

Diseño y Simulación de un Sistema de Instrumentación y Control para la Dosificación de Cultivo Hidropónico de Hortalizas

Design and Simulation of an Instrumentation and Control System for the Dosing of Hydroponic Vegetable Crops

Edgar Andrés Alférez Vega, *Especialista en Instrumentación y Control Industrial*¹, Laura Marcela Herrera Medina, *Especialista en Instrumentación y Control Industrial*², Javier Eduardo Martínez Baquero, *Msc Tecnología Educativa y Medios Innovadores para la Educación*³
^{1,2,3}Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia

¹edgar.alferez@unillanos.edu.co

²laura.herrera.medina@unillanos.edu.co

³jmartinez@unillanos.edu.co

Resumen – En este artículo se presenta el diseño de un sistema de instrumentación y control para la dosificación de nutrientes en un cultivo hidropónico de hortalizas. Para el cultivo mencionado es necesario una mezcla de nitrógeno, calcio, potasio, fósforo, azufre, magnesio y agua para lograr que las hortalizas reciban la concentración de nutrientes requeridas para su desarrollo. Para esto se diseñó un sistema de instrumentación que sensa el PH de la mezcla de nutrientes y la temperatura ambiente, al igual que dosifica la cantidad de cada nutriente según el tipo de hortaliza. Por defecto se programó una dosificación para alimentar acelgas, espinacas, lechuga crespita y lechuga morada. En el diseño se sugiere el uso de una tarjeta programable Arduino Uno, el cual se comunica con LabVIEW® para su interacción con el usuario, monitoreo y almacenamiento de datos en un computador. Con el proyecto desarrollado se busca tener un sistema que permita la reducción de los tiempos de cosecha y la mejoría en la calidad del producto, a través del seguimiento de las variables externas y la cantidad de nutrientes suministrados a las hortalizas.

Palabras clave: Cultivo hidropónico, diseño, dosificación, hortalizas, instrumentación, simulación.

Abstract – This paper presents the design of an instrumentation and control system for the dosing of nutrients in a hydroponic vegetable crop. For this crop, a mixture of nitrogen, calcium, potassium, phosphorus, sulfur, magnesium and water is necessary to ensure that the vegetables receive the concentration of nutrients required for their development. For this purpose, an instrumentation system was designed that senses the pH of the nutrient mixture and the ambient temperature, as well as doses the amount of each nutrient according to the type of vegetable. By default, a dosage was programmed to feed chard, spinach, curly lettuce and purple lettuce.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

The design suggests the use of a programmable Arduino Uno board, which communicates with LabVIEW® for interaction with the user, monitoring and data storage in a computer. The developed project seeks to have a system that allows the reduction of harvesting times and the improvement of product quality, through the monitoring of external variables and the amount of nutrients supplied to the vegetables.

Keywords: Hydroponic crop, design, dosage, vegetables, instrumentation, simulation.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años Colombia ha venido desarrollando una política agraria enfocada al aumento de la producción[1][2] y la tecnificación de los diferentes productos del campo[3][4], con el fin de mejorar y dar un impulso a este sector de la economía del país[5][6]. Potencializar el campo colombiano permitirá proyectar al país como la mayor despensa agrícola de la región y aportará significativamente al PIB de la nación.

Bajo esta circunstancia se hace notorio la necesidad de implementar nuevas técnicas de cultivo[7] que permitan tener una producción mucho más eficiente[8] en términos de tiempo de cosecha y calidad del producto reflejándose en un beneficio económico[9][10]. Una de las técnicas que viene en aumento es la de los cultivos hidropónicos[11], que no son otra cosa más que cultivos en agua, no en tierra como se realiza convencionalmente

Esta clase de cultivo crea nuevos desafíos[12][13][14], ya que, al no utilizar la tierra como sustrato, se requiere

suministrar de forma artificial los nutrientes que las plantas adquirían a través de la tierra[15][16]. Es por esto, que el presente proyecto busca satisfacer la necesidad de proporcionar de forma controlada los nutrientes que se requieren para el cultivo[17]. En este caso se programó para cuatro hortalizas: acelga, espinaca, lechuga crespa y lechuga morada.

En cultivos hidropónicos la instrumentación no ha sido muy desarrollada y menos en la parte de dosificación de nutrientes[18][19]. En el comercio se encuentran mezclas de nutrientes “estándar” para todo tipo de cultivos, sin embargo, estas a pesar de aportar nutrición a las plantas, no lo hacen de forma óptima y atendiendo las necesidades de cada planta, por eso la necesidad de crear un sistema de dosificación automatizado que responda a la necesidad de cada cultivo.

Lograr integrar un modelo de cultivo con instrumentación electrónica[20] permite obtener información más detallada de cómo y cuánto están consumiendo las plantas y en qué tiempo lo hacen[21]. Con esta información se puede determinar tendencias que permiten dar ajustes a las necesidades nutricionales de la planta, sobre todo cuando las condiciones externas como el clima son variables y afecten el comportamiento del cultivo. Según la temperatura, se hace necesario una fórmula diferente de nutrientes atendiendo el déficit de cada especie de hortaliza. De esta manera se puede garantizar una producción más constante y prolongada.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, en la figura 1, se muestra la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, la cual corresponde a un proceso evolutivo desarrollado paso a paso con la posibilidad de regresar al paso anterior y hacer los ajustes necesarios

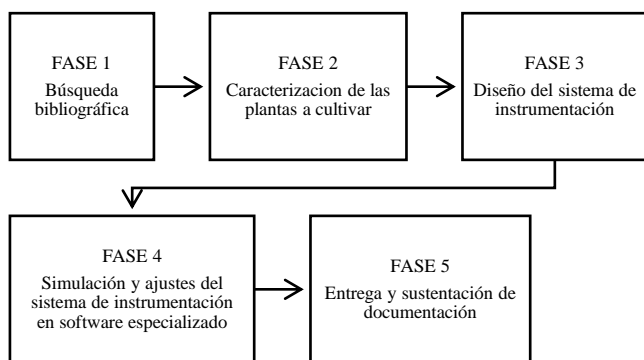


Figura 1 Metodología por fases

Luego de una búsqueda bibliográfica y consultas con expertos en el área agronómica, se definió una mezcla de nutrientes para cada hortaliza elegible.

En la tabla 1 se pueden observar las cantidades de compuestos necesarios para un cultivo hidropónico por cada litro de agua a una temperatura de 20°C. Esto permite obtener la cantidad adecuada de calcio, nitrógeno, fósforo, potasio y azufre, los cuales se catalogan como los macronutrientes necesarios para el desarrollo de una planta.

TABLA I
COMPUESTOS PARA CULTIVOS HIDROPÓNICOS POR LITRO DE AGUA

COMPUESTO	CANTIDAD
Nitrato de calcio	815,35mg
Nitrato de potasio	291,52mg
Fosfato de monopotasio	219,52mg
Sulfato de magnesio	507mg

A. Descripción del proceso

El proceso inicia con los nutrientes almacenados en los tanques TK-101, TK-102, TK-103, TK-104 (Nitrato de calcio, nitrato de potasio, fosfato de monopotasio y sulfato de magnesio respectivamente). Estos tienen una capacidad de 100 litros cada uno y son llenados de forma manual. Dentro de los tanques se encuentran los sensores LSL-101, LSL-102, LSL-103, LSL-104, los cuales detectan nivel bajo cuando queda 10% de producto en el tanque. Esta señal generada por los interruptores es configurada para emitir una alarma que se puede visualizar en la interfaz virtual avisando al operario que debe llenar el tanque y así mismo bloquea la activación de la bomba dosificadora que le corresponde a cada tanque.

A la salida de los tanques se encuentran unas bombas dosificadoras P-101, P-102, P-103 y P-104 que son activadas desde la HMI (Human Machine Interface - Interfaz Hombre Máquina) por el operario de la planta, seguidas de los transmisores de caudal FT-101, FT-102, FT-103 y FT-104. Estos permiten tener el control de la cantidad de nutrientes que pasan al tanque homogeneizador según el tipo de hortaliza escogida y una vez se complete la cantidad de flujo establecida, se enviará una señal de paro a la bomba dosificadora que corresponda.

Cada uno de los nutrientes que son impulsados por las bombas dosificadoras son llevados hasta un tanque homogeneizador o tanque principal TK-201, donde se realiza la mezcla y homogenización del producto de riego. Este tanque cuenta con una capacidad nominal de 500L y contiene un transmisor indicador de nivel LIT-201, un transmisor indicador de PH AE-201 y un agitador M-201.

Para la realización de la mezcla del producto de riego, el tanque deberá ser prellenado con un nivel determinado de agua, esta variable es medida por el LIT-201, el cual dará la señal de cierre de la electroválvula LV-201, que permite el suministro

de agua de la red de suministro existente, este elemento también se visualiza en la interfaz virtual. El agitador M-201 permite que los nutrientes se mezclen de forma homogénea con el agua manteniéndose activo mientras el nivel del tanque TK-201 este por encima del 25% de su capacidad

Una vez realizada la mezcla, esta pasa al tanque de suministro TK-202, impulsada por la electrobomba P-200. La bomba P-200 se encuentra conectada en serie con el interruptor de flujo FS-200 que sirve de protección para la bomba ante una ausencia de flujo.

El TK-202 es un tanque que se encuentra a una altura superior, con una capacidad nominal de 500 litros, el cual

almacena la mezcla para distribuirla a los cultivos. Este tanque también cuenta con un transmisor indicador de nivel LIT-202 que envía la información a la interfaz virtual. La salida del tanque es por medio de una válvula manual que accionada por el operario. El riego hacia los cultivos de esta mezcla se hará por gravedad.

Finalmente, se adiciona un transmisor indicador de temperatura TIT-100 que cumple la función de monitorear la temperatura ambiente de los cultivos. Este valor se puede observar en la interfaz virtual.

En la figura 2 se muestra el diagrama P&ID del proceso, el cual sintetiza la información anterior.

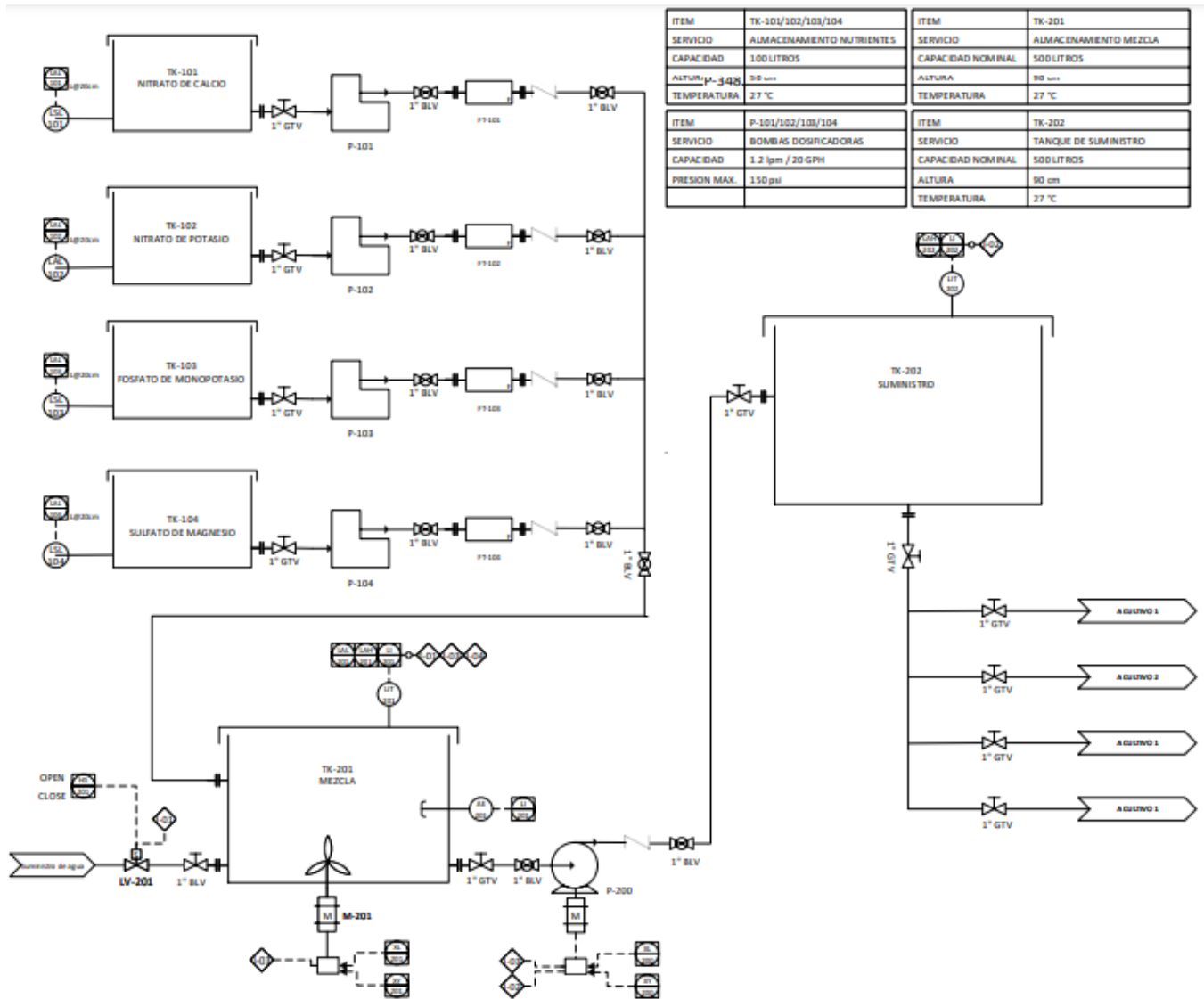


Figura 2 Diagrama P&ID del proceso

B. Sensores

En esta sección se describe con mayor detalle las variables a sensar:

Temperatura: Las hortalizas se cultivan a una temperatura entre 15°C a 20°C aproximadamente. Esta medición va a ser informativa, ya que en la acción de control no interviene la modificación de la temperatura por tratarse de cultivos al aire libre, es decir no se incluyen invernaderos. El sensor monitoreará la temperatura ambiente

PH: La mezcla suministrada como alimento a las hortalizas debe cumplir con un valor en PH de 6; para asegurar esto, se dispone de un medidor de PH en el interior del tanque donde se realiza la mezcla.

Teniendo en cuenta que el PH del agua es variable, se debe realizar una compensación con los nutrientes suministrados. El fósforo reduce los niveles de PH y el potasio los aumenta, es decir que, según la lectura de esta variable, se modificará la dosificación de los nutrientes. Este será un análisis que tendrá que realizar el ingeniero especialista en el área, con la ayuda de los datos obtenidos por el sistema instrumentado.

Caudal: Para el proceso de dosificación es necesario medir el caudal en el ducto de salida de cada nutriente, así como en el paso de la mezcla entre el TK-201 y TK-202. Para esto son necesarios cinco caudalímetros. Uno de ellos es de tipo ON/OFF y estará ubicado en serie con P-200 para evitar que esta falle. Los cuatro restantes estarán ubicados en serie con las bombas dosificadoras para controlar el paso de los líquidos.

Nivel: Para evitar que las bombas fallen, entren en cavitación y tomar algunas decisiones en el sistema de control, se deben instalar diferentes sensores de nivel en el proceso. Para los tanques de los nutrientes serán sensores de tipo ON/OFF que detecten el bajo nivel. Para el tanque de la mezcla y el tanque de suministro son necesarios transmisores para monitorear el nivel. El transmisor LTI-201 es muy importante, ya que nos da la información inicial de la cantidad de agua que está directamente relacionada con la cantidad de nutrientes a dosificar.

C. Actuadores

Para el proceso son necesarios los siguientes actuadores:

Bombas dosificadoras:

Para la dosificación de los nutrientes, se dispone de cuatro bombas dosificadoras, una a la salida de cada tanque. Estas bombas se activan por orden del operario a través de la HMI y se desactivan por orden de los sensores de flujo conectados en serie a cada una de ellas.

Agitador: Una vez se ha agregado cada uno de los nutrientes y el agua al tanque principal, se hace necesario garantizar la homogeneidad de la mezcla. Para eso, se incluyó un agitador.

Electrobomba: Una vez se tiene preparado el alimento de las hortalizas en el tanque principal, se lleva la mezcla al tanque de suministro TK-202 por medio de una electrobomba. Esto va a permitir que el riego se realice por gravedad a los cultivos.

Válvula: Permite el paso del agua de suministro hacia el tanque homogeneizador. Es activada por orden del operario a través de la HMI y desactivada por el sensor de nivel LTI-201

D. Interfaz virtual

La interfaz virtual desarrollada en LabVIEW®2019, le permite al usuario elegir el tipo de hortaliza (Acelga, Espinaca, Lechuga Morada y Lechuga Crespá). También puede asignar la cantidad de cada uno de los nutrientes a la mezcla. Se recuerda que por defecto se tienen valores definidos.

A manera de alarma, se dispone de un indicador de bajo nivel para los tanques que contienen los nutrientes.

Por otra parte, el usuario puede visualizar el nivel del tanque de la mezcla, el nivel del tanque de suministro, la temperatura ambiente y el PH de la mezcla.

La programación de la interfaz se divide así:

Inicialización del puerto de comunicación: Para comenzar, se debe elegir el puerto COM en el cual se encuentra conectada la tarjeta programable, como se observa en la figura 3.



Figura 3 Inicialización del puerto de comunicación

Escritura de datos: En esta fase se envían los datos modificados por el usuario a través del puerto serial a la tarjeta Arduino Uno. Estos se envían en una cadena de caracteres, como se muestra en la figura 4.

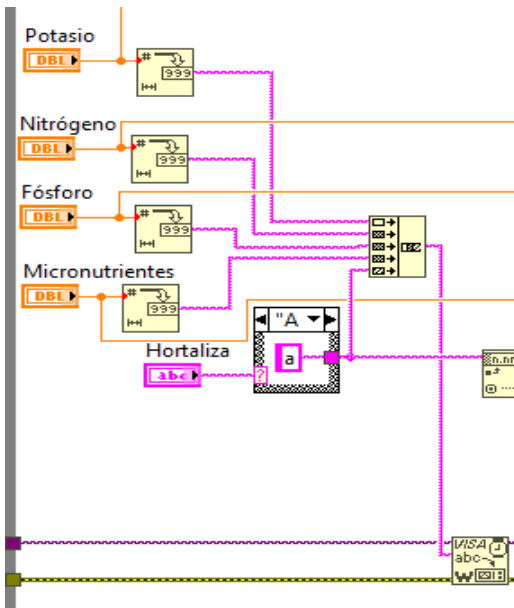


Figura 4 Escritura de datos

Tiempo de espera: Se programó un tiempo de 10ms tanto en la interfaz como en el sistema de control para evitar que los mensajes de lectura y escritura se crucen y se pierda información, como se observa en la figura 5.

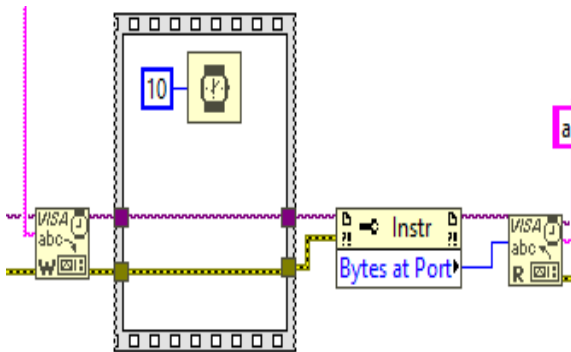


Figura 5 Tiempo de espera entre lectura y escritura

Adquisición de datos por puerto serial: En esta etapa (ver figura 6) se adquieren los datos entregados por la tarjeta Arduino Uno a través del puerto serial del computador. Se recibe una cadena de caracteres, la cual se divide por medio de las letras (a-h), para posteriormente recuperar los datos y mostrarlos según corresponda. En la información recibida, se obtiene el valor de: nivel de tanque de suministro, temperatura ambiente, PH de la mezcla preparada, nivel del tanque de la mezcla y finalmente el estado de las alarmas por nivel bajo de los tanques que almacenan los nutrientes.

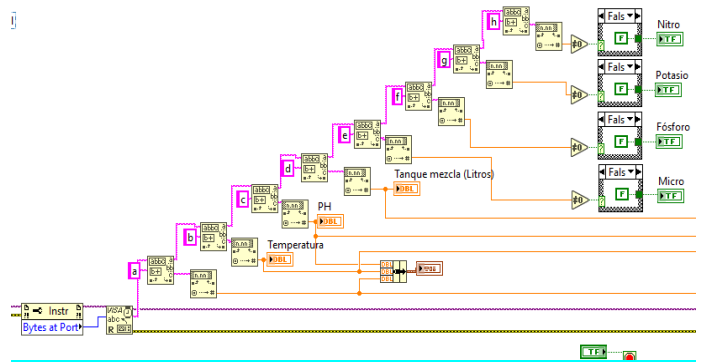


Figura 6 Lectura de puerto serial

Por medio de una gráfica se muestran los datos del nivel del tanque de suministro, la temperatura y el PH. Por medio de un indicador tipo tanque se visualiza el nivel del tanque de preparación de la mezcla. Finalmente, las alarmas de los tanques de los nutrientes, se indican a través de un led.

Almacenamiento de datos: Para facilitar el monitoreo y seguimiento de datos, estos se almacenan en un archivo excel que se guardará en el escritorio del computador, como se observa en la figura 7.

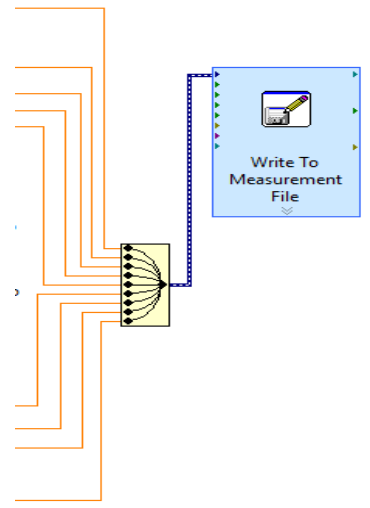


Figura 7 Almacenamiento de datos

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestra la interacción que tiene el usuario con el sistema a través de la interfaz. Sus partes son:

Controles generales: Entre estos está un menú desplegable para elegir el puerto COM de la tarjeta Arduino, un botón de inicio y un botón de parada para detener la simulación y el proceso.

Adicionalmente se encuentran los datos de entrada como tipo de hortaliza y cantidad de cada nutriente

Página 1: Se encuentra una simulación del proceso, en el que el usuario puede visualizar las alarmas por bajo nivel de los tanques de los nutrientes, el nivel del tanque de la mezcla y el nivel del tanque de suministro. Ver figura 8

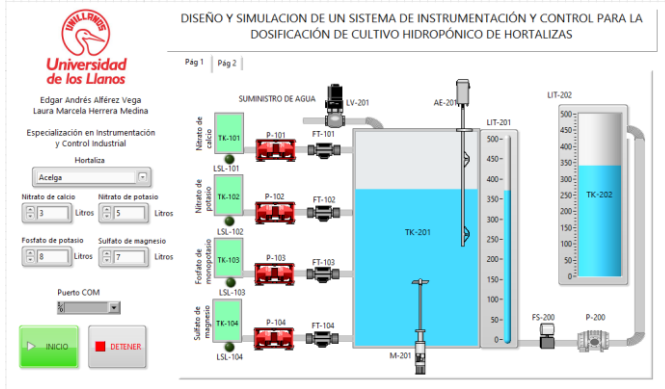


Figura 8 Interfaz virtual Página 1

Página 2: Se encuentra la gráfica de los datos del nivel del tanque de suministro, la temperatura ambiente, el ph de la mezcla y un indicador numérico del PH y la temperatura. Ver figura 9.

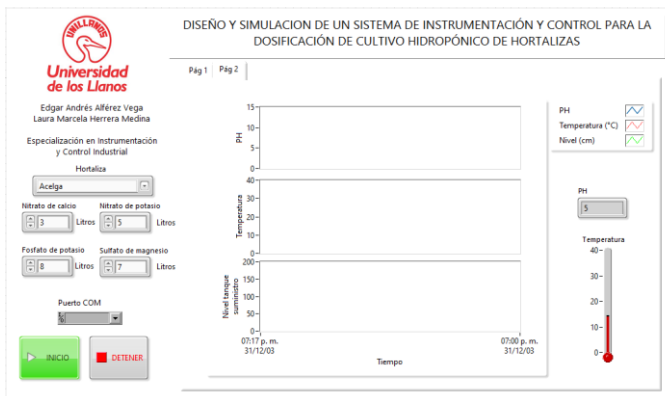
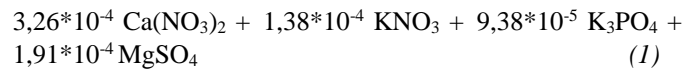


Figura 9 Interfaz virtual página 2

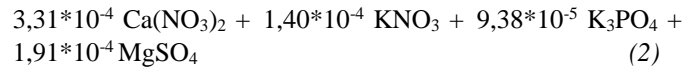
Como resultado de la investigación y consulta con los profesionales pertinentes se establecieron las siguientes fórmulas con el fin de mantener un equilibrio entre los nutrientes, teniendo en cuenta el PH necesario y los efectos de la temperatura.

Las fórmulas a continuación (1-4) se expresan en litros de cada nutriente por 1 litro de agua a una temperatura entre 10°C a 20°C.

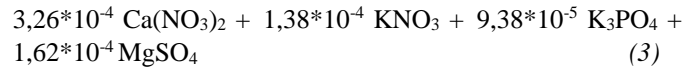
Acelga:



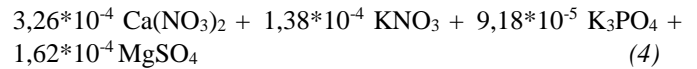
Espinaca:



Lechuga morada:

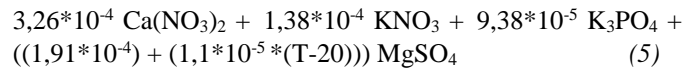


Lechuga cresspa:

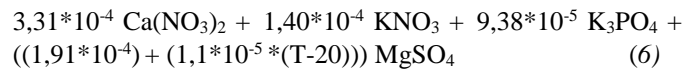


Para temperaturas entre 20°C y 25°C se aumenta el sulfato de magnesio a razón de $1,5 \cdot 10^{-6}$ por cada grado de aumento en la temperatura. Se obtienen las siguientes fórmulas (5-8):

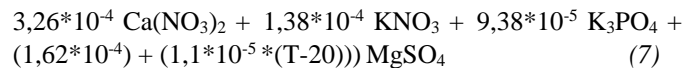
Acelga:



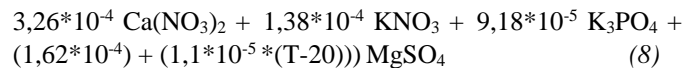
Espinaca:



Lechuga morada:



Lechuga cresspa:



Donde:

Ca(NO₃)₂: Nitrato de calcio

KNO₃: Nitrato de potasio

K₃PO₄: Fosfato de potasio

MgSO₄: Sulfato de magnesio

T: Temperatura ambiente (°C)

Para temperaturas mayores a 25°C no se recomiendan este tipo de cultivos, sin embargo, llegado el caso, el programa asumirá el ajuste de la temperatura con las ecuaciones 5,6,7 y 8.

Los valores de densidad utilizados para calcular los volúmenes de los nutrientes se presentan en la tabla II.

TABLA II

DENSIDAD DE LOS COMPONENTES

Componente	Densidad
Nitrato de calcio	2,5g/cm ³
Nitrato de potasio	2,11 g/cm ³
Fosfato de potasio	2,34g/cm ³
Sulfato de magnesio	2,66g/cm ³

Según las fórmulas programadas, se muestra en la tabla 3, tabla 4, tabla 5 y tabla 6 los resultados de diferentes dosificaciones, teniendo como dato base un tanque con 400 litros de agua.

TABLA III

NUTRIENTES PARA LA ACELGA

Nutriente	Cantidad	
	T=15°C	T=25°C
Nitrato de calcio	130,4 ml	130,4 ml
Nitrato de potasio	55,2 ml	55,2 ml
Fosfato de potasio	37,52 ml	37,52 ml
Sulfato de magnesio	76,4 ml	98,4 ml

TABLA IV

NUTRIENTES PARA LA ESPINACA

Nutriente	Cantidad	
	T=15°C	T=25°C
Nitrato de calcio	132,4 ml	132,4 ml
Nitrato de potasio	56 ml	56 ml
Fosfato de potasio	37,52 ml	37,52 ml
Sulfato de magnesio	76,4 ml	98,4 ml

TABLA V

NUTRIENTES PARA LA LECHUGA MORADA

Nutriente	Cantidad	
	T=15°C	T=25°C
Nitrato de calcio	130,4 ml	130,4 ml
Nitrato de potasio	55,2 ml	55,2 ml
Fosfato de potasio	37,52 ml	37,52 ml
Sulfato de magnesio	64,8 ml	86,8 ml

TABLA VI

NUTRIENTES PARA LA LECHUGA CRESPA

Nutriente	Cantidad	
	T=15°C	T=25°C
Nitrato de calcio	130,4 ml	130,4 ml
Nitrato de potasio	55,2 ml	55,2 ml
Fosfato de potasio	36,72 ml	36,72 ml
Sulfato de magnesio	64,8 ml	86,8 ml

IV. CONCLUSIONES

El sistema de instrumentación diseñado permite que el usuario pueda tener una trazabilidad de los factores más relevantes que afectan el cultivo y así mismo cuente con la posibilidad de realizar ajustes en la cantidad de los nutrientes según sus condiciones climáticas y/o del proceso en sí.

Un aspecto importante del sistema de instrumentación diseñado inicialmente, es que está pensado para cuatro tipos de hortalizas que han sido definidas según el planteamiento del problema presentado en este documento, sin embargo, el sistema tiene la posibilidad de adaptarse a otro tipo de cultivo que se desarrolle bajo la técnica de hidroponía.

La interfaz establecida es versátil, sencilla, amigable y de fácil entendimiento para cualquier tipo de usuario sin importar su nivel de experticia en el ámbito tecnológico.

Se estima que con la implementación del sistema de instrumentación se reduzcan los tiempos de cosecha y se mejore la calidad del producto en términos de sabor, tamaño, color, frescura y preservación, al proporcionarle a cada tipo de hortaliza los nutrientes necesarios. Esto se puede reflejar en un ahorro económico al aumentar la productividad y reducir cosechas fallidas.

REFERENCIAS

- [1] A. Machado, *La cuestión agraria el desarrollo agropecuario*, vol. 31. 1999. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4934874>.
- [2] A. M. Cotes Prado and H. Barrero Meneses, Luz Stella Rodríguez Villamizar, Fernando Zuluaga Mogollón, María Victoria Arévalo Martínez, *BIOPROSPECCIÓN PARA EL DESARROLLO DEL SECTOR AGROPECUARIO DE COLOMBIA*. 2012. [Online]. Available: <http://www.iadb.org/projects/Project.cfm?project=VE-L1003&Language=Spanish>
- [3] S. P. Montenegro Gómez and Y. K. Hernandez Ossa, "Biotecnología aplicada al desarrollo agropecuario colombiano," *Rev. Invest. Agrar. y Ambient.*, vol. 6, no. 2, pp. 97–107, 2015, doi: <https://doi.org/10.22490/21456453.1408>.
- [4] D. O. Prieto Poveda, "LA TECNIFICACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA INCREMENTAR LA PRODUCTIVIDAD AGROPECUARIA EN COLOMBIA," *FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA*, 2019. [Online]. Available: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/7246>
- [5] O. C. Luna, "Modelo de predicción de precios de productos agropecuarios como base para la priorización de Proyectos Integrales de Desarrollo Agropecuario y Rural con enfoque territorial en Colombia en el marco de los impactos producidos por la COVID-19," *Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano*, 2020. [Online]. Available: <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/17247>
- [6] J. A. Peña-Torres and J. D. Reina-Rozo, "Agroecology and communal innovation: LabCampesino, a pedagogical experience from the rural youth in Sumapaz Colombia," *Curr. Res. Environ.*

- Sustain.*, vol. 4, no. Mayo 2022, p. 14, 2022, doi: 10.1016/j.crsust.2022.100162.
- [7] A. Atehortua Gonzalez, "Tecnología e innovación: una apuesta para desarrollar el agro colombiano," *Rev. Colomb. Investig. Agroindustriales*, vol. 15, no. 2, 2018, [Online]. Available: <https://doi.org/10.23850/24220582.1797>
- [8] V. Mamatha and J. C. Kavitha, "Machine learning based crop growth management in greenhouse environment using hydroponics farming techniques," *Meas. Sensors*, vol. 25, no. Enero 2023, p. 7, 2023, doi: 10.1016/j.measen.2023.100665.
- [9] E. Pérez Correa and M. A. Farah Quijano, "Los modelos de desarrollo y las funciones del medio rural en Colombia," *Cuad. Desarro. Rural*, no. 49, pp. 9–27, 2002, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11704902%0AHow>
- [10] M. J. Ibarra, E. Alcarraz, O. Tapia, Y. P. Atencio, Y. Mamani-Coaquira, and H. A. Huillcen Baca, "NFT-I technique using IoT to improve hydroponic cultivation of lettuce," in *2020 39th International Conference of the Chilean Computer Science Society (SCCC), Coquimbo, Chile, 2020*, p. 1.7. doi: 10.1109/SCCC51225.2020.9281277.
- [11] J. Beltrano and O. Gimenez, *Cultivo en hidroponía*, Editorial. Buenos Aires, Argentina: EDULP, 2020. doi: 10.35537/10915/46752.
- [12] A. Sahara, R. H. Saputra, M. Asis, and A. Lawasnitro, "Design of Hydroponic Planting Media Based on Solar Cell Power," in *7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE), Malang, Indonesia, 2021*, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICEEIE52663.2021.9616657.
- [13] C. H. Vanipriya, Maruyi, S. Malladi, and G. Gupta, "Artificial intelligence enabled plant emotion xpresser in the development hydroponics system," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, pp. 5034–5040, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.512.
- [14] A. A. Ajeng, N. S. M. Rosli, R. Abdullah, J. S. Yaacob, N. C. Qi, and S. P. Loke, "Resource recovery from hydroponic wastewaters using microalgae-based biorefineries: A circular bioeconomy perspective," *J. Biotechnol.*, vol. 360, no. May, pp. 11–22, 2022, doi: 10.1016/j.jbiotec.2022.10.011.
- [15] J. Chaiwongsai, "Automatic Control and Management System for Tropical Hydroponic Cultivation," in *2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Sapporo, Japan, 2019*, pp. 1–4. doi: 10.1109/ISCAS.2019.8702572.
- [16] O. Gandhi, M. Ramdhani, M. A. Murti., and C. Setianingsih, "Water Flow Control System Based on Context Aware Algorithm and IoT for Hydroponic," in *2019 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoTaIS), Bali, Indonesia, 2019*, pp. 212–217. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8980373>
- [17] K. Dhananjani, B.A., Pakeerathan, "Organic Nutrient Solutions for Hydroponic Spinach (*Basella alba*) Production in Urban Agriculture," *J. Agric. Sci.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–13, 2023, doi: 10.4038/jas.v18i1.10095.
- [18] M. M. F.G., P. Montejo, and A. Polanco Risquet, "Sistema Automático para Cultivos Hidropónicos Domésticos, a través de la Medición de Iones Inorgánicos," *Rev. Cienc. Digit.*, vol. 3, no. 2, pp. 370–384, 2019, doi: 10.33262/cienciadigital.v9i2.409.
- [19] J. D. Murcia Velez and L. F. Chacón Segura, "Diseño de un sistema automático de cultivo hidropónico para forraje verde," Universidad de La Salle, 2018. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_automatizacionF.
- [20] S. P. JOSELIN ESTHEFANNY, "Sistema Automático De Dosificación De Nutrientes Para Un Cultivo Hidropónico De Fresas," UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE. IBARRA - ECUADOR, 2021. [Online]. Available: http://repositorio.utm.edu.ec/bitstream/123456789/11455/2/04_MEC_373_TRABAJO_GRADO.pdf
- [21] F. Medina Jimenez, "Necesidades nutricionales y riego de lechuga," *Rev. Agropecu.*, vol. 22, p. 9, 2015, [Online]. Available: <https://revistas.grancanaria.com/index.php/GRANJA/article/view/9945/9461>