

Análisis, Diseño y Simulación de una Red Inalámbrica de Sensores para el Monitoreo de Variables y Control de Actuadores en un Invernadero

Gabriela Cáceres *, Gustavo Quiñónez*, Ladislao Aranda, Ariel Guerrero y Mario Arzamendia

Centro de Investigación Científico, Tecnológico e Innovación Avanzada (CICTIA)

Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción" (UCA) – Hernandarias, Paraguay

Email: gabicaceres1594@gmail.com, gustavo_quinonez@hotmail.com, ladislao.aranda@uc.edu.py

Centro de Innovación en Automatización y Control (CIAC)

Parque Tecnológico Itaipú (PTI) – Hernandarias, Paraguay

Email: Ariel.guerrero@pti.org.py

Laboratorio de Sistemas Distribuidos

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción (FIUNA) – Asunción, Paraguay

Email: marzamendia@ing.una.py

Resumen—El presente trabajo propone el diseño de una arquitectura de Red Inalámbrica de Sensores y Actuadores (WSAN, *Wireless Sensor and Actuator Network*) aplicable a invernaderos hidropónicos, enfatizando en el uso del sistema operativo Contiki, ideal para dispositivos de baja potencia, junto al simulador Cooja, para el desarrollo de una aplicación que se encargue de recolectar los datos adquiridos por los sensores, para procesarlos y transmitirlos a través de la red. Además, se considera la utilización de una tecnología innovadora, como lo es el estándar 6LoWPAN, ya que está pensado para una mejor integración de las WSANs al internet y que apunta al modelo de Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*). Los resultados de las simulaciones realizadas demuestran la factibilidad de aplicar una WSAN como plataforma de comunicación en un invernadero. Para ello, primeramente se han estudiado algunos procesos que se desarrollan en su interior, tales como la refrigeración y la deshumidificación, aprovechando modelos matemáticos proporcionados por referencias bibliográficas, para obtener los requisitos temporales a los que debe ajustarse el desempeño de la WSAN, verificando que su desempeño en términos de latencia se ajusta satisfactoriamente a las necesidades de los procesos de control.

Palabras clave—hidroponía; invernadero; WSAN; 6LoWPAN; Contiki.

Abstract—This research proposes the design of a Wireless Sensors and Actuators Network (WSAN) architecture applicable for hydroponic greenhouses, emphasizing the use of the Contiki operative system, ideal for low power devices, along with de Cooja simulator, to develop an application for collecting acquired data from sensors, process this information and cast it over the network. Moreover, using an innovative technology such as

6LoWPAN is considered, given that it is conceived for a better integration between WSANs and the internet, focusing on the Internet of Things (IoT) model. Results obtained through practiced simulations show that the use of a WSAN as a communication platform for a greenhouse is applicable. For this, first, processes that take place inside it were studied, such as air conditioning and dehumidification, using mathematical models provided in bibliographical references, in order to identify the temporal requirements to which the performance of the WSANs has to be adjusted. Later, WSAN simulations were executed, verifying that its performance in terms of latency is adjusted to the requirements of controlling processes.

Keywords—hydroponics; greenhouse; WSAN; 6LoWPAN; Contiki.

I. INTRODUCCIÓN

La necesidad de llevar un control sobre las variables climáticas obedece al hecho de que es fundamental para el crecimiento saludable de las plantas, que las mismas estén en un ambiente en el cual los niveles de temperatura, humedad y luminosidad sean los adecuados.

Los invernaderos permiten manejar adecuadamente las variables climáticas relevantes para las plantaciones, que afectan a la parte aérea, al ser espacios cerrados donde, apoyados por sistemas que incorporan sensores y actuadores, es posible monitorear y controlar variables, mientras que con la hidroponía se logra controlar los factores edáficos que limitan a la parte de la raíz, que igualmente requieren de un monitoreo y control constantes. Estos sistemas, popularmente, usan para su despliegue una red cableada como medio físico para la comunicación. Sin embargo, los últimos avances en

ciencia e ingeniería han permitido implementar soluciones del campo de las WSANs para diversos escenarios que presenta la agricultura, logrando el monitoreo de parámetros ambientales mediante nodos sensores inalámbricos, también conocidos como motas. Debido a que las WSANs son escalables, redes ya desplegadas pueden ser mejoradas simplemente aumentando el número de motas que componen su arquitectura, para el monitoreo de parámetros ambientales. Esta tarea de monitoreo permite al usuario acceder a una cantidad de información mayor que a la que accede mediante el uso de herramientas manuales, y así tomar decisiones más adecuadas con respecto al manejo de su producción.

El objetivo principal de este trabajo fue diseñar una herramienta eficaz para el monitoreo y control de entornos de producción agrícola, tomando como caso de estudio las necesidades existentes dentro de un invernadero hidropónico, y presentarla como un elemento de apoyo a la hora de evaluar y determinar las condiciones favorables para los cultivos.

II. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

A. Descripción del Sistema

Dentro de la red se distinguen tanto el nodo servidor como los nodos clientes y nodos actuadores. Estos nodos integran, dentro de su arquitectura de hardware, dispositivos de radio 802.15.4, lo que hace posible la comunicación entre los mismos para el envío de los datos adquiridos por los sensores al nodo servidor, haciendo uso del protocolo UDP. Estos datos pueden ser visualizados en una interfaz de computadora, estableciendo una comunicación mediante puerto USB entre la misma y el nodo servidor. La arquitectura del sistema se presenta en la Figura 1.

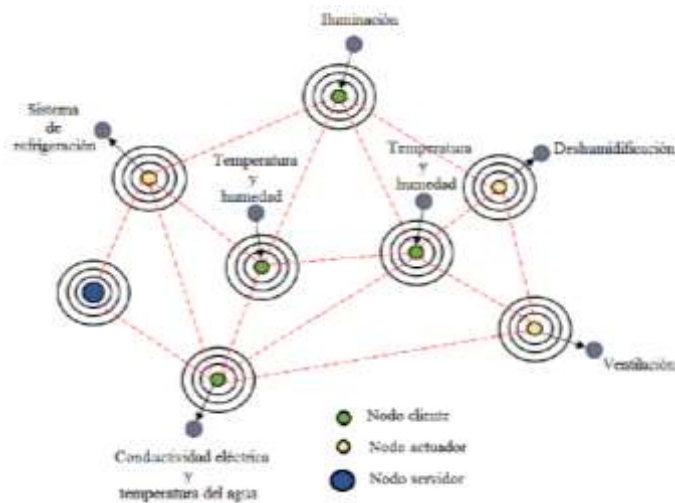


Figura 1 - Arquitectura del sistema

La información recibida por el nodo servidor es analizada, a fin de determinar la necesidad de ejecutar alguna tarea de control sobre el entorno monitoreado. En caso de necesitarse

la intervención de alguno de los actuadores, parte de este mismo nodo el comando hacia el nodo actuador asociado a la variable cuyo valor no se adecua a lo establecido

B. Wireless Sensors and Actuators Network

La WSAN se considera como una herramienta potencial para la automatización en la agricultura, ya que la misma puede recolectar la información solicitada, y junto con actuadores, reaccionar ante las distintas situaciones, destacándose su tamaño compacto, configuración dinámica, escalabilidad y adaptabilidad.

La red propuesta se basa en la tecnología 6LoWPAN, la cual permite el uso de IPv6 sobre redes basadas en el estándar IEEE 802.15.4, donde cada nodo que compone la red dispone de su propia dirección IP, adecuándose al concepto de IoT.

En cuanto a la topología de red, haciendo uso del protocolo RPL proporcionado por 6LoWPAN, el diseño de la red se basa en una topología mallada, donde cada nodo sensor envía los datos recolectados directamente al servidor, de estar éste dentro del radio de cobertura del transceptor; y de no estarlo, los mensajes pueden ser retransmitidos a otros nodos sensores, para así llegar a destino. Esta topología, por dinámica, también permite la reparación automática de los enlaces, en caso de falla de alguno de los nodos, o en caso de que se agreguen nuevos nodos a la red, permitiendo que ésta sea escalable. El comportamiento dinámico de la red se aprecia en las Figuras 2 y 3.

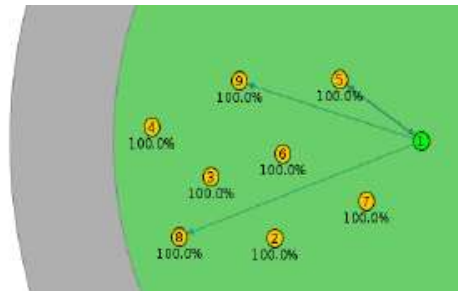


Figura 2 - Nodos sensores dentro del radio de cobertura del nodo servidor

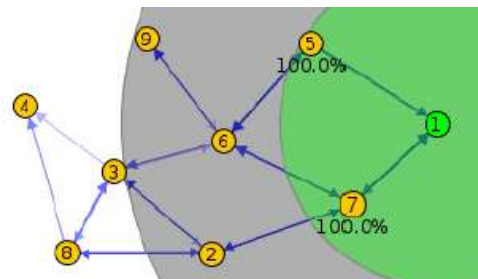


Figura 3 - Nodos sensores fuera del radio de cobertura del nodo servidor

III. ASPECTOS REFERENTES AL HARDWARE

A. Sistemas Embebidos

Todo nodo que forma parte de la red está compuesto por módulos como: microprocesador, batería, memoria, radio y sensor/actuador. Estos elementos se agrupan en plataformas dedicadas exclusivamente al despliegue de redes inalámbricas. Del análisis de plataformas disponibles, fue seleccionada la CM5000, de Advanticsys, que se basa en la plataforma TelosB y es totalmente compatible con el sistema operativo Contiki, con el cual se elabora la aplicación que se ejecuta en la plataforma utilizada. Esta plataforma será utilizada tanto para el nodo servidor como para los nodos sensores y nodos actuadores.

La CM5000 integra de fábrica sensores de temperatura del aire, humedad del aire y luminosidad, que resultan útiles para el monitoreo de los parámetros climáticos referentes a la parte aérea, mientras que para la parte de la raíz de la planta se requiere del uso de sensores de temperatura del agua y conductividad eléctrica de la misma, usando como interfaz de comunicación entre estos sensores y la CM5000, la plataforma Arduino UNO, asociada a un USB Host Shield. La comunicación entre ambas plataformas es posible vía UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*).

B. Sensores

Como fue mencionado, las variables a ser monitoreadas son la temperatura del aire, humedad del aire, luminosidad, temperatura del agua y conductividad eléctrica. Los datos recolectados pueden enviarse al nodo servidor para su visualización, o bien, visualizar los datos del propio nodo sensor a través de su dirección IP. En la Tabla 1 se describen los sensores integrados en el sistema propuesto.

Tabla 1 - Características de los sensores

Parámetros	Modelo	Rango	Precisión
Temp. aire	SHT11	-40 ~ 123.8°C	
Humedad aire		0 ~ 100%	
Luminosidad	S1087 S1087-01	320-730 nm 320-1100 nm	
Temp. agua	DS18B20	-55°C ~ 125°C	0,5°C
Cond. Elec.	K 1.0	5-200.000 uS/cm	

IV. ASPECTOS REFERENTES AL SOFTWARE

A. Sistema Operativo

El sistema operativo Contiki, seleccionado para el diseño de la aplicación, presenta las siguientes ventajas:

- Provee asignación de memoria dinámica.
- Ofrece una pila de red IP completa, con estándares de protocolos IP como UDP, TCP y HTTP (Hypertext Transfer Protocol).

- Se distribuye con un simulador propio: Cooja.
- Soporta cargas dinámicas en tiempo de ejecución.
- Opera con un consumo extremadamente bajo, lo que permite que las motas tengan autonomía de años con un par de baterías AA.
- Permite el uso de protothreads.

El simulador Cooja es la herramienta más apropiada para la simulación de motas que ejecutan aplicaciones con este sistema operativo, con una interfaz de fácil manejo. Brinda la posibilidad de emular cada mota a nivel hardware para poder observar de manera más precisa su comportamiento.

B. Protocolos Implementados

La pila de protocolos implementada para el diseño de la red se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2 - Pila de protocolos de Contiki

Capa	Protocolo
Aplicación	HTTP
Transporte	UDP
Red y Enrutamiento	RPL
Adaptación	6LoWPAN
MAC	CSMA
RDC	ContikiMAC
Radio	IEEE 802.15.4

C. Estructura Funcional de la Aplicación

1) *Nodo Sensor*: El nodo sensor cuenta con un proceso que se encarga de verificar si está disponible la conexión UDP. Una vez disponible, espera que se registre un evento, para dar inicio a la lectura de los sensores montados en la CM5000, y recuperar los datos de los sensores agregados de forma externa. Este proceso se ilustra en la Figura 4.

2) *Nodo Servidor*: El nodo servidor, que ve al nodo sensor como un cliente, primero se encarga de verificar si existe conexión UDP; verificada la conexión, espera la llegada de un nuevo paquete. De recibirse un paquete, el nodo servidor imprime el mensaje "Data recv from", seguido del número de mota que envía el paquete, para después almacenar los datos en un buffer e imprimir en la terminal de la computadora. Para completarse el proceso, envía al cliente el mensaje "Hello_from_the_server!", indicando que ha recibido el paquete. Este proceso se ilustra en la Figura 5.



Figura 4 - Diagrama de flujo de las funciones del nodo sensor

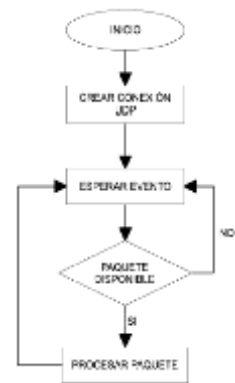


Figura 5 - Diagrama de flujo de las funciones del nodo servidor

3) *Nodo Actuador*: El nodo actuador realiza procesos similares a los del nodo sensor, ya que recoge los datos de los sensores que incorpora; y también, procesos similares a los del nodo servidor, pudiendo recibir los datos de otros nodos sensores. De acuerdo a los valores leídos, envía señales de control a relés, que se encargan de accionar los actuadores correspondientes.

V. SIMULACIONES Y RESULTADOS

Como método para evaluar la calidad de la comunicación, fueron determinadas la cantidad de paquetes perdidos y la latencia promedio experimentada, bajo dos escenarios de prueba: el primero, con una reducida cantidad de nodos en la red, y el segundo, con una cantidad superior de nodos. Estos parámetros fueron medidos a fin de validar los requisitos temporales de la red, considerando que los intervalos de tiempo requeridos para la comunicación entre los nodos deben ser menores que los intervalos de tiempo requeridos para los procesos de actuación, a fin de ejecutar un control efectivo sobre los mismos.

Para el análisis, se obtuvo el detalle de los mensajes enviados por cada mota de la red, que se muestran en el cuadro de texto del Cooja; esto fue posible gracias a que el

mismo permite guardar esta información en un archivo de texto, en el cual posteriormente se realizó un filtrado de los mensajes de interés, a fin de comparar el número de paquetes enviados, con el número de paquetes recibidos, y los instantes de tiempo en que se produjeron estos eventos.

El Cooja procede a la simulación de la red bajo condiciones ideales, es decir, libres de obstáculos e interferencias, tal y como se tendría en el despliegue real de una red inalámbrica en condición de línea de vista, donde, por ejemplo, el fabricante de la CM5000 estima un radio de alcance de 120 metros.

Sin embargo, para el despliegue real de una red, se espera que la presencia de diversos elementos en el entorno, sean éstos edificaciones o artefactos, reduzcan la capacidad de transmisión y recepción de los paquetes, y limiten el alcance de la red.

Por tal motivo, se implementaron variaciones en las tasas de suceso para la transmisión y recepción de datos (TX / RX), ajustables en el Cooja. Se inició con una tasa del 100%, que luego fue disminuida hasta el 50%, en intervalos de 25%, para realizar los análisis.

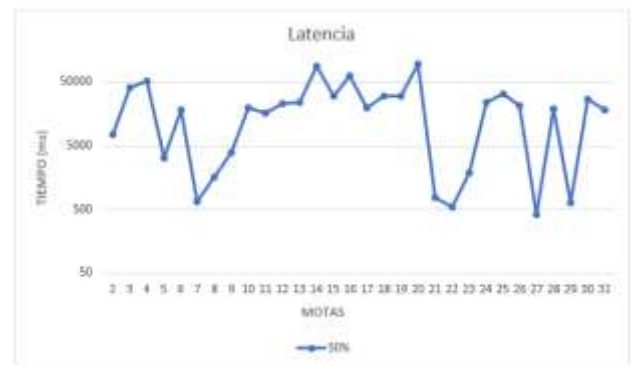


Figura 6 - Curva de latencia experimenta bajo condiciones más desfavorables

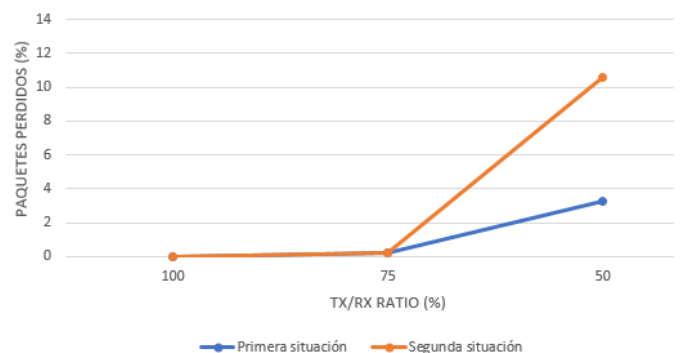


Figura 7 - Curva de paquetes perdidos bajo condiciones más desfavorables

Altas tasas de transmisión de datos pueden derivar en el congestionamiento de la red, lo que también contribuye al aumento en las pérdidas de paquetes y la latencia, debido a que, a medida que aumenta el número de nodos, son enviados más paquetes hacia el servidor.

Con respecto a los requisitos temporales de la red, se observó que, para todos los escenarios estudiados, bajo las situaciones planteadas, la latencia experimentada fue inferior al orden de las centenas de segundos, orden en el cual se encuentra el tiempo de asentamiento de una señal de control, por lo que, inclusive si se experimentase una latencia como la registrada en el peor de los casos, ésta aún sería inferior al requisito temporal mencionado, haciendo que la red pueda efectivamente ejecutar un esquema de control.

VI. CONCLUSIÓN

Atendiendo al planteamiento del problema, se presentó la arquitectura de un sistema para el monitoreo de parámetros tratados por los procesos seleccionados, a través de una red inalámbrica de topología dinámica y autoconfigurable, para la ejecución de tareas de control sobre procesos de actuación, en base a las mediciones realizadas.

El análisis de las simulaciones realizadas permitió determinar cómo afecta el aumento del número de nodos en la red, sobre la pérdida de paquetes y la latencia experimentada. También se observó el aumento que sufrirían estos parámetros ante situaciones de baja tasa de suceso en la transmisión y recepción de datos, considerándose que estas situaciones estarían constantemente presentes ante cualquier escenario de despliegue real de la red.

Se verificó mediante simulación que los requisitos temporales para el envío y la recepción de datos, entre los nodos de la red, son inferiores, y por lo tanto compatibles, con el tiempo para el asentamiento de la señal de control de un proceso, por lo que se concluye que la dinámica del sistema propuesto permitiría la implementación de un esquema de control.

REFERENCIAS

- [1] G. Eason, B. Noble, and I.N. Sneddon, "On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions," *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, vol. A247, pp. 529-551, April 1955. (*references*)
- [2] J. Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68-7.
- [3] I.S. Jacobs and C.P. Bean, "Fine particles, thin films and exchange anisotropy," in *Magnetism*, vol. III, G.T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, 1963, pp. 271-350.
- [4] K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished.
- [5] R. Nicole, "Title of paper with only first word capitalized," *J. Name Stand. Abbrev.*, in press.
- [6] Y. Yoroazu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, "Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface," *IEEE Transl. J. Magn. Japan*, vol. 2, pp. 740-741, August 1987 [Digests 9th Annual Conf. Magnetism Japan, p. 301, 1982].

- [7] M. Young, *The Technical Writer's Handbook*. Mill Valley, CA: University Science, 1989.