

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA INVERNADEROS

Hernán Coronado H., *Ing. Sistemas*
Instructor, Centro de Desarrollo Agroempresarial y Turístico del Huila -SENA, La Plata.
hcoronadoh@misena.edu.co

Juan Pablo Peña A., *Ing. Electrónico*
Instructor, Centro de Desarrollo Agroempresarial y Turístico del Huila -SENA, La Plata.
jppena62@misena.edu.co

Rosa Elvira Muñoz V., *Ing. Agrónomo*
Instructora, Centro de Desarrollo Agroempresarial y Turístico del Huila -SENA, La Plata.
rosamunozvillquiran@gmail.com

Eddinson Ortega M., *Ing. Agrícola*
Instructor, Centro de Desarrollo Agroempresarial y Turístico del Huila -SENA, La Plata.
eortega79@misena.edu.co

Julio Flórez D., *Especialista en redes y comunicaciones*
Instructor, Centro de Desarrollo Agroempresarial y Turístico del Huila -SENA, La Plata.
jflorezd6@misena.edu.co

Resumen: En el Occidente del Huila (Colombia) se evidencia baja utilización de tecnología por parte del sector agrícola en los cultivos manejados bajo invernadero; se hace necesario desarrollar trabajos que permitan al agricultor mejorar las condiciones de los cultivos bajo cubierta, implementando nuevas tecnologías a menor costo que incrementen el rendimiento de sus cultivos. El objetivo de la presente revisión bibliográfica es establecer el estado del arte, con el fin de estructurar el proyecto *Validación de un sistema automatizado de invernadero para mejorar el rendimiento del cultivo de tomate en La Plata, Huila*. Se consultaron artículos científicos en bases de datos especializadas y documentos técnicos de entidades estatales dedicadas a la investigación en temas agropecuarios, con el fin de conocer trabajos a nivel nacional e internacional realizados sobre metodologías de diseño y desarrollo de sistemas, modelos de control y automatización aplicados en agricultura de precisión, producción de tomate bajo cubierta en ambientes controlados y condiciones agroecológicas con sus respectivos costos y precios en el mercado colombiano. Los resultados de dicha revisión presentan, de manera detallada, la metodología, plataformas de desarrollo, dispositivos electrónicos, variedad de tomate seleccionado, tipo de invernadero y riego, datos que se utilizarán para el desarrollo del proyecto mencionado.

Palabras claves: Agricultura de precisión, automatización, cultivo bajo cubierta, metodología de diseño, cultivo de tomate.

BIBLIOGRAPHIC REVISION ABOUT DEVELOPMENT AND APPROVAL OF AN AUTOMATIZED GREENHOUSE SYSTEM

Abstract: In western Huila (Colombia) the agricultural sector in greenhouse crops shows a low use of technology. There is a need to develop jobs that allow farmers improve crop conditions in greenhouses, implementing new low-cost technologies that increase crop performance. The objective of this bibliographic revision is to establish the state of the art, in order to structure the project "Validation of an automatized greenhouse system to improve the tomato crop's productivity in La Plata, Huila". Scientific articles from specialized databases and technical documents were reviewed from state entities devoted to agricultural research were reviewed with the aim of learning about national and international research about the design, methodology and system development, control models and automatization applied to precision agriculture, production of tomato's under cover crops in controlled environments and agroecologic conditions included their respective cost and prices in the colombian market. The results of the review show in detail the methodology, development platforms, electronic devices, variety of selected tomatoes, type of greenhouse and watering systems that will be used for the development of the project previously mentioned.

Key words: Precision agriculture, automatization, under cover crops, design's methodology, tomato crop.

Introducción

El uso de invernaderos se hace con el fin de elevar el rendimiento en la agricultura intensiva; esto permite cultivar y controlar las condiciones climáticas para mejorar la producción (Audberto Reyes-Rosas; Raúl Rodríguez-García; Alejandro Zermeño-González; Diana Jasso-Cantú, 2012: 126). Dentro de los recursos utilizados en los invernaderos, se cuenta con la automatización, la cual permite optimizar y estabilizar los procesos mejorando estándares de calidad, reducción de pérdidas de producción, trabajo físico y repetitivo, incremento de repetitividad y mejoramiento de la relación costo-beneficio, integrando nuevas tecnologías (Nieto, 2006: 121). La automatización de procesos es un trabajo complejo que requiere la intervención de múltiples disciplinas y la adopción de una metodología que garantice el éxito del proyecto.

En el presente documento se compila información sobre metodologías y plataformas de hardware utilizadas en la automatización; así como tipos de invernadero y variedad de tomate. Este ejercicio permitió determinar el sistema más indicado para el desarrollo de un invernadero automatizado y su validación en un cultivo en el municipio de La Plata Huila.

Sistemas de automatización

Nieto (2006) afirma que

Automatización es vocablo cuya etimología proviene del griego *autos*, por sí mismo, y *maiomai* lanzar; es ahorrar esfuerzo laboral al reducir la intervención humana en procesos. Para Colciencias, la automatización industrial integra el manejo de información

para controlar y ejecutar de forma autónoma los procesos al emplear herramientas de la ingeniería con los planes de dirección empresarial; con lo anterior, un sistema automático integra procesos y máquinas para mejorar la capacidad de producción, rentabilidad y calidad del producto terminado (p. 120).

En el ámbito empresarial, los sistemas de información apoyan procesos y ayudan a reducir recursos físicos al pasar de codificar módulos individuales, a usar el software para automatizar procesos integrando tecnologías. Para esto, se sugiere implementar sistemas de información de procesos de negocio y flujos de trabajo (Paula, Olea, Alexander, Rivera, & Garavito, 2007: 195).

Sin embargo, el desarrollo de un sistema complejo como la automatización, que integre la colaboración de múltiples disciplinas, requiere de la aplicación de un adecuado y cuidadoso proceso de ingeniería que garantice el éxito del proyecto; la utilización de metodologías de diseño ayuda a los ingenieros y demás participantes para que puedan interactuar y colaborar de manera eficiente en las diferentes tareas que se requieren durante todas sus fases (Zheng, Bricogne, Le Duigou, & Eynard, 2014: 1).

Estas metodologías para el diseño de sistemas que integran electrónica y tecnologías de la información en sistemas físicos, son un campo que ha llamado la atención de investigadores que han realizado muchos estudios en los últimos años, presentando algunas alternativas que pueden ser implementadas (Wang, Yu, Xie, Zhang, & Jiang, 2013: 1).

Metodologías para el diseño

Diversas metodologías de diseño de sistemas han sido propuestas, derivadas de métodos tradicionales como el diseño secuencial y la ingeniería concurrente (Zheng, *et al.*, 2014: 5). Es decir, cada nueva tarea de diseño debe iniciarse cuando la anterior haya terminado;

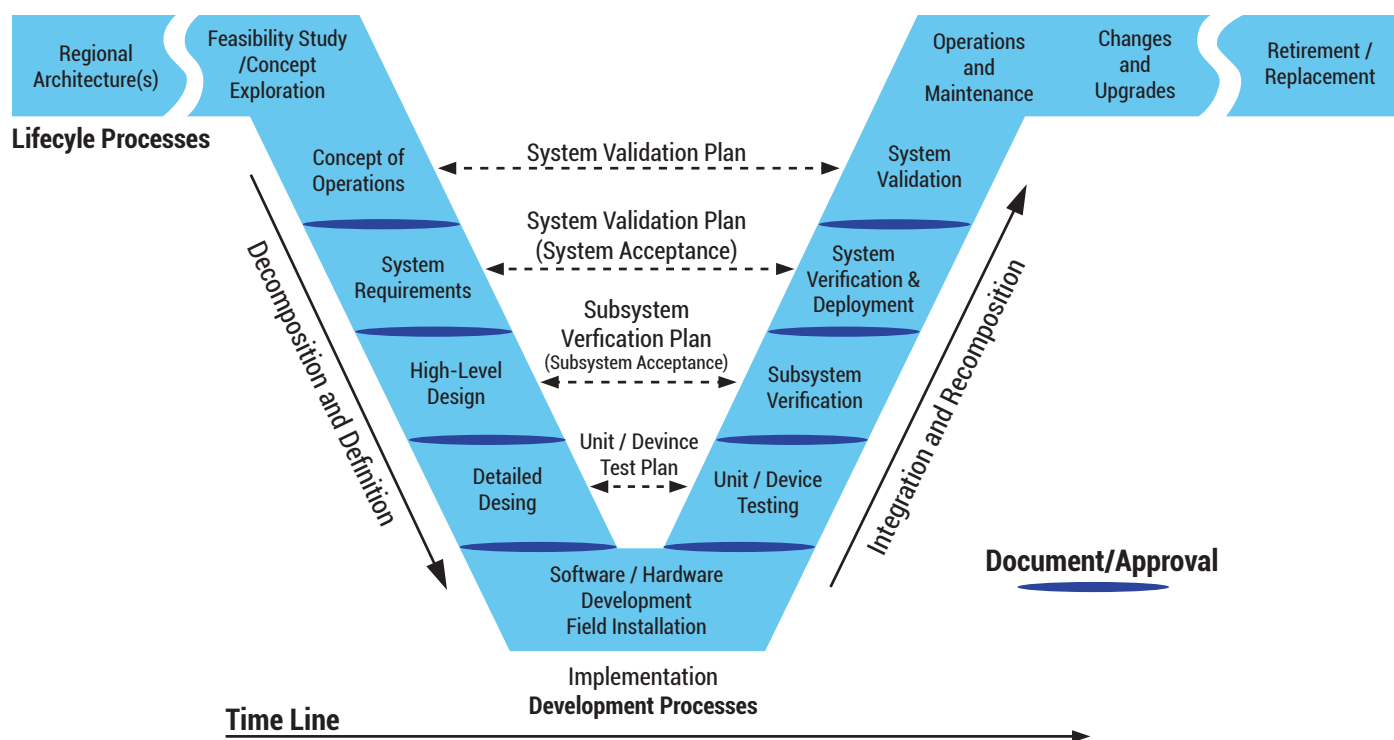
esta metodología tiene el inconveniente de que no conduce a un óptimo comportamiento de todo el sistema, puesto que no permite la colaboración entre diferentes ingenieros y obvia las relaciones explícitas existentes entre subsistemas.

Por su parte, las metodologías de ingeniería concurrente permiten parcialmente que diferentes disciplinas interactúen en el diseño; el modelo "V" y otras metodologías basadas en este modelo, así como el método de diseño jerárquico, son ejemplos de ingeniería concurrente (Zheng, *et al.*, 2014: 6).

La metodología de modelo "V" es usada en ingeniería de sistemas como modelo estándar para el desarrollo de sistemas complejos (Wang, *et al.*, 2013: 2), y presenta un flujo general del proceso de desarrollo de un producto, iniciando con la identificación de los requerimientos del usuario para realizar una descomposición del sistema completo primero en subsistemas, luego en componentes y sus respectivas interfaces (Figura 1). De esta manera, el diseño de los subsistemas puede ser realizado en paralelo por los diferentes ingenieros. La integración y recomposición se realiza después, para validar cada fase correspondiente del proceso de diseño, finalizando con la validación total del sistema incluyendo cambios y actualizaciones, para terminar el producto (Zheng, *et al.*, 2014: 7).

Wang (*et al.*, 2013) propone una estructura simplificada basada en el modelo "V" para el diseño de sistemas complejos que integren electrónica y software en sistemas físicos de ciclos iterativos (Figura 2). En la rama izquierda encontramos las fases de modelado funcional, diseño conceptual y diseño detallado de cada una de las disciplinas que integran el sistema; la parte inferior plantea una fase de modelado y simulación de los diseños y, por último, la rama derecha contempla la implementación del sistema. La descripción de las fases propuestas se describe a continuación:

Figura 1. Modelo "V"



Fuente: (Zheng *et al.*, 2014).

Etapas de un diseño

En la etapa de modelado funcional se realizan una serie de aproximaciones para diseñar un producto que cumpla con las especificaciones planteadas, y se responden preguntas como qué debe hacer el producto y qué funciones debe cumplir. Además, se realiza el modelado de los flujos de información, energía y materiales, y el modelado de caja negra. También se diseña la Técnica Sistemática de Análisis Funcional (FAST, por sus siglas en inglés) y se determinan las herramientas y programas de soporte que se utilizarán.

Por su parte, el diseño conceptual implica la generación de concepto basada en la etapa anterior y el despliegue de la función de calidad (QFD) para alinear los requerimientos con las funcionalidades que se pueden realizar. Esta fase también contempla el diseño axiomá-

tico para asegurar que el diseño sea ajustable, controlable y que evite consecuencias involuntarias; que sea robusto y con la máxima probabilidad de éxito (Tomiyama, *et al.*, 2009: 7). Además, hay que tener en cuenta el diseño modular y la elección de herramientas para el diseño asistido por computadora (CAE).

En la fase de diseño detallado se trabajan criterios de diseño concurrente, fabricabilidad, donde se incluye selección de materiales y procesos, diseño para manufactura (DFM), o diseño para ensamble (DFA) y selección de software: diseño asistido por computadora (CAD), ingeniería asistida por computadora (CAE), y manufactura asistida por computadora (CAM).

La etapa de modelado y simulación incluye modelado de elementos básicos mecánicos y electrónicos,

funciones de transferencia, respuestas en los dominios del tiempo y frecuencia, aplicación de software de simulación y de desarrollo virtual de productos.

Las siguientes etapas de la metodología implican la adquisición de materiales, la integración de los subsistemas, realizando una revisión de desempeño y finalmente del sistema completo para terminar con el prototipo físico (Wang, *et al.*, 2013: 2).

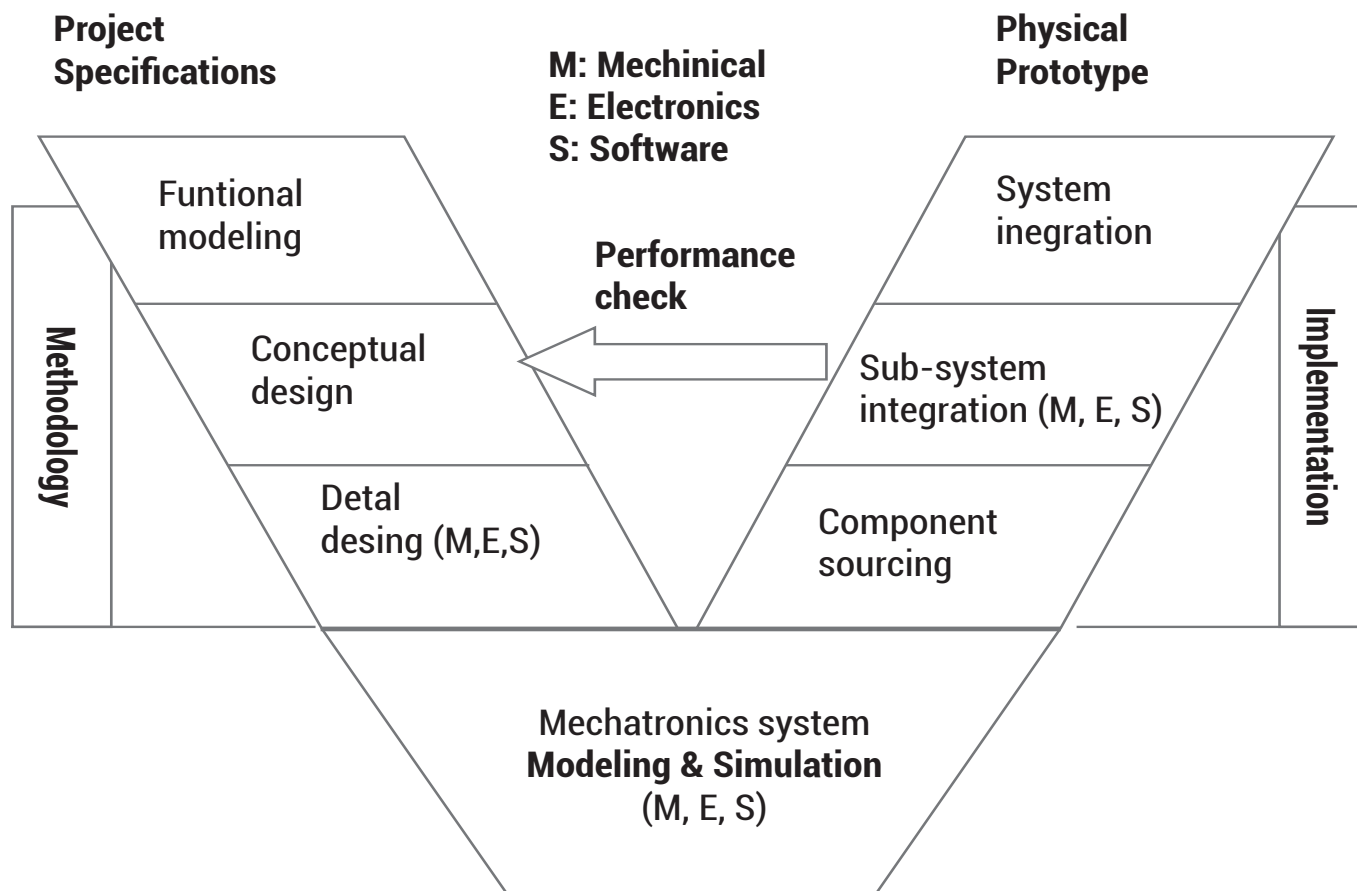
Aplicaciones de la automatización en agricultura de precisión

Mediante el uso de sistemas de información y automatización se han desarrollado estrategias para im-

plementar la agricultura de precisión usando modelos que permitan tener un microclima controlado en un área específica para optimizar la producción agrícola (Orlando, Palacios, & Cotrino, 2010: 165).

El desarrollo de invernaderos ha pasado por modelos de dinámica de fluidos (Montero, Muñoz, & Medrano, 2013: 33), modelos físicos con subsistemas dinámicos y estáticos a evaluación para manejo de temperatura y humedad relativa en invernaderos con ventilación natural. Este último se desarrolla por medio de la apertura de ventilas que permiten el flujo de aire dentro del invernadero aplicado en cultivo de tomate en Durango, México (Auberto Reyes-Rosas; Raúl

Figura 2. Modelo "V" modificado propuesto por Wang.



Fuente: (Wang, *et al.*, 2013).

Rodríguez–García; Alejandro Zermeño–González; Diana Jasso–Cantú, 2012: 128).

En Colombia, específicamente en El Rosal (Cundinamarca), se han identificado modelos por subespacios mediante el estudio aplicado en un invernadero, en el cual se hace medición y almacenamiento de variables ambientales como temperatura, humedad relativa y radiación. Los instrumentos utilizados (sensor de temperatura y humedad relativa) se instalaron dentro del invernadero a 2,5 m y 1,2 m del suelo respectivamente, sobre la línea de siembra. Para tener relación con variables externas se instalaron sensores fuera del invernadero, alejados de las construcciones a 1,5 m del suelo, esto con el fin de evitar variaciones en la medida (Orlando, Palacios, & Cotrino, 2010: 163).

Las variables en el diseño estructural del invernadero se ven reflejadas en la ventilación al interior del mismo, pues al contacto con el ambiente se crean microclimas diversos que afectan los cultivos. Para estudiar el manejo de la ventilación según diseño del invernadero en Colombia, se realizan simulaciones numéricas empleando métodos de dinámica de fluidos computacional, dando como resultado el manejo de ventilación natural para la homogeneidad del microclima en el cultivo de tomate (Villagrán, et al., 2012: 283).

En España, para validar y mejorar las condiciones térmicas en invernadero con modelos CFD, se utilizan pantallas de sombra que en el día sirven para refrigerar y en las noches frías reducen la inversión térmica, esto con el uso de energía solar que durante el día es almacenada en el suelo y en la noche es liberada (Montero, Muñoz, & Medrano, 2013: 35).

Teniendo en cuenta parámetros ambientales para mejorar la calidad en producción, se desarrollan sistemas de monitoreo y control de cultivos. En Grecia, por ejemplo, se han hecho estudios con redes de sensores inalámbricos y microcontroladores aplicados en un invernadero de verduras; se toman registros de los

parámetros ambientales de temperatura, humedad e iluminación, posteriormente estos datos se analizan y aportan a la toma de decisiones para la optimización con un sistema de control (Srbinovska, Gavrovski, Dimcev, Krkoleva, & Borozan, 2014: 10).

Cultivos bajo cubierta

Zambrano (2009) afirma que

Uno de los cambios más relevantes en la agricultura, especialmente en los sistemas de producción de tomate de mesa, es el paso de cultivos de campo abierto a cultivos bajo invernadero, es decir que ahora se busca proteger el cultivo con el fin de evitar el impacto de los fenómenos naturales y asegurar calidad y rendimiento del producto; unido a lo anterior, en el ámbito mundial se enfatiza el concepto de calidad, orientado a la producción de alimentos inocuos y conservación del ambiente en el cual se desarrolla el cultivo. La producción bajo invernadero presenta las siguientes ventajas: protección contra condiciones climáticas extremas, obtención de cosechas fuera de época, mejor calidad de la cosecha, preservación de la estructura del suelo, siembra de materiales seleccionados y mejorados, aumento considerable de la producción, ahorro en costos de producción y disminución en la utilización de pesticidas (p.5).

El T. P. y Rodríguez (2013) afirman que "con estos aspectos, se cumplen los estándares internacionales de inocuidad y calidad del producto y se adopta el esquema de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), lo cual posibilita el acceso a los mercados internacionales" (p. 12).

Y añaden:

Dentro de las desventajas de la producción bajo invernaderos podemos encontrar: Alta

inversión inicial (...), alto costo de operación (...), requiere de personal especializado (...), requiere de monitoreo constante de las condiciones ambientales dentro del cultivo para un mejor control de plagas y enfermedades (...), las condiciones agroclimáticas de la región deben ser detalladas (p.30).

Una de las condiciones a tener en cuenta es el riego, aporta el agua necesaria a la planta para su crecimiento y desarrollo; el uso de sistemas de riego con programación de autocontrol da eficiencia al manejo de agua y ayuda a la protección del medio ambiente (Espinosa, Nolasco, Mengelberg, & Palacios, 2011: 265).

En Colombia existen empresas y agricultores dedicados a la producción de hortalizas bajo condiciones protegidas. Teniendo al tomate como cultivo predilecto, estos experimentos se han realizado, en zonas frías de los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Antioquia, Huila, Eje Cafetero, Cauca, Valle del Cauca, Santander y Nariño. Se estima un área total de 800 hectáreas, las cuales han reportado notables incrementos en la productividad en los últimos años. El auge de implementar estos sistemas de producción tiene que ver con el aumento en la producción (en invernadero los rendimientos oscilan entre 100 y 150 ton/ha mientras a libre exposición pueden ser entre 20 y 40 ton/ha)" (El & Rodríguez, 2013: 12-13).

El cultivo de tomate

El cultivo del tomate es originario de América del Sur, entre las regiones de Chile, Ecuador y Colombia, pero su domesticación se inició en el sur de México y norte de Guatemala. Es una de las hortalizas de mayor importancia en el mundo por su área sembrada y su alto

nivel de consumo. Los principales países productores son: China, Estados Unidos, Turquía, Egipto, Italia, India, Irán, España, Brasil y México, los cuales contribuyen con cerca del 70 % de la producción mundial. En Colombia está disperso por todo el país, cultivándose en 18 departamentos. Sin embargo, cerca del 80 % de la producción está concentrada en los departamentos de Cundinamarca, Norte de Santander, Valle del Cauca, Caldas, Huila, Risaralda y Antioquia, donde tradicionalmente se han cultivado las variedades chonto y milano; mientras que en Atlántico, Guajira y Santander predominan variedades como el tomate río grande y el tomate ciruelo" (Mill, *et al.*, 2006: 94).

Fenología y ciclo del cultivo

La duración del ciclo del cultivo del tomate está determinada por la variedad y por las condiciones climáticas de la zona en la cual se establece el cultivo. El y Rodríguez (2013), afirman:

Su ciclo inicia desde la siembra en semillero, seguida de la germinación; posteriormente la formación de tres a cuatro hojas verdaderas y finalmente el trasplante a campo, con una duración aproximada de 30 a 35 días. Posteriormente se produce la fase reproductiva que incluye las etapas de floración, de formación y llenado del fruto, hasta la madurez para su cosecha. El ciclo total del cultivo es de siete meses aproximadamente (p.107).

Taxonomía y morfología

Familia: *solanáceas*, especie: *Lycopersicum esculentum* Mill. Planta: tipo arbustiva. Existen variedades de crecimiento limitado (determinadas) y otras de crecimiento ilimitado (indeterminadas). Tallo principal: eje con un

grosor entre 2 y 4 cm en la base, sobre el que se van desarrollando hojas, tallos secundarios e inflorescencias (Zambrano, 2009: 6).

Requerimientos climáticos y edáficos

Temperatura: la temperatura óptima de desarrollo oscila entre 20 y 30 °C durante el día y entre 1 y 17 °C durante la noche. Temperaturas superiores a los 30 y 35 °C afectan la fructificación por mal desarrollo de óvulos, el desarrollo de la planta en general y el sistema radicular, en particular.

Humedad: la humedad relativa óptima oscila entre 60 y 80 %. Humedades relativas muy altas favorecen el desarrollo de enfermedades del follaje, el agrietamiento del fruto y dificultan la fecundación.

Radiación: el tomate es un cultivo insensible a la duración del día, sin embargo requiere de una buena iluminación, la cual se modifica por la densidad de siembra, sistema de poda, tutorado y prácticas culturales que optimizan la recepción de los rayos solares, especialmente en época lluviosa cuando la radiación es más limitada.

Precipitación: el tomate se produce en zonas de precipitación anual de 1200 a 1800 mm/año sin ningún problema.

Suelos: las características físicas y químicas del suelo para que el tomate tenga un desarrollo óptimo son: textura franco a franco arcillosa, pH 5.5 – 6.0 con buen contenido de materia orgánica y profundidad efectiva >80 cm, con buen drenaje y capacidad retención de humedad y con buen contenido de nutrientes (A. J. Pérez, s. f.: 6-10).

Conclusiones

De acuerdo con la revisión realizada, se encuentra que la automatización aplicada en la agricultura bajo cubierta permite optimizar la producción en cultivos, ofreciendo condiciones ambientales más propicias, permitiendo así controlar el sistema de riego y variables como temperatura y humedad relativas, mediante una plataforma de hardware programable; se deduce también que la metodología en "V", propuesta por Wang, es la más adecuada para el diseño y desarrollo de un sistema automático; el cual será validado y evaluado en un cultivo de tomate bajo invernadero.

Bibliografía

- Audberto Reyes–Rosas; Raúl Rodríguez–García; Alejandro Zermeño–González; Diana Jasso–Cantú, M. C. H. B. (2012). "Evaluación de un modelo para estimar la temperatura y humedad relativa en el interior de invernadero con ventilación natural". *Rev. Chapingo Ser.Hortic vol.18 no.1 Versión Impresa ISSN 1027-152X*, 1(1), 125–140
- El, T. P.; & Rodríguez, V. P. (2013). *Tecnología para el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas*.
- Espinosa, O. L.; Nolasco, A. Q.; Mengelberg, J. R. B.; & Palacios, E. (2011). "Prototipo para automatizar un sistema de riego multicultivo* prototype for automating a multicropping irrigation system", 2, 659–672.
- J. I. Montero¹; P. Muñoz; M. C. Sánchez-Guerrero; E. M.; & Lorenzo, D. P. (2013). "Shading screens for the improvement of the night-time climate of unheated greenhouses". *Spanish Journal of Agricultural Research 2013*. 11(1), 32-46 ISSN: 1695-971-X eISSN: 2171-9292, 11(1), 32–46
- Mill, L.; Noreña, J. J.; A, M. G.; Zapata, M. A.; & Técnico, B. (2006). *El cultivo de tomate bajo invernadero* (pp. 1–48).

- Nieto, E. C. (2006). "Manufactura y automatización Manufacturing and automation". *Ing. Investig.* vol.26 no.3 Bogotá Sep./Dec. 2006 ISSN 0120-5609, 26(3), 120–128.
- Orlando, F.; Palacios, R.; & Cotrino, E. (2010). "Identificación de un modelo del clima en un invernadero mediante métodos por subespacios *Identifying a greenhouse climate model by using subspace methods". *Ingeniería E Investigación*, ISSN 0129-5608, Vol. 30, N°. 2, 2010, Pags. 157-167, 30(2), 157–167.
- Paula, A.; Olea, J.; Alexander, P.; Rivera, S.; & Garavito, A. (2007). "Sistema de información orientado a procesos de negocio y flujos de trabajo en la Universidad Nacional de Colombia. Perspectivas y caso de estudio A business management- and workflow-orientated information system in the Universidad Nacional de Colombia". *Revista Ingeniería e investigación*. Vol. 27 no.3, diciembre de 2007 (193-202). ISSN 0129-5608, 27(3), 193–202.
- Pérez., J. L. M.; et al (s. f.). *Manual de Buenas Prácticas Agrícolas en el cultivo de tomoe (Lycopersicum esculentum Mill)*.
- Srbinovska, M.; Gavrovski, C.; Dimcev, V.; Krkoleva, A.; & Borozan, V. (2014). "Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks". *Journal of Cleaner Production* 2014 1-14. doi:10.1016/j.jclepro.2014.04.036
- Tomiyama, T.; Gu, P.; Jin, Y.; Lutters, D.; Kind, C.; & Kimura, F. (2009). "Design methodologies: Industrial and educational applications". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2), 543–565. doi:10.1016/j.cirp.2009.09.003
- Villagrán, E. A.; Gil, R.; Acuña, J. F.; & Bojacá, C. R. (2012). "Optimization of ventilation and its effect on the microclimate of a colombian multispan greenhouse Optimización de la ventilación y su efecto en el microclima de un invernadero multitúnel colombiano". *Agron. Colomb.* vol.30 no.2 Bogotá May/Aug. 2012 ISSN 0120-9965, 30(2), 282–288
- Wang, Y.; Yu, Y.; Xie, C.; Zhang, X.; & Jiang, W. (2013). "A proposed approach to mechatronics design education: Integrating design methodology, simulation with projects". *Mechatronics*, 23(8), 942–948. doi:10.1016/j.mechatronics.2012.10.002
- Zambrano, A. (2009). "Cultivo de tomate en invernadero". 978-958-740-004-5. Retrieved from <http://www.corpoica.org.co/sitioweb/archivos/publicaciones/tomateeninvernadero.pdf>
- Zheng, C.; Bricogne, M.; Le Duigou, J.; & Eynard, B. (2014). "Survey on mechatronic engineering: A focus on design methods and product models". *Advanced Engineering Informatics*. doi:10.1016/j.aei.2014.05.003