



Artículo original

# **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL BASADO EN FPGA, PARA LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE UN INVERNADERO PARA EL CULTIVO DE TOMATE**

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN ELECTRONIC CONTROL SYSTEM BASED ON FPGA, WHICH TO CLIMATE CONDITIONS OF A GREENHOUSE FOR TOMATO CULTURE IN THE CITY OF TACNA, 2018

Cándido Molanes Miovich<sup>1</sup>  
Tito Leoncio Córdova Miranda<sup>1,2</sup>

Información del artículo:  
Recibido: 11/05/2017.  
Aceptado: 26/11/2019

<sup>1</sup> Ingeniero Electrónico

<sup>2</sup>Magíster docente en la Facultad de Ingeniería, Universidad Privada de Tacna

## *Resumen*

El propósito de la tesis es diseñar e implementar un sistema de control que optimizará las condiciones climáticas de un invernadero. El sistema está basado en una plataforma de desarrollo FPGA, concretamente la Nexys 4 ddr de digilent. El enfoque principal de la tesis fue la reconfigurabilidad y flexibilidad del hardware a futuro. Para ello el sistema de control utilizado es un microprocesador microblaze de 32 bits el cual recolecta los datos medidos por sensores, en base a un algoritmo de control desarrollado, se mantiene de forma automática los parámetros determinados por el experto en agronomía. Los parámetros a controlar son: temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, deseables en un invernadero de tomate en la ciudad de Tacna. La temperatura y humedad relativa se mantiene en un rango de (24 – 26) °C y (70 y 80) % respectivamente y la humedad del suelo debe llegar hasta la mitad de la raíz de la planta. Para medir la temperatura y humedad relativa se selecciona el sensor SHT85 con un rango de medición (-40 a 105) °C y (0 a 100) % respectivamente. La medición de la humedad del suelo se realiza mediante el sensor VH400 con dimensiones de (9.3x3.9x0.7) cm que cuenta con una regleta milimetrada. Además, se muestra las variables medidas en una consola de visualización en el monitor de una computadora aprovechando los datos enviados y recepcionados por el puerto uart de la tarjeta FPGA.

**Palabras claves:** Invernadero, Microprocesador, Sistema de control y automatización, sensor, reconfigurabilidad, flexibilidad.

## *Abstract*

The purpose of the thesis was to design and implement a control system that will optimize the climatic conditions of a greenhouse. The system was based on an FPGA development platform, specifically the Nexys 4 ddr of digilent; the main focus of the thesis was the reconfigurability and flexibility of the hardware in the future. To this end the control system used was a 32-bit microprocessor microblaze which collected data measured by sensors and based on a control algorithm developed, it maintained automatically the parameters determined by the expert in agronomy. The parameters to control were: temperature, relative humidity and humidity of the soil, desirable in a tomato greenhouse in the city of Tacna. The temperature and relative humidity were maintained in a range of (24 - 26) ° C and (70 and 80) % respectively, and it was achieved that the humidity of the soil reaches half of the root of the plant. To measure the temperature and relative humidity, the SHT85 sensor was selected with a measuring range (-40 to 105) ° C and (0 to 100) % respectively. The soil moisture measurement was made using the VH400 sensor with dimensions of (9.3x3.9x0.7) cm that has a millimeter strip. In addition, it showed the variables measured in a display console on the monitor of a laptop taking advantage of the data sent and received by the UART port of the FPGA card.

**Keywords:** Greenhouse, Microprocessor, Control and automation system, sensor, reconfigurability, flexibility.

Julio - Diciembre del 2019.

# INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el cultivo de tomate en la ciudad de Tacna se hace comúnmente en el suelo como medio de cultivo, con sistemas de riego precarios, y un clima desfavorable, así atravesando por una baja productividad. Una alternativa eficaz es utilizar un invernadero con un microclima y riego controlado. Otro elemento que normalmente se usa es un vivero para que las plantas crezcan hasta un determinado tamaño para luego puedan ser trasplantadas y su posterior cultivo en suelo. Pero poco propietarios de estas tierras usan invernaderos. Otro factor que no se tiene en cuenta, es la falta de capacitación de los agricultores en el cultivo de tomate, ya que no se cuentan con datos aplicados y de respaldo práctico con orientación a la realidad de Tacna. Los agricultores normalmente fertiirrigan sus plantas tres veces a la semana sin medir el consumo o los fertilizantes que aplican. La ciudad de Tacna tiene una zona de agricultura que cada día va aumentando cada vez más, con pocos propietarios de invernaderos, que presentan problemas de baja producción en meses de verano y no cuentan actualmente con la tecnología necesaria, están limitados a programadores de riego de alto costo y poca efectividad. Actualmente en el año 2018, los terrenos de cultivo van expandiéndose cada vez más, se extienden hasta llegar a terrenos cercanos al litoral. Los mayores problemas que se presentan son la escasez de agua por los cambios climáticos y el uso deficiente del recurso hídrico, por el uso de métodos precarios (riego por surcos, inundación). Un agricultor está acostumbrado a regar y fertilizar manualmente 3 veces a la semana sus plantas, lo que termina en un desperdicio de agua y fertilizantes. Pocos propietarios de estas tierras usan invernaderos, los cuales utilizan dos métodos distintos: como viveros, para cultivar todo tipo de plantas hasta que alcanzan el estado adecuado para su trasplante, distribución y venta (etapa de semilla a plantín), con un uso de todo el año, y como invernadero para cultivar algunos tipos de plantas hasta alcanzar una producción determinada (etapa de semilla a fruto), con un uso de 9 meses, ya que los 3 meses de verano se prefiere cultivar en el exterior, por el costo elevado de bajar la temperatura, lo cual está comprobado hasta el momento que no es rentable utilizar un control de temperatura. Cabe resaltar que es vital monitorear la temperatura y humedad relativa por el problema de garuas esporádicas durante el año. Ambos métodos de cultivo interno e externo tienen una tecnología de riego, que está muy limitada a un programador de riego de alto costo el cual es programado por un ingeniero agrónomo para regar en determinados horarios. Dependiendo de la evaporación, temperatura promedio, vientos y otros parámetros extraen mediante estadística cuantos minutos deben regar el cultivo, lo cual no tiene el rendimiento más óptimo.

Cuando se comenzaron a dar los primeros pasos de uso de tecnología en la agricultura la primera plataforma que se utilizó fue la computadora personal (PC), pero debido al ambiente del invernadero que se caracterizó por ser un ambiente ruidoso con altos niveles de humedad y cambios constantes de temperatura, es que poco a poco dejó de ser la aplicación más apropiada, siendo reemplazada por otras tecnologías. (Zhong-fu sun et al., 2005) Con el abandono de la plataforma de desarrollo PC, surgen dos nuevas tecnologías, Sistemas basados en microcontroladores o procesadores digitales de señales (DSP) que fueron desarrollados, con resultados prometedores. (J.P. Coelho et al., 2005) (Ramírez, A., 2014) utilizó como plataforma de desarrollo una tarjeta arduino uno basada en el microcontrolador ATmega328 creado por Atmel, se llegó a la conclusión de que al implementar un controlador on/off en este

microcontrolador se logra controlar y monitorear la temperatura y humedad de un invernadero. (Lara, K., 2015) utiliza una tarjeta arduino uno y se llegó a la conclusión que con este microcontrolador fue capaz de implementar 10 reglas de lógica difusa logrando replicar las tres zonas de vidas. (Rodolfo, E. , 2015) llegó a la conclusión que al implementar un sistema difuso manadami fue capaz no solo de controlar la temperatura y humedad sino de llevar las variables de temperatura y humedad a unos rangos óptimos para el cultivo de tomate bajo invernadero. Todos tuvieron propósito de controlar y monitorear las variables dentro de un invernadero, el primero para el cultivo hidropónico en México, el segundo para la preservación de orquídeas en el Perú, y el ultimo para cultivos en general en el país de Colombia. Lograron controlar y monitorear los parámetros dentro de lo presentado en sus objetivos, pero no han sido cubierto muchos aspectos por la amplitud y complejidad del tema, uno de los aspectos más importante es la reconfigurabilidad y flexibilidad del hardware que debe tener la plataforma de desarrollo a futuro, este es el enfoque principal de la tesis. (A. Pawlowski et al., 2016) explica que el desarrollo de sistemas empotrados para aplicaciones particulares ha demostrado ser una solución madura y eficaz que puede diseñarse para resolver diversos problemas complejos en aplicaciones industriales. Este antecedente ha migrado al campo de los invernaderos. En los últimos años los FPGAs, se han usado con éxito y se ha comprobado que es una solución de alto rendimiento, flexibilidad y bajo costo para aplicaciones en invernaderos (R. Castañeda et al., 2006).

Para simplificar el problema de control se debe tener en cuenta que el desarrollo del cultivo está sujeto principalmente a las variables climáticas circuncidantes, cantidad de agua y fertilizantes que se mezclan y suministran en el riego. (A. Pawlowski et al., 2009). Cuando se analiza estos subsistemas desde el punto de vista del control automático, se deben distinguir las variables que afectan el proceso de crecimiento del cultivo en cada problema de control (A. Pawlowski et al., 2016).

La tecnología de medición o detección de temperatura mediante sensores es una de las más utilizadas en el mundo.(VU MINH QUAN, 2011). Debido a la importancia de conocer el contenido de humedad de los materiales, se han desarrollado diversas técnicas para medirlo. (M. Quan, 2011). La medición de humedad del suelo se basa en la medición de contenido volumétrico de agua (vwc) o potencial matricial del suelo. Para fijar un control sobre la humedad del suelo, los sensores utilizados se apoyan en dos principios, el primero es la reflectometría del dominio del tiempo (TDR), y el segundo la reflectometría del dominio de la frecuencia (FDR) (F. Rodríguez et al., 2015). El exceso de suministro de agua produce un crecimiento pobre, menos flores y menor cantidad de fruto. Se necesita mucha agua, pero no un exceso. (PEDRO PONCE et al., 2015). En sus primeras semanas el consumo es bajo y varía entre 0.249L hasta 0.303 L, cuando está en plena producción de frutos consumirá alrededor de 0.713 hasta 1L de agua por día.(M. Hanping et al., 2017). También es de consideración mencionar, que la calefacción y la ventilación simultaneas van a dar o resultar en un aumento del consumo de energía bastante alto por parte del invernadero (J.C. BAKKER et al., 1995)

## OBJETIVOS

- Diseñar e implementar un sistema de control de humedad de suelo que optimice las condiciones climáticas de un invernadero en la ciudad de Tacna.
- Diseñar e implementar un sistema de monitoreo que muestre la temperatura y humedad relativa de un invernadero en la ciudad de Tacna.

## METODOLOGÍA

Estudio experimental. Para recolectar información se realizó visitas a campo con el propósito de conocer a fondo la problemática. Con un cuestionario de preguntas se dialogó con diversos expertos en la materia.

De acuerdo al análisis e investigación que se realizó, se resumió en un cuadro los factores que afectan la producción de tomate y sus rangos de crecimiento se detallaron en la tabla 1.

Tabla 1 Comparación teórico-práctica del factor y rango óptimo para el cultivo de tomate.

Factor	Rango de crecimiento	Rangos		
		de	Rango normal según cuestionario a experto	Rango optimo
Temperatura del aire	Etapas de germinación hasta plántula	de	15 – 28 °C	24 – 26 °C
Día soleado	Plántula hasta terminación	hasta	15 – 28 °C	25 - 27 °C
Día nublado	Plántula hasta terminación	hasta	15 – 28 °C	22 - 24 °C
Temperatura del aire nocturno	Plántula hasta terminación	hasta	15 – 28 °C	18 - 20 °C
Humedad relativa	Germinación el crecimiento temprano hasta terminación	hasta	65 – 75%	75 - 88 % 70 - 80 % 60 – 80 %
Humedad del suelo	Plántula hasta terminación	hasta	Regar hasta llegar a humedecer la mitad de la raíz	1Litro de agua por día a una conductividad eléctrica entre 1.8 –

En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control climático y de riego propuesto.

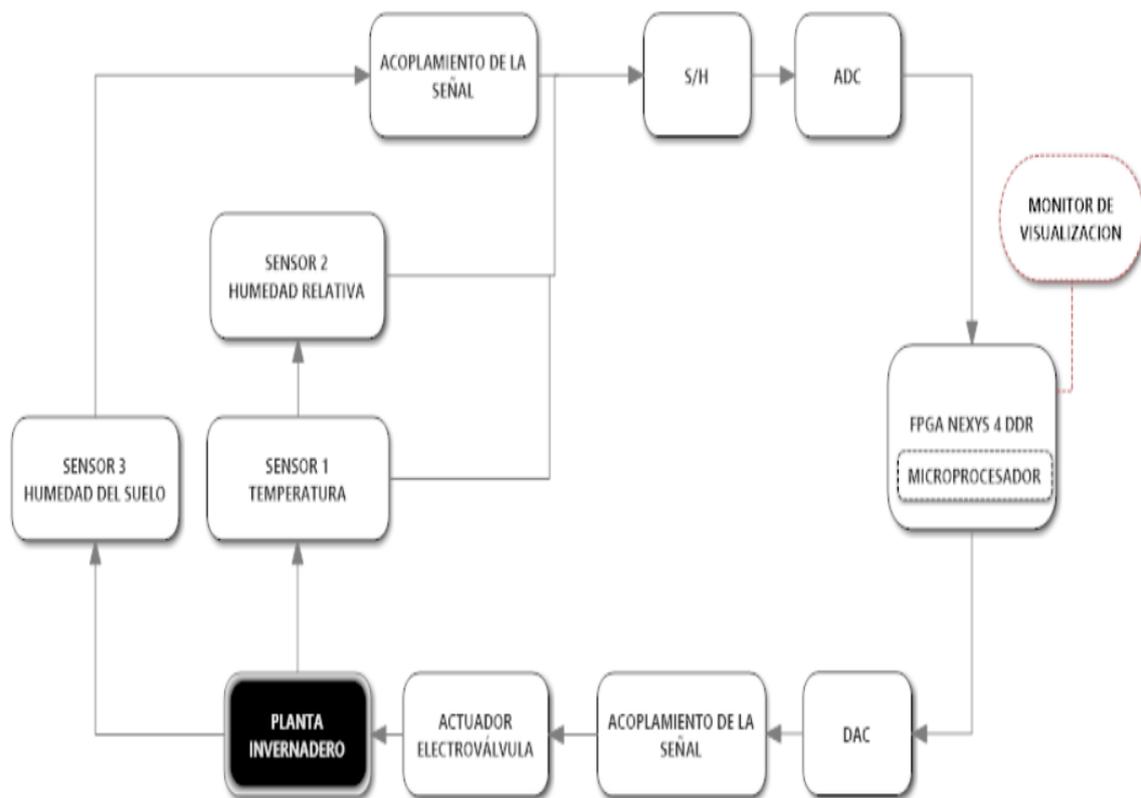


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de control climático y riego propuesto. Fuente: Elaboración propia

Estuvo conformado por un controlador, tres sensores, un actuador, y un monitor de visualización en consola en una laptop. Los sensores midieron la temperatura, humedad relativa y humedad del suelo. Los valores medidos del clima fueron enviados al microprocesador directamente, mientras que los de humedad del suelo pasaron antes por un acondicionamiento de señal.

La monitorización de los valores de los sensores se realizó a través de la medición y muestra de datos en el monitor de visualización, cuando los valores se desviaban de los rangos normales estos eran regulados automáticamente. La regulación del riego se llevó a cabo mediante la activación del sistema de riego, este se activaba o no en base al algoritmo de control, pero

siempre su objetivo principal era mantener el riego en la mitad de la raíz de la planta. Esta señal de control previamente paso por un acondicionamiento de la señal. Finalmente, el microprocesador se comunicó a través del puerto uart con una laptop que contaba con un monitor de visualización y mostro los parámetros climáticos en tiempo real. La elección de sensores se realizó conforme a la hoja técnica de los mismos, investigación en libros textos y requerimientos determinados por el experto, en la siguiente subsección se dan los detalles. La termocupla y el RTD fueron más convenientes para uso industrial, alta temperatura, alta precisión. Dos opciones muy aceptadas fueron usar termistores y circuitos integrado, pero al compararlos en base a los requerimientos, los circuitos integrados fue la opción más adecuada. El sensor SHT85 de tipo capacitivo fue el seleccionado, los criterios determinantes fueron precisión, linealidad, bajo costo. La resolución no fue relevante para este tipo de aplicación. Los tipos de sensores de humedad de suelo que se tuvo disponibles fueron: FDR, TDR bloques de yeso y sondas de neutrones. Los más utilizados en invernadero fueron FDR y TDR. El sensor seleccionado fue el VH400 que usa tecnología FDR, ya que fue el mejor en estabilidad a largo plazo y bajo costo. El modelo VH400 de la empresa vegetronix nos permitió acceder a un sensor de bajo costo con una precisión del 2% a 25°C, con un rango de medición que abarco desde 0% hasta 100%. Para lograr un diseño electrónico reconfigurable se utilizó un microprocesador microblaze de 32bits y el sistema FPro del dr. Ponchu.

En el microprocesador está el algoritmo basado en una lógica de control de tipo proporcional. Este recibirá los datos recolectados por los sensores y en base al algoritmo proporcionará una señal PWM al actuador regulando el ángulo del servomotor. Finalmente, con el control del ángulo del servomotor se logra regular el riego hacia las plantas en el invernadero, y mantener la temperatura y humedad relativa en sus valores óptimos 24 y 26°C, 70-80% respectivamente. Un circuito PWM básico constó de un contador binario y un comparador. Tuvo dos limitaciones, no se pudo controlar la frecuencia de conmutación y tampoco se pudo llegar al 100% del ciclo de trabajo. Y se resolvió al agregar dos componentes más un pre-escalador o contador especial (redujo la frecuencia del fpga a una frecuencia más baja) y un circuito de comparación extendido. (PONG P. CHU, 2017). El circuito PWM se configuro con una resolución de 8 bits el cual tiene una cantidad de 256 pasos, con el fin de llegar a la mitad de cada raíz de planta.

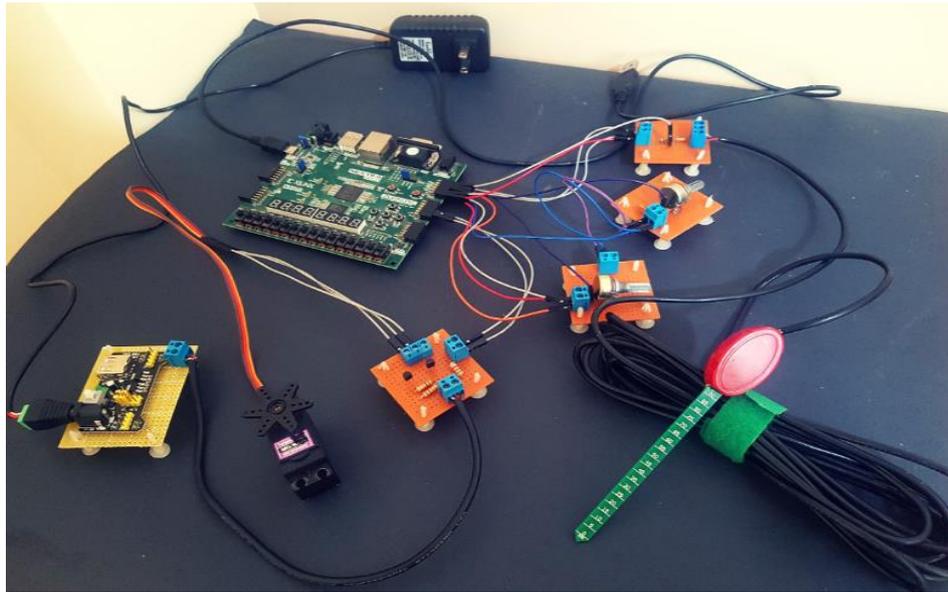
El actuador que se seleccionó como reemplazo de una servoválvula fue un servomotor de la marca towerpro modelo MG996R, ya que ambo admiten como señal de control una señal pwmy.

Para el monitor de visualización, el tipo de tecnología más usado fue el tipo uart y fue el que se empleó para el diseño propuesto. El monitoreo de las variables climáticas en el invernadero se visualizó a través de una consola en un monitor de visualización en una laptop.

## RESULTADOS

El sistema físico de control de clima y riego del invernadero se muestra en la figura 2.

Este sistema fue sometido a prueba en función de su capacidad para responder y garantizar a una combinación de reglas aportados por un experto en el ámbito de la supervisión y operación de invernaderos en la ciudad de Tacna. En vista de que no se contó con una infraestructura y equipo necesario para hacer pruebas dentro de un invernadero. Con el sistema físico creado se simuló las posibles entradas y salidas que podía tener el sistema de control. El simulador consiste en una tarjeta FPGA con 3 entradas para sensores. La salida PWM de la tarjeta está conectada al servomotor para representar la servoválvula que se debe controlar en el invernadero.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Sistema físico de control de clima y riego para un invernadero.

Se incluyeron dos escenarios:

1. Resultados del primer escenario

El primer caso se da en la época de verano cuando la temperatura se eleva y la humedad relativa tiende a bajar, y la planta de tomate normalmente consume más agua.

Esta temperatura si es mayor a  $26^{\circ}\text{C}$ , la humedad relativa es menor al 70% y la humedad del suelo está por debajo del 40% entonces el actuador tiende a encenderse y apagarse más veces. Podemos visualizar en la figura 3 que el sistema responde al primer escenario con éxito, monitoreando cuando una variable sale de su valor de referencia y luego procede a aperturar el servomotor.

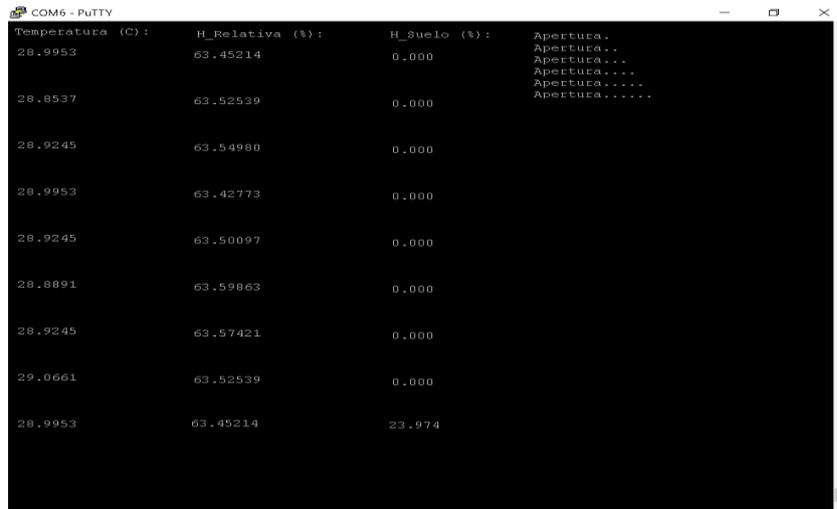


Figura 3.: Monitoreo y control de valores para el primer escenario.

## 2. Resultados del segundo escenario

El segundo caso se da en la época de invierno cuando la temperatura baja y la humedad relativa tiende a subir, y la planta de tomate consume menos agua. Si esta temperatura está por debajo de 24°C, la humedad relativa es mayor al 80% y la humedad del suelo es mayor del 50% entonces el actuador tiende encenderse y apagarse menos veces.

Podemos visualizar en la figura 4 que el sistema responde al segundo escenario con éxito, monitoreando cuando una variable sale de su valor de referencia y luego procede cerrar el servomotor. El riego es controlado por la señal pwm la cual nos permite tener una apertura grado a grado teniendo la posibilidad de llegar a la mitad de la raíz de cada planta de tomate a lo largo de las líneas de cultivo. El resultado obtenido de cada escenario de caso muestra que se tomaron medidas inmediatas para ajustar el nivel de clima en el invernadero de acuerdo con las condiciones dadas al controlador por expertos en la materia. No se detectaron problemas ni demoras en todo el proceso de prueba, lo que indica que el sistema de control desarrollado funcionó satisfactoriamente.

Temperatura (C):	H_Relativa (%):	H Suelo (%):	Cierre.....
21.1364	82.00683	5.371	Cierre....
			Cierre...
20.9240	82.25097	5.859	Cierre...
			Cierre..
20.9240	82.05566	5.615	Cierre..
			Cierre.
20.9594	82.20214	5.981	
20.8532	82.15332	5.493	
21.0656	82.05566	5.639	
20.9594	82.03125	7.031	
20.9948	82.08007	23.779	
21.0302	82.10449	47.509	

Figura 4. Monitoreo y control de valores para el segundo escenario.

## CONCLUSIONES

- El diseño simulado e implementado es reconfigurable y cuenta disponibilidad de crecimiento a futuro sin necesidad de cambiar toda la placa. Además, ha logrado responder a escenarios típicos en un invernadero.
- Se seleccionó sensores de temperatura, humedad relativa y humedad de suelo, así como un actuador que permitió el funcionamiento adecuado del sistema de control.
- Se diseñaron las etapas de acondicionamiento de señal de los sensores y actuadores, y luego se comprobó su correcto funcionamiento.

En el acondicionamiento de la señal del sensor se recomienda añadir un diodo zener antes del divisor resistivo para proteger todo, ya que el sensor tiene voltajes que podrían dañar algo si no se tiene cuidado. Cuando se intente leer un sensor con la tarjeta FPGA y se necesite una resolución más alta, se recomienda dimensionarlo tomando en cuenta la hoja de datos del puerto JXADC. Se puede mejorar el control teniendo información externa, por lo que se recomienda colocar un sensor de temperatura y humedad relativa afuera del invernadero. Se recomienda para mejorar la interacción del sistema de control y el personal calificado, modificar el código fuente para que el valor deseado de las variables pueda ser ingresado mediante el teclado de una PC o un Smartphone. En el desarrollo futuro, se recomienda probar el sistema en un entorno de invernadero con suficiente equipo con el objetivo de verificar los resultados obtenidos en el prototipo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Pawlowski, M. Beschi, J.L. Guzmán, A. Visioli, M. Berenguel, S. Dormido. (2016). Application of ssod-pi and pi-ssod event-based controllers to greenhouse climatic control.
- A. Ramírez. (2014). Diseño de un sistema para control y monitoreo de un invernadero hidropónico (tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, Mexico.
- A. Garg, R. Goyal, P. Munoth. (2016). Application of soil moisture sensors in agriculture: a review.
- A. Pawlowski, J. Sánchez, J. Guzman, F. Rodríguez, M. Berenguel, S. Dormido. (2009). Simulation of greenhouse climate monitoring and control with wireless sensor network and event-based control.
- E. Rodolfo. (2015). Diseño e implementación de un sistema de control de humedad relativa y absoluta en un invernadero (tesis de pregrado). Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogota D.C.
- F. Rodríguez, M. Berenguel, J. Guzmán, A. Ramírez Arias. (2015). Modeling and control of greenhouse crop growth (Almería). España: Springer.
- J.C. Bakker, G.P.A. Bot, H. Challa, N.J. Van de Braak. (1995). Greenhouse climate control. Wageningen: Wageningen Academic Publishers.
- J.P. Coelho, P.B. Oliveira, J. Boaventura Cunha. (2005). Greenhouse air temperature predictive control using the particle swarm optimisation algorithm.
- K. Ogata. (2010). Ingeniería de control moderna (Madrid). España: Pearson.
- K. Lara. (2015). Diseño e implementación de un sistema de control microclimático para la preservación de orquídeas endémicas del Perú en invernadero (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- L. Feng, H. Li, Y. Zhi. (2013). Greenhouse CFD simulation for searching the sensors optimal placements.
- M. Hanping, I. Ullah, N. Jiheng, Q. Javed, A. Azeem. (2017). Estimating tomato water consumption by sap flow measurement in response to water stress under greenhouse conditions.
- M. Pelletier, R. Schwartz, G. Holt, J. Wanjura, T. Green. (2016). Frequency domain probe design for high frequency sensing of soil moisture.
- M. El Ghomari, H. Tantau, J. Serrano. (2005). Non-linear constrained MPC: Real-time implementation of greenhouse air temperature control.
- P. Ponce, A. Molina, P. Cepeda, E. Lugo, B. Maccleery. (2015). Greenhouse design and control (México). Ciudad de México: CRC Press.
- P. Chu. (2017). FPGA Prototyping by VHDL examples 2da (USA). Hoboken: Wiley.
- R. Castañeda, E. Ventura, R. Peniche, G. Herrera. (2006). Fuzzy greenhouse climate control system based on a field programmable gate array.
- V. Quan. (2011). Review of sensors for greenhouse climate monitoring.
- Z. Fu, X. Xing, X. Jun. (2005). Greenhouse climate control techniques in China and the setup of the control system for a chamber.
- Z. Varas. (2013). Diseño de un sistema electrónico para riego de césped de jardín empleando un sensor de humedad de suelos y comunicación inalámbrica. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.