

Diseño de una red WSAN para la aplicación de un control de climatización en invernaderos

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— De entre las áreas de aplicación de las redes inalámbricas de sensores y actuadores (WSAN, del inglés *Wireless Sensor and Actuator Networks*), la agricultura de precisión presenta escenarios sumamente atractivos para la aplicación de esta tecnología. La utilización de tecnologías de información junto con buenas prácticas agrícolas permitirá obtener mayores beneficios de los cultivos. El presente artículo realiza una revisión del estado del arte de la aplicación de WSAN en la agricultura de precisión, casos de éxito, perspectivas y desafíos. Basado en este análisis, y enfocándose en los cultivos dentro de invernaderos, los cuales requieren de una tecnología de climatización adecuada para que funcione como cámara de ensayo, se estudian los procesos intervinientes en la climatización (refrigeración, humidificación, deshumidificación, calefacción, mezcla de aire y retorno exterior, fertilización carbónica, riego automático). Teniendo en cuenta estos subsistemas, se propone el diseño de una arquitectura WSAN aplicada para un caso específico en un invernadero. Esta arquitectura, desde el punto de la teoría de control, se constituirá en un sistema de control de bajo costo aplicado a los diversos procesos de climatización y adquisición de datos provenientes de ensayos.

Keywords—wsan; agricultura de precisión; invernadero; controlador pid

Abstract— Among the application areas of wireless networks of sensors and actuators (WSAN, *Wireless Sensor and Actuator Networks*), precision agriculture presents extremely attractive scenarios for the application of this technology. The uses of information technology along with good agricultural practices allow higher profits crop. This article makes a review of the state of the art of applying WSAN in precision agriculture, success stories, perspectives and challenges. Based on this analysis, and focusing on crops inside greenhouses, which require adequate cooling technology to function as test chamber, the processes involved in air conditioning (cooling, humidification, deshumidification, heating, and outdoor air mixture return, carbon dioxide fertilization, irrigation) are studied. Given these subsystems, the design of a WSAN architecture applied to a

specific case in a greenhouse is proposed. This architecture, from the point of control theory, will become a low-cost control system applied to various processes of climatizing and data acquisition from trials.

Keywords— wsan; precision agriculture; greenhouse; pid controller

I. INTRODUCCIÓN

Los últimos avances en ciencia e ingeniería han permitido implementar soluciones de WSANs para un creciente número de aplicaciones. Entre las principales ventajas de esta tecnología se puede resaltar la posibilidad de instalar una red de puntos de medición y/o actuación, facilitando su despliegue gracias a su comunicación inalámbrica. Uno de los campos de aplicación de las WSANs es la agricultura de precisión, en la que se utilizan sistemas de monitoreo y control para obtener mejores resultados, ya que pueden optimizar las condiciones ajustándose a las características y necesidades de cada cultivo; pueden ser utilizadas para predecir la salud de los cultivos y la calidad de la producción a través del tiempo, con el monitoreo de los niveles de nutrientes del suelo; predecir también los intervalos de riego con el monitoreo tanto de los niveles de humedad del suelo como de las condiciones climáticas [1]; y determinar el momento ideal para la siembra y cosecha, constituyéndose como herramientas para estimar, evaluar y comprender los cambios que ocurren en los cultivos [2].

Estos sistemas logran 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 adicionales [1]. Normalmente toda la información es recolectada hacia una estación base o sumidero donde se procesa y convierte en información útil para el usuario, además de enviar comandos a determinados nodos para ejecutar acciones [3].

Los invernaderos son cámaras diseñadas con el fin de mantener ambientes controlados en cultivos. Son estructuras montadas con material traslúcidos o transparentes para obtener la iluminación solar, pero cerradas de tal manera que puedan ser regulados otros factores como la temperatura, la luminosidad o los niveles de CO₂ [4]. El sistema de control de un invernadero posee diferentes subsistemas, que por un lado miden el valor de cada una de estas variables, y por otro lado lo ajustan para el valor deseado. Es decir, existen un subsistema para refrigeración, humidificación, deshumidificación, calefacción, mezcla de aire, fertilización carbónica, riego automático [5].

La manera de controlar el ambiente es implementando un lazo de control. Uno de los algoritmos de control ampliamente utilizado es el controlador PID (Fig. 1), que ha sido utilizado cuando no se tiene un conocimiento del proceso. Este control calcula la desviación o error de un valor medido, con respecto al deseado, aplicando una señal al proceso que es una combinación proporcional, integral y derivada de la señal de actuación [6]. El algoritmo del control PID consiste en tres parámetros distintos: el Proporcional, el Integral, y el Derivativo. El valor Proporcional depende del error actual; el Integral depende de los errores pasados; y el Derivativo es una predicción de los errores futuros. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso por medio de un elemento de control.

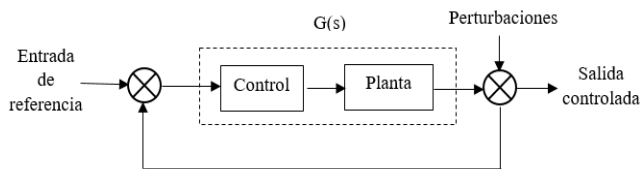


Fig. 1. Diagrama de bloques de un sistema controlado

Para el correcto funcionamiento de un controlador PID que regule un proceso o sistema, se necesita al menos:

- Un sensor, que determine el estado del sistema (termómetro, caudalímetro, manómetro, etc).
- Un controlador, que genere la señal que gobierna al actuador.
- Un actuador, que modifique al sistema de manera controlada (resistencia eléctrica, motor, válvula, bomba, etc)

TABLA I. FUNCIONES DE TRANSFERENCIAS DE LOS PROCESOS

Proceso	Función de transferencia
$G_1(s)$	$\frac{3.73}{2153.07s^4 + 2042s^3 + 549.1s^2 + 254.57s + 0.7}$ Proceso de Refrigeración [5]
$G_2(s)$	$\frac{140s + 28}{34200s^5 + 104791s^4 + 40746.63s^3 + 21617.76s^2 + 672.26s + 5.38}$ Proceso de Deshumidificación [5]
$G_3(s)$	$\frac{1}{2.5s + 1}$ Proceso de Riego Automático [5]

En la Tabla I se ven las funciones de transferencias, considerando el modelado matemático de los procesos intervinientes según Fogel [5], y que representa el comportamiento del invernadero.

El enfoque tradicional de estos sistemas para su despliegue es la utilización de una red cableada como medio físico para la comunicación, y la utilización de protocolos de comunicación industriales, como el RS-485, para el intercambio de datos entre los nodos de la red.

La contribución de este trabajo es el diseño de un sistema de control sobre una plataforma de comunicación inalámbrica. Además, se considera la utilización de una tecnología innovadora, como lo es 6LoWPAN, ya que está pensada para una mejor integración de las WSNs a la internet y que apunta al modelo de Internet de las Cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*), que últimamente ha atraído mucha atención en el ámbito académico.

La estructura del artículo es la siguiente. En la sección 2, se realiza una revisión del estado del arte; además se indican los principales desafíos en la aplicación de redes de sensores en agricultura de precisión. En la sección 3, se presenta una descripción de las WSNs. Luego, en la sección 4 se presentan algunas simulaciones del sistema de control propuesto de climatización y riego. El trabajo concluye con la sección 5, donde se resaltan los principales puntos del trabajo y los próximos pasos a realizar en el marco del presente proyecto.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

La revisión de la literatura disponible muestra varios aportes relacionados a las WSNs en agricultura de precisión en los últimos años.

Primeramente, respecto a trabajos de WSN aplicados a cultivos en campo abierto, Diaz et al. [7] presentan una metodología bastante completa para la instalación de una WSN, abarcando desde el estudio del campo donde ha de ser instalado, pasando por el diseño de la red, la simulación y la implementación de la misma. En el trabajo se consideran a los nodos MICAz y el protocolo de comunicación ZigBee. En otro trabajo presentado por Olalla, M. [3], se propone una WSN asociada a actuadores para la optimización del riego con fines productivos, debido a la escasez de agua en la Hacienda Cananvalle de la ciudad de Ibarra (Ecuador); empleando el estándar 6LoWPAN y los protocolos UDP y TCP para el desarrollo de la red inalámbrica. En este trabajo se consideran a los nodos TelosB para implementar la red.

Por otro lado, en lo que se refiere a trabajos de agricultura de precisión, se revisaron los siguientes trabajos: Saad et al. [8] implementan un sistema de monitoreo en tiempo real para un invernadero con un volumen de 2600 m³, para un cultivo de mangos. El sistema cuenta con tres puntos de medición, siendo dos internos y uno externo. Los nodos se encuentran basados en el hardware de National Instruments, así como su interfaz de usuario fue desarrollada con el software LabVIEW de la misma empresa; el protocolo de comunicación utilizado es el IEEE 802.15.4. Asokar, P.S. y Bhadade, Us. [4] proponen un sistema de monitoreo y control para un cultivo de pepinos. Sin embargo, se trata de un solo punto de medición y actuación. Además, como medio de comunicación utilizan la red GSM de telefonía.

Finalmente, Erazo et al. [9] desarrollan una red WSN para un invernadero con cultivo de rosas. Los nodos fueron desarrollados con microcontroladores del fabricante Microchip. La tecnología de comunicación inalámbrica utilizada fue ZigBee. Para la interfaz de usuario también fue utilizada la herramienta LabVIEW. Pruebas fueron realizadas en un invernadero con una superficie de 50 m². El sistema genera alarma en caso de que las mediciones caigan fuera de un rango de operación aceptable, para que el usuario pueda tomar acciones correctivas.

Por lo que se observa en los trabajos de invernaderos, las soluciones vistas presentan una aplicación más orientada a la medición de las variables, por lo que en el presente trabajo se intenta extender esto introduciendo el mecanismo de control de los subsistemas de climatización y riego del invernadero.

III. DESCRIPCIÓN DE LAS WSNs

A. Características

Una WSN 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. Para ello, debe contar básicamente con las características que se especifican a continuación.

- *Capacidad para la toma de decisiones:* el sistema debe poder ejecutarse sin alguna intervención humana durante un largo periodo, debido a que los nodos podrían ser desplegados en zonas de difícil acceso [10]. Así, múltiples nodos sensores colaboran entre ellos para tomar decisiones [1].
- *Tamaño compacto:* un nodo sensor debe ser de pequeño tamaño y poco peso, y debe prescindir del uso de cables, asegurando la portabilidad para el despliegue a larga escala de forma sencilla.
- *Configuración dinámica:* la topología de la red no debe ser fija. Los nodos pueden ser desplegados arbitrariamente y adaptados según las necesidades; cada uno de ellos debe mantenerse inactivo la mayor parte del tiempo, a fin de ahorrar energía y extender lo máximo posible el tiempo de operación de la red. Los nodos deben colaborar entre sí para determinar el mínimo número que debe permanecer activo [1].
- *Tolerancia de fallas:* un desafío que se presenta en el despliegue de una WSN es el hecho de que los nodos son propensos a fallas [11] que afectan el rendimiento de la red. Sin embargo, los nodos pueden autoorganizarse configurando dinámicamente la topología de red [12].
- *Escalabilidad y adaptabilidad:* toda red escalable debe poder aumentar el número de nodos sin que esto implique una disminución considerable de la funcionalidad o el rendimiento.
- *Acceso remoto:* se debe poder acceder a la información en tiempo real a distancia, de modo a que el usuario final la analice y tome decisiones en caso de necesidad sin importar su ubicación.

B. Diseño y Funcionalidad

Un sistema de monitoreo basado en tecnología WSN debe estar compuesto de los siguientes elementos: nodos sensores, nodo sumidero, estación base y, adicionalmente, actuadores. La Fig. 2 representa un despliegue típico de una red inalámbrica de sensores y actuadores.

- *Nodos sensores:* representan la unidad básica de una WSN; se encargan de leer la información del medio físico: los valores de las variables ambientales y del suelo; y transportarla hasta el nodo sumidero. Cada nodo, aparte de enviar su propia información, reenvía los paquetes de datos enviados por otros nodos. La Fig. 3 representa un esquema de los componentes más importantes de un nodo sensor.
- *Nodo sumidero:* es el responsable de la recolección de los datos transmitidos por los nodos sensores, para luego enviarlos a la estación base.
- *Estación base:* es el que recibe la información desde el nodo sumidero, y envía a través del mismo, comandos a los actuadores.
- *Nodos Actuadores:* son nodos que tienen la capacidad de recibir comandos desde la estación base, interpretarlos y generar una acción correspondiente. Por ejemplo, controlar un sistema de riego en base al nivel de humedad detectado.

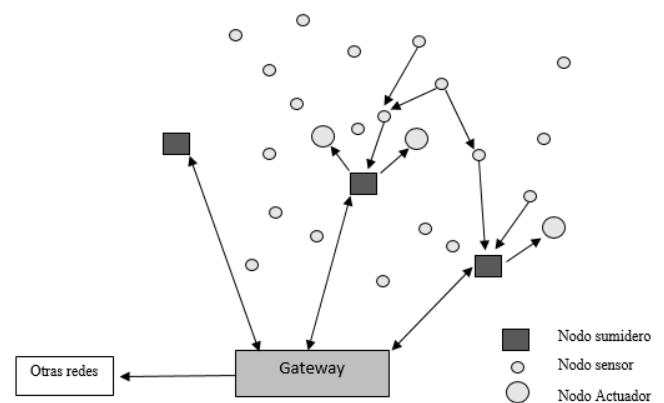


Fig. 2. Arquitectura de referencia de una WSN.

C. Estándares utilizados y Tecnología Disponible

De entre los estándares evaluados en la tecnología de comunicación: IEEE 802.15.4 [13], Zigbee [14], Wireless Hart [15], ISA100.11A [16], Bluetooth Low Energy (BLE) [17], Wifi [1], GPRS/3G/4G [1], WiMax [18], se ha seleccionado para la implementación:

- *IEEE 802.15.4:* define las especificaciones de la capa física (PHY) y subcapa de control de acceso al medio (MAC), para la conectividad inalámbrica de dispositivos fijos o móviles, de baja velocidad de transferencia de datos y consumo limitado de energía [13].

- **6LoWPAN:** es un estándar que define la implementación del stack IPv6 sobre la capa física (PHY) y la subcapa de control de acceso al medio (MAC) de la IEEE 802.15.4, para que cualquier dispositivo que lo utilice pueda ser accedido desde internet [19].

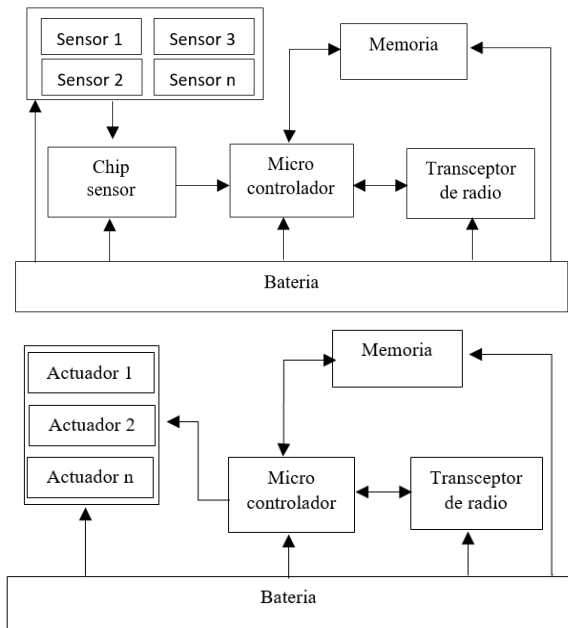


Fig. 3. Diagrama de bloques de un nodo sensor y un nodo actuador

En cuanto a las plataformas hardware para nodos sensores y actuadores, en la Tabla II se presentan características para diferentes plataformas de nodos sensores.

TABLA II. CARACTERÍSTICAS DE PLATAFORMAS

Plataforma	Características		
	Procesador	Memoria RAM	Frecuencia de transmisión (MHz)
TelosB	TIMSP430	10	2400
MICA2	ATmega128L	4	868/915
MicaZ	ATmega128L	4	2400
IRIS	ATmega128L	4	2400
Shimmer 3	TIMSP430	16	24
SunSPOT	ARM920T	512	2400
LOTUS	NXPLPC 1758	64	2405/2480
Imote2	Marvell/XScale PXA271	256	2400

Se ha seleccionado el TelosB para implementación de los nodos, considerando que posee un ecosistema de programación basado en el sistema Operativo Contiki.

ContikiOS: es el segundo sistema operativo más utilizado; está diseñado para pequeños sistemas que disponen solo de unos pocos kilobytes de memoria, resultando altamente eficiente en cuanto al manejo de la misma al proporcionar un conjunto de mecanismos de asignación de memoria de bloques. También se destaca por incluir el simulador COOJA [20].

IV. CONTROL DE CLIMATIZACIÓN EN INVERNADEROS

Fogel [5], propuso el diseño de entornos aislados y de ambiente controlado (invernaderos), con el fin de ser utilizados como estaciones experimentales para la práctica de ensayos climáticos sobre los principales cultivos de Paraguay, basado en la utilización adecuada de sistemas de calefacción, ventilación, refrigeración y fertilización carbónica para la correcta adecuación de los niveles de radiación, temperatura, humedad y CO₂, utilizando la teoría de control para modelar el invernadero, y la correcta sintonización de los controles de los distintos procesos.

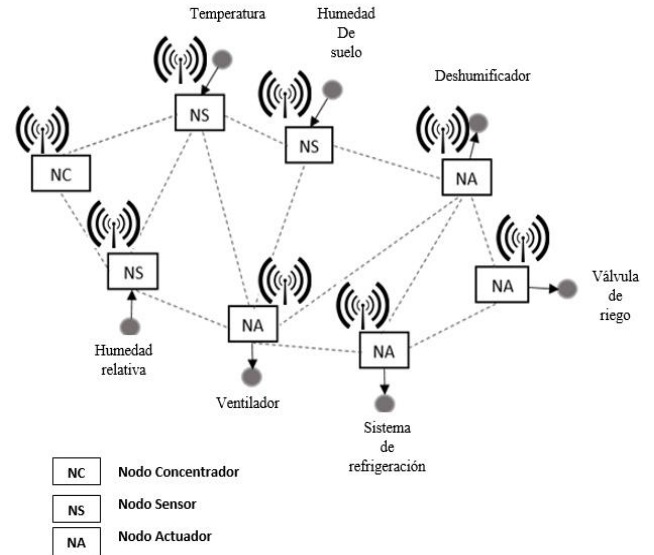


Fig. 4. Arquitectura del sistema propuesto

Utilizando este trabajo como referencia, se propone la integración de un sistema de control y una red de sensores y actuadores inalámbricos a un invernadero de 9 m², con el objetivo de ajustar las condiciones climáticas de su interior para el óptimo cultivo de tomates, específicamente. Considerando lo sugerido por la Guía Técnica de Cultivos Hortícolas, del Ministerio de Agricultura y Ganadería, el mejor comportamiento del tomate se consigue en climas tropicales o subtropicales; no tolera las temperaturas muy elevadas y tiene serios inconvenientes en climas tropicales húmedos. Así, de los procesos mencionados más arriba, se consideran de interés para esta tarea:

- El proceso de refrigeración sensible, debido a que es ideal para el cultivo, temperaturas entre 20° C a 25° C durante el día, y 11° C a 18° C durante la noche, considerando que la fructificación se ve perjudicada al no existir diferencia entre las temperaturas del día y de la noche;
- El proceso de deshumidificación, debido a que la elevada humedad del aire favorece al desarrollo de enfermedades producidas por hongos, por lo que se prefieren los ambientes secos, adoptándose un porcentaje del 60% como el ideal;
- El proceso de riego automático, debido a que las necesidades de agua del cultivo son elevadas,

especialmente en el periodo de desarrollo de la fructificación, incluyendo la etapa de cosecha.

También, se considera necesaria la implementación de un sistema de ventilación/extracción mediante un algoritmo de encendido con respaldo, que será accionado por horarios ya previstos.

Los procesos considerados se han simulado en Scilab, respetando el modelado propuesto por Fogel [5], de manera a verificar los requerimientos temporales implementativos de los diferentes lazos de control, mediante las funciones de transferencia de los mismos (Tabla I). Se asume que en el despliegue los nodos tendrán una topología fija y se considera que la alimentación no es permanente.

En las Figuras 5 al 7 se ven las respuestas temporales de las plantas consideradas.

De manera a determinar la respuesta temporal de las variables a ser controladas y considerando la propuesta de Fogel [5], se procedió a evaluar la respuesta al pulso unitario de las funciones de transferencia propuestas.

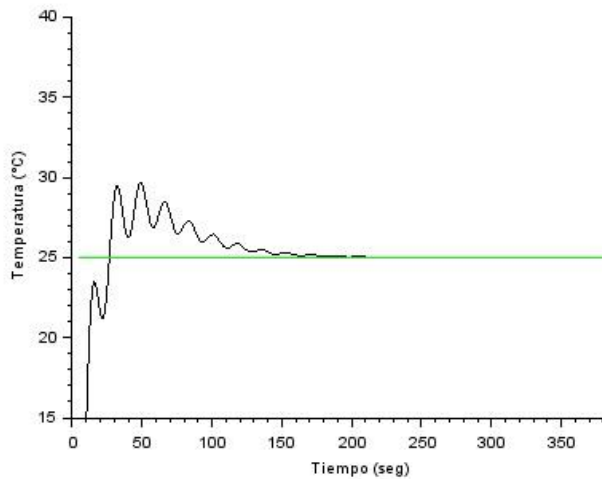


Fig. 5. Respuesta del proceso de refrigeración

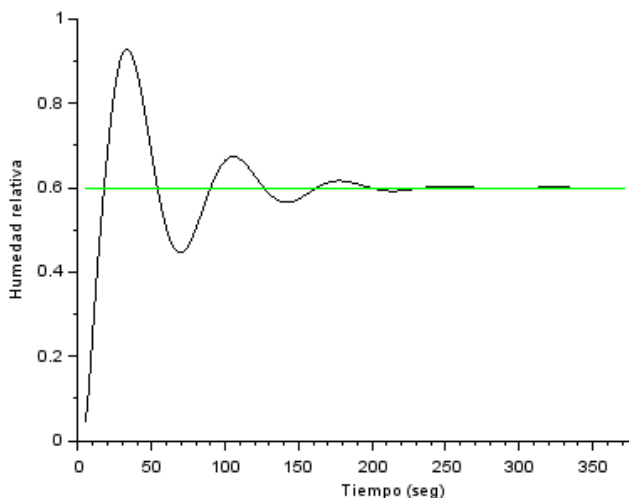


Fig. 6. Respuesta del proceso de deshumidificación

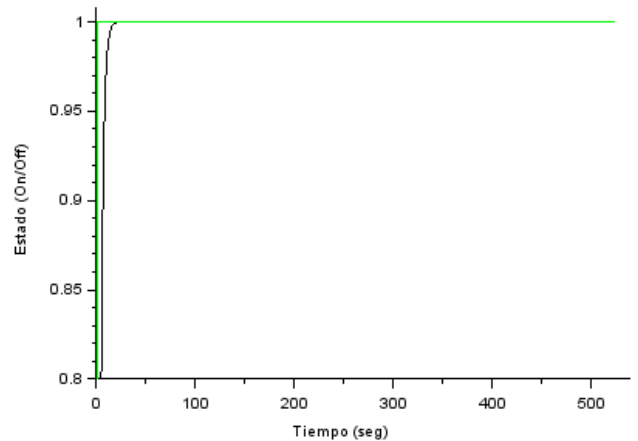


Fig. 7. Respuesta del proceso de riego por goteo

De las simulaciones se concluye que la dinámica del sistema permitiría la implementación de un esquema de control. El tiempo de asentamiento de la señal está en el orden de centenas de segundos, mientras que el tiempo de comunicación de un paquete en una red 802.15.4 está en el orden de los milisegundos.

V. CONCLUSIÓN

A partir de las consideraciones anteriores, se presenta la arquitectura de un sistema de monitoreo y control mediante el análisis de los parámetros tratados por los procesos seleccionados, a través de una red inalámbrica de topología fija y autoconfigurable. Se emplea 6LoWPAN para posibilitar el uso de IPv6 sobre redes basadas en el estándar 802.15.4.

La plataforma a utilizar como nodo sensor, actuador y sumidero es la CM5000, basada en la plataforma TelosB, que cuenta con las siguientes características:

- Plataforma WSN IEEE 802.15.4
- Procesador MSP430 de 2.4 GHz, 16bits y RF CC2420
- Sistema Operativo: ContikiOS
- Sensores ya incluidos a ser utilizados: Temperatura (SHT11) y humedad relativa (SHT11).

Asociado a la plataforma CM5000 irá el siguiente sensor compatible con la misma:

- Sensor de humedad de suelo, modelo EC-5

En cuanto a actuadores se detallan los siguientes a ser incorporados al sistema:

- Relé
- Boquillas nebulizadoras y ventiladores
- Electroválvulas

Esta red está conformada por nodos sensores y actuadores programados mediante el sistema operativo Contiki, donde los mismos se encargan de recolectar la información y comunicarse entre sí; un nodo sumidero que recibe la información recolectada y la retransmite hasta una estación base, a fin de poder procesar la información y pueda ser accesible al usuario mediante una interfaz gráfica diseñada en el entorno de desarrollo LabVIEW; y nodos actuadores, que controlan el funcionamiento de los componentes necesarios para la ejecución de los procesos de climatización, ventilación y riego, todo esto de forma automática.

REFERENCIAS

- [1] Ojha, T., Misra, S., & Raghuwanshi, N. S. (2015). Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 66-84.
- [2] Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and electronics in agriculture*, 36(2), 113-132.
- [3] Olalla, M., & Alberto, E. (2014). Red inalámbrica de sensores a través de 6LoWPAN para una agricultura de precisión aplicado en la Hacienda Cananvalle de la Ciudad de Ibarra, Tesis final de Master, Pontificia Universidad Católica de Ecuador..
- [4] Asolkar, P.S. and Bhadade, U.S., 2015, February. An Effective Method of Controlling the Greenhouse and Crop Monitoring Using GSM. In Computing Communication Control and Automation (ICCUBE), 2015 International Conference on (pp. 214-219). IEEE.
- [5] Fogel, Gerardo et Al. (2013) Diseño de Estaciones experimentales basados en módulos invernaderos climatizado para la práctica de ensayos climáticos sobre los principales cultivos del Paraguay. Tesis Final de Grado. Facultad Politécnica. Universidad Nacional de Asunción.
- [6] Kuo, B. C. (1987). *Automatic control systems*. Prentice Hall PTR.
- [7] Díaz, S. E., Pérez, J. C., Mateos, A. C., Marinescu, M. C., & Guerra, B. B. (2011). A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2), 252-265.
- [8] Saad, S.M., Kamarudin, L.M., Kamarudin, K., Nooriman, W.M., Mamduh, S.M., Zakaria, A., Shakaff, A.Y.M. and Jaafar, M.N., 2014, August. A real-time greenhouse monitoring system for mango with Wireless Sensor Network (WSN). In Electronic Design (ICED), 2014 2nd International Conference on (pp. 521-526). IEEE.
- [9] Erazo, M., Rivas, D., Pérez, M., Galarza, O., Bautista, V., Huerta, M. and Rojo, J.L., 2015, February. Design and implementation of a wireless sensor network for rose greenhouses monitoring. In Automation, Robotics and Applications (ICARA), 2015 6th International Conference on (pp. 256-261). IEEE.
- [10] Keshtgari, M., & Deljoo, A. (2012). A wireless sensor network solution for precision agriculture based on zigbee technology. *Wireless Sensor Network*, 4(1), 25.
- [11] Younis, M., Senturk, I. F., Akkaya, K., Lee, S., & Senel, F. (2014). Topology management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 58, 254-283.
- [12] Misra, S., Kumar, M. P., & Obaidat, M. S. (2011). Connectivity preserving localized coverage algorithm for area monitoring using wireless sensor networks. *Computer Communications*, 34(12), 1484-1496.
- [13] Bhat, N. S. (2012). Design and implementation of IEEE 802.15. 4 Mac protocol on FPGA. *arXiv preprint arXiv:1203.2167*.
- [14] www.zigbee.org, ZigBee Alliance, 2014.
- [15] www.hartcomm.org, 2014
- [16] www.isa.org, ISA100, Wireless Systems for Automation, 2014
- [17] www.bluetooth.com/Pages/low-energy.aspx, Bluetooth Low Energy, 2014.
- [18] *IEEE Standard for WirelessMAN-Advanced Air Interface for Broadband Wireless Access Systems*, IEEE Standard 802.16.1, 2012.
- [19] Iacono, L., Godoy, P., Marianetti, O. L., Garino, C. G., & Párraga, C. (2012). Estudio de la Integración entre WSN y redes TCP/IP. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, (10), 57-68.
- [20] www.contiki-os.org/start.html