

Wireless surveillance system for greenhouse crops Sistema inalámbrico de monitorización para cultivos en invernadero

Alejandro Cama-Pinto ^a, Francisco Gil-Montoya ^b, Julio Gómez-López ^c, Amos García-Cruz ^d
& Francisco Manzano-Agugliaro ^e

^a Ingeniero de telecomunicaciones. Universidad de la Costa. Barranquilla-Colombia. Facultad de Ingeniería. acama1@cuc.edu.co

^b Doctor. Profesor del dpto. de Ingeniería, Universidad de Almería. España pagilm@ual.es

^c Doctor Ingeniero Informático. Universidad de Almería. España jgomez@ual.es

^d Doctor Profesor del dpto. de Ingeniería, Universidad de Almería. España amos@ual.es

^e Doctor Profesor del dpto. de Ingeniería, Universidad de Almería. España fmanzano@ual.es

Received: February 7th, 2013. Received in revised form: August 20th, 2013. Accepted: November 4th, 2013

Abstract:

The agriculture in the southeast Spain has experimented important changes in the last years due to the greenhouse crops. In this kind of crops is very important the use of advanced techniques and new technologies to improve the crop efficiency. This work presents an advanced system to monitor the variables applied on greenhouse crops. The monitoring system uses a wireless sensor network (WSN) that works with 6LoWPAN and RPL as the routing protocol. It measures humidity, temperature, light, and volumetric water content in the soil. The WSN sends the recollected data to an embedded device which stores the information on a data base, so it is possible to visualize in real time the values obtained of crops as a graphic. The developed system allows installation flexibility and adaptation to any greenhouse. Because it is based on: Wireless technology, nodes can establish links automatically, and have implemented a function for saving energy which can extend the life of the batteries enough for a crop year without maintenance.

Keywords: Wireless Sensor Network, greenhouse, surveillance, 6LoWPAN.

Resumen

La agricultura del sureste español ha experimentado uno de los cambios más importantes que se han producido en los últimos años gracias a los cultivos de invernadero. En este tipo de cultivos es muy importante la utilización de técnicas avanzadas y tecnologías novedosas para mejorar el rendimiento de los cultivos. Este trabajo presenta un sistema avanzado para la monitorización de variables aplicadas a la agricultura intensiva. El sistema usa una red de sensores inalámbricos (WSN) que funciona con 6LoWPAN y RPL como el protocolo de enrutamiento, mide humedad, temperatura, luz y el contenido volumétrico de agua en el suelo. La WSN envía los datos recolectados a un dispositivo embebido que almacena la información en una base de datos a fin de visualizar de forma gráfica y en tiempo real los valores obtenidos en los cultivos. El sistema desarrollado permite una gran flexibilidad de instalación y de adaptación a cualquier invernadero, ya que se basa en tecnología inalámbrica, que los nodos pueden establecer las rutas de los enlaces entre ellos automáticamente, y tienen implementada una función de ahorro de energía que le permite alargar la vida útil de las baterías lo suficiente para una campaña agrícola sin necesidad de mantenimiento.

Palabras clave: Red de Sensores inalámbricos, Invernaderos, monitorización, 6LoWPAN.

1. Introducción

El Mediterráneo es el segundo lugar a nivel mundial en superficie total de invernaderos tras China [1]. En España el 70% están concentrados en el sureste peninsular, siendo Almería la provincia que presenta la mayor concentración de estos con aproximadamente 37500 ha [2]. A pesar de ser uno de los lugares más secos de Europa [3,4] es a la vez una de las regiones agrícolas más productivas del continente. Uno de los principales retos actuales de los invernaderos es el control del clima para lograr mayor eficacia en el aprovechamiento de los recursos hídricos [5]. Destaca de manera muy significativa el coste del agua y de la energía

eléctrica asociada, debido al bombeo que se realiza para obtener la presión necesaria en el riego por goteo [6].

De forma general, el control de irrigación se realiza con simples temporizadores configurados por los propios agricultores y según su propia experiencia. Lo habitual son sistemas avanzados que programan ciclos de irrigación teniendo en cuenta únicamente el tiempo, sin información de posibles sensores de humedad.

Aunque estos métodos intuitivos para la programación de la irrigación pueden dar buenos resultados con la experiencia, tienden a ser muy subjetivos con diferentes operadores. Por otro lado, esta práctica se ve reforzada debido a que los costes de irrigación han sido bajos respecto

al total de los costes de producción. Por consiguiente, la cantidad de agua aplicada se decide en base a la disponibilidad, más que a las necesidades reales del cultivo [7]. Otros factores que no se tienen en cuenta son la calidad del agua y la disponibilidad de la misma en el suelo. Por todo ello se hace necesario plantear un sistema de monitorización que permita recoger estas variables y ofrecerlas al usuario en tiempo real y a zonas alejadas del invernadero, por ejemplo vía Web. Hasta ahora los sistemas de monitorización existentes en invernadero se basaban en sistemas cableados [8], lo cual los hace engorrosos de instalar y caros de mantener, además están limitados a estar siempre en el mismo sitio.

En los últimos años se han propuesto aplicaciones de monitorización en diversos sectores como la salud [9], la industria [10], o la preservación de espacios naturales como el Amazonas [11]. También se ha visto que las redes de sensores inalámbricos (WSN – Wireless Sensor Network) pueden jugar un papel muy importante en la monitorización de los invernaderos [12]. Con la tecnología inalámbrica se proporciona flexibilidad en la instalación de los sensores, robustez en la red, mientras que se reduce el coste y la complejidad de su mantenimiento.

El objetivo principal del presente trabajo es desarrollar y desplegar un sistema de monitorización avanzado utilizando la tecnología WSN para el entorno agrícola y en ambiente agresivo como el del invernadero, que ayude al agricultor a la toma de decisiones para mejorar el rendimiento del cultivo.

Los objetivos específicos son:

- Diseñar una red de sensores inalámbricos para monitorizar en invernadero: humedad, temperatura, luz y contenido volumétrico de agua del suelo.
- Diseñar un sistema que permita la recolección de los datos de la red de sensores, los almacene en una base de datos y permita mostrarlos a través de una interfaz Web.
- Evaluar el rendimiento de la WSN.

2. Materiales y métodos

2.1. Variables agronómicas estudiadas

Para mejorar la productividad de los cultivos de invernadero es fundamental tener información sobre las variables agronómicas del ambiente y del suelo [13].

2.1.1. Parámetros del ambiente

Los parámetros del ambiente que se van a controlar son los siguientes:

- Humedad relativa y temperatura. La humedad relativa indica que porcentaje de la máxima cantidad de humedad está presente en el ambiente. La humedad relativa que necesitan cultivos de invernadero para la fotosíntesis se sitúa entre el 60% y 85%, y no debería de ser menor de 40% ni mayor de 90%. Como los invernaderos son ambientes bastante cerrados, se debe prestar especial atención a las estaciones frías del año

porque la humedad relativa suele aumentar con frecuencia al 90% y 100% a raíz de que se evita el intercambio de aire con el exterior para preservar el calor [14, 15].

- Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR). En diversos cultivos la insuficiencia de luz limita el crecimiento. Esto motiva que a veces para mantener el ritmo de crecimiento de los cultivos, los agricultores proporcionen una iluminación suplementaria con objeto de incrementar el total de la PAR diaria. La sumatoria de luz total recibida en un día se le denominada Luz Integral Diaria (DLI). Así, incrementando el DLI se puede aumentar la tasa de crecimiento de las especies adaptadas al sol, reduciendo el tiempo necesario para entrar en producción un cultivo. Esta práctica contribuye a la rentabilidad pues un factor clave en el precio de los productos hortícolas es su precocidad [16].

2.1.2. Parámetros del suelo

El agua es uno de los elementos indispensables a controlar para el adecuado crecimiento y mantenimiento del cultivo. El estudio del contenido volumétrico de agua en el suelo (VWC) indica cuánta agua está presente en el sustrato. De acuerdo al análisis gravimétrico puede ser expresado como: Masa de agua dividido por la Masa del material sólido.

2.2. Redes de sensores

La red de sensores inalámbricos (WSN) está compuesta por varios dispositivos llamados nodos sensores que son capaces de medir cambios en el ambiente, almacenando los datos y transmitiéndolos al nodo vecino a través de redes multi-salto (protocolo RPL o routing protocol). Para finalmente ser mostrados en una interfaz gráfica al usuario, por ejemplo vía Web.

Algunos de los grandes proyectos de monitorización de variables agronómicas como son COMMON-Sense [17] o Sensorscope [18], son proyectos que emplean los estándares 802.15.4 para la WSN, y 802.11 para (WiFi). Dada que la tendencia mundial es trabajar con direcciones IP, en lo denominado Internet de las cosas (IoT) donde los objetos (en nuestro caso los sensores) tienen funcionalidad digital y pueden ser identificados y rastreados automáticamente [19]. Cualquier contribución en el avance de IoT tiene que ser el resultado de las actividades sinérgicas realizadas en diferentes campos del conocimiento, como las telecomunicaciones, la informática y la electrónica [20].

Nuestro estudio para estar a la vanguardia tecnológica y en consonancia con la IoT, emplea 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) en WSN, que dota de direcciones IP a los nodos sensores. Esta tecnología ha demostrado su utilidad también en aplicaciones ambientales a larga distancia [11].

3. Diseño del sistema

El sistema está compuesto por tres elementos (figura 1): a) los sensores que leen la información ambiental, b) enlace que transporta los datos desde el nodo sumidero al servidor; y c) el servidor que recibe, almacena y muestra los datos.

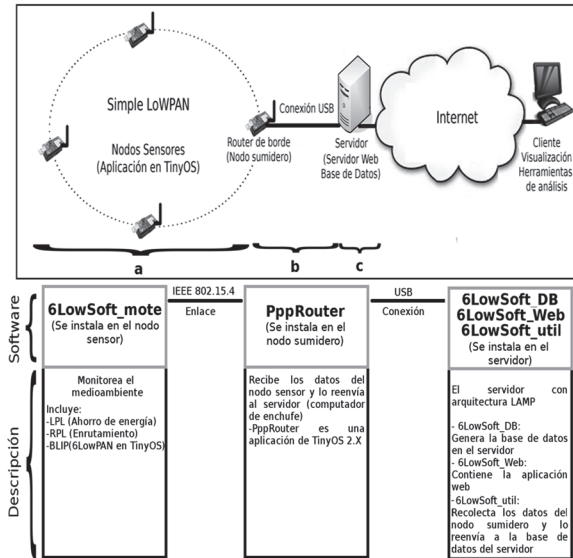


Figura 1. Arquitectura propuesta.

3.1. Sensores

Los sensores son los encargados de recolectar los valores de las variables ambientales y del suelo de la zona de cultivo, y transportarlos hasta el nodo sumidero. Se emplean los sensores integrados en los nodos inalámbricos y sensores externos de suelo que se acoplan a los nodos. Están basados en LoWPAN (Low-Power Wireless Personal Area Networks), que es un conjunto de nodos 6LoWPAN que comparten en común un prefijo de dirección IPv6. De los tres tipos de LoWPANs que hay, nuestro estudio está enfocado al llamado "Simple LoWPAN" [21].

3.2. Red de sensores

La WSN está formada por los nodos sensores que envían la información recolectada al nodo sumidero (multipoint-to-point) que cumple también la función de router de borde.

Si los nodos están alejados del nodo sumidero a una distancia mayor de 320 m [22] es necesario realizar multi-saltos y para este fin se utiliza el protocolo de enrutamiento RPL.

3.3. El servidor

El servidor se encarga de almacenar en una base de datos la información recolectada por la WSN para poder mostrarla a los clientes, a través de la Web, de una forma cómoda y sencilla.

4. Descripción del hardware

La elección del hardware está basada en trabajos previos donde las condiciones ambientales son muy exigentes, como es el caso de la amazonia [11]. En nuestro presenta también condiciones de elevada humedad y temperatura, como es el caso del microclima de un invernadero. A continuación se describe el hardware utilizado en el sistema.

4.1. Nodo TelosB

Para el despliegue de la WSN se han empleado nodos de diseño de código abierto basadas en la plataforma "TelosB" con antenas de 5 dBi de ganancia.

Estas se encargan de la recolección y transporte de los datos del suelo, así mismo tienen integrados sensores de humedad, temperatura y dos de luz para medir la radiación fotosintéticamente activa y la radiación solar total. Para leer la salida analógica del sensor de suelo se necesita una resolución mínima de 12 bits, siendo éste uno de los motivos por el cual se emplea el nodo TelosB. El tiempo de muestreo que se utiliza es de 5 minutos.

4.2. Sensor de suelo

Entre los sensores de humedad de suelo más utilizados y estudiados actualmente se encuentran los fabricados por la empresa Decagon. Cuenta con varios modelos (EC-5, EC-10 y EC-20) cuya principal diferencia es el tamaño del sensor del suelo. Se utiliza el modelo EC-20 principalmente por su bajo consumo de energía que es alrededor de 2mA a 2.5V. Aspecto relevante cuando trabaja en conjunto con la WSN pues se comunica y alimenta directamente del nodo, de ese modo al tener un menor consumo de energía permite un mayor tiempo de vida de la batería del nodo.

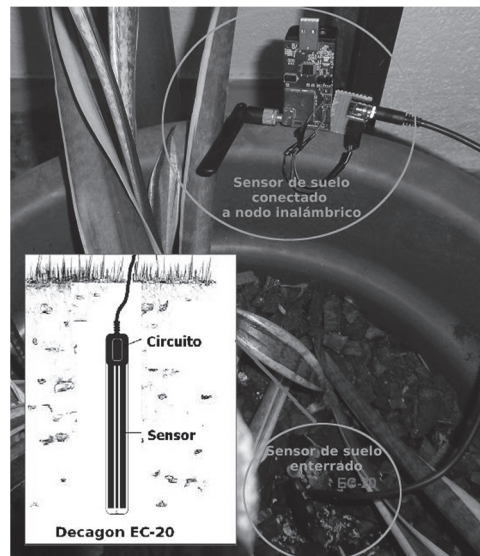


Figura 2. El sensor de suelo conectado a uno de los nodos de la WSN.

El sensor de suelo Decagon EC-20 mide el contenido volumétrico de agua y se conecta con los conectores de expansión de 6 y 10 pines del nodo. El hilo de tierra del

sensor de suelo se conecta con el pin de tierra del nodo, el de excitación con el pin GIO y su salida analógica con el pin ADC (figura 2). Dado que el sensor de suelo tiene un conector de audio, se utiliza un jack de audio como interfaz para la interconexión entre el sensor de suelo y el nodo.

4.3. Servidor

Aunque se puede emplear cualquier equipo que cumpla la función de servidor, se ha optado por un equipo con arquitectura embebida por tener más portabilidad, una mejor integración en el invernadero y un mayor ahorro de energía. Se emplea la "computadora de enchufe" Sheevaplug (figura 3) que opera con un procesador ARM de 1,2 GHz y un sistema GNU/Linux embebido (Debian 6.0).

Inicialmente el Sheevaplug tiene una memoria interna de 512 MB, pero para aumentar la capacidad de almacenamiento de la Base de Datos se utiliza una tarjeta SD de 8GB.

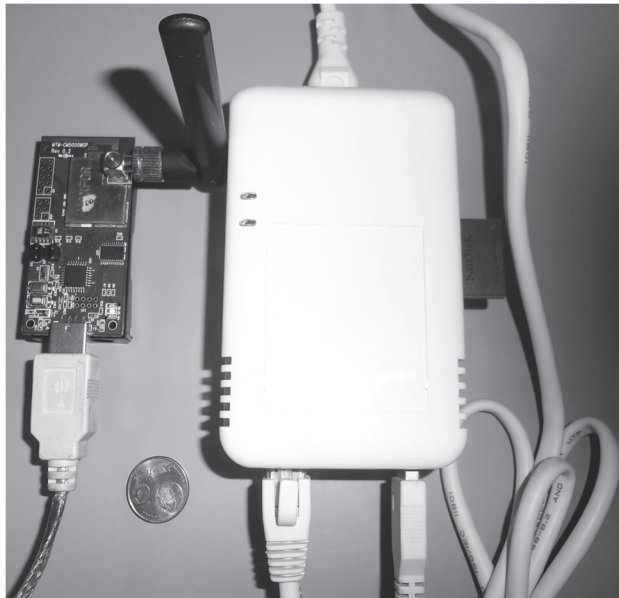


Figura 3. Servidor "Sheevaplug (a modo de comparación se muestra una moneda de 5 céntimos de euro).

5. Descripción del software

5.1. Implementación en TinyOS

Los nodos utilizan el sistema operativo de código abierto TinyOS [23] por ser uno de los más difundidos y con mayor documentación. Utiliza la pila de protocolos 6LoWPAN implementada por TinyOS denominada BLIP en todos los nodos de la red [24, 25]. A cada uno de ellos se le asigna una dirección IPv6, y la comunicación se realiza por enlaces de un sólo salto, o multi-saltos si la cobertura inalámbrica se encuentra fuera de su alcance.

5.1.1. El nodo Sumidero

El nodo sumidero tiene instalado la aplicación PppRouter que le permite actuar como un router de borde

pues hace que una de sus interfaces se comuniquen por el enlace serie con el servidor y la otra con la WSN.

5.1.2. Los Nodos Sensores

La aplicación desarrollada (6LoWSof) se instala en los nodos sensores. Se basa en el proyecto [26], en la aplicación [27] y está programada para obtener los valores del sensor de suelo externo Decagon EC-20 y de los sensores integrados en los nodos.

La comunicación entre los datos de humedad recogidos por el sensor de suelo y el nodo se lleva a cabo a través del componente Msp430Adc12ClientC y su correspondiente interfaz. Así, por ejemplo, se establece en el código fuente al pin ADC0, para que reciba los datos de la salida analógica del sensor de suelo.

De acuerdo con la hoja de datos del sensor de suelo, este trabaja correctamente mientras el voltaje de la batería supere los 2.0 V. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el voltaje mínimo necesario del nodo para que opere correctamente su radio es de 2.1 V.

5.1.3. Ahorro de energía

El ahorro de energía es una variable importante en cualquier dispositivo [28], y más aun si el dispositivo funciona con baterías pues se reduce el mantenimiento. Para controlar el ciclo de trabajo en las radios de los nodos se añade la función LPL (Low Power Listening) [29] en todos los nodos. De esta manera se consigue mayor tiempo en la autonomía de las baterías. Esto se debe a que el mayor consumo de energía de los nodos se produce cuando la radio está operando, y es de 17.4 mA ó 19.7 mA en la transmisión y recepción respectivamente. Con LPL, un nodo enciende su radio el tiempo suficiente para detectar una portadora en el canal. Si detecta la señal portadora mantiene la radio encendida durante el tiempo que se recibe un paquete. En LPL el parámetro sleep_interval se configura como el intervalo de tiempo que la radio duerme hasta que se enciende para detectar la portadora, y está dado en ms.

5.1.4. Enrutamiento

Por tratarse de una red que puede trabajar con enlaces multi-saltos se emplea para el enrutamiento el protocolo RPL [30] (IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks). El prototipo de implementación en TinyOS 2.x es denominada TinyRPL [24]. Las pruebas realizadas muestran que tiene un funcionamiento comparable con CTP (Collection Tree Protocol) el protocolo de enrutamiento de facto de TinyOS [25].

TinyRPL encuentra las rutas de forma automática sin la necesidad de crearlas manualmente. Esto le da un enfoque realista al momento de implementarlo en cualquier invernadero, ya que no importa la posición de los nodos (siempre que cuenten con visibilidad entre ellos). Así el proyecto se puede replicar en cualquier campo agrícola sin tener en cuenta la distribución de la WSN.

5.2. La aplicación web

La aplicación Web se ha dividido en cuatro secciones: Home, Valores, Gráficas y GraficaRT.

En la sección "Home" se muestra una breve descripción del proyecto con algunas imágenes y esquemas del mismo. En la sección "Valores" (figura 4) se muestran los datos en tablas mientras que en la sección "Gráficas" se muestran los datos gráficamente (figura 5).

Graphics - Sensor Values

date	wsm	sequence_no	sender_id	temperature	humidity	voltage	TSR	PAR
2011-08-23 00:32:53	1	26	8	30.67	37	2.999	626.221	8.423
2011-08-23 00:32:58	1	27	8	30.63	37	2.999	593.262	6.592
2011-08-23 00:33:03	1	28	8	30.60	37	2.999	563.965	6.226

Figura 4. Ejemplo de valores registrados dentro de un período de tiempo especificado por el usuario.

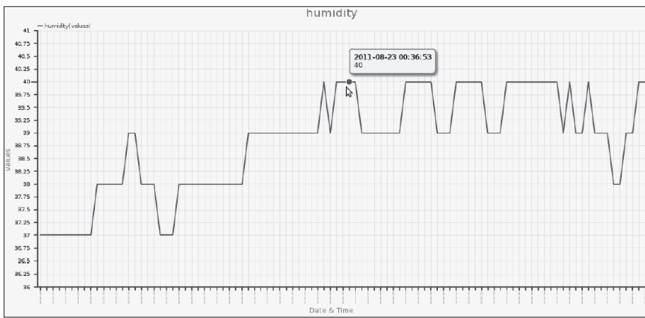


Figura 5. Gráfica de los valores de humedad dentro de un período de tiempo especificado por el usuario.

En ambos casos primero se indica el ID del nodo, la variable ambiental que desea analizar (temperatura, humedad ambiente, voltaje, PAR o VWC). Para la visualización de los datos es posible especificar un intervalo de tiempo a través de dos calendarios y horarios. De manera similar, la sección "GraficaRT" (figura 6) muestra en tiempo real los valores obtenidos por un sensor para una determinada variable.

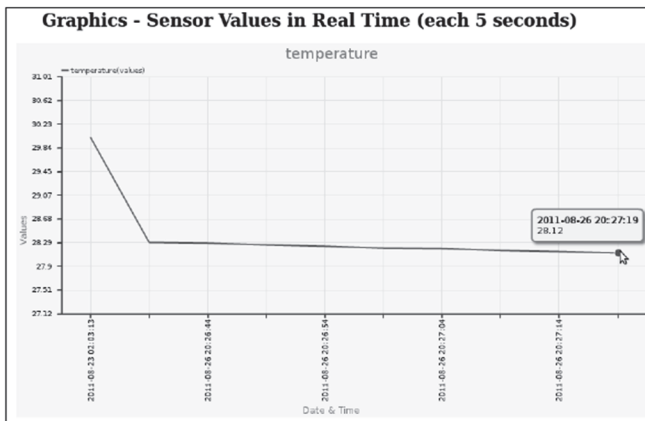


Figura 6. Gráfica actualizándose con la llegada de los valores de temperatura.

5.3. El servidor

El servidor trabaja con la estructura LAMP (Linux, Apache, MySQL y PHP como lenguaje de programación Web). Este almacena la información procedente de los sensores de la red en una base de datos y exhibe los datos a través de páginas web dinámicas desarrolladas en PHP que muestra los valores obtenidos de una manera fácil y cómoda a los usuarios a través de Internet.

Los datos que se envían desde el nodo sumidero al servidor se reciben a través de un socket UDP (User Data Protocol). Un script recoge los datos en bruto y los convierte a sus respectivas unidades de medida (por ejemplo, la temperatura se guarda en grados centígrados).

Para la generación de gráficos se utiliza Open Flash Chart que es una herramienta de gráficos basada en Flash, personalizable y basado en código abierto. Se utiliza para mostrar los valores almacenados en la base de datos en forma de gráficos estadísticos facilitando su comprensión. Por ejemplo, permitiendo ver las fechas de las muestras a lo largo de toda la gráfica mientras mueve el ratón sobre ellos. Así mismo se utiliza Ajax para dar un mayor dinamismo a la web y mostrar los datos en tiempo real. Por último, se ha creado un script que se inicia automáticamente, y que se comunica con el nodo sumidero y almacena la información de la WSN en la base de datos.

6. RESULTADOS

Dado que unos de los objetivos de diseño del sistema era que fuese autónomo durante el mayor tiempo posible. Así, se facilita la puesta en funcionamiento en invernaderos, con un mantenimiento lo más bajo posible.

Las pruebas de duración de las baterías sin LPL, fueron de 4.5 días para Alcalinas y de 6.5 días para las de Litio [11], ya que las radios están en modo de escucha el 100 % del tiempo. Para este trabajo se ha evaluado como reducir el consumo de energía de los nodos mediante la función LPL en función del intervalo de latencia o sleep_interval. La Tabla 1 muestra la duración en días, variando el sleep_interval de 512 a 2048 ms. Se observa que el rango de días útiles está entre los 75 y 625 días dependiendo de este parámetro y del tipo de batería empleada.

Tabla 1. Duración (días) en función del tipo de baterías e intervalo de latencia (Sleep interval).

Sleep_interval (ms)	Duración (días)	
	2 Alcalina (Duracell MN1500)	2 Litio (Energizer L91)
512	75	156
1024	145	312
2048	291	625

Pero los valores obtenidos pueden variar en función de los saltos que deban realizarse. Por ello se han analizado los datos durante una hora, para un único salto (Tabla 2), y con sensores a una distancia de 100 y de 200 m. En ambos casos se han obtenido un rendimiento óptimo del sistema teniendo una latencia media de 70.51 ms y una tasa de recepción del paquete (PRR) del 99.67% para ambas configuraciones.

Tabla 2.
Rendimiento de TinyRPL en 1 salto.

	Distancia (m)	
	100	200
Latencia (ms)	69.34	71.68
PRR (%)	99.67	99.67

Para enlaces multi-salto, con cada salto de 50 m. Los resultados obtenidos muestran también un comportamiento estable del sistema (véase la Tabla 3)

Tabla 3.
Rendimiento de TinyRPL en función del número de saltos y 50 m de distancia de enlace.

	Nº de saltos		
	1	2	3
Latencia (ms)	70.38	110.29	178.44
PRR (%)	99.52	99.54	98.44

Tras añadir la funcionalidad LPL al TinyRPL (TinyRPL + LPL) en todos los nodos de la red, se analiza su impacto en la latencia del sistema y en la tasa de recepción de paquetes. En la Tabla 4 se muestra el rendimiento del sistema con una red de un salto ubicando los sensores a una distancia de 100 y 200 m. Como se pueden apreciar en los resultados, el rendimiento del sistema es peor con LPL, ofreciendo una latencia media de 312.90 ms (LPL) frente a los 70.51 ms (sin LPL). Además, la PRR es más baja, de media el 91.75 % (TinyRPL + LPL) frente a una media de 99.67 % anterior (TinyRPL).

Tabla 4.
Mediciones con TinyRPL + LPL para un salto con un "sleep_interval" de 512 ms.

	Distancia (m)	
	100	200
Latencia (ms)	310.69	315.10
PRR (%)	97.1	86.4

En las pruebas con enlaces multi-salto (tabla 5), donde cada salto es de 50 m (con un "sleep_interval" de 512 ms) se obtiene una latencia similar para el enlace de un salto a 100 m (Tabla 4). Además se observa que la PRR va disminuyendo a medida que se incrementan los saltos (Tabla 5).

Tabla 5.
Rendimiento de TinyRPL+ LPL en función del número de saltos y 50 m de distancia de enlace.

	Nº de saltos		
	1	2	3
Latencia (ms)	307.16	829.34	1106.33
PRR (%)	94.50	92.00	75.21

7. Discusión

Dado que lo ideal es que la latencia sea lo más baja posible y que la PRR lo más cercana al 100 %. En las tablas anteriores se aprecia que, tiene el uso de TinyRPL en nuestra aplicación, tanto en enlaces de un salto como en multi-salto una PRR aproximado del 99% en todos los casos. Respecto de la latencia, se observa que aumenta cuando se opera en multi-salto, esto es debido al procesado que se realiza en cada nodo, no obstante sigue siendo muy bueno.

Respecto al empleo de TinyRPL en combinación con LPL (TinyRPL + LPL), se ha observado que disminuye el rendimiento de la PRR en un salto. Y empeora en el segundo y tercer salto, del 92% y del 75% respectivamente. No obstante, los valores son también aceptables para el tipo de mediciones que se realizan ya que se encuentran muy por encima del 50%, esto no sería aceptable para aplicaciones relacionadas con la salud, donde se consideraba aceptable a partir del con un 95 % [9].

Dado que sin LPL, las baterías duran sólo menos de una semana para ambos tipos de baterías (Alcalina o Litio), la función LPL se hace imprescindible en esta aplicación, ya que se alarga la vida de las baterías lo suficiente para una campaña agrícola sin necesidad de mantenimiento.

8. Conclusiones

El presente trabajo contribuye a la tecnificación de la agricultura de invernadero mediante la monitorización de variables agronómicas en tiempo real. Para ello se ha desarrollado una plataforma completa y basada en software libre. Destaca sobre todo que el sistema es inalámbrico (WSN) lo que le permite una gran flexibilidad de instalación y de adaptación a cualquier explotación agrícola. Además se han seleccionado hardware, altamente resistente a condiciones ambientales agresivas de alta humedad y temperatura. Respecto a la WSN, se aprecia que con el uso de TinyRPL se puede establecer las rutas de los enlaces automáticamente, y añadiéndole la opción de ahorro de energía (LPL) se le puede dar un mayor tiempo de vida útil a las baterías (que puede ser superior a 1 año) además con una tasa de recepción de paquete alta. Con este sistema se pueden cubrir perfectamente áreas con radios superiores a los 200 m en enlaces de un salto, y de 400 ó 600 m en enlaces multi-saltos, lo cual es suficiente para cualquier tipo de invernadero ya que no suelen superar estas dimensiones. Por último, todo el software desarrollado se ha liberado a la comunidad [31] para darle una mayor difusión y continuación al proyecto.

Agradecimientos

El presente trabajo se ha realizado bajo el proyecto de investigación “Estudio para la sostenibilidad económica y medio ambiental en la planificación, construcción y mantenimiento de campos de golf en clima mediterráneo” del Consejo Superior de Deportes del Ministerio de Educación, Cultura y Deportes con referencia 190/UPB10/12. Así mismo los autores desean agradecer la colaboración del Dr. Jacques-Olivier Panchard (École polytechnique fédérale de Lausanne - EPFL) por proveer información para este trabajo.

Referencias

- [1] Marquez, A.L. Baños, R., Gil, C., Montoya, M.G., Manzano-Agugliario, F., y Montoya, F.G. Multi-objective crop planning using pareto-based evolutionary algorithms. *Agricultural Economics* 42 (6), pp. 649-656, 2011.
- [2] Clement, J., Novas, N., y Gazquez, J.-A., Manzano-Agugliario, F. An active contour computer algorithm for the classification of cucumbers. *Computers and Electronics in Agriculture* 92, pp. 75-81, 2013
- [3] Callejón-Ferre, A., Velázquez-Martí, B., López-Martínez, J.A., y Manzano-Agugliario, F. Greenhouse crop residues: Energy potential and models for the prediction of their higher heating value. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2), pp. 948-955, 2011.
- [4] Callejón-Ferre, A., Manzano-Agugliario, F., Díaz-Pérez, M., Carreño-Ortega, A., y Pérez-Alonso, J. Effect of shading with aluminised screens on fruit production and quality in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouse conditions. *Spanish Journal of Agricultural Research* 7 (1), pp. 41-49, 2009.
- [5] López, A., Valera, D.L., Molina-Aiz, F.D., y Peña, A. Sonic anemometry measurements to determine airflow patterns in multi-tunnel greenhouse. *Spanish Journal of Agricultural Research* 10 (3), pp. 631-642, 2012.
- [6] Manzano-Agugliario, F., Cañero-León R. Economics and environmental analysis of mediterranean greenhouse crops. *African Journal of Agricultural Research* 5(22) pp. 3009-3016, 2010.
- [7] Bacci L., Battista P., and Rapi, B. An integrated method for irrigation scheduling of potted plants. *Scientia Horticulturae* 116(1) pp. 89-97, 2008.
- [8] Manzano-Agugliario, F., García-Cruz, A. Time study techniques applied to labor management in greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivation. *Agrociencia* 43(3) pp. 267-277, 2009.
- [9] Castellano, N.N., Parra, J.A.G., Rodríguez, J.F.L., y Manzano-Agugliario, F. Sistema de telemetría para la transmisión de datos desde ambulancia. *DYNA (Colombia)* 79 (175), pp. 43-51, 2012.
- [10] Manzano-Agugliario, F., Alcayde-García, A., Gil-Montoya, F., and Montero-Rodríguez, M.A. On Line temperature measurement system in the laying of high-voltage power-line conductors by topographic surveying. *Dyna* 86 (1), pp. 89-94, 2011.
- [11] Cama, A., Montoya, F.G., Gómez, J., and de la Cruz, J.L., Manzano-Agugliario, F. Integration of communication technologies in sensor networks to monitor the Amazon environment. *Journal of Cleaner Production* 59(15), pp. 32-42, 2013.
- [12] Jiménez, A., Jiménez, S., Lozada, P., and Jiménez, C. Wireless sensors network in the efficient management of greenhouse crops. *Proceedings of the 9th International Conference on Information Technology, ITNG 2012*, art. no. 6209170, pp. 680-685, 2012.
- [13] Postolache O, Pereira JM, Girão PS, and Monteiro AA. “Greenhouse environment: Air and water monitoring”. *Lecture Notes in Electrical Engineering* 146 pp. 81-102, 2012.
- [14] Gruber, J.K., Guzmán, J.L., Rodríguez, F., Bordons, C., Berenguel, M., and Sánchez, J.A. Nonlinear mpc based on a volterra series model for greenhouse temperature control using natural ventilation. *Control Engineering Practice* 19(4), pp. 354-366, 2011.
- [15] Li, Z., Wei, F., and Liu, W. Manufacture on building blocks of humidity-controlling composite materials used in greenhouse. En: *Proceedings International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment*, (Shanghai, China, Mayo 2011), Vol.2, p. 1125-1128. 2011.
- [16] Garland, K.F., Burnett, S.E., Day, M.E., and van Iersel, M.W. Influence of substrate water content and daily light integral on photosynthesis, water use efficiency, and morphology of *Heuchera americana*. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 137(1), pp. 57-67, 2012.
- [17] Panchard, J. Prabhakar T. V., Hubaux, J., and Jamadagni, H. S. Commonsense net: A wireless sensor network for resource-poor agriculture in the semiarid areas of developing countries. *Information Technologies & International Development* 4(1), pp.51-67, 2007.
- [18] Barrenetxea, G., Ingelrest, F., Schaefer, G., and Vetterli, M. Wireless sensor networks for environmental monitoring: The sensor scope experience. En: *IEEE International Seminar on Communications*, (Zurich 12-14 Marzo 2008), P. 98-101. 2008.
- [19] Kranz, M., Holleis, P., and Schmidt, A. Embedded interaction: Interacting with the internet of things. *IEEE Internet Computing* 14 (2), pp. 46-53, 2010.
- [20] Atzori, L., Iera, A., and Morabito, G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks* 54 (15), pp. 2787-2805, 2010.
- [21] Shelby, Z., Bormann, C. 6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet. Chapter 1.2, p. 13-14. John Wiley and Sons. Chichester (UK), 2009.
- [22] Afanasyev, M., O'Rourke, D., Kusy, B., and Hu, W. Heterogeneous traffic performance comparison for 6lowpan enabled low-power transceivers. En: *Proceedings of the 6th Workshop on Hot Topics in Embedded Networked Sensors*, New York (USA), 2010.
- [23] Levis P, Madden S, Polastre J, and Szewczyk R, TinyOS: An operating system for sensor networks. *Ambient intelligence* 35, pp. 115-148, 2005
- [24] Ko, J., Terzis, A., Dawson-Haggerty, S., Culler, D., Hui, J., Levis, P. Connecting low-power and lossy networks to the internet. *IEEE Communications Magazine* 49 (4), art. no. 5741163, pp. 96-101, 2011.
- [25] Ko, J., Dawson-Haggerty, S., Gnawali, O., Culler, D., Terzis, A.. Evaluating the Performance of RPL and 6LoWPAN in TinyOS. En: *Proceedings Workshop on Extending the Internet to Low power and Lossy Networks (IP+ SN)*, Chicago, (USA), 2011.
- [26] Panchard, J., Rao, S., Prabhakar, T.V., Jamadagni, H.S., Hubaux, J.-P. Common-sense net: Improved water management for resource-poor farmers via sensor networks. *International Conference on Information and Communication Technology and Development, ICTD2006*, art. no. 4085509, pp. 22-33, 2006.
- [27] Markus Becker, “UDP Echo With Measurements Application”. Disponible: <http://tinycvs.sourceforge.net/viewvc/tinycvs/tinycvs-2.x-contrib/uob/apps/UDPEchoWithMeasurements> [citado 10 de Octubre de 2013]
- [28] Montoya, F.G., Manzano-Agugliario, F., López, J.G., Alguacil, P.S. Power quality research techniques: Advantages and disadvantages. *DYNA (Colombia)* 79 (173 PART I), pp. 66-74, 2012.
- [29] Moss D, J Hui J, Klues K, Low Power Listening, Core Working Group, TEP 105.
- [30] Winter, T., Thubert, P., Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., Vasseur, J.P. Alexander, R. RPL: IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks. *IETF RFC 6550*, 2012.
- [31] Universidad de Almería. 6lowsoft. Disponible: <http://pareto.ual.es/6LoWSof/>