

Diseño e implementación de un sistema de automatización y control para cultivos acuapónicos en zonas urbanas

Karen Yissel Marín Franco ¹, Luis Fernando Riveros Orozco ¹

¹ Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia

Resumen: en el presente trabajo se plantea un sistema de automatización y control para cultivos acuapónicos en entornos urbanos empleando una técnica de control moderno multivariable. El prototipo desarrollado alcanzó un nivel de madurez tecnológica TRL 7 y consta de un cultivo acuapónico cuya luminosidad y temperatura del agua son controladas a través de un sistema de control predictivo híbrido con Fuzzy aplicado a cuatro acciones fundamentales: oxigenación, circulación y aireación de agua, y luminosidad de las plantas. Para su operación se ha diseñado una página web que permite el acceso remoto a las funciones de control, supervisión y monitoreo, así como un sistema de gestión basado en servicios comunicados mediante MQTT. El sistema de automatización utiliza una red local que acopla la comunicación entre los diferentes componentes del sistema (sensores, actuadores, microprocesador y microcontrolador), siendo capaz de detectar el estado de la conectividad a internet y tomar acciones en caso de falla.

Introducción: el proyecto se enfoca en la creación de un sistema de cultivo acuapónico adaptativo para su uso en entornos urbanos, a través del desarrollo de un prototipo con un sistema de automatización que permita a los usuarios tener versatilidad en cuanto a autonomía y supervisión. Para lograr el objetivo general se plantearon varias etapas que incluyen la selección de una técnica acuapónica adecuada para la adaptabilidad y facilidad de implementación del cultivo, el diseño preliminar de la estructura física, la creación de una primera versión del prototipo con capacidad de control manual y automático, la implementación de una técnica de control moderno para sistemas dinámicos y complejos, y la evaluación de su utilidad desde diferentes perspectivas incluyendo la eficiencia energética y el análisis matemático.

Fundamentación teórica:

- *Cultivos acuapónicos:* La acuaponía es una técnica de cultivo que mediante la combinación de cultivos hidropónicos y acuícolas posibilita el crecimiento de plantas y peces mediante la recirculación de agua. La acuaponía permite solucionar inconvenientes tanto de la hidroponía como de la acuicultura aprovechando la relación simbiótica entre plantas, peces y bacterias. Los desechos producidos por los peces y los restos de alimentos que estos dejan son convertidos en nutrientes para el crecimiento de las plantas por medio de procesos bacterianos [1].
- *Automatización y control:* La automatización es un campo de la ingeniería que se encarga de diseñar y desarrollar sistemas que sean capaces de realizar tareas de manera autónoma, sin la intervención humana directa [2]. Por su parte, el control es una técnica utilizada en la automatización de sistemas con el objetivo de regular y estabilizar variables importantes

de un proceso, asegurando que se mantengan dentro de ciertos límites o valores deseados [3].

La automatización y el control se utilizan en una gran variedad de áreas. En la agricultura, se emplean generalmente para aumentar la eficiencia, mejorar la calidad de los productos y reducir los costos [4]. Los sistemas de automatización y control, integrados a un cultivo, permiten generar acciones de control sobre procesos claves para su bienestar tales como el riego, la fertilización, la iluminación, la ventilación y la gestión de las condiciones climáticas.

- *IoT*: es la agrupación e interconexión de dispositivos y objetos a través de una red (ya sea local o conectada a Internet), donde todos ellos pueden ser visibles e interactuar entre sí. Estos dispositivos generalmente tienen que transmitir y recibir datos, para ello generalmente se emplea MQTT un protocolo de red ligero que resulta fácil de implementar y puede comunicar datos IoT de manera eficiente en términos de consumo de recursos y ancho de banda [5].
- *Bases de datos no relacionales*: principalmente se emplean para almacenar datos no estructurados, o de los que no se tienen ningún esquema o información predefinida [6]. Estas no almacenan la información en tablas sino a través de documentos y están diseñadas para soportar grandes volúmenes de datos por lo que son ampliamente utilizadas en IoT. Una de las más utilizadas es Firebase realtime, ya que permite alojar y disponer de los datos e información en tiempo real, manteniéndolos actualizados, aunque el usuario no realice ninguna acción [7].
- *Servicios en Linux*: systemd es un conjunto de bloques básicos de compilación para un sistema Linux. Proporciona un gestor de sistemas y servicios que genera una notable capacidad de paralelización pues utiliza la activación de socket y D-Bus para iniciar los servicios, permite el inicio de *daemons* bajo demanda, realiza un seguimiento de los procesos con el uso de los grupos de control de Linux, mantiene los puntos montaje y servicios de montaje automático e implementa un elaborado sistema de gestión de dependencias basado en un control lógico de los servicios [8].
- *Control On/Off*: es una de las formas básicas de control mediante la cual la salida del controlador es binaria (encendido o apagado), sin un estado medio. Un controlador on/off cambia la salida de acuerdo con una configuración predeterminada ya sea por acciones, temporizadores o setpoint [9].
- *Control predictivo*: es una metodología de control que hace uso del modelo de la planta para predecir las salidas futuras y con base en ello ejercer las acciones de control en el presente [10]. Para optimizar el control en sistemas complejos y dinámicos, mejorando la respuesta en tiempo real basados en un valor futuro, suele emplearse MPC (Model Predictive Control) [11].
- *Control fuzzy*: es una técnica de control cuyo uso es popular en sistemas en los que hay dificultad (o imposibilidad) para modelarlos a través de ecuaciones matemáticas. El desarrollo del control fuzzy tiene su origen en los sistemas basados en reglas para la toma de decisiones y en la lógica difusa para la evaluación de estas. Los controladores fuzzy toman los valores de las variables de entrada y las procesan mediante las reglas establecidas para decidir los valores de salida [12][13].

Resultados:

En primera instancia, se construyó una estructura física que alberga todos los componentes del cultivo acuapónico, incluyendo las plantas, los peces y el sistema de recirculación de agua, además de los componentes eléctricos y electrónicos necesarios para la automatización y el control del sistema.

Para la regulación del cultivo acuapónico, se sensaron tres variables: luminosidad, total de sólidos disueltos TDS y la temperatura del agua. Además, se controló directamente la luminosidad de las plantas mediante dos lámparas con luces especiales para el crecimiento de cultivos. Para la regulación indirecta de la temperatura del agua, se empleó una bomba de agua para la circulación, una bomba de aire para la oxigenación, y un ventilador para la aireación. Se utilizó un dosificador de alimento que garantiza la alimentación de los peces hasta por seis días sin intervención humana. Para el procesamiento de los datos y el control de los componentes del sistema, se utilizó una Raspberry Pi 3 como microprocesador y una ESP32 como microcontrolador.

Para cumplir con los objetivos planteados, se realizaron varios desarrollos que hacen posible que el prototipo final cuente con las siguientes funcionalidades:

- *Varias modalidades de control remoto:* El sistema de automatización ofrece tres opciones de control: modo manual, automático y parada de emergencia. En el modo *manual*, se puede controlar el estado de los actuadores del sistema a distancia, a excepción del dosificador de alimento, que requiere conexión con la misma red que el cultivo. Por su parte, el modo *automático* permite programar el estado de los actuadores en una combinación específica o ejecutar un control moderno predictivo híbrido con fuzzy. En cuanto al modo *parada de emergencia*, permite desactivar todos los elementos inmediatamente en caso de algún riesgo en el funcionamiento del sistema.
- *Visualización remota:* mediante la visualización de fotografías con una frecuencia de cambio cada tres segundos, se puede observar la zona del componente acuícola del cultivo y parte del dosificador de alimento.
- *Monitoreo remoto:* esta funcionalidad permite visualizar en un tablero virtual y de manera gráfica el comportamiento de las variables sensadas en diferentes rangos de tiempo (día/semana/mes), al igual que el estado (on/off) en tiempo real de los elementos de acción que hacen parte del sistema de automatización.



Figura 1. Control, visualización y monitoreo remoto

Para llegar a contar con dichas funcionalidades los desarrollos implementados fueron:

- *Página web*: se implementó una página web la cual se encuentra hospedada en Firebase bajo el paradigma backend-less, usa node.js con el framework de react, emplea como base de datos Firebase real-time y su arquitectura es por componentes y vistas reusables bajo el paradigma POO (Programación Orientada a Objetos).
- *IoT*: se utilizó una solución basada en el protocolo de comunicación MQTT. Esta tecnología permitió administrar la comunicación entre la Raspberry y la ESP32, enviar los resultados de los sensores desde la ESP32 a la Raspberry de forma transparente para su posterior almacenamiento en la base de datos, y verificar el funcionamiento de cualquier componente del sistema mediante un móvil. Si bien la solución implementada utilizó tecnología IoT, no se trató de una solución completa de esta, sino que se basó en el protocolo MQTT para lograr una solución más específica y acorde a las necesidades del proyecto.
- *Control*: como primer paso, se recopilaron datos y se modificaron los parámetros de acción con el fin de conocer el comportamiento del sistema, para lograrlo se implementó un sistema de control on/off programado por ventanas de tiempo. Posteriormente se definió un controlador predictivo híbrido con fuzzy que permite ajustar las acciones de control de oxigenación, aireación y circulación del agua e iluminación de plantas para controlar la luminosidad que llega a las plantas y la temperatura del agua, logrando adaptarse a las condiciones cambiantes del cultivo, manejar la incertidumbre y perturbaciones del sistema, y mantener ambas variables en un valor deseado
 - *On/Off*: en total se recolectaron 600 datos para su posterior análisis y se encontraron unos porcentajes mínimos de funcionamiento para las acciones de control de circulación (20%) y oxigenación (30%) por cada ciclo de 2 horas, con los cuales se garantiza la supervivencia tanto de los peces como de las plantas.
 - *Control predictivo híbrido con Fuzzy*:

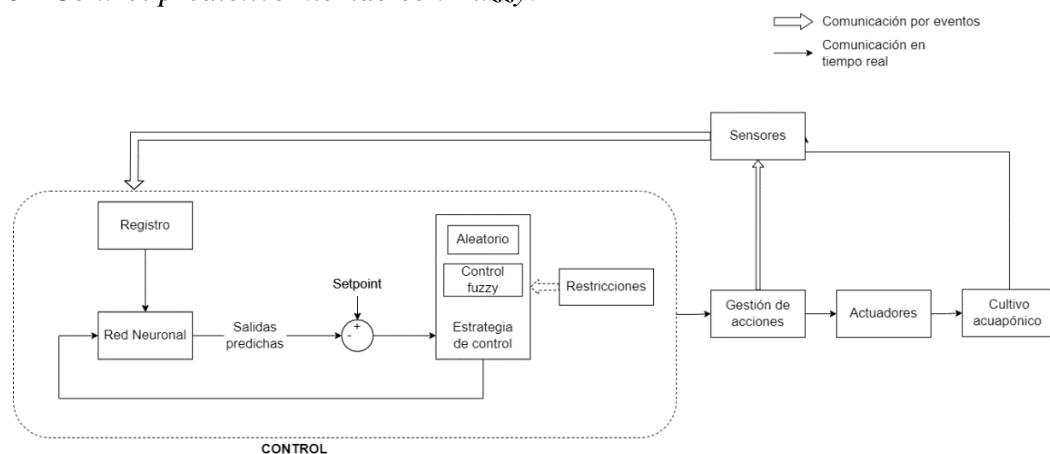


Figura 2. Arquitectura de control

Se implementó una *red neuronal* artificial por series de tiempo para modelar el comportamiento de las variables temperatura del agua y TDS. Se realizó una evaluación de la red obteniendo como resultado un R2 para la predicción de TDS del 98,5% y un R2 para la predicción de la Temperatura del 89,9%.

Se implementó un *control fuzzy* que permite calcular cuál debe ser el porcentaje de funcionamiento de las lámparas durante el ciclo siguiente, con el fin de que la luminosidad se establezca en un valor ideal.

Por su parte, la estrategia de *generación aleatoria* de estímulos es una técnica empleada para determinar la mejor combinación del porcentaje de funcionamiento de circulación, oxigenación y aireación para el siguiente ciclo.

Al implementar el control se obtuvo una mejora entre 30% y 40% en la respuesta oscilatoria del sistema para la variable temperatura.

- *Sistema de gestión*: se implementó bajo la arquitectura de servicios usando systemd y crontab en linux con scripts en python y en bash. Funciona con comunicación vía MQTT y variables en RAM. Permite gestionar la toma, envío, modificación y lectura de datos, además de la gestión del control y visualización remota.

Discusión y conclusiones:

- La implementación de un sistema de control híbrido (predictivo/difuso) permitió obtener resultados positivos en términos de control de la luminosidad y la temperatura del agua. Esto indica que el planteamiento del modelado y funcionamiento del sistema a partir de ciclos fue un aspecto clave para lograr una mejor gestión del sistema.
- Se demostró que se puede hacer un control indirecto de la variable temperatura del agua mediante el entrenamiento de una red neuronal en una arquitectura de control predictivo tipo MPC híbrido con Fuzzy.
- El desarrollo de un sistema de gestión robusto y escalable garantizó el correcto funcionamiento del sistema de automatización y control, permitiendo responder de manera efectiva ante posibles inconvenientes.
- Se demostró que las redes neuronales con el nivel de abstracción pertinente y la cantidad de datos adecuada, son una herramienta eficaz a la hora de generar modelos de predicción para sistemas dinámicos y con relaciones entre variables tan complejas.
- El diseño de una arquitectura web simple pero escalable permitió la integración de diferentes componentes del sistema aumentando la autonomía de este y facilitando acciones de control remotas y de obtención de datos.
- La implementación del sistema de automatización y control demostró ser altamente eficiente en términos energéticos. Aplicando la técnica de predictiva, se logró reducir el consumo energético en un 33 % en comparación con no aplicar control, en cambio con el on/off usando la configuración acorde a la experticia, se obtuvo una reducción del 17 % en comparación con no aplicar control. Estos resultados demuestran la importancia de implementar soluciones tecnológicas en la agricultura para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental.
- En un contexto urbano con recursos escasos, el sistema demuestra ser una alternativa integral para abordar problemas de eficiencia energética y escasez de tiempo y espacio

Referencias:

[1] R. Martínez, “La acuaponía como alternativa de producción agropecuaria sostenible ¿una posibilidad para tener en casa?” Revista de divulgación científica de nutrición ambiental y

seguridad alimentaria de la Universidad de Guanajuato, vol. 2, no. 15, Oct 2019. [Online]. Available: <https://www.ugto.mx/medicinaysa/images/Revistas2013/medicinaysa-sept-oct-2013-universidad-guanajuato.pdf>

[2] J. M. Martín-Sánchez and S. L. Shah, "Multivariable adaptive predictive control of a binary distillation column," *Automatica*, vol. 20, no. 5, pp. 607–620, 1984. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005109884900116>

[3] K. Ogata, *Modern Control Engineering: Pearson New International Edition*, 5th ed. London, England: Pearson Education, Aug. 2013.

[4] C. A. Ramírez Gómez, "Aplicación del machine learning en agricultura de precisión," *Cintex*, vol. 25, no. 2, pp. 14–27, Dec. 2020.

[5] "¿Qué es el MQTT? - Explicación del protocolo MQTT - AWS". Amazon Web Services, Inc. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/es/what-is/mqtt/>

[6] "Bases de datos no relacionales - Bases de datos de gráficos - AWS". Amazon Web Services, Inc. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/es/nosql/>

[7] Q. Martínez, "Las 5 mejores bases de datos IIoT de código abierto". Boot & Work Corp. S.L, Nov 2021. [Online]. Available: https://www.industrialshields.com/es_ES/blog/raspberry-pi-para-la-industria-26/post/las-5-mejores-bases-de-datos-iiot-de-codigo-abierto-400

[8] "Product Documentation for Red Hat Enterprise Linux 8.0". Red Hat Customer Portal, 2020. [Online]. Available: https://access.redhat.com/documentation/es-es/red_hat_enterprise_linux/8/html/configuring_basic_system_settings/managing-services-with-systemd_configuring-basic-system-settings

[9] "Control de temperatura | Reguladores y controladores". Termopares, células de carga, RTDs, transductores de presión, medidores de tensión, Wireless y automatización. [Online]. Available: <https://es.omega.com/prodinfo/controladoresdetemperatura.html#:~:text=Un%20controlador%20ON/OFF%20es,atraviesa%20el%20punto%20de%20ajuste>

[10] D. F. Sendoya, "¿Qué es el Control Predictivo y Hacia Dónde se Proyecta?", *Publicaciones e Investigación*, vol. 7, p. 53, Jun 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22490/25394088.1106>

[11] S. Lucia, P. Rumschinski, A. J. Krener, and R. Findeisen, "Improved design of nonlinear model predictive controllers," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 23, pp. 254–259, 2015, 5th IFAC Conference on Nonlinear Model Predictive Control NMPC, 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315025768>

[12] D. A. Tibaduiza, I. Amaya, S. Rodríguez, N. Mejía y M. Flórez, "Implementación de un control fuzzy para el control cinemático directo en un robot manipulador", *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 19, n.º 3, pp. 312–322, Dic 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4067/s0718-33052011000300002>

[13] "FUZZY CONTROL". UTN.BA. <https://www.frba.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2021/02/Fuzzy-Control.pdf>