

# Las redes de sensores inalámbricos y el Internet de las cosas

---

Revisión de tema - Fecha de recepción: 8 de agosto de 2012 - Fecha de aceptación: 10 de septiembre de 2012

Alejandro Cama

Ingeniero en Telecomunicaciones, Magíster en Ingeniería de Computadores y Redes, Universidad de Almería. Almería, España, acp2929@gmail.com

Emiro De la Hoz

Magíster en Ingeniería de Computadores y Redes, Corporación Universidad de la Costa - CUC. Barranquilla, Colombia, edelahoz@cuc.edu.co

Dora Cama

Ingeniero Industrial, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú, cpd9255@gmail.com

## RESUMEN

El Internet de las cosas (IoT) percibe un mundo donde los dispositivos que lo conforman pueden ser identificados en el Internet y está creciendo a un ritmo acelerado con nuevos dispositivos que se van conectando. En este sentido, las redes de sensores inalámbricos juegan un papel importante para incrementar la ubicuidad de las redes con dispositivos inteligentes de bajo costo y fácil implementación, con estándares como IEEE 802.15.4 en la capa física, 6LoWPAN en la capa de red, y RPL como protocolo de enrutamiento, que se integran en el concepto de IoT para traer nuevas experiencias en las actividades de la vida diaria, como por ejemplo en aplicaciones para hogares y oficinas confortables, salud, vigilancia del medio ambiente y ciudades inteligentes. En el presente artículo se relacionará a la red de sensores inalámbricos con el Internet de las cosas a través de estándares y protocolos.

## Palabras clave

Internet de las cosas, IoT, 6LoWPAN, RPL, redes de sensores inalámbricos, WSN, IEEE 802.15.4.

## *Wireless sensor networks and the Internet of Things*

### **ABSTRACT**

The Internet of Things (IoT) perceives a world where devices shaping it can be identified on Internet. It is growing at a rapid pace because there are always new devices to be connected. In this sense, wireless sensor networks (WSN) play a major role in increasing the ubiquity of networks with low-cost and easy to implement smart devices. Using standards such as the IEEE 802.15.4 in the physical layer, 6LoWPAN in the network layer and RPL as routing protocol, they can be integrated into the concept of IoT, hence, bringing new experiences in daily life contexts, such as home and workplace applications, health, environmental monitoring and smart cities. This article relates wireless sensor network to the Internet of Things through standards and protocols.

### **Keywords**

Internet of Things (IoT), 6LoWPAN, RPL, wireless sensor networks (WSN), IEEE 802.15.4.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad no hay una definición específica o estándar de la arquitectura del Internet de las cosas (IoT). Algunos investigadores definen el IoT como un modelo que abarca a las tecnologías de comunicación inalámbrica como las redes de sensores inalámbricos, redes móviles y actuadores, con cada uno de los elementos denominados “objeto o cosa” y con una dirección única [1].

En el caso de las redes de sensores inalámbricos (WSN), estas han recibido una gran atención en los últimos años desde los puntos de vista académico e industrial gracias a los avances de la tecnología, en relación con los micro-sensores, redes inalámbricas y el procesamiento de dispositivos embebidos.

Las WSN están constituidas por sensores autónomos distribuidos espacialmente con el propósito de ser capaces de comunicarse entre sí con un mínimo de consumo de energía y entregando su colección de datos. En el contexto del Internet de las cosas (IoT) juegan un papel importante para incrementar la ubicuidad de las redes.

A los llamados “objetos inteligentes” que constituyen las redes de sensores/actuadores inalámbricos (WSAN) se les otorga direcciones IP para que sean parte integral de Internet y puedan aprovechar los servicios que este ofrece en relación con la monitorización y control de dichos dispositivos. Esto conlleva a la conexión de objetos físicos y digitales al Internet [2].

En la Fig. 1, mediante una estructura de anillos concéntricos, se aprecia un modelo de cómo está conformado Internet hoy en día. En el centro de todos los anillos está el “Core” o núcleo de Internet, compuesto por millones de nodos (servidores y enrutadores); el siguiente anillo de mayor tamaño es la franja de Internet que corresponde a equipos o terminales de usuario final (ordenadores, teléfonos inteligentes, tabletas, etc.); finalmente, el anillo de mayor diámetro se refiere al Internet de las cosas (IoT) que agrega una nueva dimensión al Internet actual; incluyen aplicaciones para dispositivos embebidos enfocados a la automatización de edificios, la logística, mediciones de personal, o a diversos procesos de medición inteligente.

La tecnología inalámbrica es la vía fundamental por la que los “objetos inteligentes” se comunican entre ellos y hacia Internet. En este sentido, cobran importancia las redes de sensores inalámbricos (WSN) como la tecnología que permite la escalabilidad del IoT y con la funcionalidad suficiente para proporcionar su integración con la arquitectura actual de Internet, tal como se evidencia en [3], [4] y [5]. La tecnología clave para la creación de redes IP en los dispositivos inalámbricos es “IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks” (6LoWPAN), un estándar que especifica cómo se transportan paquetes IPv6 sobre IEEE 802.15.4 (mayor detalle sobre este estándar puede ser consultado en [6], [7] y [8]). Por su lado, el protocolo de enrutamiento “IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks (RPL)” se pre-

senta como el principal candidato en las redes de bajas potencias y pérdidas, que son las principales componentes en la próxima generación del Internet de las cosas [9].

## MARCO TEÓRICO

### El estándar IEEE 802.15.4

Tal como se ha mencionado, la WSN está conformada por objetos que contienen sensores y transmisores embebidos, con capacidad para monitorizar y reaccionar en el ambiente donde operan. La lógica embebida también permite el control remoto y la monitorización, y proporciona la oportunidad para vigilar y analizar fuentes de datos

con información constante, lo cual repercute en el manejo y búsqueda de datos en tiempo real. En ese sentido, desde el año 2003 el IEEE 802.15.4 ha sido el estándar más empleado en las WSN. Este estándar determina las comunicaciones en las capas físicas y de control de acceso al medio - MAC (capas uno y dos del modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos - OSI) en las redes de sensores inalámbricos de área personal de baja velocidad (LR-WPAN). Las LR-WPAN son caracterizadas por la baja tasa de datos que transportan, el bajo consumo de energía requerido para su funcionamiento (la duración de la batería es de varios meses o incluso años, dependiendo

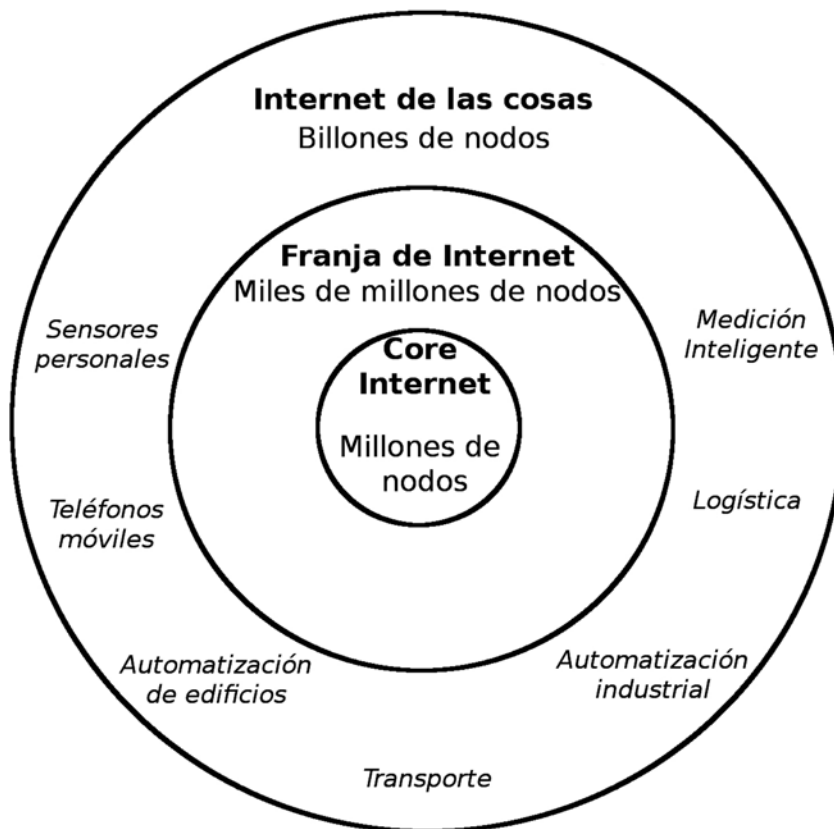


Fig. 1 Visión del Internet de las cosas (IoT) [3]

del nivel de actividad), la variabilidad de la topología de red y el conocimiento de la ubicación.

### El estándar 6LoWPAN

IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN) básicamente incluye los mecanismos necesarios para comprimir direcciones IPv6 sobre IEEE 802.15.4 [10].

Se elige trabajar con IPv6 (en vez de IPv4) en las capas superiores de IEEE 802.15.4 (red) principalmente por la oportunidad de disponer de una abundante cantidad de direcciones IP y debido a las restricciones de direccionamiento inherentes a IPv4, en vista de la gran demanda de direcciones IP de los próximos años (Fig. 2). El protocolo IPv6 trabaja con direcciones de 128 bits en lugar de los 32 bits que proporciona IPv4. Con 128 bits IPv6 proporciona  $667 \times 10^{21}$  direcciones por metro cuadrado sobre toda la superficie del planeta tierra.

En los RFC 4944 [7] y RFC 6282 [8] han sido definidas las especificaciones acerca de cómo se soportan las transmisiones de pa-

quetes IPv6 sobre LoWPAN para que cumpla con los requerimientos de IPv6. De este modo, una capa intermedia entre la capa de red y la de enlace de datos, llamada también capa de adaptación o “LoWPAN adaptation layer”, ha sido creada para permitir datagramas IPv6 conforme a los requerimientos de las capas más bajas. Actualmente el MTU definido por IEEE 802.15.4 es de 127 bytes y para las especificaciones de IPv6 su MTU es fijado, como mínimo, en 1280 bytes según [8], [11], [12] y [13].

La capa de adaptación proporciona los mecanismos de fragmentación y re-ensamblaje de los paquetes IPv6 así como la compresión de las cabeceras. Cuando los paquetes IPv6 no pueden ajustarse dentro de los 102 bytes de tamaño de la trama de carga útil de la MAC, los paquetes son fragmentados en múltiples tramas de la capa de enlace para acomodarse al mínimo MTU de IPv6 requerido y así ser re-ensamblados en el otro extremo.

### Beneficios

Los beneficios de usar 6LoWPAN van de la mano con las ventajas que representa el enfoque de Internet de las cosas, ya que sim-



Fig. 2 La pila de protocolos IP y 6LoWPAN [3]

plifica diversos protocolos propietarios con el protocolo de Internet (IP) y así conduce a la integración de los dispositivos embebidos. 6LoWPAN debería ser usado, además, por las siguientes razones:

- Puede hacer uso de la infraestructura de la red Internet dado que está basada en redes IP.
- La tecnología basada en IP es ampliamente conocida, probada y usada alrededor del mundo durante décadas, además la documentación de la tecnología IP es abierta y gratuita.
- Los dispositivos basados en IP fácilmente pueden ser conectados a otras redes IP sin la necesidad de proxies o gateways.

### El protocolo de enrutamiento RPL

El estándar 6LoWPAN y el IEEE 802.15.4 no definen protocolos de enrutamiento, el que juega un papel clave en la transferencia de datos en enlaces multisaltos. Por este motivo, la Internet Engineering Task Force (IETF) decide fundar en el año 2008 un nuevo grupo llamado “Routing Over Low-power and Lossy networks (ROLL)” para hacer frente a este asunto en particular, y luego de comparar otros protocolos existentes, como AODV y DYMO, entre otros, no obtienen resultados satisfactorios, y optan por crear un nuevo protocolo llamado IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks (RPL) que fue publicado por primera vez en agosto del año 2009[14].

El objetivo principal de RPL es proporcionar eficientes caminos de enrutamientos para tres tipos de patrones de tráfico: multipunto a punto (MP2P), punto a multipunto (P2MP) y punto a punto (P2P) [15].

Cuando un nodo trabaja con RPL, obtiene primero una dirección global IPv6 (por ejemplo vía DHCPv6), e intenta unirse a una DODAG (Destinated Oriented Directed Acyclic Graph) por medio de intercambiar solicitud de información DODAG (DIS) o mensajes de información de objetos DODAG (DIO).

Empleando estos mensajes de control un nodo raíz de un RPL DODAG se presenta como padre ante los otros nodos en su vecindad. Por otro lado, una vez que un nodo RPL selecciona a su padre, propaga su propio DIO hacia las ramificaciones contrarias o inferiores de jerarquía en toda la red para formar un sub-DODAG. Cuando un DIO es recibido y un nodo intenta conectarse a un RPL DODAG, el nodo inicia el cómputo de su propio rango o “rank” que es una representación escalar del nodo dentro de la DODAG visto desde el nodo raíz.

En el caso del patrón de tráfico multipunto a punto, el tráfico puede ser soportado con un pequeño enrutamiento de estado, por lo que cada nodo almacena su siguiente salto que lo conduce a su destino (el nodo raíz de la DODAG). Este estado puede ser mantenido por una DODAG apropiadamente confeccionada a través del intercambio de mensajes DIO. En los otros dos tipos de patrones de tráfico, punto a multipunto y pun-

to a punto, RPL suministra rutas separadas “hacia abajo” usando mensajes DAO (Destination Advertisement Object) que anuncian rutas y prefijos dentro de una red RPL. Al recibir un mensaje DAO, dependiendo de cómo se encuentre la red configurada, los nodos pueden localmente reenviar la ruta (non-storing mode) hasta la raíz de la DODAG o almacenarla localmente (storing mode). Al recoger la información de las rutas de la red un paquete puede viajar hasta su último destino por las ramificaciones de la red dado que tiene el conocimiento (lo anteriormente descrito es detallado en [16] y [17]).

RPL puede ser usado con los sistemas operativos de redes de sensores inalámbricos más difundidos, TinyOS y ContikiOS, con los nombres de TinyRPL y ContikiRPL, respectivamente [18].

## La web embebida

Las aplicaciones web actuales en su gran mayoría requieren del Protocolo de Transferencia de Hipertexto HTTP (Hypertext Transfer Protocol) para acceder a la información y realizar actualizaciones; sin embargo, no es el más idóneo para trabajar con redes y dispositivos de recursos limitados.

HTTP está basado en la Transferencia de Estado Representacional (REST), un estilo de arquitectura que proporciona la información disponible en la web mediante recursos identificados por los URI (Uniform Resource Identifier). Los clientes acceden a estos recursos alojados en servidores y

controlados en forma de petición-respuesta síncrona. Los recursos en la web a menudo contienen enlaces a otros recursos creando una web distribuida entre los puntos finales de Internet, lo que la convierte en una arquitectura altamente escalable y flexible. Estos conceptos fundamentales web se describen habitualmente como REST.

En términos generales, la web se compone de tres tecnologías: HTML, HTTP/REST y URI.

HTTP es por sí misma un protocolo muy potente, pero tiene un alto costo en el tamaño del código de una implementación (superando la capacidad de memoria de los dispositivos embebidos) y también en los requerimientos de recursos de red. Ante esta situación, el grupo de trabajo CoRE (Constrained RESTful Environments) ha propuesto el protocolo CoAP (Constrained Application Protocol), un protocolo de aplicación de transferencia web para funcionar con recursos muy limitados. A diferencia de los protocolos basados en HTTP, CoAP opera sobre UDP (User Datagram Protocol) y define una muy simple capa de mensajes para retransmitir los paquetes perdidos en lugar de usar el complejo control de congestión usado en el estándar TCP (Transmission Control Protocol). En su capa de mensaje se definen cuatro métodos de petición: GET, POST, PUT y DELETE y sus códigos de respuesta son parecidos a los del HTTP (como el 404, de “no encontrado”). Por otro lado, CoAP puede ser fácilmente traducido a HTTP para promover la integración de los nodos embebidos y la web que conocemos.



La pila de CoAP stack usa 6LoWPAN en dispositivos embebidos que necesitan comunicarse con los servicios basados en Internet [20], y su principal beneficio se alcanza cuando se interconecta con HTTP y se aprovecha la estructura REST que involucra las comunicaciones con el cliente, los proxies, gateways y servidores (Fig. 3).

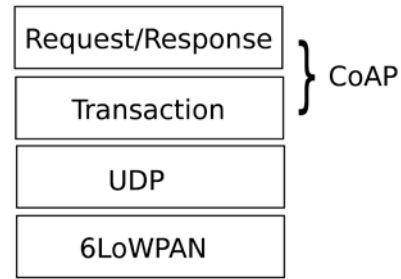


Fig. 3 La pila de protocolos de CoAP [19]

En la Fig. 4 se muestra cómo CoAP es organizado en dos capas. La capa de transacción maneja el intercambio de mensajes simples entre puntos extremos. La capa de petición/respuesta (request/response) es la responsable de la transmisión de peticiones y respuestas para la manipulación de los recursos y su transmisión. En esta capa se producen las comunicaciones basadas en REST (esto se explica en mayor detalle en [21] y [22]).

servicio (QoS) en las redes de sensores inalámbricos, debido a la escasez de recursos y la falta de fiabilidad de los enlaces inalámbricos de baja potencia [23].

### RETOS POR SOLVENTAR

Existen carencias en términos de calidad de

Existe también una falta de métodos para asegurar que una WSN proporcionará un rendimiento suficiente cuando se despliegue en un entorno dado. Por lo tanto, un enfoque de ensayo y error se aplica típicamente para cambiar los parámetros de un WSN hasta que finalmente esta trabaja adecuadamente. Sin embargo, este enfoque no es sostenible para el IoT que debe incluir

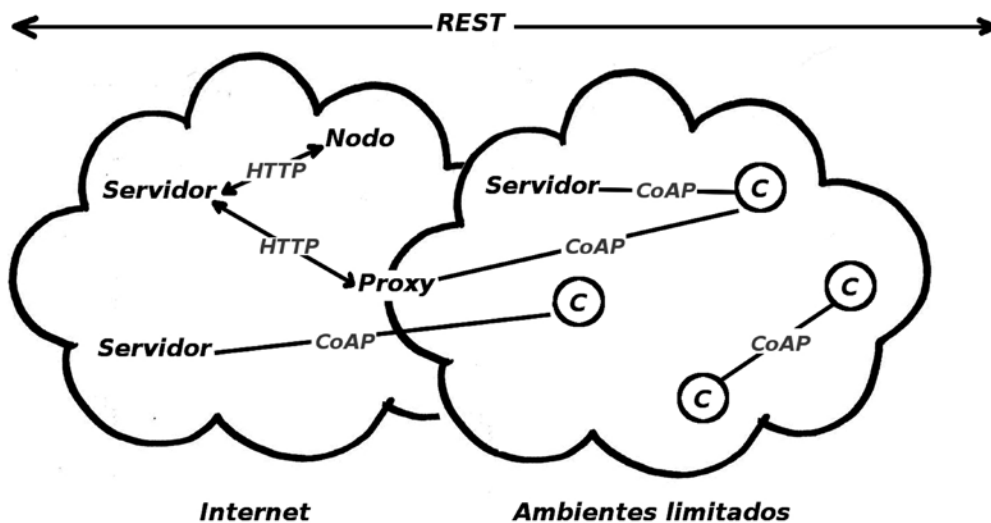


Fig. 4 Implementación de la arquitectura web con HTTP y CoAP trabajando juntos en un ambiente limitado y con el Internet tradicional [21].



miles de millones de dispositivos embebidos WSN.

La razón que hace que sea difícil garantizar un rendimiento WSN es que el entorno en gran medida afecta al rendimiento de la WSN (por ejemplo, a través de la interferencia de WiFi o el cambio de temperatura ambiente, que también afecta al rendimiento de WSN) pero esas condiciones ambientales varían espacial y temporalmente. La tendencia es mejorar el rendimiento y la fiabilidad de las WSN a través del desarrollo de métodos y herramientas genéricas que ayuden en la implementación de una WSN confiable para enfrentar el desafío de su interacción con el medio ambiente, con especial hincapié en su integración del IoT.

Aún hoy en día se siguen haciendo esfuerzos en el estudio y mejoramiento de la confiabilidad del IoT como en el programa de trabajo de la Comisión Europea del FP7 (Seventh Framework Programme), programados para los años 2012 y 2013 [24].

## CONCLUSIONES

Este artículo propicia la familiarización de conceptos y protocolos como 6LoWPAN, RPL, y de la web embebida, que tarde o temprano cualquier persona imbuida en el tema del Internet de las cosas (IoT) tendrá que manejar y/o investigar. Solo se ha hablado brevemente de este amplio dominio y tiene como objetivo animar a seguir profundizándolo.

## REFERENCIAS

- [1] O. Said and M. Masud, "Towards Internet of Things: Survey and Future Vision". *International Journal of Computer Networks (IJCN)*, 5(1), 2013.
- [2] S. Tarkoma and H. Ailisto, "The Internet of Things Program: The Finnish perspective". *IEEE Communications Magazine*, 51(3):10-11, 2013.
- [3] Z. Shelby and C. Bormann, *6LoWPAN: the wireless embedded internet*, Wiley, pp. 1-25, 2011.
- [4] G. Kortuem, F. Kawsar, D. Fitton and V. Sundramoorthy, "Smart objects as building blocks for the Internet of things". *Internet Computing, IEEE*, vol. 14(1), pp. 44 - 51, 2010.
- [5] Qian Zhu *et al.*, "IOT Gateway: bridging wireless sensor networks into internet of things". *IEEE/IFIP 8th International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*, pp. 347-352, Hong Kong, China, 2010.
- [6] G. Montenegro, N. Kushalnagar, J. Hui, D. Culler, *Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15.4 networks*, RFC 4944, 2007.
- [7] J. Hui and P. Thubert, *Compression format for IPv6 datagrams over IEEE 802.15.4-based networks*, RFC6282, 2011.
- [8] N. Kushalnagar, G. Montenegro and C. Schumacher, *IPv6 over low-power wireless personal area networks (6LoWPANs): overview, assumptions, problem statement, and goals*, RFC4919, 2007.
- [9] A. Koubaa, S. Chaudhry, M. Tezeghdanti, R. Chaari and M. Abid, "Simulation and performance evaluation of DAG construction with RPL". *Third international conference on communications and networking (ComNet)*, pp. 1-8, 2012.

- [10] W. Rukpakavong, I. Phillips, L. Guan and G. Oikonom, "RPL Router Discovery for Supporting Energy-Efficient Transmission in Single-hop 6LoWPAN". *IEEE International Conference on Communications*. Article number 6364812, pp. 5721-5725, 2012.
- [11] G. Mulligan, "6LoWPAN Working Group: The 6LoWPAN Architecture". *The Fourth Workshop on Embedded Networked Sensors*, EmNets, 2007.
- [12] J. Hui and P. Thubert, *RFC 6282, Compression format for IPv6 datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks*. ISSN: 2070-1721, 2011.
- [13] A. Ludovici, A. Calveras and J. Casademont, "Forwarding Techniques for IP Fragmented Packets in a Real 6LoWPAN Network". *Sensors*, vol. 11(1), 992-1008; doi:10.3390/s110100992, 2011.
- [14] M. Felsche, A. Huhn and H. Schwetlick, "Routing Protocols for 6LoWPAN". *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, 82: 71-83, 2012.
- [15] H. R. Kermajani and C. Gomez, "Route change latency in low-power and lossy wireless networks using RPL and 6LoWPAN Neighbor Discovery". *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pp. 937 - 942, 2011.
- [16] Jeonggil Ko, A. Terzis, S. Dawson-Haggerty, D. E. Culler, J. W. Hui and P. Levis, "Connecting low-power and lossy networks to the Internet". *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49(4), pp. 96-101, 2011.
- [17] Jeonggil Ko, O. Gnawali, D. Culler and A. Terzis, "Evaluating the Performance of RPL and 6LoWPAN in TinyOS". In: *Proceedings of the workshop on extending the internet to low power and lossy networks*, IPSN, 2011.
- [18] Nguyen Thanh Long, N. De Caro, W. Colitti, A. Touhafi and K. Steenhaut, "Comparative Performance Study of RPL in Wireless Sensor Networks". *IEEE 19th Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)*, pp. 1-6, 2012.
- [19] A. Calveras and A. Ludovici, "Implementation and evaluation of Multi-hop routing in 6LoWPAN". *IX Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, Universidad de Valladolid, 2010, pp. 1-6.
- [20] P. Rajasekaran, R. P. Janardhan and R. P. V. Chander, "A Smarter Toll Gate Based on Web Of Things". *IEEE International conference on electronics, computing and communication technologies (CONECCT)*, pp.1-6, 2013.
- [21] Z. Shelby, "Embedded web services". *Wireless Communications, IEEE*, vol. 17(6), pp. 52-57, 2010.
- [22] C. Bormann, A. P. Castellani and Z. Shelby, "CoAP: An Application Protocol for Billions of Tiny Internet Nodes". *Internet Computing, IEEE*, vol. 16(2), pp. 62-67, 2012.
- [23] K. Machado, D. Rosário, E. Cerqueira, A. A. F. Loureiro, A. Neto and J. Neuman de Souza, "A Routing Protocol Based on Energy and Link Quality for Internet of Things Applications". *Sensors*, 13 (2): 1942-1964, doi: 10.3390/s130201942, 2013.
- [24] *Seventh Framework Programme (FP7)*, [Online]. Disponible en: [http://ec.europa.eu/research/participants/portal/page/fp7\\_documentation](http://ec.europa.eu/research/participants/portal/page/fp7_documentation)