A Bridge Structural Health Monitoring System Supported by the Internet of Things

Christian Lazo*, Paulo Gallardo*, and Sandra Céspedes†

*Institute of Informatics, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

†Department of Electrical Engineering, Universidad de Chile, Santiago, Chile
clazo@inf.uach.cl, gallardo.casanova@gmail.com, scespedes@ing.uchile.cl

Abstract—Technological devices of all kinds are becoming more common in our daily lives: smart devices are being incorporated in buildings, houses, cars, and public infrastructure such as roads and bridges. The new devices give us an unusual degree of connectivity in our regular activities, for example when we employ our tablets or smart phones to check email or browse the public network, but also in more innovative forms of connectivity, such as receiving notifications directly from our refrigerator or collecting information from our clothes and shoes. This technological revolution brings new opportunities and challenges for users, businesses, and society. This paper explores such a new context, where we begin to co-exist and interact with a network of interconnected devices that is known as the Internet of Things. The objective of the project is to implement a solution for communicating devices that monitor, in real-time, the structural health of a bridge. The implementation is based on 6LoWPAN, a standard based on the IPv6 protocol over low-power and lossy networks to support the Internet of Things. We employ open hardware platforms and emphasize the singularities of embedded systems, such as a limited number of operations, low power consumption, and low bandwidth capability. The prototype shown in this work uses the 6LoWPAN standard in a network environment that connects with a real Bridge Management System, with the aim of optimizing the maintenance

Keywords—6LoWPAN, Bridge Management System, Embedded Systems, IEEE 802.15.4, Internet of Things, IPv6, Wireless Sensor Network.

I. Introducción

La actual masificación de sistemas embebidos con requerimientos de conectividad hacia Internet involucra en la actualidad no solo a teléfonos inteligentes, sino también a objetos de uso cotidiano, tales como electrodomésticos, prendas de vestir, vehículos, edificios e infraestructura pública como alumbrado urbano, avenidas, puentes, entre otros. En este escenario de alta conectividad suscita gran interés el concepto de la "Internet de las Cosas" o IoT por su sigla en inglés (*Internet of Things*), la cual describe a una red de diferentes objetos de uso cotidiano interconectados entre sí [1] [2]. Una red de objetos inteligentes, dentro del contexto de la Internet de las Cosas, puede dar respuesta a diversos desafíos planteados actualmente por la sociedad, en ámbitos como: automatización de edificios, monitoreo de las condiciones climáticas, automatización industrial, control logístico, telemedicina, entre otros.

De esta forma, la Internet llega a un punto de inflexión, donde la red tradicional de computadores interconectados evoluciona hacia una red de objetos de uso diario interconectados entre sí, y donde el protocolo IPv6 juega un rol fundamental. Debido a la mayor capacidad de direccionamiento de IPv6, que a diferencia de su predecesor IPv4, pasa de los 32 bits a los 128 bits disponibles por dirección [3] [4], se posibilita la interconexión extremo-a-extremo de nuevos dispositivos inalámbricos con un bajo costo de fabricación y despliegue, de bajo consumo de potencia, pero también con capacidades de procesamiento limitadas.

El presente artículo aborda el problema concerniente a la interacción de sensores inalámbricos destinados al monitoreo continuo de la salud estructural de un puente. El proyecto se enmarca bajo el alero del desarrollo de un Sistema de Gestión de Puentes en la Región de Los Ríos, Chile, donde se propone implementar una red basada en el protocolo 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) [5]. De esta manera se puede brindar al sistema on-line información en tiempo real sobre las condiciones de las estructuras bajo supervisión. La información contenida en un Sistema de Gestión de Puentes resulta de gran utilidad para la planificación y control de las inspecciones de la red vial, las cuales se realizan normalmente con visitas de personal técnico en terreno. Por el contrario, al contar con un sistema de monitoreo continuo, se puede no solo automatizar la recolección de datos, si no también detectar tempranamente situaciones que ameriten la atención de las agencias a cargo de la conservación de puentes.

No obstante, en un escenario de despliegue de sensores conectados a la Internet de las Cosas se enfrentan variados retos, siendo pertinente destacar en primera instancia que el hardware a utilizar presenta restricciones en cuanto a su baja capacidad de procesamiento y baja tasa de transmisión de datos. Adicionalmente, no solo los dispositivos finales, o nodos, reclaman atención, sino que también los dispositivos de comunicación y de almacenamiento, debido a los grandes volúmenes de datos que proporcionarían los sensores desplegados en una red de puentes. Mediante el desarrollo del prototipo propuesto se permitirá verificar la factibilidad de despliegue de la red descrita, en un entorno real de puentes que participan en un sistema de gestión.

El resto del artículo se encuentra organizado de la siguiente manera. En la Sección II se discute el contexto de este proyecto, el sistema de referencia en el cual se desarrolla y aspectos técnicos a considerar. En la Sección III se presenta nuestro prototipo de implementación e intregración de sensores de monitoreo en tiempo real conectados a un Sistema

on-line de Gestión de Puentes. En la Sección IV se describen las pruebas realizadas al prototipo y resultados obtenidos. Finalmente, la Sección V concluye este artículo.

II. SISTEMA Y ESTÁNDARES DE REFERENCIA

La Internet de las Cosas incorpora a todos los dispositivos embebidos, o *smart objects*, junto con sus servicios de monitoreo y control, a redes con soporte nativo del protocolo IP [6]. De esta manera se permite comunicar no solo a personas con personas, sino también a personas con objetos y a objetos entre sí. Este tipo de soluciones embebidas puede ser apoyado con Sistemas Operativos de funcionalidades reducidas. Desde esta perspectiva, la aparición de redes de sensores inalámbricas o WSN (*Wireless Sensor Networks*), es esencialmente la última tendencia de la Ley de Moore hacia la miniaturización y la ubicuidad de los dispositivos informáticos [7], lo que permitiría un intercambio mundial de información.

Actualmente se cuenta con dispositivos de corto alcance y baja potencia de radio, lo que a su vez limita las velocidades de transferencia de datos, tamaño de las tramas y ciclos de trabajo (i.e., bajo consumo de potencia). En cuanto a la estandarización de las comunicaciones que soportan la IoT, el IEEE 802.15.4 se posiciona, en el año 2003, como el primer estándar de radio de bajo consumo [8]. El IEEE 802.15.4 define los niveles básicos de red para dar servicio a redes inalámbricas de área personal o WPAN (Wireless Personal Area Networks), cuyo principal uso radica en aplicaciones de monitoreo para brindar comunicación entre dispositivos embebidos con capacidad de procesamiento limitada, bajo consumo de energía y bajo uso del ancho de banda.

En la Tabla I se presenta una clasificación de las tecnologías de comunicación inalámbricas [9], señalando sus principales características y aplicaciones típicas, a fin de observar de manera comparativa las condiciones que presenta el IEEE 802.15.4, ya que esta tecnología es la seleccionada para las comunicaciones en el prototipo propuesto. El estándar IEEE 802.15.4 tiene como principales atributos su bajo coste en términos de requerimientos y bajo consumo de energía, destacando en aplicaciones domóticas e industriales. Con una trama que no debe exceder los 127 Bytes de longitud, el estándar ofrece tasas de transmisión de datos de hasta 250 Kbps, brindando soporte para aplicaciones que no requieran gran velocidad de transmisión, o para nodos alimentados por baterías, donde la energía sea un factor crítico [10].

A. 6LoWPAN

El presente proyecto se centra en el uso de 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks), el cual hace referencia a un conjunto de estándares de Internet definidos por la IETF (Internet Engineering Task Force), que permiten el uso de IPv6 en redes de área personal inalámbricas de baja potencia, convirtiéndose en la clave para hacer realidad la Internet de las Cosas. En particular, el RFC 4919 [5] hace referencia al uso de IPv6 sobre 6LoWPAN considerando la transmisión de paquetes IP sobre tecnología IEEE 802.15.4. En la Figura 1 son comparadas las pilas de protocolos de

TABLA I Clasificación de las tecnologías de comunicación inalámbricas

Clase	Data	Radio de	Aplicaciones	Ejemplo de
	rate	cobertura	típicas	tecnologías
WWAN	<10Mbps	>10 km	Telefonía,	GSM, UMTS,
			Internet móvil,	satélite
WMAN	<100Mbps	<10 km	Internet	IEEE802.16,
			banda ancha	HIPERMAN
WLAN	<100Mbps	<100 m	LAN	IEEE802.11,
			alámbrica	HIPERLAN/2
WPAN	<10Mbps	<10 m	transferencia	Bluetooth,
			de datos	IEEE802.15.3
			personales	
WSN	<1 Mbps	<1 km	Monitoreo,	propietarias,
			control	IEEE802.15.4,
				RFID

TCP/IP y 6LoWPAN, introduciéndose en este último una capa de adaptación y optimización [6].

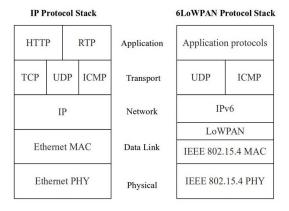


Figura 1. Pila TCP/IP y Pila 6LoWPAN

Cabe destacar que en un entorno con objetos inteligentes, en el contexto de la IoT, emergen aspectos importantes a considerar en relación a los ciclos de duración de las baterías de los dispositivos, además de su capacidad limitada de procesamiento. También, el IEEE 802.15.4 no suele soportar multicast, y posee un ancho de banda y tamaño de la trama limitados. Mientras que el tamaño de la trama para IPv6 puede ser de 1280 Bytes, la tecnología IEEE 802.15.4 define un tamaño de 127 Bytes, por lo que el RFC 4944 estandarizó una compresión de cabeceras IPv6 y UDP para un total de 6 Bytes [11]. En la Figura 2 es posible observar una comparativa entre las cabeceras IPv6, UDP y 6LoWPAN comprimida, donde los dos bits más significativos del primer Byte (Dispatch Type) indican si la cabecera corresponde a un Normal dispatch (01), Mesh header (10), Fragmentation header (11), o simplemente no se trata de un frame 6LoWPAN (00).

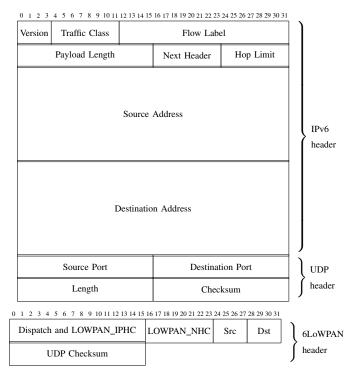


Figura 2. Header IPv6, UDP y 6LoWPAN

B. Plataformas abiertas para 6LoWPAN

Dado el desarrollo actual de las tecnologías que hacen posible la IoT, y considerando la normalización existente, el uso de alternativas abiertas favorece la experimentación. En este sentido, una alternativa provista por plataformas de hardware abiertas como Arduino [12], se aproxima fehacientemente a las condiciones reales futuras, en cuanto al uso de aparatos que presentan restricciones en términos de recursos. La solución propuesta contempla la implementación de la pila 6LoWPAN en una plataforma abierta de hardware, manteniendo las características de interoperabilidad del protocolo y resguardando las limitaciones en términos de recursos que imponen los dispositivos embebidos.

En este sentido, existen implementaciones como Contiki OS, el cual es un Sistema Operativo multitarea para sistemas integrados y WSN. Contiki OS se implementa en una estructura en capas, open source y altamente portable, el cual realiza un uso eficiente de la memoria [13]. Su kernel cuenta con componentes como μ IP, un pequeño "RFC-compliant TCP/IP stack" que permite la comunicación hacia Internet, junto con una implementación de IPv6 con soporte 6LoWPAN llamada μ IPv6; también en esta línea, el Sistema Operativo de código abierto TinyOS posee BLIP, una implementación de 6LoWPAN para WSN desarrollada por la Universidad de California, Berkeley [14], el cual corresponde a un stack IPv6 que incluye compresión de cabeceras 6LoWPAN, descubrimiento de vecinos, enrutamiento y soporte a programación en red.

C. Sistema de Gestión de Puentes

La solución de monitoreo propuesta en este trabajo se ha diseñado para proveer de datos a un Sistema de Gestión de Puentes o BMS por su sigla en inglés (*Bridge Management System*). Dicho sistema puede ser entendido como un proceso sistemático para la realización de mantenciones, reparaciones y toma de decisiones de reemplazo en un determinado conjunto de puentes, junto con el análisis de la información de los mismos, y sujeto a los fondos disponibles para preservar las estructuras. Un BMS contiene un registro inicial con datos históricos acerca de los puentes en una Base de Datos actualizada de forma regular, en donde se recolecta información sobre las inspecciones realizadas. A partir de dicha información es posible evaluar las condiciones de las estructuras y su tasa de deterioro, para así priorizar el financiamiento para la reparación y/o mantención de los puentes [15].

Un Sistema de Gestión de Puentes, como el observado en la Figura 3, está compuesto por distintos módulos, que pueden o no estar integrados entre sí, y que varían de acuerdo a los requerimientos de las agencias encargadas de su administración. No obstante, un sistema básico se maneja bajo un esquema donde los módulos primordiales son: Inventario, Inspección, Condición del puente, Costos y Opciones de mantención.

De esta forma, dada la problemática que plantea la inspección y evaluación de los puentes en terreno, en muchos casos bajo condiciones de difícil acceso, la Internet de las Cosas permite brindar al Sistema de Gestión de Puentes información en tiempo real sobre las condiciones de las estructuras.



Figura 3. Sistema de Gestión de Puentes

III. IMPLEMENTACIÓN DE LA RED DE MONITOREO

La inspección y evaluación de las estructuras se puede mejorar a través del monitoreo continuo de diversos aspectos de las mismas, velando por la mantención de la salud estructural de los puentes. En este trabajo se propone la implementación de una red de monitoreo a través de la cual se alimente con volúmenes de datos al ya existente Sistema de Gestión de Puentes de la Región de Los Ríos, en Chile, desarrollado por la Universidad Austral de Chile. La puesta en marcha de este prototipo permite, no solo validar la aplicación de la Internet

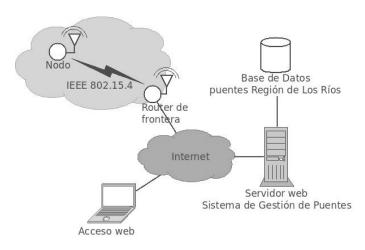


Figura 4. Arquitectura de la solución

de las Cosas en entornos reales, sino también evidenciar retos y aspectos por resolver en la interconexión de dispositivos a la IoT.

El escenario de red a implementar, ilustrado en la Figura 4, interactúa a través de Internet con el sistema de gestión, donde una Base de Datos aloja información sobre los puentes de la localidad. Como parte del prototipo se instala un sensor en una estructura, el cual se comunica de forma inalámbrica con un router frontera ubicado en el puente, con conectividad IP, y que actúa como gateway posibilitando el intercambio de información entre redes IP y el nodo IEEE 802.15.4. De esta forma, se optó por hacer uso de una pila IPv6 en un microcontrolador de una plataforma Arduino. La Figura 5 ilustra la pila a implementar, que corresponde al "Arduino-IPv6 Stack" [16], el cual fue portado por Contiki OS a la plataforma Arduino.

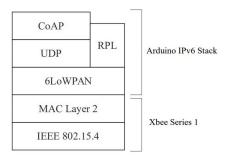


Figura 5. Arduino IPv6 Stack

Los recursos hardware a utilizar corresponden a dispositivos Arduino Mega 2560 R3, junto con XBee series 1, el cual proporciona soporte PHY/MAC IEEE 802.15.4. La Tabla II muestra las características de los módulos XBee utilizados. Los módulos XBee fueron diseñados para cumplir con los estándares IEEE 802.15.4 y soportar las necesidades de bajo

coste y bajo consumo de energía para WSN. Los módulos requieren un mínimo de energía, proporcionan entrega de datos fiable entre dispositivos, y funcionan en la banda de frecuencia de 2.4 GHz [17].

TABLA II Características módulo XBee

Velocidad de datos máxima:	115.2 kbP
Banda de frecuencia:	2.4 GHz
Potencia de transmisión:	1 mW (+0 dBm)
Rango:	100 m

El escenario dispuesto prueba la interoperabilidad de dos nodos: un nodo-sensor y un border router, trabajando con envío de mensajes multicast; si la red posee un prefijo, se cambia el prefijo propio según la dirección IP de origen del mensaje del router. De esta manera, se incluye un sensor en un nodo para capturar información del entorno, para luego, obtener datos sobre las vibraciones en la estructura a través de un acelerómetro.

Cabe destacar que el Sistema de Gestión de Puentes se compone de una aplicación web y una aplicación móvil para realizar inspecciones. El sistema cuenta con un repositorio de los puentes de la región y sus características, entre las que se cuentan los sensores con las mediciones de su estado, junto con las inspecciones realizadas a las estructuras, apoyado por un catálogo de daños y un catálogo de acciones correctivas asociado a los daños.

Además, junto con almacenar la información acerca de las condiciones del puente en la Base de Datos, se utiliza la Base de Datos on-line Xively [18] (ver Figura 6), la cual provee

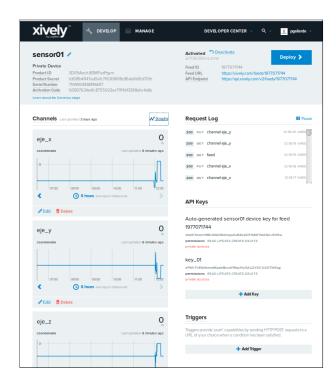


Figura 6. Base de Datos Xively

herramientas basadas en la web, permitiendo conexión a una nube pública de información para almacenar la data obtenida por objetos que forman parte de la nueva Internet.

IV. RESULTADOS

Para el análisis de la calidad de los datos obtenidos por el sensor, se llevaron a cabo experimentos en condiciones de laboratorio y en condiciones reales. En ambos casos se hizo la recolección de datos de la componente vertical, es decir, el valor de la aceleración de la proyección sobre el eje z de un vector que representa el desplazamiento del nodo-sensor en un tiempo t con respecto a un tiempo t-1.

Las condiciones del montaje de laboratorio se hicieron ubicando el nodo-sensor en el extremo de una regla de medir de 60 cm, fijada en una mesa, donde quedan 35 cm suspendidos en el aire; el nodo-sensor es sometido a estimulaciones que permiten captar las variaciones de la aceleración en la componente vertical. Los registros obtenidos en laboratorio se observan en las Figuras 7(a), 7(b) y 7(c).

A continuación, el prototipo pasó a ser ubicado en un puente de la Región de los Ríos. Los datos sobre las vibraciones de la estructura fueron obtenidos por el sensor y enviados al Sistema de Gestión de Puentes para ser desplegados al usuario a través de una plataforma web. El prototipo hardware es posicionado en el puente Calle-Calle de la ciudad de Valdivia, Chile, para así captar las vibraciones producidas por los vehículos. Dadas las condiciones existentes en términos de conectividad y/o redes IPv6 disponibles en las cercanías al puente, se recurrió a la implementación de una sonda, a modo de capturar paquetes con el fin de permitir un análisis de tráfico en el prototipo. En estas condiciones es posible establecer el proceso de descubrimiento de vecinos entre el nodo-sensor y el router de borde. Cabe señalar que el proyecto fue implementado en hardware, por tanto las evaluaciones son aplicables directamente a estos dispositivos. Los registros del prototipo desplegado en el puente son observados en las Figuras 7(d), 7(e) y 7(f). Para cada experimento fueron establecidos ciclos de muestreo a 60 Hz durante 30 segundos para obtener el comportamiento de la componente vertical.

Adicional a la componente vertical, también se midió el tiempo que tarda el proceso del nodo sensor en quedar operativo una vez que se conecta a la red. Este tiempo está medido por el retardo que hay desde que el nodo sensor hace la solicitud al router hasta que éste adquiere un prefijo de red y puede empezar a transmitir datos. De acuerdo a los resultados ilustrados en la Figura 8, en promedio transcurren 10.46 segundos para que el nodo sensor obtenga conectividad IP a la red, con un tiempo de envío entre paquetes de 1 segundo.

Dadas las características de los dispositivos Arduino utilizados, en referencia particularmente a su limitada capacidad de procesamiento, se encontró que el rendimiento del software impacta notablemente en el rendimiento de la red. De esta forma, no es posible trabajar con frecuencias de envío de paquetes muy elevadas. Además, la memoria de los dispositivos es limitada, sin embargo, en condicione reales

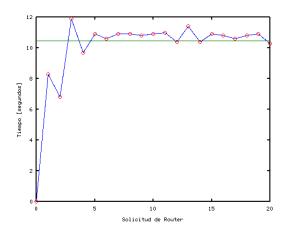


Figura 8. Tiempos en proceso de solicitid de router

fueron suficientes los ciclos de muestreo establecidos de 60 Hz durante 30 segundos para obtener datos de utilidad para las agencias encargadas de la conservación de los puentes.

En cuanto a la resolución de los datos, el sensor acelerómetro utilizado posee una resolución de 10 bits, en un rango de \pm 3 G (medida intuitiva de aceleración basada en la gravedad terrestre), donde la información capturada es digitalizada en un rango de 0 a 1023. Es así como se ideó una estrategia de almacenamiento y envío, en donde una vez que el nodo adquiere el prefijo de la red, entra en un ciclo de muestreo, donde son almacenados los datos y construidos paquetes con 9 muestras cada uno. Las muestras agregadas comienzan a ser enviadas luego de concluir el proceso de muestreo, para que así el nodo entre en reposo hasta que ocurra un nuevo ciclo de captura de datos. Cabe señalar que si se desea realizar un análisis estructural más detallado, se recomienda generar datos de mayor precisión, i.e., con resolución superior a 10 bits.

Dado el enfoque práctico de este proyecto, y considerando la experiencia adquirida, resulta pertinente realizar evaluaciones futuras en entornos simulados, donde sea posible aumentar el número de nodos, probar diferentes tiempos de envío entre paquetes, evaluar protocolos de seguridad, entre otros. También, junto a los canales de comunicación, se debe considerar el impacto a nivel de Base de Datos que implicaría contar con varios sensores recolectando datos de manera simultánea.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el diseño e implementación de un prototipo para monitorear la salud estructural de un puente, mediante el uso de redes de sensores conectados a la Internet de las Cosas. La aplicación de monitoreo fue implementada con base en el estándar 6LoWPAN y aprovechando plataformas abiertas de hardware. 6LoWPAN es un componente clave para que la Internet de las Cosas sea una realidad, ya que hace posible el uso de la tecnología inalámbrica IEEE 802.15.4, presente en muchas plataformas abiertas, estableciendo enlaces desde sistemas embebidos a través del protocolo IP, y brindando interoperabilidad con redes IP existentes.

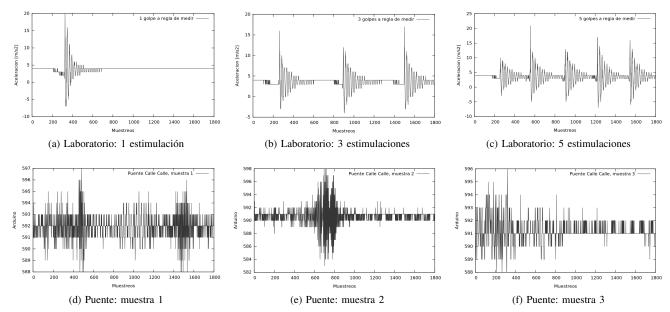


Figura 7. Mediciones de vibración en componente vertical

Los experimientos del prototipo se llevaron a cabo en entornos controlados de laboratorio y también mediante la instalación de un sensor en el puente Calle-Calle, en Valdivia, Chile. Los datos recolectados se envían en tiempo real hacia un Sistema de Gestión de Puentes previamente desplegado en la Región de los Ríos de Chile. De esta forma es posible el monitoreo continuo de las vibraciones del puente en su componente vertical, brindando grandes volúmenes de información que permiten apoyar la toma decisiones, contribuyendo a la mantención oportuna de la red vial, y permitiendo automatizar procesos que actualmente se realizan con personal técnico en terreno.

La implementación requirió el uso de estrategias de sincronización, muestreo y transmisión de datos, dadas las restricciones impuestas por el hardware empleado, como la baja potencia de cómputo, memoria limitada y baja tasa de transmisión. Mediante dichas estrategias se pudo validar la correcta recepción de los datos en el despliegue hecho en el puente, y la conexión exitosa a través de Internet con el Sistema de Gestión de Puentes. Sin embargo, para un entorno de alto rendimiento, se recomienda evaluar la utilización de plataformas hardware que provean mayores prestaciones, así como también, acompañarlas de herramientas de medición de mayor precisión. Para el trabajo futuro se espera evaluar la solución implementada a través de simulaciones, donde se pueda aumentar el número de sensores, permitiendo también diseñar protocolos de seguridad para este contexto. El objetivo final será lograr una implementación en hardware de mayor eficiencia, considerando los desafíos en términos de conectividad que se desprenden de la ubicación geográfica de los puentes supervisados mediante el sistema de gestión.

REFERENCIAS

[1] Commission of the European Communities, Internet of Things - An action plan for Europe, Bruselas, 2009.

- [2] IERC-European Research Cluster on the Internet of Things, Internet of Things Strategic Research Roadmap, 2011.
- [3] S. Deering and R. Hinden, "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification," RFC 2460, 1998.
- [4] Latin America and Caribbean Network Information Centre. (2015) IPv4 Depletion Phases. [Online]. Available: http://www.lacnic.net/web/lacnic/agotamiento-ipv4
- [5] N. Kushalnagar, G. Montenegro, and C. Schumacher, "IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals," RFC 4919, 2007.
- [6] Z. Shelby and C. Bormann, 6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet. Great Britain: John Wiley & Sons, 2009.
- [7] Y. Yu, V. Prasanna, and B. Krishnamachari, Information Processing and Routing in Wireless Sensor Networks. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009.
- [8] IEEE Standards Association, IEEE Standard 802.15.4-2003, 2003.
- [9] M. Kuorilehto, M. Kohvakka, J. Suhonen, P. Hämäläinen, M. Hännikäinen, and T. Hämäläinen, *Ultra-Low Energy Wireless Sensor Networks in Practice*. Great Britain: John Wiley & Sons, 2007.
- [10] J. Gutiérrez, E. Callaway, and R. Barrett, Low-rate Wireless Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensors with IEEE 802.15.4, ser. IEEE standards wireless networks series. New York: Standards Information Network, IEEE Press, 2004.
- [11] G. Montenegro, N. Kushalnagar, J. Hui, and D. Culler, "Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks," RFC 4944, 2007.
- [12] Arduino. [Online]. Available: http://www.arduino.cc/
- [13] Contiki OS. The Open Source OS for the Internet of Things. [Online]. Available: http://www.contiki-os.org/
- [14] TinyOS. Documentation Wiki: BLIP Tutorial. [Online]. Available: http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/BLIP_Tutorial
- [15] M. Ryall, Bridge Management. London: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [16] Telecom Bretagne. Arduino-IPv6Stack. [Online]. Available: http://github.com/telecombretagne/Arduino-IPv6Stack/wiki
- [17] Digi, XBeeTM/XBee-PROTM OEM RF Modules, XBee Series 1, 2006.
- [18] Xively. Business Soutions for the Internet of Things. [Online]. Available: https://xively.com/
- [19] R. Faludi, Building Wireless Sensor Networks, with ZigBee, XBee, Arduino, and Processing. USA: O'Reilly Media, Inc., 2010.
- [20] J. Hui, D. Culler, and S. Chakrabarti, 6LoWPAN: Incorporating IEEE 802.15.4 into the IP architecture. IPSO Alliance, 2009.
- [21] A. Dunkels and J. Vasseur, IP for Smart Objects. IPSO Alliance, 2010.