



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL & INGENIERÍA EN AUTOMATIZACIÓN Y  
ROBÓTICA

# Control por minimización de recursos en invernadero modular

Alumno:  
Hans Christopher Raddatz Garcia

Profesores guía:

Samantha Camila Reid Calderón  
Nestor M. Palominos Gonzalez

TRABAJO DE TESIS PRESENTADO EN CONFORMIDAD  
A LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL E  
INGENIERO EN AUTOMATIZACIÓN Y ROBÓTICA

SANTIAGO - CHILE  
2020



FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL  
INGENIERÍA EN AUTOMATIZACIÓN Y ROBÓTICA  
DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y PROPIEDAD

Yo, Hans Christopher Raddatz Garcia, declaro que este documento no incorpora material de otros autores sin identificar debidamente la fuente.

Santiago, octubre 2020

---

Firma del alumno

*“Allahu Akbar”*

## **Agradecimientos**

A mi negro el lucho y al ramundo por ayudarme a obtener la materia para esta Tea-sis.  
A la Sami por corregirme esto cuando se veía mas feo.  
A mi papá por tenerme la paciencia para armar “los palos”.  
A la pelusa por venir a maullar a mi ventana cuando escriba esto.  
Y a cualquiera que sienta que deba estar acá.

# Índice

<b>1. CONTEXTO</b>	<b>7</b>
1.1. Invernaderos . . . . .	8
<b>2. IMPORTANCIA DEL TRABAJO</b>	<b>9</b>
<b>3. DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>9</b>
3.1. Marco teórico de modelos de gestión de recursos . . . . .	10
3.2. Marco teórico de modelos de optimización en la gestión de recursos en un invernadero . . . . .	12
3.3. DIGITALIZACIÓN (ADC) . . . . .	13
3.4. PROTOCOLO MQTT . . . . .	13
<b>4. CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO</b>	<b>13</b>
<b>5. HIPÓTESIS</b>	<b>13</b>
<b>6. OBJETIVO GENERAL</b>	<b>14</b>
<b>7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>14</b>
<b>8. METODOLOGÍA</b>	<b>14</b>
8.1. INVERNADERO . . . . .	14
8.1.1. ESTRUCTURA . . . . .	14
8.2. CAJA . . . . .	15
8.2.1. Instrumentación . . . . .	16
8.3. Sistema de gestión . . . . .	17
8.3.1. Mosquitto(MQTT) & MySQL . . . . .	18
8.3.2. Parser MQTT → SQL . . . . .	18
8.3.3. Ajuste de Setpoints . . . . .	18
8.3.4. Control lazo cerrado . . . . .	19
8.4. Modelo de optimización . . . . .	20
8.4.1. Descripción del problema . . . . .	20
8.4.2. Supuestos . . . . .	21
8.4.3. Modelo Matemático . . . . .	21
<b>9. RESULTADOS</b>	<b>23</b>
9.1. COSTOS DE PRODUCCIÓN . . . . .	24
9.2. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS . . . . .	24
9.2.1. PARÁMETROS DEL INVERNADERO . . . . .	24
9.2.2. PREDICCIÓN DE TEMPERATURA . . . . .	24
9.3. COMPORTAMIENTO DEL MODELO . . . . .	24
9.4. OPERACIÓN DEL INVERNADERO . . . . .	24
9.4.1. DATOS RECOLGIDOS . . . . .	24
9.4.2. RESPUESTA AL CONTROL . . . . .	24
<b>10. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>24</b>
<b>11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>24</b>

## **Índice de cuadros**

1.	Marco teórico de construcción de un invernadero . . . . .	13
2.	Marco teórico de modelos de optimización en la gestión de recursos . . . .	13
3.	Componentes utilizados . . . . .	17
4.	Conjuntos, parámetros y variables del modelo . . . . .	22

# Índice de figuras

1.	Porcentaje de extracción de agua dulce por sector en 2014. Fuente: (Banco Mundial 2017) . . . . .	7
2.	Registro histórico del consumo eléctrico según continentes. Fuente: (BP , 2019) . . . . .	8
3.	Precio promedio mundial de la electricidad. Fuente: (World Bank,2016) .	8
4.	Demanda historica en la agricultura. Fuente: (FAO, 2018) . . . . .	9
5.	a) Sistema convencional b) Sistema subsuelo. Fuente: (Kurpaska & Sli-pek, 2000) . . . . .	10
6.	Relación entre sistemas desarrollados . . . . .	14
7.	Modelo 3D propuesto y maqueta realizada . . . . .	15
8.	Caja con los elementos de control . . . . .	16
9.	Relación entre sistemas desarrollados . . . . .	16
10.	Relación entre sistemas desarrollados . . . . .	17
11.	Formato de los mensajes dentro del MQTT . . . . .	18
12.	Diagrama de la aplicación que procesa mensajes. . . . .	19

# 1. CONTEXTO

En la actualidad, la población mundial funciona bajo una serie de recursos de distintos tipos como hídricos, eléctricos, alimenticios, entre otros, los cuales son limitados y necesarios para el funcionamiento colectivo (FAO, 2018). La mayoría de estos recursos presenta problemas, debido a que se están agotando a un ritmo acelerado, por lo que es imperioso proponer medidas o establecer metodologías que permitan un consumo eficiente.

Los recursos hídricos representan un problema actual, especialmente con su uso en la agricultura (Specht y col., 2014). En la Figura 1 se contempla el porcentaje de agua dulce extraída para los sectores domésticos, industriales y agrícolas, en distintos continentes, donde la mayoría se orienta a esta última área. Además, cabe mencionar que esta área el uso de las tecnologías y técnicas prioriza más la cantidad que la eficiencia. Un ejemplo es la utilización de *Sprinklers* o aspersores de riego por sobre los sistemas de Riego por Goteo Subterráneo (SDI), a pesar que este último presenta ahorros entre el 20 % y el 30 % (Zaccaria y col., 2017).

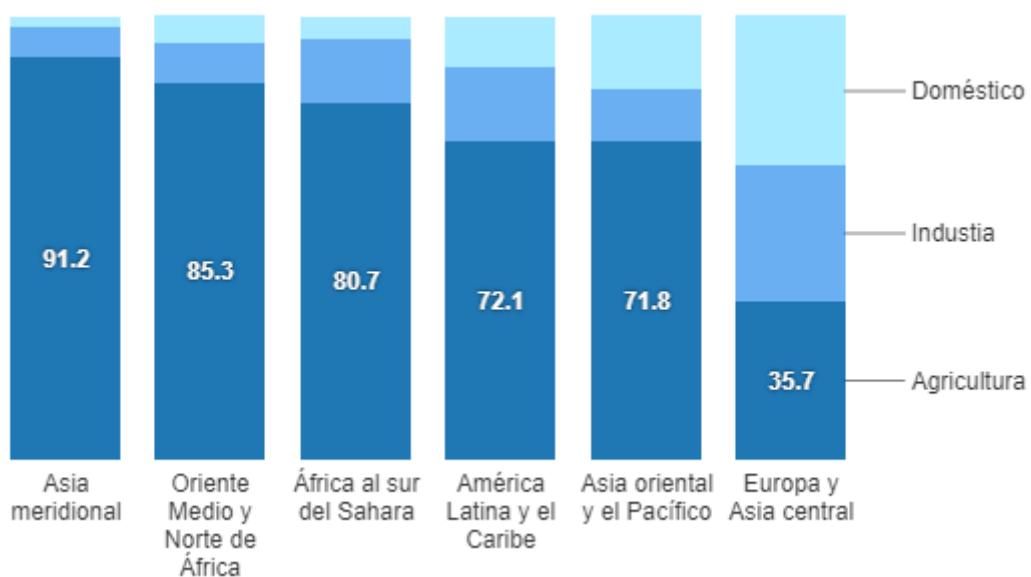


Figura 1: Porcentaje de extracción de agua dulce por sector en 2014. Fuente: (Banco Mundial 2017)

De igual manera, el consumo del recurso energético (específicamente el eléctrico) ha ido incrementando a nivel global, como se indica en la Figura 2. Sin embargo, su costo ha ido disminuyendo, lo cual ha incentivado su uso (especialmente en la agricultura), como se muestra en la Figura 3.

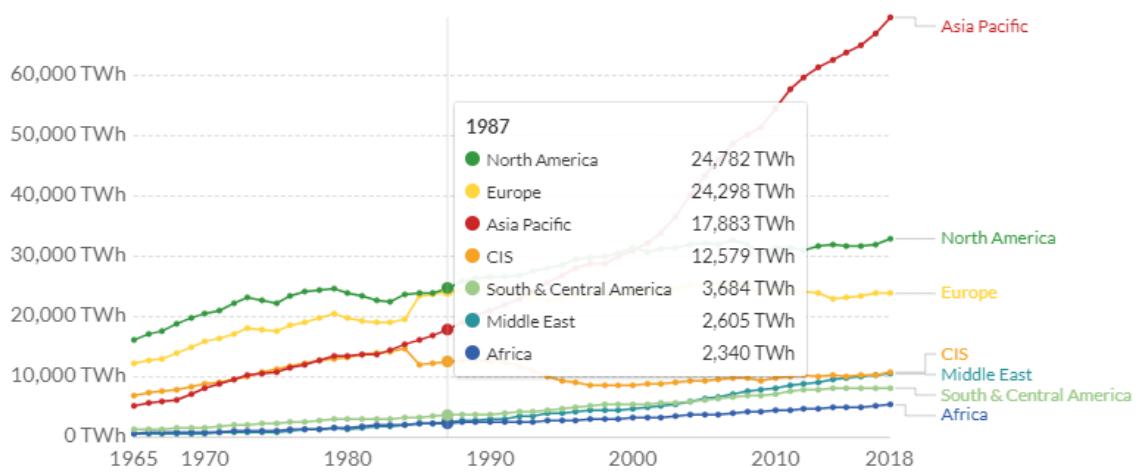
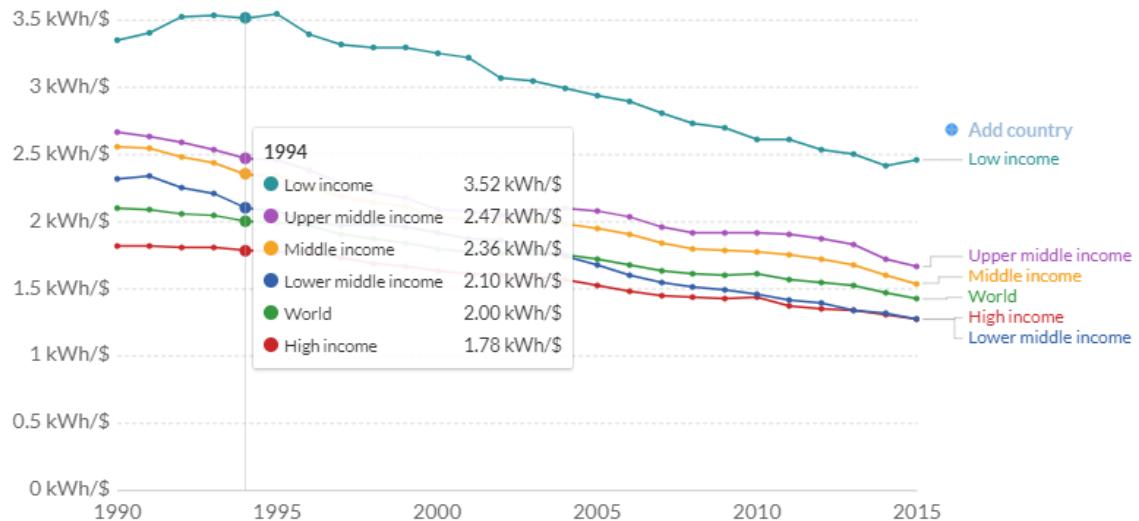


Figura 2: Registro histórico del consumo eléctrico según continentes. Fuente: (BP , 2019)



Por otro lado, el consumo de alimentos ha ido incrementando, principalmente debido a un aumento en la población. Según la FAO (2018), se espera que se consuma el doble para el año 2015. Su demanda histórica se visualiza en la Figura 4, donde se muestra el consumo de alimentos para personas, ganado y otros usos.

Finalmente, con todos estos recursos limitados, es necesario confeccionar metodologías para promover un mejor uso en el área de la agricultura, como lo es el uso de invernaderos.

## 1.1. Invernaderos

**agregar ejemplos con fotos** Los invernaderos son herramientas que permiten disminuir el consumo hídrico y la necesidad de condiciones medio ambientales específicas, haciendo uso de otros recursos, como la electricidad o gas natural. Asimismo, presenta la capacidad de controlar y a su vez monitorear ciertas variables, tales como la temperatura, humedad e iluminación entre otros (Specht y col., 2014). Estos

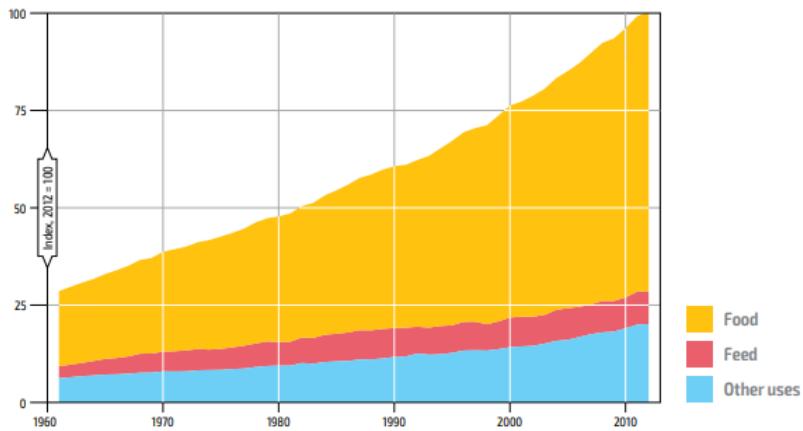


Figura 4: Demanda historica en la agricultura. Fuente: (FAO, 2018)

suelen construirse de tal forma que mejoren de forma pasiva el entorno en que los cultivos son plantados, logrando así aislarlos de los cambios de temperatura, lluvia y los fuertes vientos. Estos invernaderos pueden tener muchas formas de construcción, pero tienden a seguir un “estándar” en lo que respecta a tamaño, irrigación, calefacción e iluminación, siendo estos de un considerable tamaño para albergar la mayor cantidad de plantas en él.

La utilización de irrigación por aspersores o aspersorios en los invernaderos son los mismos que se utilizan en los cultivos a la intemperie. La temperatura del aire atrapado dentro del invernadero puede ser controlado variando el uso de tuberías de calefacción o ventanas al exterior. Por último la iluminación se logra mediante un “techo” que permita el paso de la luz solar como fuente de iluminación (Specht y col., 2014).

## 2. IMPORTANCIA DEL TRABAJO

Como se mencionó anteriormente, el sector agrícola es un área poco desarrollada en cuanto al uso eficiente de recursos, siendo una de las actividades que más afecta el consumo de agua a nivel global. Esto se ve reflejado en distintos elementos, tal como es el caso de la irrigación, donde aún se ocupan elementos como los Sprinklers.

Otra importancia radica en la creciente necesidad de alimentos debido al aumento de población, mientras existe una disminución en las áreas de suelo arable. Debido a esto, se genera una necesidad de habilitar nuevos espacios para la actividad o utilizar tecnologías que permitan un uso mas eficiente del suelo o de suelos antes no disponibles. Un ejemplo de esto son los invernaderos verticales, los cuales permiten multiplicar la producción por metro cuadrado (Specht y col., 2014). Sin embargo, la metodología de construcción de este tipo de invernadero con tecnologías altamente eficientes es escasas.

## 3. DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA

Un invernadero automatizado requiere de un control preciso y oportuno para la minimización del consumo de los recursos utilizados. Varios autores abordan la problemática del control de los invernaderos en diversas áreas como lo son la iluminación, irrigación y calefacción entre otras. Algunos autores como L. Chen y col. (2018), Hasni y col. (2011) y

Singhal y Kumar (2017) utilizan para su modelación el uso de heurísticas para un control más rápido y/o preciso.

### 3.1. Marco teórico de modelos de gestión de recursos

A continuación, se explica las aproximaciones que tomaron los autores mencionados en el cuadro 2 y 1 para los controles de la calefacción, irrigación e iluminación.

La irrigación en la agricultura suele realizarse mediante Sprinklers (aspersores), por ello autores como (DONG, 2018; Gijzen y col., 1998) modelan los invernaderos considerando el uso de esta tecnología como método de irrigación. A pesar de ser los métodos más utilizados, autores como (E. Suarez-Rey, C. Y. Choi, 2000; Kazumba y col., 2010; Zaccaria y col., 2017) han demostrado de forma experimental que el uso de SDI (irrigación en el subsuelo) llegan a ser más eficiente en el uso de agua que los Sprinklers. Dentro de los autores del cuadro 2, el autor (Kandelous & Šimůnek, 2010) es de los pocos que modelan el sistema SDI, el cual tiene la complejidad de tener que calcular el desplazamiento por capilaridad y gravedad a través del suelo pero, a diferencia del uso de Sprinkler, no es necesario calcular pérdidas de evaporación.

Por otra parte, la calefacción para invernaderos es el tópico más abordado por los autores del cuadro 2, ya que se considera como uno de los mayores consumos dentro de un invernadero(J. Chen y col., 2015). Debido a la alta complejidad matemática del sistema producida por la dinámica de fluidos, ciertos autores utilizan modelos heurísticos, principalmente la optimización de enjambre de partículas (PSO) (L. Chen y col., 2018; Hasni y col., 2011), el cual simplifica la dinámica de la temperatura del aire atrapado dentro del invernadero. El autor(Singhal & Kumar, 2017) utiliza algo parecido, pero con el uso de optimización de lobo gris (GWO), con el cual logró mejores resultados en dicho trabajo por la naturaleza de la termodinámica(convección). Otros autores como Kurpaska y Slipek (2000), modeló un sistema donde se elevó la temperatura del suelo y en consecuencia, aumentó la del aire. En dicho trabajo se contrastaron ambos sistemas, logrando mejoras eficiencias en los intercambiadores enterrados. Ambos sistemas pueden ser visualizados en la figura 5.

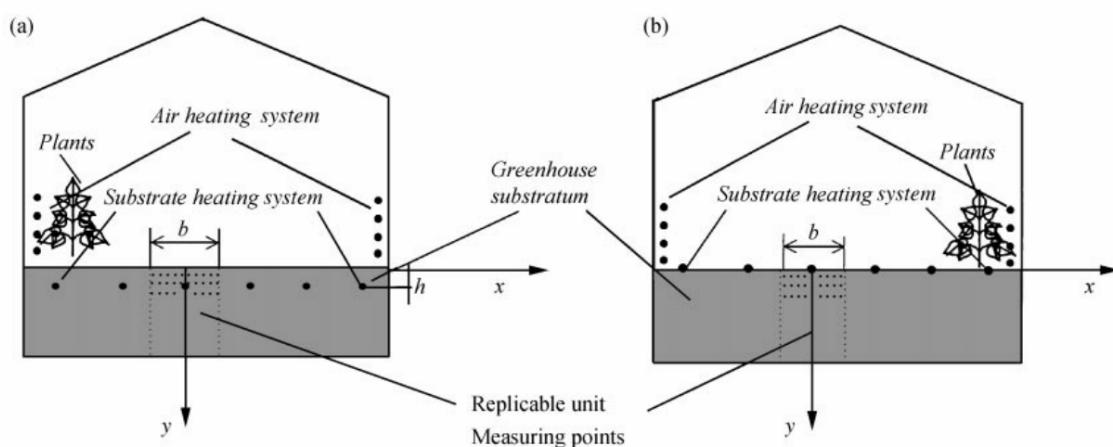


Figura 5: a) Sistema convencional b) Sistema subsuelo. Fuente: (Kurpaska & Slipek, 2000)

En cuanto a iluminación, debido a que la mayoría de los invernaderos estudiados son de tipo "venlo" (estructuras transparentes de vidrio o plástico) la iluminación no es una

variable que se pueda controlar, ya que esta proviene de la luz solar y es atenuada por el material de construcción. Debido a que su efecto no perdura en el tiempo, esta es una variable en que su control esta meramente determinado por la iluminación del sol. Según (Darko y col., 2014) cada planta tiene un rango en el nivel de luz en donde la fotosíntesis es más efectiva y por ello (van Iersel & Gianino, 2017) aborda el control de esta variable graduando un pulso modulado(PWM), para el cual se hizo una regresión lineal respecto a los valores entregados por una tira LED(diodo emisor de luz) al respectivo valor del PWM.

### **3.2. Marco teórico de modelos de optimización en la gestión de recursos en un invernadero**

A continuación, se muestra una pequeña descripción del trabajo de cada autor de la tabla 2.

**Kurpaska y Slipek, 2000** desarrolla un modelo que minimiza la temperatura del líquido que fluye dentro de los intercambiadores de calor en un invernadero, además de responder a qué distancia de la superficie del suelo se deben colocar los intercambiadores en el subsuelo.

**Kandelous y Šimůnek, 2010** desarrolla un modelo para minimizar el uso de agua en sistemas de irrigación SDI para luego compararlo con el modelo numérico HYDRO-2D, el software analítico WetUp, y otros modelos empíricos por el mismo autor en 2008.

**Hasni y col., 2011** desarrolla un modelo de PSA (algoritmos de enjambre de partículas) y AG (algoritmo genético) para minimizar el costo operacional de la calefacción. Considerando que la tierra se calienta y aire encerrado en el invernadero.

**Kiyan y col., 2013** desarrolla un modelo de calefacción con fuente híbrida (solar/fósil) para minimizar el consumo de combustible en función del entorno (temperatura e iluminación) y los parámetros propios del invernadero.

**Bozchalui y col., 2015** desarrolla un modelo para minimizar los costos operacionales de iluminación y producción de CO<sub>2</sub> según una predicción del clima, además se introduce el efecto de las “Smart-Grid” en la variación de precios para la electricidad. Las variaciones de estas predicciones son estudiadas a través de la simulación de montecarlo.

**J. Chen y col., 2015** Desarrolla un modelo utilizando CDF (dinámica de fluidos computacional) más un modelo de predicción para minimizar únicamente los costos operacionales de la calefacción en invernaderos.

**Singhal y Kumar, 2017** desarrolla un modelo para el control de la calefacción mediante el uso de GWO (optimización del lobo gris), luego compara sus resultados con otras técnicas como PSO y AG.

**L. Chen y col., 2018** desarrolla un modelo robusto para el control de la temperatura a través de MPC (modelo predictivo de control), para ello utiliza PSO que permite incluir una posible perturbación, la cual suele ser omitida por otros autores. Comparó el MPC con y sin PSO vinculándole un ruido sinusoidal.

**DONG, 2018** Utilizando partes de los modelos en Gijzen y col., 1998 desarrolla un modelo centrado en un invernadero de una cara para la minimización de los costos de calefacción según las condiciones externas

A continuación, se muestran dos tablas de los autores relevantes para este trabajo. En ellas se ordenan los autores respecto al tipo de contribución (construcción o modelado), a su vez, se muestra las variables que se trabajan en dichos documentos. También, se distinguió si el control que realizó para dicha(s) variable(s) fue realizada como: una predicción del comportamiento en el tiempo, un control en tiempo real o si no efectuó control alguno. Finalmente, se muestra si es que el autor realizó una aplicación experimental o no.

Cuadro 1: Marco teórico de construcción de un invernadero

Autor	Año	Objetivo	1	2	3	Tipo de control	Experimental
E. Suarez	2000	Comparación de tipos de irrigación Sprinkler/SDI	X			R	X
Kazumba, S.	2010	Uso de SDI con agua recuperada	X			R	X
F. R. Lamm	2010	Estado de la tecnología SDI	X			N	
Xiaoning M.	2012	Analizar patrones por el riego mediante SDI	X			N	X
Cuce E.	2016	Analizar métodos sostenibles para invernaderos		X	X	N	
Marc W.	2016	Proponer una metodología de iluminación asistida			X	R	X
Propuesta	2020	Desarrollo de un invernadero modular eficiente	X	X	X	P	X

Cuadro 2: Marco teórico de modelos de optimización en la gestión de recursos

Autor	Año	Función Objetivo	1	2	3	Tipo de control	Experimental
Kurpaska, S.	2000	Minimizar altura de tubos de calefacción subterráneos		X		P	X
Kanelous, M.	2010	Minimizar el uso de agua para regadío	X			P	X
Hasni, A.	2011	Minimizar gasto en calefacción mediante heurística		X		P	X
Kiyan, M.	2013	Minimizar temperatura requerida para calefaccionar un invernadero		X		R	X
Mohammad, C.	2015	Minimizar gasto en calefacción e iluminación en "Smart Grids"	X			P	
Chen, J.	2015	Minimizar costos operacionales de Calefacción		X		P	X
Singhal, R.	2017	Minimizar gasto en calefacción mediante heurística		X		P	
Iijun, C.	2018	Minimizar gasto en calefacción mediante heurística		X		P	
Shuyao D.	2018	Minimizar consumo eléctrico en invernaderos		X		N	X
Propuesta	2020	Minimizar costos operacionales de un invernadero modular	X	X	X	X	X

---

(1) = irrigación      (2) = temperatura      (3) = Iluminación      R = Control en tiempo real  
P = Control predictivo    N = Sin control    X = Realiza un experimento

## agregar partes

### 3.3. DIGITALIZACIÓN (ADC)

### 3.4. PROTOCOLO MQTT

## 4. CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO

La contribución del trabajo se divide en: (a) diseñar y confeccionar un sistema para invernaderos modulares que permita la comunicación, control y visualización de múltiples "módulos" de invernaderos automatizados; y (b) desarrollar un modelo de optimización que minimice los costos por el uso del sistema de irrigación y temperatura en el tiempo.

## 5. HIPÓTESIS

Un invernadero automatizado que realice un control mediante un modelo matemático sera más eficiente que un control realizado por métodos más convencionales.

## 6. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de gestión para la automatización de invernaderos modulares, minimizando costos operacionales.

## 7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Confeccionar una maqueta/prototipo de un invernadero modular, incorporando sensores de medición (internos y externos) para las variables de temperatura, humedad y luz.
- Confeccionar un sistema de control cerrado para las variables de la irrigación, iluminación y calefacción.
- Confeccionar un modelo de optimización que minimice los costos por el uso del sistema de irrigación y temperatura en el tiempo.
- Implementar y obtener resultados del sistema de control y modelo de optimización dentro del invernadero.

## 8. METODOLOGÍA

El invernadero propuesto consta de 3 componentes; el invernadero como estructura física, el modelo de optimización el cual define el comportamiento futuro del invernadero y un sistema de gestión que realice la función de puente entre múltiples aplicaciones, el modelo y el invernadero. La interacción entre los componentes se exemplifica en la figura 6.

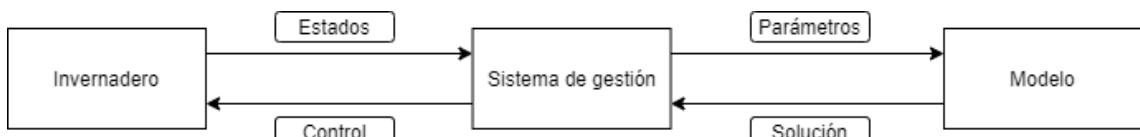


Figura 6: Relación entre sistemas desarrollados

### 8.1. INVERNADERO

El invernadero desarrollado se compone tanto de la estructura física que alberga y aísla las plantas, actuadores (bombas, calefactor y luminaria), elementos de medición (sensores) y una caja con la electrónica necesaria para la interacción de los elementos anteriores.

#### 8.1.1. ESTRUCTURA

La estructura del invernadero se construyó en dos partes:

- Una base cuadrada que sujeta y aísla térmicamente a 8 contenedores (submódulos) que funcionan como macetas para las plantas mas un contenedor, estos contenedores a su vez rodean un mayor contenedor (unidad central) el cual almacena el agua, esta

agua se utiliza como intercambiador de calor al moverse atravesó de las cañerías de calefacción que atraviesan de forma similar por cada uno de los 8 submódulos con retorno a la misma unidad central Figura XX , esta guía también será utilizada para la irrigación mediante SDI en cada uno de los submódulos.

- Una tapa para la base con paredes transparentes y aislantes construidas como un “sándwich” de polietileno y aire, esta tapa también sujetara un cuadro suspendido de altura regulable con “tiras led” para lograr una iluminación asistida cuando la iluminación natural escasee.



(a) Modelo 3D



(b) Maqueta desarrollada

Figura 7: Modelo 3D propuesto y maqueta realizada

## 8.2. CAJA

al exterior de la estructura estará presente una caja estanca Figura XX que contenga los mecanismos de control para los actuadores (bombas, iluminación LED y calefactor) ubicados en el invernadero además de un microcontrolador ESP-32-WROOM el cual se encargara del manejo de señales dentro y hacia afuera del invernadero, finalmente existirá una fuente de poder que entregue los voltajes [ 3,3V : 5V : 12V ] los cuales son necesarios para los elementos de control y en paralelo a esta fuente se desviara una vía de 220V que pase atreves de los reles respectivos para el control de los actuadores de mayor potencia (calefactor y bomba) .

El funcionamiento del invernadero se realizará mediante el control de tres variables en su interior iluminación, temperatura e irrigación, a continuación, se describirá cada sistema y metodología de control.

- La **iluminación asistida** será controlada de forma proporcional según la iluminación resultante de la luminaria LED más la iluminación natural esperada para un tiempo determinado en el día. Para esto se utilizará el sensor de intensidad lumínica MAX44900 el cual permite una medida integrada en un tiempo de 50 ms como lo recomienda el fabricante para las condiciones en que será expuesto el sensor, además se utilizará un controlador de corriente constante P9813 para luces LED, su salida será ajustada entre cada lectura del sensor.



Figura 8: Caja con los elementos de control

- La **irrigación** será controlada por la variable de irrigación (*BA*) que entrega el modelo, según esta se accionará la bomba de irrigación, esta acción rellenará la columna de agua que genera una presión de valor conocida sobre el tubo de goteo en el subsuelo, finalmente esta presión provocará un goteo que humedecerá la tierra de cada contenedor de forma similar, esta humedad será medida por un sensor capacitivo de humedad de salida analógica. El flujo de agua dentro del invernadero se puede apreciar en la Figura 9

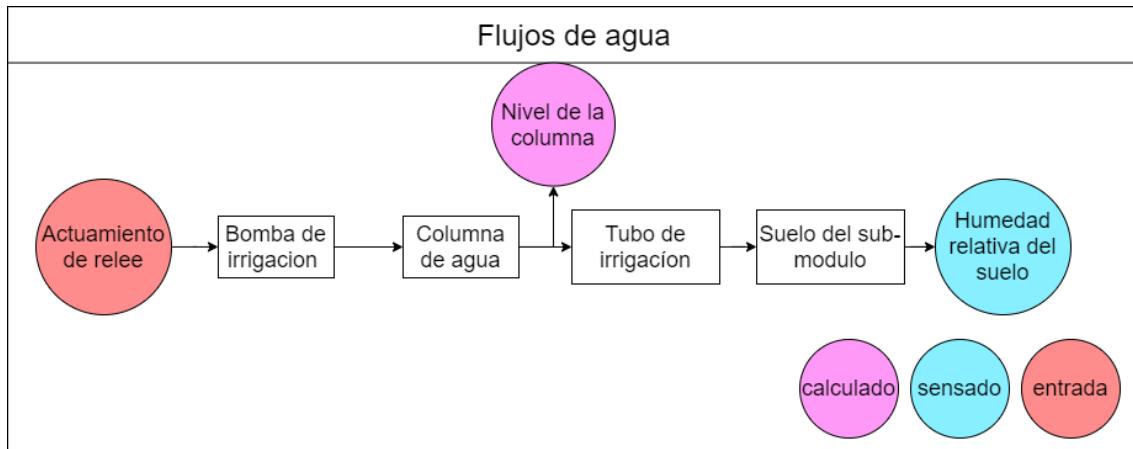


Figura 9: Relación entre sistemas desarrollados

- La **temperatura** será regulada, al igual que la irrigación por medio del modelo matemático, donde se accionará tanto la bomba de temperatura como el calefactor según la variable de calefaccionar (*BT*), el calefactor calentara el agua del módulo principal y la bomba circulará esta agua calentada por una tubería de cobre que atraviese a cada submódulo como se presenta en la **Figura XX**, el calor se transferirá como se muestra en la Figura 10.

### 8.2.1. Instrumentación

La instrumentación para el invernadero se encuentra descrita en el Cuadro 3.

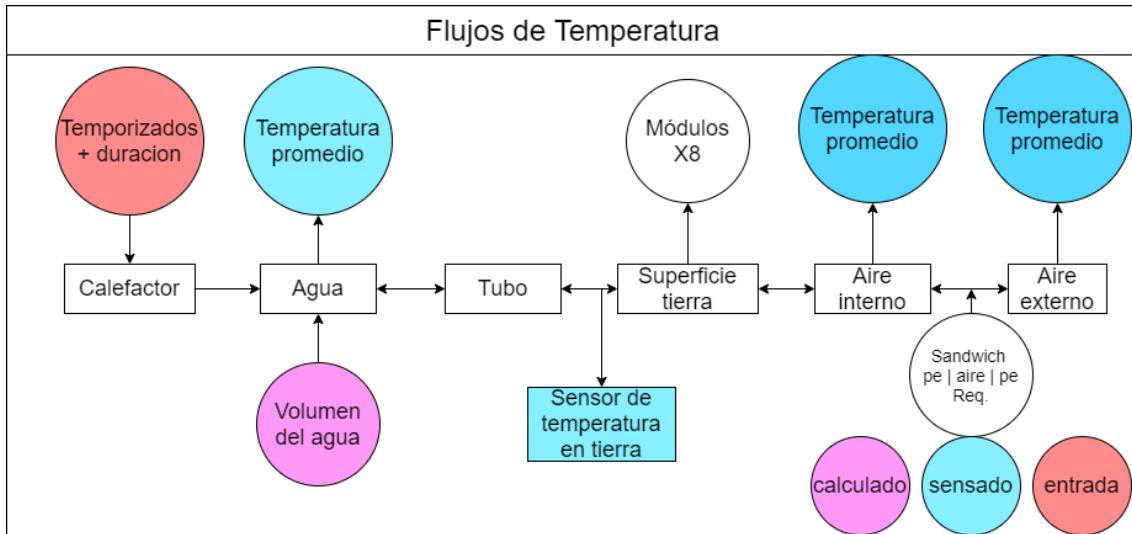


Figura 10: Relación entre sistemas desarrollados

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	[? .. ?] Hum relativa
ADS1115	ADC	Conversor analógico → 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 3: Componentes utilizados

Dentro de los sensores utilizados, se destaca que tanto los MAX44009 como los ADS1115 fueron conectados por medio del protocolo I2C lo que permitió un mejor aprovechamiento de los pines del ESP32. También se debe destacar, que al utilizarse la funcionalidad de conexión WIFI en el microcontrolador, este deja de tomar medidas exactas por su ADC interno y por ello se utilizó el ADS1115. Otro caso importante de mencionar es el del DHT11 el cual es un sensor con un tiempo de muestreo lento (2 segundos entre mediciones), el cual debe respetarse ya que este puede enviar información antigua sin alerta alguna o incluso puede perder la siguiente medición si se le apura mucho.

### 8.3. 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.

### 8.3.1. Mosquitto(MQTT) & MySQL

Las herramientas ya existentes que se utilizaron fueron:

- Broker 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.

### 8.3.2. 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 11.



Figura 11: 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 12.

### 8.3.3. 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 13b. 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 8.3.2 y luego enviado por MQTT. Este comportamiento es descrito en mayor detalle en el diagrama de la Figura 13a.

**Terminar esta aplicación y subir una foto**

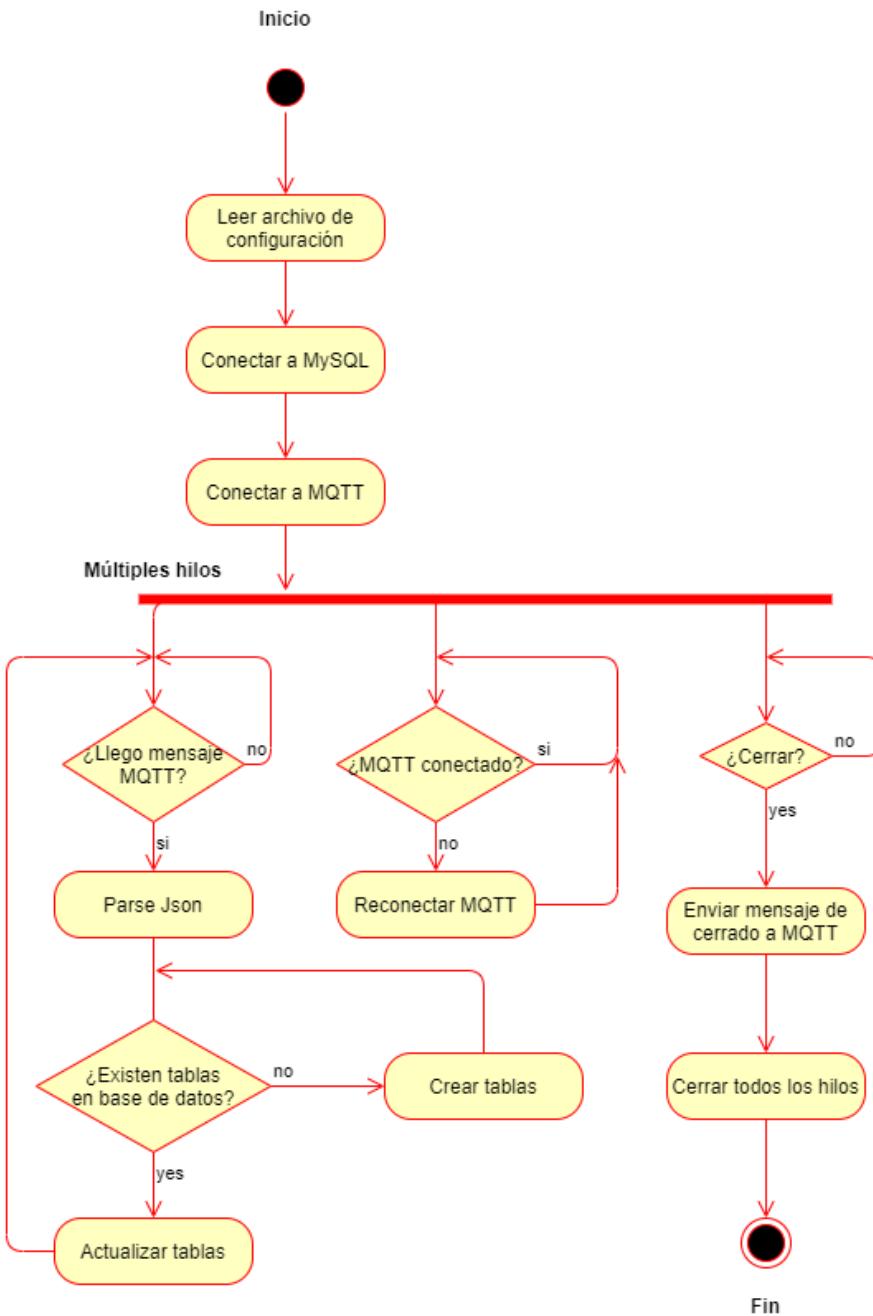
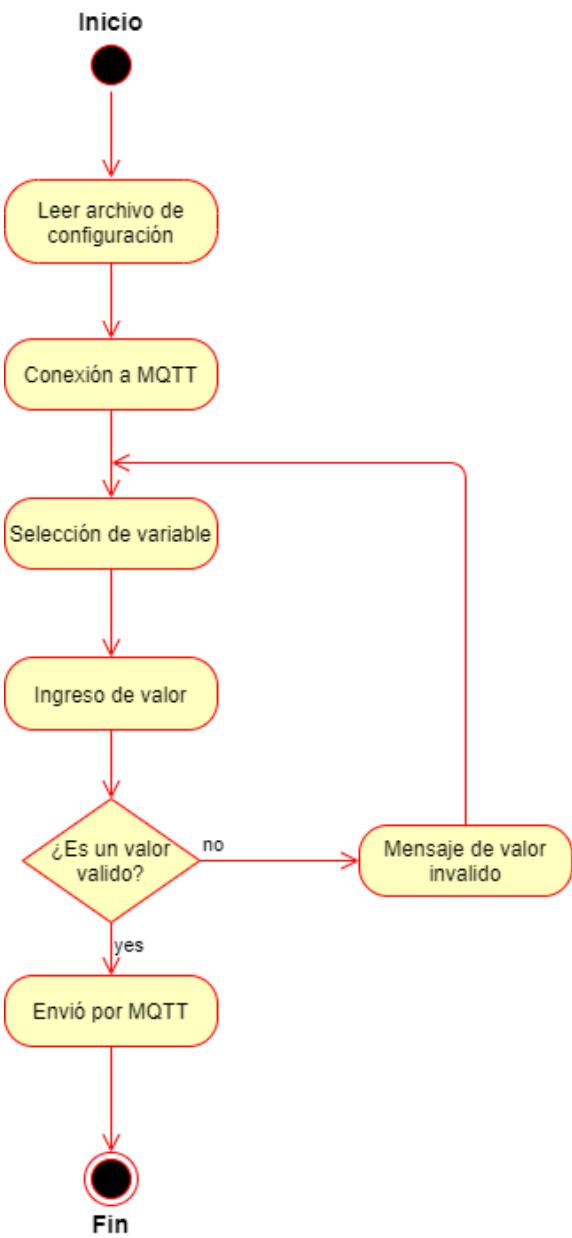


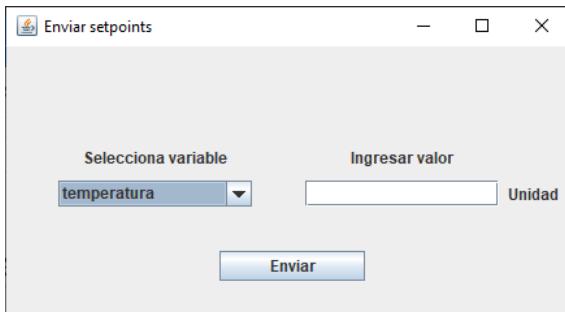
Figura 12: Diagrama de la aplicación que procesa mensajes.

#### 8.3.4. 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 sistemas que estén sin funcionamiento. Este sistema está diseñado para realizar un control por lazo cerrado en cada sistema descrito en la **Figura ??**, 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.



(a) Diagrama del funcionamiento



(b) Programa realizado

## 8.4. Modelo de optimización

### 8.4.1. Descripción del problema

Se cuenta con un invernadero, el cual tiene de distintos costos relacionados con su funcionamiento. Uno de estos viene dado por la electricidad consumida calefactor en conjunto a la bomba de calefacción  $BT * (ebt + ect)$ , más el funcionamiento de la bomba de irrigación  $BA$ , cada uno de estos por sus respectivos costos de electricidad  $ce$ , otro es el costo del agua  $ca$  por el volumen utilizado  $BA \cdot aba$  para la irrigación.

Por otro lado, es necesario mantener dentro de un rango la temperatura de agua  $[ta_{min}, ta_{max}]$ , la temperatura del suelo  $[tp_{min}, tp_{max}]$ , la temperatura del aire dentro del invernadero  $[tai_{min}, tai_{max}]$ , y la humedad relativa del suelo entre  $[hs_{min}, hs_{max}]$ .

#### 8.4.2. Supuestos

- I. La temperatura del aire dentro y fuera del invernadero es homogénea.
- II. La temperatura del aire fuera del invernadero puede ser obtenida para una ventana de tiempo determinada.
- III. La temperatura del agua dentro del contenedor del invernadero es homogénea debido al efecto de la bomba de calefacción.
- IV. La temperatura dentro del tubo de calefacción es homogénea.
- V. 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.
- VI. 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 emiten la misma cantidad de calor al aire externo.
- VII. Las pérdidas de calor en la plantación por el suelo al exterior son despreciables ya que se encuentran aislado térmicamente.
- VIII. 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.
- IX. La recarga de la columna de agua es de forma total, independiente del nivel actual.
- X. **investigar esto** Los niveles de humedad relativa que se mantienen en el invernadero permiten despreciar la evo-transpiración.
- XI. La humedad relativa del suelo puede ser determinada por regresión.

#### 8.4.3. Modelo Matemático

A continuación, se presenta el modelo matemático:

$$\text{Min} \sum_{t \in TIEMPOS} (ce * (BT_t * (ebt + ect))) + \quad (1)$$

$$\sum_{t \in TIEMPOS} (ca * BA_t * aba) + \quad (2)$$

$$\sum_{v \in VARS} \sum_{t \in TIEMPOS} (mucho_v * CF_{t,v}) \quad (3)$$

La función 1 minimiza el consumo eléctrico debido a las activaciones de bombas y el calefactor y la función 2 minimiza el gasto en agua, en ambos casos se relacionan el consumo a una unidad monetaria además se agrega un holgura figura 3 por situaciones en que el sistema no es capaz de mantener las condiciones mínimas y/o máximas.

Conjuntos	
<i>TIME</i>	{0,maxt} Conjunto de tiempos distanciados por "periodo" segundos
<i>TIEMPOS</i>	{periodo,maxt} Sub-conjunto de <i>TIME</i>
<i>VARS</i>	{0,maxt} Conjunto de variables de holgura para requerimientos de la planta
Parametros	
<i>periodo</i>	Tiempo en segundos que dura cada tiempo
<i>maxt</i>	Numero máximo de tiempos
<i>caleagua</i>	Calor específico del agua
<i>caleaire</i>	Calor específico del aire
<i>masaaire</i>	Masa del aire que esta atrapado dentro del invernadero
<i>denagua</i>	Densidad del agua
<i>rags</i>	Resistencia térmica desde el agua a la superficie de la tierra
<i>rsai</i>	Resistencia térmica desde la superficie de la tierra al aire atrapado
<i>raie</i>	Resistencia térmica desde el aire atrapado al aire en el exterior
<i>tiag</i>	Temperatura inicial de agua
<i>tiai</i>	Temperatura inicial de aire atrapado
<i>vi</i>	Volumen inicial del agua litros
<i>ceav</i>	Calor específico volumétrico del agua
<i>qc</i>	Calor generado en KJ por encender el calefactor en un tiempo
<i>ce</i>	Costo en pesos (CLP) por KWh de electricidad consumida
<i>ca</i>	Costo en pesos (CLP) por litro de agua consumida
<i>eba</i>	Energía consumida en KWh por activar la bomba de irrigación
<i>ebt</i>	Energía consumida en KWh por activar la bomba de calefacción
<i>ect</i>	Energía consumida en KWh por activar el calefactor
<i>tamin</i>	Límite inferior a la temperatura del aire atrapado en C°
<i>tamax</i>	Límite superior a la temperatura del aire atrapado en C°
<i>tamax</i>	Temperatura máxima a la que calienta el agua el calefactor en C°
<i>tamin</i>	Temperatura mínima del agua en el sub-modulo central en C°
<i>aba</i>	Cantidad de agua en litros que se ocupa al utilizar la bomba de agua
<i>Hrel</i>	Porcentaje de humedad relativa añadida por una activación de la irrigación
<i>Hmin</i>	Porcentaje mínimo de humedad en el suelo para la planta
<i>Hmax</i>	Porcentaje máximo de humedad para la planta
<i>Hin</i>	Humedad relativa inicial
<i>mucho<sub>v</sub></i>	Ponderador de holguras CLP/(sobre limite) $v \in VARS$ (costo feo)
<i>te<sub>t</sub></i>	Temperatura exterior en el tiempo $t \in TIME$
Variables decisión	
<i>BT<sub>t</sub></i>	1 si se enciende la bomba de temperatura y el calefactor en el tiempo $t \in TIME$ , 0 si no
<i>BA<sub>t</sub></i>	1 si se enciende la bomba de agua en el tiempo $t \in TIME$ , 0 si no
<i>VA<sub>t</sub></i>	Volumen de agua en litros en el tiempo $t \in TIME$
<i>CF<sub>tv</sub></i>	Variable de holgura $v \in VARS$ en el tiempo $t \in TIME$ (costo feo)
Variables auxiliares	
<i>HUM<sub>t</sub></i>	Porcentaje de humedad relativa en la tierra del invernadero en el tiempo $t \in TIME$
<i>TAI<sub>t</sub></i>	Temperatura en C° del aire atrapado en el tiempo $t \in TIME$
<i>TAG<sub>t</sub></i>	Temperatura en C° del agua en el tiempo $t \in TIME$

Cuadro 4: Conjuntos, parámetros y variables del modelo

$$TAG_t = TAG_{t-p} + ((BT_{t-p} * qc * 1000 + \\ 8 * \frac{TAI_{t-p} - TAG_{t-p}}{rags + rsai}) * \\ * \frac{p}{VA_t * caleagua * denagua}) \quad \forall p = periodo, t \in TIME \quad (4)$$

$$TAI_t = TAI_{t-p} - (\frac{8 * (TAI_{t-p} - TAG_{t-p})}{rags + rsai} + \\ \frac{te_{t-p} - TAI_{t-p}}{raie} * \\ * \frac{p}{masaaire * caleaire} \quad 22 \quad \forall p = periodo, t \in TIME \quad (5)$$

La restricción 4 representa la transferencia de calor desde el calefactor al agua dentro del estanque, además de la transferencia hacia el aire interno a través de los 8 contenedores con tierra, de igual manera, la restricción 5 representa las transferencias desde el aire interno y hacia el exterior del invernadero.

agrego lo que esta comentado para explicar las transferencias o lo paso a marco teórico

$$HUM_t \leq HUM_{t-p} + Fe + BA_t * Hrel \quad \forall p = periodo, t \in TIME \quad (6)$$

$$VA_t = VA_{t-p} - aba * BA_{t-p} \quad \forall p = periodo, t \in TIME \quad (7)$$

La restricción 6 modela las variaciones de la humedad relativa en el suelo en función de las activaciones de  $BA_t$  y de la disminución de humedad característica del sistema  $Fe$ . Además la restricción 7 relaciona el consumo de agua con las activaciones de la bomba de irrigación.

$$var_t \leq var_m ax + CF_{t,v} \quad \forall t \in TIME \quad (8)$$

$$var_m in \leq var_t + CF_{t,v} \quad \forall t \in TIME \quad (9)$$

Las restricciones 8 y 9 representan de forma genérica la utilización de holguras  $CF_{t,v}$  sobre cada variable auxiliar  $var_t$  (4) en cada tiempo  $t$  para evitar que las temperaturas y humedades salgan de los rangos impuestos según la planta a cultivar.

$$TAI_t = tiai \quad \forall t = 0 \quad (10)$$

$$TAG_t = tiag \quad \forall t = 0 \quad (10)$$

$$HUM_t = Hin \quad \forall t = 0$$

El grupo de restricciones 10 entregan las condiciones iniciales al modelo.

$$BT_t, BA_t, VA_t, CF_{tv} \in \{1, 0\} \quad \forall t \in TIEMPOS \quad (11)$$

$$TAI_t, TAG_t \in \mathbb{R} \quad \forall t \in TIME \quad (12)$$

$$HUM_t \in \{100, 0\} \quad \forall t \in TIME \quad (13)$$

Las restricciones 11, 12, 13 indican el dominio de las variables.

## 9. RESULTADOS

agregar partes

- 9.1. COSTOS DE PRODUCCIÓN**
- 9.2. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS**
  - 9.2.1. PARÁMETROS DEL INVERNADERO**
  - 9.2.2. PREDICCIÓN DE TEMPERATURA**
- 9.3. COMPORTAMIENTO DEL MODELO**
- 9.4. OPERACIÓN DEL INVERNADERO**
  - 9.4.1. DATOS RECOPILADOS**
  - 9.4.2. RESPUESTA AL CONTROL**

**algo mas?**

## **10. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

darle mas vueltas al modelo.

## **11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

### **Referencias**

- 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, J., Xu, F., Tan, D., Shen, Z., Zhang, L. & Ai, Q. (2015). A control method for agricultural greenhouses heating based on computational fluid dynamics and energy prediction model. *Applied Energy*, 141(1), 106-118. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.026>
- 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>
- Darko, E., Heydarizadeh, P., Schoefs, B. & Sabzalian, M. R. (2014). Photosynthesis under artificial light: The shift in primary and secondary metabolism. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1640). <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0243>
- DONG, S. (2018). *Thermal environment modelling 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.
- FAO. (2018). *The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050*. <http://www.fao.org/3/I8429EN/i8429en.pdf>

- 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>
- Kazumba, S., Gillerman, L., Demalach, Y. & Oron, G. (2010). Sustainable domestic effluent reuse via subsurface drip irrigation (SDI): Alfalfa as a perennial model crop. *Water Science and Technology*, 61(3), 625-632. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.904>
- Kiyan, M., Bingöl, E., Melikoglu, 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>
- 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>
- 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>