectado y en el caso de que un nodo hijo es el que no ha recibido un HELLO de su nodo padre entonces este nodo entra en contienda para unirse a un nuevo nodo padre.

Para evaluar el desempeño de CICADA fueron configurados dos escenarios para la misma topología de red (ver Figura 6), constituida por un coordinador y 13 nodos sensores dispuestos en árbol expandido. En el primer escenario un nodo que pertenece al primer nivel de hijos es movido por 10 segundos para que en el segundo nivel se una a un nuevo padre y luego es regresado a su posición original, de modo que en el proceso sus hijos resulten afectados ya que es necesario pasar por un salto adicional para llegar al coordinador, como consecuencia una latencia que sobrepasa los 0.2 segundos es experimentada por el hijo que esté en el nivel más bajo en la rama, esto debido al proceso de unirse a un nuevo padre y luego unirse al coordinador de nuevo. En el segundo escenario un nodo del tercer nivel de hijos es movido cerca del coordinador para simular el movimiento de un brazo que se acerca a la cintura, como consecuencia la latencia en la transmisión de dicho nodo se reduce cuando se une al coordinador como su nuevo padre y le transmite sus datos directamente a este.

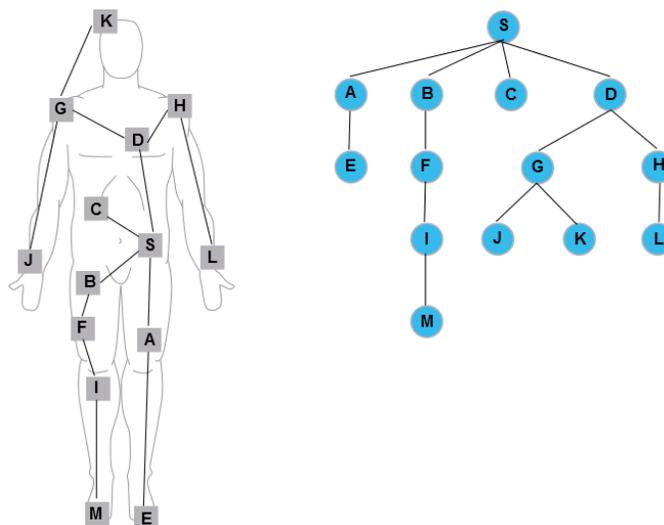


Figura 6. Topología implementada para evaluar el protocolo CICADA [27]

CICADA se constituye como una mejora al protocolo WASP [26], exhibiendo los mismos beneficios en el ahorro de energía y además añadiendo la posibilidad de dinámica y movilidad en la red al permitir que los nodos puedan unirse a nuevos padres. Cabe mencionar que CICADA es propenso a la desconexión de la red cuando un nodo padre se agota ya que no se menciona método alguno para que un nodo se convierta en padre de modo que los nodos huérfanos se unen a los nodos padres que quedan e incrementan el gasto de energía de éstos.

Nabi et al [28] diseñaron una pila de protocolo para solucionar los problemas debidos a movilidad, baja confiabilidad y la variación en el tiempo de los enlaces en las WBAN. La pila está basada en transmisiones multi-salto y evita la dependencia de una topología de red para las labores de enrutamiento. La pila usa una capa de acceso al medio basada en TDMA (Time Division Multiple Access) y una estrategia de enrutamiento llamada “gossiping”; tanto el acceso al medio como las estrategias de red se fusionan para transmitir los datos de una manera confiable, rápida y robusta con poco sobre-encabezamiento en los paquetes.

El protocolo asume que todos los nodos tienen suficiente espacio en la caché para almacenar un ítem de datos proveniente de cada uno de los nodos que componen la red, de modo que en cada ronda de transmisión un nodo almacene el último ítem de datos recibido de los otros nodos. Los nodos sensores envían un paquete compuesto por ítems de datos, un nodo envía al menos su propio ítem de datos y el de otro nodo vecino. Basándose en el número fijo de ítems de datos por transmisión, el número de nodos en la red, el ID del nodo y el número de orden de la ronda de envío, un nodo divide su caché para escoger la cantidad de datos que envía en la ronda. Dicha escogencia está diseñada de tal forma que diferentes nodos evitan enviar información duplicada al tiempo y además un mismo nodo evita enviar la misma información en rondas consecutivas.

Aunque la capa de acceso al medio está basada en TDMA no se dan problemas de sincronización dado el tamaño pequeño de la red y la presencia del coordinador con mejores recursos energéticos para la transmisión de paquetes a través de la red, permitiendo que los nodos corrijan los desajustes del reloj.

El protocolo está provisto de un mecanismo de adaptación de la potencia de transmisión basado en dos métricas; una métrica de la calidad de los enlaces de salida y una métrica de la conectividad de los nodos con el nodo coordinador. El objetivo de tal mecanismo es el de reaccionar con prontitud incrementando la potencia de transmisión cuando se detecta un cambio en la postura o una desconexión ocurre, manteniendo conexión con un grupo de vecinos y directa con el coordinador o a través de los vecinos. Ambas métricas se calculan basándose en el comportamiento histórico de los enlaces y el estado de los mismos en la última transmisión.

Este protocolo asegura eficiencia en el consumo de energía al prevenir las retransmisiones. El enrutamiento de datos no depende de topologías y los nodos transmiten la información sin preocuparse por la posición relativa al destino, y la latencia se reduce porque los nodos alcanzan al coordinador usando el mecanismo de adaptación de la potencia de transmisión.

Cabe mencionar que el protocolo necesita optimizar la escucha en las ranuras de tiempo activas para reducir el consumo de energía por escucha ociosa.

Abbabneh et al. [29], proponen una solución para el problema de enrutamiento eficiente y presentan la localización de ancho de banda como un problema de optimización lineal. Definen una métrica llamada utilidad de la red y su objetivo es llegar a una compensación entre la energía remanente en los nodos y el rendimiento de la red. Esta aproximación sugiere que los paquetes sean forzados a moverse a través de los nodos con mayores recursos energéticos dentro de un árbol de enrutamiento. El problema principal es el de incrementar la cantidad de nodos con alta probabilidad de ser aceptados para unirse al árbol de enrutamiento, en aras de balancear el consumo de energía y prolongar el tiempo de vida de la red. Los nodos son aceptados en el árbol de enrutamiento al medir su importancia relativa en el contexto de la red. La importancia o utilidad de un nodo depende de la cantidad de paquetes que transitan por dicho nodo y de su nivel de energía, una vez estas medidas caen por debajo de un umbral establecido el nodo se pone en modo offline.

El protocolo exhibe cuatro fases, a saber, 1) Topology Discovery cuando los nodos intercambian mensajes HELLO para detectar a los nodos vecinos y registrarlos en su tabla de vecinos; 2) Energy Aware Routing que ocurre cuando un nodo escoge entre los nodos del árbol cuál de ellos será su nodo padre, esta decisión depende del nivel de energía de los nodos candidatos a ser padre y de la energía del camino total que el paquete debe atravesar; 3) Bandwidth Allocation, el ancho de banda se localiza de una manera eficiente en las ramas del árbol, proporcional a la prioridad de los datos que se enrutan a través de esas ramas, la prioridad de los datos es definida por la variable que sensan los nodos. Y en la fase 4) Load balancing routing los nodos que pertenecen al árbol de enrutamiento regresan a la fase Topology Discovery para ahorrar energía y permitir que otros nodos se encarguen de las labores de enrutamiento en el árbol.

Esta aproximación logra el ahorro de energía y la prolongación de la vida de la red como consecuencia del cambio periódico en los nodos entre los estados de enrutamiento y el estado offline. La calidad de servicio (QoS) se alcanza ya que se da prioridad a los datos dependiendo de la variable sensada. Cabe mencionar que el protocolo fue simulado bajo condiciones ideales para el canal y se demostró que el desempeño de la red tiene una fuerte dependencia de la localización del coordinador en el cuerpo.

Fue comparado el desempeño del protocolo con respecto a la solución óptima obtenida con la formulación del problema lineal entero que consistía en el incremento (maximización) del número de nodos con alta prioridad de pertenecer al árbol de enrutamiento con las más altas tasas de datos a la vez que se balancea el consumo de energía para alargar el tiempo de vida de la red. La evaluación del desempeño mostró que la utilidad se incrementa al aumentar el número de nodos con alta prioridad y como consecuencia directa más nodos son aceptados como fuentes de tráfico con la mejor tasa de datos. En ambas evaluaciones la brecha entre la solución óptima y la solución provista por el protocolo es pequeña y tiende a mantenerse constante mientras aumenta el número de nodos con alta prioridad. Con respecto al consumo de energía el protocolo supera a la solución óptima cuando el coordinador está ubicado en la cintura.

En la Tabla 8 se observan el promedio de energía residual en los nodos de la red cuando el árbol de enrutamiento está compuesto de 5 y 8 nodos, y el coordinador está ubicado en la

cadere. Se compara el promedio del protocolo con el de la solución óptima luego de dejar correr la simulación por cerca de 2000s.

Número de nodos	Energía	
	Solución óptima	Protocolo
5	0.795J	0.877J
8	0.865J	0.74J

Tabla 8. Energía promedio remanente en la red en [29]

Torabi y Leung [30] presentan su propio diseño de capa cruzada “Cross-Layer Design for Prompt and Reliable Transmissions over Body Area Networks”, el diseño es concebido como una mejora de una estrategia que los autores habían diseñado con anterioridad llamada CBAS (Centralized Body area Network Access Scheme) [31]. La mejora consiste en incorporar una estrategia de capa de red que mejore la tasa de entrega de paquetes (PDR) tomando información recopilada por la capa MAC acerca de la calidad de los enlaces de la WBAN de modo que se puedan identificar los enlaces más confiables de una manera distribuida y añadiendo una característica de ciclo de dureza adaptativo en los nodos para aumentar el ahorro de energía.

La entrega confiable de datos médicos desde los nodos hacia el coordinador requiere de una capa de red que este consciente de las variaciones del canal en el tiempo de transmisión y de la movilidad de los nodos en la red. El diseño propuesto presenta una estrategia de capa cruzada consciente de las interferencias en la comunicación y de los cambios en la topología de la red para de forma conjunta solucionar los requerimientos de confiabilidad en los datos en las WBAN.

El empleo de CBAS como esquema subyacente de la capa MAC permite mitigar las interrupciones de servicio ocasionadas por sistemas que coexisten en el canal y de ese modo reducir las latencias en el acceso al medio. La capa de red propuesta toma información de la capa MAC para tener en cuenta fluctuaciones del canal y de los enlaces para que en la programación de las transmisiones se reduzca la tensión entre la tasa de entrega de paquetes y las latencias.

Se toman en cuenta 2 premisas principales para el desarrollo del diseño: 1) Los esquemas TDMA aunque son eficientes energéticamente no toman en cuenta que el acceso periódico al medio no está garantizado cuando las WBAN trabajan en presencia de otras redes (WLAN, Zigbee, Bluetooth, etc.); 2) Para poder enfrentarse a cambios impredecibles en la topología un mecanismo de asignación en línea basado en la calidad de los enlaces es preferible.

Entonces para poder aprovechar las características de ahorro de energía del esquema TDMA y resolver el problema de amplias latencias en el acceso al medio que las WBAN enfrentan en las estrategias por contienda, todo esto con altas tasas de datos y alta potencia, en CBAS el coordinador evalúa el espectro y al encontrar espacios libres inicia una conexión que es ortogonal a la frecuencia y/o al tiempo existente, esta estrategia permite

que la WBAN pueda operar confiablemente en un medio donde coexisten otras redes y a la vez permite que los nodos puedan transmitir en slots libres de interferencia.

Otras investigaciones han comprobado previamente que las WBAN pueden beneficiarse confiadamente de los espacios libres que se dan en gran parte del espectro, inclusive en áreas donde se espera coexistencia con señales de WLAN/Bluetooth, de forma tal que hay suficientes espacios libres y la asignación de transmisiones será exitosa la mayoría de las veces. Cuando el coordinador detecta un espacio libre envía un paquete RTS (Request to Send) para informar a los dispositivos de otras redes que en ese slot se va dar una comunicación de la WBAN, luego el coordinador envía un comando en el canal de control para informar a los nodos que pueden transmitir. Los nodos al recibir el comando se despiertan inician la contienda por el slot de transmisión, la contienda es decidida por un parámetro llamado “Peso” que se calcula basándose en la calidad del enlace entre el nodo y el coordinador y en un registro del número de transmisiones previas que ese nodo ha realizado de modo que se garantice una distribución justa de las oportunidades de transmisión entre los nodos. El nodo con el mayor “peso” es el que tiene la mayor chance de obtener el slot de transmisión.

Cuando un nodo gana la contienda envía un paquete “win-packet” al coordinador para informar su decisión de transmitir, luego para minimizar la probabilidad de colisiones el coordinador envía un paquete de alta potencia para prevenir que otros nodos traten de iniciar transmisiones.

El diseño no está restringido a transmisiones de único salto ya que en el caso de por ejemplo nodos ubicados en los talones (y el coordinador ubicado en la cintura) donde la calidad del enlace entre nodo y coordinador es baja se permite que otros nodos retransmitan los paquetes hacia el coordinador para completar las transmisiones de forma exitosa. Cuando un nodo envía un paquete de datos los nodos vecinos guardan una copia del paquete y permanecen activos esperando el ACK (Acknowledge) del coordinador, en caso de que no haya ACK un nodo vecino se encarga de la retransmisión y una vez se da el ACK los nodos pasan a dormir.

Por último cabe mencionar que este diseño de capa cruzada provee un mecanismo adaptativo para ajustar el ciclo de dureza mediante la aplicación de ciertas políticas o condiciones para el manejo de las preferencias de un nodo que permiten controlar la duración del tiempo en el que los nodos deben estar activos.

El estándar para redes WBAN IEEE802.15.6 [32] sugiere el empleo de topologías en estrella de uno y dos saltos para aplicaciones de monitorización de salud y define 7 niveles de prioridad para los paquetes. En [33] un algoritmo de diseminación de datos de capa cruzada adopta un mecanismo de enrutamiento en árbol inverso que tiene como objetivo reducir el número de hello beacons intercambiados para el establecimiento y mantenimiento de la topología de red en redes WBAN de dos saltos. El árbol inverso tiene 2 fases de construcción, una fase de descubrimiento para hacer broadcasting de los ID de red en un mensaje beacon, y una fase de cálculo de una ruta de árbol inverso para la designación del nuevo salto en la red.

En la fase de descubrimiento el coordinador transmite su ID y ese ID es diseminado por los hijos a un salto a los hijos a dos saltos, de modo que los nodos a 2 saltos evitan reenviar paquetes de otros nodos al revisar un contador de saltos que sirve para que en el árbol inverso los nodos a un salto escojan al coordinador como su próximo salto y los nodos a dos saltos escojan como próximo salto solo a los nodos a un salto. Pero el próximo salto se escoge dependiendo del mensaje de ID que haya llegado primero, ósea con la menor latencia.

Para soportar la diferenciación de tráfico se definen 3 niveles de prioridad Emergency Mandatory (EM), Delay Sensitive (DS) y General Monitoring (GM). El acceso al canal se hace usando los esquemas CSMA/CA y Slotted Aloha. Los paquetes con prioridades EM y DS se envían en los periodos de acceso exclusivo EAP1 y EAP2 de la súper-trama IEEE802.15.6, mientras que los paquetes GM compiten por acceso al canal en los periodos de acceso aleatorio RAP1 y RAP2.

El framework de capa cruzada presentado en [34] considera que las principales fuentes de consumo de energía en WBAN son el proceso de transmisión y codificación en la capa física y la localización óptima de ancho de banda en capa de enlace. El problema de distorsión de la tasa de energía (E-R-D) es formulado como un problema de optimización.

La función objetivo de la formulación es la minimización de la energía total consumida en las fases de transmisión y codificación, que se calcula con base en parámetros del canal tales como la magnitud del desvanecimiento, el coeficiente de pérdida por trayectoria y la energía disipada en los módulos de cuantización y de transformada discreta wavelet.

El modelo de optimización considera las siguientes restricciones: 1) El retraso máximo permitido en las transmisiones no puede ser mayor a un umbral predefinido; 2) la máxima tasa de distorsión en el codificador y 3) el ancho de banda disponible que se puede localizar para los nodos en la red. El esquema de localización de ancho de banda propone una aproximación adaptativa variable donde las ranuras de tiempo son asignadas óptimamente de acuerdo a los requerimientos de las capas PHY y Aplicación.

La optimización se enfoca en una localización eficiente de los recursos y proveer los mejores parámetros para satisfacer conjuntamente el consumo de energía y las tasas de datos y distorsión.

El modelo E-R-D propuesto ofrece un framework de optimización restringido por la latencia y la distorsión que obtiene los mejores parámetros de las capas involucradas para minimizar el consumo de energía, a partir de la longitud del wavelet, la tasa óptima de transmisión, la tasa de compresión, la longitud de las ranuras de tiempo y la asignación de ancho de banda.

La capacidad que tienen las baterías de recobrar energía cuando están apagadas por un intervalo de tiempo, dependiendo de los componentes electroquímicos que las componen y la cantidad de tiempo en estado apagado; es una propiedad aprovechada en [35] para idear un esquema TDMA para WBAN manejado por las dinámicas de las baterías y especificado para aplicaciones médicas. Ésta estrategia TDMA considera la capacidad de recuperación

de las baterías, el estado del canal inalámbrico y restricciones de calidad de servicio derivadas de situaciones como el retraso en transmisiones y la pérdida de paquetes.

Para incrementar el tiempo de vida de las baterías, la idea es maximizar los periodos en los que las baterías están inactivas, manteniendo un buen balance con respecto a los retrasos de transmisiones y la pérdida de paquetes que genera el mecanismo de espera y encolamiento de paquetes que se utiliza para reducir el número de ranuras de tiempo requeridas para las transmisiones. En la capa MAC, los nodos deciden empezar una transmisión solo cuando el estado del canal, que se estima usando el nivel de la señal de los mensajes “beacon” enviados por el coordinador, es lo suficientemente bueno y cuando el buffer de paquetes tiene una longitud adecuada.

Aunque este protocolo para WBAN prolonga la vida útil de las baterías, y los paquetes son eficazmente entregados y a tiempo en las ranura de tiempo garantizadas de la súper-trama (GTS), algunos problemas se identifican también. En los casos en los que se incrementa el periodo inactivo de las baterías, los nodos quedan propensos a incrementar la pérdida de paquetes y el retraso promedio debido a que los paquetes se mantienen en los buffers por largos intervalos de tiempo.

Como se evidencia en los resultados obtenidos por los autores para la aplicación de ECG, el retraso trabaja en los bordes del límite sugerido para el retraso en este tipo de aplicaciones, de modo que este protocolo está más propenso a introducir mayores latencias que a reducirlas. El modelo de canal utilizado en las pruebas del protocolo no se acomoda al de un escenario de WBAN real, ya que se ha comprobado que la distribución Nakagami no describe las características de un canal corporal. Además no se toma en cuenta los fenómenos introducidos por la movilidad.

## 2.6 Trabajo futuro en el diseño de capa cruzada

A partir de la revisión del estado del arte se identificaron los siguientes tópicos como propicios para trabajo futuro en el diseño de capa cruzada para WBAN.

### Movilidad

La gran mayoría de los protocolos que se estudiaron al realizar la investigación del estado del arte carecían de soporte a la movilidad, es decir, el cambio cotidiano en las posturas del cuerpo humano que es bastante común en las WBAN. Como se vio en los apartados de modelo de movilidad, existen diversos esquemas de movilidad que se pueden adaptar a los requerimientos de una evaluación de WBAN, el modelo MoBAN es un ejemplo muy claro, tiene una definición matemática rigurosa, se desarrolla a partir de modelos predefinidos y usados en redes inalámbricas móviles, y además está implementado para un simulador muy popular en el entorno de las WBAN.

Dicho de otro modo, los diseñadores de protocolos de capa cruzada hoy en día no tienen excusa para no incluir un modelo de movilidad que corresponda con los escenarios en los que hacen la evaluación de sus protocolos, es cierto que los diseños muchas veces están orientados a escenarios específicos pero un modelo general de movilidad podría ayudar a obtener resultados más acordes con la realidad y no simplemente con el escenario de prueba.

#### Ciclos de dureza adaptativos

Como se referencio anteriormente, gran parte del consumo ineficiente de energía se debe a problemas como la escucha ociosa y la sobre-escucha del canal. La optimización en la asignación de los periodos activos en las estrategias de acceso al medio puede contribuir de una manera bastante significativa en el manejo eficiente de energía en las WBAN.

#### Capa cruzada consciente del contexto

Este tópico está muy ligado a las aplicaciones propias de las WBAN, es decir al ambiente hospitalario y de monitoreo remoto de signos vitales y enfermedades. El contexto se refiere al entorno y las condiciones de los usuarios de las WBAN, es decir las características físicas de la locación (humedad, temperatura, luminosidad, etc.) y las características físico-mentales del usuario (nivel de estrés, edad, estado emocional, etc.). Autores sugieren que una estrategia consciente del contexto puede colaborar en el manejo eficiente de energía y la mejora de las métricas de calidad de servicio al construir una comunicación efectiva de parámetros de contexto entre las capas de Aplicación y de acceso al medio [36].

#### Calidad de Servicio (QoS)

Como se ha insistido desde la Introducción del presente trabajo las WBAN deben complementar el manejo eficiente de energía con un adecuado nivel en métricas de calidad de servicio, los trabajos que se presentan de capa cruzada por lo general se enfocan en un solo aspecto y se presentan resultados convincentes pero para ese solo aspecto de forma aislada, pero en WBAN se necesita aportar a mejorar el balance entre el consumo de energía y la calidad de servicio y no solo unas cuantas métricas sino un conjunto riguroso de métricas ya que en WBAN la información que se maneja es de una importancia crucial, inclusive de ella puede depender la vida del usuario de la WBAN.

#### Seguridad

Es un tema crucial en WBAN ya que la información de un usuario (paciente) es privada y no debe ser accedida por agentes externos al sistema global del que hace parte la WBAN. Está claro que una estrategia de seguridad induce gastos de procesamiento extra y consumo de energía adicional al hacer uso de esquemas de codificación y la adición de encabezados a los paquetes de los protocolos. Pero como es un tema tan sensible para redes de ese nivel de privacidad, se debe abordar y tratar como un tema inherente al desarrollo de estrategias de capa cruzada en WBAN.

## Capa física y canal inalámbrico

En los trabajos de capa cruzada revisados se puede evidenciar también que la capa física al igual que en la pila de protocolos no tiene un papel tan decisivo en el proceso de comunicación. Un buen esquema de capa cruzada debería incluir a la capa física para desarrollar esquemas que permitan estar conscientes de los cambios constantes en el canal y pueda tomar decisiones más acertadas en el proceso de comunicación y no se limite solamente a recibir parámetros de las capas superiores y a transmitir y recibir datos.

# 3. Escogencia de la estrategia de capa cruzada y planteamiento del experimento

---

## 3.1 Análisis de aportes y falencias de las estrategias de capa cruzada.

Para la comparación que se pretende realizar es necesario escoger una de las estrategias de capa cruzada estudiadas, por tanto se debe profundizar en cada una de ellas para identificar las características que las distinguen de las demás y los aportes más significativos al balance entre consumo de energía y satisfacción de métricas de QoS en escenarios de aplicación de las WBAN.

*Braem et al. The Wireless Autonomous Spanning Tree (WASP) [26]*

Esta estrategia contribuye al ahorro de energía ya que los nodos pueden entrar en modo de bajo consumo en las ranuras de tiempo en las que deben permanecer en silencio. Gastos de energía debidos a la sobre-escucha y a las colisiones se evitan gracias a que en cada ranura de tiempo solo hay 2 nodos haciendo uso del canal, el nodo padre que escucha los datos y el nodo hijo que los está transmitiendo. A pesar de que este mecanismo de asignación de ranuras evita las colisiones y la sobre-escucha, no exhibe un cálculo óptimo de la amplitud de las ranuras de tiempo, entonces puede darse que los nodos permanezcan escuchando el canal libre por más tiempo del que es necesario, generando gasto de energía por escucha inoficiosa del canal.

Debido a la topología de árbol en expansión hay nodos que están propensos a asumir rol de padre de ramas muy profundas dentro del árbol, lo que ocasiona que tales nodos tengan periodos de inactividad muy cortos con respecto a los de otros nodos, derivando en alto consumo de energía por parte de estos nodos y como consecuencia degradando el tiempo de vida de la red. Una vez desconectada una rama por desgaste de un nodo padre no hay un mecanismo para que uno nodo asuma rol de padre o para que los nodos huérfanos se conecten a otra rama del árbol y se reconfigure la red.

De lo último que se menciona se puede concluir que no existe un soporte a movilidad, las ramas desconectadas quedan aisladas y los paquetes generados por sus nodos se pierden o experimentan retrasos excesivos. De los resultados presentados también se puede verificar que el retraso promedio de extremo a extremo exhibido en las transmisiones no es el adecuado para algunas de las aplicaciones de WBAN.

*Latrè et al. The Cascading Information retrieval by Controlling Access with Distributed slot Assignment (CICADA) [27]*

CICADA se considera como una implementación mejorada de WASP, luego se observa que exhibe beneficios de ahorro de energía similares en aspectos como la escucha inoficiosa del canal, la sobre-escucha, el sobre-encabezamiento y las colisiones, agregando la novedad de un mecanismo para soportar movilidad de la red ya que los nodos pueden asociarse a un nuevo padre cuando resultan aislados en la red. Pero también se introduce un problema cuando un padre se agota y los nodos huérfanos se agregan a las ramas de otros padres aumentando el ciclo de trabajo de los padres que quedan y reduciendo las ranuras en las que estos pueden estar inactivos.

CICADA es propenso a un problema de seguridad en escenarios donde existan varias redes corriendo bajo este protocolo. Es posible que por el mismo mecanismo de soporte a la movilidad, nodos pertenecientes a la red de un paciente traten de agregarse a las ramas de la red de otro paciente. CICADA además no cuenta con una orientación a otras métricas de calidad de servicio distintas al retraso extremo a extremo.

La división del proceso de transmisión en ciclos de datos y de control asume que en el ciclo de datos solo se envía un paquete de datos, lo que causa que aplicaciones con altas tasas de transmisión necesiten aumentar el número de ranuras de transmisión y por tanto se reduzcan los periodos de inactividad y ahorro de energía.

*Nabi et al. [28]*

El esquema de capa cruzada ayuda a la conservación de energía al utilizar el esquema TDMA como estrategia de acceso al medio, ya que se evitan colisiones y además los nodos duermen en el periodo inactivo de la trama TDMA. La estrategia de “gossiping” proporciona que el protocolo no dependa de topologías para el enrutamiento de los datos, que se evite gasto de energía por retransmisiones ya que los datos son difundidos a través de la red por todos los nodos hasta que alcanzan el coordinador y también se logra reducir significativamente la latencia en las transmisiones. A pesar de los beneficios mencionados se debe resaltar que como contraprestación los nodos deben escuchar en todas las ranuras de la parte activa de la trama TDMA lo que ocasiona un gasto de energía debido a la escucha del canal que en ocasiones puede ser inoficiosa.

La combinación entre la estrategia “gossiping” y el mecanismo de adaptación de la potencia de transmisión permite la movilidad de los nodos y también transmisiones a muy baja potencia evitando radiación excesiva en el cuerpo y además ahorrando energía.

Como el protocolo depende de una fuerte conexión de los nodos entre sí y con el coordinador puede ocurrir que nodos propensos a estar aislados constantemente debido a la movilidad puedan sufrir problemas de sincronización al pasar periodos de desconexión con el coordinador. Para mitigar esta situación estos nodos podrían incurrir en gastos de energía superiores a los de otros nodos ya que tendrían que adaptar su potencia de transmisión a los niveles más altos, lo cual terminaría en una degradación del tiempo de vida de la red.

*Abbabneh et al. [29]*

Esta estrategia exhibe algunas falencias que pueden definir por completo el buen o mal desempeño de la WBAN. Los mismos autores citan que el desempeño de la red se ve fuertemente influenciado por la posición del nodo coordinador en el cuerpo, sugieren que este nodo se ubique en la cadera del portador. La tarea de la transmisión de los datos recae en un árbol de enrutamiento que se reconfigura dinámicamente de acuerdo al nivel de energía de los nodos y del nivel de energía total del camino hasta el coordinador. El protocolo fue probado en condiciones ideales donde el canal de comunicaciones no se ve interferido y no existen condiciones de movilidad, a partir de esto se puede concluir que en el instante en que un nodo selecciona al nodo del árbol al que le va transmitir los datos puede suceder que un instante después debido a la movilidad o a una interferencia del canal ese enlace entre el nodo y el árbol de enrutamiento desaparezca lo que ocasionaría que el paquete se pierda o que el nodo transmisor deba elegir otro nodo enrutador del árbol de nuevo. Sin mencionar que la conexión entre los nodos pertenecientes al árbol también puede resultar afectada por los fenómenos mencionados.

De manera que el bajo soporte a movilidad y las condiciones cambiantes del canal hacen que esta opción no sea realmente adecuada para redes WBAN.

*Torabi y Leung. [30]*

Se considera que el enfoque de esta estrategia es el de enviar con éxito los datos de la WBAN hacia el exterior más que proveer beneficios en cuanto a consumo de energía y calidad de servicio al interior de la WBAN. Es de previo conocimiento que las estrategias basadas en contienda entre los nodos acarrearán gasto extra de energía, en el caso específico de esta estrategia puede decirse que los nodos incurren en consumo ineficiente de energía ya que deben mantener sus radios en escucha para detectar el paquete de control (comando) del coordinador. Esa escucha ineficiente también ocurre cuando el nodo ganador de la contienda envía el paquete de datos, ya que los demás nodos quedan pendientes en escucha del ACK del coordinador, ya que si ese ACK no llega ellos deben de asumir la retransmisión del paquete.

El intercambio de paquetes “win” y ACK entre nodo y coordinador también implica gastos de energía extra no exhibidos en otros protocolos orientados al ahorro de energía.

Esta estrategia proporciona un mecanismo adaptativo para el ciclo de dureza de los nodos, luego el periodo en el que los nodos permanecen activos cambia dinámicamente con respecto a sus necesidades de transmisión, lo cual permite ahorro de energía. La estrategia de “peso” para la contienda entre los nodos proporciona un acceso justo al coordinador, lo que permite que no haya nodos que acaparen el canal, de modo que todos los nodos cuentan con una probabilidad significativa de transmitir sus datos.

*Su y Zhang. [35]*

El primer inconveniente de esta estrategia es que asume transmisiones solo cuando los nodos tienen una cola de espera lo suficientemente grande como para abandonar el periodo de inactividad en el que permanecen la mayoría del tiempo para recargar las baterías. Este tipo de funcionamiento es ineficiente en el contexto de WBAN donde pueden existir nodos que necesitan enviar pequeñas cantidades de datos pero con cierta regularidad y prácticamente en tiempo real.

Los autores tratan de probar el buen desempeño con la transmisión de señales de ECG, a pesar del esfuerzo, es necesario aclarar que la transmisión de señales de ECG es un caso que se adapta con facilidad al funcionamiento del protocolo ya que es una señal que puede ser más significativa cuando se envía una cantidad sensada en un intervalo de tiempo determinado que cuando se envía constantemente.

### **3.2 Simulador OMNeT++ para WBAN [37]**

Para comprobar el desempeño de protocolos en el contexto de WBAN lo más indicado sería hacer un experimento en ambientes reales de atención médica, por desgracia es bastante difícil llevar a cabo un experimento de esa magnitud ya que existen problemas y carencias principalmente a nivel logístico y económico, y otros que tienen que ver con la cantidad de esfuerzo se debe invertir en el experimento.

Aunque los problemas anteriores son comunes en cualquier implementación de WBAN, el caso de las estrategias de capa cruzada añade un ítem adicional y es que no existen dispositivos electrónicos de comunicación inalámbrica que implementen o permitan la implementación de los protocolos. Podría pensarse en procesadores, microcontroladores e inclusive FPGAs pero el esfuerzo de desarrollo e implementación en este tipo de plataformas sería de algún modo excesivo para el mero objetivo de evaluar el desempeño y la medición de algunas métricas de interés.

Además está también claro el problema de la dualidad desempeño versus implementación presente en los desarrollos de capa cruzada, muchas de las estrategias de capa cruzada, por no decir que la mayoría, están completamente enfocadas en demostrar que su desempeño es superior o mejora el de alguna otra estrategia con respecto a alguna métrica de desempeño en específico. Un buen ejemplo se puede observar en [38] donde los investigadores tenían como objetivo implementar el protocolo de capa cruzada para WBAN CICADA, al principio tratan de seguir al pie de la letra el modelo descrito por los creadores del protocolo para luego darse cuenta de que con el hardware que tenían a disposición no era posible implementar el protocolo sin tener que modificarlo en su forma original, obteniendo al final una implementación semejante pero que no emulaba con total fidelidad el modelo descrito originalmente por los autores del protocolo.

De acuerdo con lo anterior es posible que las conclusiones y resultados que se puedan obtener al replicar el experimento realizado por los creadores de una estrategia de capa cruzada al implementarla en plataformas de hardware existentes sometiéndola a modificaciones sustanciales, no se ajusten a los obtenidos por los autores y por tanto no permitan realizar una evaluación del desempeño a la luz de las premisas originales propuestas por los creadores de la estrategia.

Una alternativa utilizada con mayor regularidad para evaluar el desempeño de protocolos y estrategias de comunicaciones es el uso de software de simulación para redes de telecomunicaciones. Mediante el empleo de software de simulación es posible evitar los costos, inconvenientes y complejidades de las implementaciones reales, con ventajas adicionales como:

- Simular funcionamiento por largos periodos de tiempo.
- Corregir los modelos de implementación.
- Diseñar distintos escenarios de ejecución de pruebas.
- Agregar mecanismos de control y de evaluación de métricas de desempeño
- Obtener gráficas y análisis en tiempo de ejecución del desempeño de los protocolos.
- Minimización del tiempo y esfuerzo de desarrollo, pruebas e implementación.
- Ejecución de pruebas en distintos escenarios y diferentes parámetros paralelamente.
- Permite implementar estrategias de capa cruzada fieles a su descripción original.

La escogencia de un simulador para WBAN se basa las siguientes premisas:

El simulador facilita frameworks de simulación de redes inalámbricas, específicamente estándares orientados al bajo consumo.

Costo del simulador y soporte técnico disponible.

Lenguaje de implementación de la simulación (lenguajes de programación de uso extendido, modelado con interfaz gráfica, ejecución de scripts, etc.).

Se permita ejecutar pruebas en paralelo (paralelismo computacional).

Los frameworks del simulador cuentan con modelos predefinidos que ahorran tiempo y esfuerzo de implementación (modelos de consumo de batería, paquetes de control entre capas, modelos de canal y movilidad, etc.).

Retroalimentación positiva en el uso del simulador de parte de la comunidad científica (publicaciones científicas, foros, comunidades online, grupos de desarrollo, mantenimiento y corrección de bugs, repositorios, etc.).

Portabilidad del simulador entre distintas plataformas de software y hardware (sistemas operativos y procesadores).

A pesar de que por lo general es difícil encontrar un simulador de eventos discretos para redes de telecomunicaciones que cumpla en su totalidad con todas las premisas enumeradas anteriormente, para este experimento se escogió el simulador OMNeT++ (Objective Modular Network Test-bed in C++) [37], ya que puede usarse tanto en el sistema operativo Windows como en Linux, cuenta con una interfaz gráfica que emula el comportamiento de los nodos y el funcionamiento de la red en tiempo de ejecución, cuenta con frameworks de simulación para redes inalámbricas tales como MiXiM, InetManet y Castalia, los modelos de simulación para el estándar IEEE802.15.4 están presentes en dos de los frameworks, en MiXiM e InetManet. La funcionalidad de los modelos se describe usando un lenguaje de programación de uso común en el medio científico como lo es C++, mientras que la descripción estructural de los modelos se puede hacer tanto de manera gráfica como mediante el uso del lenguaje NED. OMNeT++ es open-source y tiene un gran soporte de parte de la comunidad académica y de sus desarrolladores a través de foros, publicaciones científicas, listas de distribución, grupos de colaboración online y repositorios digitales. También ofrece facilidades con respecto al modelo de canal y el modelo de movilidad para WBAN que serán discutidas en el siguiente apartado.

#### *OMNeT++*

OMNeT++ es un simulador de eventos discretos cuyo esquema de simulación consiste en la interconexión y anidamiento jerárquico de módulos funcionales que hacen el paso de información entre ellos mediante el uso de mensajes. La funcionalidad de los módulos se describe usando el lenguaje de programación C++ y al ser orientado a objetos permite heredar y reutilizar las funcionalidades de otros módulos prediseñados. La interconexión entre módulos se realiza utilizando el lenguaje NED (Network Description) que es simplemente una descripción de los módulos como entidades con interfaces de entrada y salida y que hace el llamado a la clase que describe su funcionalidad, el lenguaje NED no es un impedimento para la utilización de OMNeT++ ya que a nivel de código es muy intuitivo y si se desea se puede hacer la descripción de manera gráfica.

De manera que las redes en OMNeT++ son un encadenamiento de los distintos módulos que describen la arquitectura y el comportamiento (funcionalidad) de los actores de la red, es decir, el canal, los nodos, los paquetes, las baterías, los modelos de movilidad, las diferentes capas que componen los módulos de comunicación de los nodos, etc. (Ver Figura 7).

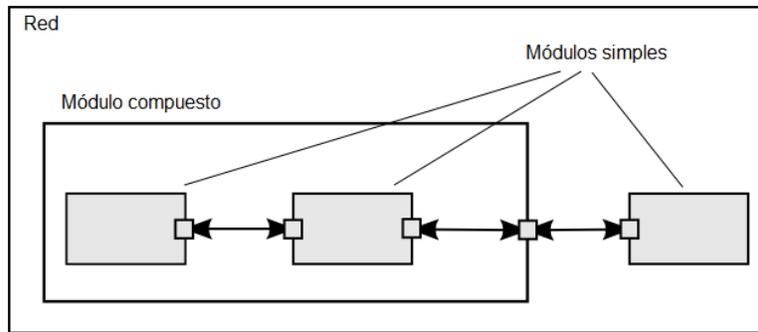


Figura 7. Modelo de red en OMNeT++ [21]

Por ejemplo, un modelo básico de simulación en OMNeT++ de una red punto a punto entre dos nodos puede estar compuesto tan solo por 4 archivos, un archivo de descripción del nodo (archivo en lenguaje NED), que describe la entidad de ese nodo, es decir interfaces de entrada y salida. Un archivo que describe la funcionalidad de ese nodo, es decir, que acciones ejecuta ese nodo cuando recibe un mensaje (paquete) por su puerto de entrada, este archivo es una clase de C++. Otro archivo que describe el mensaje que comparten ambos nodos, algo así como el paquete de datos (archivo msg) y un archivo final en NED que describe la red como tal, o sea un módulo compuesto de dos módulos simples prediseñados, que en este caso corresponden a módulos de nodo.

### 3.2.1 Frameworks de OMNeT++ para redes inalámbricas de bajo consumo *MiXiM [39]*

Es un framework para la simulación de modelos de redes inalámbricas en OMNeT++, sus creadores lo definen como un framework que resulta de la combinación de diferentes funcionalidades que ya habían sido desarrolladas para otros frameworks de OMNeT++. Por ejemplo la estructura general del framework, el soporte a movilidad y el manejo de las conexiones es tomada del Mobility Framework, los modelos de propagación en el canal inalámbrico son tomados del Channel Simulator (ChSim) y la librería de protocolos es tomada del MAC Simulator, del Positif Framework y del Mobility Framework.

Entre los distintos modelos con los que cuenta MiXiM se encuentra uno en especial que corresponde al estándar IEEE802.15.4 en el modo no ranurado (unslotted). Aparte de los archivos necesarios en cualquier simulación en OMNeT++, en MiXiM es necesario incluir otros archivos de configuración adicionales un archivo de extensión .ini donde se definen las distintas configuraciones de todas las capas por separado, algunos parámetros de simulación, el tiempo total de la simulación y también se pueden definir distintos escenarios de simulación. Un archivo de configuración adicional en lenguaje XML permite definir los parámetros de la capa física, es decir, modelos de desvanecimiento, el umbral de señal a ruido en el decisor, etc.

*InetManet [40]*

Este framework está más enfocado en protocolos de redes como la Internet. Contiene modelos de redes cableadas e inalámbricas, implementaciones de protocolos del stack TCP/IP, soporte a movilidad y con respecto a redes de bajo consumo de energía contiene el modelo IEEE802.15.4 en ambos modos ranurado y no ranurado (slotted y unslotted).

### **3.3 Canal y modelo de movilidad para WBAN**

Ambos frameworks para redes inalámbricas en OMNeT++ (MiXiM e InetManet) permiten modelar el canal inalámbrico a partir de ejemplos de modelos existentes en los frameworks o de un modelo propio construido desde cero. Por lo general se utilizan los modelos que ya están implementados en el framework y solo se modifican los parámetros susceptibles a ser modificados de acuerdo a las necesidades con respecto al canal de quien pretende ejecutar la simulación.

Al principio del proyecto cuando apenas se estaban plasmando los objetivos generales y específicos para la propuesta de investigación, se pensaba que uno de esos objetivos era el de modelar tanto el canal para WBAN como el modelo de movilidad. Luego de la extensa revisión del estado del arte, se llegó a la conclusión que no existe como tal un modelo unificado del canal para WBAN, los mismos autores de algunos modelos indican que las aproximaciones obtenidas por ellos modelan el canal para la situación y el escenario específico en el que ellos pretenden evaluar el desempeño y otras métricas de funcionamiento. También mencionan claramente que ninguna distribución estadística conocida refleja con exactitud las características de desvanecimiento de las ondas electromagnéticas en el cuerpo humano. A partir de esas conclusiones y de las sugerencias recibidas por parte de un evaluador de la propuesta de investigación se decidió acotar nuestra intervención en el modelo del canal y más bien dirigir nuestro enfoque en estudiar y analizar modelos de movilidad existentes y aplicables en OMNeT++ y en los frameworks para redes inalámbricas, para posteriormente añadirlos en nuestras simulaciones.

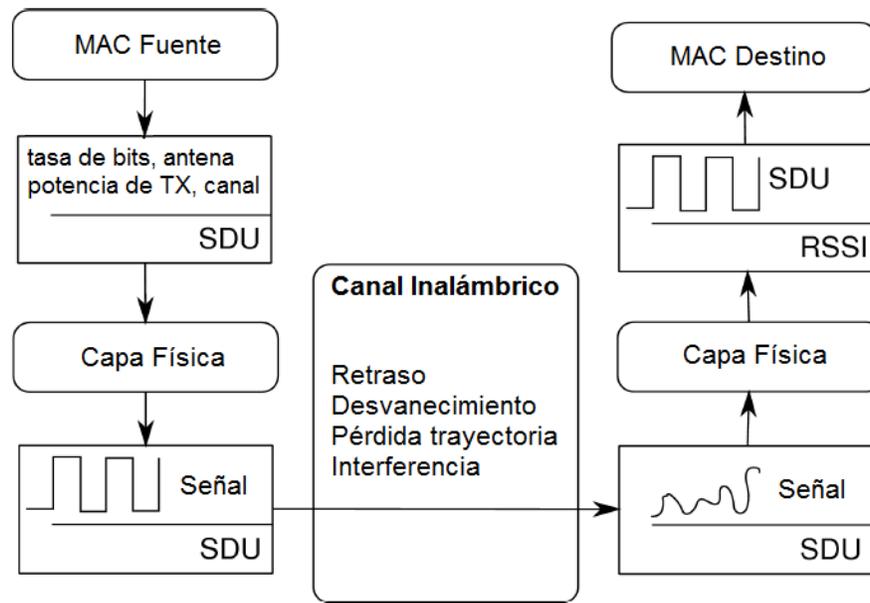


Figura 8. MAC, PHY y Canal Inalámbrico [41]

Las transmisiones inalámbricas tienen 2 características fundamentales que se deben tener en cuenta cuando se van a simular este tipo de redes de modo que permita diferenciarlas ostensiblemente de las redes cableadas. Tales características son 1) El canal inalámbrico, que hace que en los enlaces inalámbricos existan pérdidas, errores y retrasos en los paquetes de manera aleatoria; 2) la movilidad de la red, influye de manera determinante en los problemas mencionados ya que propicia que los enlaces inalámbricos no sean permanentes todo el tiempo.

De manera que los enlaces inalámbricos debido a la naturaleza del canal y a la movilidad de la red se ven sometidos a fenómenos que impactan en la propagación de las transmisiones, tales como (ver Figura 8):

- Atenuación por distancia.
- Reflexión en obstáculos.
- Difracción causada por obstáculos con bordes y perfiles agudos.
- Dispersión de las ondas por objetos que son pequeños comparados con la longitud de onda.

Los frameworks para redes inalámbricas de OMNeT++ ofrecen tres modelos de propagación de ondas en canales inalámbricos que recrean algunos de los efectos mencionados con anterioridad. Pueden ser utilizados individualmente o en combinaciones:

Atenuación por trayectoria (Simple Path loss) [41]:

Es la pérdida de energía de la señal conforme aumenta la distancia entre receptor y transmisor, depende de la frecuencia de transmisión y de la distancia. El modelo de pérdida se expresa en dB como una función de la distancia  $d$  entre las antenas receptora y transmisora mediante la fórmula de Friis (Ecuación 12) para la pérdida en el espacio libre, donde  $P_0$  es la atenuación a una distancia de referencia  $d_0$  y  $\eta$  es el coeficiente de atenuación (pathloss-exponent).

$$P_{dB} = P_0 + 10\eta \log \frac{d}{d_0} \quad (12)$$

Sombreado (Shadowing, lognormal) [41]:

El efecto de sombreado es debido a las variaciones en el ambiente que rodea a la WBAN, más específicamente por el movimiento del cuerpo (extremidades, cambio de posiciones), lo cual genera que haya un intercambio aleatorio entre modos de transmisión con línea de vista y sin línea de vista. El efecto de sombreado adiciona un efecto de variabilidad al modelo de pérdida por trayectoria. Esa variación alrededor de la media de la pérdida por trayectoria es por lo general expresada como una variable aleatoria con distribución normal.

Desvanecimiento (Jakes Fading) [41]:

Este desvanecimiento es una atenuación a pequeña escala, en el caso particular del modelo incluido en OMNeT++, se considera debido a múltiples caminos, es decir, las señal transmitida experimenta la superposición de distintos componentes de la señal que viajaban por diversos caminos, como consecuencia la señal en el receptor puede experimentar un cambio en la potencia debida a la interferencia constructiva o destructiva que se origina en la superposición de los componentes de señal.

Para facilidad de quien pretende simular, OMNeT++ cuenta con un archivo de configuración escrito en lenguaje de etiquetas XML, donde se pueden asignar al canal los modelos de propagación que se quieren tener en cuenta en la simulación. En OMNeT++ son denominados “Analogue Models” y permiten ajustar los modelos mediante la modificación de parámetros del modelo matemático, tales como media, desviación estándar, retraso rms, número de caminos, coeficientes de atenuación, frecuencia de la portadora, etc. Ver Figura 9.

En la revisión del estado del arte en modelos de movilidad para WBAN se encontró un modelo muy interesante, MoBAN, desde el punto de vista de que está diseñado específicamente para WBAN, modela con fidelidad un conjunto de posiciones del cuerpo que son cotidianas en los seres humanos (corriendo, caminando, sentado, de pie y acostado). El cambio entre posiciones no es determinístico sino estocástico, gracias a que se basa en una cadena de Markov, dejando la posibilidad de interactuar en distintos escenarios

al modificar las probabilidades de pasar de una posición a otra en las matrices de transición. No solo se modela el cambio de ubicación de los nodos para cada posición del cuerpo sino que también se modela el movimiento individual de los nodos en cada una de las posiciones, permitiendo que en cada posición del cuerpo se pueda especificar la velocidad y el radio de movimiento de cada nodo individualmente (esfera de movimiento en 3 dimensiones). Y la última característica pero la más importante es que está hecho para el framework MiXiM de OMNeT++, de modo que ahorra esfuerzos de implementación y adaptación al modelo de simulación.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<root>
  <AnalogueModels>

    <AnalogueModel type="SimplePathlossModel">
      <!-- Environment parameter of the pathloss formula
           If omitted default value is 3.5-->
      <parameter name="alpha" type="double" value="3.5"/>

      <!-- Carrier frequency of the signal in Hz
           If omitted the carrier frequency from the
           connection manager is taken if available
           otherwise set to default frequency of 2.412e+9-->
      <parameter name="carrierFrequency" type="double" value="2.412e+9"/>
    </AnalogueModel>

    <AnalogueModel type="LogNormalShadowing">
      <!-- Mean attenuation in dB -->
      <parameter name="mean" type="double" value="0.5"/>

      <!-- Standart deviation of the attenuation in dB -->
      <parameter name="stdDev" type="double" value="0.25"/>

      <!-- Interval in which to define attenuation for in seconds -->
      <parameter name="interval" type="double" value="0.001"/>
    </AnalogueModel>
  </AnalogueModels>
</root>
```

**Figura 9. Configuración de los modelos de propagación (Analogue Models) en OMNeT++ [37]**

En la Figura 10, se observa la estructura general del modelo de movilidad MoBAN. Existen 3 archivos de configuración del modelo de movilidad escritos en lenguaje XML, el archivo de configuración configMoBAN.xml permite especificar la posición inicial de la WBAN en el escenario de simulación (playground), el rango de duración en el que la WBAN se mantiene en una misma posición, las áreas o lugares en los que se mueve la WBAN y las matrices de transición entre las distintas posiciones.

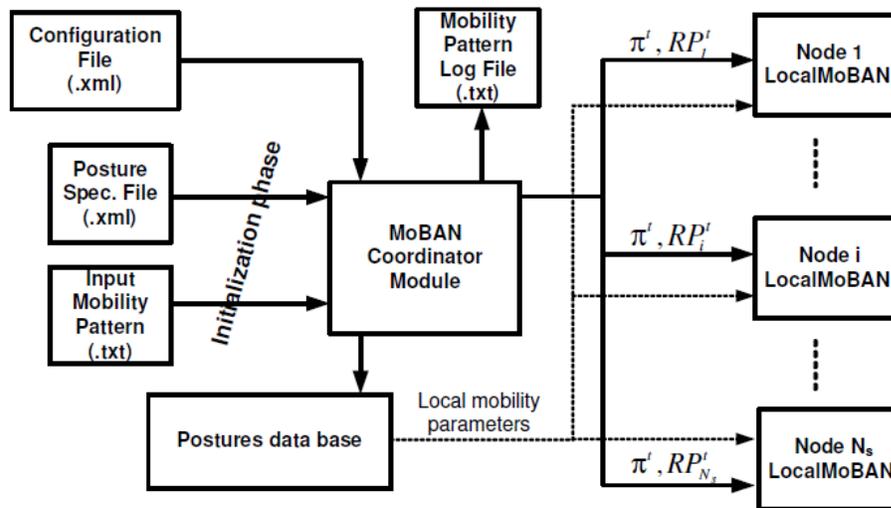


Figura 10. Estructura del modelo de movilidad MoBAN [20]

En el archivo Postures.xml se especifican los parámetros de movimiento de los nodos individuales en cada posición. Los parámetros son: 1) las coordenadas del nodo en la WBAN para esa posición específica del cuerpo; 2) la velocidad promedio a la que se mueve ese nodo y 3) el radio de la esfera de movimiento individual del nodo (ejm: movimiento extremidades).

El archivo input\_Pattern.txt permite utilizar patrones de movilidad usados en simulaciones previas, para usarlos en el archivo de configuración de la simulación debe especificarse que se va a utilizar un patrón existente de movilidad.

El módulo MoBANCoordinator corresponde a la clase de C++ que se encarga de la funcionalidad del coordinador de WBAN, es decir, el control de la movilidad colectiva de toda la red. Este módulo se encarga de calcular de la nueva posición del coordinador dentro del escenario de simulación y de hacer el cambio entre las posiciones (ejm: de corriendo a caminando) con las matrices de Markov.

El módulo MoBANLocal es la clase de C++ que se encarga de recibir como parámetros la ubicación del coordinador y la posición en la que se encuentra la WBAN, para de este modo calcular la posición individual del nodo con respecto al coordinador y según la posición de la WBAN. Además se encarga de calcular el movimiento individual de los nodos.

En la Figura 11 se ilustra la animación gráfica de una red inalámbrica de área corporal simulada en OMNeT++ haciendo uso del modelo de movilidad MoBAN.

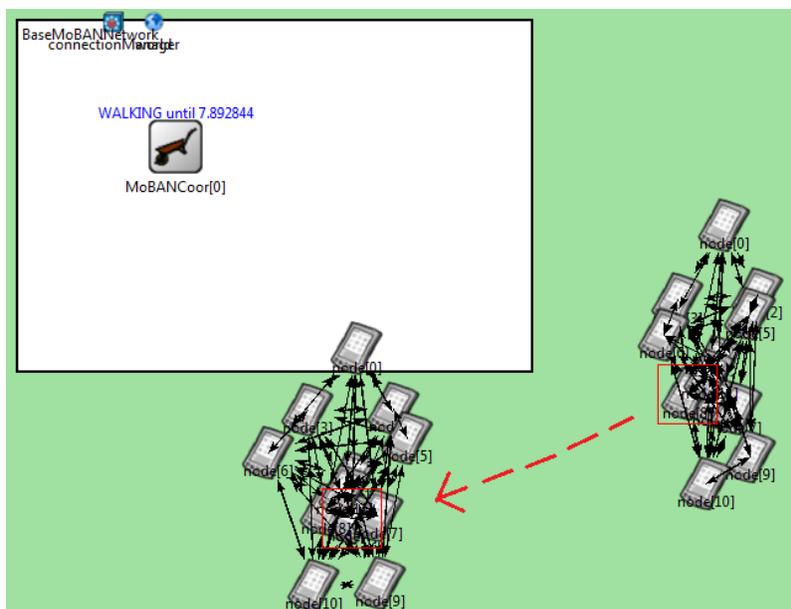


Figura 11. Interfaz gráfica simulación WBAN con MoBAN

### 3.4 Estrategias de capa cruzada candidatas para la comparación

De las estrategias de capa cruzada revisadas en el estado del arte muy pocas ofrecían mecanismos de soporte a movilidad, es decir, desconexión de los enlaces inalámbricos entre los nodos pertenecientes a la WBAN. Puntualmente solo dos de las estrategias mencionaban proporcionar algún tipo de estrategia que permitiera evitar que los nodos se aislaran de la red debido a la movilidad del portador de la red.

Las estrategias de capa cruzada que ofrecen soporte a movilidad son el protocolo CICADA [27] y el protocolo propuesto por Nabi, Geilen, Blagojevic y Hendriks [28].

A continuación se describen los mecanismos mediante los cuales estos protocolos de capa cruzada proporcionan soporte a movilidad, se discute acerca de la funcionalidad de tales mecanismos y con base en la discusión se escoge uno de los protocolos que será el que se simulará y posteriormente será sujeto de comparación con el protocolo IEEE802.15.4.

#### *CICADA*

Consideraciones iniciales del funcionamiento del protocolo:

Cicada propone que todo el proceso de transmisión de datos de todos los nodos de la red se realice en un solo ciclo en aras de reducir la latencia en las transmisiones. Cada ciclo está compuesto por dos subciclos, el primero es un subciclo de control en el que los nodos envían dos esquemas a sus hijos:

1. Esquema de control: Asigna las ranuras de tiempo en las que los hijos pueden transmitir sus esquemas de control a sus propios hijos.
2. Esquema de datos: Asigna las ranuras de tiempo en las que los hijos pueden transmitir datos a sus padres. Además reserva una ranura de tiempo para contienda de nuevos nodos que se unan a la red.

El segundo subciclo es el de datos, en este los nodos transmiten datos a sus padres. De modo que durante este subciclo un nodo recibe datos de parte de sus propios hijos y transmite a su padre los datos de sus hijos y sus propios datos.

El esquema de datos está compuesto de dos partes, la primera corresponde al periodo de datos de longitud  $\alpha$  y un periodo de espera de longitud  $\beta$ . En el periodo de espera los nodos apagan sus radios y permanecen en silencio para ahorrar energía, mientras que en el periodo de datos reciben datos de sus hijos y transmiten datos a sus padres.

Cada nodo mantiene una “tabla de hijos” en la que consigna la longitud del periodo de datos y de espera de cada uno de sus hijos, para de ese modo calcular sus propios periodos de datos y de espera que luego debe comunicar a su padre. Esta información es comunicada al ser agregada al encabezado del paquete de datos, de modo que el nodo padre puede saber cuántas ranuras de tiempo necesitan sus hijos en el próximo ciclo de transmisión.

Esta información adicional en el encabezado se debe enviar inclusive cuando un nodo no tiene datos para enviar, es a lo que se denomina paquete “HELLO”, que sirve para mantener informado a un nodo padre que sus hijos están conectados.

Esquema de movilidad (ver Figura 12):

1. Luego de la desconexión de un nodo, tanto el nodo padre como el nodo hijo esperan paquetes provenientes del otro en dos ciclos, el nodo hijo espera esquemas de control y datos mientras que el nodo padre espera paquetes “HELLO” por lo menos.
2. Pasados dos ciclos sin que padre e hijo reciban comunicación de parte de otro, entonces el nodo padre elimina de su tabla de hijos a ese nodo en particular, mientras que el nodo hijo se considera a sí mismo desconectado y se prepara para escuchar los esquemas de un nuevo padre y unírsele en la ranura de contienda del subciclo de datos.
3. Cuando un nodo nuevo o huérfano escucha el esquema de datos del nodo padre al que desea unirse, entonces envía un paquete “JOIN-REQUEST” en la ranura de contienda del esquema de datos de ese nodo padre. Ese paquete tiene como información la longitud de los periodos de datos y de espera de ese nodo, que en ese caso serían el total de ranuras que necesita para transmitir sus datos ( $\alpha$ ) y 1 porque no tiene hijos ( $\beta$ ), respectivamente.

Discusión del esquema de movilidad

En la descripción del esquema de movilidad no se menciona claramente que características o parámetros debe considerar un nodo padre para permitir que un nodo se una a su rama en el árbol. A partir de esa observación se pueden considerar situaciones como por ejemplo ¿qué tanto se puede ver afectado el tiempo de vida de la red y la latencia en los datos cuando un nodo padre permite que muchos hijos se unan a su rama?

¿Qué ocurre cuando un nodo huérfano no escucha esquemas distintos a los a los del mismo padre del que se había desconectado anteriormente?, ¿se une de nuevo a ese padre? Considerando desde el punto de vista de que esos nodos pueden calificarse como propensos a desconexiones. Y ¿qué consecuencias a nivel de latencia, pérdida de paquetes y consumo de energía pueden derivar de un nodo que no logre escuchar esquemas de ningún padre?

A nuestro juicio el esperar aleatoriamente un tiempo para transmitir el paquete “JOIN-REQUEST” en la ranura de contienda no es un método adecuado para el acceso al canal y ni para evitar colisiones al pretender unirse a la red.

¿Por cuánto tiempo un nodo insiste en tratar de unirse a la red en las ranuras de contienda?, resaltando que estos nodos deben permanecer mucho tiempo escuchando el canal para los esquemas y transmitiendo en las ranuras de contienda.

No se menciona la latencia que podrían experimentar los hijos de un nodo huérfano. Ellos en principio no se considerarían desconectados sino hasta que su padre se considere como tal. Luego se da la situación de que estos nodos que antes conformaban una rama ahora entrarán a competir entre ellos en las ranuras de contienda lo cual puede generar colisiones, latencias exageradas y pérdida de paquetes.

El problema de seguridad que se da en el caso de coexistencia de varias redes WBAN con Cicada en un escenario hospitalario, nodos de una red compitiendo por el canal con nodos de otra red en las ranuras de contienda.

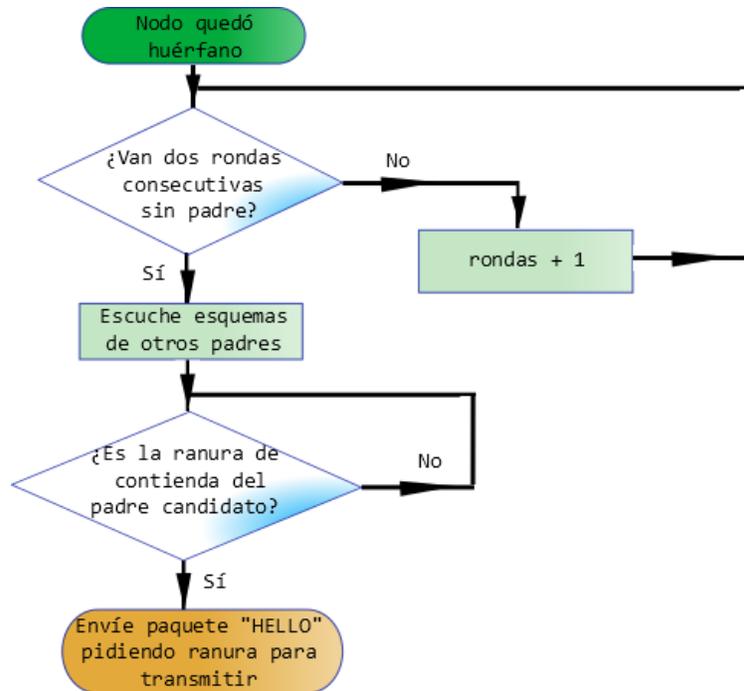


Figura 12. Estrategia de movilidad de Cicada

*Protocolo de Nabi et. al.*

Consideraciones iniciales del funcionamiento del protocolo:

### 1. Estrategia “Gossiping”

Los nodos que conforman la red transmiten en broadcast sus propios datos y por lo menos un paquete de datos recibido de un vecino en la última ronda de transmisión. Mediante una estrategia se evita que los nodos envíen paquetes de datos repetidos de un mismo nodo. De modo que esta estrategia “gossiping” ayuda a que los datos de los nodos se difundan por la red y alcancen el nodo coordinador de la WBAN, evitando el uso de estrategias de enrutamiento.

### 2. Acceso al medio TDMA

Se usa TDMA para evitar colisiones en la utilización del canal, se asume que no hay inconvenientes relevantes de sincronización debido a la cantidad de nodos que componen una WBAN. Y también se utiliza para que los nodos pasen la mayor parte del tiempo en modo de bajo consumo y solo estén funcionando en la parte activa de la trama TDMA.

Esquema de movilidad (ver Figura 13):

Para evitar el aislamiento de los nodos por desconexiones y variaciones de los enlaces inalámbricos debidos al cambio de posturas del usuario de la WBAN esta estrategia propone aumentar la potencia de transmisión (contrario a otras estrategias que para ahorrar energía sugieren transmisiones a los niveles más bajos de potencia) de acuerdo al cálculo de dos métricas que previenen que los nodos se desconecten de sus vecinos y que además se formen clústeres locales de modo que a pesar de que los vecinos estén conectados no exista una conexión real con el nodo coordinador de la red.

Outlink Quality Metric (métrica de calidad de los enlaces de salida)

Se definen dos conjuntos de nodos.  $I_i^t$ , es el conjunto de nodos que envían datos al nodo  $i$  en la ronda de transmisión  $t$ .  $IO_i^t$ , es el conjunto de nodos que envían datos al nodo  $i$  en la ronda  $t$  y que a la vez son receptores de datos del nodo  $i$  en la misma ronda de transmisión.

Cuando un nodo transmite datos, agrega un encabezado llamado “inlink-map” que es un arreglo binario en el cual un nodo registra los nodos de los que recibió datos en la última ronda de transmisión. Es decir un arreglo de  $N-1$  bits ( $N$  es el número de nodos de la red) posiciones donde el  $k$ -ésimo bit indica si el nodo  $k$  pertenece al conjunto  $I_i^t$  del nodo  $i$ . Se entiende por consiguiente que los nodos conforman el conjunto  $IO_i^t$  con los “inlink-map” que reciben de sus vecinos.

Con los dos conjuntos mencionados los nodos calculan las tasas  $\varphi_{i,j}^t$  y  $\omega_{i,j}^t$  en las últimas  $h$  rondas de transmisión. El parámetro  $h$  es escogido y asignado en tiempo de diseño.

$$\varphi_{i,j}^t = \frac{1}{h} \sum_{k=0}^{h-1} (j \in I_i^{t-k}), 1 \leq j \leq N, i \neq j \quad (13)$$

$$\omega_{i,j}^t = \frac{1}{h} \sum_{k=0}^{h-1} (j \in IO_i^{t-k}), 1 \leq j \leq N, i \neq j \quad (14)$$

$\varphi_{i,j}^t$ , representa la tasa de recepción promedio del nodo  $i$  con respecto del nodo  $j$  en las últimas  $h$  rondas.

$\omega_{i,j}^t$ , brinda una aproximación de la tasa de mensajes de los que se recibió acuso de recibo en las últimas  $h$  rondas.

Con las tasas se calcula la calidad de cada enlace de salida desde el nodo  $i$  hacia el nodo  $j$ ,  $0 \leq q_{ij}^t \leq 1$

$$q_{i,j}^t = \begin{cases} q_{i,j}^{t-1} + (1 - q_{i,j}^{t-1})\omega_{i,j}^t, j \in I_i^t, i \in I_j^{t-1} \\ q_{i,j}^{t-1}\omega_{i,j}^t, j \in I_i^t, i \notin I_j^{t-1} \\ q_{i,j}^{t-1}\mu_{i,j}^t, j \notin I_i^t, \mu_{i,j}^t = \frac{\omega_{i,j}^t}{\varphi_{i,j}^t} \end{cases} \quad (15)$$

En el primer caso si un nodo  $i$  recibe un paquete de un nodo  $j$ , y al observar en el “inlink-map” perteneciente al nodo  $j$  descubre que  $i \in I_j^{t-1}$ , entonces  $q_{i,j}^{t-1}$  es actualizado a  $q_{i,j}^t$  con un incremento determinado por la historia del enlace entre los dos nodos ( $\omega_{i,j}^t$ ).

En el segundo caso, cuando  $i \notin I_j^{t-1}$  entonces  $q_{i,j}^{t-1}$  decrece proporcionalmente con la historia del enlace entre los nodos ( $\omega_{i,j}^t$ ).

El tercer caso se da cuando en la ronda  $t$  el nodo  $i$  no recibió datos del nodo  $j$ , entonces no puede saberse si  $i$  perteneció o no al “inlink-map” del nodo  $j$  en la ronda anterior, por tanto no se puede concluir nada acerca de la calidad del enlace. Entonces se define un factor de confianza  $\mu_{i,j}^t$  que representa la tasa de rondas de transmisión en las que el nodo  $j$  ha recibido paquetes de parte del nodo  $i$ . Pero cuando el enlace está completamente roto, es decir  $\varphi_{i,j}^t = 0$ , entonces se asume  $\mu_{i,j}^t = 0$ .

Luego de calcular  $q_{i,j}^t$ , se puede calcular la calidad de los enlaces de salida del nodo  $i$  con todos los nodos de la WBAN, es decir, el número de nodos con los que el nodo  $i$  está directamente conectado en la red.

$$Q_i^t = \sum_j q_{i,j}^t \quad (16)$$

El objetivo es mantener conexión directa con un número determinado de vecinos, por tanto está última métrica se encierra entre límites que se definen de acuerdo al diseño de la red y de los objetivos en calidad de servicio y ahorro de energía,  $l_i \leq Q_i^t \leq l_s$ .

Luego, debido a que  $l_i \leq Q_i^t$  no garantiza que el nodo  $i$  tenga conexión (directa o por saltos) con el nodo coordinador de la red, como consecuencia de la formación de un clúster local entre  $i$  y sus vecinos. En este punto es que aplica la métrica de calidad de conexión con el coordinador,  $C_i$ , que cada nodo individualmente la calcula y la comparte a los demás nodos en el encabezado del paquete de datos.

$$C_i = \max\{C_j * q_{i,j}\} \quad (17)$$

Esta métrica es igual a 1 para el nodo coordinador y a los demás nodos se les asigna un valor inicial según la distancia a la que están del coordinador. Un valor de  $C_i = 0$  indica que el nodo  $i$  a perdido conexión con el coordinador.

Luego la estrategia de soporte a movilidad se basa en adaptar la potencia de transmisión cuando estas dos métricas no tienen valores adecuados, o sea que en primer lugar  $C_i = 0$ , o que en segundo lugar  $Q_i^t \leq l_i$ .

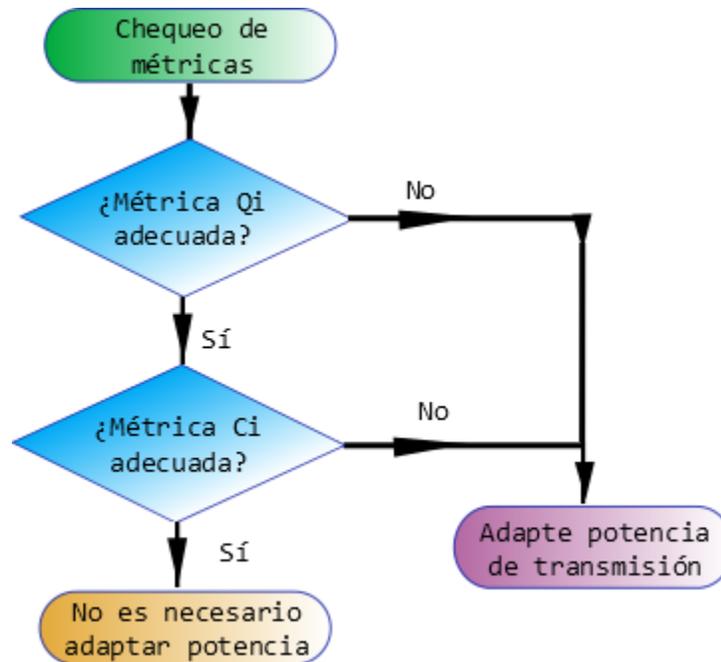


Figura 13. Estrategia de movilidad del protocolo de Nabi et. al

### Discusión del esquema de movilidad

El nivel inicial de potencia de transmisión con el que los nodos deben empezar a funcionar puede incidir directamente en el desempeño temprano de la WBAN. Un nivel muy bajo puede causar que los paquetes generados en las primeras rondas de transmisión se pierdan mientras los nodos adaptan la potencia y alcanzan valores adecuados de las métricas.

Consideramos como desafortunado que haya varios parámetros del esquema de movilidad que tengan que ser ajustados en tiempo de diseño (implementación), que a la vista se concluye que su configuración va depender de la experiencia y de los resultados obtenidos en implementaciones previas. Nos referimos puntualmente al parámetro del número de rondas de transmisión con respecto del cual se calcula la métrica de calidad de enlace de salida; los límites, superior e inferior, de la métrica de calidad de enlace de salida y los

valores iniciales en los nodos de la métrica de calidad de conexión con el coordinador. Advertimos que una mala configuración de estos valores podría degenerar en un desempeño precario del protocolo mientras que se llega a la estabilización de las métricas (si es que se llega como tal).

Tal y como lo presentan el esquema de movilidad depende fuertemente de la calidad de los enlaces de salida de un nodo hacia sus vecinos, lo que hace llegar a la conclusión de que es igualmente dependiente de la calidad de los enlaces de entrada. A partir de ahí se concluye que para mejorar las métricas no basta solo con que un nodo sea escuchado por sus vecinos sino que él también pueda escucharlos, o sea que la adaptación de potencia de transmisión en algunas situaciones no puede ser solo individual sino también colectiva, hace falta un componente cooperativo. En ocasiones, particularmente las de aislamiento extremo, el mejoramiento de las métricas de un nodo va depender de que sus vecinos cercanos le cooperen aumentando ellos también sus niveles de potencia para que sus “inlink-map” alcancen al nodo en cuestión. De otra manera el nodo aislado va estar aumentando su potencia hasta llegar al nivel máximo y pasara mucho tiempo mientras sus métricas mejoran, tiempo en el que incurrirá en gastos de energía nada despreciables.

### **3.5 Elección de la estrategia para la comparación**

A partir de las discusiones realizadas con respecto a los modelos de movilidad de ambas estrategias de capa cruzada, se llega a la conclusión de que ambas estrategias cuentan con esquemas de soporte a movilidad interesantes, con sus beneficios y falencias. De modo que el ítem de selección va referirse a la facilidad de implementación en el simulador, y en este punto en específico el protocolo de Nabi es superior al ofrecer una estrategia de enrutamiento de los datos que no depende de topología alguna, el proceso de estar reconfigurando el árbol de enrutamiento para cada postura de la WBAN en una simulación de Cicada puede resultar bastante engorroso, sin mencionar que la modificación constante a la asignación de ranuras en la trama TDMA también se convierte en un obstáculo importante a la hora de implementar una estrategia como Cicada. De modo que la estrategia que se va a someter a simulación y posterior comparación con el estándar IEEE802.15.4 es el protocolo de capa cruzada para WBAN de Nabi, Geilen, Blagojevic y Hendriks.

#### **3.5.1 Implementación en el simulador de la estrategia de capa cruzada seleccionada**

1. ¿Qué se necesita para implementar la estrategia de capa cruzada en OMNeT++?

##### **1.1 Capas del modelo de comunicación**

De acuerdo con la descripción del protocolo está claro que la capa de red no es necesaria, ya que al no depender de topología alguna y hacer las transmisiones en broadcast no se necesita de un protocolo para el enrutamiento de los datos. De modo que las capas que

serían necesarias para implementar el protocolo serían la capa de Aplicación (APP), la capa de enlace o acceso al medio (MAC) y la capa física (PHY).

Capa de Aplicación: En esta capa se debe implementar la generación y conformación de paquetes de la aplicación de WBAN que reside en el nodo, de acuerdo a la variable médica en particular que el nodo se encarga de sensar. Entonces deben implementarse métodos para el envío y para la recepción de paquete desde y hacia a la capa inferior. De acuerdo a la concepción original del protocolo donde cada capa tiene funcionalidades que corresponden con sus funciones primordiales dentro del modelo de comunicaciones, se delegara a esta capa los cálculos de métricas, conformación de encabezados y manejo de variables relacionadas con el método de “gossiping” y el mecanismo de adaptación de potencia de transmisión.

Capa de Acceso al medio: El protocolo de capa cruzada tiene como estrategia de acceso al medio el protocolo TDMA, de modo que en esta capa la implementación se debe enfocar en implementar un acceso al medio por división del tiempo en ranuras garantizadas para cada nodo de la red.

Capa Física: En esta capa se debe hacer la transmisión y recepción de los paquetes. En esta capa se hace la modulación de los datos, el decisor discrimina entre ruido y señal las transmisiones que se reciben. Esta capa también se encarga de intercambiar entre los niveles de potencia para las transmisiones y además debe informar a un módulo de batería para que haga el descuento de batería correspondiente de acuerdo a la función que ejecute el radio de comunicaciones.

## 1.2 Estrategia “gossiping” para la diseminación de los datos

Primero se debe definir cuántos ítems de datos de los vecinos se van a enviar en las transmisiones junto con los propios datos del nodo. Adicionalmente se deben crear estructuras de almacenamiento de datos para almacenar allí los datos recibidos de los demás nodos en cada ronda de transmisión. Una vez definido el número de ítems de datos de los vecinos se puede aplicar la estrategia mencionada en la descripción del protocolo para que antes de hacer una transmisión los nodos seleccionen los datos de los vecinos que van a enviar.

$N$  = número de nodos de la red

$\lambda$  = ítems de datos de los vecinos que se deben enviar en cada transmisión

$$M = (N-1)/(\lambda -1)$$

$r$  = orden de la ronda de transmisión actual

$i$  = número de identificación del nodo en la red

En cada ronda de transmisión un nodo selecciona los ítems de datos que se encuentren en la porción  $s$  de la estructura de almacenamiento, ver Ecuación 18:

$$s = r + i \text{ mod } M \quad (18)$$

### 1.3 Mecanismo de adaptación de potencia de transmisión

Lo primero que se debe implementar con respecto al mecanismo de adaptación de potencia es un encabezado adicional en los paquetes de datos, en este encabezado los nodos deben informar su “inlink-map”, su métrica de conectividad con el coordinador ( $C_i$ ). Se deben implementar métodos donde se calculen las métricas  $Q_i$  y  $C_i$ . Luego se deben implementar métodos que le informen a las capas de los cambios en la potencia de transmisión de acuerdo a la variación de las métricas. Y por supuesto se deben implementar métodos que manejen el cambio de la potencia de transmisión en la capa física y que informen de los cambios en el gasto de energía a la batería del nodo.

## 2. Implementación de la estrategia de capa cruzada

### 2.1 Capas del modelo de comunicación

2.1.1 Capa de Aplicación: Para la implementación de la capa de Aplicación se realizó una adaptación de un ejemplo de capa de aplicación que viene incluido en los frameworks de OMNeT++ denominado SensorAppLayer, de este ejemplo se aprovecharon los siguientes métodos:

```
void SensorAppLayer::initialize(int stage)
```

Método utilizado para inicializar las variables y los parámetros por defecto de la capa de Aplicación, este método solo se ejecuta una vez al principio de la simulación.

```
void SensorAppLayer::initializeDistribution(const char* traffic)
```

Este método define con que distribución o periodicidad se va a generar el tráfico de datos en la capa de Aplicación, existen 3 opciones de tráfico que son: exponencial, periódico y uniforme. En la simulación del protocolo de capa cruzada se usará tráfico periódico.

```
void SensorAppLayer::scheduleNextPacket()
```

De acuerdo al tipo de tráfico seleccionado con el método `initializeDistribution` este método agenda el momento en que debe hacerse el envío del próximo paquete.

```
void SensorAppLayer::handleSelfMsg(cMessage *msg)
```

Con el uso de este método se atienden los contadores de tiempo que se configuran y los mensajes que se agendan en los distintos métodos. Por ejemplo, mediante el uso de este

método se agenda los cambios de ronda de transmisión, los cálculos de métricas y el envío de los datos.

```
void SensorApplLayer::handleLowerMsg( cMessage* msg )
```

Este método se utiliza para atender los paquetes que vienen de la capa inferior. De manera que en este método se hace el desempaqueado de los paquetes que provienen de otros sensores. En este método se hace el conteo de los paquetes que llegan al nodo, se calculan métricas de calidad de servicio como la tasa de pérdida de paquetes y el retraso extremo a extremo. Además se hace la extracción de los “inlink-map”, de la métrica  $C_i$  y de los ítems de datos para almacenarlos en una estructura de almacenamiento.

```
void SensorApplLayer::sendData()
```

Se utiliza para pasar los paquetes a la capa inferior, es el envío de datos como tal desde el punto de vista de la capa de Aplicación. Existe una variable mediante la cual el método que revisa el estado de las métricas avisa si se debe hacer un incremento de potencia, esta variable es transmitida a las capas inferiores por medio de un mensaje de control entre capas que se instancia en este método.

```
void SensorApplLayer::finish()
```

En este método se ejecuta el reporte del estado final de variables y métricas al terminar la simulación. También se aplican los destructores y liberadores de memoria.

Métodos adicionales que se agregaron a la capa de Aplicación:

```
void MyAppLayer::buildNextPacket(MyApplPkt *appPkt)
```

Este método ayuda en la construcción de los paquetes de datos, en este método se eligen los ítems de datos de los vecinos que se deben enviar en la ronda de transmisión. Además se construyen los encabezados adicionales del paquete donde se agregan el “inlink-map” y la métrica  $C_i$ .

```
void MyAppLayer::restartInMaps(void)
```

Este método adicional agregar la funcionalidad para restablecer a cero los “inlink-map” de los vecinos, ya que previo a cada ronda de transmisión el inlink-map de cada nodo debe ser reescrito entonces es necesario limpiar estas estructuras de datos previo a ese proceso de actualización.

```
void MyAppLayer::calcfwuij(void)
```

Método en el que se calculan los parámetros (tasas)  $\varphi_{i,j}^t$ ,  $\omega_{i,j}^t$  y  $\mu_{i,j}^t$ .

```
void MyAppLayer::calcMetricas(void)
```

Método en el que se calculan las métricas en las que se soporta el mecanismo de adaptación de potencia de transmisión que son la calidad de los enlaces de salida  $q_{ij}$  y  $Q_i$ , y la calidad de la conexión con el nodo coordinador  $C_i$ .

```
void MyAppLayer::checkMetrics(void)
```

En este método se definen los límites superior e inferior de la métrica  $Q_i$  y se observa que dicha métrica se encuentre entre esos límites. También se observa la evolución de la métrica  $C_i$ . Una vez observado el valor actual de las métricas se decide si es necesario realizar un incremento en la potencia de transmisión que se hace a través de una variable visible globalmente al resto de los métodos.

Implementaciones adicionales de la capa de Aplicación:

Paquete `MyAppIPkt.msg`: Es el mensaje en el que se definen los campos que tiene el paquete de capa de aplicación.

Mensaje de control `MyOwnAppControlInfo.h`: Un mensaje de control mediante el cual se avisa desde la capa de Aplicación a las capas inferiores que se debe ejecutar un aumento en la potencia de transmisión, debido a una desconexión con los vecinos o la formación de un clúster local con los vecinos que se ve reflejado en unas métricas deficientes.

### 2.1.2 Capa de Acceso al medio (MAC):

Para implementar la capa de acceso al medio se realizó una adaptación de un ejemplo de TDMA realizado por el investigador A. Ajith Kumar S. del Bergen University College de Noruega. Este ejemplo es compartido libremente por su autor en el sitio web <http://home.hib.no/ansatte/aaks/omnet.html>

Principales modificaciones realizadas al ejemplo TDMA de A. Ajith Kumar S:

Se modificó la máquina de estados para que el protocolo funcionara como un TDMA puro con ranuras de tiempo asignadas a cada nodo. Adicionalmente se modificó el tiempo de duración de las ranuras y el número de ranuras que componen la trama TDMA. Cada trama se ajustó para durar 1 segundo y la longitud de las ranuras de tiempo se ajustó en 4ms para poder transmitir toda la información en un solo paquete a una tasa de transmisión de 250kbps.

Adicionalmente se agregaron 2 mensajes de control. Un mensaje de control mediante el cual se recibe el aviso de adaptación de potencia de transmisión de parte de la capa superior del modelo de comunicación. Y una vez hecha la adaptación de potencia (incremento o decremento) se avisa a través de un segundo mensaje de control a la capa física. La adaptación de potencia en capa de acceso al medio se realizó en una sobrecarga del método: `void MyTDMAMac::attachSignal(macpkt_ptr_t macPkt)` donde se agregó una función

*setTxPower* para modificar la potencia de transmisión que se le pasa a la capa física a través del mensaje de control.

### 2.1.3 Capa Física (PHY)

Para la implementación de la capa física se aprovecharon las funcionalidades de los módulos *PhyLayerBattery* y *BasePhyLayer* de los frameworks de OMNeT++. Aprovechando el mensaje de control entre capa de acceso al medio y capa física se implemento un método adicional que permitía extraer el valor de potencia de transmisión previamente calculado en la capa superior. El paso siguiente era calcular el consumo de corriente de acuerdo al nivel de potencia de transmisión, para implementar esta funcionalidad se sobrecargo el método de capa física: *virtual double calcTXCurrentForPacket(macpkt\_ptr\_t /\*pkt\*/, MacToPhyControlInfo\* /\*cInfo\*/)* de modo que a cada nivel de potencia de transmisión se le asignara un nivel de consumo de corriente eléctrica para el descuento de energía en la batería. En la Tabla 9 se observan los valores para los pares potencia de transmisión – corriente que se consume, que fueron tomados de la hoja de datos de los radios CC2420 de Texas Instruments.

Potencia de Transmisión (mW)	Consumo de corriente (mA)
0,0032	8,5
0,032	9,9
0,1	11
0,32	14
1	17,4

Tabla 9. Niveles de potencia de transmisión y consumo de corriente en la batería de los módulos CC2420

### 2.2 Estrategia “Gossiping” para la disseminación de paquetes de datos

Esta estrategia se implemento en el método *void MyAppLayer::buildNextPacket(MyAppIPkt \*appPkt)* de la capa de Aplicación, en este método es dónde se generan los paquetes que se van a enviar a otros nodos, por tanto en este método se deben seleccionar los ítems de datos de los nodos vecinos que se deben enviar adicionalmente con el propio paquete de datos del nodo.

### 2.3 Adaptación de potencia de transmisión

La estrategia de adaptación de potencia es el “núcleo” del protocolo de capa cruzada. En la descripción de la implementación de las capas se han mencionado los métodos y funcionalidades extra (encabezados, paquetes de control, etc.) que hacen posible el

desarrollo de esta estrategia, sin embargo a continuación se realiza un recuento de los métodos que implementan la estrategia y en que capas del modelo se localizan tales métodos.

### 2.3.1 Capa de Aplicación

En esta capa se implemento el paquete *MyAppIPkt.msg* en cuyo encabezado cada nodo agrega el “inlink-map” y su métrica actual  $C_i$ . También se implemento el mensaje de control *MyOwnAppControlInfo* que permite informar del cambio en la potencia de transmisión debido a malas métricas  $Q_i$  y  $C_i$ .

Cabe mencionar que en el método *void MyAppLayer::handleLowerMsg( cMessage\* msg )*, que es el que recibe los paquetes provenientes de la capa inferior, se hace la extracción de los “inlink-map” y las métricas  $C_i$  de los paquetes de los vecinos.

Adicionalmente se implementaron en capa de Aplicación los siguientes métodos para el cálculo de las métricas:

*void MyAppLayer::restartInMaps(void)*

*void MyAppLayer::calcfwuij(void)*

*void MyAppLayer::calcMetrics(void)*

*void MyAppLayer::checkMetrics(void)*

### 2.3.2 Capa de Acceso al medio

La sobrecarga *void MyTDMAmac::attachSignal(macpkt\_ptr\_t macPkt, int incP)* se implemento para realizar el intercambio entre los niveles de potencia de transmisión, desde la capa de Aplicación la capa de acceso al medio recibe la notificación para modificar la potencia de transmisión a través del mensaje de control *MyOwnAppControlInfo* en el argumento *int incP*, y una vez fijada la nueva potencia de transmisión, esta se le comunica a la capa física a través del mensaje de control *MacToPhyControlInfo* utilizando los métodos *setTxPower* y *setControlInfo*.

### 2.3.3 Capa Física

Con el método *getTxPowerFromControlInfo* se obtiene la potencia de transmisión comunicada por la capa de acceso al medio a través del mensaje de control *MacToPhyControlInfo*, una vez se tiene la nueva potencia de transmisión mediante la sobrecarga *double current = calcTXCurrentForPacket(pkt, cInfo, txPower)* se obtiene la corriente que se debe consumir en el módulo de batería. Y por supuesto se modifica la potencia a la que se emiten los paquetes al canal.

## 2.4 Implementaciones adicionales y soluciones a problemas encontrados en la implementación

Al protocolo de capa cruzada se le adiciono el modelo de movilidad MoBAN. Para agregarlo fue necesario incluir los archivos configMoBAN.xml y postures.xml. En el archivo de inicialización de la simulación omnet.ini se modificaron y configuraron convenientemente las líneas donde se indica el tipo de movilidad para establecer a MoBAN como el modelo para la simulación y demás parámetros concernientes a las configuraciones de inicialización de MoBAN.

En el archivo configMoBAN.xml se incluyen las matrices de transición entre las distintas posturas de la WBAN. Para este fin se definieron 4 matrices para incrementar la probabilidad de permanecer en las siguientes posturas:

- “Corriendo” y “Caminando”
- “De pie” y “Sentado”
- “Caminando” y “De pie”
- “De pie”, “Sentado” y “Acostado”

En el archivo postures.xml se definió la posición de los nodos para cada postura de la WBAN, adicionalmente se indicaba la velocidad y el radio de libertad para el movimiento individual de los nodos en cada postura por separado. La idea obviamente era posicionar los nodos de forma que se asemejaran a una WBAN instalada en una persona.

Al realizar los primeros ensayos de funcionamiento de la estrategia de capa cruzada se observo un comportamiento anómalo que ya había sido previsto con antelación en la discusión que se hizo con respecto de la estrategia de soporte a movilidad del protocolo.

Se observo que a pesar de que los nodos incrementaban su potencia de transmisión las métricas no mejoraban en lo absoluto, se había previsto que iban a ocurrir situaciones en las que los nodos iban a ser escuchados al incrementar su potencia de transmisión pero por el contrario ellos no iban a escuchar a sus vecinos ya que estos no incrementaban su potencia de transmisión. De modo que los nodos en esa situación no reciben los “inlink-maps” de sus vecinos y por tanto sus métricas no mejoran a pesar de los incrementos en la potencia de transmisión.

Para mitigar este problema se implemento la siguiente estrategia (ver Figura 14):

1. A cada nodo se le asigna una tabla de vecinos cercanos a los que debe ayudar a mejorar sus métricas cuando estos así lo requieran.
2. En los paquetes se agrego un encabezado extra mediante el cual los nodos “piden ayuda” a sus vecinos para mejorar sus métricas. Es decir los nodos piden a sus vecinos que

incrementen la potencia a la que transmiten para que él pueda escuchar sus “inlink-maps” y empezar a mejorar sus métricas.

3. Cuando un nodo recibe un paquete y observa que “están pidiendo ayuda” debe remitirse a su tabla de vecinos cercanos que le ayuda a decidir si incrementa su potencia de transmisión o no.
4. El límite de veces que un nodo incrementa su potencia para ayudar a sus vecinos está determinado por el límite superior de su métrica  $Q_i$ .

Entonces, en el método ***void MyAppLayer::checkMetrics(void)*** de la capa de Aplicación el nodo revisa las métricas y observa si debe incrementar su potencia de transmisión, y cada vez consecutiva que ejecuta este método, hace un registro de los intentos sin que las métricas mejoren considerablemente. Al tercer intento activa una bandera para que en el método ***void MyAppLayer::buildNextPacket(MyApplPkt \*appPkt)*** se active el encabezado para pedir ayuda a los vecinos.

Luego, cuando un nodo recibe un paquete en el método ***void MyAppLayer::handleLowerMsg( cMessage\* msg )*** revisa el encabezado para ver si el nodo del que recibió el paquete necesita ayuda, en caso de necesitarla entonces pasa a revisar si ese nodo está en su tabla de vecinos cercanos. De verificarse que es un vecino cercano, el nodo activa una bandera para que se haga un incremento de potencia. Si un nodo observa que al incrementar su potencia sobrepasa el límite superior de la métrica  $Q_i$ , entonces descarta ayudar a su vecino.

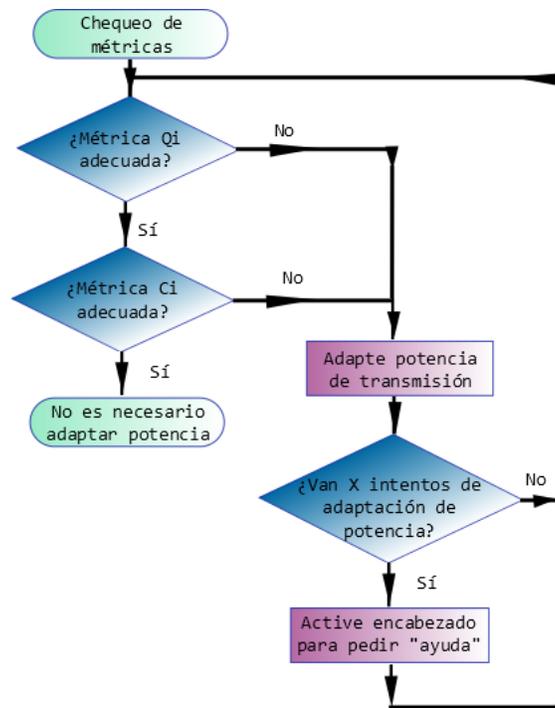


Figura 14. Solución al problema del protocolo de capa cruzada

### 3.6 Planteamiento del experimento

La ejecución de un experimento es una de las partes fundamentales en un trabajo investigativo, permite corroborar con resultados y análisis un conjunto de predicciones e hipótesis acerca del desempeño de una unidad experimental. El objetivo en particular del presente trabajo es el de realizar una comparación adecuada entre el protocolo de capa cruzada seleccionado y el estándar IEEE802.15.4, ambos en el entorno de las redes inalámbricas de área corporal WBAN.

Está claro que el enfoque va dirigido a evaluar el balance entre consumo de energía y el cumplimiento de algunas métricas de calidad de servicio relevantes en el ámbito de las WBAN en los protocolos en cuestión. Esto con el fin de dar un concepto, ciertamente objetivo, acerca de que estrategia es más adecuada para WBAN, si una estrategia de capa cruzada o una cuyo funcionamiento está supeditado al modelo de comunicaciones jerárquico de capas en pila.

El experimento se plantea bajo la concepción de un modelo de efectos fijos, es decir, se espera que los resultados del experimento tengan una fuerte influencia de parte de las interacciones de los distintos niveles de los factores que se van a aplicar a una unidad experimental determinada. Previamente se deben definir la unidad experimental, los factores y las variables respuesta del experimento, y adicionalmente introducir un conjunto

de hipótesis que a partir de algún tipo de análisis del conjunto de resultados permita hacer una discusión desde el punto de vista del objetivo particular del experimento y del trabajo investigativo como tal.

A continuación se hace una descripción de la unidad experimental, los factores y las variables respuesta alusivos a este experimento:

### 3.6.1 Unidad experimental

La unidad experimental es una red inalámbrica de área corporal instalada en una persona y que emula las transmisiones periódicas de los sensores. La red se compone de nodos sensores ubicados en distintas partes del cuerpo y de un nodo central que concentra todas las transmisiones de los nodos sensores (ver Figura 15).

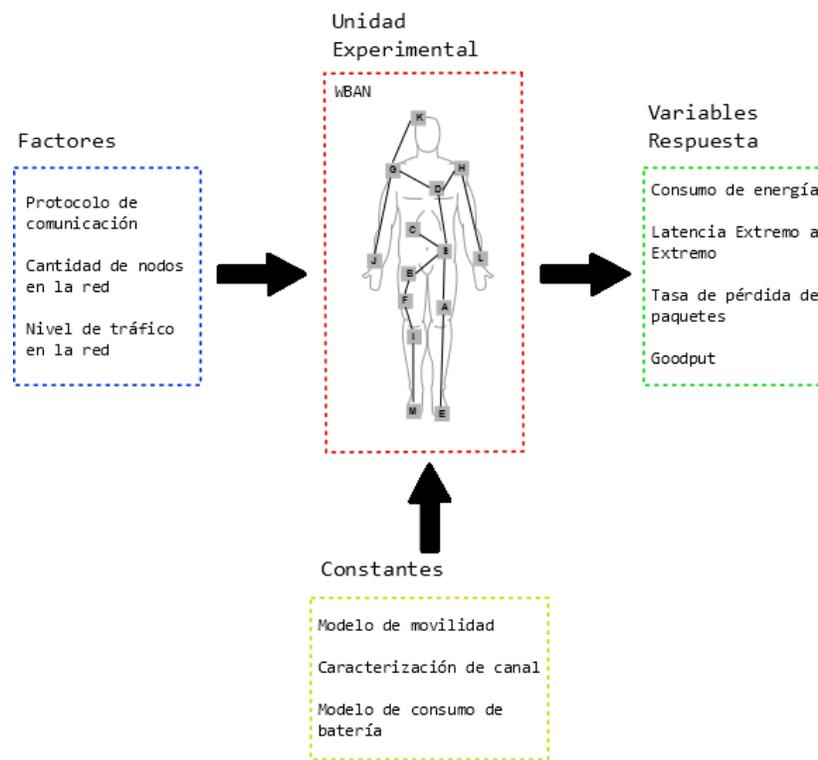


Figura 15. Unidad experimental

### 3.6.2 Factores

Son las variables cuyo efecto se considera tienen influencia directa en el desempeño de la unidad experimental (Ver Tabla 10).

1. Protocolo de comunicaciones de la WBAN

Es el protocolo utilizado para la comunicación de los datos al interior de la WBAN, se considera que este factor tiene 2 niveles cualitativos que son: el protocolo de capa cruzada y el estándar IEEE802.15.4.

## 2. Tráfico de la red

Considerando que la cantidad de tráfico circulando en la red puede influenciar el consumo de energía y el desempeño de las métricas de QoS, se definieron dos niveles para esta variable, uno corresponde a tráfico alto, transmisiones cada 30 segundos, y otro a tráfico bajo, transmisiones cada 5 minutos.

## 3. Cantidad de nodos de la red

Recordando que el nivel de conectividad de las redes inalámbricas en muchas ocasiones depende de la cantidad de vecinos que rodean a los nodos, se considero el impacto de este factor. Fueron definidos dos niveles, una WBAN de 5 nodos, 4 nodos y el nodo coordinador. Y una WBAN de compuesta por 12 nodos.

<b>Variable de control</b>	<b>Niveles propuestos</b>	<b>Predicción de efectos</b>
Protocolo de comunicación	-Protocolo de capa cruzada -Protocolos estándar IEEE802.15.4	Efecto directo en las variables respuesta del experimento. Especialmente en el consumo de energía de la red.
Cantidad de nodos	-5 nodos -12 nodos	Efecto directo en la latencia extremo a extremos y en la tasa de pérdida de paquetes.
Tráfico	-Alto (paquetes cada 30 segundos) -Bajo (paquetes cada 5 minutos)	Efecto directo en el goodput y en el consumo de energía de la red.

Tabla 10. Factores del experimento

### 3.6.3 Variables respuesta

Permiten medir el desempeño del experimento luego de ejecutar los distintos tratamientos, y a través de su análisis es posible ratificar las hipótesis y predicciones realizadas de manera previa a la realización del experimento. Para hacer la comparación de desempeño entre los protocolos se evaluarán los resultados de las siguientes variables respuesta: Consumo de energía, latencia extremo a extremo (end to end delay), tasa de pérdida de paquetes y goodput.

1. Consumo de energía promedio: Se observa el porcentaje de energía remanente en la batería, registrado al terminar la simulación. Para calcular el promedio de energía que gasta la toda la red, en la transmisión de todos los paquetes, se hace la sumatoria de la energía remanente en las baterías de todos los sensores de la red al finalizar la simulación y se obtiene el promedio entre el número de nodos. En la Ecuación 19,  $E_i$  corresponde a la energía en el nodo  $i$  al finalizar la simulación, y  $N$  es el número de nodos.

$$E_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^k E_i}{N} \quad (19)$$

2. Latencia de extremo a extremo: Es una métrica de calidad de servicio que indica la demora promedio de un paquete desde que sale de la fuente y llega al destino. Se calcula a través de una marca de tiempo de creación, que posee cada paquete y al llegar al nodo coordinador, este calcula el tiempo que demoró en llegar el paquete. Al finalizar la simulación se calcula el promedio de latencia como la sumatoria de todas las latencias de cada paquete sobre el número total de paquetes entregados al nodo coordinador (Ecuación 20).  $L_j$  es la latencia del paquete  $j$  recibido por el coordinador,  $Pkt_{RX-COORD}$  es el total de paquetes recibidos por el coordinador de la red.

$$L_{PktRx} = \frac{\sum_{j=0}^{Pkt_{RX-COORD}} L_j}{Pkt_{RX-COORD}} \quad (20)$$

3. Tasa de pérdida de paquetes: Da cuenta del porcentaje de paquetes que no alcanzaron al nodo coordinador. Permita también inferir la probabilidad de pérdida de paquetes en las transmisiones (Ecuación 21).  $Pkt_{Tx}$  es la cantidad de paquetes transmitidos por todos los nodos de la red y  $Pkt_{Rx}$  es la cantidad de paquetes recibidos por el nodo coordinador.

$$P_{ppkts} = \frac{Pkt_{Tx} - Pkt_{Rx}}{Pkt_{Tx}} \quad (21)$$

4. Goodput: En general el goodput se define como el número de bits de información transmitidos correctamente por unidad de tiempo. El goodput entrega información acerca de la eficiencia de transmisión que posee una red bajo una cierta configuración. En algunas aplicaciones no resulta suficiente que la tasa de error del nivel físico sea baja, sino que es necesario que todos los bits se entreguen correctamente (Ecuación 22).  $Pkt_{RX-COORD}$  es la cantidad de paquetes recibidos por el nodo coordinador y  $T_{simulacion}$  es la duración total de la simulación.

$$G = \frac{Pkt_{RX-COORD} * (\text{tamaño paquete en bytes}) * 8}{T_{simulacion}} \quad (22)$$

### 3.6.4 Tratamientos

Los tratamientos corresponden a las combinaciones posibles entre los niveles de los factores y que se pueden aplicar a la unidad experimental, la Tabla 11 muestra los tratamientos para este experimento.

Protocolo	Tráfico	Nodos
Capa Cruzada	Alto	5
		12
	Bajo	5
		12
IEEE802.15.4 (Unslotted-Slotted)	Alto	5
		12
	Bajo	5
		12

Tabla 11. Tratamientos del experimento

### 3.6.5 Número de réplicas y aleatorización de los tratamientos

Por cada tratamiento se aplicarán 10 réplicas, para un total de 80 tratamientos aplicados a la unidad experimental. Adicionalmente se debe aleatorizar la aplicación de los tratamientos para procurar independencia en las observaciones y resultados en las variables respuesta. La Tabla 12 permite observar el orden de ejecución de las réplicas en el experimento.

Protocolo	Tráfico	Nodos	Réplicas									
Capa Cruzada	Alto	5	12	47	22	3	67	44	23	25	62	6
		12	29	31	38	53	39	79	2	5	4	64
	Bajo	5	72	11	13	55	69	1	42	78	16	68
		12	32	77	35	26	49	30	75	71	46	33
IEEE802.15.4 (Unslotted-Slotted)	Alto	5	76	74	51	20	36	15	27	50	17	18
		12	8	40	56	41	66	63	9	59	73	43
	Bajo	5	54	10	34	24	28	65	45	57	7	70
		12	37	52	58	19	14	60	21	80	48	61

Tabla 12. Orden de las réplicas de los tratamientos

### 3.7 Hipótesis preliminares del experimento

Luego de ejecutar el experimento se debe realizar un análisis de los resultados obtenidos para las variables respuesta de modo que se puedan ratificar o desacreditar la validez de un conjunto de hipótesis. La hipótesis es que el desempeño del protocolo de capa cruzada otorga mejores beneficios con respecto al balance entre consumo de energía y métricas de calidad de servicio en el ámbito de las WBAN, a continuación se describen las hipótesis individuales:

- El protocolo de capa cruzada permite un manejo más eficiente de energía que el estándar IEEE802.15.4.

La hipótesis nula sugiere que las medias de la variable respuesta consumo de energía respecto de los niveles del factor protocolo son iguales y son cero.

La hipótesis alternativa propone que al menos una de las medias de la variable respuesta consumo de energía respecto de los niveles del factor protocolo es distinta de cero.

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = 0$$

$$H_1: \alpha_i \neq 0, \text{ para algún } i$$

- El protocolo de capa cruzada tiene una latencia extremo a extremo más baja que el estándar IEEE802.15.4.

La hipótesis nula sugiere que las medias de la variable respuesta latencia extremo a extremo respecto de los niveles del factor protocolo son iguales y son cero.

La hipótesis alternativa propone que al menos una de las medias de la variable respuesta latencia extremo a extremo respecto de los niveles del factor protocolo es distinta de cero.

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$$
$$H_1: \beta_j \neq 0, \text{ para algún } j$$

- La tasa de pérdida de paquetes es inferior en el protocolo de capa cruzada con respecto al estándar IEEE802.15.4.

La hipótesis nula sugiere que las medias de la variable respuesta tasa de pérdida de paquetes respecto de los niveles del factor protocolo son iguales y son cero.

La hipótesis alternativa propone que al menos una de las medias de la variable respuesta tasa de pérdida de paquetes respecto de los niveles del factor protocolo es distinta de cero.

$$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = 0$$
$$H_1: \gamma_k \neq 0, \text{ para algún } k$$

- La métrica Goodput exhibe un mejor desempeño cuando la WBAN comunica datos usando el protocolo de capa cruzada.

La hipótesis nula sugiere que las medias de la variable respuesta goodput respecto de los niveles del factor protocolo son iguales y son cero.

La hipótesis alternativa propone que al menos una de las medias de la variable respuesta goodput respecto de los niveles del factor protocolo es distinta de cero.

$$H_0: \delta_1 = \delta_2 = 0$$
$$H_1: \delta_n \neq 0, \text{ para algún } n$$

### 3.8 Configuración de las simulaciones en OMNeT++

En las figuras 16 y 17 se ilustra la ubicación de los nodos para las WBAN en los dos niveles del factor Cantidad de Nodos.

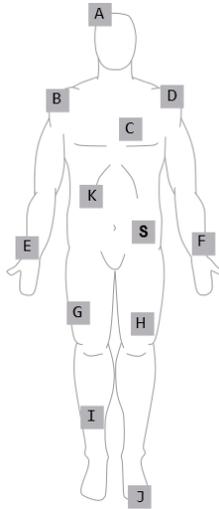


Figura 16. WBAN conformada por 12 nodos

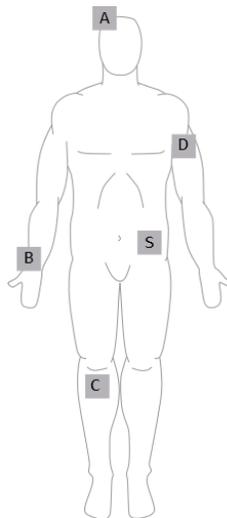


Figura 17. WBAN conformada por 5 nodos

La tabla 13 condensa las configuraciones generales de los modelos de simulación, los parámetros expuestos son los mismos con los que se construye el archivo inicial de configuración de simulación en OMNeT++ llamado omnet.ini.

<b>Configuraciones generales</b>	
Tiempo total de simulación	86400 s
Playground size X	500 m
Playground size Y	500 m

Playground size Z	500 m
Modelo de movilidad	MoBAN
Nominal batería	500 mAh
Capacidad batería	500 mAh
Voltaje de batería	3.3 V
<b>Capa Física</b>	
Frecuencia de portadora	2.4 Ghz
Ruido térmico	-100 dBm
Modelos analógicos de propagación	Simple Pathloss / Lognormal Shad. / Jakes Fading
Sensibilidad del receptor	-84 dBm
Potencia de transmisión máxima	1.1 mW
Corriente de recepción	18.8 mA
Corriente de transmisión	17.4 mA (IEEE802.15.4) / Variable (Capa cruzada)
Corriente en modo sleep	21 $\mu$ A
Corriente Rx-Tx / Tx-Rx	18.8 mA
Corriente setup Rx	0.6391 mA
Corriente setup Tx	0.6845 mA
Tiempo conmutación Rx a Tx	0.21 ms
Tiempo conmutación Rx a Sleep	0.031 ms
Tiempo conmutación Tx a Rx	0.12 ms
Tiempo conmutación Tx a Sleep	0.032 ms
Tiempo conmutación Sleep a Rx	0.103 ms
Tiempo conmutación Sleep a Tx	0.203 ms
Canal	11
<b>Capa de Acceso al Medio (MAC)</b>	
Tasa de transmisión de datos	250kbps
Duración de las ranuras de tiempo	4 ms (Capa cruzada)
Número de ranuras de tiempo (TDMA)	100 (Capa cruzada)
Número máximo de retransmisiones	3 (IEEE802.15.4)
Uso de ranuras GTS	Sí (IEEE802.15.4)
BO (Beacon Order)	8 (IEEE802.15.4)
SO (Super Frame Order)	4 (IEEE802.15.4)
<b>Capa de Aplicación</b>	
Tipo de tráfico	Periódico (30 s o 5 min)
Tamaño del payload	80 bytes (Capa cruzada) / 40 bytes (IEEE802.15.4)
Número de ranuras de tiempo (TDMA)	100 (Capa cruzada)

Tabla 13. Configuraciones generales de los modelos de simulación

## 4. Resultados

---

Como se ha mencionado reiteradamente el objetivo del experimento es hacer una comparación, en cuanto al desempeño en el balance entre consumo de energía y métricas de calidad de servicio, entre el protocolo de capa cruzada y los dos modos de operación del estándar IEEE802.15.4 en el entorno de aplicación de las WBAN. Luego de la aplicación de todos los tratamientos con sus respectivas réplicas se obtuvieron los resultados que se analizarán en detalle en este capítulo.

Sin embargo y como se evidenció en el desarrollo del protocolo, existen algunos ítems de la implementación que dependen mucho de la experiencia de quien corre la simulación, es decir, el protocolo tal y como esta descrito en la publicación de los autores no funciona si se implementa al pie de la letra. En la misma lectura se destacan algunos parámetros que se escogen en tiempo de diseño, como es el caso del número de rondas de transmisión para hacer el cálculo de las métricas, el parámetro  $\lambda$  para la estrategia “gossiping” y el valor inicial de la métrica  $C_i$  de los nodos. Eso sin mencionar que para que la estrategia funcionara correctamente se tuvo que implementar el “work-around” de las tablas de vecinos cercanos de los nodos, aspecto sin el que no se hubieran obtenido los resultados que finalmente se lograron al final de los experimentos.

Lo anterior no hubiera sido posible si no se hubieran primero corrido muchas simulaciones y evaluado el funcionamiento a través de técnicas de depuración de código y mediante la revisión minuciosa de los archivos “log” que arrojaba la simulación. Luego gran parte del éxito depende de un buen trabajo previo en implementación y desarrollo de código.

En principio se pensó que la mejor forma de abordar la verificación de las hipótesis del experimento era a través de un análisis de varianza, ANOVA, de un modelo de efectos fijos. Lamentablemente dada la heterogeneidad de los resultados obtenidos tanto para el par Capa cruzada-IEEE802.15.4 Unslotted como para el par Capa cruzada-IEEE802.15.4 Slotted, no fue posible hacer este tipo de análisis ya que se podía correr el riesgo de hacer conclusiones erróneas y no consistentes con lo reflejado en los resultados.

La razón para que no se pudiera realizar el ANOVA es que al realizar las pruebas tanto estadísticas como gráficas para la verificación de los supuestos (normalidad, homogeneidad de varianzas, independencia) con respecto a los residuales del modelo de efectos fijos, los resultados no dieron cuenta satisfactoria de los supuestos, luego no se podría considerar adecuada cualquier conclusión a la luz de los dictámenes obtenidos al realizar el ANOVA.

La alternativa entonces era la realización de un análisis estadístico exploratorio de los resultados a partir de medidas de resumen y representaciones gráficas de la distribución de

los resultados. Y a partir de las observaciones concluir acerca de las hipótesis planteadas al inicio del experimento.

## 4.1 Capa cruzada - IEEE802.15.4 Unslotted

### 4.1.1 Latencia Extremo a Extremo

Resultados del experimento para la variable respuesta Latencia Extremo a Extremo (Tabla 14).

Protocolo	Tráfico	Nodos	Latencia Extremo a Extremo										
Capa Cruzada	Alto	5	7.9	8.5	8.1	8.3	7.7	7.7	9.7	8.2	8.1	7.9	
		12	7.2	8.3	7.4	7.2	7.2	8.1	9	8	8.5	9.5	
	Bajo	5	10	9.3	8.7	8.1	7.8	9	8.8	7.9	7.5	7.3	
		12	7.1	7.1	8.25	8.35	7.1	7.2	7.2	9	6.8	7.15	
IEEE802.15.4 (Unslotted)	Alto	5	5.7	6	5	5.35	5.78	5.85	5.9	6	5.9	6.2	
		12	5.8	5.8	6	4.9	5.9	5.5	5.7	6.2	5.9	5.2	
	Bajo	5	5.1	5.5	5.8	5.95	5.75	6	5.35	5.5	5.78	5.8	
		12	5.4	5.8	5.4	6	4.8	5.9	4.9	5.2	5.7	6	

Tabla 14. Resultados para Latencia Extremo a Extremo (Modo no ranurado)

En este experimento, ésta fue la única variable respuesta para la que la validación de los supuestos se cumplió exitosamente en su totalidad, como se muestra en las figuras 18, 19 y 20. De modo que las conclusiones con respecto a ésta variable si se consolidaron con base en los resultados de un análisis de varianza ANOVA.

Validación de supuestos:

Normalidad de los residuales

Pruebas estadísticas: Shapiro-Wilk y Anderson-Darling

```

> shapiro.test(residuales)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  residuales
W = 0.959, p-value = 0.01168
> ad.test(residuales)

      Anderson-Darling normality test

data:  residuales
A = 0.734, p-value = 0.05356

```

Figura 18. Prueba de normalidad estadística variable Latencia Extremo a Extremo (Modo no ranurado)

Se observa que la prueba Shapiro-Wilk falla ya que el estadístico de prueba o p-value es menor que el umbral de significancia de la prueba, que en este caso es 0.05. Por el contrario, la prueba Anderson-Darling confirma la normalidad de los residuales ya que el p-value  $> 0.05$ .

Pruebas gráficas: Histograma, diagrama de cajas y Q-Qplot

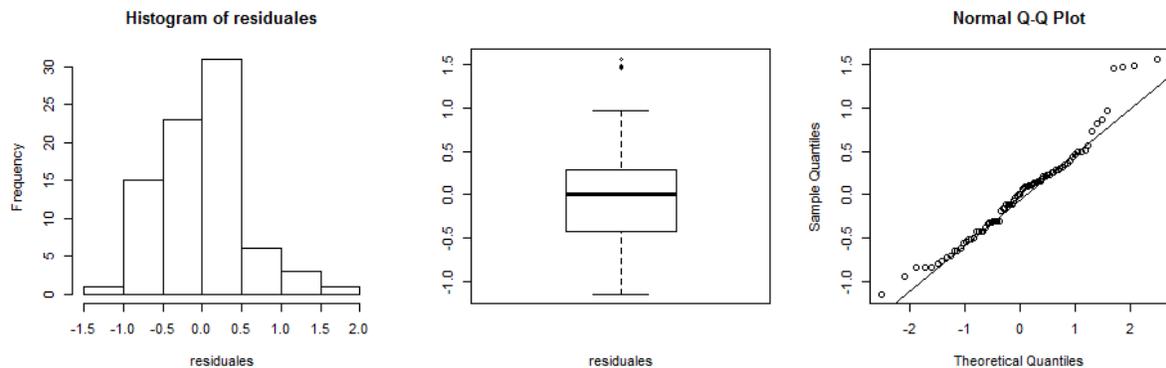


Figura 19. Prueba gráfica de normalidad variable Latencia Extremo a Extremo (Modo no ranurado)

Las pruebas gráficas, en especial al Q-Qplot y el diagrama de cajas confirman la normalidad de los residuales.

Homogeneidad de varianzas e independencia de los residuales

Pruebas estadísticas: Levene-Test (Homogeneidad de varianzas)

La prueba estadística sólo confirma la homogeneidad de varianzas para el factor número de nodos, p-value $>0.05$ . De modo que se debe confirmar con prueba gráfica.

```

> leveneTest(E2EDelay ~ Protocol)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value    Pr(>F)
group 1  17.046 9.075e-05 ***
      78
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> leveneTest(E2EDelay ~ Nodes)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value Pr(>F)
group 1  2.3111 0.1325
      78
> leveneTest(E2EDelay ~ Protocol:Nodes)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value    Pr(>F)
group 3  3.6137 0.01694 *
      76
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Figura 20. Prueba estadística de homogeneidad de varianzas variable Latencia Extremo a Extremo (Modo no ranurado)

Pruebas gráficas: Gráfico de Orden vs Residuales (Homogeneidad de varianzas), Series Residuales (Independencia) (ver Figura 21)

En la prueba gráfica de homogeneidad de varianzas se observa que a pesar de existir algunos puntos alejados del eje horizontal la mayoría se distribuyen uniformemente alrededor del eje, lo que confirma la homogeneidad de varianza de los residuales para la variable respuesta Latencia Extremo a Extremo. En cuanto a la independencia, la prueba gráfica confirma la independencia de los residuales.

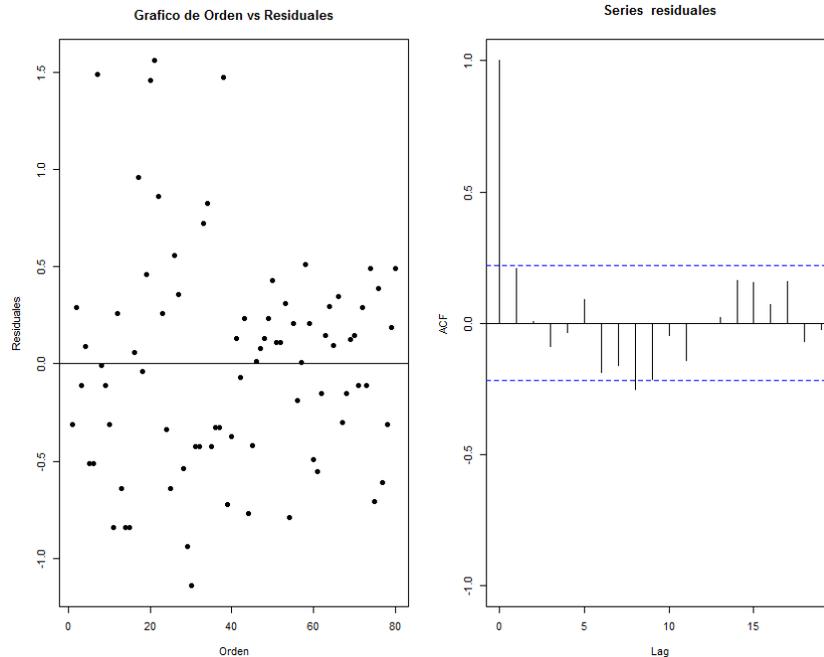


Figura 21. Prueba gráfica de homogeneidad de varianzas e independencia variable Latencia Extremo a Extremo (Modo no ranurado)

### Análisis de varianza (ANOVA)

```
> modelo<-aov(E2EDelay ~ Protocol * Traffic * Nodes)
> summary(modelo)
```

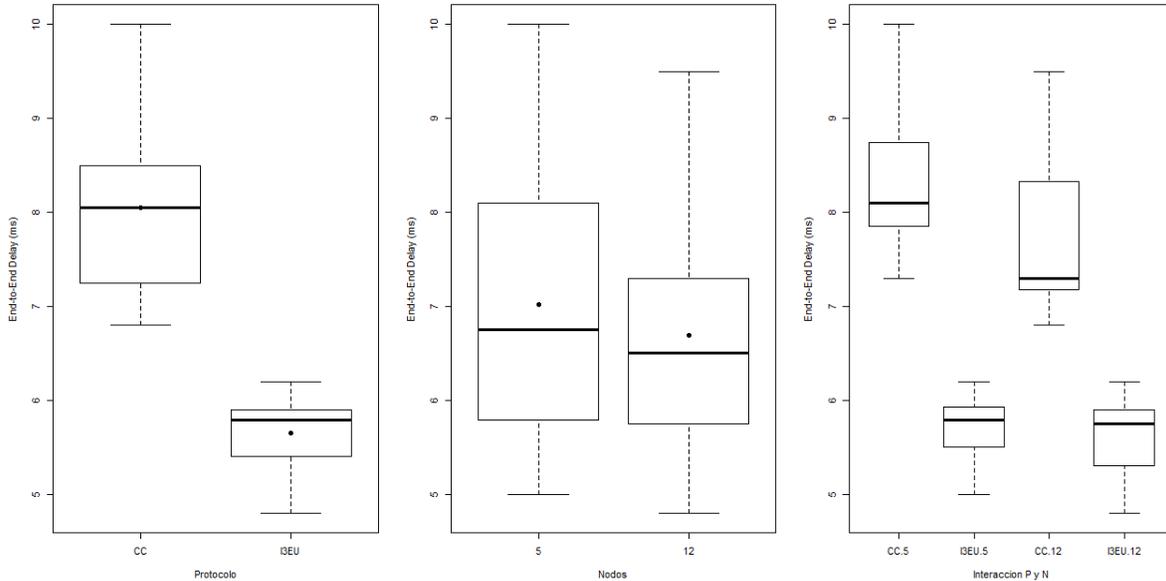
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Protocol	1	115.06	115.06	326.874	<2e-16 ***
Traffic	1	0.42	0.42	1.195	0.2780
Nodes	1	2.13	2.13	6.057	0.0162 *
Protocol:Traffic	1	0.00	0.00	0.000	0.9850
Protocol:Nodes	1	0.93	0.93	2.651	0.1079
Traffic:Nodes	1	0.82	0.82	2.330	0.1313
Protocol:Traffic:Nodes	1	0.58	0.58	1.642	0.2041
Residuals	72	25.34	0.35		

---  
 Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Figura 22. Tabla Análisis de Varianza ANOVA variable Latencia Extremo a Extremo (Modo no ranurado)

En la tabla del análisis de varianza (Figura 22) se observa que con respecto a la variable respuesta Latencia Extremo a Extremo solo los factores Protocolo y Cantidad de nodos tienen efecto significativo, ya que el estadístico de prueba p-value es menor al nivel de significancia,  $p\text{-value} < 0.05$ . Luego solo estos dos factores son susceptibles de algún tipo de análisis en cuanto a su efecto directo en la variable respuesta.

Análisis estadístico gráfico de la influencia de los factores Protocolo y Nodos.



**Figura 23. Diagrama de cajas efecto Protocolo y Nodos en Latencia Extremo a Extremo**

La figura 23 permite observar que la influencia de los factores Protocolo y Nodos en la Latencia Extremo a Extremo, es claramente apreciable. En particular, el efecto debido al factor Protocolo es muy significativo, y que las medias están bastante alejadas la una de la otra. Por tanto, se puede concluir que el protocolo IEEE802.15.4 Unslotted experimenta una menor latencia promedio desde los nodos hasta el nodo coordinador. El efecto debido a la cantidad de nodos no es tan significativo pero de igual forma influye en el cambio del valor promedio de la Latencia Extremo a Extremo. La interacción entre los dos factores tiene un efecto débil. Sin embargo se observa que el protocolo de capa cruzada es influenciado por la cantidad de nodos, lo cual era de esperarse porque este protocolo permite transmisiones multi-salto mientras que el IEEE802.15.4 estaba configurado para funcionar en topología estrella de un solo salto. De modo que a mayor cantidad de nodos que conformen la WBAN se va reducir en un factor la Latencia Extremo a Extremo al emplear el protocolo de Capa cruzada, mientras que ese efecto no ocurrirá al emplear el protocolo IEEE802.15.4.

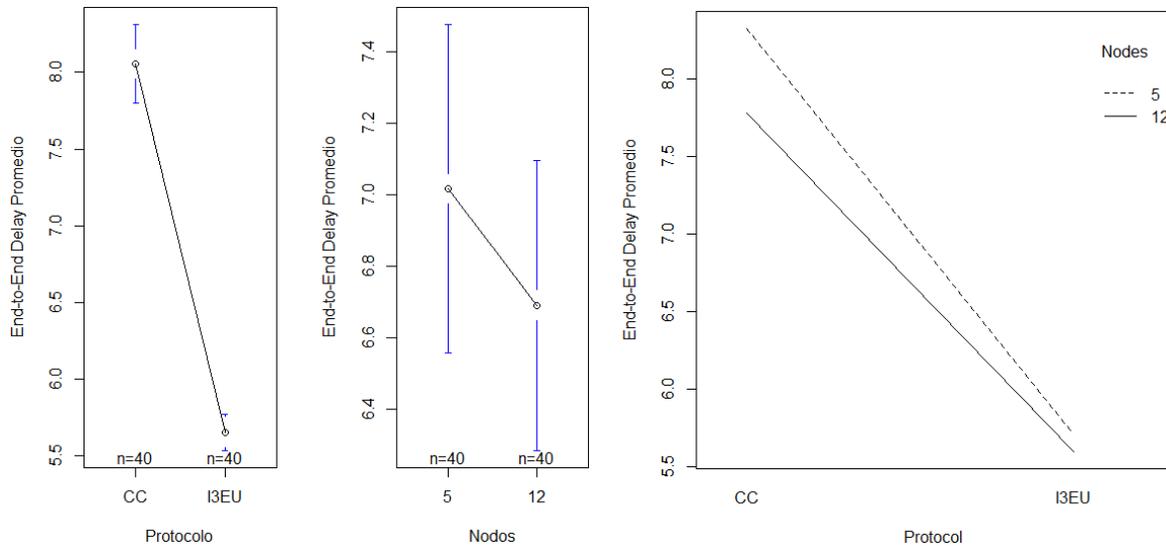


Figura 24. Gráfico de medias de Latencia Extremo a Extremo debido factores Protocolo y Nodos.

Los gráficos de medias y de interacción de los factores de la figura 24 confirman las conclusiones anteriores; un efecto significativo debido al protocolo, un efecto débil pero representativo debido a la cantidad de nodos y una interacción débil entre los dos factores, en especial para la interacción IEEE802.15.4 – Nodos.

La hipótesis alternativa de que el factor protocolo tiene efecto en la Latencia a Extremo a Extremo se acepta y se agrega que el estándar IEEE802.15.4 Unslotted tiene un mejor desempeño con respecto a esta métrica que el protocolo de Capa cruzada.

#### 4.1.2 Tasa de Pérdida de Paquetes

Resultados del experimento para la variable respuesta Tasa de Pérdida de Paquetes (Tabla 15).

Protocolo	Tráfico	Nodos	Tasa de Pérdida de Paquetes											
Capa Cruzada	Alto	5	3.5	5	3.5	5	3	2	1.5	3	2.5	2		
		12	5	2	1.5	2	5	4	5	5	4	3		
	Bajo	5	3.5	2.5	2	2	2.5	3	2	2	1	2		
		12	3	2	4	4	5	2.2	4.5	4	2.5	4.5		
IEEE802.15.4 (Unslotted)	Alto	5	0	0	1	1	1	1	0	0.5	1	1		
		12	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0		
	Bajo	5	1	0.5	0.5	1	0	0	1	0	0	0.5		
		12	0	0	1	1	1	0.5	0	0	1	0		

Tabla 15. Resultados para Tasa de Pérdida de Paquetes (Modo no ranurado)

Los residuales de esta variable respuesta no cumplen con la verificación de supuestos, y por tanto no es conveniente concluir con base en los resultados que se puedan obtener de un análisis de varianza ANOVA. Se hace entonces un análisis estadístico exploratorio para sacar conclusiones de acuerdo a lo que se pueda apreciar directamente en los resultados.

En los gráficos de la figura 25, se puede observar la influencia de los 3 factores en la Tasa de Pérdida de Paquetes: la diferencia de medias de mayor magnitud es debida al efecto del factor protocolo, los otros dos factores también tienen efectos en la variable respuesta a pesar de ser casi despreciables. Se puede apreciar también en los gráficos la gran variabilidad que se da en la variable respuesta para los factores Nodos y Tráfico.

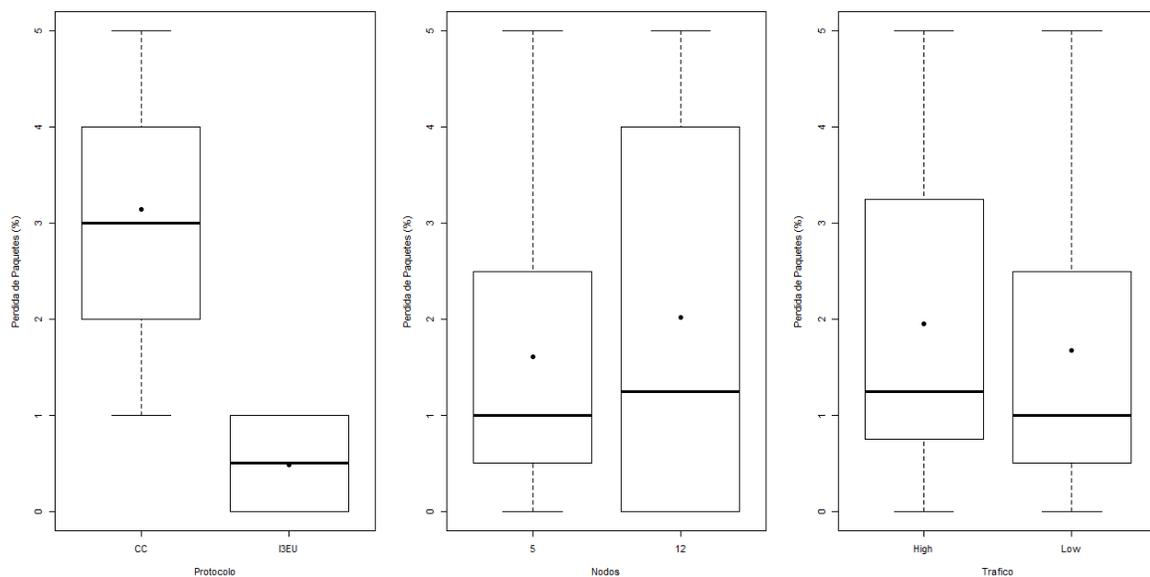


Figura 25. Diagrama de cajas efecto Protocolo, Nodos y Tráfico en la Tasa de Pérdida de Paquetes

El gráfico de medias de la figura 26 confirma el rechazo de la hipótesis nula de que los efectos en la Tasa de Pérdida de Paquetes debidos al factor Protocolo son nulos. Se observa también que con respecto a esta métrica el desempeño de los protocolos del estándar IEEE802.15.4 en el modo Unslotted es superior al del protocolo de capa cruzada, lo cual de alguna forma era previsible, ya que los nodos en los que está implementado el protocolo de capa cruzada experimentaron durante los primeros instantes de la simulación un proceso de ajuste de la potencia de transmisión para mejorar sus métricas de modo que un porcentaje de los paquetes generados en esa etapa se perdieron. Por el contrario, los nodos de IEEE802.15.4 Unslotted desde el principio están en modo escucha y transmitiendo a la potencia más alta, de modo que la probabilidad de pérdida de paquetes es menor en comparación con los nodos con el protocolo de capa cruzada.

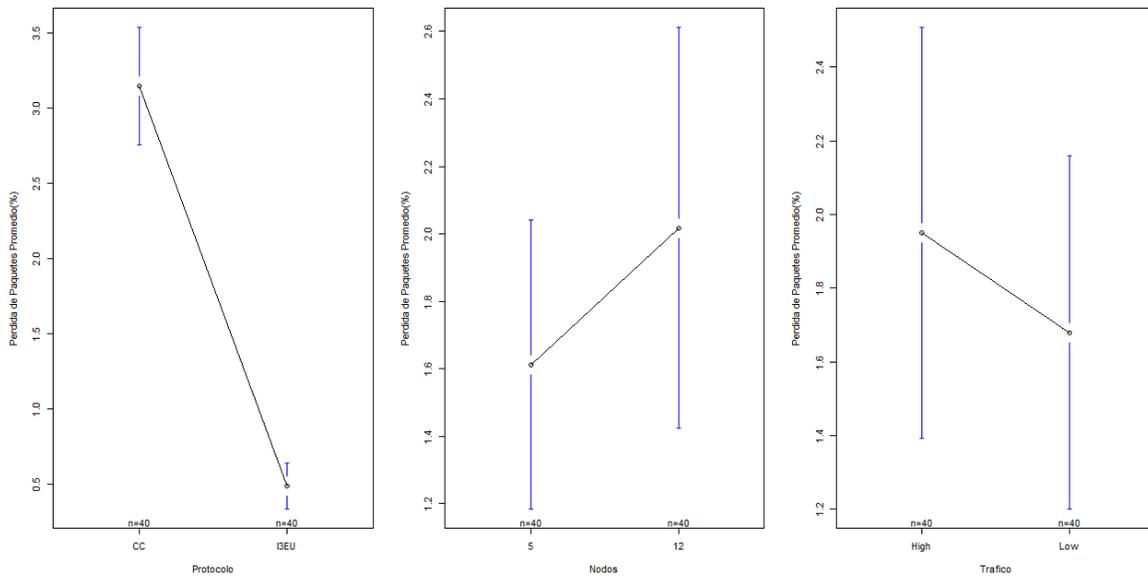


Figura 26. Gráfico de medias de la Tasa de Pérdida de Paquetes respecto a los factores

Tal y como se había mencionado anteriormente, las interacciones no son muy significativas, pero en cuanto a esta métrica cualquier porcentaje representa una cantidad considerable de paquetes que se perdieron en las transmisiones. En la figura 27 se observa que las interacciones en las que se ve involucrado el factor Protocolo, el desempeño termina ajustándose al del protocolo actuando individualmente. Esto ocurre inclusive en el caso del estándar IEEE802.15.4, en el cual la interacción arroja un efecto casi nulo.

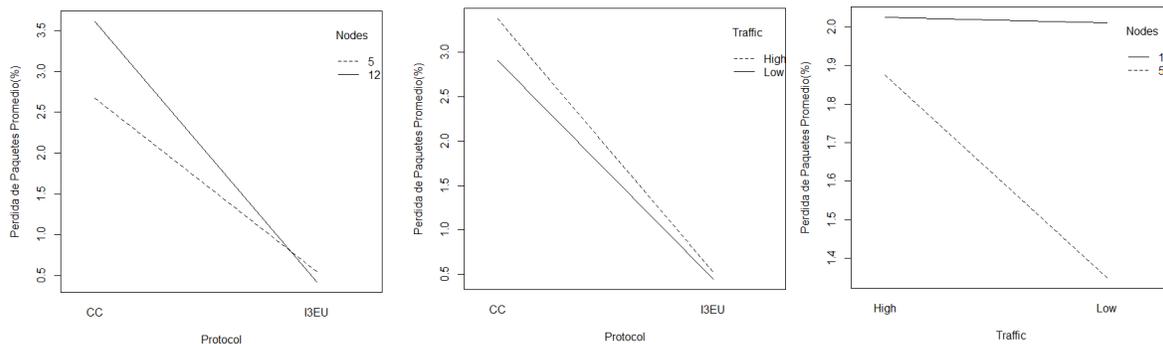


Figura 27. Interacciones entre los factores con respecto a la variable respuesta Tasa de Pérdida de Paquetes

### 4.1.3 Goodput

Resultados del experimento para la variable respuesta Goodput (Tabla 16).

Protocolo	Tráfico	Nodos	Goodput									
Capa Cruzada	Alto	5	85.33	84.48	84.48	84.48	84.48	85.33	84.91	84.48	84.48	85.53
		12	128.45	122.93	126.45	122.93	127.63	129.97	131.15	127.63	128.8	129.97
	Bajo	5	8.45	8.53	8.53	8.53	8.53	8.45	8.45	8.45	8.45	8.53
		12	23	23.11	23	22.29	22.76	22.53	22.29	22.29	22.53	22.85
IEEE802.15.4 (Unslotted)	Alto	5	42.45	42.45	42.24	42.67	42.67	42.24	42.67	42.67	42.45	42.67
		12	114.4	114.99	114.99	114.4	113.81	114.99	114.99	116.35	114.99	113.81
	Bajo	5	4.27	4.22	4.22	4.22	4.25	4.27	4.27	4.22	4.27	4.27
		12	11.5	11.26	11.26	11.15	11.48	11.21	11.26	11.44	11.21	11.75

Tabla 16. Resultados para Goodput (Modo no ranurado)

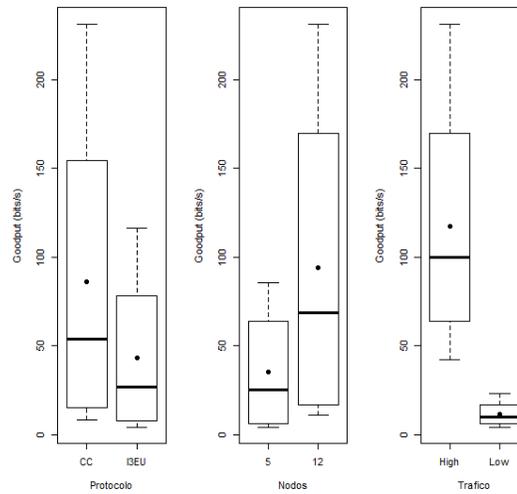
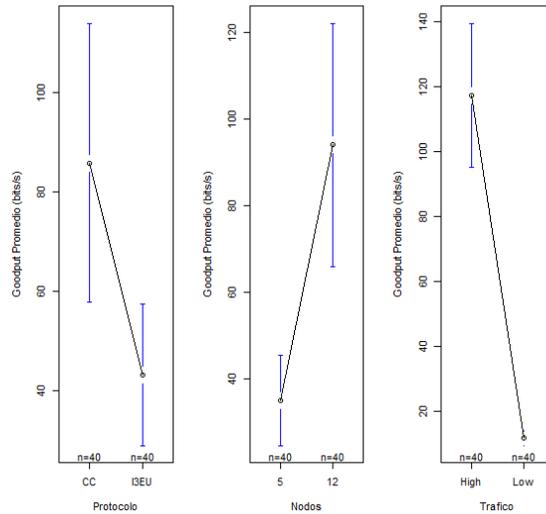


Figura 28. Diagrama de cajas efecto Protocolo, Nodos y Tráfico en el Goodput

La figura 28 permite observar la gran variabilidad que se presenta en los resultados del experimento para esta variable respuesta, lo cual se deriva de los resultados tan disímiles para los distintos tratamientos en cuanto a entrega de paquetes, debido al número de nodos y el tráfico. Y los diagramas de cajas (Figura 28) confirman lo anterior siendo el factor tráfico el que incide de mayor manera en el Goodput, ya que la cantidad de bits transmitidos a lo largo de la simulación es distinta para los dos niveles de este factor. Este es un resultado esperado, ya que la tasa de bits transmitidos correctamente al nodo coordinador en todo el tiempo de simulación es mayor para niveles mayores de tráfico.



**Figura 29. Gráfico de medias de Goodput respecto a los factores**

A pesar de la fuerte influencia del factor tráfico, también se evidencian efectos influenciados por los otros factores. Con respecto al factor nodo, el resultado también coincide con el esperado, ya que la cantidad de paquetes generados por la WBAN incrementa en la medida en que crece el número de nodos. Por tanto, el factor que más llama la atención y que vale la pena analizar más a fondo es el protocolo, ya que con respecto a este factor se llega a una conclusión particular: al observar la diferencia de medias en la figura 29 se esperaría que el Goodput de la red con IEEE802.15.4 Unslotted fuera superior ya que la Tasa de Pérdida de Paquetes de este esquema fue inferior, como se observó anteriormente. Sin embargo, los resultados dan cuenta del efecto contrario. Para explicar este hecho, debe recordarse que el Goodput mide la cantidad de bits transmitidos por unidad de tiempo, en este caso segundos. De modo que, al remitirnos al diseño del protocolo de capa cruzada, observamos que en cada transmisión los nodos transmiten sus datos y los de un vecino, o sea que los paquetes que envían estos nodos son más grandes. Por tanto, el Goodput se ve favorecido al usar el protocolo de capa cruzada.

#### 4.1.4 Consumo de energía

Resultados del experimento para la variable respuesta Consumo de Energía (Tabla 17).

Para la variable consumo de energía se tomaron medidas del porcentaje promedio de energía remanente en la batería de los nodos de la red. En la figura 30 se observa el efecto casi despreciable debido a la cantidad de nodos y al nivel de tráfico. Se evidencia, asimismo, la gran influencia aportada por el factor Protocolo, y que la brecha entre el porcentaje de batería remanente entre los dos protocolos es bastante amplia. A simple vista, se observa que el protocolo de capa cruzada es el que ahorra más energía, inclusive se puede afirmar que en promedio los nodos con los protocolos de IEEE802.15.4 Unslotted llegaron a prácticamente agotar sus baterías en todo el tiempo de simulación, mientras que

los nodos del protocolo de capa cruzada ahorraron en promedio el 80% de la batería, un resultado bastante satisfactorio con respecto a esta métrica.

Protocolo	Tráfico	Nodos	Consumo de energía									
Capa Cruzada	Alto	5	90	89.9	89.9	90	90	90.1	89.9	89.9	90	89.9
		12	78.1	77.5	77.4	77.5	77.5	78	77.3	77.3	77.2	77.3
	Bajo	5	91	92	90	91	90	89.9	90	91	89.9	91
		12	77.2	77.2	77.3	77.1	77.3	77.4	77.3	77.2	77.2	77.2
IEEE802.15.4 (Unslotted)	Alto	5	9.6	9.5	9.7	9.7	9.7	9.6	9.5	9.5	9.6	9.6
		12	9.7	9.8	9.7	9.8	9.8	9.9	9.8	9.8	9.9	9.8
	Bajo	5	9.7	9.7	9.7	9.6	9.6	9.7	9.8	9.7	9.7	9.7
		12	9.9	9.8	10	10.1	9.9	9.8	9.9	10	9.9	10.1

Tabla 17. Resultados para Consumo de energía (Modo no ranurado)

En el diagrama de cajas también se aprecia que la variabilidad en el Consumo de Energía debida al factor Protocolo es poca y la distribución de los datos es simétrica, lo cual garantiza que el funcionamiento del Protocolo no se ve significativamente afectado por perturbaciones externas a la red que en este caso se podrían atribuir directamente a las características variantes del canal y a la movilidad (cambio de posturas) de los nodos de la WBAN. Es decir, los protocolos están soportando bien la movilidad de la red y la transmisión de datos en el cuerpo humano, pero la diferencia en el consumo de energía, se puede explicar a la luz del funcionamiento de las dos estrategias.

El protocolo de capa cruzada tiene un ciclo de dureza de funcionamiento relativamente bajo (los nodos pasan la mayor parte del tiempo en modo de bajo consumo y gracias a las estrategias de “gossiping” y “adaptación de potencia de transmisión” los nodos hacen sus transmisiones a niveles de potencia muy bajos), mientras que los nodos bajo el estándar IEEE802.15.4 Unslotted transmiten a la máxima potencia y fundamentalmente debido al esquema Unslotted los nodos siempre están en “modo escucha” y por tanto pasan la mayor parte del tiempo con el radio encendido y consumiendo energía constantemente.

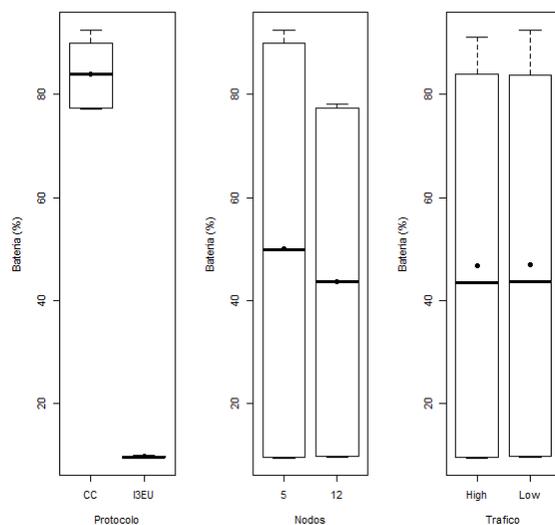


Figura 30. Diagrama de cajas efecto Protocolo, Nodos y Tráfico en el Consumo de Energía

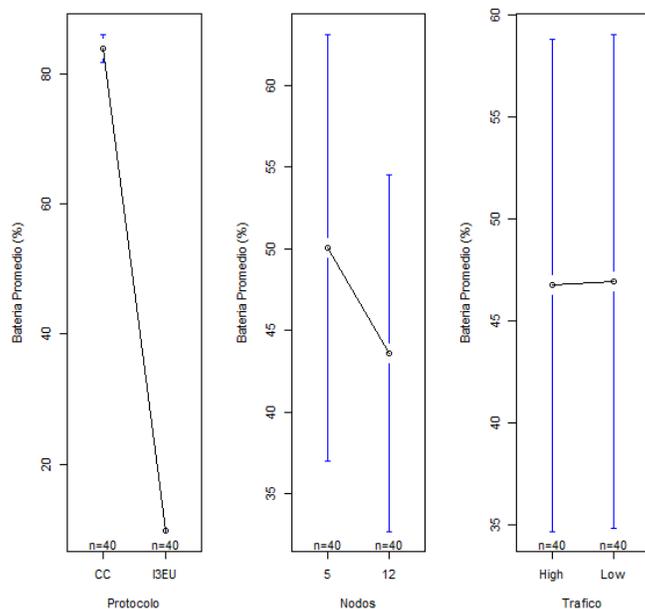


Figura 31. Gráfico de medias del Consumo de Energía respecto a los factores

Se acepta la hipótesis alternativa de que el factor Protocolo sí tiene efecto en el Consumo de Energía de la WBAN ya que las medias de dicha variable respuesta con respecto a los niveles del factor son distintas. El gráfico de medias de la figura 31 permite confirmar la conclusión de que el protocolo de capa cruzada permite que la WBAN consuma menos energía que si se implementara el estándar IEEE802.15.4 en el modo Unslotted.

Adicionalmente, se observa un efecto del factor Nodos: según las figuras anteriores, los nodos ahorran más energía cuando la red está conformada por pocos nodos, en este caso la red con 5 nodos es más eficiente en el consumo de energía que la red compuesta por 12 nodos, la diferencia no es muy significativa pero ya que es observable en los gráficos, se debe tener en cuenta. La figura 32 da cuenta de la interacción entre los factores Protocolo y Nodos, se observa que el consumo de energía más eficiente ocurre cuando se usa el protocolo de capa cruzada y la WBAN tiene pocos nodos, en este caso 5. Esta última conclusión era de esperarse, ya que en redes de menor cantidad de nodos éstos tienen ciclos de dureza más cortos por lo tanto el periodo activo en la trama TDMA es también más corto, de modo que se limita aún más el encendido del radio de comunicaciones en escenarios de pocos nodos.

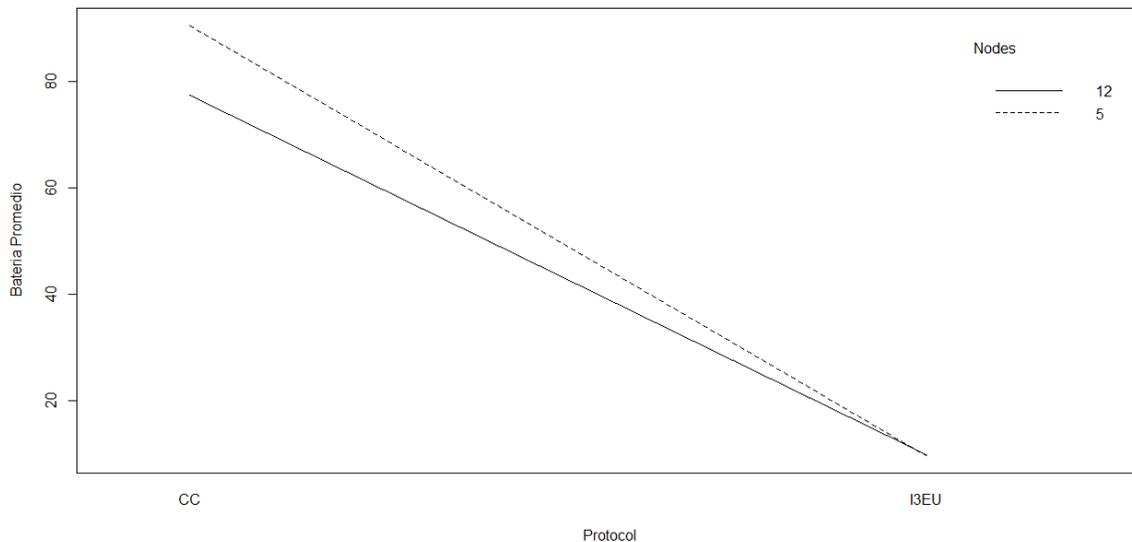


Figura 32. Interacción factores Protocolo y Nodos en el Consumo de Energía

## 4.2 Capa cruzada - IEEE802.15.4 Slotted

### 4.2.1 Latencia Extremo a Extremo

Resultados del experimento para la variable respuesta Latencia Extremo a Extremo (Tabla 18).

Protocolo	Tráfico	Nodos	Latencia Extremo a Extremo									
Capa Cruzada	Alto	5	7.9	8.5	8.1	8.3	7.7	7.7	9.7	8.2	8.1	7.9
		12	7.2	8.3	7.4	7.2	7.2	8.1	9	8	8.5	9.5
	Bajo	5	10	9.3	8.7	8.1	7.8	9	8.8	7.9	7.5	7.3
		12	7.1	7.1	8.25	8.35	7.1	7.2	7.2	9	6.8	7.15
IEEE802.15.4 (Slotted)	Alto	5	60.9	58.4	56.2	59.5	65.5	62.3	62.25	58.9	61.4	62
		12	57.8	56.5	55.9	56.5	54.95	55.6	56.7	57.45	58.2	56.9
	Bajo	5	65.1	64.85	64.24	63.7	65.1	64.4	65.15	62.95	66	65.4
		12	64.33	61.5	60.85	59.8	61.45	62.2	60.35	61.2	61.6	60.9

Tabla 18. Resultados para Latencia Extremo a Extremo (Modo ranurado)

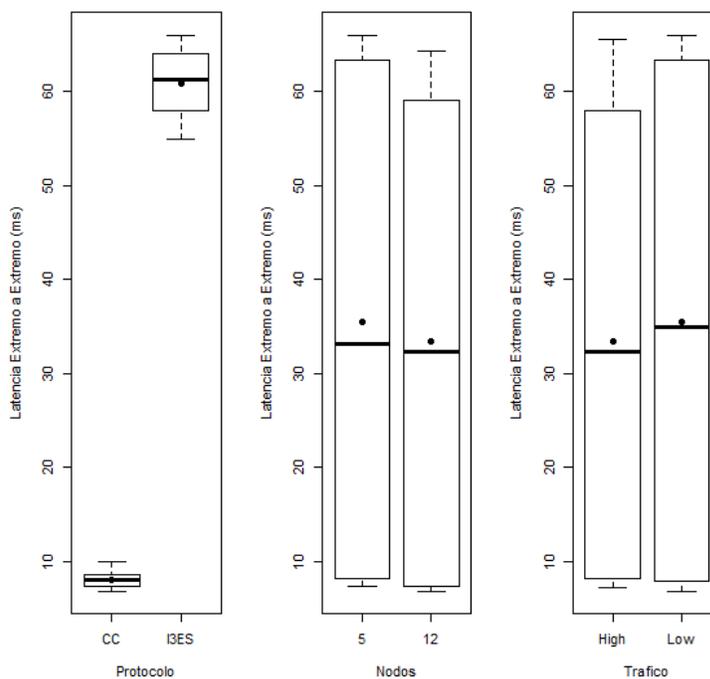


Figura 33. Diagrama de cajas efecto Protocolo, Nodos y Tráfico en la Latencia Extremo a Extremo

A partir de la figura 33 se puede argumentar que el efecto de los factores Nodos y Tráfico no es realmente significativo, el verdadero efecto lo imprime el factor Protocolo, que es el principal factor de interés en este experimento. Se advierte cómo la distribución de los resultados de la Latencia Extremo a Extremo para los dos niveles del factor Protocolo se ajusta mucho a una distribución normal.

De acuerdo con el diagrama de cajas de la figura 33 y el diagrama de medias de la figura 34, el protocolo de capa cruzada es el que presenta la menor Latencia Extremo a Extremo promedio en las transmisiones, y la diferencia con respecto al estándar IEEE802.15.4

Slotted es bastante considerable. Puede afirmarse entonces que la Latencia Extremo a Extremo del estándar IEEE802.15.4 Slotted es en promedio 10 veces mayor en comparación con la que se presenta al usar el protocolo de capa cruzada en la WBAN.

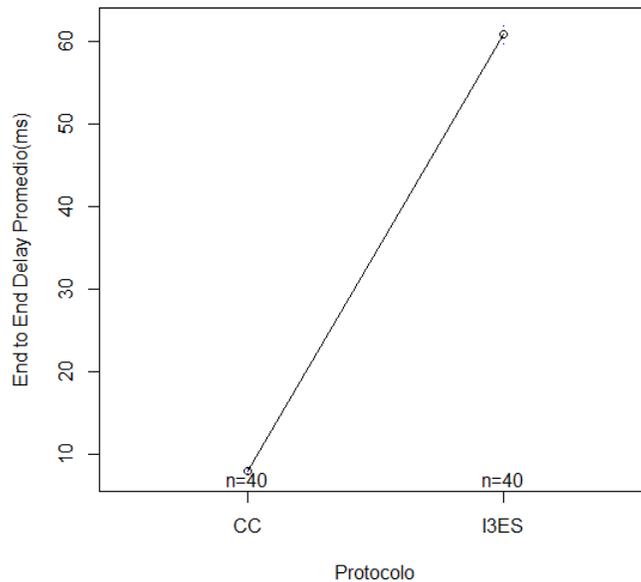


Figura 34. Diferencia de medias de la Latencia Extremo a Extremo debida al factor Protocolo

Al igual que como sucedió en el experimento anterior (IEEE802.15.4 Unslotted), se rechaza la hipótesis nula de que el efecto en la Latencia Extremo a Extremo debido al factor Protocolo es nula, pero por el contrario en esta ocasión el protocolo de capa cruzada es el que exhibe el mejor desempeño.

Con respecto a esta conclusión, no se puede establecer con seguridad una conjetura o una predicción, del modo que se hizo en las variables respuestas para el experimento anterior. Sin embargo, se podría atribuir el retardo en las transmisiones a problemas de sincronización de la red: en los archivos log de la simulación se observó que debido a los cambios de postura, en ocasiones los nodos no recibían los “beacon” del nodo coordinador y por tanto, a pesar de que se generaban los paquetes, éstos no podían ser enviados sino hasta que se recibía un nuevo “beacon” para reservar la transmisión para la siguiente ronda de transmisión, eso sin tener en cuenta las retransmisiones que se pudieran dar.

#### 4.2.2 Tasa de Pérdida de Paquetes

Resultados del experimento para la variable respuesta Tasa de Pérdida de Paquetes (Tabla 19).

Protocolo	Tráfico	Nodos	Tasa de Pérdida de Paquetes									
Capa Cruzada	Alto	5	3.5	5	3.5	5	3	2	1.5	3	2.5	2
		12	5	2	1.5	2	5	4	5	5	4	3
	Bajo	5	3.5	2.5	2	2	2.5	3	2	2	1	2
		12	3	2	4	4	5	2.2	4.5	4	2.5	4.5
IEEE802.15.4 (Unslotted)	Alto	5	12	12.5	12	11.8	11.8	12	12.2	12	12.4	11.9
		12	13	12.6	13	12.7	12.65	12.8	12.8	12.7	12.6	12.9
	Bajo	5	11.85	11.9	11.9	12	12.1	12	11.85	11.9	12	12
		12	12.7	12.8	12.8	13	13.1	12.95	12.85	12.8	13	13

Tabla 19. Resultados para Tasa de Pérdida de Paquetes (Modo ranurado)

El factor que exhibe un efecto significativo en la Tasa de Pérdida de Paquetes de acuerdo al diagrama de cajas de la figura 35 es el factor Protocolo, pero hay que recordar que esta tasa mide un porcentaje de paquetes perdidos en la simulación, de modo que cualquier diferencia porcentual por insignificante que se observe en las gráficas representa una cantidad no despreciable de paquetes que se pierden y que afectan el desempeño de esta métrica. De acuerdo con esta afirmación, es necesario analizar la interacción entre el factor que exhibe el efecto de mayor magnitud con los demás factores.

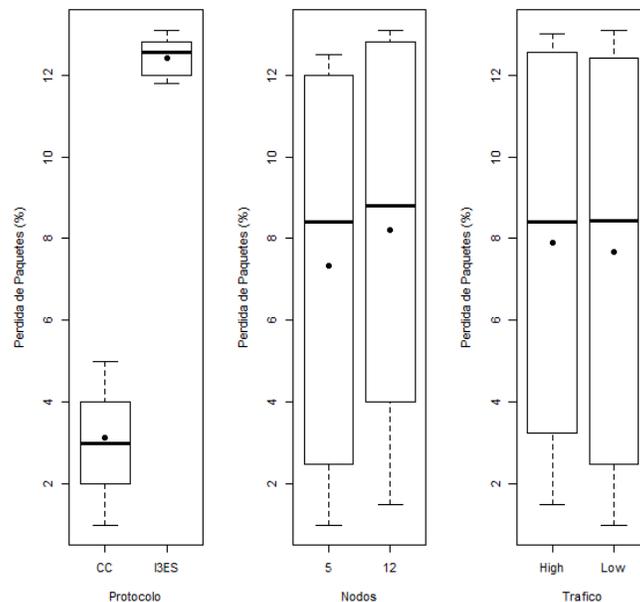


Figura 35. Diagrama de cajas efecto Protocolo, Nodos y Tráfico en la Tasa de Pérdida de Paquetes

Según se observa en el gráfico de medias de la figura 36 y los gráficos de interacción entre el factor Protocolo y los factores Nodos y Tráfico (ver Figura 37), los tratamientos que

aseguran una menor tasa de pérdida de paquetes son aquellos en los que se combinan los niveles protocolo de capa cruzada, 5 nodos y tráfico bajo de los factores Protocolo, Nodos y Tráfico, respectivamente. El efecto de la interacción entre los factores Protocolo y Tráfico no es realmente significativo mientras que el efecto de la interacción entre Protocolo y Nodos sí es más perceptible a pesar de que el porcentaje de diferencia de la variable respuesta entre tratamientos no es superior al 1% en la gran mayoría de los casos.

A partir del análisis de las interacciones, se puede asegurar que el único factor realmente influyente es el Protocolo y que se rechaza la hipótesis nula planteada al diseñar el experimento. En esta oportunidad, el protocolo de capa cruzada es el que ofrece el mejor desempeño en cuanto a pérdida de paquetes se refiere.

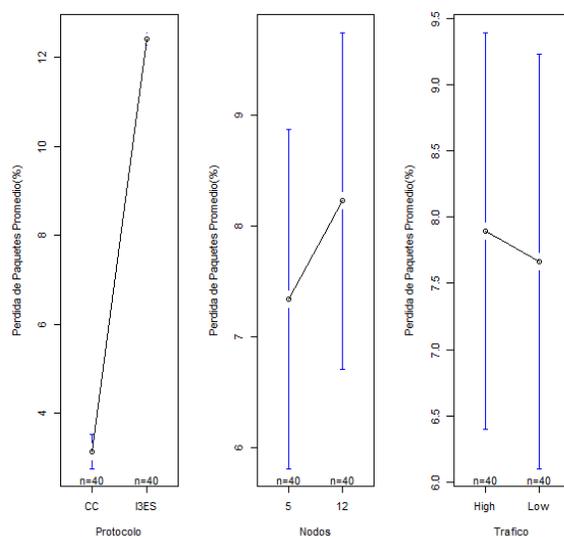


Figura 36. Gráfico de medias de la Tasa de Pérdida de Paquetes respecto a los factores

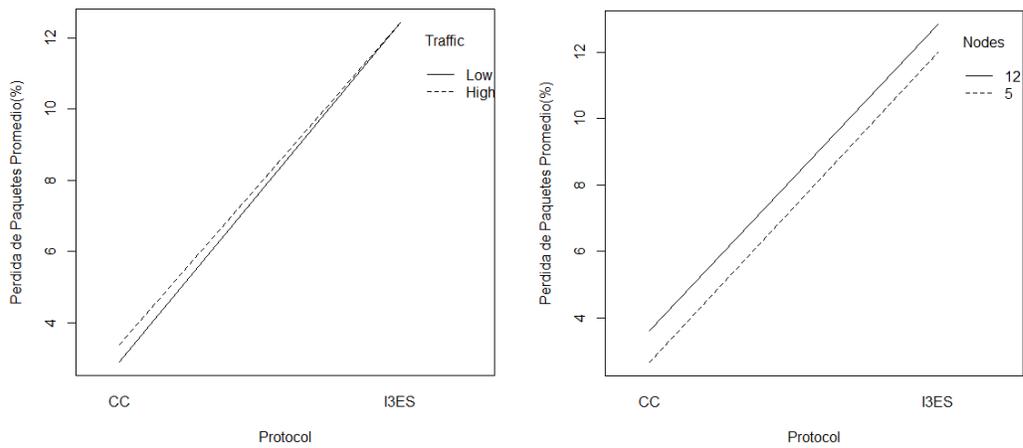


Figura 37. Interacciones entre los pares Protocolo-Tráfico y Protocolo-Nodos

### 4.2.3 Goodput

Resultados del experimento para la variable respuesta Goodput (Tabla 20).

Protocolo	Tráfico	Nodos	Goodput									
Capa Cruzada	Alto	5	85.33	84.48	84.48	84.48	84.48	85.33	84.91	84.48	84.48	85.53
		12	126.45	122.93	126.45	122.93	127.63	129.97	131.15	127.63	128.8	129.97
	Bajo	5	8.45	8.53	8.53	8.53	8.53	8.45	8.45	8.45	8.45	8.53
		12	23	23.11	23	22.29	22.76	22.55	22.29	22.29	22.55	22.65
IEEE802.15.4 (Slotted)	Alto	5	37.55	37.33	37.55	37.63	37.63	37.55	37.46	37.55	37.38	37.59
		12	102.08	102.55	102.08	102.43	102.49	102.31	102.31	102.43	102.55	102.2
	Bajo	5	3.76	3.76	3.76	3.75	3.75	3.76	3.76	3.75	3.75	3.75
		12	10.24	10.23	10.23	10.21	10.2	10.21	10.23	10.21	10.21	10.23

Tabla 20. Resultados para Goodput (Modo ranurado)

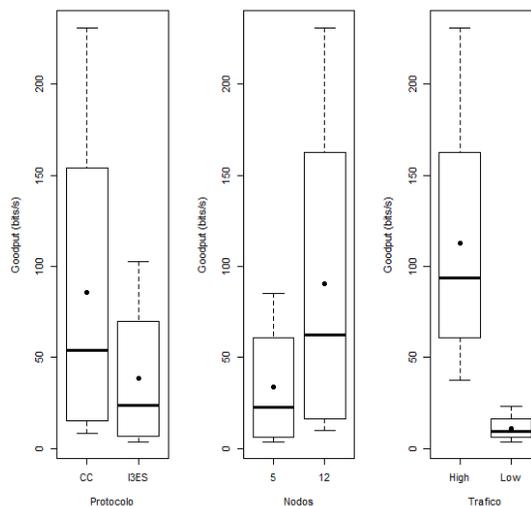


Figura 38. Diagrama de cajas efecto Protocolo, Nodos y Tráfico en el Goodput

Al igual que en el experimento anterior, la variable respuesta que presenta las distribuciones con mayor asimetría y variabilidad en los resultados es el Goodput (ver figura 38), lo cual, como ya se había mencionado con anterioridad, se debe principalmente al cambio brusco en la transmisión de paquetes por unidad de tiempo inducida por los niveles de los factores Nodos y Tráfico.

Para ser consistentes con lo mencionado anteriormente, vale la pena anotar que los 3 factores tienen efecto en la variable respuesta, siendo más significativos los efectos debidos a los factores Nodos y Tráfico. Las pendientes de las gráficas de medias de la figura 39 confirman esta afirmación y también permiten observar que los niveles de los factores que aportan a un mejor desempeño de la tasa de bits correctamente transmitidos por segundo son el protocolo de capa cruzada, 12 nodos y tráfico alto para los factores Protocolo, Nodos y Tráfico respectivamente.

Las gráficas de interacción de los factores (ver figura 40) deben confirmar que los casos en los que el Goodput exhibe un mejor desempeño son aquellos cuyos tratamientos corresponden a las combinaciones de los niveles de los factores que individualmente muestran un mejor desempeño respecto a esta métrica. Y en efecto así es, y no solo eso sino que las interacciones son relevantes porque confirman que a mayor cantidad de bits que se generan y transmiten en un intervalo determinado de tiempo, es mayor la cantidad que pueden ser transmitidos exitosamente por unidad de tiempo. O sea que en este caso, al igual con el modo Unslotted, el tratamiento que va reportar los mejores resultados va ser el que genere paquetes de mayor cantidad de bits (protocolo de capa cruzada), específicamente

quel que tenga el mayor número de nodos y que haga transmisiones con mayor periodicidad.

Con respecto a la hipótesis del experimento, se corrobora que el protocolo de capa cruzada es el que permite un mejor desempeño de la métrica Goodput, obviamente con el sacrificio que se hace al tener que aumentar el tamaño de las ranuras de transmisión para evitar fragmentar paquetes y realizar retransmisiones.

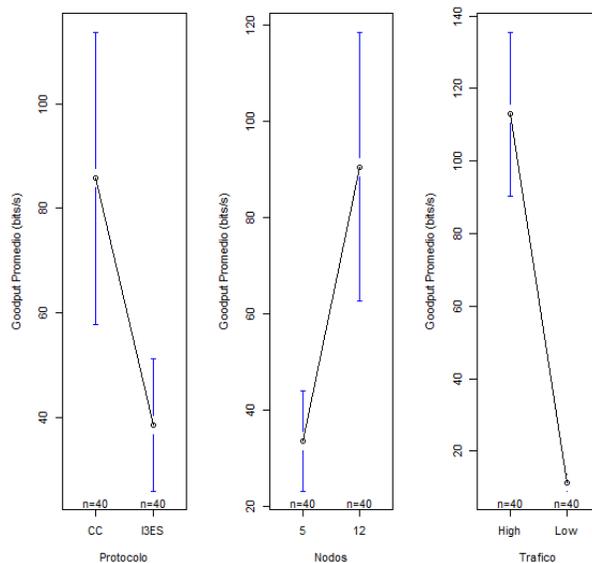


Figura 39. Diferencia de medias para el Goodput debido a los factores del experimento

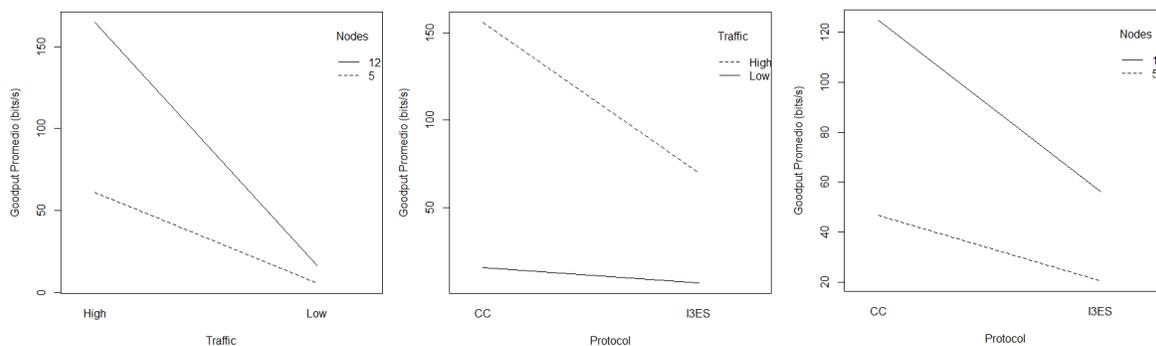


Figura 40. Interacciones entre los pares Tráfico-Nodos, Protocolo-Tráfico y Protocolo-Nodos para la variable respuesta Goodput

#### 4.2.4 Consumo de energía

Resultados del experimento para la variable respuesta Consumo de Energía (Tabla 21).

Con respecto a esta métrica, se cumplen prácticamente las mismas premisas que en el experimento con el IEEE802.15.4 Unslotted. La gran diferencia radica en que en esta oportunidad el protocolo que refleja un consumo de energía menor es el IEEE802.15.4 Slotted (ver figuras 41, 42 y 43). Este fenómeno se atribuye fundamentalmente a que a diferencia del modo de operación Unslotted, en este modo los nodos sí cuentan con un periodo de funcionamiento en el que permanecen inactivos con sus radios en modos de bajo consumo.

Protocolo	Tráfico	Nodos	Consumo de energía											
Capa Cruzada	Alto	5	90	89.9	89.9	90	90	90.1	89.9	89.9	90	89.9		
		12	78.1	77.5	77.4	77.5	77.5	78	77.3	77.3	77.2	77.3		
	Bajo	5	91	92	90	91	90	89.9	90	91	89.9	91		
		12	77.2	77.2	77.3	77.1	77.3	77.4	77.3	77.2	77.2	77.2		
IEEE802.15.4 (Slotted)	Alto	5	94.2	93.9	96.4	93.5	96.4	95.6	95.6	96.4	95.6	96		
		12	96.3	96.4	96.4	93.5	95.5	93.9	94.7	96.2	95.8	94.2		
	Bajo	5	97.5	97.8	97	96.8	96.3	95.9	98	97.5	97.3	96.9		
		12	96.9	97.3	98	95.5	96.7	96.4	96	96.5	97.2	96.6		

Tabla 21. Resultados para Consumo de energía (Modo ranurado)

A simple vista, podría pensarse entonces que los consumos entre ambos protocolos no deberían ser solo similares sino prácticamente iguales, pero esta conjetura se ve obstaculizada al tener en cuenta que en el caso del estándar IEEE802.15.4 Slotted, los nodos no necesitan escuchar a sus vecinos ya que no envían ítems de datos pertenecientes a éstos, y por tanto los periodos de escucha son mínimos, se reducen solo a los periodos en los que es obligatorio escuchar al nodo coordinador y a los periodos en los que se debe escuchar el canal para participar en las contiendas y verificar que el canal esté libre. Adicionalmente las ranuras de transmisión, por contienda o ranuras GTS (Guaranteed Time Slots) son más estrechas que las que se definieron para que el protocolo de capa cruzada pudiera transmitir todos los datos en una sola ranura.

Para esta métrica, también se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa ya que los factores sí inciden en el porcentaje promedio que se observa de conservación de la energía en la batería. Los gráficos de interacciones entre los factores de la figura 43 permiten vislumbrar que el tratamiento que ofrece el manejo más eficiente de energía corresponde a la combinación del estándar IEEE802.15.4 en modo Slotted, nivel bajo de tráfico y menor cantidad de nodos.

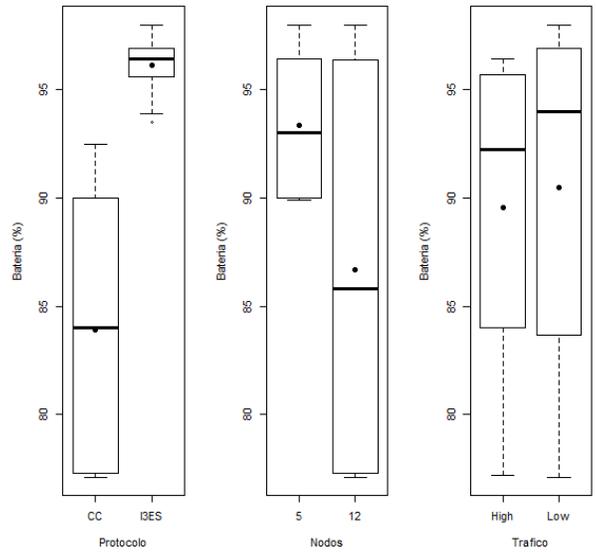


Figura 41. Diagrama de cajas efecto Protocolo, Nodos y Tráfico en el Consumo de Energía

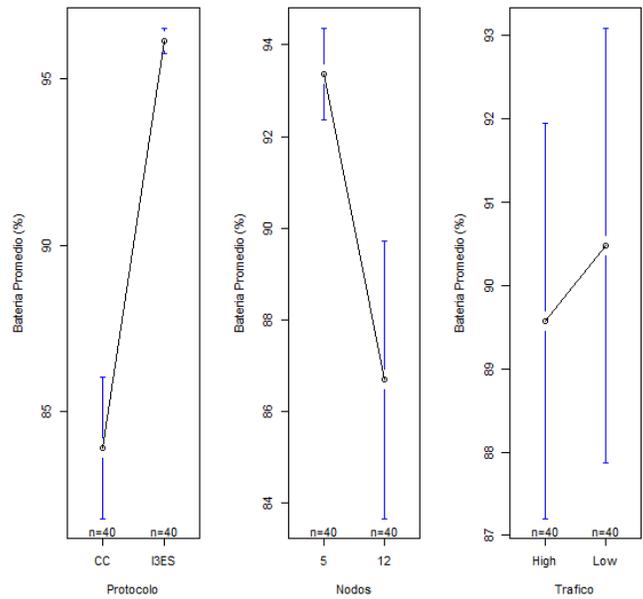


Figura 42. Gráfico de medias del Consumo de Energía respecto a los factores

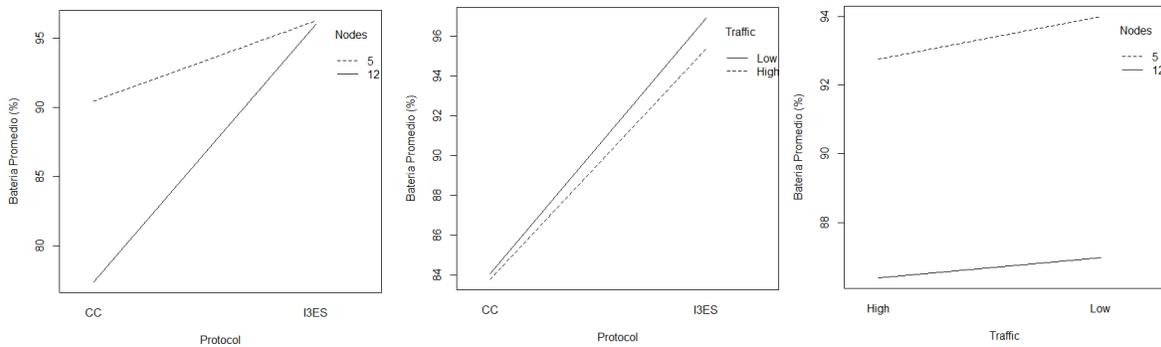


Figura 43. Interacciones entre los pares Tráfico-Nodos, Protocolo-Tráfico y Protocolo-Nodos para la variable respuesta Consumo de Energía

### 4.3 Potencia de transmisión

En el artículo del protocolo de capa cruzada, se aseguraba que uno de los aspectos más importantes que se había observado al probar el protocolo era la potencia a la cual transmitían los nodos. Se mencionaba que los nodos transmitían a bajas potencias y que en general no transmitían a la máxima potencia a la que podían radiar los radios utilizados para la transmisión de datos.

Además, un aspecto en el que se hacía mucho hincapié en los artículos revisados en el estado del arte (investigación referente a WBAN) era la necesidad de reducir los niveles de radiación electromagnética en el cuerpo humano, de modo que un esquema adecuado de comunicaciones para WBAN debe tener en cuenta este aspecto y por tanto ofrecer un desempeño eficaz y confiable en las comunicaciones que ofrezca un buen balance entre consumo de energía y métricas de calidad de servicio, y que a la par permita que los nodos puedan transmitir a bajas potencias para que no haya repercusiones futuras en el cuerpo humano debido al uso de la WBAN.

#### WBAN de 5 nodos

Las figuras 44 y 45 ilustran la potencia de transmisión en cada uno de los nodos de la WBAN en dos réplicas elegidas al azar, una correspondía a transmisiones cada 30 segundos (figura 42) y la otra correspondía a transmisiones cada 5 minutos (figura 43).

En ambas gráficas se observa que algunos nodos de capa cruzada si transmitían a potencias inferiores a la máxima (1mW ó 17.4dBm), pero otros si debían transmitir a máxima potencia. Esto podría explicarse desde el punto de vista de las métricas de adaptación de potencia del protocolo, que a simple vista, con solo hacer una revisión de la manera en que se calculan, sugieren que el modelo de adaptación de potencia funciona con mayor eficacia

en redes con mayor densidad de nodos. Por tanto, de algún modo era inevitable tener nodos transmitiendo a máxima potencia en la WBAN de 5 nodos.

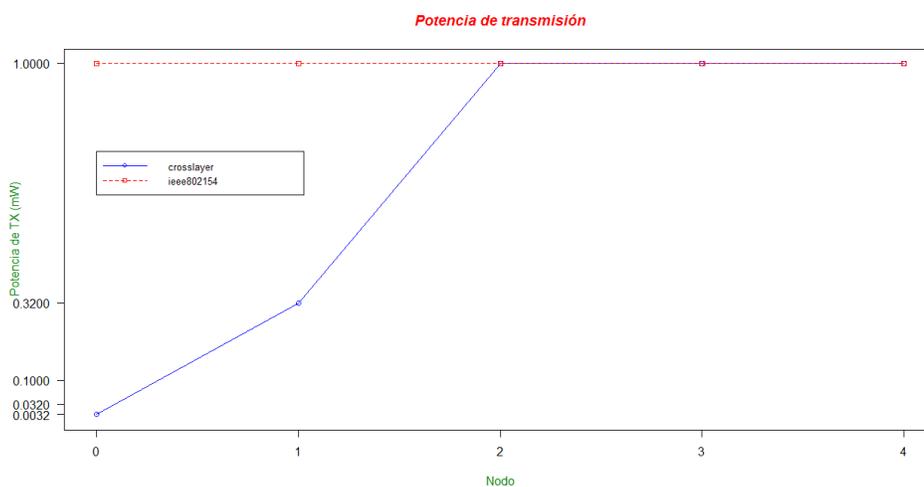


Figura 44. Potencia de transmisión WBAN 5 nodos y transmisiones cada 30 segundos

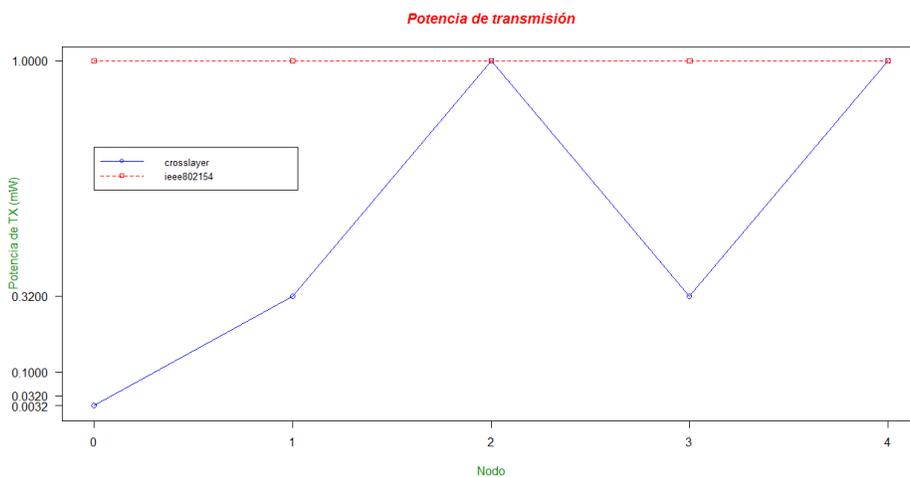


Figura 45. Potencia de transmisión WBAN 5 nodos y transmisiones cada 5 minutos

## WBAN de 12 nodos

Las figuras 46 y 47 ilustran la potencia de transmisión en la WBAN de 12 nodos, con transmisiones cada 30 y 5 minutos respectivamente.

Las gráficas confirman la hipótesis de que las métricas del protocolo permiten menores niveles de potencia cuando las WBAN tienen mayor densidad de nodos. En este caso, a

diferencia del anterior, ningún nodo alcanza a radiar a máxima potencia, y en general la mayoría de los nodos transmiten a potencias muy bajas, lo cual es bastante satisfactorio para transmisiones en escenarios de WBAN donde los nodos están instalados en el cuerpo humano que es susceptible a efectos colaterales al uso de la WBAN por cuenta de la radiación electromagnética absorbida por los músculos y tejidos del cuerpo.

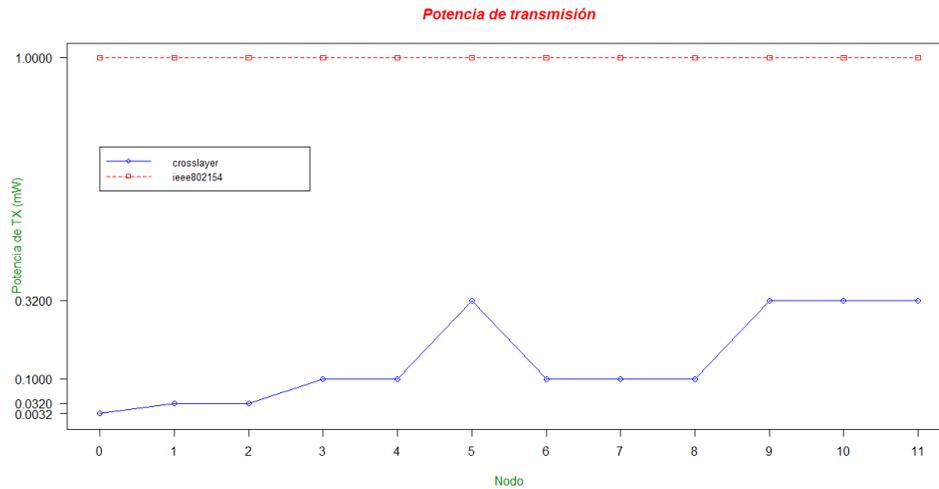


Figura 46. Potencia de transmisión WBAN 12 nodos y transmisiones cada 30 segundos

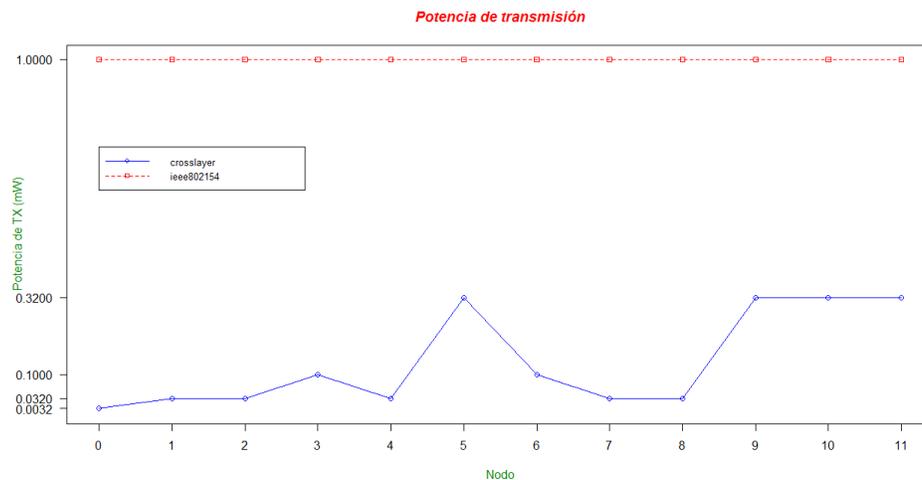


Figura 47. Potencia de transmisión WBAN 12 nodos y transmisiones cada 5 minutos

De acuerdo con estos últimos resultados se obtiene la conclusión de que para escenarios reales de WBAN es más conveniente utilizar el protocolo de capa cruzada, que además de los beneficios en consumo de energía y métricas de calidad de servicio verificados

previamente, también agrega el plus de la baja potencia de transmisión que puede ayudar positivamente en la reducción de problemas de salud y comodidad en los usuarios de la WBAN, al contribuir con los niveles de absorción electromagnética en el cuerpo del usuario.

## 5. Conclusiones

---

El objetivo de la comparación entre los dos esquemas de comunicación estaba encaminado en identificar cuál de ellos ofrece las mejores características de desempeño que contribuyen al balance entre consumo de energía y métricas de calidad de servicio en nuestro escenario particular de WBAN.

Después de hacer el análisis de los resultados del experimento, realizado de la manera más rigurosa posible, es necesario resaltar algunos aspectos y características que se evidenciaron, y que de alguna forma contribuyen o caracterizan el desempeño de las estrategias analizadas, especialmente la de capa cruzada que era la de mayor interés en este trabajo. A continuación se mencionan tales aspectos y características y a la vez se describe lo que, a nuestro modo de ver, fueron las principales falencias y contribuciones de los esquemas de comunicación abordados.

Al remitirse directamente a los resultados cuantitativos de la comparación, podemos observar que en cuanto a consumo de energía el protocolo de capa cruzada supero al IEEE802.15.4 Unslotted pero a su vez fue superado por el modo Slotted del IEEE802.15.4. En cuanto a las métricas de calidad, desde un punto de vista generalizado, el protocolo de capa cruzada tuvo un desempeño que superó a ambos modos del IEEE802.15.4. De manera que, volviendo al enfoque del balance entre consumo de energía y calidad de servicio, el protocolo de capa cruzada contribuyó a un mejor desempeño de nuestro escenario de WBAN. En los resultados de la comparación se puede observar de manera explícita que a pesar de que el consumo de energía es más eficiente usando el modo Slotted en el estándar IEEE802.15.4, la diferencia no es exagerada con respecto al consumo de energía del protocolo de capa cruzada, se puede inclusive afirmar que ambos tienen un consumo promedio similar, y que el remanente con el cual el Slotted supera al de capa cruzada se ve invertido en este último en un mejor desempeño de las métricas de calidad de servicio, lo que reafirma la idea original del balance entre ambas facetas de desempeño.

Otro punto a favor del protocolo de capa cruzada, del cual se dejó evidencia en el capítulo de resultados, es el de la potencia de radiación de los nodos. Si se hace un recuento de las premisas que se habían tenido en cuenta para el desarrollo de sistemas de comunicaciones para WBAN, una de ellas se refería a la radiación electromagnética en el cuerpo humano, la cual debía ser lo más mínima posible para evitar futuras complicaciones o efectos indeseados derivados del uso de la WBAN. En cuanto a este aspecto se pudo verificar que gracias a las estrategias de “gossiping” y “adaptación de la potencia de transmisión” del protocolo de capa cruzada los nodos transmitían en niveles muy bajos de potencia, mientras que los nodos con el estándar IEEE802.15.4 debían transmitir a la máxima potencia so pena de degradar considerablemente el desempeño de las transmisiones en la WBAN.

Además de los aportes en el balance entre consumo de energía y métricas de calidad de servicio, es también una obligación resaltar aspectos que se deben observar en la implementación del protocolo de capa cruzada en la WBAN. A pesar de que aún no existen los dispositivos electrónicos (chips) que permitan implementar un protocolo de esta naturaleza, lo cual sería ideal para hacer este tipo de comparaciones en ambientes reales de aplicación, el simulador de eventos discretos permite modelar escenarios con características correspondientes a escenarios reales y con la posibilidad de forzar eventos que permitan evaluar el desempeño de las estrategias en situaciones altamente exigentes. Aunque el simulador OMNeT++ no cuenta propiamente con un framework que permita realizar interacciones de capa cruzada (por lo menos no a la fecha de este trabajo), sí cuenta con características que permiten modelar la mayoría de abstracciones propuestas por los diseños de capa cruzada. En el caso del protocolo involucrado en este trabajo, las características del simulador fueron más que suficientes para implementarlo con propiedad.

Es importante resaltar que en general dependiendo de los escenarios de experimentación pueden obtenerse resultados y parámetros distintos en cada experimento. El desempeño en diversos escenarios está ligado al parecer a la ejecución de un trabajo exploratorio inicial en el que se deben realizar algunos experimentos previos y corridas de simulación preliminares que permitan ajustar parámetros de diseño y parámetros exclusivos de cada escenario que debido a sus características individuales con respecto de los demás podrían no ser compatibles en otros escenarios similares.

# Apéndice A: Implementación del protocolo de capa cruzada en el simulador OMNeT++

---

En este anexo se presenta la forma como se implementó el protocolo de capa cruzada en el simulador de redes OMNeT++, específicamente en el framework MiXiM. En secciones anteriores de este trabajo se ha explicado detalladamente el protocolo y su funcionamiento.

A continuación se detallan los desarrollos realizados en cada capa individual para implementar la funcionalidad del protocolo.

## Capa Aplicación

El método `void MyAppLayer::handleLowerMsg( cMessage* msg )` se emplea para recibir los paquetes de las capas inferiores, en esta implementación se incluye la captura de los “inlink-maps”, de la métrica Ci, el registro del nodo transmisor en el “inlink-map”. Mediante la captura de los “time-stamps” de los paquetes se calcula la métrica de Latencia Extremo a Extremo. Adicionalmente en este método se revisa el encabezado para observar si el nodo transmisor necesita que los vecinos aumenten la potencia de transmisión para poder mejorar las métricas.

```
void MyAppLayer::handleLowerMsg( cMessage* msg )
{
    if ( msg->getKind() == NODE_MESSAGE ) {

        MyAppIPkt *m = static_cast<MyAppIPkt *>(msg);

        EV << "Received a packet from host["<<m->getSrcAddr()<<"] -> delete
message,          we're online!" << endl;

        packet_counter++;

        EV << "Received packets: " << packet_counter << endl;

        /* Capturando el data item del nodo que hizo la TX */
    }
}
```

```

int index_1 = m->getMyId();

int aux_index = m->getMyId();

simtime_t tStamp_1 = simTime();

if(index_1 > myId)
    index_1--;

data_items[index_1].Id = m->getMyId();
data_items[index_1].Ci = m->getMyCi();
cj[index_1] = m->getMyCi(); //Capturando la metrica Ci del nodo
data_items[index_1].times = m->getMyTimestamp();
for(int n=0; n<num_nodes-1; n++)
    data_items[index_1].inlink[n] = m->getMyInkMap(n);

/*Chequiando el nodo enviante en el inlinkmap propio y guardando el
inlinkmap del nodo enviante*/

int auxvar = myId*4+inkMapP; //Test: Por ser 3 rondas de tx
consecutivas

inkMaps[auxvar][index_1] = 1; //Registrando el nodo del cual se
acaba de recibir tx en el inlink map propio

int aux_inkP = 0;

if(inkMapP==0)
    aux_inkP = 3; //Por ser unicamente 3 rondas de tx
else
    aux_inkP = inkMapP-1;

int inkPos = (aux_index*4)+aux_inkP; //Test: Por ser 3 rondas de tx

```

```

        for(int n=0; n<num_nodos-1; n++)

            inkMaps[inkPos][n]= m->getMyInkMap(n); //Guardando el inlink
map del nodo del cual se acaba de recibir tx

        int txPod = m->getInctxN(); //Verificando si el nodo necesita
“ayuda”

        if(txPod == 1)
        {
            for(int k=0; k<3; k++) //Esta dentro de la lista de vecinos?
            {
                if(index_1 == areaNeigs[k]) //Si, aumente potencia de tx
                {
                    incTxPower = 1; //Aumento potencia de tx
                    helping = 1; //Ya estoy ayudando
                    EV<< "El nodo "<<areaNeigs[k]<<" necesita ayuda"<<

endl;

                }
            }
        }

        /* Capturando el data item de un vecino del nodo que hizo la TX */

        int not_myself = 0;

        int index_2 = m->getNId();

        if(index_2 != myId)

```

```

        not_myself = 1;

        if(index_2 > myId)
            index_2--;

        simtime_t tStamp_2 = data_items[index_2].times;

        if(not_myself)//No tiene sentido que los datos del vecino de mi
vecino sean mis propios datos que envíe anteriormente
        {
            if((tStamp_2 < m->getNTimestamp())&&((m->getNTimestamp()-
tStamp_2) < 5))
            {
                //Capturando los encabezados del item de datos del nodo
vecino

                data_items[index_2].Id = m->getNId();
                data_items[index_2].Ci = m->getNCi();
                data_items[index_2].times = m->getNTimestamp();
                for(int n=0; n<num_nodes-1; n++)
                    data_items[index_2].inlink[n] = m->getNInkMap(n);
                packet_counter++;
                double e2e;
                e2e = SIMTIME_DBL(simTime() - m->getNTimestamp());
                e2eDelayVec.record(e2e);
                sumE2EDelay += e2e;
            }
        }
    }

```

```

//Registrando la Metrica E2EDelay
double e2eDelay;

e2eDelay = SIMTIME_DBL(simTime() - m->getMyTimestamp());

e2eDelayVec.record(e2eDelay);

sumE2EDelay += e2eDelay;

meanE2EDelayVec.record(sumE2EDelay/packet_counter);

    delete msg;

    return;

}

}

```

En el método **void MyAppLayer::sendData()** se construye el paquete para enviarlo y se hace el aviso a las capas inferiores en caso de que se necesite hacer una adaptación de la potencia de transmisión

```

void MyAppLayer::sendData() {

    MyAppIPkt *pkt = new MyAppIPkt("Data", NODE_MESSAGE);

    //Siempre se transmite en broadcast
    if(broadcastPackets) {

        pkt->setDestAddr(LAddress::L3BROADCAST);

    } else {

        pkt->setDestAddr(destAddr);

    }

    pkt->setSrcAddr(myAppAddr);

    pkt->setByteLength(headerLength);

    //Llamada al metodo que construye el paquete
    buildNextPacket(pkt);
}

```

```

int incP = 0;

//Se debe adaptar la potencia de Transmision?

if(incTxPower == 1) //Incremento de Tx
    incP = 1;
else if(incTxPower == 3) //Decremento de Tx
    incP = 3;

//Se le avisa a las otras capas que se debe adaptar la potencia de Tx
MyOwnNetwControlInfo::setControlInfo(pkt, pkt->getDestAddr(), incP);
incTxPower = 0; //La limpiamos de nuevo
debugEV<< "Sending data packet!\n";
sendDown(pkt); //Se envia el paquete
scheduleNextPacket(); //Se agenda la proxima transmision
packet_sent++;
}

```

El método **void MyAppLayer::buildNextPacket(MyAppIPkt \*appPkt)** se utiliza para construir los paquetes. Este método implementa la estrategia de “gossiping”, se escoge el item de datos de uno de los vecinos y se contruye el paquete. Adicionalmente se configura el encabezado para pedir ayuda a los vecinos en caso que las métricas así lo obliguen.

```

void MyAppLayer::buildNextPacket(MyAppIPkt *appPkt)
{
    //Estrategia “gossiping” para escoger el vecino del que se enviara el item
    de datos//

    int M = (num_nodes - 1)/(lambda - 1);

    int neig = (tx_round + myId) % M; //Se usa la misma formula propuesta en el
    paper

```

```
    //int neig = floor(fmod((tx_round + myId), M)); //En caso de usar tx_round
como double
```

```
appPkt->setMyId(myId);
appPkt->setMyCi(Ci);
char data[8]="My data";
for(int i=0; i<7; i++)
    appPkt->setMyData(i,data[i]);
/*Agregando el inlink map de la ultima ronda de tx*/
int aux_inkP = 0;
if(inkMapP==0)
    aux_inkP = 3; //Por ser unicamente 3 rondas de tx
else
    aux_inkP = inkMapP-1;
int aux_var = (myId*4)+aux_inkP;//inkMapP;
for(int j=0; j<num_nodes-1; j++)
{
    appPkt->setMyInkMap(j, inkMaps[aux_var][j]);
    EV << "inkMaps[" << aux_var <<"]["<<j<<"]: " << inkMaps[aux_var][j] <<
endl;
}

appPkt->setMyTimestamp(simTime());

if(inctxTimes > 1) //Necesito pedir "ayuda" a los vecinos??
{
    inctxTimes = 0;
    appPkt->setInctxN(1); //Uso el encabezado para pedir "ayuda"
```

```

}

else

    appPkt->setInctxN(0);

//Ajustando los encabezados y datos del item de datos del vecino//
if(neig < myId)

    appPkt->setNId(neig);

else

    appPkt->setNId(neig+1);

appPkt->setNCi(data_items[neig].Ci);

for(int i=0; i<7; i++)

    appPkt->setNData(i, data_items[neig].data[i]);

for(int j=0; j<num_nodes-1; j++)

    appPkt->setNInkMap(j, data_items[neig].inlink[j]);

appPkt->setNTimestamp(data_items[neig].times);

}

```

Para el cálculo de los parámetros que se usan para determinar la evolución de las métricas  $q_{ij}$  y  $Q_i$  se implemento el método **void MyAppLayer::calcfwuij(void)**, cada 3 rondas de transmisión se recalculan los parámetros para hacer la actualización de las métricas.

```

void MyAppLayer::calcfwuij(void) //Calculo de los parametros
{

    int fijn[4]={};

    int aux = 0;

    int aux2 = 0;

    int wijn = 0;

    int inkaux1 = 0;

```

```

int inkaux2 = 0;

int inkaux3 = 0;

//Dependiendo de la ronda de TX se calculan los parametros con determinados
inlink- maps//

if(inkMapP == 0)
{
    inkaux1 = 3;
    inkaux2 = 2;
    inkaux3 = 1;
}

if(inkMapP == 1)
{
    inkaux1 = 0;
    inkaux2 = 3;
    inkaux3 = 2;
}

if(inkMapP == 2)
{
    inkaux1 = 1;
    inkaux2 = 0;
    inkaux3 = 3;
}

if(inkMapP == 3)
{
    inkaux1 = 2;
    inkaux2 = 1;
    inkaux3 = 0;
}

```

```

}

/*Para calcular la metrica fi(i,j) */
for(int h=0; h<num_nodes-1; h++)
{
    fij[n][h] = inkMaps[myId*4+inkaux1][h] + inkMaps[myId*4+inkaux2][h] +
                inkMaps[myId*4+inkaux3][h];

    fij[h] = (double)fijn[h]/3; //Por ser en 3 rondas de tx
}

/*Calculando omega(i,j) con respecto a los nodos vecinos*/
for (int j=0; j<num_nodes; j++)
{
    if(j != myId)
    {
        wijn = 0;
        aux = j;
        aux2 = myId;
        if(aux > myId)
            aux = aux-1;
        else
            aux2 = myId-1;

        if((inkMaps[myId*4+inkaux1][aux] & inkMaps[j*4+inkaux1][aux2]) == 1)
            wijn++;
    }
}

```

```

        if((inkMaps[myId*4+inkaux2][aux] & inkMaps[j*4+inkaux2][aux2]) == 1)
            wijn++;

        if((inkMaps[myId*4+inkaux3][aux] & inkMaps[j*4+inkaux3][aux2]) == 1)
            wijn++;

        wij[aux] = (double)wijn/3; //Por ser en 3 rondas de tx
    }
}

```

```

/*Calculando mu(i,j)*/
for(int l=0; l<num_nodes-1; l++)
{
    if(fij[l] != 0)
        uij[l] = wij[l]/fij[l];
    else
        uij[l] = 0;
}

```

```

}

```

El cálculo de las métricas de calidad de los enlaces de salida ( $Q_i$ ) y calidad de la conexión al coordinador ( $C_i$ ) se hace en el método **void MyAppLayer::calcMetricas(void)**, donde se llama al método que calcula los parámetros y luego se calculan las métricas tal y como esta descrito en la publicación del protocolo.

```

void MyAppLayer::calcMetricas(void)
{
    int aux = 0;

```

```

int aux2 = 0;

int inkaux1 = 0;

int inkaux2 = 0;

//Primero se calculan los parametros fi, omega y mu //
calcfwuij();

//En la ronda t se deben utilizar los parametros de t-1 y t-2

if(inkMapP == 0)
{
    inkaux1 = 3;
    inkaux2 = 2;
}
if(inkMapP == 1)
{
    inkaux1 = 0;
    inkaux2 = 3;
}
if(inkMapP == 2)
{
    inkaux1 = 1;
    inkaux2 = 0;
}
if(inkMapP == 3)
{
    inkaux1 = 2;
    inkaux2 = 1;
}

```

```

/* Calculo de qij */

for (int j=0; j<num_nodes; j++)
{
    if(j != myId)
    {
        aux = j;
        aux2 = myId;
        if(aux > myId)
            aux = aux-1;
        else
            aux2 = myId-1;

        if((inkMaps[myId*4+inkaux1][aux] & inkMaps[j*4+inkaux2][aux2]) == 1)
            qij[aux] = qij[aux] + (1-qij[aux])*wij[aux];

        else if((inkMaps[myId*4+inkaux1][aux] & inkMaps[j*4+inkaux2][aux2])
!= 1)
            qij[aux] = qij[aux]*wij[aux];

        else if(inkMaps[myId*4+inkaux1][aux] == 0)
            qij[aux] = qij[aux]*uij[aux];

        EV<< "qij["<<aux<<"]: "<< qij[aux] << endl;
    }
}

/*****/

```

```

/* Calculo de Qi */

Qi = 0;

for (int i=0; i<num_nodes-1; i++)
{
    Qi += qij[i];
}
EV<< "Qi: " << Qi << endl;

/*****/

/* Calculo de Ci */

Ci = 0;

for (int k=0; k<num_nodes-1; k++)
{
    cj[k] = cj[k]*qij[k];
    EV<< "cj[" << k << "]: " << cj[k] << endl;
}

if(myId != 0) //Solo se le calcula Ci a nodos distintos al coordinador
    Ci = (double)*std::max_element(cj, cj+(num_nodes-1));
else
    Ci = 1;

EV<< "Ci: " << Ci << endl;

```

```

    /*****/
}

Finalmente en el método void MyAppLayer::checkMetrics(void) se hace observan las métricas  $Q_i$  y  $C_i$  para definir si es necesario hacer una adaptación de la potencia de transmisión.

void MyAppLayer::checkMetrics(void)
{
    double lb = 1; //Limite inferior para la metrica Qi
    double ub = 3; //Limite superior para la metrica Qi

    incTxPower = 0; //Por defecto no se debe incrementar la potencia de Tx

    if(Qi < lb)
    {
        incTxPower = 1; //Mala metrica de enlace de salida (pocos vecinos) -->
incremente potencia de Tx
        incTxTimes++; //Acumulando actualizaciones de metricas malas para pedir
“ayuda”
    }
    else if(Qi > ub)
    {
        if(!helping)
            incTxPower = 3; //Mala metrica de enlace de salida (exceso de vecinos)
--> decremente potencia de Tx*/
    }
    else
    {
        if(Ci == 0)
        {

```

```

        incTxPower = 1; //Mala metrica de conexion con el gateway -->
incremente potencia de Tx

        incTxTimes++; //Acumulando actualizaciones de metricas malas para pedir
“ayuda”
    }
}
}

```

## Capa de Acceso al Medio

El método **void MyTDMAMac::handleSelfMsg(cMessage\* msg)** es un contador interno que constantemente está verificando si el nodo se encuentra en la parte activa o inactiva de la trama TDMA. Y de estar en la parte activa verifica si está en la ranura de transmisión o si por el contrario está en las ranuras en las que debe escuchar las transmisiones de sus vecinos.

```

void MyTDMAMac::handleSelfMsg(cMessage* msg)

```

```

{

    switch (msg->getKind())
    {
        /* SETUP phase enters to start the MAC protocol !aaks */
        case START_MYTDMAMAC:

            /* CurrentSlot counter !aaks */
            currSlot = 0;
            currentMacState = STARTUP;

            /* Start listening as a starting procedure !aaks */
            scheduleAt(simTime(), startListening);

            break;

        /* Sleep state definition !aaks */
    }
}

```

```

case START_SLEEPING:

    currSlot++;

    /* Mod operation to reset counter within the number of
slots laaks */

    currSlot %= numSlots;

    currentMacState = SLEEP;

    /*Parte inactiva de la trama TDMA */
    phy->setRadioState(MiximRadio::SLEEP);
    nextEvent = slotDuration*88;
    currSlot +=88;
    currSlot %= numSlots;

    /*Debe despertar a modo escucha cuando termine la parte
inactiva */

    scheduleAt(simTime() + nextEvent, startListening);

break;

/* Listening state definition */
case START_LISTENING:

    currSlot++;

    currSlot %= numSlots;

    /* Checking if the radio is already in receive mode */
if (phy->getRadioState() != MiximRadio::RX)
    {
        phy->setRadioState(MiximRadio::RX);
    }

```

```

    }
    else EV << "Radio already in receive mode" << endl;

    currentMacState = RECEIVE;
    //Preparandose para transmitir en el siguiente slot
    if(transmitSlot[(currSlot + 1) % numSlots] == mySlot &&
currSlot+1 < 12)
    {
        scheduleAt(simTime() + slotDuration*1, startTransmit);
    }
    //del slot 13 en adelante duerme (parte inactiva)
    else if (currSlot+1 >= 12)
    {
        debugEV << "Next Slots are sleep slots.\n";
        scheduleAt(simTime() + slotDuration*1, startSleeping);
    }
    else //Si el siguiente slot es escuchar, sigue escuchando
    {
        scheduleAt(simTime() + slotDuration*1,
startListening);
    }
    break;

    /* Transmitting state definition */
    case START_TRANSMIT:

        currSlot++;

        currSlot %= numSlots;

        currentMacState = TRANSMIT;

```

```

        /* Checking if the current slot is also the node's
transmit slot !aaks */
        if (mySlot == transmitSlot[currSlot])
        {
            /* Checking if packets are available to send in
the mac queue !aaks */
            if(macPktQueue.empty()){
                debugEV << "No Packet to Send exiting" <<
endl;
            }
            else {
                debugEV << "Waking up in my slot. Switch to
RECV first to check the channel.\n";
                /* Setting the radio state to transmit mode
*/
                phy->setRadioState(MiximRadio::TX);
            }
        }
        else {
            debugEV << "ERROR: Send data message received,
but we are not in our slot!!! Repair.\n";
        }
        //Preparandose para transmitir en el siguiente slot
        if(transmitSlot[(currSlot + 1) % numSlots] == mySlot &&
currSlot+1 < 12)
        {
            debugEV << "Next Slot is my Transmit Slot, getting
ready to transmit.\n";
            scheduleAt(simTime() + slotDuration*1, startTransmit);

```

```

    }

    //Si los siguientes slots son inactivos, pasa de tx a sleep
    else if (currSlot+1 >= 12)
    {
        debugEV << "Next Slots are sleep slots.\n";
        scheduleAt(simTime() + slotDuration*1, startSleeping);
    }

    //Si el siguiente slot es escuchar, pasa de tx a rx
    else
    {
        debugEV << "Next Slot is my Receive Slot, getting ready
to receive.\n";

        scheduleAt(simTime() + slotDuration*1, startListening);
    }
    break;
    default:{
        EV << "WARNING: unknown timer callback " << msg->getKind() << endl;
    }
}
}
}

```

Para realizar la adaptación de potencia se verifica que desde las capas superiores se haya solicitado hacerlo, luego se debe compartir esa solicitud a la capa física y además se debe pasar como parámetro el nuevo valor de la potencia de transmisión. El método **void MyTDMAmac::attachSignal(macpkt\_ptr\_t macPkt, int incP)** implementa dichas funcionalidades.

```

void MyTDMAmac::attachSignal(macpkt_ptr_t macPkt, int incP)
{
    //calc signal duration
    simtime_t duration = macPkt->getBitLength() / bitrate;

```

```

if(incP == 1)
{
    incTxPow++;
    if(incTxPow > 5)
        incTxPow = 5;
}

else if(incP == 3) //Decremento de potencia
{
    incTxPow--;
    if(incTxPow < 1)
        incTxPow = 1;
}

double txPow = 0.0032; //Un valor por default
switch(incTxPow)
{
    case 1: // -25dBm
        txPow = 0.0032; //Valores del datasheet del CC2420 (-25, -15, -10,
-5, 0 dBm) (Tx Pow en mW)
        break;
    case 2: //-15dBm
        txPow = 0.032;
        break;
    case 3: //-10dBm
        txPow = 0.1;
        break;
    case 4: //-5dBm
        txPow = 0.32;

```

```

        break;

    case 5: // 0dBm

        txPow = 1;

        break;

    default:

        txPow = 0.0032; //Un valor por default

    }

    //create signal

    setTxPower(txPow); // Configurando la potencia de transmision

    MyMacToPhyControlInfo::setControlInfo(macPkt, createTime(),
duration,
txPower, bitrate), txPower); //Advirtiendo a la capa fisica la nueva potencia de
TX

}

```

El método `MyTDMAMac::encapsMsg(cPacket* msg)` se usa para empaquetar el paquete proveniente de las capas superiores para pasarlo a la capa física. Adicionalmente se revisa el mensaje de control para extraer el encabezado que informa si se debe hacer una adaptación en la potencia de transmisión.

```

MyTDMAMac::macpkt_ptr_t MyTDMAMac::encapsMsg(cPacket* msg) {

    MyMacPkt *pkt = new MyMacPkt(msg->getName(), msg->getKind());

    pkt->setBitLength(headerLength);

    cObject* cInfo = msg->removeControlInfo();

    if(cInfo == NULL){

        EV << "warning: Network layer did not specifiy control info" << endl;

        pkt->setDestAddr(LAddress::L2BROADCAST);

    } else {

```

```

        MyOwnNetwToMacControlInfo *const cCInfo =
dynamic_cast<MyOwnNetwToMacControlInfo *const>(cInfo);

        pkt->setDestAddr(MyOwnNetwToMacControlInfo::getDestFromControlInfo(
cInfo ));

        incP = 0;

        incP = cCInfo->getIncP(); //Desempaquetando los encabezados del paquete,
para
                verificar luego si se debe adaptar la potencia de TX

        delete cInfo;
}

/* set the src address to own mac address (nic module getId()) #LMAC */
pkt->setSrcAddr(myMacAddr);

/* encapsulate the network packet #LMAC */
pkt->encapsulate(check_and_cast<cPacket *>(msg));
debugEV <<"pkt encapsulated\n";

return pkt;
}

```

## Capa Física y Módulo de Batería

Los métodos **void PhyLayerBattery::handleUpperMessage(cMessage\* msg)** y **virtual double calcTXCurrentForPacket(macpkt\_ptr\_t, MyMacToPhyControlInfo\*, double txPower)** se encargan de actualizar la potencia con la que se van a transmitir los paquetes y además selecciona la corriente de acuerdo a la potencia de transmisión para hacer el respectivo descuento en la energía de la batería.

```

void PhyLayerBattery::handleUpperMessage(cMessage* msg) {

    if (battery && battery->getState() != HostState::ACTIVE) {

        coreEV<< "host has FAILED, dropping msg " << msg->getName() <<
endl;

```

```

        delete msg;

        return;
    }

    macpkt_ptr_t pkt = static_cast<macpkt_ptr_t>(msg);

    MyMacToPhyControlInfo* cInfo = static_cast<MyMacToPhyControlInfo*>(pkt->getControlInfo()); //Obteniendo el mensaje de control

    //Tomando el valor de potencia de TX configurado en la capa de acceso al
    medio

    double txPower = MyMacToPhyControlInfo::getTxPowerFromControlInfo( cInfo
    );

    //Calculando el valor de corriente que debe usarse en la bateria para
    hacer

    // la sustraccion correspondiente de energía

    double current = calcTXCurrentForPacket(pkt, cInfo, txPower);

    if(current > 0) {
        MiximBatteryAccess::drawCurrent(current, TX_ACCT);
    }

    PhyLayer::handleUpperMessage(msg);
}

virtual double calcTXCurrentForPacket(macpkt_ptr_t, MyMacToPhyControlInfo*,
double txPower) const

```

```
{  
  //Con el valor de potencia de TX se escoge la corriente de TX  
  if(txPower == 0.0032)  
    return 8.5;  
  else if(txPower == 0.032)  
    return 9.9;  
  else if(txPower == 0.1)  
    return 11;  
  else if(txPower == 0.32)  
    return 14;  
  else if(txPower == 1)  
    return 17.4;  
  else  
    return 8.5;  
}
```

# Referencias

---

- [1] Groß, C., Hermanns, H., & Pulungan, R. (2007). Does clock precision influence ZigBee's energy consumptions?. In *Principles of Distributed Systems*(pp. 174-188). Springer Berlin Heidelberg.
- [2] Koubaa, A., Alves, M., & Tovar, E. (2006, June). A comprehensive simulation study of slotted CSMA/CA for IEEE 802.15. 4 wireless sensor networks. In *5th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems* (pp. 183-192). IEEE.
- [3] V. Srivastava, M. Motani, *Cross-layer Design: A Survey and the Road Ahead*, *Communications Magazine*, IEEE 43 (12) (2005) 112-119.
- [4] Al Masud, S. M. R. QoS taxonomy towards wireless body area network solutions. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*, 2 (2013), 221-234.
- [5] Ameen, M. A., Nessa, A., & Kwak, K. S. (2008, November). QoS issues with focus on wireless body area networks. In *Convergence and Hybrid Information Technology, 2008. ICCIT'08. Third International Conference on* (Vol. 1, pp. 801-807). IEEE.
- [6] Tschirner, S., Xuedong, L., & Yi, W. (2008, October). Model-based validation of QoS properties of biomedical sensor networks. In *Proceedings of the 8th ACM international conference on Embedded software* (pp. 69-78). ACM.
- [7] Cheng, S., Huang, C., & Tu, C. C. (2011). RACOON: A multiuser QoS design for mobile wireless body area networks. *Journal of medical systems*, 35(5), 1277-1287.
- [8] Y. Wang, X. Liu, J. Yin, Requirements of quality of service in wireless sensor network, in: *Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies, 2006. ICN/ICONS/MCL 2006. International Conference on*, 2006, pp. 116-116.
- [9] Ullah, S., Higgins, H., Braem, B., Latre, B., Blondia, C., Moerman, I., & Kwak, K. S. (2012). A comprehensive survey of wireless body area networks. *Journal of medical systems*, 36(3), 1065-1094.
- [10] Latrè, B., Braem, B., Moerman, I., Blondia, C., & Demeester, P. (2011). A survey on wireless body area networks. *Wireless Networks*, 17(1), 1-18.
- [11] Barakah, D. M., & Ammad-uddin, M. (2012, February). A survey of challenges and applications of wireless body area network (WBAN) and role of a virtual doctor server in existing architecture. In *Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), 2012 Third International Conference on* (pp. 214-219). IEEE.

- [12] Chen, M., Gonzalez, S., Vasilakos, A., Cao, H., & Leung, V. C. (2011). Body area networks: A survey. *Mobile networks and applications*, 16(2), 171-193.
- [13] Crosby, G. V., Ghosh, T., Murimi, R., & Chin, C. A. (2012). Wireless body area networks for healthcare: a survey.
- [14] Alam, M. M., & Hamida, E. B. (2014). Surveying wearable human assistive technology for life and safety critical applications: Standards, challenges and opportunities. *Sensors*, 14(5), 9153-9209.
- [15] Movassaghi, S., Abolhasan, M., Lipman, J., Smith, D., & Jamalipour, A. (2014). Wireless body area networks: A survey. *Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, 16(3), 1658-1686.
- [16] X. Hong, M. Gerla, G. Pei, and C. Chiang. A group mobility model for ad hoc wireless networks. In *Proc. 2nd ACM Int. Conf. on Modeling, analysis and Simulation of Wireless and Mobile systems (MSWiM)*. p.p. 53–60. 1999.
- [17] E. Hyttiä and J. Virtamo. Random waypoint mobility model in celular networks. *Wireless Networks*. p.p. 177–188. 2007.
- [18] M. Zonoozi y P. Dassanayake. User mobility modeling and characterization of mobility patterns. *Selected Areas in Communications*, IEEE Journal on 15.7 (1997): 1239-1252.
- [19] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless communications and mobile computing*. p.p. 483-502. 2002.
- [20] M. Nabi, M. Geilen and T. Basten. MoBAN: A configurable mobility model for wireless body area networks. *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering). 2011.
- [21] OMNeT++ Network Simulator website. <http://www.omnetpp.org>.
- [22] Sandhu, M. M., Akbar, M., Behzad, M., Javaid, N., Khan, Z. A., & Qasim, U. (2014, November). Mobility Model for WBANs. In *Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2014 Ninth International Conference on* (pp. 155-160). IEEE.
- [23] H. Ren y M. Meng. Understanding the mobility model of wireless sensor networks. *International Conference on Information Acquisition*. Proceedings of the 2006 IEEE. 2006.
- [24] E. Reusens, W. Joseph, B. Latr´e, B. Braem, G. Vermeeren, E. Tanghe, y C. Blondia. Characterization of on-body communication cannel and energy efficient topology design

for wireless body area networks. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, p.p. 933-945. 2009.

[25] Z. Hu, Y. Nechayev, P. Hall, C. Constantinou, y Y. Hao. Measurements and statistical analysis of on-body channel fading at 2.45 GHz. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, p.p. 612-615. 2007.

[26] B. Braem, B. Latre, I. Moerman, C. Blondia, P. Demeester, The wireless autonomous spanning tree protocol for multihop wireless body area networks, in: *Mobile and Ubiquitous Systems: Networking Services, 2006 Third Annual International Conference on*, 2006, pp. 1-8.

[27] B. Latrè, B. Braem, I. Moerman, C. Blondia, E. Reusens, W. Joseph, P. Demeester, A low-delay protocol for multihop wireless body area networks, in: *4th Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems (MobiQuitous 2007)*, August 6-10, 2007, Philadelphia, PA, USA, 2007, pp. 1-8.

[28] M. Nabi, T. Basten, M. Geilen, M. Blagojevic, T. Hendriks, A robust protocol stack for multi-hop wireless body area networks with transmit power adaptation, in: *Proceedings of the Fifth International Conference on Body Area Networks*, 2010, pp. 77-83.

[29] N. Ababneh, N. Timmons, J. Morrison, Cross-layer optimization protocol for guaranteed data streaming over wireless body area networks, in: *8th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC 2012, Limassol, Cyprus, August 27-31, 2012*, 2012, pp. 118-123.

[30] N. Torabi, V. C. M. Leung, Cross-layer design for prompt and reliable transmissions over body area networks, *IEEE J. Biomedical and Health Informatics* 18 (4) (2014) 1303-1316.

[31] N. Torabi, V. C. M. Leung, Realization of public m-health service in license-free spectrum, *IEEE J. Biomedical and Health Informatics* 17 (1) (2013) 19-29.

[32] IEEE, Ieee standard for local and metropolitan area networks part 15.6: Wireless body area networks: Ieee std 802.15. 6-2012 (2012) 1-271

[33] H. Ben Elhadj, S. Boudjit, L. Chaari Fourati, A cross-layer based data dissemination algorithm for ieee 802.15.6 wbans, in: *Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT), 2013 International Conference on*, Vol. 01, 2013, pp. 1-6.

[34] A. Awad, A. Mohamed, A. A. El-Sherif, Energy e\_icient cross-layer design for wireless body area monitoring networks in healthcare applications, in: *24th IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, PIMRC 2013, London, United Kingdom, September 8-11, 2013*, 2013, pp. 1484-1489.

- [35] H. Su, X. Zhang, Battery-dynamics driven tdma mac protocols for wireless body-area monitoring networks in healthcare applications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 27 (4) (2009) 424-434.
- [36] Tobón, D. P., Falk, T. H., & Maier, M. (2013). Context awareness in WBANs: a survey on medical and non-medical applications. *Wireless Communications, IEEE*, 20(4), 30-37.
- [37] A. Varga, et al., The omnet++ discrete event simulation system, in: *Proceedings of the European simulation multiconference (ESM'2001)*, Vol. 9, sn, 2001, p. 65.
- [38] Torfs, W., De Cleyn, P., & Blondia, C. (2009, June). WBAN implementation on Magnetic Induction Radio IC for medical remote monitoring. *InCommunications Workshops, 2009. ICC Workshops 2009. IEEE International Conference on* (pp. 1-5). IEEE.