

Análisis y Evaluación de una Solución basada en IPv6 para Monitoreo de Calidad Ambiental en base a Redes Inalámbricas de Sensores

Herrera C.*; González F.*; Sá Silva P.**; Sá Silva J.**

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador
e-mail: carlos.herrera@epn.edu.ec

** Depart. of Informatics Engineering, University of Coimbra, Coimbra, Portugal
e-mail: sasilva@dei.uc.pt)

Resumen: Las Redes Inalámbricas de Sensores (Wireless Sensor Networks - WSN) permiten una amplia variedad de servicios en áreas de vital importancia tales como el control de la seguridad industrial, salud y medio ambiente. Las revistas técnicas especializadas en este campo, consideran a las Redes Inalámbricas de Sensores, como una de las tecnologías emergentes más importantes del siglo XXI.

Por otro lado, las soluciones basadas en IPv6/6LoWPAN son muy interesantes y ofrecen un gran potencial. Estas soluciones permiten superar las limitaciones de los paradigmas basados en gateways y ofrecen soluciones extremo a extremo entre el nodo sensor y los dispositivos conectados a Internet.

El objetivo fundamental de este artículo es describir el proyecto desarrollado en el Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información (DETRI) de la Escuela Politécnica Nacional, para evaluar la utilización de las Redes Inalámbricas de Sensores y las tecnologías de comunicación de 4ta generación, como una alternativa a las soluciones convencionales para el monitoreo ambiental. El proyecto incluye un sistema de control de la calidad del aire para sectores específicos de la ciudad de Quito.

Este artículo presenta el prototipo ya implementado donde se recurrió a soluciones 6LoWPAN para integrar el sistema de monitoreo con Internet a través de IPv6. Paralelamente fueron efectuados algunos estudios de simulación para complementar la evaluación de la solución propuesta.

Palabras clave: Redes Inalámbricas de Sensores, 6LoWPAN, IPv6, calidad ambiental.

Abstract: Wireless Sensor Networks (WSN) offer a wide variety of services in areas such as the control, safety, health and environment monitoring. Technical journals consider WSN one of the most important emerging technologies of the XXI century.

On the other hand solutions based on IPv6/6LoWPAN for WSN are very interesting and offer a high potential. These solutions overcome the limitations of the paradigms based on gateways, and support end-to-end solutions between the sensor node and the devices connected to the Internet.

The main objective of this paper is to describe the project developed in the Department of Electronics, Telecommunications and Information Networks of Escuela Politécnica Nacional to evaluate the use of WSN and 4th Generation communication technologies as an alternative to conventional solutions in the areas of environmental monitoring. The project includes a control system of air quality for specific sectors in Quito.

This paper describes the prototype that is running in Escuela Politécnica Nacional and it also presents some simulation studies that were done to complement the evaluation analysis.

Keywords: Wireless sensor networks, 6LoWPAN, IPv6, Air and environment quality.

1. INTRODUCCIÓN

Una red inalámbrica de sensores se compone de un gran número de nodos con capacidades de auto-organización y de cooperación. Los sensores recogen información específica, a veces la procesan y la envían a un repositorio central. [1]

El *Internet Engineering Task Force* (IETF), entidad encargada de promover los estándares de Internet, en lo

referente a las Redes Inalámbricas de Sensores, ha creado un grupo de trabajo en entornos 6LoWPAN, que realiza el estudio de la transmisión de paquetes IPv6 en dispositivos simples basados en el estándar IEEE 802.15.4 [2]. Este grupo propone la utilización de una capa intermedia entre el protocolo de capa red (IPv6) e IEEE 802.15.4, que permita la gestión de los procesos de compresión. La cabecera IPv6 representa un *overhead* excesivo si se utiliza en su formato original, ya que en el caso de las Redes Inalámbricas de

Sensores, cualquier nodo requiere transmitir solamente una pequeña cantidad de bits.

Actualmente existen sistemas de monitoreo ambiental basados en Redes Inalámbricas de Sensores. Sin embargo, con este proyecto de investigación, se propone soluciones innovadoras donde, al contrario de las soluciones actuales basadas en gateways y middleware, se implementa directamente el protocolo IP en los nodos sensores. Para ello fue necesario hacer un análisis teórico y de laboratorio, para validar la integración del IP en Redes Inalámbricas de Sensores, y comparar las soluciones IPv4 e IPv6 que permitan evaluar cuál se adapta mejor a los objetivos de este proyecto.

En este momento se tiene ya los prototipos implementados, los estudios teóricos y de simulación efectuados y los resultados obtenidos muestran que se puede optar por la integración del IPv6 en Redes Inalámbricas de Sensores para sistemas de monitoreo ambiental en la ciudad de Quito.

Este artículo presenta un análisis teórico-experimental, comparando el IPv4 y el IPv6.

La estructura de este artículo está organizada de la siguiente forma: en la siguiente sección se presenta los fundamentos teóricos para la integración de IP en WSN. Luego se comparan las soluciones basadas en *gateways* con las soluciones basadas en 6LowPAN. La sección 3 presenta los requisitos del sistema a implementar. Se expone el modelo elegido, basado en WSN, para evaluar la calidad del aire en la ciudad de Quito. La implementación del prototipo y su evaluación son descritas en la sección 4 de este artículo. En la última sección se presentan algunas conclusiones y trabajos futuros a ser realizados.

2. MODELOS DE INTEGRACIÓN DE IP EN REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

La conexión de las WSN a Internet se realiza, en su mayoría, a través de *gateways* que convierten las solicitudes enviadas por los dispositivos conectados a Internet en mensajes de *request* para las WSN. Estos *gateways* tienen un papel importante puesto que las redes de sensores e Internet exhiben propiedades diferentes conforme se muestra en la tabla 1.

Tabla1 - Comparación entre Redes IP y WSN

	Redes IP	WSN
Modo de Red	Aplicaciones independientes	Aplicaciones específicas
Paradigma de Encaminamiento	Orientado a direcciones	Orientado a los datos/localización
Flujo de Datos	Uno-para-uno	Varios-para-uno
Velocidad de Transmisión	Alta (Gbps)	Baja (Kbps)
Recursos Limitados	Ancho de banda	Energía, memoria, procesamiento
Tiempo de Vida de la Red	Elevado	Reducido (días)
Operación	Administrada	Auto-configurable

Si bien las tareas de desarrollo de aplicaciones para redes TCP/IP son transparentes a las propiedades de los protocolos existentes en la pila de protocolos (el programador no tiene que preocuparse por el funcionamiento de los protocolos de las capas inferiores), en la programación de aplicaciones para WSN se recurre, a menudo, a funcionalidades de las capas inferiores. De hecho, en este último caso es muy común que el programador necesite trabajar en procesos de enrutamiento, en la implementación de mecanismos de recuperación de errores o en la gestión de la energía. Este proceso, contrario a la independencia de las diferentes capas en la arquitectura de TCP/IP, es llamado *crosslayer*.

En Internet, el encaminamiento de mensajes desde el emisor hasta el receptor se basa en las direcciones IP. En las WSN, la mayoría de las veces, no es importante que un nodo sensor específico sea el que responda a una pregunta enviada por la estación central.

Mientras que el flujo de información a través de Internet es, en su mayoría, punto-a-punto (*unicast*) y a veces de un emisor para varios receptores (punto-multipunto), en las WSN la información es mayoritariamente enviada desde los nodos sensores hacia la estación central de recolección de datos: multipunto-punto (Fig. 1).

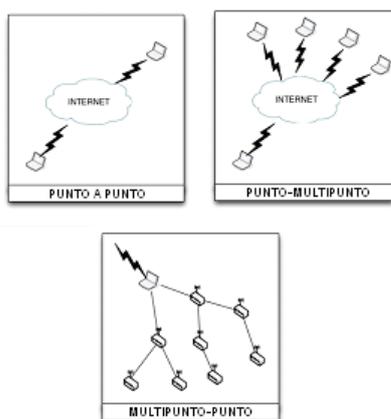


Figura 1 – Punto-Punto vs Punto-Multipunto (Internet) vs Multipunto-Punto (WSN)

Las velocidades de transmisión en las redes TCP/IP son muy elevadas en comparación con las velocidades soportadas en las Redes Inalámbricas de Sensores (Kbps). Sin embargo, mientras uno de los factores más críticos en las WSN es la duración de la batería de los nodos, sigue siendo el ancho de banda uno de los recursos críticos de las redes TCP/IP. La razón es la constante necesidad de ancho de banda de las aplicaciones de Internet y el número creciente de dispositivos que se conectan a esta red, que hacen que el ancho de banda existente sea siempre un recurso escaso.

La simplicidad de un nodo sensor obliga a una serie de limitaciones significativas que, además, caracterizan a este tipo de redes:

- El consumo de energía limita considerablemente el procesamiento y la comunicación.

- Los nodos sensores, como cualquier dispositivo de red, se pueden comunicar con sus nodos vecinos por cables, a través de enlaces de radio, o a través de cualquier otro sistema de comunicación. Sin embargo, las comunicaciones de los nodos sensores son, esencialmente, basadas en entornos inalámbricos, donde los problemas tradicionalmente asociados con estos canales, tales como las tasas de error o el *fading*, son críticos. Sin embargo, como las exigencias de ancho de banda asociadas a las WSN no son elevadas, en el orden de 1 a 100 Kbps, la elección de soluciones de acceso al medio de transmisión basadas en tiempo (TDMA) pueden ofrecer mejores niveles de ahorro de energía, cuando son comparadas con las soluciones basadas en acceso al medio por colisión (CSMA).

También es importante que se comprenda que la masificación de la utilización de las WSN todavía depende de un conjunto significativo de factores: [1]

- Los avances en la electrónica y en los procesos de miniaturización.
- Búsqueda de nuevos algoritmos y procesos para la utilización eficiente de la energía.
- Nuevos paradigmas de comunicación.
- Búsqueda de métodos de auto-configuración.
- Soporte de ambientes dinámicos.

Los proyectos actualmente existentes para la integración de TCP/IP en las redes de sensores no exploran todas las funcionalidades de IP y presentan diversas limitaciones: la pila de protocolos TCP/IP es demasiado compleja para las capacidades reducidas de procesamiento de los nodos sensores, y obliga a un consumo de energía crítico y prohibitivo.

Los usuarios esperan una convergencia de las infraestructuras con y sin cables, habilitando diferentes posibilidades de acceso: conectividad constante, acceso en movimiento, características uniformes de desempeño y transparencia IP. La actual generación de sistemas de comunicaciones - 4^a Generación, está basada en conceptos heterogéneos, manteniendo al protocolo IP como la única tecnología de integración. [3]

La integración de IP en las WSN ha suscitado acaloradas discusiones e interesantes estudios. Si, por un lado, los nodos sensores ofrecen reducidas capacidades de procesamiento y tienen un consumo de energía limitado, por otro, la integración de IP en las WSN ofrecerá un manantial de nuevas posibilidades. Dicho sea de paso, comienzan a aparecer soluciones innovadoras con una propuesta de protocolos similares a IP, pero con funcionalidades reducidas. Este "adelgazamiento" en el IP original pretende adaptarse, por lo tanto, a las limitaciones de las WSN.

La mayoría de las soluciones basadas en WSN ya se encuentran conectadas a Internet, esto se logra recurriendo a un *gateway* que conecta la red IP a la WSN y posibilita, por lo tanto, que un usuario pueda recurrir a un dispositivo IP para conocer el valor medido por un determinado nodo (Fig. 2).

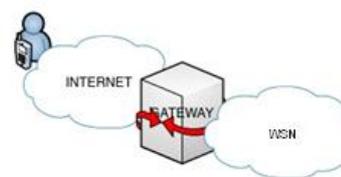


Figura 2–Conexión de una WSN a Internet.

En las WSN, la cabecera de IPv6 representaría un *overhead* excesivo (Fig. 3), si fuese utilizada en su formato original, pues, en la mayoría de situaciones, un nodo solamente desea transmitir a la estación de recolección unos pocos bits, correspondientes a los valores medidos por sus sensores.



Figura 3 – Cabecera IPv6. [3]

Según la propuesta de 6LoWPAN, las direcciones origen y destino de IPv6, que son de 128 bits cada una, son convertidas a 2 bits. Los campos *TrafficClass* y *FlowLabel* son convertidos en 1 bit cada uno, en cuanto al campo *NextHeader* se reduce a 2 bits (Fig. 4).

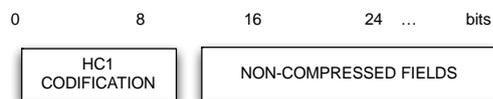


Figura 4 - Compresión de la cabecera IPv6.[3]

Sin embargo, los objetivos de 6LoWPAN no solo eran los de compresión para la interoperabilidad de IPv6 en las WSN. Fue también necesario el desarrollo de nuevos procesos para la gestión y la compatibilidad de las direcciones. Fue asimismo propuesto un conjunto de nuevos protocolos de enrutamiento y registro de nodos. Paralelamente, de cara a la creciente importancia de las WSN en la sociedad del siglo XXI, se han propuesto también soluciones para la seguridad y la privacidad.

La importancia del soporte de IPv6 en las WSN llevó a que, desde muy temprano, los sistemas operativos Contiki y TinyOS comenzaran a soportar el 6LoWPAN y otras funcionalidades de IPv6. Por ejemplo, algunos modelos proponen el uso de mecanismos de autoconfiguración de IPv6 en las WSN a gran escala, para evitar la configuración manual de los nodos. Los procesos de *Neighbor Discovery* y la movilidad nativa son otros ejemplos de funcionalidades que podrán ser optimizadas en las WSN.

3. MODELO PROPUESTO

Quito es la capital de Ecuador. Es una ciudad de cerca de 2.000.000 de habitantes que se extiende en un área de 290 Km². Quito está situada a 2.800 metros de altitud y tiene niveles considerables de contaminación debido al elevado parque automotriz y a la industria localizada en la periferia de la ciudad. [4]

Para la implementación de un sistema de monitorización de la calidad del aire fue necesario evaluar los parámetros ambientales que se deben medir, de acuerdo con la Ordenanza Metropolitana N° 146 del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. [5] Según estas directivas los valores

máximos permitidos de emisión de contaminantes al aire para fuentes fijas de combustión son los indicados en la tabla 2.

Tabla 2 - Valores ambientales máximos permitidos [5]

Contaminante emitido	Combustible utilizado	Unidades	Valores máximos
Partículas	Sólido	mg/Nm ³	200
	Bunker	mg/Nm ³	200
	Diesel	mg/Nm ³	150
	Gaseoso	no aplicable	no aplicable
Óxido de Nitrógeno	Sólido	mg/Nm ³	900
	Bunker	mg/Nm ³	700
	Diesel	mg/Nm ³	500
	Gaseoso	mg/Nm ³	140
Dióxido de Azufre	Sólido	mg/Nm ³	no aplicable
	Bunker	mg/Nm ³	1650
	Diesel	mg/Nm ³	1650
	Gaseoso	no aplicable	no aplicable
Monóxido de Carbono	Sólido	mg/Nm ³	1800
	Bunker	mg/Nm ³	300
	Diesel	mg/Nm ³	250
	Gaseoso	mg/Nm ³	100

Estos parámetros se consideran medidos en ambientes caracterizados con 1013 milibares de presión atmosférica, a una temperatura de 0°C, corregidos a 7% de Oxígeno, en base seca. Sin embargo, las concentraciones de contaminantes comunes que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia de la calidad de aire se presentan en la tabla 6 (al final del artículo).

Los sistemas tradicionales de monitoreo de la calidad del aire utilizan equipos grandes y caros. Los desafíos del proyecto descrito en este artículo se fundamentan en la demanda de un sistema de bajo costo, basado en WSN y utilizando el 6LoWPAN.

Antes de proceder a la implementación del sistema real, se desarrollaron varios prototipos, tanto en simulación como en plataformas de laboratorio, para evaluar las consecuencias de la utilización de soluciones 6LoWPAN y su comparación con soluciones tecnológicas alternativas.

4. EVALUACIÓN DEL MODELO PROPUESTO

Para evaluar el impacto de la utilización de 6LoWPAN en WSN y compararlo con IPv4 e IPv6, se recurrió al Network Simulator 2 (NS2). [6] El NS2 es un simulador gratuito y *open-source*, cuya riqueza de protocolos soportados resulta de la contribución de varios investigadores y profesionales.

En los estudios que se presentan a continuación se evalúa el impacto que las dos versiones de IP, IPv4 e IPv6, tienen en las WSN y se compara con la utilización de 6LoWPAN.

Para este trabajo se asume que la calidad del aire de una ciudad se mide utilizando los parámetros indicados en la tabla 3.

Tabla 3 – Parámetros a medir [5]

Parámetro	Número de bits utilizados para la medición y el envío
Monóxido de Carbono (CO)	8
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	8
Ozono (O ₃)	8
Hidrógeno (H ₂)	8
Metano (CH ₄)	8
Etanol e Isobutano	8
Amoniaco (NH ₃)	8
Sulfuro de Hidrógeno (SH ₂)	8
Tolueno	8

Es decir, son necesarios 72 bits para registrar y enviar esta información. Además se escogió un período de muestreo y envío de datos de una hora.

El siguiente estudio pretende comparar el envío de estos datos (72 bits) para diferentes escenarios de comunicaciones:

Escenario 1) IPv4 en redes GSM

Escenario 2) IPv6 en redes GSM

Escenario 3) IPv4 en redes con tecnología IEEE 802.11

Escenario 4) IPv6 en redes con tecnología IEEE 802.11

Escenario 5) IEEE 802.15.4

Escenario 6) IPv6 con 6LowPAN en redes de tecnología IEEE 802.15.4

Para los escenarios 3, 4, 5 y 6 se evalúa también las redes de comunicación con 2, 3 y 4 nodos intermedios (Fig. 5):



Figura 5 – Red de comunicación con nodos intermedios.

Se consideraron las siguientes velocidades de transmisión:

GSM: 9.6 Kbps

IEEE 802.11: 11 Mbps

IEEE 802.15.4: 250 Kbps

En el escenario IPv4GSM no fue considerado un *overhead* adicional porque el paradigma se basa en la conmutación de circuitos. El estudio de escenarios IPv4 fue directamente elaborado en NS2 original, sin recurrir a módulos adicionales. Para el estudio con IPv6 se consideró el exceso provocado por el tamaño de la cabecera IPv6, en comparación con la cabecera IPv4. Se asumió que tanto las cabeceras IPv4 como IPv6 no utilizaban ningún tipo de opciones o *extension headers*.

También se consideró que la distancia entre la *base station* y el nodo GSM es de 400 metros, y la distancia entre pares de

nodos Wi-Fi y entre los nodos IEEE 802.15.4 es de 100 metros.

Los resultados de la simulación para el envío de un bloque de datos de 72 bits, asumiendo la ausencia de interferencias y colisiones, se muestran en la tabla 4.

Tabla 4 - Tiempos de envío para los diferentes escenarios

Tipo de red	Tiempo de envío (s)
IPv4 GSM	0.480001
IPv6 GSM	1.066668
IPv4 IEEE 802.11, 2 nodos	0.000527
IPv4 IEEE 802.11, 3 nodos	0.001053
IPv4 IEEE 802.11, 4 nodos	0.501581
IPv6 IEEE 802.11, 2 nodos	0.001039
IPv6 IEEE 802.11, 3 nodos	0.001766
IPv6 IEEE 802.11, 4 nodos	0.502494
IEEE 802.15.4, 2 nodos	0.001760
IEEE 802.15.4, 3 nodos	0.003521
IEEE 802.15.4, 4 nodos	0.505281
IPv6, 6LowPAN, IEEE 802.15.4, 2 nodos	0.004064
IPv6, 6LowPAN, IEEE 802.15.4, 3 nodos	0.008129
IPv6, 6LowPAN, IEEE 802.15.4, 4 nodos	0.512193

En las comunicaciones IEEE 802.11 se asumió 34 bytes de *overhead* producido por la capa MAC y 114 bytes de *overhead* para la capa física con preámbulo corto.

Para las comunicaciones IEEE 802.15.4, se ha considerado un *overhead* de 46 bytes, 25 bytes para la capa física y 21 bytes necesarios para implementar la seguridad en la capa enlace de datos, utilizando AES-CCM-128.

Como se muestra en la tabla 4, los escenarios en los que el nodo con sensores para el monitoreo de la calidad del aire utiliza comunicaciones GSM son los que tienen tiempos de envío más elevados, tanto en IPv4 como en IPv6. Los otros escenarios tienen siempre valores inferiores a 0.6 segundos.

Sin embargo, para hacer una comparación justa entre las diferentes tecnologías, se asume que el nodo sensor que mide los parámetros ambientales se encuentra siempre a la misma distancia de la estación receptora, es decir a 400 metros. En el caso de los primeros escenarios que utilizan la tecnología GSM, la estación receptora se comunica directamente con la estación base. Para la tecnología IEEE 802.11 se consideró la existencia de un nodo intermedio. Para los escenarios basados en IEEE 802.15.4 se asumió la existencia de dos nodos intermedios. Los resultados comparativos se muestran en la Fig. 6.

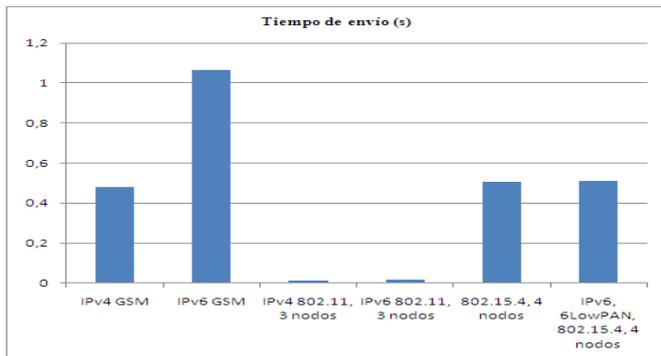


Figura 6 - Estudios comparativos

Como se muestra, las soluciones basadas en IEEE 802.11 son las que tienen menores tiempos de envío. Sin embargo, en un proyecto de ingeniería de esta naturaleza es necesario evaluar otros factores tales como el costo y la viabilidad técnica. Con respecto a este último factor, no existen fuentes de alimentación, en los lugares de medición de los parámetros ambientales, que permitan soportar módulos IEEE 802.11 para el envío de la información recolectada. Además, las soluciones de mercado basadas en las WSN con IEEE 802.11 todavía presentan consumos de energía prohibitivos.

A pesar que las soluciones GSM presentan los tiempos de envío más elevados, se podría optar por esta tecnología debido a que el período de muestreo y envío de los parámetros es de una hora (para cumplir con los criterios que se han descrito anteriormente). Sin embargo, el costo de los nodos sensores con soporte GSM es sustancialmente más alto y también presenta consumos de energía elevados, lo que provocaría una disminución abrupta del tiempo medio de vida de los nodos sensores. Por lo tanto, se decidió recurrir a la solución basada en la tecnología IEEE802.15.4 con dos nodos intermedios. Los mecanismos de la tecnología IEEE 802.15.4, incluyendo la capa MAC, permiten proporcionar ciclos de trabajo reducidos que aumentan el tiempo de vida medio de los nodos sensores.

Además se desarrolló un prototipo de laboratorio utilizando nodos sensores MicaZ y TelosB [7]. Para propósito de las evaluaciones se utilizaron placas MDA100CB con sensores de temperatura y luminosidad.

El prototipo de laboratorio implementado se muestra en las Figs. 7a) y 7b).

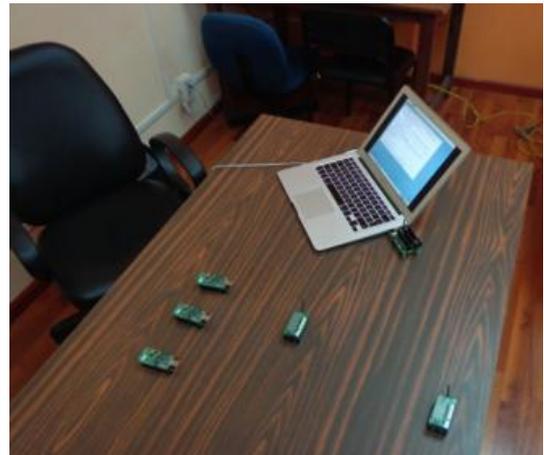


Figura 7 a - Prototipo de laboratorio.



Figura 7b - Prototipo de laboratorio.

Para la implementación de 6LowPAN se utilizó el módulo blip de TinyOS. Las siguientes figuras muestran el arranque de *lip-driver* (Fig. 8a) y el resultado del comando *ifconfig* (Fig. 8b), mostrando el túnel creado.

```

Terminal
File Edit View Search Terminal Help
-driver ip_driver-serial_tun.o ip_driver-tun_dev.o ip_driver-hashtable.o ip_driv
er-routing.o ip_driver-nwstate.o ip_driver-logging.o ip_driver-config.o ip_driv
er-radvd-wrapper.o ip_driver-vty.o ip_driver-vty-util.o ip_driver-netlink.o ip_dr
iver-mcast.o ip_driver-log.o ip_driver-socket.o ip_driver-recv.o ip_driver-util.
o ip_driver-timer.o ip_driver-send.o ip_driver-process.o ip_driver-interface.o i
p_driver-device.o ip_driver-device-common.o ../lib6lowpan/lib6lowpan.a /opt/tiny
os-2.1.1/support/sdk/c/sf/libmote.a
make[2]: Leaving directory /opt/tinyos-2.1.1/support/sdk/c/blip/driver'
make[2]: Entering directory /opt/tinyos-2.1.1/support/sdk/c/blip'
make[2]: Leaving directory /opt/tinyos-2.1.1/support/sdk/c/blip'
make[1]: Leaving directory /opt/tinyos-2.1.1/support/sdk/c/blip'
rnsilva@TECRAMINT /opt/tinyos-2.1.1/support/sdk/c/blip $ sudo driver/ip-driver /
dev/ttyUSB1 micaz
[sudo] password for rnsilva:
2012-12-12T18:02:56.505WET: INFO: Read config from 'serial_tun.conf'
2012-12-12T18:02:56.505WET: INFO: Using channel 15
2012-12-12T18:02:56.505WET: INFO: Retries: 5
2012-12-12T18:02:56.527WET: INFO: telnet console server running on port 6106
2012-12-12T18:02:56.639WET: INFO: created tun device: tun0
2012-12-12T18:02:58.770WET: INFO: interface device successfully initialized
2012-12-12T18:02:58.770WET: INFO: starting radvd on device tun0
2012-12-12T18:02:59.579WET: INFO: Starting to proxy for 0x1
    
```

Figura 8a - Utilización de 6LowPAN blip.

```

Terminal
File Edit View Search Terminal Help
TX packets:17613 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
collisions:0 txqueuelen:1000
RX bytes:15063633 (15.0 MB) TX bytes:3149863 (3.1 MB)

lo
Link encap:Local Loopback
inet addr:127.0.0.1 Mask:255.0.0.0
inet6 addr: ::1/128 Scope:Host
UP LOOPBACK RUNNING MTU:16436 Metric:1
RX packets:6923 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
TX packets:6923 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
collisions:0 txqueuelen:0
RX bytes:695819 (695.8 KB) TX bytes:695819 (695.8 KB)

tun0
Link encap:UNSPEC HWaddr 00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00
inet6 addr: fe80::64/128 Scope:Link
inet6 addr: fec0::64/128 Scope:Site
UP POINTOPOINT RUNNING NOARP MULTICAST MTU:1280 Metric:1
RX packets:47 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
TX packets:46 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
collisions:0 txqueuelen:500
RX bytes:3424 (3.4 KB) TX bytes:4592 (4.5 KB)
    
```

Figura8b - Utilización de 6LowPAN blip.

Como se puede observar, se crea un túnel con los prefijos IPv6 de *link-local* fe80::64/128 y la dirección IPv6 global fec0::64/128. Por lo general, los nodos pueden ser configurados con estos prefijos de red, usando sus propios ID como sufijos, tal como se define en 6LoWPAN. Por ejemplo, al nodo lse podrá acceder a través de la dirección IPv6 fec0::1.

Se efectuaron pruebas adicionales para evaluar la solución 6LoWPAN y así complementar los estudios de simulación efectuados.

Para la plataforma utilizada en este estudio se utilizó dos nodos sensores MicaZ, (un nodo receptor que funciona como *base station* y que se encuentra conectado a la placa MDA100CB, que a su vez está conectada al PC vía USB), y un nodo sensor destino que disponía de la aplicación *Ping*. Fue necesario establecer un túnel en el PC para el enrutamiento de paquetes IPv6 a través de una interfaz virtual del PC y la interfaz serial del nodo sensor.

El nodo receptor, *base station*, fue programado con la aplicación *BaseStationCC2420* que forma parte del sistema operativo TinyOS. Esta aplicación permite que todos los mensajes recibidos a través de la interfaz radio sean encaminadas para la interfaz serial, siendo de esta forma posible el redireccionamiento de paquetes para el PC. Dado que el transporte de los paquetes IPv6 fue realizado usando IEEE 802.15.4, existieron algunas limitaciones que tuvieron que ser superadas.

Las redes basadas en IEEE 802.15.4 solo consiguen transportar paquetes cuyo *MaximumTransmissionUnit* (MTU) es de 127 bytes. Puesto que la cabecera IEEE 802.15.4 (correspondiente al tamaño máximo de las sub-capas PHY y MAC) es de 25 bytes, debemos incrementar el tamaño del paquete, que el TinyOS define por defecto de 28 bytes, a 102 bytes, aprovechando así toda la carga para capas superiores. Para proceder a esta alteración a nivel de programa, fue necesario añadir en el fichero *Makefile* de la aplicación *BaseStationCC2420* la siguiente información: `CFLAGS += -DTOSH_FECHA_LENGTH=102`.

El nodo sensor de destino dispone de la aplicación *Ping* que forma parte del paquete 6LoWPAN. Esta aplicación fue

responsable del envío de respuestas a pedidos ICMPv6. El nodo de destino fue configurado con una dirección IPv6.

El túnel IPv6, desarrollado en C, se encuentra en el paquete del proyecto 6LoWPAN y permitió el enrutamiento de paquetes en la red creada.

Para hacer uso de la pila de protocolos de 6LoWPAN fueron generados 500 paquetes ICMPv6 a partir del computador donde está activo el túnel, teniendo como destino el nodo sensor que posee la aplicación *Ping*. A través del comando *ping6* y usando las flags `-s <tamaño_paquete_a_enviar>` y `-i <intervalo_entre_paquetes_ms>` se realizaron pruebas incrementando sucesivamente el tamaño del paquete a enviar (desde 16 bytes hasta 208 bytes).

El uso del parámetro `-i` con el valor 2 permitió tener la garantía de que exista realmente tiempo para el intercambio de paquetes.

Las Figs. 9 y 10 permiten analizar el comportamiento de la red ante el incremento en el tamaño de los paquetes. De una forma general, al analizar los gráficos, se verificó que existe un punto crítico a partir del envío de paquetes con tamaño superior a 64 bytes.

La Fig. 9 presenta las variaciones registradas en el tiempo de envío y la respectiva respuesta ICMP (RTT). Las variaciones del RTT son obtenidas calculando el *mean deviation* - mdev. Los desvíos son bastante significativos cuando se envían paquetes con tamaños inferiores o iguales a 48 bytes y superiores a 64 bytes. Para 48 bytes el campo mdev del *ping* registra un valor de aproximadamente 6ms, mientras que para 64 bytes el valor del mdev es de 860 ms.

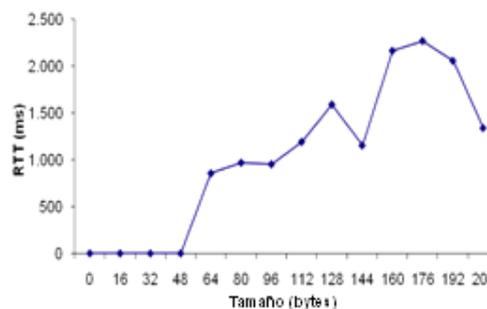


Figura 9 - Tiempo de envío 1

En la Fig. 10 se presenta el tiempo mínimo necesario entre un pedido ICMP y la respuesta respectiva. Se observa que cuando un paquete no necesita ser fragmentado tarda un promedio de 52 ms. A partir de los 64 bytes, y una vez que 6LoWPAN procede a la fragmentación, el valor aumenta al doble. Para un paquete con un tamaño de 208 bytes son necesarios aproximadamente 200 ms.

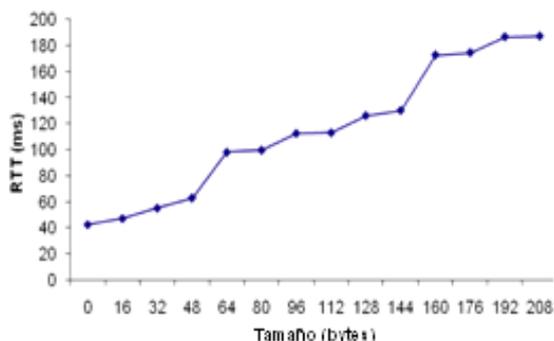


Figura 10 - Tiempo de envío 2

El aumento significativo del tiempo, está asociado al hecho que la tecnología IEEE802.15.4 únicamente soporta el envío de máximo 127 bytes por cada paquete. Puesto que la cabecera IEEE 802.15.4 utiliza 25 bytes (PHY+MAC), la cabecera IPv6, 40 bytes y la cabecera ICMPv6, 4 bytes, solo quedan 58 bytes para el transporte de información. Al enviar un paquete con más de 58 bytes de información, se fuerza a que la pila de protocolos 6LoWPAN proceda a la fragmentación, creando más de un paquete.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Las WSN son una tecnología con un gran potencial. Su integración con Internet y los protocolos TCP/IP, amplían su ámbito de aplicación, pero aún se requiere de un trabajo de integración significativa.

El uso del protocolo IP en redes de sensores ciertamente tiene buenas perspectivas, pues permite la interoperabilidad con otras redes ya existentes. De esta forma, un nodo podrá ser alcanzado desde cualquier lugar, dejando de ser un dispositivo aislado, y también podrá realizar algunas tareas que serían imposibles para otros dispositivos. Además, los mecanismos de autenticidad, integridad y confidencialidad de los datos transmitidos por las WSN pueden ser desarrollados más fácilmente cuando están dotadas del protocolo IPv6.

Del trabajo de investigación realizado se puede concluir que, tomando en cuenta el parámetro retardo, la mejor tecnología de comunicación entre los nodos es el estándar IEEE 802.11; sin embargo, debido al elevado costo y consumo de energía se decidió hacer la comunicación utilizando el estándar IEEE

802.15.4, el cual es adecuado para el volumen de datos y la periodicidad con la que se transmiten los mismos.

Como trabajos futuros se propone desarrollar un prototipo real con equipos Libellium [8], cuyas características ya han sido determinadas, y posteriormente realizar una implementación real con una mayor cantidad de nodos, para de esa manera poder alcanzar el objetivo de medir la calidad del aire, en lugares específicos de la ciudad de Quito.

También se deberá implementar un sistema de gestión y control de las baterías de los nodos sensores. Uno de los problemas críticos es el consumo de energía, lo que provoca la necesidad de cambiar con frecuencia la batería de los nodos. De esta forma se pretende conseguir un sistema que, de manera automatizada, informe al administrador el nivel de la batería de cada nodo y alerte cuando se necesite cambiar las baterías.

Otra preocupación del grupo de investigadores del proyecto es la necesidad periódica de calibración de los sensores. Este tópico también deberá ser estudiado en trabajos futuros.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la SENESCYT - Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de Ecuador.

REFERENCIAS

- [1] Akyildiz, I. F., and Kasimoglu, I. H., "Wireless Sensor and Actor Networks: Research Challenges," *Ad Hoc Networks Journal* (Elsevier), vol. 2, pp. 351-367, October 2004.
- [2] G. Montenegro, N. Kushalnagar, J. Hui, D. Culler, "Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks", RFC 4944, September 2007
- [3] Jonathan Hui, David Culler, Samita Chakrabarti, IP Infusion, "6LoWPAN: Incorporating IEEE 802.15.4 into the IP architecture", Internet Protocol for Smart Objects (IPSO) Alliance White paper # 3, January 2009
- [4] Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Quito_\(canton\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Quito_(canton))
- [5] Norma técnica para emisiones a la atmósfera de fuentes fijas de combustión. DMQ. Libro VI de Texto Unificado de Legislación Secundaria, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.
- [6] Network Simulator 2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [7] Memsic, <http://www.memsic.com>
- [8] Libellium, <http://www.libellium.com>
- [9] Gobierno de la República del Ecuador, Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULAS), D.E. 3516, 31-03-2003.

Tabla 6 - Concentración de contaminantes comunes que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire [9]

Contaminante y periodo de tiempo	Alerta	Alarma	Emergencia
Monóxido de Carbono Concentración promedio en ocho horas	15000	30000	40000
Oxidantes fotoquímicos, expresados como ozono Concentración promedio en una hora	300	600	800
Óxidos de Nitrógeno, como NO ₂ Concentración promedio en una hora	1200	2300	3000
Dióxido de Azufre Concentración promedio en veinticuatro horas	800	1600	2100
Material particulado PM10 Concentración en veinticuatro horas	250	400	500

Nota: Todos los valores de concentración expresados en microgramos por metro cúbico de aire, a condiciones de 25°C y 760 mm Hg.