

Estudio de la Integración entre WSN y redes TCP/IP

A Survey on the integration between WSN and TCP/IP networks

Lucas Iacono¹, Pablo Godoy², Osvaldo Marianetti³, Carlos García Garino⁴, Cristina Párraga⁵

Recibido: Mayo 2012

Aprobado: Julio 2012

Resumen.- Las redes de sensores inalámbricas (Wireless Sensor Networks, o simplemente WSN), constituyen actualmente una herramienta tecnológica muy valiosa para recolectar información del entorno. Estas redes están formadas por plataformas de hardware con recursos limitados de memoria, cómputo y energía, motivo por el cual las WSN trabajan con protocolos especialmente diseñados para funcionar sobre estas plataformas (IEEE 802.15.4, ZigBee, etc.). Estos protocolos de WSN, generalmente, no son compatibles con los protocolos de la pila TCP/IP. Esta incompatibilidad implica que para presentar los datos recolectados por las WSN al usuario mediante redes TCP/IP (p. ej. Internet), deban implementarse distintas técnicas de hardware y software. En este trabajo se relevan y estudian distintas propuestas que permiten resolver la integración WSN - redes TCP/IP.

Palabras clave: WSN; Gateway; Overlay Networks; ZigBee.

Summary.- *Wireless sensor networks (WSN), are a useful technological tool to collect information of the environment. These networks have hardware platforms with limited computational, memory and energy resources. As a result, the WSN work with protocols specially designed to run on these hardware platforms (IEEE 802.15.4, ZigBee, etc.) and generally these are not compatible with the TCP/IP stack protocols. In order to present the data collected by WSN to user through TCP/IP networks (e.g. Internet), different hardware and software techniques must be implemented. This paper presents a survey on different approaches made to integrate WSN to TCP/IP networks.*

Keywords: WSN; Gateway; Overlay Networks; TCP/IP; ZigBee.

1. Introducción.- Las WSN, permiten obtener y transmitir información del entorno donde están desplegadas. Estas redes pueden ser utilizadas en aplicaciones tales como agricultura de precisión [1], meteorología y monitoreo del medio ambiente [2, 3], cuidado y monitoreo de pacientes [4, 5], prevención de inundaciones [6], etc. Una red de sensores inalámbrica está formada por nodos, routers, y una estación base. Los datos recolectados por las WSN, pueden ser luego puestos a disposición de usuarios a través de alguna red (Internet, GPRS).

El principal inconveniente que presentan las WSN es que debido a que están desplegadas en el campo (muchas veces a kilómetros del usuario), deben optimizar el consumo de energía. Es por esta razón, que los protocolos utilizados en WSN para transmitir datos y coordinar el

¹Estudiante de Doctorado. Investigador del Instituto de Microelectrónica, Facultad de Ingeniería Universidad de Mendoza, lucas.iacono@um.edu.ar

²Estudiante de Doctorado. Investigador del ITIC, Instituto universitario para las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, UNCuyo, pgodoy@itu.uncu.edu.ar

³Director del Instituto de Microelectrónica, Facultad de Ingeniería. Universidad de Mendoza, Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería Universidad de Mendoza, osvaldo.marianetti@um.edu.ar

⁴Director del ITIC, Instituto Universitario para las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, UNCuyo. Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería UNCuyo, cgarcia@itu.uncu.edu.ar

⁵Directora del DICYTyV, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas y Vinculación. Universidad de Mendoza, Profesora Titular de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Mendoza, cristina.parraga@um.edu.ar

funcionamiento, son especialmente diseñados para ahorrar energía y no son compatibles con TCP/IP. Motivo por el cual, las WSN requieren la implementación en sus elementos de diversas técnicas tanto de software como de hardware para resolver la integración a redes TCP/IP.

En el presente artículo se analizan diversas propuestas disponibles para implementar la problemática de la integración WSN - TCP/IP. El desarrollo de este trabajo está organizado de la siguiente forma: la Sección 2 introduce una visión general de la tecnología WSN. En la Sección 3 se estudian los enfoques que permiten resolver la integración WSN - TCP/IP. En la Sección 4 se presentan propuestas desarrolladas por diferentes autores. En la Sección 5 se analiza la problemática derivada del estudio de los trabajos previos y finalmente en la Sección 6 se presentan las conclusiones del presente artículo.

2. WSN. Visión general.- En esta sección se introducen distintos conceptos relacionados con las WSN. En el apartado 2.1 se mencionan los elementos que componen las WSN y en el apartado 2.2 se detallan protocolos de la subcapa MAC (Medium Access Control) y de la capa de red utilizados en esta tecnología.

2.1. Elementos.- Los constantes avances de tecnología han permitido el surgimiento de nuevos dispositivos llamados nodos. Los mismos están compuestos por sensores, microcontrolador, memoria y alguna interfaz estándar de conexión (RS232, Ethernet, etc.).

A los nodos se suman routers, que permiten utilizar distancias de comunicación menores y rutas alternativas de entrega de datos por si se presentan fallas en los nodos. Finalmente existe en cada WSN, un dispositivo que recibe toda la información generada por los nodos y coordina el funcionamiento de la red llamado estación base. En esta máquina (una PC o un sistema embebido), los datos son mostrados, almacenados o enviados a una localización remota a través de alguna red mayor (como por ejemplo Internet). La Figura I muestra los elementos que integran las WSN.

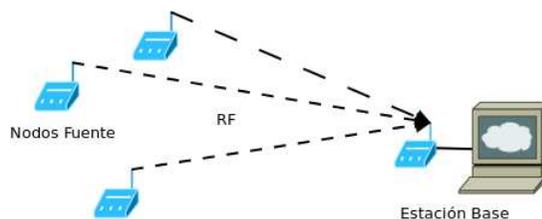


Figura I.- Elementos de una WSN.

2.2. Protocolos.- 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 de comunicación diseñados específicamente para este tipo de tecnología.

2.2.1. Protocolos MAC.- De los protocolos MAC actualmente disponibles, el estándar IEEE 802.15.4 [7] es quizás de los más populares y de fácil implementación. Esto se debe en parte a la gran cantidad de fabricantes que actualmente proveen hardware compatible con el estándar IEEE 802.15.4. Este protocolo abarca la capa física y la subcapa MAC del modelo TCP/IP, para WPAN (Wireless Personal Area Network) de baja tasa de transferencia de datos. IEEE 802.15.4 admite dos topologías de red: estrella y peer to peer [7] y dos tipos de dispositivos o nodos: de

función completa (actúa como coordinador de red) y de función reducida (actúa como nodo recolector de información o simplemente, nodo fuente).

2.2.2. Protocolos de la capa de red.- Diversos protocolos han sido desarrollados para utilizar las plataformas de hardware basadas en IEEE 802.15.4. Éstos proporcionan, por sobre las capas definidas por IEEE 802.15.4, otras topologías de red (p. ej. Mesh), seguridad, soporte de la aplicación, etc.

ZigBee. ZigBee [8], es un protocolo de comunicaciones desarrollado por la ZigBee Alliance, con el fin de reducir costos y consumo de energía, en dispositivos que necesiten comunicarse inalámbricamente. Este protocolo, es estudiado y analizado por diversos autores [9-11], por lo que sólo se mencionarán algunas características principales del mismo.

ZigBee, utiliza los servicios de 802.15.4 y añade la capa de red, permitiendo el uso de topologías de redes Malla (Mesh), Estrella (Star) y Árbol (Tree) [8], la subcapa de soporte de la aplicación (APS) y los servicios de seguridad.

6lowPAN. Debido a que los protocolos basados en IEEE 802.15.4 no son compatibles con TCP/IP, los sensores no pueden comunicarse directamente con servidores, navegadores y otros dispositivos TCP/IP compatibles. Es por eso que el IETF (Internet Engineering Task Force) ha desarrollado 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks) [12]. Este estándar define la implementación del stack IPv6 sobre las capas PHY y subcapa MAC de IEEE 802.15.4 para que cualquier dispositivo que lo utilice pueda ser accedido desde Internet. El principal desafío de integrar IPv6 y WSN es la estructura de direccionamiento de IPv6, el cual define un encabezado y un campo de información de 40 bytes. Sin embargo, IEEE 802.15.4 permite hasta 127 bytes para todo el paquete incluido el encabezado y los datos, por lo que en 6lowPAN se utilizan técnicas de compresión para disminuir el tamaño de la cabecera de 40 bytes a alrededor de 4 bytes. 6LoWPAN, agrega una capa de adaptación que permite que trabajen de forma conjunta el radio 802.15.4 y las comunicaciones de IPv6. Este protocolo ha sido ampliamente tratado por diversos autores [13-15].

3. Enfoques de Integración WSN – redes TCP/IP.- Las WSN cuentan con recursos acotados tanto de hardware como de consumo de energía, por lo que como se ha mencionado anteriormente, la utilización de protocolos TCP/IP en los nodos no es factible. Este motivo implica que la integración de WSN a redes TCP/IP sea un tema abierto en el campo de las WSN [16].

De la revisión de literatura realizada en el presente trabajo, surge que la integración WSN-TCP/IP implica dos niveles a ser resueltos: Arquitectura y Protocolos de Interconexión.

3.1. Nivel de Arquitectura.- Este nivel toma en cuenta cuál es el elemento WSN que tendrá dirección IP (real o virtual), y se resuelve utilizando dos enfoques: gateway y redes overlay.

3.1.1. Gateway.- Este enfoque (ver Figura II), se basa en que los nodos no cuentan con dirección IP, siendo la estación base la que tiene dirección IP y actúa como gateway de la capa de aplicación, traduciendo los protocolos de la capa inferior de ambas redes (TCP/IP y p. ej. ZigBee) [17-19].

El gateway es el único punto de acceso a la red, permite tomar los datos y comandos de cada WSN en el protocolo nativo (p. ej. ZigBee) y los convierte a TCP/IP para luego, por intermedio de alguna red mayor (p.ej. Internet) presentarlos al cliente. Este enfoque permite trabajar con nodos sensores que cuenten con requerimientos escasos de cómputo, memoria y consumo de energía, ya que no requiere cargas extras de protocolo en los nodos sensores.

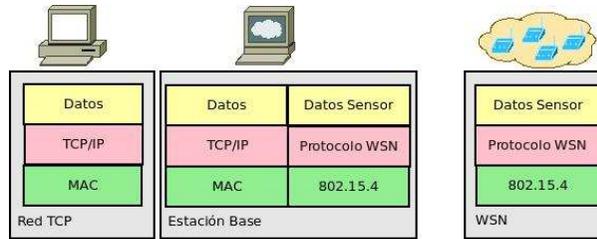


Figura II.- Enfoque de gateway. Adaptado de [19].

3.1.2. Redes Overlay.- Este enfoque de integración permite integrar redes con distintos protocolos mediante el solapamiento de uno de los protocolos sobre el otro [17-20]. En el caso de la integración WSN - TCP/IP, se denomina TCP/IP “overlay” Sensor Networks [19], ya que se embebe parte o toda la pila TCP/IP en los nodos sensores (Ver Figura III).

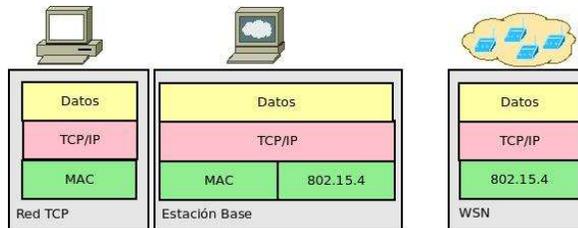


Figura III.- Enfoque de redes overlay. Adaptado de [19].

3.2. Nivel de Protocolos de Interconexión.- El protocolo de interconexión es la implementación que permite el intercambio de mensajes y comandos entre ambas redes, definiendo reglas y sintaxis para lograr la interconexión entre estas redes. El protocolo además asiste a la aplicación para interactuar con la complejidad y heterogeneidad de las plataformas de hardware de ambas redes (WSN y TCP/IP). Los enfoques utilizados en este nivel, se pueden clasificar en Ad-hoc y Basados en estándares.

3.2.1. Basados en estándares.- En este enfoque, los protocolos basan la gestión de datos y comandos de las WSN en estándares como:

- Servicios Web.
- Lenguajes de descripción. Por ejemplo XML (Extensible Markup Language) [21].
- Estándares de sensores como IEEE 1451 [22] y SensorML [23].
- Protocolos Web tales como SNMP (Simple Network Management Protocol), HTTP, etc.

Estos lenguajes y protocolos si bien requieren mayores recursos de memoria y procesador en los nodos sensores, permiten estandarizar los datos prácticamente desde el momento en que son obtenidos por el nodo fuente.

3.2.2. Protocolos de interconexión AD-HOC.- En este caso el protocolo de interconexión es diseñado específicamente para cada propuesta de integración. Las características de cada protocolo varían de acuerdo a la aplicación en particular, teniendo como principal ventaja el adecuarse específicamente a la aplicación, optimizando entre otras características, el uso de recursos de hardware y el consumo de energía. La principal desventaja de este enfoque es que

presenta dificultades para permitir la interoperabilidad entre distintos sistemas ya que no están basados en estándares.

4. Trabajos Previos.- A continuación se analizan trabajos de distintos autores que estudian la integración WSN - TCP/IP. Si bien existen dos niveles a considerar para llevar a cabo la integración (arquitectura y protocolos de Interconexión), para una mejor comprensión al momento de realizar el análisis, los trabajos previos han sido agrupados según el enfoque utilizado en el nivel de arquitectura y luego en cada trabajo analizado, se detalla qué enfoque de protocolo de interconexión es implementado.

4.1. Basados en Gateway.- En Reddy et. al. [24], se desarrolló una arquitectura basada en Gateway para compartir los datos recolectados y variar la configuración de redes de sensores.

Los sensores se comunican con uno o más gateways utilizando el protocolo específico de la red de sensores (p. ej. ZigBee). Los gateways, luego envían los datos y parámetros de la red de sensores a bases de datos y los indexan en buscadores de sensores. El usuario finalmente accede a los datos y configuración en forma web a través de la plataforma SensorBase. Todo este proceso se realizó a través de un protocolo ad-hoc desarrollado por los autores llamado SDSP (Sensor Data Stream Protocol). SDSP transporta datos en formato XML en forma similar a RSS (Really Simple Syndication) [25] y en forma bidireccional, ya que permite modificar la configuración de la WSN.

En [5], los autores desarrollaron un sistema destinado a prestación de asistencia sanitaria y seguimiento de pacientes en sus hogares. Este sistema utiliza una plataforma llamada SYLPH (Services layers over Light Physical devices). SYLPH está basada en el modelo de arquitectura orientada a servicios (SOA) y permite integrar WSN heterogéneas a redes TCP/IP, utilizando arquitectura gateway y un conjunto de protocolos ad-hoc que funcionan sobre servicios web. SYLPH trabaja con los recursos de distintas WSN modelando sus funcionalidades como servicios independientes.

La plataforma, utiliza un lenguaje basado en XML llamado SSDL (SYLPH Services Definition Language). SSDL a diferencia de XML, permite optimizar procesamiento y consumo de energía en los nodos sensores. Además SSDL permite la comunicación entre componentes de software sin importar su hardware ni protocolo de comunicación inalámbrico. Esto fue demostrado por los autores integrando una WSN basada en Bluetooth y otra en ZigBee. La Figura IV, muestra las capas de SYLPH.

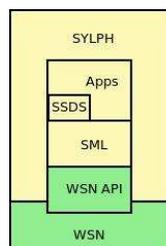


Figura IV.- Modelo en capas de SYLPH. Adaptado de [5].

En Annamraju et. al. [26], se propuso un middleware con arquitectura de gateway, protocolo de comunicación ZigBee y estándar IEEE1451 [22], para comunicar los nodos sensores de una WSN con un procesador embebido en el gateway de la misma.

Los nodos se comunican a través del protocolo ZigBee entre ellos y con el gateway. Los datos que viajan sobre ZigBee están estandarizados según el estándar IEEE1451 por lo que el usuario accede tanto los datos como a los metadatos de configuración del sensor. Este trabajo finalmente

demostró, que se pueden integrar WSN del tipo ZigBee a redes TCP/IP, utilizando protocolos de interconexión basados en el estándar IEEE1451.

O'Reilly et. al. [27], demostraron como los estándares IEEE 1451, OGC-SWE (OGC Sensor Web Enablement), y el protocolo MBARI PUCK [3], pueden ser integrados para adquirir, fusionar y acceder a los datos de diversos instrumentos de tres observatorios oceanográficos. En cada observatorio, se implementaron programas para realizar el mapeo entre IEEE 1451 y los protocolos propios de cada observatorio. Gracias al uso de protocolos de interconexión estándar y arquitectura Gateway, una aplicación de internet que “hable” IEEE1451, puede acceder a los instrumentos del observatorio a través de un servidor IEEE 1451 propio de cada observatorio.

En este trabajo los nodos IEEE 1451 presentan sus datos y metadatos a través de servicios web basados en STWS (Smart Transducer Web Service). STWS está descrito en WSDL (Web Services Description Language), basado en SOA (Service Oriented Architecture) y en los servicios de los nodos que utilizan IEEE 1451. El componente STWS puede estar alojado en el nodo IEEE 1451 o en una computadora ajena al mismo. Los autores realizan la integración entre IEEE 1451 y OGC-SWE mediante STWS. Siendo STWS la aplicación de internet que “habla” IEEE1451 y actúa como puente entre el protocolo OGC-SWE y IEEE 1451.

Los autores demostraron que la adaptación de los instrumentos de protocolo nativo a IEEE1451 se pudo realizar sin ningún problema y de forma rápida (1-2 semanas). Ésta fue la parte más lenta del proceso ya que STWS resolvió la integración IEEE1451 a OGC-SWE.

En Rajesh et. al. [16], se desarrollaron sensores que, utilizando SOAP y XML provean servicios web, para ser utilizados por un cliente (en este caso una aplicación industrial).

La lista de servicios es descubierta e invocada por las aplicaciones del cliente, usando mensajes SOAP.

En la arquitectura propuesta por estos autores, se define un dispositivo llamado IC (Controlador de Integración), a través del cual pasan las comunicaciones con el cliente, siendo además este dispositivo el encargado de la autenticación de los usuarios. Es este elemento el gateway que permite la integración a redes TCP/IP utilizando protocolos de interconexión estándar. Esta arquitectura llamada IICiA (Internet and Integration Controller interaction Architecture), permite que los usuarios realicen de forma sencilla la recolección, acceso, procesamiento, visualización, almacenamiento y búsqueda de gran cantidad de datos recolectados por sensores de diverso tipo en entornos de computación distribuida que utilizan TCP/IP (p. ej. Cloud Computing).

Lim et. al. [28], desarrollaron un gateway que incluye un servidor proxy basado en el protocolo estándar de la capa de aplicación SNMP llamado “SNMP-Proxy”. El proxy SNMP permite armar un puente entre redes “NO” TCP/IP y redes TCP/IP. En este trabajo, los datos pertenecen a una red de sensores inalámbrica utilizada para recolectar datos médicos.

Una desventaja que presentó SNMP-Proxy es que la red tenía un único punto de falla, por lo cual debe ser un factor a considerar al momento de implementar esta arquitectura en aplicaciones críticas (p. ej. Monitoreo de Procesos Industriales). En la Tabla I se resumen las propuestas analizadas en la presente sección.

Arquitectura Propuesta	Protocolo de Interconexión	Protocolo Utilizado	Aplicación
Sensor Base-cSDSP	Ad-hoc	SDSP (Sensor Data Stream Protocol), basado en RSS-XML	Monitoreo de animales.
SYLPH	Ad-hoc	SSDL (SYLPH Services Definition Language)	Asistencia sanitaria y seguimiento de pacientes en sus hogares.
Annamraju et. al.	Estándar	IEEE 1451.4	Industria Aeroespacial.
Interoperable Test-Bed	Estándar	OGC-WE/SensorML y IEEE 1451	Oceanografía.
IICiA	Estándar	SOAP-XML	NPMS (Nuclear Plant Maintenance System).
SNMP-Proxy	Estándar	SNMP	Monitoreo de Pacientes. Nodos sensores móviles.

Tabla I.- Arquitecturas basadas en gateway

4.2. Basados en Redes Overlay.- Una de las primeras propuestas realizadas para embeber TCP/IP en WSN fue la desarrollada por Dunkels et. al. [29]. En este trabajo los autores presentaron una optimización de mecanismos utilizados en TCP/IP para permitir que la pila pueda ser embebida en nodos de WSN contando con similares prestaciones a las obtenidas utilizando protocolos diseñados para esta tecnología. Los autores propusieron cuatro soluciones para implementar TCP/IP en plataformas de hardware WSN, con recursos acotados de cómputo, memoria y energía.

1. *Arquitectura de direccionamiento IP.* Teniendo en cuenta que en la mayoría de las WSN, los datos generados por los nodos necesitan estar asociados con la ubicación geográfica donde han sido recolectados. Los autores propusieron una asignación de IP basada en la situación espacial de los nodos. Este método se basa en proveer una dirección IP “semi” exclusiva a cada nodo sensor.
2. *Sobrecarga en el encabezado.* Los encabezados pueden comprimirse utilizando diversas técnicas de compresión, por ejemplo: si todos los nodos son parte de la misma subred IP no hay necesidad de transmitir toda la dirección IP completa en los encabezados de los paquetes que provienen o que están destinados a los nodos de cada WSN.
3. *Recursos limitados de hardware.* Los autores desarrollaron y probaron μ TCP/IP, demostrando que se pueden implementar en microcontroladores de 8 bits con poca memoria RAM versiones de la pila TCP/IP.
4. *Eficiencia energética.* En la arquitectura presentada en este trabajo, se desarrolló un mecanismo que combina almacenamiento en caché de segmentos de datos y retransmisiones locales en cooperación con la capa de enlace resolviendo tanto el problema del consumo de energía.

En M.M Islam et. al. [30], los autores implementaron un protocolo ad-hoc para WSN llamado SPMIPv6 (Sensor Proxy Mobile IPv6), basado en el Protocolo PMIPv6 (Proxy Mobile-IPV6) [31] y en 6lowPAN.

PMIPv6 es un protocolo basado en MIPv6 (Mobile-IPV6) que permite trabajar con nodos móviles IPv6 pero sin la gran carga de señales de control que utiliza MIPv6. PMIPv6 reduce las funcionalidades en el nodo móvil, aumentándolas en un nuevo dispositivo de la red llamado MAG (Mobile Access Gateway) [31].

SPMIPv6, utiliza elementos comunes con PMIPv6 los cuales son los LMA (Localized Mobility Anchor) y los MAG. La principal diferencia entre PMIPv6 y SPMIPv6 es que los MAG y LMA de SPMIPv6 trabajan con nodos sensores 6LoWPAN.

Otra propuesta de integración de WSN vía redes overlay es la de Silva et. al. [32]. Los autores desarrollaron un protocolo ad-hoc llamado SMP (Sensor Mobility Proxy), el cual trabaja de forma similar a PMIPv6. En este caso los autores implementaron un gateway basado en MIPv6, que permitió dar solución a los requerimientos específicos de una aplicación de monitoreo de salud: movilidad, baja latencia [33] y confiabilidad.

La propuesta consistió en implementar en los nodos móviles el protocolo μ IPv6 y establecer comunicación con una red TCP/IP por intermedio de un gateway conectado a la estación base. La arquitectura que se desarrolló en este trabajo es del tipo overlay, ya que si bien tiene un gateway, cada nodo tiene μ TCP/IP, el cual embebe una versión de TCP/IP en los nodos. El gateway en este caso permite que el nodo pueda trabajar con una versión de TCP/IP apta para sistemas embebidos de bajo consumo ya que agrega otras funcionalidades a las tramas para que sean totalmente compatibles con MIPv6 pero conservando en los nodos el bajo consumo de energía.

En la Tabla II se resumen las arquitecturas basadas en redes overlay analizadas en la presente sección.

Arquitectura Propuesta	Protocolo de Interconexión	Protocolo Utilizado	Aplicación
μ TCP/IP	Estándar	μ TCP/IP	No se especifica, los nodos utilizados permiten trabajar con variedad de sensores de acuerdo a la aplicación.
SMPIIPv6	Ad-hoc	SMPIIPv6	Monitoreo de Pacientes. Nodos sensores móviles.
SMP	Estándar	MIPv6	Monitoreo de Salud de Trabajadores en Industrias. Nodos sensores móviles.

Tabla II.- Arquitecturas basadas en redes overlay.

5. Análisis.- En este apartado se realiza un análisis de las ventajas y desventajas que presentan cada enfoque de integración tanto a nivel de arquitectura como a nivel protocolo de interconexión.

5.1. Nivel de Arquitectura.- En este nivel, se analizan los dos enfoques propuestos para la integración WSN – TCP/IP: gateway y redes overlay.

5.1.1. Gateway.- La principal ventaja de este enfoque es que no requiere agregar componentes extras de software en los nodos de la WSN. Luego, los nodos funcionan solo con protocolos diseñados especialmente para WSN, optimizando recursos de hardware y consumo de energía.

El gateway permite además reutilizar tecnología existente, ya que la integración se implementa solamente en una máquina y no se debe modificar el software de las WSN previamente instaladas y en funcionamiento.

Uno de los inconvenientes que presenta este enfoque es el desbalance de tráfico debido a que una gran cantidad de datos tienen que ser enviados desde y hacia el gateway, lo que implica que los nodos cercanos al gateway serán los que presentarán un mayor consumo de energía.

Otro problema es la centralización del punto de falla en la estación base, por lo que si esta presenta una falla, la WSN pierde la conexión al entorno TCP/IP.

El uso de gateway presenta algunos problemas en la escalabilidad de las WSN, ya que es necesario agregar un componente nuevo de software en el gateway por cada nueva red de sensores inalámbrica a integrar. Además debe tenerse en cuenta que no es posible la comunicación extremo a extremo entre la WSN y la red TCP/IP ya que todas las comunicaciones están centralizadas en el Gateway.

5.1.2. Redes Overlay.- La principal ventaja de las redes overlay es permitir la comunicación extremo a extremo entre ambas redes. Otra ventaja que poseen es la posibilidad de trabajar con la pila de protocolos TCP/IP, lo que facilita el trabajo de usuarios familiarizados. Algunas propuestas como μ TCP/IP [29], presentan versiones especiales de la pila TCP/IP para ser utilizadas en WSN con recursos acotados de energía.

En este caso se elimina el punto centralizado de fallo gracias a la comunicación extremo a extremo. Sin embargo algunos casos (como SMPIPv6 [30]), implementan algunas capas de la pila TCP/IP en los nodos y otras en el gateway. Por lo que no siempre esta solución logra evitar el punto de falla centralizado de la red.

Otra desventaja que presenta este enfoque es que las propuestas de versiones de TCP/IP analizadas solo son compatibles con algunas plataformas de hardware de WSN.

5.2. Nivel de Protocolos de Interconexión.- En este apartado, se analizan los dos enfoques propuestos en el nivel de Protocolos de Interconexión para la integración WSN – TCP/IP: basados en estándares y ad-hoc.

5.2.1. Ad-Hoc. Este enfoque, tiene como principal ventaja el permitir desarrollar programas adaptados a las necesidades del usuario y de las aplicaciones.

En la mayoría de los casos, esta técnica no necesita cargar funciones extras a los componentes de las WSN, los cuáles si se necesitan al momento de utilizar protocolos basados en estándares (XML, IEEE 1451, etc.). Luego, se puede optimizar el consumo de energía y de los recursos de hardware, ya que los nodos solo necesitan procesar el protocolo de la red de sensores, siendo la estación base, la encargada de implementar el protocolo ad-hoc.

De la literatura revisada surge que este tipo de enfoque se utiliza mayormente en arquitecturas basadas en gateway y en menor medida en redes overlay, las cuáles son mas aptas para ser integradas mediante protocolos basados en estándares.

El enfoque ad-hoc, debido a la falta de estandarización en el software, requiere que el programador de las aplicaciones este familiarizado tanto con la tecnología WSN como con el protocolo de interconexión desarrollado. El mismo deberá, por ejemplo, conocer la forma de la trama utilizada por el protocolo WSN nativo para entregar los datos a la estación base.

Otros problemas que presentan los abordajes ad-hoc son la escalabilidad e interoperabilidad en etapas post-desarrollo del protocolo de interconexión, ya que para integrar plataformas de hardware de WSN se deben agregar nuevos componentes de software tanto en la estación base como en la aplicación final.

5.2.2. Basados en Estándares.- Estos lenguajes permiten integrar las WSN gracias a la estandarización de los sensores y sus metadatos. Requiriendo el uso de estándares como IEEE 1451 y SensorML, los nodos se pueden acceder utilizando un formato estándar. Luego, se facilita la interoperabilidad de sensores con independencia del protocolo que se emplea para transmitir sus datos de forma inalámbrica.

El uso de servicios web permiten, el acceso a datos y a configuración de sensores, utilizando protocolos compatibles con la pila TCP/IP. Además, permite que el programador de aplicaciones pueda abstraerse del hardware de las WSN.

Existe una tendencia creciente a utilizar servicios web en redes, por lo que el uso de estos estándares en WSN permitirá interactuar con tecnologías como Cloud Computing e independizará al programador de la aplicación del hardware y del protocolo nativo de las WSN.

Un problema de este enfoque es que se deben programar en los nodos, componentes de software adicionales al protocolo nativo utilizado (p. ej. ZigBee). Estos componentes incluyen la descripción de cada sensor y sus metadatos en el lenguaje estándar a implementar. Generalmente esta información no se proporciona por el fabricante e implica un mayor trabajo de programación. Además los nodos deben contar con recursos de hardware suficientes para soportar los componentes de software adicionales necesarios para entregar los datos a la estación base, de acuerdo al formato pre-establecido por el estándar implementado.

Otra desventaja que presenta este tipo de estándares es el consumo de energía en los nodos ya que la cantidad de bits a transmitir al enviar datos en formato XML, IEEE1451 o SensorML es mucho mayor que si sólo se enviaran los datos en el formato nativo WSN.

En este enfoque el tiempo para acceder a los datos es mayor, ya que se deben formatear los datos de acuerdo al lenguaje de descripción utilizado.

6. Conclusiones.- El estudio de los enfoques a nivel de arquitectura sugiere que cada abordaje tiene características que lo hacen más apto para ser aplicado en ciertos tipos de aplicaciones y tecnologías de hardware de WSN.

El enfoque de redes overlay, permite una integración más directa a redes TCP/IP ya que sus nodos se comunican utilizando protocolos de la pila TCP/IP. Esta posibilidad, puede ocasionar retardos y requiere mayores recursos de hardware, carga de software y consumo de energía en los nodos de las WSN.

El enfoque de gateway es más apto para integrar plataformas de WSN compuestas por nodos con recursos acotados de hardware y consumo de energía. Además evita retrasos en la entrega de datos. El problema que presenta este enfoque es la centralización del tráfico de datos y el punto de falla en la estación base.

Respecto al potencial de los enfoques en el nivel de protocolo de interconexión, parece más adecuado utilizar protocolos ad-hoc cuando se necesite optimizar tiempo de entrega de datos, recursos y consumo de energía. Sin embargo estos protocolos de interconexión, presentan dificultades para integrar redes de sensores heterogéneas en hardware y protocolos de comunicación.

El uso de protocolos basados en estándares, será adecuado cuando se busque integrar WSN heterogéneas y a la vez utilizar servicios web. En este caso se generan mayores cargas de software, retardos en la entrega de información y consumo de energía en las WSN.

Es importante tener en cuenta al implementar la integración WSN – TCP/IP, con el propósito de brindar soporte a una aplicación, revisar los requerimientos específicos de la aplicación (tolerancia a retardos, volúmenes de datos, tipo de hardware WSN, etc.), y en base a estas necesidades decidir cuál es el enfoque que mejor se adapte a cada uno de los niveles que implican la integración a TCP/IP.

7. Referencias

- [1] Morais, R. Fernandes, M. Matos, S. Serōdio, C. Ferreira, P. y Reis, M.; *A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture*, Computers and Electronics in Agriculture, 2008. 62(2): p. 94--106.
- [2] Ghanem, M. Guo, Y. Hassard, J. Osmond, M. y Richards, M.; *Sensor grids for air pollution monitoring*, in Proc. of the 3rd UK e-Science All Hands Meeting, Nottingham, UK. 2004.
- [3] O'Reilly, T. Headley, K. Edgington, D. Rueda, C. Lee, K. Song, E. Zedlitz, J. del Rio, J. Toma, D. Manuel, A. y otros; *Instrument interface standards for interoperable ocean sensor networks*, in Proc. of the OCEANS 2009-EUROPE, 2009: p. 1--10.
- [4] Preve, N; *SEGEDMA: Sensor Grid Enhancement Data Management System for HealthCare Computing*. Expert Systems With Applications, 2011. 38(3): p. 2371--2380.
- [5] Corchado, J. Bajo, J. Tapia, D. y Abraham, A; *Using Heterogeneous Wireless Sensor Networks in a Telemonitoring System for Healthcare*, IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2010. 14(2): p. 234--240.
- [6] Hughes, D. Greenwood, P. Blair, G.; Coulson, G. Grace, P.; Pappenberger, F. Smith, P. y Beven, K.; *An experiment with reflective middleware to support grid-based flood monitoring*, Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2008. 20(11): p. 1303--1316.
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE); *IEEE Standard for Information Technology- Telecommunications and Information Exchange Between Systems- 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 802.15.4-2006: p. 1--305.
- [8] ZigBee Alliance; *Zigbee-2006 specification*, www.zigbee.org. 2006. Accedido en 2011.
- [9] Baronti, P. Pillai, P. Chook, V. Chessa, S. Gotta, A. y Hu, Y.; *Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and ZigBee standards*, Computer communications, 2007. 30(7): p. 1655--1695.
- [10] Kinney, P.; *Zigbee technology: Wireless control that simply works*, in Proc. of the Communications design conference, 2003. Vol 2.
- [11] Eady, F.; *Hands-on Zigbee: Implementing 802.15. 4 with microcontrollers*, 2007. Newnes.
- [12] Bormann, C., Mulligan, G., Arkko, J., Townsley, M. y Schumacher, C.; *IPv6 over Low power WPAN (6lowpan)*, IETF Working Group. 2006.
- [13] Kushalnagar, N. Montenegro, G. Schumacher, C. y otros.; *6LoWPAN: Overview, assumptions, problem statement and goals*, IETF Working Group. www.ietf.org. 2007. Accedido en 2012.
- [14] Ma, X. y Luo, W.; *The analysis of 6LoWPAN technology*, in Proc. of the Computational Intelligence and Industrial Application, PACIIA'08. Pacific-Asia Workshop on. 2008: p. 963--966.
- [15] Shelby, Z. y Bormann, C.; *6LoWPAN: the wireless embedded internet*, 2010. Wiley Publishing.
- [16] Rajesh, V. Gnanasekar, J. Ponmagal, R. y Anbalagan, P.; *Integration of Wireless Sensor Network with Cloud*, in Proc. of the Recent Trends in Information, Telecommunication and Computing (ITC), 2010 International Conference on. 2010: p. 321--323.
- [17] Zuñiga, M. y Krishnamachari, B.; *Integrating future large-scale wireless sensor networks with the Internet*. USC, Computer Science Technical Report, 2003: p. 03--792.
- [18] Liutkevicius, A., Vrubliauskas, A. y Kazanavicius, E.; *A Survey of Wireless Sensor Network Interconnection to External Networks*, Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications and Networking, 2010: p. 41--46.
- [19] Roman, R. y Lopez, J.; *Integrating wireless sensor networks and the internet: a security analysis*, Internet Research, 2009. 19(2): p. 246--259.
- [20] Akyildiz, I., Melodia, T. y Chowdhury, K.; *A survey on wireless multimedia sensor networks*, Computer networks, 2007. 51(4): p. 921--960.

- [21] Bray, T. Paoli, J. Sperberg-McQueen, C. Maler, E. Yergeau, F. y otros.; *Extensible markup language (XML)*, World Wide Web Journal, 1997. 2(4): p. 27--66.
- [22] Lee, K. *IEEE 1451: A standard in support of smart transducer networking*, in Proc. of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference 2000. (IMTC 2000), 2000: p. 525--528.
- [23] M. Botts y A. Robin.; *OpenGIS Sensor Model Language (SensorML) implementation specification*. OpenGIS Implementation Specification OGC 07-000, The Open Geospatial Consortium, 2007.
- [24] Reddy, S. Chen, G. Fulkerson, B. Kim, S. Park, U. Yau, N. Cho, J. Hansen, M. y Heidemann, J.; *Sensor-Internet share and search: Enabling collaboration of citizen scientists*, in Proc. of the ACM Workshop on Data Sharing and Interoperability on the World-wide Sensor Web, 2007: p. 11--16.
- [25] Winer, D.; *RSS 2.0 Specification*, <http://www.rssboard.org/rss-2-0>, 2002. Accedido en 2012..
- [26] Annamraju, S. Gumudavelli, S. Wang, R. y Gurkan, D.; *Middleware design for measurement data exchange in a smart sensor network*, in Proc. of the Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2010 IEEE, 2010: p. 204--207.
- [27] O'Reilly, T. Headley, K. Edgington, D. Rueda, C. Lee, K. Song, E. Zedlitz, J. del Rio, J. Toma, D. Manuel, A. y otros.; *Instrument interface standards for interoperable ocean sensor networks*, in Proc. of the OCEANS 2009-EUROPE, 2009: p. 1--10.
- [28] Lim, Y. Messina, M. Kargl, F. Ganguli, L. Fischer, M. y Tsang, T.; *SNMP-Proxy for Wireless Sensor Network*, in Proc. of the Fifth International Conference on Information Technology: New Generations, 2008: p. 738--743.
- [29] Dunkels, A. Alonso, J. y Voigt, T.; *Making TCP/IP viable for wireless sensor networks*, in Proc. of the First European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2004) work-in-progress session, 2004: p. 16--19.
- [30] Islam, M. Hassan, M. y Huh, E.; *Sensor Proxy Mobile IPv6 (SPMIPv6)-A framework of mobility supported IP-WSN*, in Proc. of the 13th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT), 2010: p. 295--299.
- [31] Lee, K.; *IEEE 1451: A standard in support of smart transducer networking*, in Proc. of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2000), 2000: p. 525--528.
- [32] Silva, R. Silva, S. y Boavida, F.; *A Proxy-based Mobility Solution for Critical WSN Applications*, in Proc. of the Workshops in 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2010: p. 1--5.
- [33] Akyol, B. Kirkham, H. Clements, S. y Hadley, M.; *A Survey of Wireless Communications for the Electric Power System*, Prepared for the US Department of Energy under Contract DE-AC05-76RL01830, January 2010.