

Análisis de Factores que Afectan el QoS que Ofrecen las WSN Aplicado a Entornos de Salud

Raymundo Buenrostro Mariscal^{a,b}, Juan Iván Nieto Hipólito^a, Juan Antonio Guerrero Ibáñez^b, María Cosío León^a, Mabel Vázquez Briseño^a, y Juan de Dios Sánchez López^a

^aUniversidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño.
Carr. Ensenada-Tijuana 3917, Col. Playitas, Ensenada, B.C., México, 22860.

{rbuenrostro, jnieto, maria.cosio, mabel.vazquez, jdios}@uabc.edu.mx

^bUniversidad de Colima, Facultad de Telemática.

CAv. Universidad 333, Col. Las Víboras, Colima, Col. México, CP. 28040.

antonio_guerrero@ucol.mx

2013 Published by *DIFU*_{100ci}@ <http://www2.uaz.edu.mx/web/www/publicaciones>

Selection and peer-review under responsibility of the Organizing Committee of the CICOMP-2013, www.cicomp.org

Resumen

Actualmente se han considerado las Redes Inalámbricas de Sensores (WSNs) para la recolección de signos vitales de personas. Sin embargo, por el tipo de datos se considera una aplicación crítica, lo cual exige una comunicación eficiente. Dentro de los protocolos de comunicación de red, la capa de transporte y la sub-capa de acceso al medio juegan un papel importante en el desempeño de la comunicación. En este trabajo se analizó el protocolo TCP y el estándar IEEE 802.15.4 bajo un escenario de aplicación médica, específicamente, los factores que afectan las métricas de tasa de entrega de datos y el retardo de transmisión. Los resultados demostraron que el tamaño del paquete es un factor crucial en el diseño de redes bajo IEEE 802.15.4. Además, TCP fue la causa principal del bajo desempeño de las métricas, debido a la necesidad de una sesión de datos para transmitir los paquetes del nodo sensor.

Palabras clave: IEEE 802.15.4, QoS, TCP, WSN.

1. Introducción

Las Redes Inalámbricas de Sensores (WSNs, Wireless Sensor Networks) son redes compuestas por dispositivos interconectados entre sí, que trabajan de forma cooperativa para recolectar datos de interés y transmitirlos de forma inalámbrica a otro punto. En los últimos años se ha incrementado los trabajos que exploran su uso en aplicaciones médicas, por ejemplo,

la supervisión de la salud de forma remota [1], [2]. Las WSN pueden recuperar signos vitales de personas en hospitales o en casa, como temperatura corporal, saturación de oxígeno, ritmo cardíaco, electrocardiograma (ECG), entre otros, los cuales son transmitidos hasta un punto central para ser analizadas por personal médico. Bajo este escenario y por la naturaleza crítica de los datos, éste tipo de aplicaciones demandan una comunicación más eficiente. Por lo tanto, existen diferentes

requerimientos de transmisión de datos que deben ser cubiertos por las WSNs: métricas de calidad de servicio (QoS, Quality of Service) tales como retardo de transmisión del paquete y la tasa de entrega de datos; junto con la métrica de "Equidad" en el uso de los recursos (referida como la oportunidad que tiene cada nodo a enviar sus datos). Sin embargo, las WSNs tienen limitaciones importantes para cumplir con estos requerimientos [3], debido a su naturaleza inalámbrica y a su medio compartido, donde todos los nodos compiten por el acceso al medio para transmitir su datos. Como resultado, la transferencia de datos está sujeta a diferentes problemas que afectan la calidad de la comunicación (colisiones, degradación de la señal por interferencias, congestión del enlace, entre otras). Además, la WSN puede estar formada por múltiples nodos sensores que mantienen flujos de datos la mayor parte del tiempo, provocando que se acentúen éstos problemas. Lo anterior conduce a la pérdida de paquetes y al incremento del tiempo de transmisión de los datos; lo cual tiene un impacto directo en el desempeño de la red y por ende en los niveles de QoS y Equidad que pueden ofrecer las WSNs.

Dentro de los protocolos de comunicación de las WSNs, la capa de Transporte y la subcapa de acceso al medio (MAC, Medium Access Control) juegan un rol importante en el desempeño en la entrega de datos [4]. Por lo tanto, es importante analizar los factores que afectan el desempeño de las WSNs, considerando Transporte y MAC, con el fin de alcanzar los mejores niveles de desempeño y habilitar este tipo de redes para aplicaciones médicas.

Existen varios trabajos que han analizado el desempeño de las WSNs. En [4] se evalúa el desempeño de diferentes protocolos de transporte que utilizan los protocolos IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4 por medio de simulación. Sin embargo, el escenario de experimentación fue limitado, ya que la cantidad de nodos sensores (4 nodos) y el tamaño del paquete fueron siempre los mismos. El máximo desempeño y el mínimo retardo de transmisión alcanzado por el estándar IEEE 802.15.4 son investigados en [5]. Sin embargo, sólo se consideran un solo nodo como fuente de tráfico. En [6] se analizaron los efectos de variar la cantidad de nodos en la red, el tamaño del paquete, la frecuencia de muestreo, y el ciclo de transmisión en una red basada en IEEE 802.15.4 que consiste de sensores de monitorización de ECG. Sin embargo, no incluye en su análisis el efecto de la capa de transporte. Ninguna de las propuestas revisadas presenta resultados sobre la métrica de Equidad. Además, excepto en [6], ninguna de ellas considera aplicaciones médicas para modelar la fuente

de tráfico. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es analizar los factores que afectan el QoS y la Equidad que ofrecen las WSNs en aplicaciones médicas, que utilizan el protocolo de transporte TCP [7] y el estándar IEEE 802.15.4 [8].

El resto de este trabajo está organizado como sigue. La Sección 2 describe aspectos técnicos relacionados con una WSN aplicada a la salud. El escenario de trabajo se presenta en la Sección 3. En la Sección 4 se detallan las métricas de evaluación y los casos de estudio. El análisis de resultados se explica en la Sección 5. Finalmente, en la Sección 6 se dan las conclusiones y el trabajo futuro.

2. WSN para aplicaciones médicas

Cuando se proponen las WSNs para la monitorización de pacientes de forma remota, el desempeño en la transmisión de los datos es mucho más importante que en otras aplicaciones. Ya que los datos son utilizados para la atención médica personal y esto lo vuelve una aplicación crítica. Por lo tanto, es necesario que el diseño de la WSN considere los protocolos de la capa de transporte y la subcapa MAC como se indico en la introducción. Los protocolos de transporte, aseguran la comunicación de los datos extremo a extremo y pueden ofrecer un trato especial a los datos de la aplicación, ya sea para programarlos y/o priorizarlos. Por su parte, los protocolos MAC complementan el proceso de comunicación entre los nodos de la red, administrando el acceso al canal común. Además, los dispositivos que forman las WSNs deben trabajar en el entorno de las personas. Lo cual exige otros requerimientos importantes en el diseño de la WSNs; tales como: los dispositivos que forman la WSN deben ser de tamaño reducido, de bajo consumo de energía, con mínimos niveles de mantenimiento, de bajo costo y que permitan la movilidad de las personas.

2.1. Protocolo de Control de Transmisión (TCP)

TCP es un protocolo orientado a conexión que opera en la capa de transporte y ofrece servicios de comunicación extremo a extremo entre dos nodos de la red. Además, incluye servicios de confiabilidad en la entrega de datos, control de flujo, establecimiento de sesión, entre otros; con el objetivo de proveer una transmisión confiable [7].

En TCP cuando dos procesos, que se ejecutan en nodos diferentes, desean comunicarse, necesitan establecer una conexión antes de iniciar el envío de los

datos. TCP utiliza un mecanismo de sincronía de “tres-pasos”: solicitud de conexión, respuesta a la solicitud de conexión y un mensaje de confirmación por parte del nodo solicitante. Sólo si la respuesta fue exitosa, el nodo emisor inicia con la transmisión de sus datos. Para las funciones de confiabilidad, TCP necesita recibir un mensaje de acuse de recibo, del nodo receptor, por cada paquete que se envía, para asegurar una entrega exitosa. Este mensaje se le conoce como mensaje de Ack (del inglés Acknowledgment). Si no lo recibe en un determinado tiempo, debe retransmitir dicho paquete. En suma TCP está diseñado para ofrecer una comunicación confiable proporcionando control de congestión y un mecanismo de confiabilidad en la entrega de datos.

2.2. Estándar IEEE 802.15.4

Una de las tecnologías utilizadas para desarrollar las WSNs es el estándar IEEE 802.15.4. Este estándar fue diseñado para dispositivos que necesiten una transmisión de datos de corto alcance con una velocidad de datos moderada (250 kbps a 2.4 GHz), con muy bajo consumo de energía, de baja complejidad, portable y de bajo costo de implementación [8]. IEEE 802.15.4 no fue diseñado para competir con otras tecnologías inalámbricas, si no que complementa la gama de tecnologías inalámbricas disponibles [9].

IEEE 802.15.4 comprende las especificaciones de la capa Física y la subcapa MAC para redes inalámbricas de área personal. Para el acceso al canal de comunicaciones, el estándar utiliza un mecanismo de acceso múltiple por detección de portadora con prevención de colisiones (CSMA/CA, del inglés Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Cada vez que un dispositivo de la red necesita transmitir un paquete de datos, éste espera un periodo de tiempo aleatorio o de Backoff, antes de verificar el canal. Si el canal está libre, el dispositivo transmite inmediatamente su paquete; de lo contrario, éste espera por otro periodo de Backoff antes de intentarlo de nuevo. Este proceso se repite hasta que se alcanza el máximo número de intentos de acceso al canal; si esto ocurre, se declara una falla de acceso al canal.

El estándar IEEE 802.15.4 ofrece servicios de confiabilidad, similar a TCP, entre dos nodos vecinos que están en la misma área de cobertura (a un salto como máximo). Este servicio puede ser activado o desactivado de acuerdo a las necesidades de la aplicación desde capas superiores (por ejemplo la capa de transporte). Puede ser activado para incrementar los niveles de confiabilidad en la entrega de datos, o eliminarla para reducir el retardo de transmisión extremos a extremo.

Tabla 1. Mediciones de señales biomédicas [10]

Señal	Tasa muestras/seg	Resolución bits/muestra	Datos bits/s
ECG	1250	12	15000
Nivel de glucosa	50	16	800
Ritmo cardíaco	25	24	600
Temp. corporal	5	16	80

Por lo mencionado anteriormente, el estándar IEEE 802.15.4 se concibe como una opción adecuada para crear WSNs; ya que se alinean a las necesidades principales de las aplicaciones médicas. Sin embargo es necesario su análisis al respecto del desempeño de las métricas de QoS y Equidad para confirmar su factibilidad.

2.3. Caracterización del tráfico

Conocer el tipo de tráfico que generan las aplicaciones es importante, para determinar el tipo de atención que los protocolos de comunicación deben ofrecerle para su transporte dentro de la WSN. Para lograr esto, existen varios factores que deben ser considerados, tales como: *tipo*, *cantidad* y *frecuencia* de los datos. Para el caso de la supervisión de la salud, el tráfico es generado por los sensores que recolectan las señales fisiológicas de los pacientes. Dichas señales se necesitan estudiar desde el punto de vista eléctrico y desde el punto de vista de la aplicación médica. Para éste fin, la señal ECG es seleccionada; con la intención de que éste estudio pueda ser aplicable a otras señales médicas.

La señal ECG es el resultado de las señales eléctricas que produce el corazón en el rango de frecuencia de 0.01 a 250 Hz (Figura 1). Estas señales eléctricas son generadas continuamente, y por lo tanto, deben ser periódicamente muestreadas para digitalizarlas. La frecuencia de muestreo y los métodos de digitalización juegan un papel importante en determinar las características del tráfico. Por ejemplo, si la señales eléctricas del corazón se muestrean a 500 muestras por segundo (2 veces la frecuencia máxima) y cada muestra tiene un tamaño de 10 bits; entonces, se espera que el flujo de datos de la aplicación ECG genere un tráfico de 5000 bps (bits/segundo). La Tabla 1 muestra una propuesta de requerimientos de tráfico, para algunas señales biomédicas [10]. Observe que la señal con más requerimientos de comunicación es el ECG. Por el contrario la temperatura corporal es la que menos bits por segundo genera.

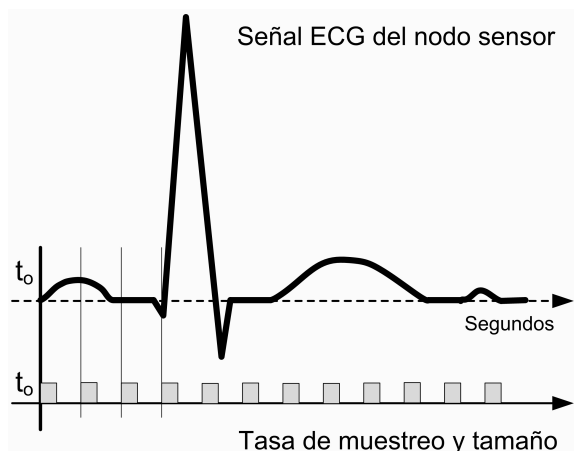


Figura 1. Señal ECG y digitalización.

Desde el punto de vista de la aplicación, el tipo tráfico se debe generar de forma periódica durante todo el tiempo que incurra la supervisión médica. A éste tipo de tráfico se le considera de carácter crítico, con flujos de datos de tipo continuo. Además, el usuario de la aplicación espera recibir los datos lo más rápido posible. Por lo tanto, el retardo de transmisión de los datos es un importante parámetro. En [11] se establece que el valor de retardo de transmisión de un ECG de tres electrodos debe ser menor a 500 ms y una tasa mínima de 4 Kbps. Por su parte en [12] indica que una señal ECG genera una tasa de datos de 1 a 20 Kbps y el retardo de transmisión debe ser menor a 1 segundo. Por lo tanto, consideramos para nuestro análisis un requerimiento QoS de: al menos 5 Kbps para la tasa de datos y retardo de transmisión de paquete no mayor a 500 ms.

Estos requerimientos de comunicación y el tipo de tráfico de las señales ECG son un dato importante al momento de diseñar los protocolos de comunicaciones para garantizar los niveles QoS que la aplicación médica necesita.

3. Escenario de trabajo

Nuestro escenario de trabajo involucra una WSN con una arquitectura de red que incluye las capas de aplicación, de Transporte y la sub-capa MAC (Figura 2). La capa de aplicación involucra los requerimientos de la aplicación médica, detallados en la sección anterior. Cabe resaltar que el objetivo de la aplicación médica es para la supervisión de la salud del paciente y no con fines de diagnóstico. Además, se propone que cada nodo sensor envíe una señal ECG (de tres electrodos) de forma constante y permanente. La cantidad de tráfico que cada nodo puede generar se establece en 18 kbps durante todo el tiempo de experimentación, mayores

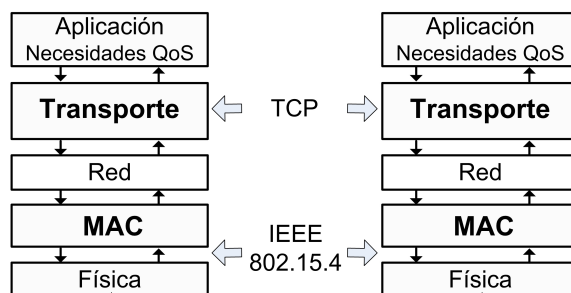


Figura 2. Arquitectura del escenario de trabajo.

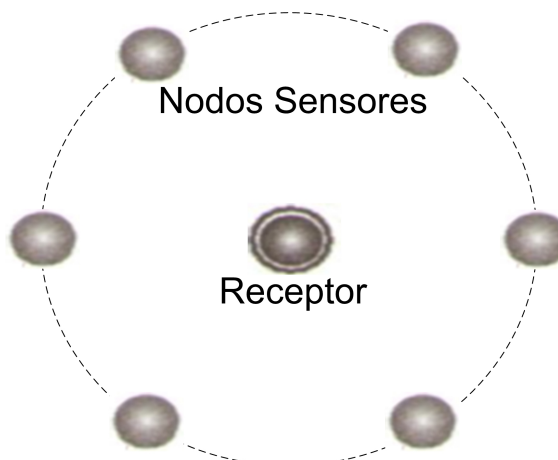


Figura 3. Topología de la red WSN.

a los establecidos en la Tabla 1, con el fin de considerar casos irregulares de pacientes con problemas de arritmias, como una taquicardia. En lo referente a la capa de Transporte se propone el protocolo TCP, como medio para establecer la comunicación a nivel de proceso, debido a sus prestaciones de control de flujo y confiabilidad en la entrega de paquetes.

Par la subcapa MAC y capa Física se utiliza el estándar IEEE 802.15.4 en su versión de 2.4 GHz a una tasa de 250 Kbps, que cubre las especificaciones de ambas entidades. IEEE 802.15.4 en modo No-Beacon es elegido para la operación de la red, el cual ofrece el máximo desempeño y el mínimo retardo de transmisión [5], [6]. En todos los casos se utiliza el mecanismo CSMA/CA para usar el canal inalámbrico.

En cuanto a la topología de la red esta se basa en una configuración en estrella. Los nodos sensores están distribuidos alrededor del nodo receptor a la misma distancia, como se aprecia en la Figura 3. La red se propone “totalmente conectada”, esto significa que todos los nodos de la red puedan escuchar sus transmisiones entre sí; para evitar el problema del nodo oculto presente en las redes inalámbricas.

4. Métricas de desempeño y casos de estudio

Para conocer si el protocolo TCP y el estándar IEEE 802.15.4 cubren las necesidades de transmisión del tráfico ECG se propone dos métricas de evaluación:

- Métricas QoS:** tasa de entrega de datos (Td) y retardo de transmisión de paquete (Rt).
- Equidad:** Se refiere a las oportunidades de transmisión de paquetes de cada nodo hacia el destino o Sink.

Las métricas fueron seleccionadas por que integran los principales parámetros de evaluación del desempeño de una red de comunicaciones [13]. Además, se consideran los requerimientos de QoS para la señal ECG de: 500 ms para el retardo de transmisión y de 5 Kbps para la tasa de entrega de datos.

La tasa de entrega de datos (Td) se define como la cantidad de bits recibidos en el nodo destino por unidad de tiempo, desde cualquier nodo sensor. Este valor es conocido como desempeño de la red o Throughput (por su significado en inglés). Td está dada en bits por segundo (bps) y se calcula como:

$$Td = \frac{\text{bits recibidos}}{\text{Ventana de tiempo}} \text{ bps} \quad (1)$$

El retardo de transmisión de paquete (Rt) es el intervalo de tiempo desde que el paquete i es enviado por el nodo sensor hasta el momento en el cual el paquete i es recibido en el nodo receptor:

$$Rt(P_i) = \text{tiempo de llegada} - \text{tiempo de salida} \quad (2)$$

La *Equidad* de la red es medida como la cantidad de paquetes recibidos en el nodo receptor de cada nodo sensor por unidad de tiempo. A través de esta métrica podemos conocer que señal médica se está reportando con más frecuencia hacia el nodo destino.

La evaluación de todas las métricas será efectuada en el nodo receptor y serán calculadas tanto para TCP como para IEEE 802.15.4.

4.1. Casos de estudio

Con la intención de conocer los parámetros que proporcionan el mejor desempeño de las métricas bajo el escenario planteado, se proponen dos casos de estudio:

- Tamaño del paquete de datos:** carga útil dentro del paquete que corresponde a los datos de la señal ECG muestreada.
- Cantidad de nodos sensores:** número de nodos que forman la WSN, los cuales generan datos de manera continua.

Estos casos están propuestos debido a que afectan la operación del estándar IEEE 802.15.4 y del protocolo TCP. En el caso de IEEE 802.15.4 nos interesa conocer el desempeño del mecanismo de acceso al medio CSMA/CA. El desempeño de este mecanismo se ve seriamente afectado por el la cantidad de nodos que compiten por el uso del canal inalámbrico; en este sentido, la cantidad de nodos y el tamaño de paquete juegan un rol crítico. Por un lado, más nodos sensores intentando transmitir se traduce en un incremento del nivel de contienda en la red. Por otro lado, un mismo nodo sensor puede causar mayor o menor contienda de acuerdo a la cantidad de paquetes por unidad de tiempo que desee transmitir.

En el caso de TCP, queremos conocer cuál es el desempeño alcanzado en el transporte de los datos. Por ejemplo, se requiere establecer una sesión para cada nodo que necesiten transmitir; por ello, mayor número de nodos mayor es la demanda hacia el mismo nodo receptor, lo cual puede incrementar el retardo de transmisión o que no se logre la sesión. TCP espera un paquete de Ack por cada paquete enviado. En consecuencia, mayor número de paquetes provoca una mayor cantidad de procesos y tráfico por la red. Este tráfico además de afectar las métricas de retardo incrementan el nivel de contienda del a nivel MAC.

Para cada caso de estudio se establecieron los siguientes parámetros de configuración:

- Para simular el tráfico ECG se utilizará un generador de tráfico constante tipo CBR (Constant Bit Rate) a una tasa de 18 Kbps, en la capa de aplicación.
- Cada nodo inicia el envío de tráfico de forma aleatoria una vez que la red está totalmente construida (asociación de los nodos de la red).
- Se utilizó la versión básica de TCP con las configuraciones por omisión.
- En lo referente a IEEE 802.15.4, se utilizó: con y sin servicios de confiabilidad (Ack), valores por omisión para CSMA/CA (minBE=3, maxBE=5 y CSMABackoff=4).

Para el primer caso, se consideraron 6 nodos como fuente de tráfico y un tamaño de paquete, a nivel TCP, desde 10 hasta 80 bytes; resultando en 57 y 127 bytes respectivamente para la capa MAC (debido a los 40 y 7 bytes de sobre carga de control que TCP y MAC le agregan al paquete respectivamente). Para el caso 2, se fijó el tamaño del paquete al valor encontrado en el primer caso (con el cual se tuvo el mejor equilibrio

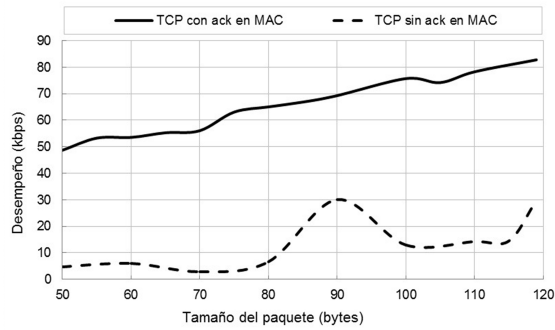


Figura 4. Tasa de entrega de datos en TCP.

entre T_d y R_t) y la variable de estudio fue la cantidad de nodos en la red (1 hasta 6 nodos).

La experimentación se realiza con el simulador de redes NS2, herramienta orientada a eventos que cuenta con módulos para el registro detallado de la operación de la red bajo el escenario propuesto. Cada resultado medido en el simulador fue el promedio de 200 eventos y cada experimento se repitió 10 veces para obtener el promedio del promedio.

5. Análisis de resultados

La Figura 4 presenta el T_d alcanzado por la red a nivel TCP (mismo valor para nivel MAC). Observe que en general conforme el tamaño de paquete se incrementa también lo hace el T_d . Por ejemplo, para el caso de servicio con confiabilidad a nivel MAC, para un tamaño de 50 bytes se alcanzó un desempeño de 48.65 Kbps y cuando el paquete MAC fue de 110 bytes el valor del desempeño fue de 78.24 Kbps; lo que representó un incremento del 62.18 %. Esto es consecuencia del mecanismo CSMA/CA; ya que la red necesita transmitir más del doble de paquetes para transportar la misma cantidad de datos, cuando se utiliza paquetes de 50 bytes. Lo cual se traduce en más periodos de contienda en un corto intervalo de tiempo, incrementando la probabilidad de colisiones y la probabilidad de “falta de acceso al canal”.

En ambos casos el paquete se pierde, primero por el daño del paquete, y segundo por el descarte del paquete debido al algoritmo CSMA/CA. Por lo tanto, es importante manejar paquetes de mayor tamaño para provocar que los nodos transmitan paquetes a “intervalos de tiempo mayores” y en consecuencia, la probabilidad de éxito de acceso al canal sea mayor. Otra conclusión importante de los resultados de la Figura 4 fue, que el valor de T_d alcanzado fue mejor cuando se usa el mecanismo Ack en la operación de IEEE 802.15.4. Esto se explica, porque el mecanismo de confiabilidad de MAC recu-

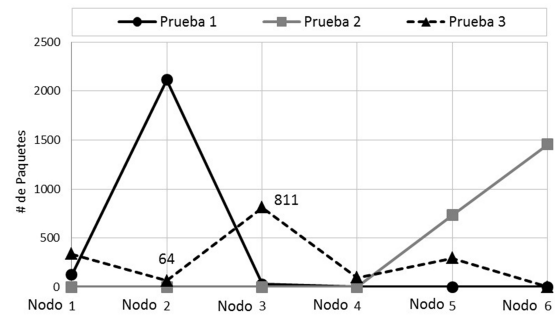


Figura 5. Paquetes recibidos en el receptor de cada nodo sensor.

pera, con un cierto grado de eficiencia, los paquetes que no fueron recibidos. Por lo tanto, se incrementa la probabilidad de éxito en la entrega de paquetes. El beneficio del mecanismo se maximiza cuando el paquete que recupera corresponde a un paquete de solicitud o de confirmación de sesión de la capa de transporte. Puesto que, evita que el 100 por ciento de los paquetes de ese flujo se pierdan, debido a al mecanismo de TCP para enviar sus datos. Esto puede observarse en los resultados de la Figura 5. Por ejemplo, en la prueba 1 y 2 sólo se recibieron paquetes de dos nodos, de los 6 posibles. Revisando el archivo de traza, que genera el simulador NS2, se confirma que la causa principal por la que el resto de los nodos no enviaron sus datos fue la falla para iniciar sesión; incluso a pesar, que la capa MAC operaba con el mecanismo Ack.

En lo referente a la métrica de “Equidad”, nos apoyaremos de la Figura 5. Observe los resultados de la prueba 3, el nodo que más paquetes logró enviar al nodo destino fue el nodo tres, con un total de 811 paquetes, en contraste con los 64 paquetes enviados por el nodo 2. Esto nos permite concluir que TCP e IEEE 802.15.4 no cuentan con mecanismos adecuados para proporcionar equidad a los nodos. Este problema impide que se pueda garantizar un cierto nivel de QoS por aplicación específica. Esto deja un espacio importante de investigación para implementar mecanismos de priorización de paquetes y/o nodos.

El retardo de transmisión es una métrica importante en las aplicaciones médicas de tiempo crítico. Los resultados del retardo promedio en TCP, para diferentes tamaños de paquetes, se muestran en la Figura 6. La primera conclusión fue, que la prueba con el mecanismo Ack de MAC presenta mayores retardos para cualquier tamaño de paquete. Lo cual es comprensible, ya que el nodo transmisor debe esperar por un paquete de confirmación antes de enviar el siguiente paquete; lo cual incorpora un valor extra de tiempo a cada comunicación. Otro resultado importante fue, que el valor del retardo promedio disminuye conforme se incrementa el

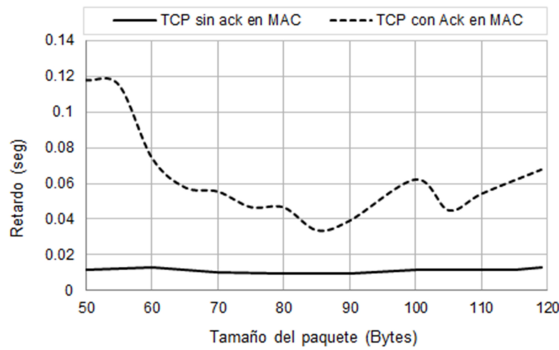


Figura 6. Retardo promedio de transmisión de paquete a nivel TCP.

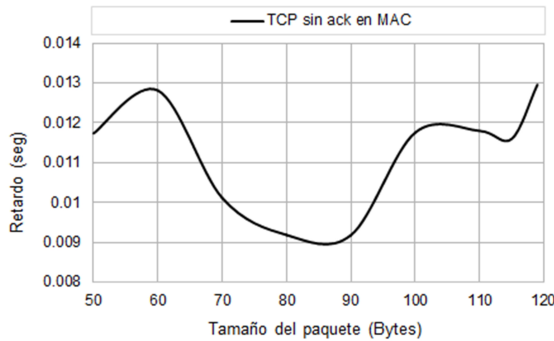


Figura 7. Retardo promedio de transmisión de paquete en TCP sin Ack en MAC.

tamaño del paquete hasta que el paquete alcanza un cierto tamaño, entonces el retardo promedio comienza a incrementarse.

Observe la Figura 6, para el caso de TCP con Ack en MAC, el retardo disminuye de 117 ms (para un tamaño de 50 bytes) hasta los 33.7 ms, cuando el paquete tiene un tamaño de 85 bytes. Sin embargo, con forme el tamaño del paquete se incrementa el valor de retardo comienza a crecer.

En el caso de TCP sin Ack en MAC, parece que el efecto no fue tan evidente, sin embargo, esto es debido a la escala del eje “Y”. Por ello se presenta la Figura 7, con el mismo caso. Observe que el comportamiento antes descrito es muy evidente. Además, al igual que en el caso anterior, los mejores valores de retardo se obtienen para un tamaño de paquete MAC entre 80 y 90 bytes.

Este comportamiento se explica debido a los procesos involucrados en el envío de los datos: el acceso al canal (retardo de Backoff) y la transmisión del paquete (retardo de transmisión). Cuando el tamaño del paquete es pequeño la principal contribución al retardo lo aporta el tiempo de acceso al canal del mecanismo CSMA/CA, ya que más paquetes a transmitir por cada nodo ocasionan mayor demanda de acceso, y por lo tanto mayores periodos de Backoff. Por otro lado, conforme el tamaño del paquete rebasa los 85 bytes, la principal contribu-

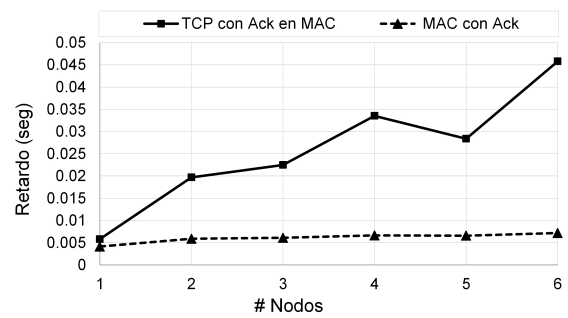


Figura 8. Retardo promedio de transmisión de paquete a nivel TCP y MAC.

ción al retardo de transmisión la da el tiempo que le toma al emisor enviar el paquete hasta el nodo destino, una vez que obtiene el acceso al medio. Ya que más bits por paquete requieren periodos mayores de transmisión incrementando el retardo total.

Recordando que uno de los objetivos de la experimentación es obtener el tamaño de paquete que nos diera el mejor valor de la métrica de Retardo y Td. Se concluye, a partir del estudio anterior que se tiene mayor Td cuando se utiliza el mecanismo de Ack en MAC y se tienen los más bajos valores de retardo cuando se utiliza un tamaño de paquete en MAC de alrededor de 80 bytes (y un tamaño de 33 bytes en TCP por los encabezados que se adicionan, 47 bytes).

Ahora que se tiene definido el tamaño de paquete (80 bytes), con el cual se tiene un adecuado equilibrio entre el valor de Retardo de paquete y Ancho de Banda alcanzado por la red, nuestro siguiente paso es conocer el efecto del número de flujos o nodos en la red en las métricas definidas. Con ello, establecer el número máximo de flujos ECG que una red WSN puede soportar bajo los requisitos QoS establecidos en la sección 2.3. La Figura 8 muestra los resultados de las pruebas para el retardo de transmisión para un tamaño de paquete fijo a 80 bytes y la activación del Ack en capa MAC. Los resultados muestran que el retardo promedio para TCP fue mayor que en MAC, sobre todo conforme el número de nodos se incrementa. Es claro que el retardo en TCP debe ser mayor que MAC, ya que éste incluye el tiempo de MAC; sin embargo, TCP aporta la mayor parte del valor final del retardo. Por ejemplo, para el caso de 3 nodos, el retardo de TCP fue de 22.48 ms y para MAC fue de 6.1 ms; que representa un incremento de 72.84 % para TCP. Lo cual evidencia una oportunidad de mejora al cambiar de protocolo de transporte para el envío de los datos.

Para el análisis de la cantidad de nodos que la WSN puede soportar consideramos que un ECG genera 5 Kbps o 625 bytes por segundo, y considerando que TCP

debe incorporar 33 bytes como máximo para obtener los 80 bytes en capa MAC, se tendrían 18.94 paquetes en TCP por cada señal ECG (o 19 paquetes). Por lo tanto, el retardo de transmisión de los 19 paquetes no debe ser mayor a 500 ms. En este sentido y de los resultados de la Figura 8, la WSN puede soportar hasta 3 nodos si utilizamos TCP, ya que el retardo promedio por paquete fue de 22.487 ms por 19 paquetes de la señal ECG, se alcanza un retardo total de 427.25 ms. Sin embargo para 4 nodos, con un retardo de 33.528 ms, se alcanza 637.03 ms, rebasando los 500 ms que requiere la aplicación médica del ECG. Caso totalmente diferente si consideramos sólo el retardo de transmisión de capa MAC, que puede soportar los 6 nodos sin problema, ya que el retardo promedio con 6 nodos es de 136.352 ms (retardo unitario de 7.176 ms).

Para el caso de la métrica de desempeño (Td), la Figura 9 muestra los resultados obtenidos en la simulación. Como se observó en los resultados del primer caso de estudio, el desempeño es significativamente mayor cuando se activa el mecanismo de confiabilidad de MAC. Sin embargo, para un solo nodo sensor, el desempeño que alcanza la red es prácticamente el mismo en ambos casos. Esto es explicable, ya que no existen otros nodos que provoquen colisión o incrementen la congestión de la red. Sin embargo, cuando la cantidad de nodos crece, la cantidad de contienda por acceso al canal también lo hace; provocando problemas en la operación de TCP y del mecanismo CSMA/CA que afectan el desempeño de la red. Otra observación importante de la Figura 9 y del caso TCP con Ack en MAC fue que, excepto para uno y dos nodos sensores, el resto de los casos no alcanzo el desempeño esperado, ya que el crecimiento se mantiene alrededor de los 62.5 Kbps. La causa principal fue la falla en el inicio de sesión de TCP, lo cual provocó que algunos nodos no iniciaran la transmisión de sus datos. Por lo tanto, aunque TCP e IEEE 802.15.4 tiene mecanismos para recuperar paquetes (Ack), sin embargo, no fue suficiente.

6. Conclusiones

En este trabajo se analizaron algunos factores que afectan la operación de TCP e IEEE 802.15.4 para cumplir los requerimientos QoS (tasa de entrega de datos y retardo de transmisión) y de Equidad para la supervisión de la salud. Estos factores fueron el tamaño de paquete, la cantidad de nodos en la red y las características del tráfico de la aplicación ECG. Los resultados muestran que el desempeño alcanzado en las métricas por IEEE 802.15.4 dependen del nivel de contienda por el acceso al medio debido al CSMA/CA, por lo tanto

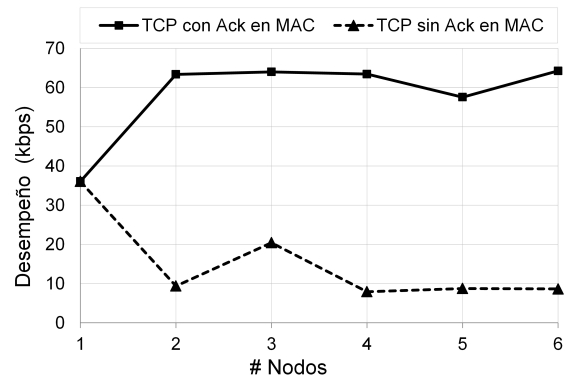


Figura 9. Desempeño de TCP contra el número de nodos.

cuando se trabaja un tamaño de paquete a nivel MAC entre 80 y 90 bytes se obtiene los valores más bajos de retardo y un valor aceptable para la tasa de entrega de datos. Otra conclusión importante es que TCP es la causa principal del retardo de transmisión total, debido a sus mecanismos de entrega y recepción de sus mensajes. Al respecto del número de nodos sensores ECG, el IEEE 802.15.4 puede soportar los 6 nodos del escenario sin alcanzar los 500 ms de retardo máximo permitido; sin embargo TCP sólo puede soportar tres nodos.

Por último, se concluye que TCP e IEEE 802.15.4 no ofrecen la misma oportunidad de transmisión a los nodos de la red y sólo garantiza el “mejor esfuerzo”. Por lo tanto, es necesario administrar el tráfico que pasa en cada nodo; con el fin de garantizar los mejores valores de QoS, de acuerdo a los niveles de prioridad de cada aplicación.

Como trabajo futuro consideramos la evaluación del mecanismo de acceso al medio CSMA/CA administrando los tiempos de Backoff e incorporando un protocolo de transporte que considere las áreas de oportunidad aquí descritas.

Referencias

- [1] M. A. Ameen, A. Nessa, and K. S. Kwak, “QoS Issues with Focus on Wireless Body Area Networks,” *Convergence and Hybrid Information Technology, ICCIT '08. Third International Conference on*, Vol. 1, pp. 801 -807, 2008.
- [2] B. Latré, B. Braem, I. Moerman, C. Blondia, and P. Demeester, “A survey on wireless body area networks,” *Wirel. Netw.*, Vol. 17, No. 1, pp. 1-18, Jan. 2011.
- [3] M. A. Yigitel, O. D. Incel, and C. Ersoy, “QoS-aware MAC protocols for wireless sensor networks: A survey,” *Comput. Netw.*, Vol. 55, No. 8, pp. 1982-2004, Jun. 2011.
- [4] A. Sharif, V. Potdar, and A. J. D. Rathnayaka, “Performance evaluation of different transport layer protocols on the IEEE 802.11 and IEEE 802.15.4 MAC/PHY layers for WSN,” *Proceedings of the 7th International Conference on Advances in*

- Mobile Computing and Multimedia*, pp. 300-310, New York, NY, USA, 2009.
- [5] B. Latré, P. De Mil, I. Moerman, N. Van Dierdonck, B. Dhoedt, and P. Demeester, "Maximum throughput and minimum delay in IEEE 802.15.4," *Proceedings of the First international conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, Berlin, Heidelberg, pp. 866-876, 2005.
- [6] X. Liang and I. Balasingham, "Performance Analysis of the IEEE 802.15.4 based ECG Monitoring Network," *Wireless and Optical Communications*, Quebec, Canada, pp. 99-104, 2007.
- [7] DARPA. (Julio, 2013), "TCP-Transmission Control Protocol," <http://www.ibiblio.org/pub/docs/rfc/rfc793.txt>.
- [8] IEEE. (2006), "IEEE Standard for Information technology- Local and metropolitan area networks- Specific requirements- Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)," *IEEE Std 802154-2006 Revis. IEEE Std 802154-2003*, pp. 1-320.
- [9] J. A. Gutiérrez, Callaway, and R. L. Barrett, "Low-rate wireless personal area networks: enabling wireless sensors with IEEE 802.15.4," *IEEE*, New York, 2007.
- [10] N. Chevrollier and N. Golmie, "On the use of wireless network technologies in healthcare environments," *Proc. 5th IEEE workshop on Applications and Services in Wireless Networks*, ASWN 2005, Paris, France, pp. 147-152, 2005.
- [11] J. R. Gallego, A. Hernandez-Solana, M. Canales, J. Lafuente, A. Valdovinos, and J. Fernandez-Navajas, "Performance analysis of multiplexed medical data transmission for mobile emergency care over the UMTS channel," *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed.*, Vol. 9, No. 1, pp. 13-22, 2005.
- [12] S. Arnon, D. Bhastekar, D. Kedar, and A. Tauber, "A comparative study of wireless communication network configurations for medical applications," *IEEE Wirel. Commun.*, Vol. 10, No. 1, pp. 56-61, 2003.
- [13] C. Wang, B. Li, K. Sohraby, M. Daneshmand, and Y. Hu, "Upstream congestion control in wireless sensor networks through cross-layer optimization," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 25, No. 4, pp. 786-795, May 2007.