

Título

Samantha Reid Calderón
MSc., Docente
Departamento de Ciencias de la Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Santiago, Chile
Email:s.reid.cal@gmail.com

Hans Raddatz García
Estudiante de Ingeniería
Facultad de Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Santiago, Chile
Email: hansraddatzreyking@gmail.com

Resumen—Aquí va el abstract. Este elemento es lo que se hace al último en el documento.

Index Terms—Palabras claves.

I. INTRODUCCIÓN

Dentro de los grandes problemas que afronta la agricultura es la creciente demanda de alimentos respecto a la disminución de tierra arable Specht y col. (2014), además del inminente agotamiento de los recursos hídricos (recurso primordial para la agricultura) a nivel mundial (Baldos & Hertel, 2016). Una de las formas en que se puede combatir estos problemas es mediante el uso de invernaderos que sean lo suficientemente flexibles como para ser colocados en cualquier superficie y condiciones, además de buscar ser más eficientes que los cultivos en tierra firme en el uso de recursos como el agua.

Como es importante buscar que la implementación y uso de los invernaderos sea más eficientes que el cultivo tradicional, se utilizarán tecnologías como el SDI (irrigación por goteo en sub-suelo) el cual ha demostrado tener un aprovechamiento del agua de entre el 20 % y el 30 % más que los Sprinklers (Zaccaria y col., 2017). Otro de los aspectos es la calefacción e iluminación, las cuales no son consideradas para los cultivos tradicionales en tierra y sin techo, a diferencia de los invernaderos en donde la calefacción suele ser el punto más crítico por su alto consumo en temporadas y/o zonas frías DONG, 2018, por ello la calefacción es uno de los puntos con mayor literatura al respecto donde se rescata el uso de calefacción en el subsuelo como lo plantea (Kurpaska & Slipek, 2000). El último factor importante que abarca este trabajo es el de la iluminación, el cual solo afecta cuando el invernadero no tiene acceso a luz solar o esta es muy escasa; para este caso como lo menciona (van Iersel & Gianino, 2017) los requerimientos para la fotosíntesis de las plantas puedes ser asistidos o remplazados completamente con iluminación LED (diodo emisor de luz).

En este documento se presenta una propuesta de invernadero tal que este pueda ser instalado sobre cualquier superficie, este invernadero utilizará las tecnologías de SDI para la irrigación, calefacción en sub-suelo e iluminación LED asistida, todos controlados por un microcontrolador ESP32 el cual realizará el actuamiento de cada sistema, además de registrar dichos procesos a una base de datos MySQL a través de mensajes en formato JSON en el protocolo MQTT para poder así agregar otras aplicaciones gráficas para una gestión cómoda del invernadero. Además del sistema de gestión se desarrolla un modelo de optimización con Gurobi que minimice el costo operacional para la calefacción e irrigación en el uso de agua y electricidad.

El resto del documento se organiza de la siguiente manera.

aun nose

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Es claro que a futuro la infraestructura para la agronomía tendrá que ser más productiva y sustentable, teniendo foco en mejorar los problemas medio-ambientales y sociales, además de proveer un beneficio económico al mismo tiempo (Specht y col., 2014).

Dentro de las herramientas disponibles para lograr invernaderos más eficientes se destaca el uso de SDI en comparación con el sistema tradicional de Sprinklers tal y como lo demuestra el autor (E. Suarez-Rey, C. Y. Choi, 2000), esta tecnología a pesar de no ser nueva, no ha tenido tanto impacto como los Sprinklers principalmente por la escasa información accesible para los granjeros y complicaciones que esta puede presentar (Lamm y col., 2012), a pesar de que la gran mayoría son solucionables como lo demuestra (Yu y col., 2010). Otra herramienta que cabe destacar para mejorar la eficiencia de un invernadero es el uso de calefacción en el subsuelo tal y como lo propone (Cuce y col., 2016) dentro de sus propuestas para un invernadero sustentable,

también mediante un modelamiento para minimizar la temperatura de los tubos de calefacción (Kurpaska & Slipek, 2000), determina que en gran cantidad de casos es sustancialmente más eficiente el uso de calefactores en el sub-suelo para la calefacción. Otro factor importante es el uso de iluminación asistida mediante la cual permite sustituir o apoyar a la luz solar que llega a las plantas, de las tecnologías disponibles HPS (lámparas de sodio a alta presión) y LED, esta última permite la emisión de frecuencias específicas necesarias para fotosíntesis además de que su emisión puede ser modulada evitando la sobre exposición (van Iersel & Gianino, 2017).

Mientras que los autores anteriores hablan de como utilizar dichas tecnologías, otros hablan de como optimizar el uso y/o implementación de estas, donde muchos toman como base a Gijzen y col., 1998 por su antigüedad y amplitud que abarcan sus siete sub-modelos en el funcionamiento general de un invernadero, aunque al igual que muchos otros autores más contemporáneos, dejan de lado la optimización para la irrigación con alguna pocas excepciones para el uso de SDI como lo es (Kandelous & Šimůnek, 2010), quien modela dicha tecnología para obtener el patrón de regadío que esta genera y con ello poder minimizar el uso de agua. Para el caso de la calefacción existe un gran número de moldeamientos y propuestas de como minimizar su costo, de ellas se pueden dividir según el uso de heurística o no, quienes no hacen uso de esta herramienta suele deberse a que su modelo implica más variables que solo la calefacción como lo es (Kiyan y col., 2013), quien busca un modelo y control automatizado para ir alternado entre uso de energía solar o combustible fósil para calefaccionar o el caso de (Bozchalui y col., 2015), quien implementó un modelo con la dinámica de “Smart-Grids” para periodos con costos variables en el tiempo, en cambio quienes si utilizan heurística poseen bastantes puntos en común respecto a su modelamiento, como lo es el método de utilizar un calefactor para el aire atrapado o el uso de técnicas similares como son el PSO (optimización de enjambre de partículas) (Chen y col., 2018; Hasni y col., 2011) o la versión más especializada GWO (optimización del lobo gris) (Singhal & Kumar, 2017) o, por CDF (dinámica de fluidos computacional). Todas estas técnicas se utilizan para el mismo objetivo el cual es modelar la dinámica del aire calefaccionado y por ende el movimiento de la temperatura, el cual suele ser de alta complejidad matemática (Singhal & Kumar, 2017) y por ello los autores anteriormente mencionados utilizan la heurística.

El invernadero propuesto integrará el uso de SDI,

calefacción en el subsuelo e iluminación asistida, además de un sistema de gestión para la interacción remota. El modelo propuesto mediante un método numérico de minimización para el costo operacional buscara realizar un control predictivo sobre los sistemas del invernadero propuesto.

III. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este invernadero automatizado modular se consideran 3 aspectos principales: la construcción del invernadero como estructura que albergara los componentes electrónicos de sensorizado y actuación, un sistema de gestión que procese, active los actuadores y almacene la información de estos procesos y, finalmente un modelo que optimice el uso de recursos del invernadero en función de las condiciones externas previstas.

III-A. Construcción de un invernadero modular

Para la construcción de la estructura del invernadero se realizó un cajón en aire auto-sostenido con aislación de poliestireno expandido (plumavit) en los cuatro laterales y base. Este cajón sujetara los nueve contenedores (sub-modulos) que almacenarán tanto la instrumentación como el agua y la tierra donde se plantara (ver Figura 1). Para la zona superior se construyó una caja de paneles aislantes compuesto por dos capas de polietileno de alta densidad que contiene aire de forma aislada en su interior.



Figura 1: Cajón del invernadero

III-A1. Instrumentación: La instrumentación para el invernadero se encuentra descrita en el Cuadro I.

III-A2. Funcionamiento: A continuación, se presentará cada sistema que está involucrado en el funcionamiento del invernadero, estos utilizarán un único microcontrolador (ESP32) como cerebro para el control de cada uno de estos, además de enviar la

Nombre	Tipo	Descripción	Rango
DHT11	Sensor	Sensor de temperatura y humedad de relativa	[20 .. 90] Hum relativa [0 .. 50] C°
MAX44009	Sensor	Sensor de intensidad lumínica	[0,045 .. 188000] Lux
LM35	Sensor	Sensor de temperatura	[-55 .. 150] C°
Sensor Capacitivo	Sensor	Sensor capacitivo de humedad en el suelo	[3? .. 3?] Hum relativa
ADS1115	ADC	Conversor análogo → digital	[16] Bits
P9813	Controlador led	Controlador con memoria para tiras led	[8] Bits/canal
Modulo Relay's	Relay	Modulo relay's con señal aislada	[4] Salidas [0 .. 250] VAC
ESP32-WROOM	Microcontrolador	Microcontrolador con conexión WIFI integrada	[3,3] Volts
Calefactor	Actuador	Calefactor para agua en contenedores	[75] Watts
Bomba pequeña	Actuador	Bomba hidráulica	[5] Volts
Bomba grande	Actuador	Bomba hidráulica	[220] VAC

Cuadro I: Componentes utilizados

información respecto al estado de cada variable a un servidor detallado en el sistema de gestión.

Irrigación: El sistema de irrigación funcionará bajo el principio de goteo en el subsuelo o SDI, por sus siglas en inglés. Este sistema constará de una bomba pequeña que levante una columna de agua para generar presión sobre el resto de la tubería sin necesidad de mantener encendida la bomba, la tubería estará nivelada de tal forma que cada orificio emita la misma cantidad de agua en función de su presión. El resultado de la irrigación se obtendrá por medio de un sensor capacitivo para medir la humedad relativa de la tierra en los sub-módulos como se muestra en la Figura 2.

Temperatura: El sistema de calefacción se desarrollará mediante el uso de un calefactor dentro del sub-modulo principal para calentar el agua que este contiene (ver Figura 2), el agua será movida a través de un tubo metálico que atraviesa de forma similar cada sub-modulo calentando de esa forma la tierra circundante al tubo. Como la tierra será calentada esto generará menores pérdidas de calor (Kurpaska & Slipek, 2000) al exterior lo que haría de este invernadero uno más eficiente.

Iluminación: El sistema de iluminación asistida es desarrollada mediante el uso de un módulo con el circuito integrado P9813 el cual modulará la intensidad de las tiras LED, estas estarán sujetas a un marco suspendido sobre las plantas de forma que su altura respecto a la superficie de la tierra sea regulable. Finalmente, por medio del sensor MAX44009 se realiza un control de lazo cerrado para lograr la intensidad deseada en función de la luz solar y la de los LED.

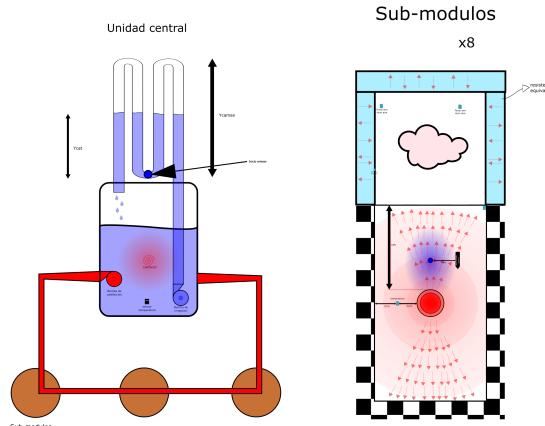


Figura 2: Sub-Módulos del invernadero

III-B. Sistema de gestión

Para la realización de la automatización de este proyecto se utilizó el protocolo sobre TCP MQTT, el cual permite la comunicación entre muchos dispositivos. Una base de datos MySQL que almacenaría la información relevante respecto al o los invernaderos, además de otras herramientas desarrolladas para la gestión del invernadero de forma sencilla. También, se realizó un sistema de control cerrado en el caso de que el invernadero no reciba información del servidor y por ende el control determinado por el modelo matemático.

III-B1. Mosquitto(MQTT) & MySQL: Las herramientas ya existentes que se utilizaron fueron:

- Boker de MQTT Mosquitto, el cual es una herramienta gratuita con varias opciones de seguridad y configuración para el caso de este proyecto. Todas las comunicaciones se realizarán por websocket con autenticación de usuarios para mantener un control sobre aquellos dispositivos que envían y/o reciben mensajes de cada tópico.

- Base de datos MySQL, en la cual se configuró un usuario con acceso restringido tanto para editar como visualizar las tablas que contendrán la información respecto al invernadero, además de otro usuario quien solo podrá visualizar dichas tablas, con el objetivo de tener protegida la base de datos, ya que solo se tendrá una instancia local que acceda a la edición de las tablas y muchos posibles clientes que visualicen la información de forma no local.

III-B2. Parser MQTT → SQL: Debido a los múltiples tipos de mensajes que pueden ser transmitidos dentro de los tópicos del MQTT se optó por seguir un protocolo conocido para el envío de mensaje "JSON"(Javascript object notation), de esta forma es más simple ordenar el contenido de los mensajes, además de entregar información relevante respecto a este. Los mensajes se encuentran descritos en la Figura 3.



Figura 3: Formato de los mensajes dentro del MQTT

Ya que los mensajes solo estarán disponibles dentro de los tópicos del MQTT, se realizó una aplicación en Java que realice lo siguiente:

- Conectarse a los tópicos relevantes (entradas y salidas).
- Procesar el mensaje en JSON a formato SQL.
- Conectarse a la base de datos MySQL.
- Enviar el mensaje procesado o notificar si hubo un error.

El diagrama de dicha aplicación se muestra en la Figura 4.

III-B3. Ajuste de Setpoints: El ajuste de los Setpoints se utilizará para cuando el invernadero funcione tanto con el modelo, como control cerrado o de forma manual. Se realizará mediante una aplicación gráfica desarrollada en Java la cual se muestra en la Figura 5b. En esta uno seleccionará la variable que desea modificar y su respectivo valor, al enviarse el mensaje se procesará como un mensaje en JSON como los descrito en III-B2 y luego enviado por MQTT. Este comportamiento es descrito en mayor detalle en el diagrama de la Figura 5a.

III-B4. Control lazo cerrado: Todos los sistemas anteriores están pensados para funcionar en conjunto, pero en el caso de que alguno de estos falle y que su funcionamiento sea crítico, como lo es el Broker MQTT, se realizó un sistema auxiliar que sirva de respaldo mientras el resto de los sistema estén sin funcionamiento. Este sistema está diseñado

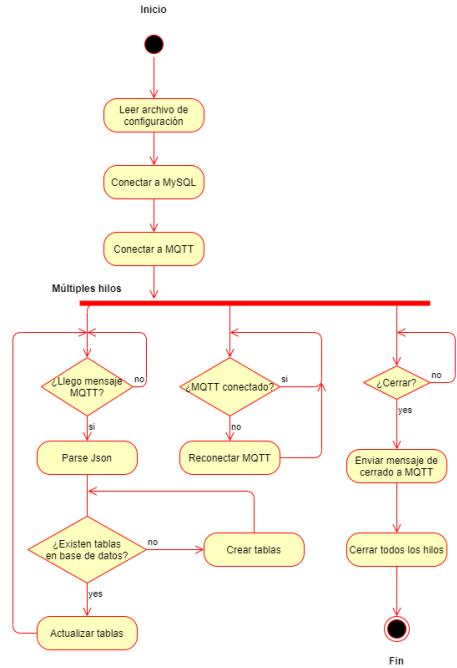


Figura 4: Diagrama de la aplicación que procesa mensajes.

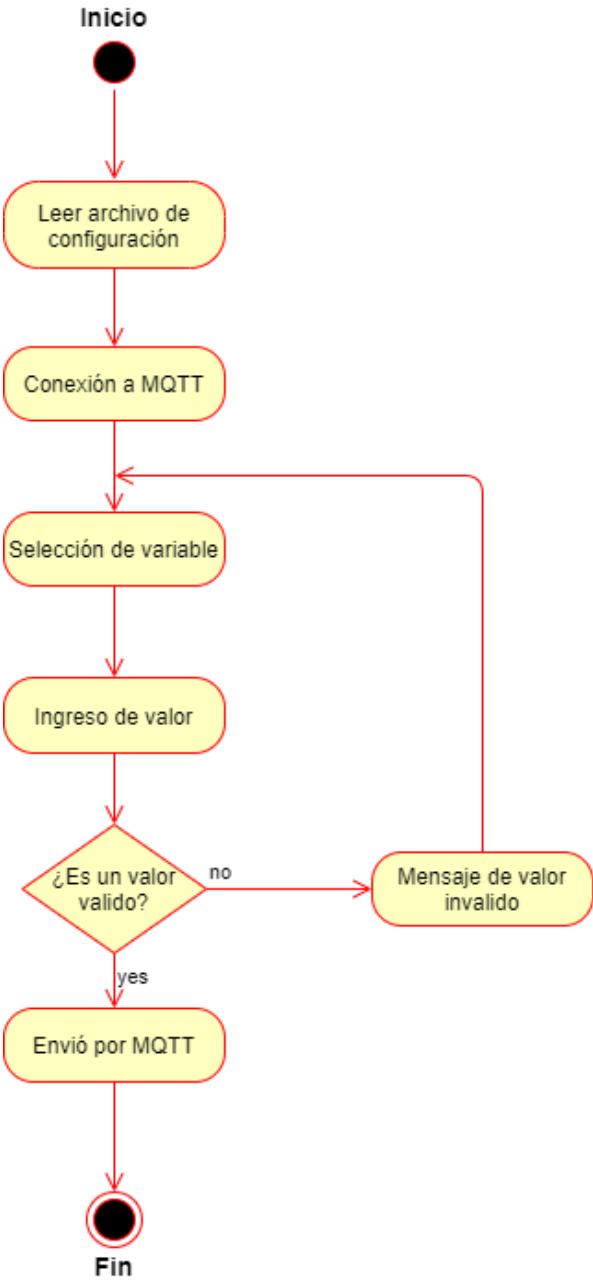
para realizar un control por lazo cerrado en cada sistema descrito en la Figura III-A2, tomando como Setpoint el último entregado por el servidor en el caso de no existir uno que venga por defecto en la programación del ESP32. Cabe destacar, que este control se encontrará dentro de la programación del microcontrolador del invernadero.

III-C. Modelo de optimización

III-C1. Descripción del problema: Se tiene un invernadero que consta de nueve sub-módulos, dentro de este se desea minimizar los costos operacionales dados por el funcionamiento del calefactor junto a la bomba de calefacción "BT" más el funcionamiento de la bomba de irrigación "BA" por sus costos respectivos de electricidad "ce". El objetivo de estas activaciones será el de mantener dentro de un rango; a la temperatura del agua [$t_{amin} \dots t_{amax}$], la temperatura del suelo [$t_{aimin} \dots t_{aimax}$] y la humedad relativa del suelo [$hs_{min} \dots hs_{max}$].

Para determinar las temperaturas en cada tiempo se calculará la diferencia temperatura en cada masa de aire o agua dentro del invernadero puede ser determinada según las sumas de los flujos de calores divididos por su calor específico y multiplicados por su masa y periodo.

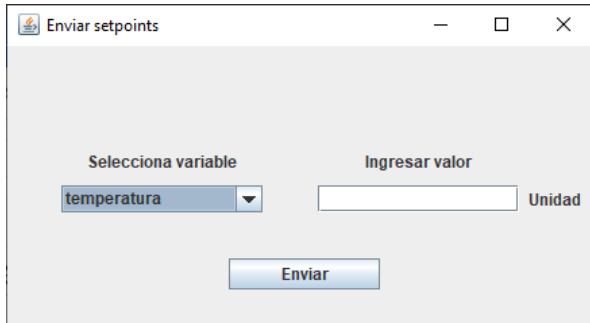
$$\Delta T = \frac{\Delta Q * Periodo}{Ce * masa}$$



(a) Diagrama del funcionamiento

Además, cada flujo de calor a excepción del generado por el calefactor puede ser calculando la diferencia de temperatura dividido por su resistencia térmica entre las superficies respectivas. Esta resistencia puede ser calculado tanto teóricamente como experimentalmente.

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{termica}}$$



(b) Programa realizado

III-C2. Supuestos:

- I. La temperatura del aire dentro del invernadero es homogénea.
- II. La temperatura del aire fuera del invernadero es homogénea y puede ser obtenida en base a una predicción externa.
- III. La temperatura del agua dentro del contenedor del invernadero es homogénea.
- IV. La temperatura dentro del tubo de calefacción es

- homogénea.
- v. El calefactor se enciende junto a la bomba de calefacción siempre con costos eléctricos definidos para cada uno.
 - vi. El flujo del calor en la tierra es de forma homogénea respecto a las diferencias de temperatura en los extremos, se asume un suelo ideal con resistencia térmica ideal.
 - vii. La tubería de calefacción atraviesa de tal forma cada sub-modulo que se puede asumir un mismo patrón del flujo de calor y por consiguiente tienen el mismo valor para cada tiempo.
 - viii. Las pérdidas de calor en la plantación por el suelo al exterior son despreciables ya que se encuentran aislado térmicamente.
 - ix. Todas las resistencias térmicas en el invernadero no varían respecto a la temperatura, debido a las diferencias máximas de temperatura a las cuales estarán expuestos.

Conjuntos	
TIME	{0,maxt} Conjunto de tiempos
Parametros	
periodo	Tiempo en segundos que dura cada tiempo
maxt	Número máximo de tiempos
caleagua	Calor específico del agua.
caleaire	Calor específico del aire.
masaire	Masa del aire que está atrapado dentro del invernadero
denagua	Densidad del agua
rags	Resistencia térmica desde el agua a la superficie de la tierra
rsai	Resistencia térmica desde la superficie de la tierra al aire atrapado
raie	Resistencia térmica desde el aire atrapado al aire en el exterior
tiag	Temperatura inicial de agua
tiai	Temperatura inicial de aire atrapado
ceav	Calor específico volumétrico del agua
qc	Calor generado en [KJ] por encender el calefactor en un tiempo
ce	Costo en pesos (CLP) por KWh de electricidad consumida
eba	Energía consumida en [KWh] por activar la bomba de irrigación
ebt	Energía consumida en [KWh] por activar la bomba de calefacción
ect	Energía consumida en [KWh] por activar el calefactor
tainf	Límite inferior a la temperatura del aire atrapado en C°
taimax	Límite superior a la temperatura del aire atrapado en C°
tamax	Temperatura máxima a la que calienta el agua el calefactor en C°
tamin	Temperatura mínima del agua en el sub-modulo central en C°
mucho	Mucho en CLP
te _t	Temperatura exterior en el tiempo $t \in TIME$
Variables	
TAI _t	Temperatura en C° del aire atrapado en el tiempo $t \in TIME$
TAG _t	Temperatura en C° del agua en el tiempo $t \in TIME$
BT _t	1 si se enciende la bomba de temperatura y el calefactor en el tiempo $t \in TIME$, 0 si no
BA _t	1 si se enciende la bomba de agua en el tiempo $t \in TIME$, 0 si no
HR _t	% de humedad relativa en la tierra del invernadero en el tiempo $t \in TIME$

III-C3. Modelo Matemático:

$$\min \sum_{t \in TIME} (ce * BT_t * (ebt + ect)) + mucho * costo$$

$$\begin{aligned}
 \text{s.t. } tamin - costo_feo &\leq TAI_t && \forall t \in TIME \\
 TAI_t &\leq taimax + costo_feo && \forall t \in TIME \\
 TAG_t &\leq tamax + costo_feo && \forall t \in TIME \\
 tamin - costo_feo &\leq TAG_t && \forall t \in TIME \\
 TAG_t &= TAG_{t-1} + \left(BT_{t-1} * qc - \frac{TAI_{t-1} - TAG_{t-1}}{rags + rsai} \right) * \frac{periodo}{VA_{t-1} * cale_agua} && \forall t \in TIME \\
 TAG_t &= TAI_{t-1} + \left(\frac{TAI_{t-1} - TAG_{t-1}}{rags + rsai} - \frac{te_{t-1} - TAI_{t-1}}{raie} \right) * \frac{periodo}{VA_{t-1} * cale_agua} && \forall t \in TIME \\
 TAG_0 &= tiag \\
 TAI_0 &= tiai
 \end{aligned}$$

IV. CASO DE ESTUDIO

IV-A. Área de estudio

Se menciona el caso de estudio, ya sea una región de estudio y/o establecimiento, etc.

IV-B. Recopilación de datos

Se declaran todos los datos de los parámetros utilizados. Se pueden ocupar las subsecciones.

IV-B1. Software: El modelo de optimización fue ejecutado en AMPL Gurobi. Además, las instancias fueron desarrolladas por un computador con procesador i7, con 16 GB de memoria RAM.

V. RESULTADOS

Se exponen los resultados, según los escenarios conversados con el profesor guía.

VI. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

Se concluye el trabajo. Primero se resume lo que se hizo y se discuten los resultados obtenidos. Posteriormente se proponen los trabajos futuros.

VII. BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS

- Baldos, U. L. C. & Hertel, T. W. (2016). Debunking the 'new normal': Why world food prices are expected to resume their long run downward trend. *Global Food Security*, 8, 27-38. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.03.002>
- Bozchalui, M. C., Cañizares, C. A. & Bhattacharya, K. (2015). Optimal energy management of greenhouses in smart grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(2), 827-835. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2372812>
- Chen, L., Du, S., He, Y., Liang, M. & Xu, D. (2018). Robust model predictive control for greenhouse temperature based on particle swarm optimization. *Information Processing in Agriculture*, 5(3), 329-338. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.04.003>
- Cuce, E., Harjunowibowo, D. & Cuce, P. M. (2016). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 34-59. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.077>
- DONG, S. (2018). *THERMAL ENVIRONMENT MODELING OF THE MONO-SLOPE SOLAR GREENHOUSE FOR COLD REGIONS* (Tesis doctoral N.º 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- E. Suarez-Rey, C. Y. Choi, P. M. W. (2000). COMPARISON OF SUBSURFACE DRIP IRRIGATION AND SPRINKLER IRRIGATION FOR BERMUDA GRASS TURF IN ARIZONA, 43(3), 631-640.
- Gijzen, H., Heuvelink, E., Challa, H., Dayan, E., Marcelis, L. F., Cohen, S. & Fuchs, M. (1998). Hortisim: A model for greenhouse crops and greenhouse climate. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.456.53>
- Hasni, A., Taibi, R., Draoui, B. & Boulard, T. (2011). Optimization of greenhouse climate model parameters using particle swarm optimization and genetic algorithms. *Energy Procedia*, 6, 371-380. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.043>
- Kandelous, M. M. & Šimůnek, J. (2010). Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, 28(5), 435-444. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0205-9>
- Kiyan, M., Bingöl, E., Melikoğlu, M. & Albostan, A. (2013). Modelling and simulation of a hybrid solar heating system for greenhouse applications using Matlab/Simulink. *Energy Conversion and Management*, 72, 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.036>
- Kurpaska, S. & Slipek, Z. (2000). Optimization of greenhouse substrate heating. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 76(2), 129-139. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0537>
- Lamm, F. R., Bordovsky, J. P., Schwankl, L. J., Grabow, G. L., Peters, R. T., Colaizzi, P. D., Trooien, T. P. & Porter, D. O. (2012). SUBSURFACE DRIP IRRIGATION: STATUS OF THE TECHNOLOGY IN 2010 F., 55(2), 483-491.
- Singhal, R. & Kumar, R. (2017). Receding horizon based greenhouse air temperature control using grey Wolf optimization algorithm. *2016 IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics Engineering, UPCON 2016*, (2), 32-37. <https://doi.org/10.1109/UPCON.2016.7894620>
- Specht, K., Siebert, R., Hartmann, I., Freisinger, U. B., Sawicka, M., Werner, A., Thomaier, S., Henckel, D., Walk, H. & Dierich, A. (2014). Urban agriculture of the future: An overview of sustainability aspects of food production in and on buildings. *Agriculture and Human Values*, 31(1), 33-51. <https://doi.org/10.1007/s10460-013-9448-4>
- van Iersel, M. W. & Gianino, D. (2017). An adaptive control approach for light-emitting diode lights can reduce the energy costs of supplemental lighting in greenhouses. *HortScience*, 52(1), 72-77. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11385-16>
- Yu, Y., Shihong, G., Xu, D., Jiandong, W. & Ma, X. (2010). Effects of Treflan injection on winter wheat growth and root clogging of subsurface drippers. *Agricultural Water Management*, 97(5), 723-730. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.01.003>
- Zaccaria, D., Carrillo-Cobo, M. T., Montazar, A., Putnam, D. H. & Bali, K. (2017). Assessing the viability of sub-surface drip irrigation for resource-efficient alfalfa production in central and Southern California. *Water (Switzerland)*, 9(11), 1-21. <https://doi.org/10.3390/w9110837>