

# Análisis de rendimiento de protocolos de Publicación/Suscripción en comunicación con una Red de Sensores Inalámbricos Zigbee

Carlos Hervas Parra, Luis Marrone.  
Facultad de Informática, Universidad Nacional de La Plata  
La Plata – Argentina  
hervasc@esPOCH.edu.ec, lmarrone@linti.unlp.edu.ar.

**Resumen.** En esta investigación se realizó una revisión del estado del arte de una Red de Sensores Inalámbricos basada en el estándar IEEE 802.15.4 y su operación a través de la tecnología Zigbee, así como también el estudio de las comunicaciones M2M mediante los protocolos de publicación/suscripción MQTT-SN y CoAP. Proponiendo la construcción de un escenario de pruebas para la implementación de estos protocolos, con el fin de realizar un análisis de rendimiento en su operación con la WSN mediante la medición de consumo de ancho de banda, tasa de entrega y pérdida de publicaciones dentro de la red. Finalmente, se expone los resultados obtenidos a través del análisis de cada protocolo mediante gráficos con sus correspondientes discusiones y conclusiones principales del trabajo.

**Palabras Clave:** WSN, Zigbee, Publicación/Suscripción, MQTT-SN, CoAP.

## 1 Introducción

Mediante este trabajo se pretende investigar a fondo el funcionamiento de una Red de Sensores Inalámbricos bajo la tecnología Zigbee y como esta se puede interconectar hacia la red tradicional de servicios (Red LAN o Internet), para su interacción con la misma a través de un protocolo de comunicación que brinde de manera más eficiente la comunicación de extremo a extremo entre las dos redes. Los protocolos de comunicación que se estudian y utilizan a lo largo de la investigación son: el protocolo Message Queue Telemetry Transport Sensor Network (MQTT-SN) y el Protocolo de Aplicación Restringido (CoAP).

Para el desarrollo de la investigación se planteó la utilización de un escenario de red de pruebas compuesto por una Red de Sensores Inalámbricos Zigbee y un Gateway de interconexión hacia un servidor de gestión y almacenamiento de datos dentro de la red TCP/IP como se visualiza en la figura 1.1. Toda la infraestructura de red de pruebas será proporcionada por el laboratorio de informática del Instituto Tecnológico Superior Riobamba.

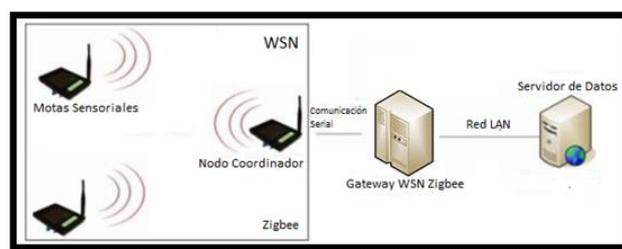


Figura 1.1 Escenario de Red  
Fuente: El Autor

Mediante este escenario, se implementó la operación de cada protocolo en estudio para la obtención de mediciones de los parámetros de consumo de ancho de banda, tasa de entrega y pérdida de publicaciones a nivel de capa de aplicación en la comunicación M2M entre la WSN y el servidor de gestión de datos. El análisis de rendimiento se basó en realizar mediciones de estas métricas en función del número de nodos que publiquen información dentro de la red, teniendo un rango de 10 a 40 nodos sensoriales.

A través de la observación de los resultados del análisis de cada protocolo en el escenario de red de pruebas, se realizó una comparativa para la obtención del protocolo de comunicación M2M basado en

publicación/suscripción más adecuado en el diseño de un sistema de comunicación extremo a extremo entre la Red de Sensores Inalámbricos Zigbee y la red de servicios tradicional.

## 2 Estado del Arte

Desde la aparición de las WSN (Wireless Sensor Networks / Redes de Sensores Inalámbricos), en los últimos años, este tipo de redes ha ido ganando cada vez más atención, desde el punto de vista técnico hasta el punto de vista comercial, debido a su potencial en la implementación de soluciones novedosas y de bajo costo en áreas tales como: automatización industrial, domótica, transporte, monitoreo de eventos físicos y ambientales, sensores para medir o detectar temperatura, presión, humedad, niveles de contaminación o cualquier parámetro crítico de un escenario determinado, es así que el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) identificó a las Redes de Sensores Inalámbricos como una de las diez tecnologías que tienen alto impacto en el progreso tecnológico mundial [14].

En las tendencias actuales como son los ambientes del Internet de las Cosas (IoT), se propone que los dispositivos se conecten y puedan detectar/comunicar datos de su entorno. Se espera que esto genere redes con cantidades de nodos mucho más grandes, por lo tanto, es importante utilizar un método eficiente y escalable para recopilar información de Redes de Sensores Inalámbricos de altas densidades. De igual manera, muchas de estas implementaciones requieren que los datos recopilados por los sensores sean enviados hacia aplicaciones que se encuentran en una infraestructura de red tradicional, por ejemplo: redes LAN, redes empresariales, Internet, etc. Este motivo implica que la integración de las WSN a redes TCP/IP sea un tema abierto para su desarrollo tomando en cuenta que las Redes de Sensores Inalámbricos cuentan con recursos limitados en hardware y software en sus nodos finales, por lo que la utilización de protocolos TCP/IP a nivel de capa de red en los nodos no es siempre factible.

Para atender esta necesidad, en la actualidad la integración de una WSN se encuentra resuelta bajo dos enfoques, a través de un Gateway de interconexión o a través de Redes Overlay. En el primer caso se considera que los nodos sensoriales no cuentan con direccionamiento IP, siendo la estación base de la WSN la que posee el aprovisionamiento a nivel de capa de red y actúa como gateway de interconexión para la salida de la WSN hacia la red TCP/IP. Este enfoque es aplicable en las WSN que no permiten cargas extras de protocolo en los nodos sensoriales, como por ejemplo en redes que utilizan Zigbee [1], definidas por el IETF como dispositivos de "Clase 0" que no pueden ejecutar una pila IP segura debido a limitaciones de recursos, bajo nivel de procesamiento y memoria.

Mientras que para el segundo caso se considera incluir parte o toda la pila TCP/IP en los nodos sensoriales mediante el protocolo 6LoWPAN [15], el cual permite la implementación del stack IPv6 sobre las capas PHY y subcapa MAC del estándar IEEE 802.15.4 para que cualquier dispositivo que lo utilice pueda tener conectividad a nivel de capa de red logrando de esta manera que un nodo final o dispositivo sensorial dentro de la WSN tenga conexión directa hacia internet donde se publican sus datos, cada nodo es visible desde la red tradicional externa a través de IPv6 con lo cual la conectividad hacia entornos de IoT se encuentra resuelta.

Por otro lado, en la ciudad de Riobamba a cargo del Instituto Tecnológico Superior Riobamba se encuentra en producción una Red de Sensores Inalámbricos compuesta por un conjunto de motas sensoriales que operan a través de la plataforma Xbee Pro, la cual se encarga de la recolección de parámetros ambientales para su estudio por parte de instituciones públicas de la ciudad, que acceden a la información a través de un servidor que se encuentra instalado de forma local en la red. Con el fin de mejorar y optimizar el acceso y visualización de los datos generados por la red, dada su importancia de operación en la ciudad, se aprovecha el uso de su infraestructura como principal motivación de esta investigación para el análisis de un mecanismo de comunicación que vincule la operación de este tipo de dispositivos de redes sensoriales hacia la red tradicional de servicios (Red LAN o Internet), para su interacción con la misma. Debido a la limitación de recursos de la red, se utiliza el enfoque de integración para la WSN a través de un Gateway de interconexión mediante Zigbee.

También se consideró que la actual aplicación que gestiona los datos de la red, de manera general se encuentra enviando consultas continuamente hacia todos los nodos sensoriales requiriendo una gran cantidad de información que en muchos casos no es utilizada o analizada, con lo cual la obtención de información de la WSN se realiza de forma ineficiente y conduce a un desperdicio de recursos valiosos dentro de la red como son: la energía, procesamiento, memoria y el ancho de banda, que son muy limitados en este tipo de dispositivos. Esta problemática puede superarse con la utilización de un enfoque de comunicación centrado en los datos, en el cual la información se entrega a los consumidores no en función de los identificadores de red, sino más bien en función de sus contenidos e intereses. El modelo de Publicación/Suscripción [2], es un ejemplo muy claro de comunicación centrada en datos y es ampliamente utilizado en redes empresariales, principalmente debido a que

permite una mayor escalabilidad y flexibilidad, además de proporcionar una topología de red más dinámica. Estas son características deseables para una Red de Sensores Inalámbricos y tendencias actuales que exige el Internet de las Cosas que hacen que el modelo de publicación/suscripción sea muy adecuado para este propósito.

Existen varios estudios sobre el uso de protocolos de transporte confiables en las WSN [12-13]. Es así como algunos protocolos bajo el modelo de publicación/suscripción ya se han propuesto para este tipo de redes [3-4], la mayoría de los cuales sin embargo son protocolos cerrados, es decir, están diseñados para una aplicación específica sin una estandarización universal o su desarrollo ya no es soportado. Por otro lado, los protocolos abiertos han tenido un mejor auge en su desarrollo e intentos de estandarización [5]. Entre estos protocolos, se encuentra MQTT (Message Queue Telemetry Transport), con su especificación MQTT-SN (Message Queue Telemetry Transport Sensor Network) [8], como una versión de MQTT adaptada a las peculiaridades de un entorno de comunicación inalámbrica para sensores, siendo ampliamente utilizado para aplicaciones de monitoreo remoto [6], aplicaciones de mensajería [7], y una gama de aplicaciones de automatización y domótica.

También se encuentra el protocolo CoAP (Constrained Application Protocol) [9], desarrollado por el grupo de trabajo IETF CORE [10]. CoAP es un protocolo de transferencia de estado representacional (RESTful) con funcionalidades web optimizado para redes con recursos limitados, está enfocado hacia aplicaciones M2M en entornos del Internet de las cosas, se basa en una arquitectura REST en la que los recursos se ponen a disposición mediante un proceso de aplicación y se visualizan mediante identificadores universales de recursos (URI), lo cual lo hace ideal para su funcionamiento en conjunto con redes de sensores restringidas, tiene como objetivo operar en nodos de bajo nivel de procesamiento dentro de las WSN. CoAP también proporciona un modelo de publicación/suscripción llamado modelo de observador [11].

De esta manera tanto MQTT-SN como CoAP son los dos principales protocolos abiertos que se podrían utilizar dentro de redes de sensores restringidas en recursos que utilicen Zigbee. Debido a que el uso de servicios web en Internet se ha vuelto omnipresente en la mayoría de las aplicaciones actuales, es de vital importancia el estudio de este tipo de protocolos en su función como intermediarios en la unificación de la red de sensores inalámbricos con la red tradicional donde se alojan los servicios de dichas aplicaciones.

## 2.1 Interconexión de una Red Zigbee hacia la Red Tradicional

Desde su creación una WSN con Zigbee fue concebida como una red donde cada nodo sensorial recolecta datos de su entorno físico y estos son destinados hacia el nodo coordinador el cual mediante una conexión serial permite la transferencia de esta información hacia una aplicación o servidor local para su tratamiento y almacenamiento.

En la actualidad con el surgimiento de IoT, desde una perspectiva de comunicación de extremo a extremo, una WSN con Zigbee puede ser vista como la unificación de dos subredes:

- Una subred que conecta uno o más nodos sensoriales, quienes enrutan los datos hasta el nodo coordinador el cual se interconecta con un gateway utilizando protocolos propios especificados por Zigbee.
- Otra subred de conexión TCP/IP bajo el paradigma de comunicación M2M entre el gateway y un servidor o intermediario de servicios de fondo.

A través de un protocolo de comunicación de datos fiable la puerta de enlace debe agregar todos los datos recibidos de varios nodos sensoriales y luego encargarse de enviarlos hacia un servidor intermediario, para que estos recursos sean consumidos por parte del cliente.

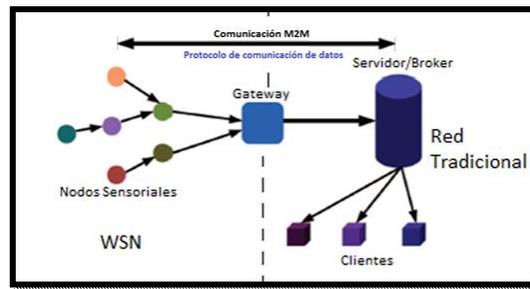


Figura 2.1. Interconexión de una Red Zigbee hacia la Red Tradicional  
Fuente: El Autor

Según lo visualizado en la figura 2.1, se puede determinar los elementos que cumplen el papel de intermediarios de interconexión entre las dos subredes que forman parte de la arquitectura de una WSN con visibilidad hacia la red tradicional, siendo los siguientes:

- **Gateway de interconexión:** Es el único punto de acceso a la WSN, permite tomar los datos de los nodos Zigbee y enviarlos por la red tradicional logrando el acoplamiento de las dos subredes ofreciendo los servicios de capas superiores para que los nodos sensoriales con recursos limitados no requieran cargas extras de protocolo.
- **Comunicación M2M:** Proporciona la arquitectura de comunicación entre los dispositivos de la red sensorial y el servidor que gestione los datos de la red.
- **Protocolo de comunicación de datos:** Las WSN a diferencia de las redes inalámbricas tradicionales, están compuestas por nodos que tienen recursos acotados de cómputo, memoria y energía. Estas restricciones implican el surgimiento de protocolos para la comunicación de sus datos diseñados específicamente para este tipo de tecnología.

### 3 Construcción del escenario de red de pruebas

En la Figura 3.1, se observa la representación gráfica del escenario de red implementado para realizar las pruebas y mediciones, el cual consta de una WSN con un total de 40 nodos sensoriales inalámbricos conectados hacia un nodo coordinador. La comunicación inalámbrica se realiza mediante la tecnología Zigbee con una topología de red tipo malla. Los Nodos de la WSN se encuentran dispersos en el Campus del Instituto Tecnológico Superior Riobamba en la ciudad de Riobamba y en su operación se encargan de la recolección de parámetros ambientales (temperatura, humedad y presencia de gases).

La arquitectura de interconexión hacia la red tradicional es centralizada mediante un dispositivo gateway, el cual se encuentra interconectado hacia el nodo coordinador de la WSN mediante una conexión serial por puerto USB y por una interfaz ethernet se encuentra conectado hacia la red LAN, para su comunicación con el servidor en donde se deben gestionar los datos de la WSN. Adicionalmente en el segmento de la red LAN se encuentra interconectado un ordenador portátil que se encarga de la captura de tráfico generado entre la WSN y el servidor para la medición de los parámetros estipulados en el análisis.

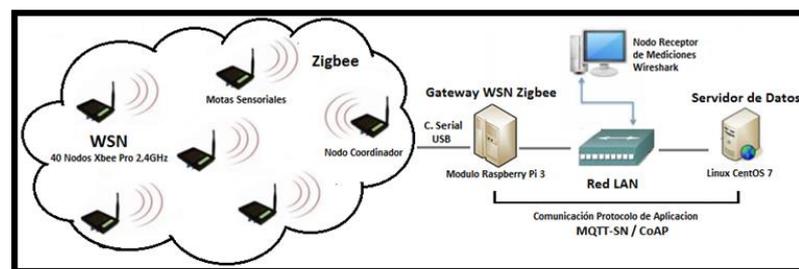


Figura 3.1. Escenario de Red de Pruebas  
Fuente: El Autor

Para el análisis de rendimiento de cada protocolo se dispuso de 4 escenarios de operación los cuales varían según el número de nodos de la WSN, es decir las métricas de rendimiento (consumo de ancho de banda, tasa de entrega, retransmisión y pérdida de publicaciones) de cada protocolo fueron medidas en función al número de nodos que transmitan información por la red, teniendo en cuenta escenarios con 10, 20, 30 y 40 nodos sensoriales transmitiendo datos a través del nodo coordinador y su gateway para su conexión hacia el servidor de gestión de datos en la red LAN.

### 3.1 Emulación de una comunicación a través de Internet

Se implementó la emulación de una red restringida o amplia dentro del escenario de red de pruebas que permita insertar parámetros de retraso, pérdida, duplicación, corrupción y reordenamiento de paquetes con el objetivo de que se pueda obtener el comportamiento de una red con características similares a las que se presentan en ambientes de comunicación amplios como internet, con la ventaja de que mediante el uso de la emulación los parámetros mencionados anteriormente puedan ser manipulados en función del tipo y cantidad de restricciones que se desea emular en el comportamiento de la red. Por tal razón, se utilizó la herramienta NetEM en su versión 2.6 para emular un ambiente de red restringida entre el gateway y el servidor de gestión de datos.

Para la emulación de una ruta de Internet con pérdida de paquetes variables, latencia, reordenamiento y jitter se utilizó como base la configuración obtenida de los ejemplos de NetEM [16], que emula las características de conexión de un enlace de Internet desde un ISP de bajo nivel operando en Sudamérica hacia los servidores de un ISP de la costa este de los Estados Unidos, con lo cual se establecieron los siguientes parámetros:

- El retardo de latencia se establece en 100ms con una variación de +/- 40ms con un 25% de correlación con el último paquete enviado.
- La pérdida de paquetes se establece en un 9% de que los paquetes se eliminen aleatoriamente y se pierdan, cada probabilidad sucesiva depende en un 25% de la última.
- La duplicación de paquetes se establece en 1% del total de paquetes enviados.
- La corrupción de paquetes se establece en el 0.1% del tráfico, con lo cual se introduce un solo error de bit en el desplazamiento aleatorio del paquete.
- El reordenamiento de paquetes se establece en que el 5% de los paquetes con una correlación del 50% se enviará inmediatamente.

### 3.2 Implementación de MQTT-SN en el escenario de red de pruebas

Para la implementación del protocolo MQTT-SN dentro del escenario de pruebas se utilizó la arquitectura de gateway agregado ofrecida por el protocolo. En la cual los nodos de la WSN se comunican hacia el gateway a través de conexiones con MQTT-SN y posteriormente el gateway establece su conexión hacia el servidor de gestión de datos mediante MQTT. En la figura 3.2, se visualiza el esquema de comunicación entre todos los elementos de la red. Los nodos sensoriales actuarán como clientes MQTT-SN (agentes de publicación de información). El gateway de interconexión opera como agente intermediario de comunicación traduciendo los mensajes MQTT-SN de la WSN a mensajes MQTT para su envío a través de la red TCP/IP hacia el servidor de gestión de datos en el cual se implementó un servicio de Broker MQTT y un agente de suscripción para recibir los datos generados por la red de sensores inalámbricos.

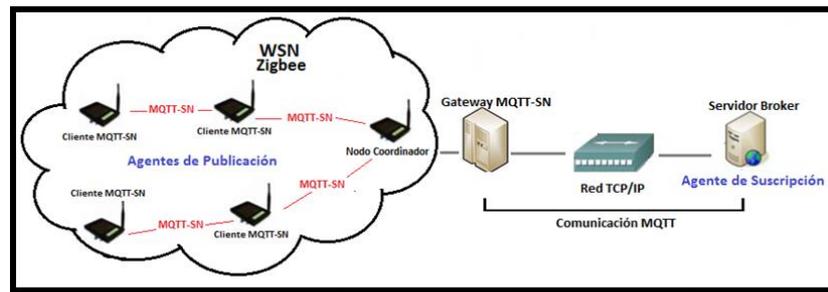


Figura 3.2. Implementación MQTT-SN en escenarios de red de pruebas  
Fuente: El Autor

La comunicación de extremo a extremo entre el cliente MQTT-SN o agente de publicación y el agente de suscripción implementado en el servidor de gestión de datos se llevará a cabo mediante la especificación de un “topic” o tema en común gestionado por el protocolo, el cual será utilizado por los nodos sensoriales para publicar sus datos, así como también lo utilizará el servidor para recibir toda la información. La información fue publicada mediante los mecanismos de confiabilidad de QoS 0 y 1 brindados por el protocolo.

### 3.3 Implementación de CoAP en el escenario de red de pruebas

Para la implementación del protocolo CoAP dentro del escenario de pruebas se utilizó la arquitectura del modelo “observador” ofrecida por el protocolo. En la cual se facilita un mecanismo de interacción publicación/suscripción, donde el protocolo CoAP permite a un cliente observar constantemente los eventos de un sujeto registrando su interés en sus eventos por medio de una solicitud GET extendida y la opción OBSERVE. Para la obtención de datos de la red de sensores inalámbricos, el cliente observador registra su interés en los cambios de eventos dentro de la WSN, los nodos sensoriales cumplen el papel de sujetos de observación publicando sus recursos a través de un proxy intermediario que realiza la tarea de unificación de los nodos sensoriales de la red inalámbrica hacia la red tradicional TCP/IP donde se encuentra el cliente observador. En la figura 3.3, se visualiza el esquema de comunicación entre todos los elementos de la red, donde los nodos sensoriales actúan como sujetos de observación (agentes de publicación de eventos), el servidor de gestión de datos opera como nodo observador (agente de suscripción de eventos) y el gateway de interconexión funciona como proxy intermediario de comunicación encargándose de multiplexar la información de los sujetos de observación con el interés del nodo observador a través del protocolo CoAP.

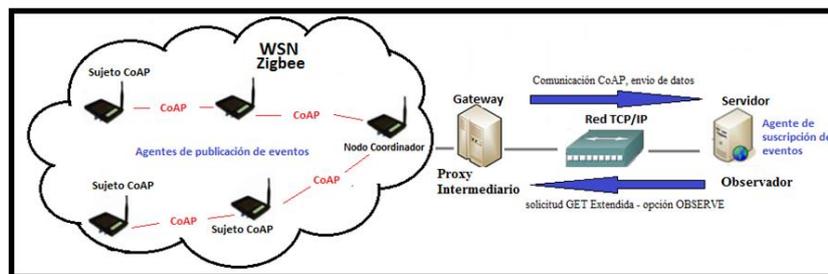


Figura 3.3. Implementación CoAP en escenarios de red de pruebas  
Fuente: El Autor

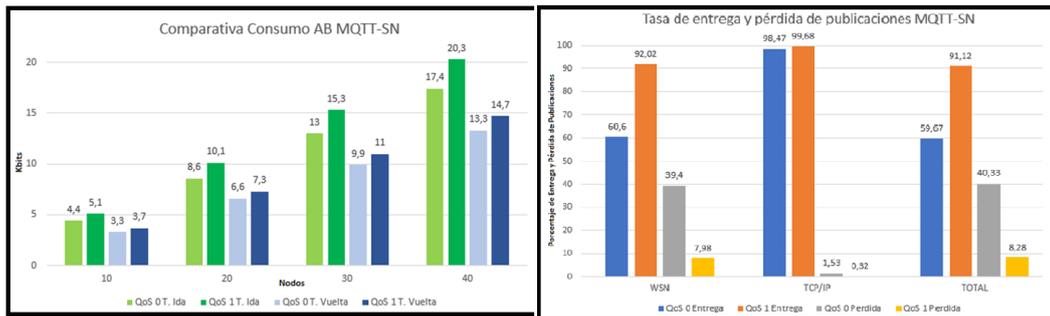
La información fue publicada mediante los mecanismos de confiabilidad de CoAP a través de mensajes no confirmables de tipo NON y mensajes confirmables de tipo CON brindados por el protocolo según cada escenario de prueba.

## 4 Resultados

En la gráfica 4.1, se puede observar la comparativa de consumo de ancho de banda promedio tanto para el tráfico de ida como el tráfico de vuelta de los mecanismos de confiabilidad QoS 0 y 1 de MQTT-SN. Teniendo como resultado que con el mecanismo de confiabilidad QoS 1 se tiene un aumento en el consumo de

ancho de banda para el tráfico de Ida de un 16,93% promedio por cada diez nodos a comparación del tráfico de ida del mecanismo QoS 0. Mientras que, para el tráfico de Vuelta, el mecanismo de QoS 1 presenta un aumento del consumo de ancho de banda del 11,09% promedio por cada diez nodos a comparación del tráfico de vuelta del mecanismo QoS 0.

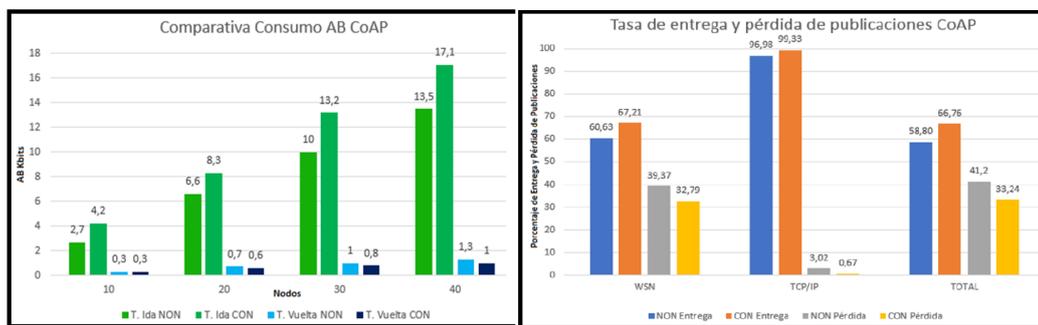
También se puede observar la comparativa del porcentaje de entrega y pérdida de publicaciones entre los mecanismos de QoS 0 y 1 de MQTT-SN. Teniendo como resultado que con el mecanismo de confiabilidad QoS 1 se tiene un mejor porcentaje de entrega de publicaciones a nivel general, habiendo un aumento significativo del porcentaje de entrega del 31,42% en la WSN, 1,21% en la red TCP/IP y un 31,45% en el total de publicaciones entregadas a comparación del mecanismo QoS 0.



Gráfica 4.1. Comparativa de variables MQTT-SN QoS 0 y 1  
Fuente: El Autor

En la gráfica 4.2, se puede observar la comparativa de consumo de ancho de banda promedio tanto para el tráfico de ida como el tráfico de vuelta de los mecanismos de entrega de mensajes tipo NON y CON de CoAP. Teniendo como resultado que con el mecanismo de confiabilidad de mensajes CON se tiene un aumento en el consumo de ancho de banda para el tráfico de Ida de un 34,99% promedio por cada diez nodos a comparación del tráfico de ida del mecanismo de entrega de mensajes NON. Mientras que, para el tráfico de Vuelta, el mecanismo de entrega de mensajes NON presenta un aumento del consumo de ancho de banda del 17,92% promedio por cada diez nodos a comparación del tráfico de vuelta del mecanismo de entrega de mensajes CON.

También se puede observar la comparativa del porcentaje de entrega y pérdida de publicaciones entre los mecanismos de entrega de mensajes NON y CON de CoAP. Teniendo como resultado que con el mecanismo de entrega de mensajes tipo CON se tiene un mejor porcentaje de entrega de publicaciones a nivel general, habiendo un aumento del porcentaje de entrega del 6,58% en la WSN, 2,35% en la red TCP/IP y un 7,96% en el total de publicaciones entregadas a comparación del mecanismo de entrega de mensajes tipo NON.

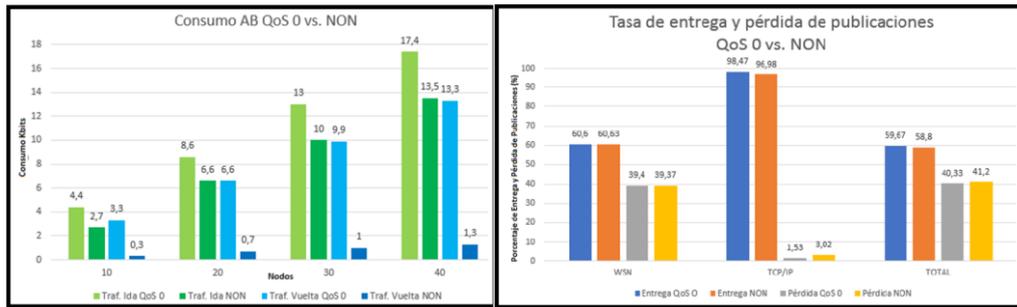


Gráfica 4.2. Comparativa de variables CoAP NON y CON  
Fuente: El Autor

En la gráfica 4.3, se puede observar la comparativa de consumo de ancho de banda promedio tanto para el tráfico de ida como el tráfico de vuelta de los mecanismos de confiabilidad QoS 0 y NON de cada protocolo. Teniendo como resultado que con el mecanismo de confiabilidad NON se tiene un consumo de ancho

de banda menor de un 26,85% promedio para el tráfico de ida y de un 90,11% promedio para el tráfico de vuelta por cada 10 nodos publicadores a comparación del mecanismo de confiabilidad QoS 0.

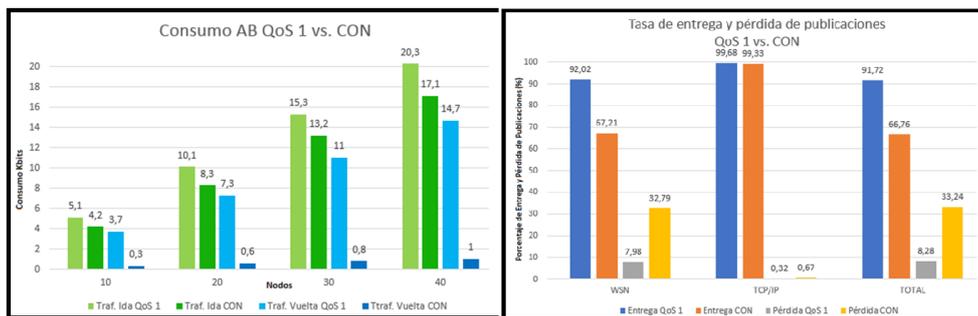
También se puede observar la comparativa del porcentaje de entrega y pérdida de publicaciones entre los mecanismos de confiabilidad QoS 0 y NON de cada protocolo. Teniendo como resultado que con los dos mecanismos de entrega de mensajes se tienen porcentajes de entrega de publicaciones similares a nivel de la WSN, habiendo un ligero aumento del porcentaje de entrega por parte del mecanismo QoS 0 del 1,49% en la red TCP/IP y un 0,87% en el total de publicaciones entregadas a comparación del mecanismo de entrega de mensajes tipo NON.



Gráfica 4.3. Comparativa de variables QoS 0 y NON  
Fuente: El Autor

En la gráfica 4.4, se puede observar la comparativa de consumo de ancho de banda promedio tanto para el tráfico de ida como el tráfico de vuelta de los mecanismos de confiabilidad QoS 1 y CON de cada protocolo. Teniendo como resultado que con el mecanismo de confiabilidad CON se tiene un consumo de ancho de banda menor de un 16,24% promedio para el tráfico de ida y de un 92,40% promedio para el tráfico de vuelta por cada 10 nodos publicadores a comparación del mecanismo de confiabilidad QoS 1.

También se puede observar la comparativa del porcentaje de entrega y pérdida de publicaciones entre los mecanismos de confiabilidad QoS 1 y CON de cada protocolo. Teniendo como resultado que con los dos mecanismos de entrega de mensajes se tienen porcentajes de entrega de publicaciones similares a nivel de la red TCP/IP habiendo un ligero aumento del porcentaje de entrega por parte del mecanismo QoS 1 del 0,35%, mientras que en la WSN se tiene un denotado mayor porcentaje de entrega con un 24,81% y un 24,96% en el total de publicaciones entregadas a comparación del mecanismo de entrega de mensajes tipo CON.



Gráfica 4.4. Comparativa de variables QoS 1 y CON  
Fuente: El Autor

### Conclusiones

En base a los resultados del análisis de rendimiento de los protocolos de Publicación/Subscripción MQTT-SN y CoAP en términos de consumo de ancho de banda, tasa de entrega y pérdida de publicaciones en su operación con una Red de Sensores Inalámbricos Zigbee, se han determinado las siguientes conclusiones:

El uso de los mecanismos de confiabilidad con acuse de recibo (QoS 1 y CON) a comparación de los mecanismos best-effort (QoS 0 y NON) de cada protocolo produce una disminución en el rendimiento del ancho de banda, visibilizándose un mayor consumo de este. En cambio, se obtiene un mejor rendimiento en el porcentaje de la tasa de entrega de publicaciones en general para todos los escenarios de pruebas con diferentes valores dependiendo del rendimiento de cada protocolo.

La implementación del mecanismo de acuse de recibo de publicaciones en el protocolo de aplicación MQTT-SN produce un impacto poco significativo en el aumento de consumo de ancho de banda de la comunicación. Teniendo según los resultados que con el mecanismo QoS 1 se tiene un aumento del 16,93% y 11,09% promedio del tráfico de ida y vuelta respectivamente a comparación del mecanismo QoS 0. Mientras que para la tasa de entrega de publicaciones existe un aumento significativo del porcentaje de entrega del 31,42% en la WSN, 1,21% en la red TCP/IP y un 31,45% en el total de publicaciones entregadas con QoS 1 a comparación de QoS 0.

La implementación del mecanismo de acuse de recibo de publicaciones en el protocolo de aplicación CoAP produce un impacto poco significativo en el aumento de consumo de ancho de banda de la comunicación. Teniendo según los resultados que con el mecanismo CON se tiene un aumento del 34,99% promedio del tráfico de ida a comparación del mecanismo NON. Mientras que para la tasa de entrega de publicaciones existe un aumento mínimo poco significativo del porcentaje de entrega del 6,58% en la WSN, 2,35% en la red TCP/IP y un 7,96% en el total de publicaciones entregadas a través de CON a comparación de NON.

En la interconexión de la WSN con tecnología Zigbee hacia la red tradicional, la arquitectura de gateway agregado brindada por MQTT-SN destaca sobre la arquitectura de proxy intermediario que brinda el protocolo CoAP, ya que esta ofrece el apoyo del protocolo durante toda la comunicación de extremo a extremo, obteniendo un mayor nivel de independencia que tiene cada nodo sensorial en publicar su información por separado directamente hacia el servidor de gestión a comparación de la arquitectura de CoAP en la cual el protocolo no cuenta con soporte para una comunicación de extremo a extremo con este tipo de tecnologías, produciendo una falta de acompañamiento por parte del protocolo que afecta directamente al rendimiento de este en el manejo de las publicaciones de los nodos WSN, las cuales deben ser gestionadas de manera centralizada a través del proxy como agente intermediario.

Los mecanismos de confiabilidad QoS 0 y 1 de MQTT-SN presentan un mayor consumo de ancho de banda que los mecanismos NON y CON de CoAP debido a la cantidad de bits que utilizan para sus procesos de señalización en la comunicación de extremo a extremo con la WSN, recalando que MQTT-SN utiliza TCP como protocolo de transporte por lo cual requiere una mayor señalización tanto para el tráfico de ida como de vuelta a comparación del protocolo CoAP que opera sobre UDP reduciendo la cantidad de paquetes enviados o recibidos durante la comunicación. En los resultados se visibiliza que para comunicaciones sin acuse de recibo a nivel de aplicación el mecanismo NON tiene un consumo de ancho de banda menor de un 26,85% y 90,11% promedio para el tráfico de ida y vuelta respectivamente a comparación del mecanismo QoS 0 y para comunicaciones con acuse de recibo a nivel de aplicación el mecanismo CON presenta un consumo de ancho de banda menor de un 16,24% y 92,40% promedio para el tráfico de ida y vuelta respectivamente a comparación del mecanismo QoS 1. Mientras que en la tasa de entrega de publicaciones el uso de TCP como protocolo de transporte por parte de MQTT introduce un pequeño aporte en el éxito de entrega de publicaciones dentro de la red tradicional a comparación de UDP utilizado por CoAP.

En base al aumento del número de nodos que realizan publicaciones dentro de la WSN se debe considerar que, aunque MQTT-SN demuestre mayores consumos de ancho de banda a comparación de CoAP, el protocolo MQTT-SN presenta un rendimiento más equilibrado en el uso del ancho de banda, teniendo picos de consumo máximo menores al 50% del valor de consumo de ancho de banda promedio en función al aumento del número de nodos WSN que realizan publicaciones con los mecanismos de QoS 0 y 1. Mientras que el protocolo CoAP presenta picos de consumo máximo desproporcionales mayores al 80% del valor de consumo de ancho de banda promedio con el mecanismo NON y picos de consumo máximo desproporcionales mayores al 150% del valor de consumo de ancho de banda promedio con el mecanismo CON en función al aumento del número de nodos WSN que realizan publicaciones.

En cuanto a la tasa de entrega, retransmisión y pérdida de publicaciones, la evaluación de los resultados muestra que el mecanismo de confiabilidad con acuse de recibo de extremo a extremo juega un papel importante en todos los escenarios de red evaluados, principalmente en el mejoramiento de la tasa de entrega de publicaciones en el segmento de red perteneciente a la WSN, en la cual se evidencia el mayor porcentaje de pérdida. Teniendo como resultado que el mecanismo QoS 1 de MQTT-SN tiene el mejor porcentaje de entrega de publicaciones con un

91,72% sobre el 66,76% de entrega del mecanismo CON de CoAP, denotándose que la principal desventaja del mecanismo CON de CoAP es no contar con soporte de acuse de recibo por parte del protocolo en el segmento de Red que presenta mayores pérdidas.

La diferencia existente en el rendimiento de cada protocolo se puede aprovechar para mejorar el rendimiento en general de diferentes tipos de implementaciones de red, ya que en base a esta información se puede decidir que protocolo utilizar según las condiciones de la red predominantes. Dentro de las comunicaciones M2M, las aplicaciones pueden requerir optimizar el consumo de ancho de banda o a su vez dar prioridad a la entrega de publicaciones sobre otras métricas.

Finalmente, se concluye que el protocolo de Publicación/Subscription más adecuado para el diseño e implementación de un sistema de comunicación extremo a extremo entre una Red de Sensores Inalámbricos Zigbee y la red de servicios tradicional bajo las métricas de consumo de ancho de banda y tasa de entrega de publicaciones es el protocolo MQTT-SN bajo su mecanismo de confiabilidad QoS 1 por sus resultados de rendimiento en los cuales se denota un consumo de ancho de banda equilibrado y de crecimiento proporcional en función al aumento de nodos publicadores, así como también ser el mejor mecanismo para lograr una mayor tasa de entrega de publicaciones, disminuyendo significativamente la pérdida de publicaciones dentro del segmento de la WSN, considerada la parte más sensible de la comunicación de extremo a extremo.

## Referencias

1. Zigbee Alliance, TECNOLOGIA ZIGBEE. [en línea], última fecha de acceso: 28/05/2016. Disponible en: <http://www.zigbee.org/>
2. Eugster P. T., Felber P. A., Guerraoui R., Kermarrec A., (2003). "The many faces of publish/subscribe". ACM Comput. Surv. vol. 35, no. 2, Pp. 114–131
3. Souto E., Guimarães G., Vasconcelos G., Vieira M., Rosa N., Ferraz C., (2006). "A publish/subscribe middleware for sensor networks". Personal and Ubiquitous Computing., vol 10, no. 1, Pp. 37–44.
4. Hunkeler U., Truong H. L., Stanford-Clark A., (2008). "MQTT-SN — A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks". Communication Systems Software and Middleware and Workshops. COMSWARE 2008. 3rd International Conference, Bangalore. Pp. 791-798.
5. MQ Telemetry Transport Standardization Announce. (2011). [en línea], última fecha de acceso: 28/05/2016. Disponible en: <http://mqtt.org/2011/08/open-invitation-to-join-the-mqtt-standardization-discussion>
6. Using WebSphere MQ Telemetry and Pachube to connect to Remote Sensors and Devices. (2012). [en línea]. Última fecha de acceso: 28/05/2016. Disponible en: [https://www.ibm.com/developerworks/websphere/library/techarticles/1106\\_maynard/1106\\_maynard.html](https://www.ibm.com/developerworks/websphere/library/techarticles/1106_maynard/1106_maynard.html)
7. Building Facebook Messenger. (2011). [en línea], última fecha de acceso: 28/05/2016. Disponible en: <http://www.facebook.com/notes/facebook-engineering/building-facebook-messenger/10150259350998920>
8. Stanford-Clark A., Truong H. L., (2013). "MQTT for sensor networks (MQTT-SN) Protocol Specification Version 1.2". Disponible en: [http://mqtt.org/new/wp-content/uploads/2009/06/MQTT-SN\\_spec\\_v1.2.pdf](http://mqtt.org/new/wp-content/uploads/2009/06/MQTT-SN_spec_v1.2.pdf)
9. Core Working Group., (2012). "Constrained Application Protocol (CoAP), Draft-Ietf-Core-Coap-11". [en línea], última fecha de acceso: 28/05/2016. Disponible en: <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-core-coap-11>
10. Constrained RESTful Environments (core). [en línea], última fecha de acceso: 28/05/2016. Disponible en: <http://datatracker.ietf.org/wg/core/charter/>
11. Internet Engineering Task Force (IETF). (2015). "Observing Resources in the Constrained Application Protocol (CoAP)". ISSN: 2070-1721., [en línea], última fecha de acceso: 28/05/2016. Disponible en: <https://tools.ietf.org/html/rfc7641>.
12. Wang C., Sohraby K., Li B., Daneshmand M., Hu Y. M., (2006). "A survey of transport protocols for wireless sensor networks". IEEE Network, vol. 20, no. 3, pp. 34-40.
13. Jones J., Atiquzzaman M., (2007). "Transport protocols for wireless sensor networks: State of the art and future directions". International Journal of Distributed Sensor Networks. Pp. 119–133.
14. Escobar Días M. S., (2009). "Wireless Sensors Network, Estado del arte e Investigación", Computer Science and Engineering Department, Universidad Carlos III de Madrid, [en línea], última fecha de acceso: 28/05/2016. Disponible en: [http://arcos.inf.uc3m.es/~sescolar/index\\_files/presentacion/wsn.pdf](http://arcos.inf.uc3m.es/~sescolar/index_files/presentacion/wsn.pdf)
15. Bormann C., Mulligan G., Arkko J., Townsley M., Schumacher C., (2007). "IPv6 over Low power WPAN (6lowpan)", IETF Working Group. Disponible en: <https://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/documents/>
16. NetEM Network Emulator, Network Latency and Packet Loss Emulation, [en línea], última fecha de acceso: 28/05/2016. Disponible en: <https://wiki.linuxfoundation.org/networking/netem>