



# **Diseño de una estrategia de control robusto para manejo de temperatura a partir del modelo de un invernadero**

**Héctor Iván Tangarife Escobar**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica - FIMEB  
Bogotá D.C., Colombia  
2020



# **Diseño de una estrategia de control robusto para manejo de temperatura a partir del modelo de un invernadero**

**Héctor Iván Tangarife Escobar**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Maestría en instrumentación y automatización**

Director (a):

Ph.D. Andrés Leonardo Jutinico Alarcón

Codirector (a):

Ph.D. Álvaro David Orjuela Cañón

Línea de Investigación:

Sistemas de control

Grupo de investigación en bioinstrumentación y control GIBIO

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica - FIMEB

Programa de maestría en instrumentación y automatización

Bogotá D.C., Colombia

2020



*El hombre que busca un norte y nunca desfallece encuentra uno de los caminos a la felicidad individual.*

*A Dios*

*Por permitirme cumplir con las metas que me he propuesto, por fortalecer mi espíritu de lucha y por haber puesto en mi camino a las personas que han compartido sus conocimientos y me han guiado.*

*A mi familia*

*Dedico de manera muy especial a mis padres que han forjado en mi un carácter persistente y quienes han sido parte de mis cimientos en mi vida profesional y un apoyo incondicional.*

*Dedico este trabajo a mi hermano Andrés Tangarife, a quien le quiero transmitir un mensaje muy especial con el esfuerzo realizado durante la construcción de este trabajo, agradecerle por su apoyo y decirle: “el árbol es gigante porque sus raíces son profundas y fuertes”. A Sandra Gaitán por sus buenos consejos y apoyo durante la toma de decisiones personales para acercarme a esta meta.*

*A mis maestros.*

*Ingeniero Andrés Leonardo Jutinico por su gran apoyo y motivación, por entregar su conocimiento de manera oportuna y por impulsar el avance académico y su asesoría constante para la elaboración de este trabajo.*



## **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero agradecer a Andrés Leonardo Jutinico, director y asesor del proyecto de grado de maestría por su orientación respecto a la temática de trabajo, la asesoría durante la ejecución y la contribución en el desarrollo del producto final.

Quiero extender mis agradecimientos al Servicio Nacional de Aprendizaje SENA por permitir el tiempo para realizar actividades de investigación. Agradecimientos especiales al grupo de investigación GICEMET perteneciente al Centro Metalmeccánico CMM por facilitar el desarrollo de proyectos dentro de la línea de investigación del presente trabajo.





## Resumen

La agricultura bajo invernadero hace parte de una solución al manejo del clima para las plantas mediante la protección del cultivo, sin embargo, los sistemas de producción bajo cubierta presentan dinámicas con incertidumbres en el modelo y disturbios que generan condiciones ambientales no favorables y baja uniformidad en las variables ambientales. Debido a estas premisas, el presente proyecto presenta el diseño de una estrategia de control para el manejo de variables climáticas como la temperatura, mediante el uso de técnicas robustas empleando un modelo dinámico de invernadero con características específicas extraído de la bibliografía. El proyecto se desarrolla en las siguientes etapas: Reconocimiento e implementación del modelo dinámico a utilizar, simulación del modelo de invernadero a través del software, diseño de una estrategia de control para el invernadero usando los algoritmos, "Regulador robusto recursivo para sistemas lineales sujetos a saltos Markovianos de tiempo discreto", comparación del control diseñado con un "Regulador robusto óptimo lineal cuadrático para sistemas sujetos a incertidumbres" y finalmente interpretación y análisis de los resultados para validar la estrategia más adecuada a partir de la robustez del controlador, la simulación se realiza en Matlab, mediante el uso de un modelo de invernadero existente, estudiado y extraído de la bibliografía. A partir del proyecto se obtiene la estrategia de control que logre los ajustes deseados.

**Palabras clave:** Estrategia de control, invernadero, variables climáticas, modelo dinámico, control de variables ambientales.

## Abstract

Greenhouse agriculture is part of a solution to climate management for plants through crop protection; however, agriculture indoor production systems present dynamics with nonlinearities, model uncertainties, and disturbances. The above generates unfavorable ecological conditions and low uniformity for environmental variables. Due to these premises, the current project sets out to design a control strategy to manage climatic variables such as temperature using robust techniques using a dynamic greenhouse model with specific characteristics extracted from the bibliography. The project has the following stages: recognition and implementation of the dynamic model to be used; simulation of the greenhouse model through software; design of a control strategy for the greenhouse using the algorithms: "Robust Regulator for Discrete-time Markov Jump Linear systems" in comparison with the "robust Linear Quadratic Regulator "; and finally the interpretation and analysis of the results to validate the most appropriate strategy based on the robustness of the controller, the simulation is performed in Matlab, through the use of an existing greenhouse model, studied and extracted from the bibliography, the project hopes to obtain the control strategy that achieves the desired adjustments.

**Keywords:** Control strategy, greenhouse, climatic variables, dynamic model, control of environmental variables.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Lista de símbolos y abreviaturas</b> .....	<b>XV</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>17</b>
<b>Planteamiento del problema</b> .....	<b>22</b>
<b>Justificación</b> .....	<b>24</b>
<b>Objetivos</b> .....	<b>26</b>
<b>Capítulo 1</b> .....	<b>27</b>
<b>1. Metodología y marco teórico</b> .....	<b>27</b>
1.1 Metodología de desarrollo del proyecto .....	28
1.2 Marco teórico .....	29
1.2.1 Regulador Lineal Cuadrático LQR .....	29
1.2.2 Regulador Robusto Lineal Cuadrático RLQR .....	32
1.2.3 Regulador Robusto Recursivo .....	33
1.2.4 Regulador Robusto Recursivo para Sistemas Lineales de Salto Markoviano en Tiempo Discreto RR-DMJLS .....	35
1.3 Descripción del sistema invernadero .....	37
1.3.1 Variables climáticas en sistemas productivos bajo cubierta .....	38
1.3.2 Actuadores del sistema bajo cubierta .....	40
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>43</b>
<b>2. Modelo dinámico del sistema</b> .....	<b>43</b>
2.1 Modelo dinámico de temperatura en invernadero .....	44
2.2 Modelo dinámico de humedad en el invernadero .....	47
2.3 Modelo dinámico del dióxido de carbono en invernadero .....	48
2.4 No linealidades del sistema .....	49
2.5 Linealización en el punto de operación .....	57
2.6 Coeficientes del modelo dinámico del sistema .....	59

2.7	Modelo de espacio de estados.....	61
2.8	Análisis de incertidumbres .....	64
2.9	Disturbios asociados al sistema .....	68
2.9.1	Primer escenario de variables ambientales .....	68
2.9.2	Segundo escenario de variables ambientales .....	74
2.10	Resultados sobre la simulación del modelo del sistema dinámico .....	77
2.10.1	Descripción de la familia de disturbios.....	80
<b>Capítulo 3 .....</b>		<b>83</b>
<b>3. Diseño y resultados de la simulación del control de Temperatura a partir de los reguladores óptimo y robusto .....</b>		<b>83</b>
3.1	Diseño del LQR para el sistema con disturbios.....	83
3.2	Resultados del LQR para el sistema con disturbios .....	84
3.2.1	LQR primer y segundo escenario .....	85
3.3	El problema de la saturación.....	88
3.4	Diseño del LQR con integrador con saturación .....	88
3.5	Resultados LQR con integrador y con saturación primer y segundo escenario.....	90
3.6	Diseño del RLQR para el sistema con disturbios .....	94
3.7	Resultados del RLQR para el sistema con disturbios.....	95
3.7.1	RLQR con integrador con saturación primer y segundo escenario .....	95
<b>Capítulo 4 .....</b>		<b>101</b>
<b>4. Diseño y resultados de la simulación del control de Temperatura a partir del regulador robusto sujeto a saltos Markovianos .....</b>		<b>101</b>
4.1	Solución al problema de la saturación.....	101
4.2	Diseño del control Markoviano con acción integral y saturación.....	103
4.3	Resultados control Markoviano con integrador y saturación 1er escenario .....	106
4.4	Resultados control Markoviano con integrador y saturación 2do escenario .....	109
<b>Capítulo 5 .....</b>		<b>112</b>
<b>5. Resultados: comparación de las estrategias de control 1er y 2do escenario.....</b>		<b>112</b>
<b>Conclusiones .....</b>		<b>121</b>
<b>Recomendaciones .....</b>		<b>122</b>
<b>Anexo A: Linealización del sistema.....</b>		<b>124</b>
<b>Bibliografía .....</b>		<b>129</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Fases revisión bibliográfica. ....	27
Figura 2. Diagrama metodología del proyecto. ....	29
Figura 3. Invernadero de referencia.....	38
Figura 4. Comportamiento estomático en varias condiciones ambientales.....	40
Figura 5. Distribución de boquillas en invernadero. ....	41
Figura 6. Caudales y reguladores de presión. ....	42
Figura 7. Diagrama de bloque del sistema dinámico. ....	63
Figura 8. Valores singulares asociado a la variable temperatura.....	68
Figura 9. Primer escenario señales de disturbios. ....	73
Figura 10. Segundo escenario señales de disturbios.....	76
Figura 11. Comportamiento del modelo en lazo abierto primer escenario. ....	79
Figura 12. Familia de disturbio primer escenario. ....	81
Figura 13. Familia de disturbio segundo escenario.....	82
Figura 14. LQR sin integrador sin saturación primer escenario. ....	86
Figura 15. LQR sin integrador sin saturación segundo escenario.....	87
Figura 16. LQR con integrador con saturación primer escenario. ....	91
Figura 17. LQR con integrador con saturación segundo escenario.....	92
Figura 18. RLQR con integrador con saturación primer escenario.....	97
Figura 19. RLQR con integrador con saturación segundo escenario.....	98
Figura 20. Windup a) Descripción en PID. b) Regulador con anti windup.....	102
Figura 21. Control Markoviano con integrador con saturación primer escenario.....	107
Figura 22. Control Markoviano con integrador con saturación segundo escenario. ....	110
Figura 23. Control LQR (izquierda). Control RLQR (centro). Control Markoviano (derecha) para el primer escenario.....	115
Figura 24. Valor RMS de la temperatura. ....	119
Figura 25. Valor RMS de la humedad durante el día. ....	119
Figura 26. Valor RMS de la humedad durante la noche. ....	120

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de la radiación solar en función de las longitudes de onda. ....	39
Tabla 2. Cálculos relacionados con $Kv$ . ....	46
Tabla 3. Magnitud de los parámetros de la ecuación de temperatura del modelo. ....	46
Tabla 4. Magnitud de las constantes del modelo. ....	47
Tabla 5. Magnitud de los parámetros de la ecuación de humedad del modelo. ....	48
Tabla 6. Magnitud de los parámetros ecuación dióxido de carbono. ....	49
Tabla 7. Parámetros de $f_{qcond}$ . ....	50
Tabla 8. Coeficientes de temperatura de la cobertura del invernadero. ....	50
Tabla 9. Parámetros de $f_{qE}$ . ....	51
Tabla 10. Coeficientes de temperatura del aire y radiación global. ....	52
Tabla 11. Parámetros de $f_{flr - air}$ . ....	52
Tabla 12. Parámetros de $f_{air - out}$ . ....	53
Tabla 13. Parámetros de $f_E$ . ....	54
Tabla 14. Parámetros de $f_{cond}$ . ....	55
Tabla 15. Parámetros de $f_{Hair - Hout}$ . ....	55
Tabla 16. Parámetros de $f_{pg'}$ . ....	56
Tabla 17. Parámetros de $f_{cair - cout}$ . ....	57
Tabla 18. Primer escenario de disturbios intervalo de 24 horas. ....	69
Tabla 19. Segundo escenario de disturbios en un intervalo de 24 horas. ....	75
Tabla 20. Temperatura del aire interior primer y segundo escenario. ....	93
Tabla 21. Humedad absoluta interior primer y segundo escenario. ....	93
Tabla 22. Temperatura del aire interior primer y segundo escenario. ....	96
Tabla 23. Humedad absoluta del aire interior primer y segundo escenario. ....	97
Tabla 24. Temperatura del aire interior primer y segundo escenario. ....	114
Tabla 25. Humedad absoluta interior primer y segundo escenario. ....	117

# Lista de símbolos y abreviaturas

## Nomenclatura del modelo

Símbolo	Término	Unidad SI
$t_{sample}$	Tiempo de muestreo	$s$
$\rho_{air}$	Densidad del aire	$\frac{kg}{m^3}$
$C_{p,air}$	Capacidad calórica específica del aire	$\frac{J}{kg \cdot K}$
$H_g$	Altura media del invernadero	$m$
$\Delta H$	Calor latente de evaporación	$\frac{J}{kg}$
$K_r$	Coefficiente de transferencia de calor por convección entre aire interior y cubierta	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$K_s$	Coefficiente de transferencia de calor por convección entre aire y el suelo	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$\eta_{air}$	Coefficiente de absorción de radiación solar del aire	
$K_v$	Coefficiente de transferencia de calor de ventilación	$\frac{W}{^\circ C \cdot m^3}$
$C_{leakage}$	Coefficiente de fuga de efecto invernadero	
$V_{wind}$	Velocidad del viento exterior	$\frac{m}{s}$
$\phi_{leakage}$	Función por partes	
$u_{vent}$	Entrada de ventilación variable	
$A_{vent}$	Parámetro	$\frac{m}{m^2}$
$C_w$	Coefficiente global de presión del viento que depende de la forma del invernadero	
$C_d$	Coefficiente de descarga de ventilación que depende de la forma del invernadero	

## Entradas, salidas y disturbios del modelo

Símbolo	Término	Unidad SI
$T_{air}(k)$	Temperatura del aire al interior del invernadero	$^\circ C$
$Q_{heat}(k)$	Flujo de calor del sistema de calefacción	$\frac{W}{m^2}$
$\Phi_{fog}(k)$	Flujo de vapor del sistema de nebulización	$\frac{kg}{s \cdot m^2}$
$T_{out}(k)$	Temperatura del aire exterior del invernadero	$^\circ C$

<b>Símbolo</b>	<b>Término</b>	<b>Unidad SI</b>
$T_{flr}(k)$	Temperatura del piso del invernadero	$^{\circ}C$
$I_{glob}(k)$	Radiación solar sobre la cubierta	$\frac{W}{m^2}$
$E(k)$	Velocidad de Transpiración del dosel del cultivo	$\frac{kg}{s * m^2}$
$\Phi_{cond}(k)$	Flujo de agua de condensación	$\frac{m^2 \cdot s}{g}$
$H_{air}(k)$	Humedad al interior del invernadero	$\frac{m^3}{g}$
$H_{out}(k)$	Humedad al exterior del invernadero	$\frac{m^3}{g}$
$CO_{2,air}(k)$	Concentración interior de $CO_2$ del invernadero	$\frac{m^3}{mg}$
$CO_{2,out}(k)$	Concentración de $CO_2$ exterior del invernadero	$\frac{m^3}{mg}$
$\Phi_{CO_2}(k)$	Flujo de $CO_2$ del sistema de enriquecimiento de $CO_2$	$\frac{m^3}{mg}$
$Re(k)$	Tasa de respiración del dosel del cultivo	$\frac{s \cdot m^2}{mg}$
$P_g(k)$	Tasa de fotosíntesis del dosel del cultivo	$\frac{s \cdot m^2}{mg}$



# Introducción

Una de las primeras estrategias para manejar las variables climáticas en un cultivo, consiste en el uso de invernaderos. La producción bajo cubierta permite proteger el sistema productivo mediante una barrera que evita la exposición directa de las plantas con el medio a través de un material que deja pasar la luz solar, facilita la acumulación de calor en el día y la pérdida lenta en la noche, sistema que permite controlar el ambiente interno modificando el clima (Estrada, 2012).

La baja productividad de los sistemas agrícolas y la alta demanda de alimentos consecuencia del crecimiento demográfico, ha generado un desequilibrio entre la demanda y la oferta, como alternativa de solución se ha implementado la agricultura bajo cubierta que aporta beneficios, protección ante factores ambientales adversos, barrera ante plagas, enfermedades, malezas y favorece el manejo de recursos como agua e insumos.

Sin embargo, proteger el cultivo ante factores externos para mejorar los rendimientos no es suficiente, también se requiere hacer uso de la tecnología para garantizar mejores condiciones y un mayor volumen de productos agrícolas por unidad de área (Iglesias, 2006).

Siendo así, en la actualidad, la unión de la tecnología de los sistemas de información geográfica, las tecnologías de la información, el control y la instrumentación con la agricultura ha generado nuevas técnicas de producción vegetal, denominadas agricultura de precisión (Iglesias, 2006), en donde, el tratamiento se asocia a las necesidades de la planta.

Los procesos de control y automatización en el sector agrícola han permitido nuevas formas de producción a través del uso de la tecnología (Katariya, Gundal, Kanawade, &

Mashar, 2015), (Baerdemaeker, Ramon, Anthonis, Speckmann, & Munack, 2009). En la actualidad, los sistemas de control tienen un papel relevante en la agricultura de precisión (Baerdemaeker et al., 2009), (Baerdemaeker et al., 2009). Así, en invernaderos, factores abióticos como la humedad relativa, la temperatura, la conductividad y el pH del suelo, pueden ser controlados con el objetivo de regular factores bióticos tales como plagas, enfermedades y malezas (Miller, 2019).

La producción bajo invernadero puede lograr unas condiciones climáticas adecuadas para las plantas, en estos espacios se puede regular la humedad, temperatura e intensidad de luz con respecto a la producción a campo abierto, sin embargo, esto no garantiza que los rendimientos de los cultivos sean elevados (Iglesias, 2006). Adicionalmente, los sistemas de producción bajo cubierta presentan dinámicas con incertidumbres y disturbios que impiden que las condiciones climáticas sean las más adecuadas para los cultivos, por esta razón, se pretende diseñar una estrategia de control de temperatura para un invernadero y validar la robustez mediante simulación.

La población y la demanda de alimentos aumenta, los espacios para producción son más restringidos y los recursos que usa la agricultura son limitados, debido a estas condiciones recientemente muchos países han iniciado estudios con el fin de optimizar la producción, basados en diversas problemáticas asociadas al clima bajo cubierta.

Considerando que los invernaderos son estructuras que permiten manejar las variables climáticas, aun así, al interior se presentan microclimas que afectan los cultivos, estudios han comprobado los efectos negativos a partir de muestras. Proyectos de investigación desarrollados en la universidad de Purdue, usan el modelo del invernadero para reducir los efectos del clima, en este estudio la geometría del invernadero adquiere importancia (Ma *et al.*, 2019).

En consecuencia, Mourik *et al* (2019) plantean el monitoreo del clima en invernadero basado en modelos, en donde se muestra un filtro de Kalman extendido EKF que es combinado con el modelo de las ecuaciones diferenciales del clima, este estudio se enfoca en controlar las variables temperatura y humedad, es comparado con el filtro de media móvil y con el filtro de Kalman “uncented”, del inglés (Unscented Kalman Filter, UKF) la

---

evaluación comparativa del error se demuestra que el EKF supera los demás filtros (van Mourik, van Beveren, López-Cruz, & van Henten, 2019).

Estudios de control basados en el modelo del invernadero se ven reflejados en (Xu, Du, & van Willigenburg, 2019), en donde se desarrolla un doble lazo cerrado para el manejo del clima, trabaja la dinámica lenta y la dinámica rápida del sistema (Mohamed & Hameed, 2018). El modelo dinámico del invernadero planteado por Mohamed muestra en detalle entradas y salidas del sistema y las ecuaciones diferenciales del invernadero (Chen, Du, He, Liang, & Xu, 2018).

Estudios previos de Lijun *et al* (2018), muestran un conjunto de investigaciones publicada en el mismo año, relacionadas con un modelo predictivo de control robusto sobre la variable temperatura (Lijun, Shangfeng, Yaofeng, & Meihui, 2018). Un control óptimo lineal cuadrático y un modelamiento basado en un control difuso de Takagui Sugeno también se estudian en (Yaofeng, Meihui, Lijun, Xiaohui, & Shangfeng, 2018). Por otro lado, un estudio sobre control adaptativo neuro-difuso es estudiado en (Atia & El-madany, 2017),

El modelamiento del clima en un invernadero es estudiado en detalle por Yuaping (2017), este modelo considera tres variables de estado asociadas a la temperatura, humedad y CO<sub>2</sub>, para mejorar el rendimiento de la simulación del modelo en tiempo discreto se usa el polinomio que describe el sistema, la técnica de mínimos cuadrados y el algoritmo de LM Levenberg-Marquardt (Su & Xu, 2017). El mejoramiento del clima en invernadero también es estudiado en (Cañadas, Sánchez-Molina, Rodríguez, & del Águila, 2017), un control óptimo mediante ahorro energético lo describe Beveren (van Beveren, Bontsema, van Straten, & van Henten, 2015).

El ahorro de consumo de agua y energía también ha sido desarrollado por Blasco *et al.* (2007), en donde se diseña un algoritmo para manejar las condiciones del clima bajo invernadero, para lo cual se usa un modelo no lineal preciso y un control predictivo basado en modelos (MBPC) que incorporan el consumo de energía y agua. Los algoritmos genéticos (GA) juegan un papel clave en estos dos elementos porque las funciones a resolver son no convexas y con mínimos locales (Blasco, Martínez, Herrero, Ramos, & Sanchis, 2007). Por otro lado, Pahuja desarrolla un simulador del clima en invernadero mediante el modelo dinámico (Pahuja, Verma, & Uddin, 2015).

Los controladores basados en modelos, MPCs con ventilación natural no dejan de ser útiles para el estudio de la temperatura en el invernadero dado el ahorro energético y la posibilidades que brinda para el manejo de la humedad (Gruber et al., 2011), sin embargo, también se implementan sistemas de nebulización que ayudan controlar rápidamente la magnitud de la masa de agua por unidad de volumen en el sistema bajo cubierta (Agmail, Waleed, Linker, & Arbel, 2009). Waleed *et al* (2009), desarrolla un control robusto para manejo de temperatura y humedad simultáneamente, el cual se basa en un control MIMO para solucionar el problema de seguimiento de la variable.

Por otro lado, la teoría de control robusto puede ser usado para enfrentar desafíos relacionados con las incertidumbres, la estimación de variables a partir de estrategia de filtrado, el rechazo de perturbaciones y ruido (Cerri, 2013). Quizás otra orientación se puede observar en el diseño de controladores y filtros robustos, cabe mencionar los que están basados en desigualdades lineales matriciales (Wang, Liu, & Liu, n.d.), así como las técnicas de filtrado y control recursivo basadas en las ecuaciones de Riccati (Cerri & Terra, 2017). El regulador robusto lineal cuadrático para sistemas sujeto a incertidumbres, entrega la mejor acción de control minimizando los estados y maximizando las incertidumbres, este enfoque basado en el modelo es el fundamento del trabajo que considera saltos Markovianos (Cerri & Terra, 2017), cabe resaltar que la técnica mencionada previamente para atender las dinámicas de los sistemas de producción bajo invernadero aún no han sido reportadas en la literatura.

El presente proyecto considera las siguientes etapas: estudio del modelo dinámico propuesto en (Su & Xu, 2017), implementar una simulación en software del modelo del invernadero estudiado previamente, posteriormente se diseñan dos estrategias de control de temperatura para el sistema invernadero usando los algoritmos presentados en (Cerri & Terra, 2017), (Ishihara, Terra, & Cerri, 2015). Finalmente se realiza la interpretación de los resultados obtenidos para dar un diagnóstico relacionado al modelo con el cual se logran los ajustes deseados.

Finalmente se obtiene el presente escrito que se estructura de la siguiente manera: planteamiento del problema que se desea desarrollar a través del proyecto, se justifica la

ejecución con base en la necesidad, se propone una metodología, y unos resultados, se definen los recursos a utilizar, se generan las simulaciones que permiten obtener resultados que serán analizados en la sección con el mismo nombre, por último, se concluye con los hallazgos obtenidos más relevantes.

## Planteamiento del problema

Los invernaderos son sistemas productivos controlados en donde es deseable establecer un manejo de las variables ambientales para generar las condiciones óptimas durante el crecimiento de las plantas. Sin embargo, una producción bajo cubierta no garantiza que el sistema maximice la producción con respecto a la inversión, es decir, no siempre se cumple que el rendimiento de los cultivos sean los más adecuados con respecto a los costos de producción, el consumo de energía y mano de obra (Olivares, Castro, Peralta, Espinoza, & Suástegui, 2019).

Lo anterior, implica que en procesos de monitoreo en campo se presenten condiciones fisiológicas diferentes en las plantas debido a la baja uniformidad de la distribución climática dentro del invernadero (van Mourik et al., 2019). Para resolver el problema mencionado anteriormente en el estado del arte se encuentran diferentes enfoques que buscan controlar las condiciones climáticas en invernaderos y contribuir con un rendimiento adecuado (Edan, Han, & Kondo, 2009). Sin embargo, los sistemas de producción bajo cubierta presentan dinámicas con incertidumbres en el modelo y disturbios que impiden que las condiciones climáticas en el invernadero sigan los ajustes deseados (Chen et al., 2018; Ma et al., 2019).

En este sentido, la teoría de control robusto puede ser usada para enfrentar tales desafíos, pues se distingue por el estudio de las incertidumbres, el uso de estrategias de filtrado robustas para la estimación de variables, la supresión de ruido y el rechazo de perturbaciones y disturbios (Cerri, 2013; Cerri & Terra, 2017; Cerri, Terra, & Ishiara, 2014; Ishiara et al., 2015). Diversos enfoques se destacan en el diseño de controladores y filtros

robustos. Entre ellos se pueden mencionar los basados en las desigualdades lineales matriciales (LMI - Linear Matrix Inequalities) (Wang, Lam, & Liu, n.d.; Wang, Liu, et al., n.d.), así como las técnicas de filtrado y control recursivo basadas en las ecuaciones de Riccati (Cerri, 2013; Cerri & Terra, 2017; Cerri et al., 2014; Ishiara et al., 2015; Wang, Lam, et al., n.d.; Wang, Liu, et al., n.d.). En particular el algoritmo, regulador robusto óptimo lineal cuadrático para sistemas sujetos a incertidumbres (Cerri et al., 2014), permite obtener la acción de control óptima, minimizando los estados del sistema y maximizando las incertidumbres. Este enfoque determinista basado en modelo ha sido el fundamento para el desarrollo de un nuevo framework que puede considerar saltos Markovianos (Cerri & Terra, 2017). En este proyecto serán estudiados e implementados los algoritmos de control mencionados anteriormente, con el objetivo de generar estrategias de control que permitan robustez, pero que puedan atender las incertidumbres y disturbios del sistema (Costa, Fragoso, & Marquez, 2005). Es importante resaltar que la aplicación de estas técnicas de control en sistemas de invernadero aún no ha sido reportada en la literatura.

Siendo así, surge la pregunta de investigación, ¿Cómo diseñar una estrategia de control robusto de temperatura para un invernadero?

## Justificación

La producción agrícola bajo cubierta es altamente dependiente de los factores ambientales al interior del invernadero. Las arvenses compiten por los recursos con las plantas de interés económico. Bajo condiciones favorables una maleza puede presentar un desarrollo fenológico (físico) mucho más rápido, el cual, puede ser nocivo para las plantas cultivadas dado que compiten por los elementos disponibles en el suelo, o en su defecto por la radiación solar bajo condiciones específicas. La humedad alta puede generar las condiciones bajo las cuales una enfermedad se desarrolla adecuadamente, en otros casos, las plagas se proliferan mejor bajo temperaturas altas. En este contexto, el control de la variable temperatura juega un papel importante durante el ciclo productivo.

En general, la producción agrícola es sustento principal de ingresos para los agricultores y una fuente de alimento para las personas que viven en los centros poblados, alrededor del 50% de los ingresos son agrícolas y la otra mitad corresponde a ingresos no agrícolas (FAO, FIDA, & PMA, 2012). Sin embargo, debido a la alta migración de las personas del campo a la ciudad, se identifica una escasez de mano de obra y de tecnología que afectan los ingresos y el suministro de productos agrícolas, dado lo anterior existe la necesidad de realizar transferencia tecnológica de sectores más adelantados, mediante estudios de investigación, innovación y desarrollo tecnológico, relacionado al manejo del clima bajo cubierta. especialmente en sectores rurales con producción agrícola bajo invernadero a nivel empresarial. La automatización en general garantiza mejor rendimiento y una disminución en la afección al sistema agrícola por parte de agentes patógenos plagas o enfermedades (Cotes et al., 2018).



El desarrollo de este proyecto se basa en una necesidad de mejorar las condiciones ambientales y el uso de los recursos. Diversas universidades están realizando estudios de investigación, en China, Su *et al* (2017) se propone una forma de controlar variables ambientales para crear un entorno favorable durante el crecimiento de los cultivos (Su & Xu, 2017), y en Tailandia, Mahdavian *et al* (2017) estudia la optimización del sistema agrícola para mejorar los rendimientos (Mahdavian, Sudeng, & Wattanapongsakorn, 2017). Siendo así, el avance tecnológico para el sector agrícola es crucial, debido a la necesidad de mejorar los rendimientos para satisfacer la demanda.

Para promover el uso de la tecnología de la automatización y el control a favor de la mejora en los procesos agrícolas, el presente proyecto pretende proporcionar los principios y fundamentos teórico - conceptuales asociados al control de la variable temperatura, que serán articulados posteriormente con el proyecto denominado SCADA que se desarrolla en el Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA, en donde se consideran varias etapas, un control manual, un control pre-programado y un control programado que hacen parte del proceso de adaptación a la tecnología por parte de los agricultores u operarios y finalmente una etapa denominada control automático, en esta última se pretende implementar la estrategia de manejo de variables climáticas más adecuada obtenida a partir del proyecto denominado diseño de una estrategia de control robusto que se propone en este escrito.

De acuerdo a lo establecido en el proyecto mencionado previamente, el estudio actual busca articularse a futuro con el proyecto SCADA desarrollado en el SENA, obteniendo el diseño de una estrategia de control que posteriormente puede implementarse en múltiples variables climáticas bajo invernadero, aportando los fundamentos teóricos asociados a la técnica que más adapte al control de variables.

## Objetivos

### General

Diseñar una estrategia de control de temperatura mediante el uso de técnicas robustas empleando un modelo dinámico de invernadero con características específicas.

### Específicos

Implementar una simulación de un invernadero basado en el modelo propuesto en Su y Xu (2017), mediante el uso de software, el cual incluye la variable temperatura y parámetros próximos al contexto real.

Diseñar una estrategia de control de temperatura para el sistema invernadero usando los algoritmos, "Regulador robusto recursivo para sistemas lineales sujetos a saltos Markovianos de tiempo discreto (Cerri & Terra, 2017)" y compararla con un "Regulador robusto óptimo lineal cuadrático para sistemas sujetos a incertidumbres" (Terra, Cerri, & Ishihara, 2014).

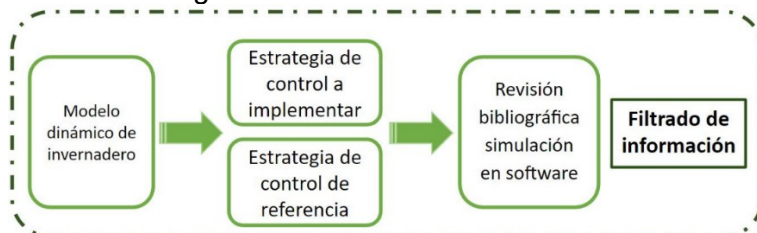
Determinar qué estrategia de control es la más adecuada a través de una validación dada por la robustez de los sistemas de control estudiados.

# Capítulo 1

## 1. Metodología y marco teórico

El proyecto inicia con la identificación de las fuentes principales de información como revistas nacionales e internacionales prestando especial interés a estas últimas y focalizando la búsqueda en referentes de los últimos cinco años, esto con el fin de realizar una documentación bibliográfica que abarca tres grandes temáticas de interés, relacionadas con artículos que profundizan sobre los modelos dinámicos de un invernadero. Posterior a esto, se identifican los artículos que permiten establecer las particularidades de la estrategia de control a implementar y el referente con el que se va a comparar, finalmente, se estudia la metodología para la implementación del código en el software de simulación Figura 1. Para cada temática se identifica una cantidad considerable de información que pasa a ser filtrada para extraer los documentos con mayor contribución.

Figura 1. Fases revisión bibliográfica.



Fuente: Elaboración propia

## 1.1 Metodología de desarrollo del proyecto

Posterior a la revisión bibliográfica asociada al modelo dinámico, se definen las entradas y salidas, los tipos de perturbaciones y disturbios exógenos del sistema, se diseña el controlador y se generan las simulaciones.

El proyecto considera tres etapas: inicialmente se implementa una simulación de un invernadero basados en el modelo dinámico propuesto en Su y Xu (2017). Adicional a la elección de un modelo nominal, se consideran incertidumbres paramétricas aditivas no estructuradas, la elección es relevante ya que el algoritmo Cerri et al (2014) es basado en el modelo.

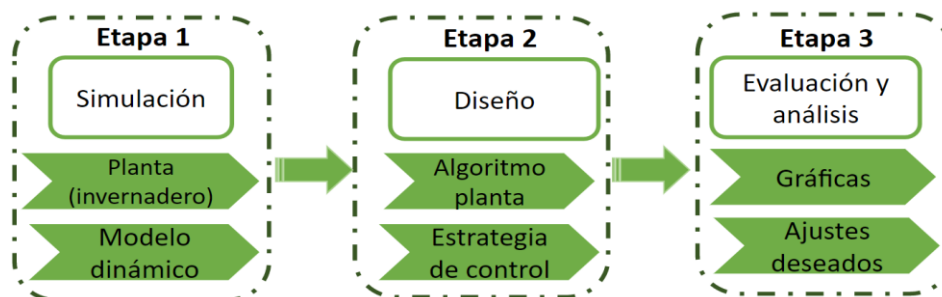
Un segundo enfoque considera diferentes modos de operación del sistema con diversos modelos nominales y cambios amplios en los parámetros del sistema, así como, cambios relacionados con las variables exógenas que pueden afectar el sistema durante el día y la noche, este enfoque es en un contexto estocástico Cerri & Terra (2017), dada la naturaleza de variables climáticas como son; la temperatura interior del invernadero, la humedad exterior, la radiación solar y la velocidad del viento.

La segunda etapa considera el diseño de dos estrategias de control de temperatura para el sistema invernadero usando los algoritmos presentados en (Cerri & Terra, 2017; Cerri et al., 2014). Finalmente se realizará la interpretación de los resultados obtenidos a partir de la simulación del modelo integrado con el control para dar un diagnóstico relacionado al sistema con el cual se obtiene los ajustes deseados.

Para la simulación del modelo de la planta, el controlador y la generación de gráficas resultado del proceso, se usa Matlab ©. Se ingresan las ecuaciones que rigen el sistema, se prueban las estrategias de control para la variable climática seleccionada, a partir de las gráficas se parametrizan los puntos de ajuste y se identifican los mejores valores que se acondicionan a los ajustes deseados.

Particularmente durante la etapa dos se estudia la forma de ingresar el modelo dinámico al simulador, se diseña la estrategia de control, y finalmente se generan las gráficas que permiten identificar los ajustes deseados (Figura 2).

Figura 2. Diagrama metodología del proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados se interpretan a partir de las gráficas obtenidas de la simulación, no se realiza recolección de datos dado que el control se basa en el modelo, los resultados se muestran mediante gráficas y la interpretación de las mismas. El proyecto ha sido ejecutado durante el año 2020 en la Universidad Antonio Nariño y con el aporte de los grupos de investigación GIBIO de la misma universidad, GICEMET del Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA. El proyecto finaliza con el análisis de resultados obtenidos en la simulación.

## 1.2 Marco teórico

### 1.2.1 Regulador Lineal Cuadrático LQR

La regulación de sistemas se aplica en la robótica, aeronáutica, comunicaciones, entre otros. A principios de los 60's Kalman plantea un control y filtrado óptimos, para disminuir la complejidad computacional del filtro propuesto por Wiener, mediante proyecciones ortogonales que resultaron en algoritmos recursivos eficientes. En las últimas cuatro décadas, se han propuesto varias técnicas para resolver problemas de control robusto cuando las perturbaciones externas y las incertidumbres internas influyen en el rendimiento y la estabilidad de los sistemas de retroalimentación. En presencia de incertidumbres, no

se garantiza la optimización del regulador estándar. En consecuencia, su rendimiento se ve comprometido e incluso la estabilidad no está asegurada.

El regulador recursivo robusto para sistemas lineales de tiempo discreto sujeto a incertidumbres, se caracteriza por no tener parámetros de ajuste en aplicaciones en línea. Para solucionar este tipo de sistemas, se formula una función de costo cuadrática basada en la combinación de la función de penalización y métodos robustos de mínimos cuadrados ponderados.

Un tema clave en el enfoque desarrollado es transformar un problema de control restringido sujeto a incertidumbres en uno sin restricciones. Definiendo las entradas y estados de control como variables a minimizar, es posible regularizar la solución de este problema de optimización. La función de costo cuadrático se optimiza mediante la combinación de una función de penalización y un método robusto de mínimos cuadrados ponderados. Un equilibrio óptimo entre el mejor desempeño y la máxima influencia de las incertidumbres se encuentra a través de la minimización de una función continua que presenta un mínimo global único. La ley de control robusto óptimo recupera la simplicidad del control óptimo estándar en el sentido que el ajuste de rendimiento ya no es necesario (Cerri *et al.*, 2014).

Las ecuaciones que rigen el regulador lineal cuadrático para sistemas sujetos a incertidumbres se plantean como sigue ecuación (1) (Cerri, 2009), teniendo en cuenta que se presenta restricciones debido al uso de positividad sobre la matriz de ponderación  $P_{N+1}$ ,  $Q_i$ ,  $R_i$ , las ecuaciones están basadas en la minimización del índice de desempeño cuadrático de las variables de estado  $x_{i+1}$  y de control  $u_i$  al mismo tiempo, es así como, el caso robusto resultará de una extensión del caso nominal. El problema del control óptimo cuadrático también es conocido como el problema del regulador lineal cuadrático, se puede establecer como sigue. Considerando el modelo en espacio de estados:

$$x_{i+1} = Fx_i + G_i u_i, \quad i = 0, \dots, N; \quad (1)$$

Donde  $x_i$  es vector de estados,  $u_i$  es vector de entradas (control),  $F_i$  y  $G_i$  matriz de parámetros nominales conocidos, y  $x_0$  es un vector de estado inicial en una secuencia de entradas de control sin restricción. El objetivo del control óptimo lineal cuadrático es

encontrar una secuencia de control  $\{u_i^*\}_{i=0}^N$  que va a minimizar una función de costo cuadrático preestablecido (Cerri, 2009).

Un índice de desempeño cuadrático bien conocido en la literatura, está dado por la expresión de la ecuación (2):

$$J = x_{N+1}^T P_{N+1} x_{N+1} + \sum_{j=0}^N (x_j^T Q_j x_j + u_j^T R_j u_j), \quad (2)$$

Se asume  $P_{N+1} \geq 0$ ,  $Q_j \geq 0$  y  $R_j \geq 0$  conocidas, independiente de la solución abordada, la ecuación (2) puede ser establecida en forma de un problema de minimización  $\min_{u_i} \{J\}$ . La minimización de  $J$  está dada en términos de la variable de control  $u_i$ . La solución óptima se presenta como sigue:

$$u_i^* = k_i x_i, \quad i = 0, \dots, N, \quad (3)$$

Siendo la ganancia  $K_i$  calculada de acuerdo con la ecuación (4) y  $P_i$  está relacionada con la fórmula de Riccati expuesta de acuerdo con la ecuación (5):

$$K_i = -(R_i + G_i^T P_{i+1} G_i)^{-1} G_i^T P_{i+1} F_i, \quad (4)$$

$$P_i = (F_i + G_i K_i)^{-T} P_{i+1} (F_i + G_i K_i) + K_i^T R_i K_i + Q_i, \quad (5)$$

Para  $i = N, \dots, 0$  y  $P_{N+1}$  se asume conocido, el sistema con realimentación óptima está dado por la ecuación (6):

$$x_{i+1}^* = (F_i + G_i K_i) x_i; \quad i = 0, \dots, N. \quad (6)$$

El costo óptimo para una secuencia de control en un intervalo de interés está dado por la ecuación (7):

$$J_i^* = x_i^T P_i x_i. \quad (7)$$

Consecuentemente, el valor mínimo del índice de desempeño de la ecuación (2) es  $J^* = J_0^* = x_0^T P_0 x_0$  dada una función  $P_0$  y el estado inicial, es posible verificar que la combinación de la ecuación (5) con la (4) resulta en la ecuación de Riccati como sigue:

$$P_i = F_i^T \left( P_{i+1} - P_{i+1} G_i (R_i + G_i^T P_{i+1} G_i)^{-1} G_i^T P_{i+1} \right) F_i + Q_i. \quad i = N, \dots, 0. \quad (8)$$

## 1.2.2 Regulador Robusto Lineal Cuadrático RLQR

De acuerdo con la disertación de Cerri (2009), en donde se plantea un regulador robusto recursivo para sistemas lineales de tiempo discreto sujetos a incertidumbres paramétricas, el cual se basa en el regulador lineal recursivo definido en la sección 1.2.1, que puede ser definido considerando el problema de optimización de la ecuación (13) (Terra et al., 2014).

Considere el siguiente sistema lineal de tiempo discreto sujeto a incertidumbres paramétricas de la ecuación (9):

$$x_{i+1} = (F_i + \delta F_i)x_i + (G_i + \delta G_i)u_i; \quad i = 0, \dots, N, \quad (9)$$

Donde  $x_i$  es vector de estados,  $u_i$  es vector de entradas de control,  $F_i$  y  $G_i$  matriz de parámetros nominales conocidos, y  $x_0$  es un vector de estado inicial en una secuencia de entradas de control sin restricción, se asume conocido. Sea  $\delta F_i$  y  $\delta G_i$  las matrices de incertidumbres desconocidas modeladas como sigue:

$$[\delta F_i \quad \delta G_i] = H_i \Delta_i [E_{Fi} \quad E_{Gi}]; \quad i = 0, \dots, N, \quad (10)$$

Siendo  $H_i$ ,  $E_{Fi}$ ,  $E_{Gi}$ , matrices conocidas y  $\Delta_i$  una matriz arbitraria con  $\|\Delta_i\| \leq 1$ . Asuma que la matriz  $H_i$  no es nula para todo  $i = 0, \dots, N$ . Para cada  $u_i$  fijo se tienen un conjunto de soluciones  $x_{i+1}$ .



Siendo:

$$\begin{aligned}
 J_i(x_{i+1}, u_i) = & \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ u_i \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P_{i+1} & 0 \\ 0 & R_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ u_i \end{bmatrix} \\
 & + \left( \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ I & -G_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ u_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -I \\ F_i \end{bmatrix} x_i \right)^T \begin{bmatrix} Q_i & 0 \\ 0 & \mu I \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ I & -G_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ u_i \end{bmatrix} \right. \\
 & \left. - \begin{bmatrix} I \\ F_i \end{bmatrix} x_i \right),
 \end{aligned} \tag{11}$$

Ya habiendo establecido el problema de control nominal será redefinido para deducir el controlador robusto que regulará el sistema. Asumiendo las siguientes identificaciones:

$$F_i \rightarrow F_i + \delta F_i \text{ y } G_i \rightarrow G_i + \delta G_i \tag{12}$$

### 1.2.3 Regulador Robusto Recursivo

Para obtener la solución recursiva y regular los sistemas lineales sujetos a incertidumbres de la ecuación (9) y (10), se establece lo siguiente:

Sea fijado  $\mu > 0$  para considerar el problema de obtener una solución óptima:

$$\min_{x_{i+1}, u_i} \max_{\delta F_i, \delta G_i} \{J_i^\mu(x_{i+1}, u_i, \delta F_i, \delta G_i)\} \tag{13}$$

Donde la función de costo cuadrático está dada por (14) con  $Q_i > 0$ ,  $R_i > 0$ ,  $P_{i+1} > 0$  y  $\mu > 0$ :

$$\begin{aligned}
 J_i^\mu(x_{i+1}, u_i, \delta F_i, \delta G_i) & \\
 & = \begin{bmatrix} x_i \\ u_i \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P_{i+1} & 0 \\ 0 & R_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ u_i \end{bmatrix} \\
 & + \left\{ \left( \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ I & -G_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\delta G_i \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ u_i \end{bmatrix} \right. \\
 & \left. - \left( \begin{bmatrix} -I \\ F_i \end{bmatrix} x_i + \begin{bmatrix} 0 \\ \delta F_i \end{bmatrix} x_i \right) \right\}^T \begin{bmatrix} Q_i & 0 \\ 0 & \mu I \end{bmatrix} \{ \cdot \},
 \end{aligned} \tag{14}$$

El problema de minimización se establece como:

$$\min_{x_{i+1}u_i} \{J(x_{i+1}, u_i)\} \quad (15)$$

El problema de optimización de las ecuaciones (13) y (14) para  $\mu > 0$  está dada por la ecuación (16) y (17):

$$\begin{bmatrix} x_{i+1}^*(\mu) \\ u_i^*(\mu) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_i^\mu \\ K_i^\mu \end{bmatrix} x_i, \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} L_i^\mu \\ K_i^\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{i+1}^{-1} & 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & R_i^{-1} & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & Q_i^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum_i(\mu, \lambda_i) & \mathcal{J} & -\mathcal{G}_i \\ I & 0 & 0 & \mathcal{J}^T & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & -\mathcal{G}_i^T & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -I \\ \mathcal{F}_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

Definiendo  $\mathcal{J}$ ,  $\mathcal{G}_i$  y  $\mathcal{F}$  como sigue:

$$\sum_i = \begin{bmatrix} \mu^{-1}I - \hat{\lambda}_i^{-1}H_iH_i^T & 0 \\ 0 & \hat{\lambda}_i^{-1}I \end{bmatrix}, \quad \mathcal{J} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathcal{G}_i = \begin{bmatrix} G_i \\ E_{G_i} \end{bmatrix}, \quad \mathcal{F}_i = \begin{bmatrix} F_i \\ E_{F_i} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$\lambda_i > \|\mu_c H_{i,k}^T H_{i,k}\|$ . El costo óptimo de  $J_i^*(\mu)$  esta dado por la ecuación (19):

$$\begin{aligned} J_i^*(\mu) &:= J_i^\mu(x_{i+1}^*, u_i^*, \delta F_i, \delta G_i) \\ &= x_i^T (L_i^{\mu T} P_{i+1} L_i^\mu + K_i^{\mu T} R_{i+1} K_i^\mu + Q_i \\ &\quad + (J L_i^\mu - G_i K_i^\mu - \mathcal{F}_i)^T \Sigma_i^{-1}(\mu, \hat{\lambda}_i) (J L_i^\mu - G_i K_i^\mu - \mathcal{F}_i)) x_i. \end{aligned} \quad (19)$$

## 1.2.4 Regulador Robusto Recursivo para Sistemas Lineales de Salto Markoviano en Tiempo Discreto RR-DMJLS

Debido a los altos niveles de estocasticidad e incertidumbres paramétricas, muchos sistemas pueden modelarse como sistemas lineales sujetos a salto Markoviano en tiempo discreto (DMJLS), existen algunos sistemas con robustez ante perturbaciones y dinámicas no lineales dentro de aviones, robots, entre otros, que se relacionan con categorías de saltos aleatorios.

El regulador robusto para sistemas lineales de salto Markoviano en tiempo discreto (DMJLS) por sus siglas en inglés Robust Regulator for Discrete-time Markovian Jump Linear Systems, es un tipo de regulador robusto que considera los estados de la cadena de Markov en cada instante y la matriz de probabilidades de transición, la cual, varía en el tiempo. El problema se enmarca dentro de una aproximación de regularización que se desarrolla a través de mínimos cuadrados y funciones de penalización. Las soluciones se representan en términos de las ecuaciones de Riccati que no dependen de parámetros auxiliares, pero vale destacar que son similares a los reguladores estándar DMJLS cuando el sistema no está sujeto a incertidumbres (Cerri & Terra, 2017).

A través la ecuación (20), se muestran las entradas para este algoritmo, las cuales, son parámetros del modelo dinámico, el peso de las matrices  $P_{c,i,k} > 0$ ,  $Q_{c,i,k} > 0$ ,  $R_{c,i,k} > 0$  y el parámetro  $\mu_c > 0$ . Las salidas del algoritmo son la respuesta óptima del lazo cerrado del sistema  $x_{k+1}^*$ , las acciones de control  $u_k^*$ , el vector de control  $K_{i,k}$ , y la matriz de lazo cerrado  $L_{i,k}$ . Cuando existe una medición completa de los estados,  $\mu_c \rightarrow +\infty$ , por tanto,  $W_{i,k} \rightarrow 0$ , y así, la robustez del sistema está garantizada (Cerri & Terra, 2017), (Jutinico, Escalante, Jaimes, Terra, & Siqueira, 2018).

El modelo del sistema está definido como:

$$x_{k+1} = (F_{\theta_k,k} + \delta F_{\theta_k,k})x_k + (G_{\theta_k,k} + \delta G_{\theta_k,k})u_k, \quad (20)$$

Donde  $p_{ij}$  es la probabilidad de transición de un modo a otro, es decir, la probabilidad de estar en  $i$  y saltar a  $j$ , y  $\theta_k$  es el parámetro de salto, una característica principal es que los sistemas Markovianos no tiene memoria la única condición es estar en el estado actual:

$$Prob(\theta_{k+1} = j | \theta_k = i) = p_{ij}, \quad Prob[\theta_0 = i] = \pi_i \quad (21)$$

$$\begin{cases} L_{i,k} = F_{i,k} + G_{i,k}K_{i,k} \\ E_{F_{i,k}} + E_{G_{i,k}}K_{i,k} = 0. \end{cases} \quad (22)$$

El regulador robusto para DMJLS tiene condiciones iniciales, para  $x_0, \theta_0, \mathbb{P}, P_i(n) > 0, \forall_i \in \{1, \dots, s\}$ . Siendo así, el primer paso es realizar el cálculo para todo  $k = N - 1, \dots, 0$ :

$$\Psi_{c,i,k+1} = \sum_{j=1}^s P_{c,j,k+1} p_{ij} \quad (23)$$

La probabilidad de transición de modo  $i$  a modo  $j$  es  $0 \leq p_{ij} \leq 1$

$$\begin{bmatrix} L_{i,k} \\ K_{i,k} \\ P_{c,i,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -I \\ 0 & 0 & \hat{F}_{i,k} \\ I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Psi_{c,i,k+1}^{-1} & 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & R_{c,i,k}^{-1} & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & Q_{c,i,k}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_{i,k} & \hat{I} & -\hat{G}_{i,k} \\ I & 0 & 0 & \hat{I}^T & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & -\hat{G}_{i,k}^T & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -I \\ \hat{F}_{i,k} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Donde  $Q, R$  y  $P$  se denominan matrices de ponderación,  $W, \hat{F}_{i,k}, \lambda_{i,k}$  y  $\hat{G}$  son definidas como sigue en la ecuación (25) y (26):

$$W_{i,k} = \begin{bmatrix} \mu_c^{-1}I - \hat{\lambda}_{c,i,k}^{-1}H_{i,k}H_{i,k}^T & 0 \\ 0 & \hat{\lambda}_{c,i,k}^{-1}I \end{bmatrix}, \quad \hat{I} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$\hat{G}_{i,k} = \begin{bmatrix} G_{i,k} \\ E_{G_{i,k}} \end{bmatrix}, \quad \hat{F}_{i,k} = \begin{bmatrix} F_{i,k} \\ E_{F_{i,k}} \end{bmatrix}, \quad \lambda_{i,k} > \|\mu_c H_{i,k}^T H_{i,k}\|. \quad (26)$$

Donde el parámetro de penalización es  $\mu$ , el cual, es responsable de garantizar que la igualdad se cumpla para cualquier modo de Markov y para asegurar la regularización robusta.

Se obtiene para cada  $k = 0, \dots, N - 1$

$$\begin{bmatrix} x_{k+1}^* \\ u_k^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\theta_{k,k}} \\ K_{\theta_{k,k}} \end{bmatrix} \quad (27)$$

### 1.3 Descripción del sistema invernadero

Los invernaderos son sistemas que facilitan el manejo de variables ambientales y la reducción del impacto por el clima. Según Alvarado y Urrutia (2003), se denomina invernadero a aquella estructura de cubierta transparente que favorece requerimientos fotosintéticos y de calor, que impide la salida de energía para modificar el ambiente interno (Alvarado & Urrutia, 2003). Algunas especies de plantas de interés económico requieren para su óptimo desarrollo una temperatura de aire moderada (Francescangeli & Mitidieri, 2006). Las estructuras bajo cubierta facilitan el manejo de factores, tanto bióticos como abióticos, el control de clima para el desarrollo de las plantas y hace parte de una barrera contra enfermedades, las cuales pueden ingresar por condiciones climáticas desfavorables al cultivo, así como, mediante los vectores que pueden ser plagas.

Los invernaderos son usados en lugares donde las condiciones climáticas pueden variar significativamente entre el día y la noche, en lugares donde el cultivo puede estar expuesto a temperaturas muy bajas o muy altas por temporadas prolongadas. El incremento de las tecnologías ha cambiado la manera en la que se usan los invernaderos, en algunos casos pasa de ser manual, en donde el agricultor debe estar activo en todas las tareas agrícolas, hacia un manejo automatizado que implica la ejecución de tareas sin intervención de operarios, especialmente en sistemas de producción agroindustrial.

La simulación del modelo considera un escenario puntual que consiste en un invernadero tipo capilla Figura 3, el cual está ubicado en la sabana de Bogotá municipio de Mosquera Cundinamarca, está constituido por una estructura metálica y cobertura en plástico transparente, con área de  $780 m^2$  y una altura a la cumbre de 5.1 m y al canalón de 4m, camas en tierra y espacios entre camas en tierra y algunas áreas en concreto destinadas para diversos fines agrícolas.

Es un invernadero destinado para germinación, pruebas de fertilización e irrigación, con disponibilidad de sistemas de riego por goteo y nebulización para manejo de humedad ambiental, espacios tipo ventana desplegable en la parte inferior de los canalones para facilitar el ingreso de aire y viento al interior, ventanas cerradas con posibilidad de apertura manual.

Figura 3. Invernadero de referencia.



Fuente: Elaboración propia

### 1.3.1 Variables climáticas en sistemas productivos bajo cubierta

Según Alpi (1999) un invernadero es un construcción cubierta por un material con características traslucidas, provista en algunos casos de calefacción y en ocasiones esta iluminada artificialmente, en donde se pueden cultivar planta de diversos tipos, entre ellas

hortalizas, flores, aromáticas, entre otras, en épocas donde la luz y humedad son insuficientes para el desarrollo fenológico de los cultivos (Alpi & Tognoni, 1999). La producción bajo invernadero tienen ventajas relacionadas con la protección contra el viento, aumento de la temperatura, aumento de la superficie foliar (superficie de las hojas expuestas a radiación solar), reducción del consumo de agua, permite que las plantas mejoren su actividad vegetativa en comparación con la producción al aire libre, reducción en el consumo de agua al reducir la evapotranspiración (Perez & Diaz, 2002).

Una ventaja adicional está relacionada con el manejo de la temperatura que depende de la energía emitida por el sol, la radiación solar no llega toda a la superficie de la tierra y no todo el rango de longitudes de onda es aprovechado por la vegetación. La Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA), es la fracción que favorece el proceso de fotosíntesis en las plantas; radiaciones mayores a 700nm no favorecen la fotosíntesis, pero si generan la acumulación de calor en el invernadero, Tabla 1. La RFA representa entre el 45 – 50% de la radiación solar total recibida, y es la de mayor calidad para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. (INTAGRI S.C., 2020).

Tabla 1. Clasificación de la radiación solar en función de las longitudes de onda.

UV	Visible	RFA	IR Cercano	IR lejano
300-380nm	380-760nm	400-700nm	760-2500nm	2500-40000nm

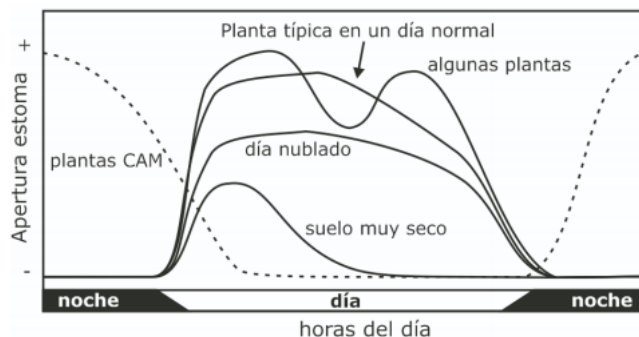
Fuente: (INTAGRI S.C., 2020)

La humedad es una de las variables que es necesario controlar bajo invernadero, dado que, no solamente favorece el desarrollo de la plantas sino enfermedades o melazas, está determinada por la masa de agua por unidad de volumen. En el interior de las estructuras bajo cubierta, el aire es enriquecido con vapor de agua por evaporación del suelo, y por transpiración del follaje. Las plantas liberan agua en forma de partículas muy pequeñas a través de la apertura de los estomas (Figura 4), esto favorece el transporte de nutrientes, permite refrigerar y regular el crecimiento (Huertas, 2007). La transpiración está relacionada directamente con la humedad, depende del déficit de saturación entre los estomas y el aire, cuando son altos o bajos influyen en la fisiología del cultivo y en su desarrollo. Si la humedad ambiental es alta, el intercambio gaseoso queda limitado, se

reduce la transpiración y la absorción de nutriente, si es baja se cierran los estomas y se reduce la tasa de fotosíntesis (Huertas, 2007).

En la noche, la humedad relativa varía inversamente con la temperatura para un contenido absoluto de vapor de agua, es decir, en la medida que la temperatura decrece, la humedad relativa se incrementa. En el día la temperatura incrementa y la humedad absoluta también puesto que los estomas abren y se presenta transpiración. Por otro lado, la condensación se presenta cuando la temperatura del aire al interior es mayor a la del material de la cubierta, la humedad relativa es inferior a la de saturación y el aire húmedo del invernadero está en contacto con una superficie fría de temperatura inferior a punto de rocío, lo que produce la deshumidificación (Huertas, 2007).

Figura 4. Comportamiento estomático en varias condiciones ambientales



Fuente: (Squeo & León, 2007)

### 1.3.2 Actuadores del sistema bajo cubierta

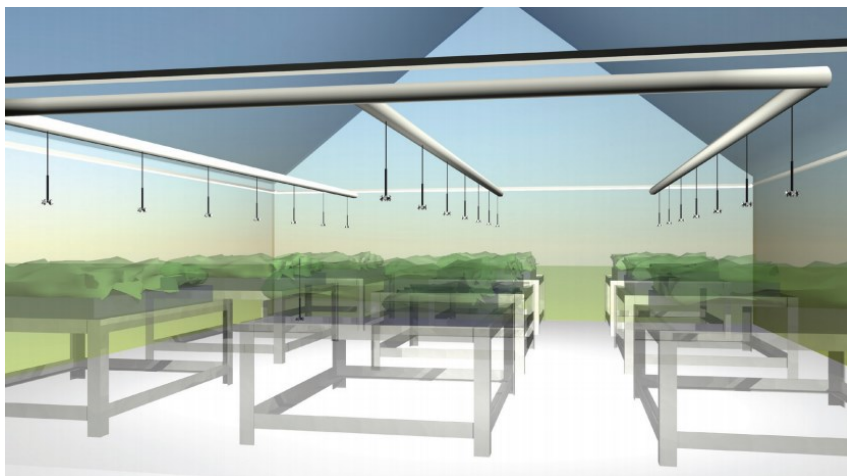
Los sistemas bajo cubierta cuentan con actuadores de doble funcionalidad, es decir, están en capacidad de suministrar calor y extraer calor, facilitan la circulación del aire y la deshumidificación cuando se incluyen dentro del lazo de control, tienen incluido calefacción y refrigeración en un solo dispositivo, está en capacidad de inyectar energía, es una representación positiva de la adición de calor al sistema en  $\frac{W}{m^2}$  y la extracción de energía, la cual es una representación negativa de la disminución o atenuación de la cantidad de calor dentro del sistema. El equipo DG12 y DG6 cumplen esta función (DryGair, 2020). El aire interior se calienta y enfría a partir de agua a una temperatura alta cerca de los 85°C



y agua fría que puede estar alrededor de 7°C, la cual se distribuye de manera uniforme dentro del invernadero, el sistema cuenta con capacidad 84kW de potencia de calefacción y de refrigeración de 26kW, otros sistemas están en capacidad de suministrar aire caliente en vez de agua.

Los humidificadores permiten controlar condiciones climáticas, producto del intercambio de energía entre el aire caliente y las gotas, el agua evaporada ayuda a bajar la temperatura entre 4°C y 6 °C y contribuye al aumento de los niveles de humedad, la duración de la nebulización recomendada puede variar entre 1 segundo y 3 segundos, todo depende de la humedad deseada que generalmente es establecida por el tipo de cultivo y las condiciones de velocidad del viento que depende de la apertura de ventanas del sistema, la estructura posible se puede observar en la Figura 5 (Senniger irrigation, 2020).

Figura 5. Distribución de boquillas en invernadero.



Fuente: Hoja técnica (Senniger irrigation, 2020)


Acorde a ficha técnica las presiones pueden tener un rango de trabajo entre 0.69 psi y 60 psi, los caudales pueden variar entre 0.1 gpm y 20 gpm. Las presiones deben ser controladas para garantizar uniformidad, el cálculo es por boquilla, sin embargo, también existen configuraciones de 4 boquillas en un solo punto de instalación distribuidas a 90° cada una. Para un caudal determinado de 5.6gpm a 20PSI conociendo la densidad del agua y las conversiones respectivas, se identifica que esto representa  $0.03 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$ , una boquilla por metro cuadrado, en función de las necesidades se incrementa la densidad de

42 Diseño de una estrategia de control robusto para manejo de temperatura a partir del modelo de un invernadero

---

boquillas por metro o se incrementan los tiempos de aplicación para modificar la humedad ambiental del sistema invernadero. Para garantizar un caudal deseado se debe modificar las presiones a través de reguladores de presión Figura 6. Por otro lado, de acuerdo con la hoja de especificaciones se recomienda instalar a 0.9m de distancia entre boquillas (Senniger irrigation, 2020).

Figura 6. Caudales y reguladores de presión.



	PRLG	PRL	PSR	PMR-MF
Caudal	23 – 1,590 l/hr (0.1 - 7 gpm)	23 – 1,817 l/hr (0.1 - 8 gpm)	114 – 3,407 l/hr (0.5 - 15 gpm)	454 – 4,542 l/hr (2 - 20 gpm)
Presión Regulada	0,69 – 2,76 bar (10 - 40 psi)	0,41 – 3,10 bar (6 - 45 psi)	0,41 – 3,45 bar (6 - 50 psi)	0,41 – 4,14 bar (6 - 60 psi)

Fuente: Hoja técnica (Senniger irrigation, 2020)

## Capítulo 2

### 2. Modelo dinámico del sistema

En los últimos años el control del clima ha estado en el centro de atención debido a la necesidad de mejorar la producción y el rendimiento. El clima bajo cubierta requiere modelos bastante precisos que consideren las entradas del sistema con los disturbios existentes.

Para implementar una estrategia de control que considere las variables temperatura y humedad con los disturbios asociados, se usa el modelo planteado por Su & Xu, (2017), en el artículo titulado “*Towards discrete time model for greenhouse climate control*”, publicado en el año 2017 en la revista *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, este artículo construye el modelo del clima en invernadero en tiempo discreto, estas condiciones al interior se pueden caracterizar con la temperatura, humedad y concentración de  $CO_2$  y acciones de control que incluyen; calefacción, nebulización e inyección de  $CO_2$ . La razón principal para elección del modelo está relacionado con la documentación suficientemente documentada y de estudio reciente, publicada en una serie de artículos relacionados al control del clima mediante el modelo y diferentes técnicas entre el año 2015 y 2017 (Su & Xu, 2015, 2017; Su, Xu, & Goodman, 2018; Su, Xu, & Li, 2016), adicionalmente, en el artículo en mención Su *et al.*, se fundamenta en otros modelos como el de Vanthoor (2011) con un enfoque fuertemente enmarcado en el trabajo de campo y documentado en detalle.

## 2.1 Modelo dinámico de temperatura en invernadero

La ecuación en tiempo discreto, formulada por Su, asociada a la variable temperatura, es descrita por la ecuación (28), en donde,  $t_{sample}$  es el tiempo de muestreo en (s),  $\rho_{air}$  es la densidad de aire en  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ ,  $C_{p,air}$  es capacidad de calor específico del aire en  $\left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$ ,  $H_g$  es la altura del invernadero (m), estas constantes son factor común a las variables de estado, variables de entrada y a los disturbios.

La temperatura del aire interior  $T_{air}$  ( $^{\circ}C$ ), es variable de estado, el flujo de calor del sistema de calefacción  $Q_{heat}(k)$   $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ , es la variable de control, y los disturbios están asociados a  $\Phi_{fog}$  flujo de vapor del sistema de nebulización en  $\left(\frac{kg}{s \cdot m^2}\right)$ ,  $T_{out}$  temperatura del aire exterior en ( $^{\circ}C$ ),  $T_{flr}(k)$  temperatura del piso del invernadero en ( $^{\circ}C$ ),  $I_{glob}(k)$  radiación solar sobre la cubierta en  $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ ,  $E$  velocidad de transpiración del cultivo que está en  $\left(\frac{kg}{s \cdot m^2}\right)$  y  $\Phi_{cond}$  flujo de agua de condensación en  $\left(\frac{g}{s \cdot m^2}\right)$  La ecuación (28) describe el modelo:

$$\begin{aligned}
 T_{air}(k+1) = & T_{air}(k) \\
 & + \frac{t_{sample}}{\rho_{air} C_{p,air} H_g} \left[ \theta_{heat} Q_{heat}(k) - 0.001 \theta_{qfog} \Delta H * \Phi_{fog}(k) \right. \\
 & - \theta_{T_{air}-T_{out}} (Kv + Kr) (T_{air}(k) - T_{out}(k)) + \theta_{T_{flr}-T_{air}} Ks (T_{flr}(k) - T_{air}(k)) \\
 & \left. + \theta_{I_{glob}} \eta_{air} I_{glob}(k) - \theta_{qE} \Delta H * E(k) + \theta_{qcond} \Delta H \Phi_{cond}(k) \right] \\
 & + \zeta_1(x(k), w(k), u(k))
 \end{aligned} \tag{28}$$

Otras constante asociadas al modelo son  $Kr$ ,  $Kv$ ,  $Ks$ ,  $\eta_{air}$ ,  $\Delta H$  que se mencionan a continuación

$$Kr = 0,1331 \frac{W}{m^2 \cdot K}, \quad \text{Coeficiente de transferencia de calor por convección}$$

$$Kv = \rho_{air} C_{p,air} \Phi_{vent} \text{ en la unidades } \frac{W}{^{\circ}C \cdot m^3}, \quad \text{Coeficiente de transferencia calor por ventilación}$$

$$Ks = 2,57 \frac{W}{m^2 \cdot K}, \quad \text{Coeficiente de transferencia calor entre el aie y el suelo}$$

$$\eta_{air} = 0.03, \quad \text{Coeficiente de absorción de radición solar del aire}$$

$$\Delta H = 2450000 \frac{J}{kg}, \quad \text{Calor latente de evaporación}$$

En la Tabla 2 se muestran los cálculos para determinar el valor del coeficiente de transferencia de calor por ventilación  $Kv$ , el cual, se tiene en cuenta para los cálculos de las ecuaciones en tiempo discreto que modelan el sistema, se asume que entre la suma  $(\phi_{vent} + \phi_{leakage})$ ,  $\phi_{vent} = 0$ , esto debido, debido a la existencia de buenas condiciones de aireación y ventilación dentro del invernadero y la ausencia de actuadores para extracción de aire.

Adicionalmente, se identificó que la velocidad del viento en la sabana de Bogotá no cambia significativamente y que el promedio está en los alrededores de  $1,6 \frac{m}{s}$ , (Burgos, Aldana, & Rodríguez, 2015; IDEAM, 2020b) y debido a que  $V_{wind} \geq 0,25$ , se usa la ecuación  $C_{leakage} V_{wind}$  lo que permite simplificar los cálculos para  $Kv$ , obteniéndose así,  $Kv = \rho_{air} C_{p,air} C_{leakage} V_{wind}$  como se muestra en Tabla 2,  $\phi_{vent}$  es uno de los parámetros de  $Kv$  que se relacionan con las entradas de ventilación, dada la constancia de los vientos y la buena aireación externa dada por la estructura física de los invernaderos en la sabana, para este modelo no se usan dispositivos para inyección de aire, por tanto,  $Kv = \rho_{air} C_{p,air} \phi_{leakage}$  se obtiene como sigue:

$C_w =$  Coeficiente global del presión del viento

$C_d =$  Coeficiente de descarga de ventilación

$C_{leakage} =$  Coeficiente de fuga de efecto invernadero

$V_{wind} =$  Velocidad del viento  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$A_{max} =$  parámetro  $\left(\frac{m}{m^2}\right)$

Tabla 2. Cálculos relacionados con  $Kv$ .

$Kv = \rho_{air} C_{p,air} \Phi_{vent}$ $Kv = \rho_{air} C_{p,air} (\phi_{vent} + \phi_{leakage})$ $\phi_{vent} = 0$ $Kv = \rho_{air} C_{p,air} (\phi_{leakage})$ $\phi_{leakage} = C_{leakage} V_{wind}$ $Kv = \rho_{air} C_{p,air} C_{leakage} V_{wind}$	$\phi_{vent} = A_{max}(0,5C_d\sqrt{C_w}V_{wind} + 0,0159)$ $\phi_{vent} = A_{vent}(0,5C_d\sqrt{C_w}V_{wind} + 0,0159)$ $A_{vent} = u_{vent}A_{vent-max}$ $u_{vent} = 0$ $\phi_{leakage} = \begin{cases} 0,25 C_{leakage} & V_{wind} < 0,25 \\ C_{leakage} V_{wind} & V_{wind} \geq 0,25 \end{cases}$ $C_w = 0,09, C_d = 0.65, C_{leakage} = 0.0001,$ $V_{wind} = 1,6 \frac{m}{s}, A_{max} = 0,18 \frac{m}{m^2}$
---	---

Fuente: (Su & Xu, 2017)

Los parámetros de la ecuación (28) se pueden observar en la Tabla 3, en donde se relacionan todos los ajustes que se deben ingresar al sistema acorde a modelo realizado por Su & Xu (2017). En la columna de la izquierda se muestra la simbología y en la columna de la derecha se indica la magnitud asociada:

Tabla 3. Magnitud de los parámetros de la ecuación de temperatura del modelo.

Símbolo	Magnitud
$\theta_{heat}$	0,040250776
$\theta_{qfog}$	0,021040025
$\theta_{T_{air}-T_{out}}$	0,0054734184
$\theta_{T_{flr}-T_{air}}$	0,048660338
$\theta_{I_{glob}}$	0,067444516
$\theta_{qE}$	0,0054838984
$\theta_{qcond}$	1,3880771

Fuente: (Su & Xu, 2017)

Las contantes de los coeficientes de las variables de estado, entradas y disturbios del sistema, se relacionan en la Tabla 4. Adicionalmente se ingresan las constantes asociadas a los coeficientes, sin embargo, para el cálculo, se incluyen los parámetros. En relación al tiempo de muestreo se trabaja con lo implementado en el modelo planteado por Su *et al* (2017). Es decir, se usó un periodo de muestreo proporcionado por la bibliografía, por otro lado, los sensores y los actuadores están en capacidad de dar respuestas en tiempos menores o iguales a un segundo y en estado estacionario se garantiza un número de muestras mayor a 10.

Tabla 4. Magnitud de las constantes del modelo.

Constante	Magnitud	Unidad de medida
$t_{sample}$	1	s
$\rho_{air}$	1.424	$\frac{kg}{m^3}$
$C_{p,air}$	1000	$\frac{J}{kg * K}$
$H_g$	5,1	m
$\Delta H$	2450000	$\frac{J}{kg}$
$Kr$	0,1331	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$Ks$	2,57	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$\eta_{air}$	0.03	
$C_{leakage}$	0.0001	
$V_{wind}$	1,6	$\frac{m}{s}$
$A_{vent} = A_{max}$	0,18	$\frac{m^2}{m^2}$
$C_w$	0,09	
$C_d$	0.65	

Fuente: (Su &amp; Xu, 2017)

## 2.2 Modelo dinámico de humedad en el invernadero

La variable humedad en tiempo discreto se modela mediante la ecuación (29), en donde: la humedad del aire interior del invernadero  $H_{air}$  ( $\frac{g}{m^3}$ ) es la variable de estado,  $\Phi_{fog}$  es el flujo de vapor del sistema de nebulización en ( $\frac{kg}{s \cdot m^2}$ ) que hace parte de las entradas del sistema,  $E$  es velocidad de transpiración del cultivo en ( $\frac{kg}{s \cdot m^2}$ )  $\Phi_{cond}$  es el flujo de agua de condensación en ( $\frac{g}{s \cdot m^2}$ ), y  $H_{out}$  es la humedad al exterior del invernadero en ( $\frac{g}{m^3}$ ), ecuación (29):

$$H_{air}(k+1) = H_{air}(k) + \frac{t_{sample}}{H_g} [1000(\theta_E E(k)) - 1000(\theta_{cond} \Phi_{cond}(k)) - \theta_{Hair-Hout} \Phi_{vent}(H_{air}(k) - H_{out}(k)) + \theta_{fog} \Phi_{fog}(k)] + \zeta_2(x(k), w(k), u(k)) \quad (29)$$

Los parámetros se pueden observar en la Tabla 5, relacionan todos los ajustes que se deben realizar al sistema. En la columna de la izquierda se muestra la simbología y en la columna de la derecha se indica la magnitud de los parámetros de los coeficientes que multiplican las variables de estado, entrada y disturbios del sistema:

Tabla 5. Magnitud de los parámetros de la ecuación de humedad del modelo.

Símbolo	Magnitud
$\theta_{H_{air-Hout}}$	0,027234667
$\theta_{fog}$	0,15486025
$\theta_E$	0,11193369
$\theta_{cond}$	7,8792998

Fuente: (Su & Xu, 2017)

## 2.3 Modelo dinámico del dióxido de carbono en invernadero

La ecuación (30) relaciona la concentración de dióxido de carbono presente en el invernadero en donde:  $CO_{2,air}$  en  $\left(\frac{mg}{m^3}\right)$  es la variable de estado del sistema,  $\Phi_{CO_2}$  es el sistema de flujo de dióxido de carbono en  $\left(\frac{mg}{s*m^2}\right)$ , es la entrada de control de la variable,  $Re$  es la tasa de transpiración del dosel del cultivo en  $\left(\frac{mg}{s*m^2}\right)$ ,  $P_g$  es la tasa de fotosíntesis del dosel del cultivo  $\left(\frac{mg}{s*m^2}\right)$ ,  $CO_{2,out}$  es la concentración de dióxido de carbono en el exterior del invernadero en  $\left(\frac{mg}{m^3}\right)$ ,  $Re$ ,  $P_g$ ,  $CO_{2,out}$  hacen parte de los disturbios que pueden afectar el sistema y  $\Phi_{vent}$  es el coeficiente que se calcula en la Tabla 2 denominada cálculos relacionado a  $Kv$ .

$$CO_{2,air}(k+1) = CO_{2,air}(k) + \frac{t_{sample}}{H_g} [\theta_{CO_2} \Phi_{CO_2}(k) + \theta_{Re} Re(k) - \theta_{P_g} P_g(k) - \theta_{C_{air-cout}} \Phi_{vent}(CO_{2,air}(k) - CO_{2,out}(k))] + \zeta_3(x(k), w(k), u(k)) \quad (30)$$

Los parámetros de la ecuación (30) se pueden observar en la Tabla 6, muestra los parámetros del modelo. En la columna de la izquierda se muestra la simbología y en la columna de la derecha se indica la magnitud de los parámetros de los coeficientes que multiplican la variable de estado y disturbios del sistema.



Tabla 6. Magnitud de los parámetros ecuación dióxido de carbono.

Símbolo	Magnitud
$\theta_{C_{air-cout}}$	0.038953225
$\theta_{CO_2}$	0.1887992
$\theta_{Re}$	0.276
$\theta_{Pg}$	0.074639956

Fuente: (Su &amp; Xu, 2017)

## 2.4 No linealidades del sistema

Los modelos de temperatura, humedad y dióxido de carbono tienen no linealidades representados mediante  $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$  y  $\zeta_3$  respectivamente ecuación (31), los cuales se pueden ver en la ecuaciones,

$$\begin{aligned}
 \zeta_1(x(k), w(k), u(k)) &= \frac{\Delta H}{\rho_{air} C_{p,air} H_g (\varepsilon + 1)} f_{qcond}(\Delta VP_{air-cov}(k)) \\
 &- \frac{\Delta H}{C_{apair}} f_{qE}(I_{glob}(k), CO_{2,air}(k), T_{can}(k), H_{air}(k)) \\
 &+ \frac{K_s}{C_{apair}} f_{flr-air}(\Delta T_{flr-air}) - \frac{Kv + Kr}{C_{apair}} f_{air-out}(\Delta T_{air-out}),
 \end{aligned} \tag{31}$$

En donde  $f_{qcond}$  se define como sigue:

$$\begin{aligned}
 f_{qcond}(\Delta VP_{air-cov}(k)) &= \theta_{qc0} + \theta_{qc1}(\Delta VP_{air-cov}(k)) + \theta_{qc2}(\Delta VP_{ir-cov}^2(k)) \\
 &+ \theta_{qc3}(\Delta VP_{ir-cov}^3(k)),
 \end{aligned} \tag{32}$$

Los coeficientes constantes de asociados a  $\theta_{qc}$  se identifican en la Tabla 7

Tabla 7 Parámetros de  $f_{qcond}$ .

Símbolo	Magnitud
$\theta_{qC0}$	-0.0152
$\theta_{qC1}$	$-1.6652 \times 10^{-6}$
$\theta_{qC2}$	$-4.8661 \times 10^{-10}$
$\theta_{qC3}$	$2.7354 \times 10^{-12}$

Fuente: (Su & Xu, 2017)

El primer término de las no linealidades del modelo, relaciona  $f_{qcond}$  que está dado por el diferencial de presión de vapor de la ecuación (33):

$$\Delta VP_{air-cov}(k) = VP_{air} - VP_{cov}, \quad (33)$$

Donde la presión de vapor del aire es  $VP_{air}$  y la de la cobertura es  $VP_{cov}$ :

$$VP_{air} = \frac{H_{air} * R * (T_{air} + 273.15)}{M_{H_2O}} \times 10^{-3}, \quad (34)$$

$$VP_{cov} = 2.229 \times 10^{-11} e^{-\frac{5385}{T_{cov} + 273.15}}, \quad (35)$$

Dependiendo  $VP_{cov}$  de  $T_{cov}$ , en donde, esta última se define en la ecuación (36):

$$T_{cov} = b_1 T_{air} + b_2 T_{out}, \quad (36)$$

Los coeficientes de la temperatura de la cobertura se relacionan en la Tabla 8:

Tabla 8. Coeficientes de temperatura de la cobertura del invernadero.

Símbolo	Magnitud
$b_1$	0.3
$b_2$	0.7

Fuente: (Su & Xu, 2017)

El segundo término de las no linealidades del modelo, relaciona  $f_{qE}$ , el cual, está definido de manera simplificada mediante la ecuación (37):

$$f_{qE}(I_{glob}(k), CO_{2,air}(k), T_{can}(k), H_{air}(k)) = f_{qE}(T_{can}(k), H_{air}(k)) \quad (37)$$

El segundo término de las no linealidades del modelo, relaciona  $f_{qE}$ , el cual, está definido como sigue:

$$\begin{aligned} f_{qE}(T_{can}(k), H_{air}(k)) &= \theta_{qE0} + \theta_{qE1}T_{can}(k) + \theta_{qE2}H_{can}(k) + \theta_{qE3}T_{can}^2(k) \\ &+ \theta_{qE4}T_{can}(k)H_{air}(k) + \theta_{qE5}H_{air}^2(k) + \theta_{qE6}T_{can}^3(k) \\ &+ \theta_{qE7}T_{can}^2(k)H_{air}(k) + \theta_{qE8}T_{can}(k)H_{air}^2(k) + \theta_{qE9}H_{air}^3(k) \end{aligned} \quad (38)$$

Tabla 9. Parámetros de  $f_{qE}$ .

Símbolo	Magnitud
$\theta_{qE0}$	0.0046896
$\theta_{qE1}$	$3.3808 \times 10^{-5}$
$\theta_{qE2}$	0.0013
$\theta_{qE3}$	$2.9259 \times 10^{-4}$
$\theta_{qE4}$	$-5.6434 \times 10^{-4}$
$\theta_{qE5}$	$2.2877 \times 10^{-4}$
$\theta_{qE6}$	$2.6071 \times 10^{-5}$
$\theta_{qE7}$	$-1.0596 \times 10^{-5}$
$\theta_{qE8}$	$1.3471 \times 10^{-4}$
$\theta_{qE9}$	$-5.3686 \times 10^{-5}$

Fuente: (Su & Xu, 2017)

La temperatura del dosel  $T_{can}$ , es la temperatura de la parte aérea de las plantas, especialmente la que está asociada a las hojas, se define como:

$$T_{can} = b_3 T_{air} + b_4 \eta_{can} I_{glob} \quad (39)$$

En donde,

$$\eta_{can} = \text{tasa de radiación global observada por el canopy}$$

$$\eta_{can} = (\alpha_{can} + \alpha_{can}\rho_{flr}\tau_{can})\tau_{cov} = 0.5129$$

$$\alpha_{can} = 1 - 0.2325 (1 - e^{-0.87LAI}) - e^{-0.615LAI} = 0.516$$

$$\tau_{can} = e^{-0.615LAI} = 0.29229$$

$$\tau_{cov} = 0.85 \text{ Coeficiente de transmisión de la cobertura}$$

$$\rho_{flr} = 0.58 \text{ Coeficiente de reflexión del suelo}$$

$$LAI = 2 \text{ Índice de área de la hoja (Leaf area index)}$$

Tabla 10. Coeficientes de temperatura del aire y radiación global.

Símbolo	Magnitud
$b_3$	1.035009892
$b_4$	0.012296484369

Fuente: (Su & Xu, 2017)

El termino tres de las no linealidades de  $\zeta_1$  es  $f_{flr-air}(\Delta T_{flr-air})$  que está definido como se expresa en la ecuación (40):

$$f_{flr-air}(\Delta T_{flr-air}) = \theta_{T1} + \theta_{T2}\Delta T_{flr-air} + \theta_{T3}\Delta T_{flr-air}^2 + \theta_{T4}\Delta T_{flr-air}^3 + \theta_{T5}\Delta T_{flr-air}^4 \quad (40)$$

Los parámetros de la ecuación (40) relacionados con  $f_{flr-air}(\Delta T_{flr-air})$ , se ven reflejados en la Tabla 11, a través de los cinco valores de  $\theta_T$ .

Tabla 11. Parámetros de  $f_{flr-air}$ .

Símbolo	Magnitud
$\theta_{T1}$	$1.3514 \times 10^{-8}$
$\theta_{T2}$	723.7673
$\theta_{T3}$	2.4092
$\theta_{T4}$	1.5268
$\theta_{T5}$	0.0322

Fuente: (Su & Xu, 2017)

Donde  $\Delta T_{flr-air}$  es el diferencial de temperatura del suelo con respecto al aire definido en la ecuación siguiente:

$$\Delta T_{flr-air} = T_{flr} - T_{air} \quad (41)$$

El último término asociado a las no linealidades de la temperatura  $\zeta_1$  se describe como sigue mediante la ecuación (42):

$$f_{air-out}(\Delta T_{air-out}) = \frac{K_v + K_r}{C_{p,air}} (\theta_{T6} + \theta_{T7} \Delta T_{air-out} + \theta_{T8} \Delta T_{air-out}^2 + \theta_{T9} \Delta T_{air-out}^3 + \theta_{T10} \Delta T_{air-out}^4), \quad (42)$$

Siendo así,  $K_v$  relaciona la densidad del aire  $\rho_{air}$ , capacidad calorífica del aire  $C_{p,air}$ , el coeficiente de fuga de efecto invernadero  $C_{p,air} C_{leakage}$  y la velocidad del viento  $V_{wind}$ , todos conocidos

$$K_v = \rho_{air} C_{p,air} C_{leakage} V_{wind} = 28.48, \quad (43)$$

Delta de temperatura relaciona la diferencia del aire  $T_{air}$  menos temperatura exterior  $T_{out}$  como se muestra en la ecuación:

$$\Delta T_{air-out} = T_{air} - T_{out}. \quad (44)$$

Los parámetros relacionados con  $f_{air-out}$  se pueden ver como sigue:

Tabla 12. Parámetros de  $f_{air-out}$ .

Símbolo	Magnitud
$\theta_{T6}$	-2.0821
$\theta_{T7}$	1.4107
$\theta_{T8}$	0.1553
$\theta_{T9}$	-0.0941
$\theta_{T10}$	-0.0028

Fuente: (Su & Xu, 2017)

Las no linealidades relacionadas al vector humedad se relacionan mediante  $\zeta_2$  en la ecuación (45):

$$\begin{aligned} \zeta_2(X(k), W(k), U(k)) &= \frac{1}{H_g} f_E(I_{glob}(K), CO_{2-air}(K), T_{can}(K), H_{air}(K)) \\ &\quad - \frac{1}{H_g} f_{cond}(\Delta VP_{air-cov}(K)) - \frac{\Phi_{vent}(K)}{H_g} f_{Hair-Hout}(\Delta H_{air-out}) \end{aligned} \quad (45)$$

El modelo simplificado permite obtener la siguiente igualdad:

$$f_E(I_{glob}(k), CO_{2,air}(k), T_{can}(k), H_{air}(k)) = f_E(T_{can}(k), H_{air}(k)) \quad (46)$$

Donde  $f_E(T_{can}(k), H_{air}(k))$  está definido como sigue:

$$\begin{aligned} f_E(T_{can}(k), H_{air}(k)) &= \theta_{E0} + \theta_{E1}T_{can}(k) + \theta_{E2}H_{can}(k) + \theta_{E3}T_{can}^2(k) \\ &\quad + \theta_{E4}T_{can}(k)H_{air}(k) + \theta_{E5}H_{air}^2(k) + \theta_{E6}T_{can}^3(k) \\ &\quad + \theta_{E7}T_{can}^2(k)H_{air}(k) + \theta_{E8}T_{can}(k)H_{air}^2(k) + \theta_{E9}H_{air}^3(k) \end{aligned} \quad (47)$$

La temperatura del canopy  $T_{can}$  está definido en la ecuación (39), la humedad del aire es idéntica a la humedad de canopy, los parámetros relacionados con  $\theta_E$  se relacionan en la Tabla 13. Parámetros de  $f_E$ .

Tabla 13. Parámetros de  $f_E$ .

Símbolo	Magnitud
$\theta_{E0}$	0.1564
$\theta_{E1}$	0
$\theta_{E2}$	-0.6539
$\theta_{E3}$	-0.0799
$\theta_{E4}$	-0.102
$\theta_{E5}$	-0.1008
$\theta_{E6}$	$-8.4926 \times 10^{-4}$
$\theta_{E7}$	0.0033
$\theta_{E8}$	0.0088
$\theta_{E9}$	$-3.0233 \times 10^{-4}$

Fuente: (Su & Xu, 2017)

El segundo término de  $\zeta_2$  se define como sigue:

$$\begin{aligned}
 f_{cond}(\Delta VP_{air-cov}(k)) & \\
 &= \theta_{c0} + \theta_{c1}(\Delta VP_{air-cov}(k)) + \theta_{c2}(\Delta VP_{ir-cov}^2(k)) \\
 &+ \theta_{c3}(\Delta VP_{ir-cov}^3(k)),
 \end{aligned} \tag{48}$$

Lo mencionado anteriormente está relacionado con la presión de vapor del aire y la cobertura, referenciada en las ecuaciones (33) a (36) y la Tabla 8. Coeficientes de temperatura de la cobertura del invernadero. Por otro lado la Tabla 14 muestra los parámetros de la ecuación (48):

Tabla 14. Parámetros de  $f_{cond}$ .

Símbolo	Magnitud
$\theta_{c0}$	0.1564
$\theta_{c1}$	0.0056
$\theta_{c2}$	$6.1855 \times 10^{-6}$
$\theta_{c3}$	$2.1828 \times 10^{-9}$

Fuente: (Su & Xu, 2017)

$f_{Hair-Hout}(\Delta H_{air-out})$  esta definido como sigue donde  $\Delta H_{air-out} = H_{air} - H_{out}$

$$\begin{aligned}
 f_{Hair-Hout}(\Delta H_{air-out}) & \\
 &= \theta_{H1} + \theta_{H2}\Delta H_{air-out} + \theta_{H3}\Delta H_{air-out}^2 + \theta_{H4}\Delta H_{air-out}^3 \\
 &+ \theta_{H5}\Delta H_{air-out}^5
 \end{aligned} \tag{49}$$

La tabla de parámetros se muestra a continuación:

Tabla 15. Parámetros de  $f_{Hair-Hout}$ .

Símbolo	Magnitud
$\theta_{H1}$	-0.1912
$\theta_{H2}$	-0.5667
$\theta_{H3}$	-0.9269
$\theta_{H4}$	-0.1748
$\theta_{H5}$	-0.0216

Fuente: (Su & Xu, 2017)

La no linealidad relacionada con el modelo del dióxido de carbono se ve reflejada en  $\zeta_3$  ecuación (50), se puede observar que la forma simplificada, el modelo de no linealidad depende del  $I_{glob}$ ,  $T_{air}$ ,  $CO_{2,air}$ ,  $CO_{2,out}$ ,  $T_{can}$  como se muestra en los siguientes términos:

$$\begin{aligned} \zeta_3(X(k), W(k), U(k)) & \\ &= -\frac{1}{H_g} f_{pg}(I_{glob}(k), T_{can}(k), CO_{2,air}(k)) + \frac{1}{H_g} f_{Re}(T_{can}(k)) \\ &\quad - \frac{\Phi_{vent}(k)}{H_g} f_{cair-cout}(\Delta CO_{2,air-cout}(k)) \end{aligned} \quad (50)$$

La forma simplificada de  $f_{pg}$  es:

$$\frac{1}{H_g} f_{pg}(I_{glob}(k), T_{can}(k), CO_{2,air}(k)) = I_{glob}(k) f'_{pg}(T_{can}(k), CO_{2,air}(k)) \quad (51)$$

Donde  $f'_{pg}$  está definido como:

$$\begin{aligned} f'_{pg}(T_{can}(k), CO_{2,air}(k)) & \\ &= \theta_{P0} + \theta_{P1} T_{air}(k) + \theta_{P2} CO_{2,air}(k) + \theta_{P3} T_{air}^2(k) \\ &\quad + \theta_{P4} T_{air}(k) CO_{2,air}(k) + \theta_{P5} CO_{2,air}^2(k) + \theta_{P7} T_{air}^2(k) CO_{2,air}(k) \\ &\quad + \theta_{P6} T_{air}^3(k) + \theta_{P8} T_{air}(k) CO_{2,air}^2(k) + \theta_{P9} CO_{2,air}^3(k) \end{aligned} \quad (52)$$

Tabla 16. Parámetros de  $f'_{pg}$ .

Símbolo	Magnitud
$\theta_{P0}$	4.7059
$\theta_{P1}$	-0.2345
$\theta_{P2}$	-0.018
$\theta_{P3}$	-0.0067
$\theta_{P4}$	0.002
$\theta_{P5}$	$-2.5407 \times 10^{-5}$
$\theta_{P6}$	$2.3245 \times 10^{-4}$
$\theta_{P7}$	$-2.557 \times 10^{-5}$
$\theta_{P8}$	$-1.0024 \times 10^{-6}$
$\theta_{P9}$	$5.4021 \times 10^{-8}$

Fuente: (Su & Xu, 2017)



El segundo término de las no linealidades de  $\zeta_3$  es  $f_{Re}$  de acuerdo a la ecuación (53) dado que  $T_{can}(k) = 0$ , se puede afirmar que:

$$f_{Re} = T_{can}(k) = 0 \quad (53)$$

Finalmente, el último término de  $\zeta_3$  es  $f_{cair-cout}$ , que se describe en la ecuación (54) la cual, relaciona la diferencia de dióxido de carbono al interior y al exterior,  $\Delta CO_{2,air-out} = CO_{2,air} - CO_{2,out}$ :

$$\begin{aligned} f_{cair-cout}(\Delta CO_{2,air-out}) & \quad (54) \\ & = \theta_{CO1} + \theta_{CO2}\Delta CO_{air-out} + \theta_{CO3}\Delta CO_{air-out}^2 + \theta_{CO4}\Delta CO_{air-out}^3 \\ & \quad + \theta_{CO5}CO_{air-out}^4 \end{aligned}$$

Los parámetros de  $f_{cair-cout}$  están en la Tabla 17, en donde se describe el símbolo y la magnitud.

Tabla 17. Parámetros de  $f_{cair-cout}$ .

Símbolo	Magnitud
$\theta_{CO1}$	-204.2477
$\theta_{CO2}$	-12.5384
$\theta_{CO3}$	0.3306
$\theta_{CO4}$	-0.0028
$\theta_{CO5}$	$6.8871 \times 10^{-6}$

Fuente: (Su & Xu, 2017)

## 2.5 Linealización en el punto de operación

Considere que el sistema será operado alrededor de un punto de consigna, por lo tanto, se admite la siguiente linealización:

$$\delta x_{k+1} = F\delta x_k + G\delta u_k + G_d\delta w + J(\zeta(x_k, w_k, u_k)), \quad (55)$$

La variable  $J$  denota el Jacobiano usado para aproximar el sistema, en el punto de operación,

$$J(\zeta_1(x_k, w_k, u_k)) = \frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{air}} + \frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial H_{air}} + \frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{out}} + \frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial I_{glob}} + \frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{flr}}, \quad (56)$$

$$J(\zeta_2(x_k, w_k, u_k)) = \frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{air}} + \frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial H_{air}} + \frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{out}} + \frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial I_{glob}} + \frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial H_{out}},$$

A continuación, se muestran las ecuaciones que describen el modelo lineal para  $\zeta_1$ , note que,  $T_{air0}$ ,  $H_{air0}$ ,  $I_{glob0}$ ,  $T_{flr0}$  y  $T_{out0}$ , son definidos como valores constantes de consigna.

$$\frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{air}} = (\phi_{1a} + \phi_{2a} + \phi_{3a} + \phi_{4a})\delta T_{air}, \quad (57)$$

$$\frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial H_{air}} = (\phi_{1b} + \phi_{2b})\delta H_{air},$$

$$\frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{out}} = \phi_{1c}\delta T_{out}, \quad (58)$$

$$\frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial I_{glob}} = \phi_{1d}\delta I_{glob},$$

$$\frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{flr}} = \phi_{1e}\delta T_{flr}.$$

Las ecuaciones que definen los parámetros  $\phi_{1a}, \phi_{2a}, \phi_{3a}, \phi_{4a}, \phi_{1b}, \phi_{2b}, \phi_{1c}, \phi_{1d}$  y  $\phi_{1e}$  son descritas en el anexo A. Seguidamente, se muestran las ecuaciones que describen el modelo lineal para  $\zeta_2$ , note que,  $T_{air0}$ ,  $H_{air0}$ ,  $T_{out0}, H_{out0}$  y  $I_{glob0}$ , son definidos como valores constantes de consigna.

$$\frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{air}} = (\phi_{1T_{air}} + \phi_{2T_{air}})\delta T_{air}, \quad (59)$$

$$\frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial H_{air}} = (\phi_{1H_{air}} + \phi_{2H_{air}} + \phi_{3H_{air}})\delta H_{air}, \quad (60)$$

$$\frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{out}} = (\phi_{2T_{out}})\delta T_{out}, \quad (61)$$

$$\frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial I_{glob}} = (\Phi_{1I_{glob}}) \delta I_{glob}, \quad (62)$$

$$\frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial H_{out}} = (\Phi_{3H_{out}}) \delta H_{out}, \quad (63)$$

Las ecuaciones que definen los parámetros  $\Phi_{1aT_{air}}$ ,  $\Phi_{2aT_{air}}$ ,  $\Phi_{1H_{air}}$ ,  $\Phi_{2H_{air}}$ ,  $\Phi_{3H_{air}}$ ,  $\Phi_{2T_{out}}$ ,  $\Phi_{1I_{glob}}$  y  $\Phi_{3H_{out}}$  son descritas en el anexo A.

## 2.6 Coeficientes del modelo dinámico del sistema

A partir de las ecuaciones (28), (29) y (30) se determinan los coeficientes que serán ingresados al modelo dinámico del sistema del invernadero a través del software Matlab, de la ecuación (28) se determina el coeficiente  $a_T$  que multiplica la variable de estado temperatura, ver ecuación (64), el coeficiente  $b_T$  multiplica la entrada de calefacción del sistema, ver ecuación (67),  $c_T$  multiplica la entrada de nebulización del sistema, ver ecuación (68), los demás coeficientes  $d_T$ ,  $e_T$ ,  $f_T$ ,  $g_T$  y  $h_T$ , están asociadas a los disturbios ecuaciones (69) a la (73), temperatura externa, temperatura del suelo, radiación solar, transpiración y condensación respectivamente.

$$a_T = 1 - \frac{t_{sample}}{\rho_{air} C_{p,air} H_g} \theta_{T_{air}-T_{out}} (\rho_{air} C_{p,air} C_{leakage} V_{wind} + Kr) - \frac{t_{sample}}{\rho_{air} C_{p,air} H_g} \theta_{T_{flr}-T_{air}} KS, \quad (64)$$

$$a_{11} = \Phi_{1a} + \Phi_{2a} + \Phi_{3a} + \Phi_{4a} \quad (65)$$

$$a_{12} = \Phi_{1b} + \Phi_{2b}, \quad (66)$$

$$b_T = \frac{t_{sample}}{\rho_{air} C_{p,air} H_g} \theta_{heat}, \quad (67)$$

$$c_T = \frac{t_{sample}}{\rho_{air} C_{p,air} H_g} 0.001 \theta_{qfog} \Delta H, \quad (68)$$

$$d_T = \frac{t_{sample}}{\rho_{air} C_{p,air} H_g} * \theta_{T_{air}-T_{out}} (\rho_{air} C_{p,air} C_{leakage} V_{wind} + Kr) + \Phi_{1c}, \quad (69)$$

$$e_T = \frac{t_{sample}}{\rho_{air} C_{p,air} H_g} \theta_{T_{flr}-T_{air}} KS + \Phi_{1e}, \quad (70)$$

$$f_T = \frac{t_{sample}}{\rho_{air} C_{p,air} H_g} \cdot \theta_{I_{glob}} \eta_{air} + \Phi_{1d}, \quad (71)$$

$$g_T = \frac{t_{sample}}{\rho_{air} c_{p,air} H_g} \theta_{qE} \Delta H, \quad (72)$$

$$h_T = \frac{t_{sample}}{\rho_{air} c_{p,air} H_g} \theta_{qcond} \Delta H, \quad (73)$$

Los coeficientes asociados al dióxido de carbono, se determinan a partir de la ecuación (29), el coeficiente  $a_H$  multiplica la variable de estado humedad, ecuación (74), y el coeficiente  $c_H$  multiplica la entrada de nebulización del sistema ver ecuación (77), las no linealidades son representadas como disturbios exógenos asociados a las variables de estado ecuaciones (75) y (76) los demás coeficientes  $d_H, g_H$  y  $h_H$  están asociadas a los disturbios: transpiración, condensación y humedad externa, respectivamente ver ecuaciones de la (78) a la (82), las no linealidades asociadas a los disturbios se representan en la ecuaciones (79) y (80):

$$a_H = 1 - \frac{t_{sample}}{H_g} * \theta_{H_{air}-H_{out}} C_{leakage} V_{wind}, \quad (74)$$

$$a_{21} = \Phi_{1T_{air}} + \Phi_{2T_{air}}, \quad (75)$$

$$a_{22} = \Phi_{1H_{air}} + \Phi_{2H_{air}} + \Phi_{3H_{air}}, \quad (76)$$

$$c_H = \frac{t_{sample}}{H_g} \theta_{fog}, \quad (77)$$

$$d_H = \frac{t_{sample}}{H_g} \theta_{H_{air}-H_{out}} C_{leakage} V_{wind} + \Phi_{3H_{out}}, \quad (78)$$

$$d_{1a} = \Phi_{2T_{out}} \quad (79)$$

$$f_y = \Phi_{1I_{glob}} \quad (80)$$

$$g_H = \frac{t_{sample}}{H_g} 1000 \theta_E, \quad (81)$$

$$h_H = \frac{t_{sample}}{H_g} 1000 \theta_{cond}. \quad (82)$$

La ecuación (30) permite determinar el coeficiente  $a_C$  que multiplica la variable de estado dióxido de carbono ver ecuación (83) y el coeficiente  $c_C$  que multiplica la entrada de suministro de  $CO_2$  del sistema ecuación (84), los demás coeficientes  $i_C, j_C,$  y  $k_C$  están asociadas a los disturbios: flujo de dióxido de carbono del sistema de enriquecimiento, tasa de transpiración del dosel del cultivo y tasa de fotosíntesis del dosel del cultivo, en donde, el dosel es la capa o cubierta aérea del cultivo, ver ecuaciones de la (85) a la (87):

$$a_C = 1 - \frac{t_{sample}}{H_g} * \theta_{Cair-cout} C_{leakage} V_{wind} , \quad (83)$$

$$c_C = \frac{t_{sample}}{H_g} \theta_{Cair-cout} C_{leakage} V_{wind} , \quad (84)$$

$$i_C = \frac{t_{sample}}{H_g} \theta_{CO_2} , \quad (85)$$

$$j_C = \frac{t_{sample}}{H_g} \theta_{Re} , \quad (86)$$

$$k_C = \frac{t_{sample}}{H_g} \theta_{Pg} . \quad (87)$$

Finalmente, las ecuaciones en términos de las variables de estado, entradas al sistema y disturbios, asociados con los coeficientes se muestran a continuación, ver (88) (89) y (90):

$$T_{air}(k+1) = a_T * T_{air}(k) + b_T * Q_{heat}(k) - c_T * \Phi_{fog}(k) + d_T * T_{out}(k) + e_T * T_{flr}(k) + f_T * I_{glob}(k) - g_T * E(k) + h_T * \Phi_{cond}(k) + a_{11} * \delta T_{air}(k) + a_{12} * \delta H_{air}(k), \quad (88)$$

$$H_{air}(k+1) = a_H * H_{air}(k) + c_H * \Phi_{fog}(k) + d_H * H_{out}(k) + g_H * E(k) - h_H * \Phi_{cond}(k) + a_{21} \delta T_{air}(k) + a_{22} \delta H_{air}(k) + d_{1a} \delta T_{out}, \quad (89)$$

$$CO_{2,air}(k+1) = a_C * CO_{2,air}(k) + c_C * \Phi_{CO_2}(k) + i_C * CO_{2,out}(k) + j_C * Re(k) - k_C * P_g(k) + \zeta_3(x_k, w_k, u_k). \quad (90)$$

## 2.7 Modelo de espacio de estados

Se representan las ecuaciones (88), (89) y (90) en tiempo discreto determinadas previamente, en la forma de la ecuación matricial general del sistema ver ecuación (91):

$$X_{k+1} = Fx_k + Gu_k + G_d w + G_\delta w \quad (91)$$

La representación general se muestra en la ecuación (92), en donde se pueden observar las variables de estado, las entradas y disturbios asociados al modelo, en forma de matrices,  $F$

la primera matriz 3x3 relacionada con las variables de estado, la matriz de entradas  $G$  de 3x3 y la matriz  $G_d$  de 3x9 relacionada a los disturbios:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} T_{air}(k+1) \\ H_{air}(k+1) \\ CO_{2,air}(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_T & 0 & 0 \\ 0 & a_H & 0 \\ 0 & 0 & a_C \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_{air}(k) \\ H_{air}(k) \\ CO_{2,air}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_T & -c_T & 0 \\ 0 & c_H & 0 \\ 0 & 0 & c_C \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Q_{heat}(k) \\ \Phi_{fog}(k) \\ \Phi_{CO_2}(k) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} d_T & e_T & f_T & -g_T & h_T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_H & -h_H & d_H & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & i_C & j_C & -k_C \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_{out}(k) \\ T_{flr}(k) \\ I_{glob}(k) \\ E(k) \\ \Phi_{cond}(k) \\ H_{out}(k) \\ CO_{2,out}(k) \\ Re(k) \\ P_g(k) \end{bmatrix} + \zeta(x_k, w_k, u_k) \end{aligned} \quad (92)$$

De acuerdo con Su & Xu (2017) y para efectos de la simulación de la estrategia de control robusto, se identifica que el  $CO_2$  no influye sobre la variable  $T_{air}$ . Asimismo, no existe una relación entre el  $CO_2$  y las no linealidades  $\zeta_1$  y  $\zeta_2$ , como se evidencia en las ecuaciones (37) y (46). En este sentido, dado que el sistema esta desacoplado, no existe una dependencia de la humedad y la temperatura con la concentración del dióxido de carbono  $CO_2$  en el invernadero, por tanto, el sistema se puede representar de manera sintetizada como sigue, al dejar de considerar  $\zeta_3$ ,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} T_{air}(k+1) \\ H_{air}(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_T & 0 \\ 0 & a_H \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_{air}(k) \\ H_{air}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_T & -c_T \\ 0 & c_H \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Q_{heat} \\ \Phi_{fog} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} d_T & e_T & f_T & -g_T & h_T & 0 \\ d_{1a} & 0 & f_y & g_H & -h_H & d_H \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_{out}(k) \\ T_{flr}(k) \\ I_{glob}(k) \\ E(k) \\ \Phi_{cond}(k) \\ H_{out}(k) \end{bmatrix} + G_\delta w \end{aligned} \quad (93)$$

Se identifican las matrices  $F, G, G_d$  y  $G_\delta$ , como sigue:

$$F = \begin{bmatrix} a_T & 0 \\ 0 & a_H \end{bmatrix}, \quad (94)$$

$$G = \begin{bmatrix} b_T & -c_T \\ 0 & c_H \end{bmatrix}, \quad (95)$$

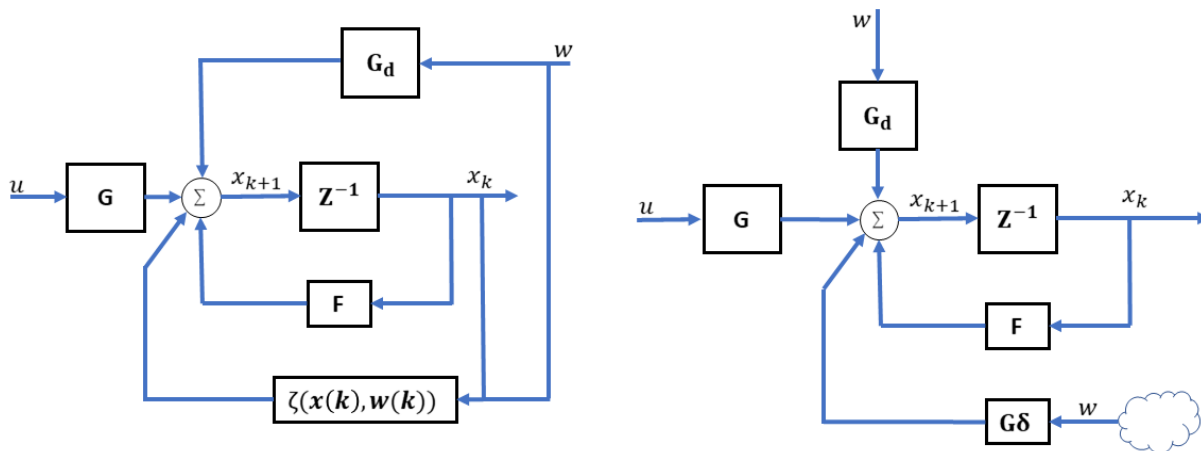
$$G_d = \begin{bmatrix} d_T & e_T & f_T & -g_T & h_T & 0 \\ d_{1a} & 0 & f_y & g_H & -h_H & d_H \end{bmatrix}, \quad (96)$$

La ecuación matricial de parámetros linealizados de las funciones  $\zeta_1$  y  $\zeta_2$  que serán ingresadas como incertidumbres paramétricas es  $G_\delta$ ,

$$G_\delta = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (97)$$

La Figura 7, muestra las interconexiones del sistema dinámico. En la Figura 7 (izquierda) se consideran las no linealidades  $\zeta(x_k, w_k)$  y la dependencia que estas tienen respecto de los estados y los disturbios asociados al sistema. En la Figura 7 (derecha), se muestra el enfoque de modelo con incertidumbres considerado en este proyecto, el cual es similar al descrito en (Gu, Petkov, & Konstantinov, 2005). En este sentido las no linealidades son consideradas como disturbios exógenos, las cuales tienen una equivalencia con los parámetros inciertos del modelo. Una explicación al respecto de esta equivalencia se encuentra en la siguiente sección.

Figura 7. Diagrama de bloque del sistema dinámico.



Fuente: Elaboración propia

## 2.8 Análisis de incertidumbres

La presente sección pretende mostrar la relación existente entre el modelo de incertidumbres paramétricas descrito en (9) y el modelo que considera disturbios exógenos ecuación (91). De acuerdo con Cerri *et al.* (2017), un modelo que considera disturbios exógenos se puede describir como:

$$x_{i+1} = F_i x_i + G_i u_i + G_{di} w_i, \quad i = 0, \dots, N; \quad (98)$$

Donde,  $F_i$ ,  $G_i$ ,  $G_{di}$ , son la matriz de transición de estados, la matriz que relaciona la acción de control y la matriz que relaciona el disturbio, respectivamente. Además, admita las siguientes equivalencias:

$$G_{di} = H[E_F + E_G]; \quad w_i = \Delta \begin{bmatrix} x_i \\ u_i \end{bmatrix}, \quad (99)$$

donde,  $\Delta$  es un número aleatorio y está definido como  $-1 < \Delta < 1$ , esta contracción se relaciona con los disturbios ya que tiene comportamiento aleatorio. Además,  $H$ ,  $E_F$  y  $E_G$  conforman un arreglo de incertidumbres limitadas. Por lo tanto, sustituyendo (99) en (98) se obtiene:

$$x_{i+1} = F_i x_i + G_i u_i + H[E_F + E_G] \Delta \begin{bmatrix} x_i \\ u_i \end{bmatrix}, \quad (100)$$

Para la ecuación (100) se puede realizar la siguiente equivalencia:

$$H \Delta \begin{bmatrix} E_F & E_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ u_i \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} E_F & E_G \end{bmatrix} \Delta \begin{bmatrix} x_i \\ u_i \end{bmatrix}, \quad (101)$$



La parte izquierda de la ecuación anterior describe incertidumbres paramétricas limitadas y la parte de la derecha de la ecuación está relacionado con los disturbios. De tal forma que:

$$\delta F_i x_i + \delta G_i u_i = G_{di} w_i. \quad (102)$$

Por lo tanto, se muestra que existe una equivalencia entre el modelo que considera las incertidumbres y el que considera el disturbio, en donde,  $\delta F_i$  y  $\delta G_i$  se definen como sigue:

$$\delta F_i = H \Delta E_F; \quad \delta G_i = H \Delta E_G \quad (103)$$

Por tanto, se puede afirmar que el sistema de la ecuación (98) es equivalente al sistema de la ecuación (104):

$$(F_i + \delta F_i) x_i + (G_i + \delta G_i) u_i = F_i x_i + G_i u_i + G_{di} w_i \quad (104)$$

Ahora considere determinar la transformada de z a partir de la ecuación (104):

$$X(z) = (zI - F)^{-1} G u(z) + (zI - F)^{-1} G_d w(z). \quad (105)$$

Esta ecuación se puede organizar como:

$$X(z) = (zI - F)^{-1} [G \quad G_d] \begin{bmatrix} u(z) \\ w(z) \end{bmatrix}, \quad (106)$$

La ecuación (105) permite observar el análisis desde el punto de vista de los disturbios. Por otro lado, desde el punto de vista de las incertidumbres se tiene que:

$$x_{i+1} = (F_i + \delta F_i) x_i + (G_i + \delta G_i) u_i, \quad (107)$$

Aplicando la transformada z:

$$X(z) = (zI - F - \delta F)^{-1}[G \ \delta G_d]u(z), \quad (108)$$

Ahora note que, si  $\Delta u_i = w_G$  se puede afirmar que,  $\delta G_i u_i = H E_G w_G$ , en donde la variable  $w_G$  es análoga a un disturbio dada su naturaleza aleatoria. Siendo así, se obtiene:

$$X(z) = (zI - F - \delta F)^{-1}[G u(z) \ H E_G w_G(z)], \quad (109)$$

representando, un modelo equivalente de respuesta en frecuencia ante incertidumbres:

$$X(z) = (zI - F - \delta F)^{-1}[G \ H E_G] \begin{bmatrix} u_i(z) \\ w_G(z) \end{bmatrix}, \quad (110)$$

En sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), el análisis de incertidumbres se puede realizar mediante las gráficas de valores singulares, las cuales, permiten identificar si un modelo de incertidumbres limitadas, contiene un modelo de disturbios. Adicionalmente, dado que se han considerados incertidumbres de tipo aditivo, puede ser analizado el error absoluto entre los valores singulares de un sistema nominal y un sistema sujeto a disturbios o a incertidumbres. Un método para determinar el conjunto de incertidumbres limitadas usadas en el diseño de los reguladores robustos considerados en este documento, el cual determina la robustez de un sistema, se describe en las ecuaciones (111) a (114). Dado que  $z = e^{j\omega T_s} \approx \frac{1+j\omega T_s/2}{1-j\omega T_s/2}$ , se pueden definir las siguientes funciones de transferencia:

$$\Omega_n(e^{j\omega T_s}) = C(e^{j\omega T_s}I - F)^{-1}G, \quad (111)$$

$$\Omega_d(e^{j\omega T_s}) = C(e^{j\omega T_s}I - F)^{-1}[G \ G_d], \quad (112)$$

$$\bar{\Omega}_p(e^{j\omega T_s}) = C(e^{j\omega T_s}I - F - H E_F)^{-1}[G \ H E_G], \quad \Delta = 1, \quad (113)$$

$$\underline{\Omega}_p(e^{j\omega T_s}) = C(e^{j\omega T_s}I - F + H E_F)^{-1}[G \ H E_G], \quad \Delta = -1. \quad (114)$$

Donde, las funciones de transferencia  $\Omega_n$ ,  $\Omega_d$ ,  $\bar{\Omega}_p$  y  $\underline{\Omega}_p$ , están dadas para el sistema nominal, el sistema sujeto al disturbio exógeno, el sistema considerando el límite superior de incertidumbres y el sistema considerando el límite inferior de incertidumbres, respectivamente. A partir, de lo anterior, se puede determinar el error absoluto que existe entre los valores singulares del sistema nominal y el sistema sujeto al disturbio exógeno  $e\sigma(y, u, w)$ . También, se puede determinar el error absoluto que existe entre los valores singulares del sistema nominal y el sistema sujeto a incertidumbres,  $e\underline{\sigma}(y, u, w)$  y  $e\bar{\sigma}(y, u, w)$ , como se muestra en seguida:

$$e\sigma(y, u, w) = |\sigma(\Omega_n(e^{j\omega T_s})) - \sigma(\Omega_d(e^{j\omega T_s}))|, \quad (115)$$

$$e\underline{\sigma}(y, u, w) = |\sigma(\Omega_n(e^{j\omega T_s})) - (\underline{\Omega}_p(e^{j\omega T_s}))|, \quad (116)$$

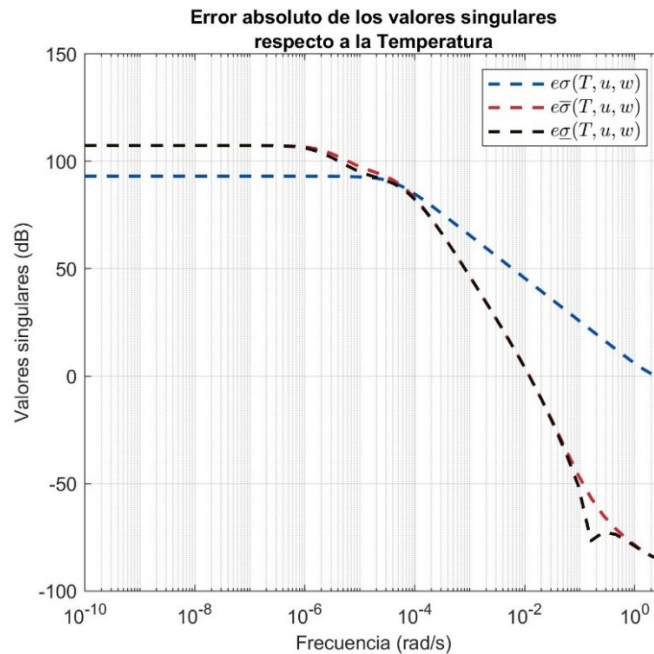
$$e\bar{\sigma}(y, u, w) = |\sigma(\Omega_n(e^{j\omega T_s})) - (\bar{\Omega}_p(e^{j\omega T_s}))|. \quad (117)$$

Por lo tanto, la garantía para que exista estabilidad robusta en el sistema es la siguiente:

$$e\underline{\sigma}(y, u, w) > e\sigma(y, u, w) \text{ y } e\bar{\sigma}(y, u, w) > e\sigma(y, u, w). \quad (118)$$

En la Figura 8 se muestra la gráfica del error absoluto de los valores singulares asociados a la temperatura. Note que  $y = C_p x$ , por lo tanto para el cálculo de la respuesta en frecuencia asociada a la temperatura  $C_p = [1 \ 0]$ . Adicionalmente son considerados los puntos de consigna  $T_{air0} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $H_{air0} = 10 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ ,  $I_{glob0} = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{flr0} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $T_{out0} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ , note que para los puntos de consigna  $I_{glob0}$ ,  $T_{flr0}$  y  $T_{out0}$ , se consideran puntos de consigna extremos, lo que implica los casos con mayor incertidumbre. En la Figura 8, la línea azul representa  $e\sigma(y, u, w)$ , y las líneas roja y negra  $e\underline{\sigma}(y, u, w)$  y  $e\bar{\sigma}(y, u, w)$ , respectivamente. El hecho que las líneas rojas y negras cubran la línea de color azul, implica que el modelo de incertidumbre contiene al modelo de disturbio, para el caso particular de la temperatura por lo menos hasta  $10^{-4} \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ .

Figura 8. Valores singulares asociado a la variable temperatura.



Fuente: Elaboración propia

De este análisis son elegidos  $H_i = [0.9 \ 0.5]^T$ ,  $E_{Fi} = [3.2 \times 10^{-6} \ 8 \times 10^{-6}]$  y  $E_{Gi} = [1 \ 1] \times 10^{-13}$ .

## 2.9 Disturbios asociados al sistema

### 2.9.1 Primer escenario de variables ambientales

Los disturbios hacen parte de las variables que cambian el comportamiento convencional de los sistemas, atenuando, ampliando o desplazando la señal de salida. En la Tabla 18, se muestra los datos de las señales obtenidas de diversas fuentes para definir el comportamiento de los disturbios en un intervalo de 24 horas, es decir, un escenario próximo al real, medido en un día convencional.

Debido a que los datos de las perturbaciones no se pueden extraer de una sola fuente por falta de documentación, se identificaron varios recursos de donde se toman los datos. Este estudio procura identificar la tendencia y el comportamiento de cada variable durante un día, por tanto, se usan los datos del pronóstico del clima del día 11 de septiembre de 2020, desde las 12:01 am hasta las 11:59 pm del mismo día en la ciudad de Bogotá y alrededores, estos datos conservan la misma tendencia para el perímetro urbano donde está ubicado el sistema de cultivo deseado.

Tabla 18. Primer escenario de disturbios intervalo de 24 horas.

Hora del día	Temperatura exterior (°C)	Temperatura del suelo (°C)	Radiación solar (W/m <sup>2</sup> )	Condensación (g/m <sup>2</sup> *s)	Flujo de transpiración (kg/m <sup>2</sup> *s) $\times 10^{-6}$	Humedad Absoluta exterior (g/m <sup>3</sup> )
0	11	13	0.1	0.00582	1.667	10.33
1	10	13	0.1	0.00582	1.528	9.759
2	11	13	0.1	0.00517	1.528	10.23
3	10	13	0.1	0.00459	1.250	9.562
4	10	13	0.1	0.00398	1.111	9.464
5	10	13	2.2	0.00398	1.111	9.464
6	10	13	84.3	0.00459	1.111	9.562
7	11	14	260.6	0.00452	1.667	10.13
8	13	15	446	0	2.778	10.53
9	15	18	601.4	0	2.639	10.89
10	16	19	661.1	0	5.556	10.56
11	17	22	669	0	6.944	10.59
12	17	23	720.2	0	9.722	10.00
13	17	24	690	0	12.50	9.416
14	18	24	549.3	0	13.89	10.13
15	18	25	365	0	13.33	10.13
16	17	25	182.7	0	13.89	9.710
17	16	24	32.9	0	12.78	9.865
18	14	20	0.2	0	13.89	9.294
19	13	17	0.2	0	12.78	9.363
20	12	15	0.1	0	5.556	9.063
21	11	14	0.1	0	2.778	8.873
22	11	13	0.1	0	2.778	9.081
23	10	12	0.1	0.00582	2.500	8.675

Fuente: Elaboración propia

Los datos de temperatura se ven reflejados en la segunda columna, el muestreo es cada hora, la humedad absoluta se determina a partir de la humedad relativa extraída de pronósticos del clima del 11 de septiembre de 2020 (Weather, 2020).

Acorde a lo propuesto por Salazar *et al.* (2016), en donde se plantea un modelo de humedad absoluta dentro de un invernadero semicerrado, se calcula variable mediante el uso de las ecuaciones (119) y (120), en donde se usa una exponencial que en su parámetro incluye la temperatura exterior, con esto se calcula  $x_a^*$ , ecuación (119) que posteriormente será utilizada en el cálculo de  $x_a$  que es la humedad absoluta, ecuación (120), (Salazar-Moreno, López-Cruz, & Cruz, 2018; Salazar-Moreno, Mauricio-Perez, Lopez-Cruz, & Rojano-Aguilar, 2016) Cabe resaltar que las condiciones de temperatura y humedad están dentro de las tendencias reales e información acondicionada a días convencionales para la época del año.

$$x_a^* = 5,5638 * e^{0,0572 * T_a} , \quad (119)$$

$$x_a = \frac{x_a^* RH}{100} . \quad (120)$$

Dada la dificultad para obtener datos recientes, la radiación solar se obtiene para el mes de noviembre del año 2018, datos del mismo mes en un año diferente, se extraen del documento evaluación de la radiación global en Colombia realizado por el IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2019), lo que brinda una alta confiabilidad para los datos regionales que se desean usar en el escenario.

Según empresa J.Huete (2020), empresa dedicada al diseño, fabricación y automatización de invernaderos, la condensación es una variable que se produce cuando el aire al interior de una estructura semicerrada o cerrada se encuentra saturado con partículas de agua en el ambiente y la temperatura exterior desciende, creando un diferencial térmico alto entre la superficie ubicada al interior y el exterior del invernadero, encontradas estas condiciones se genera la condensación de agua sobre la superficie interna de la cubierta. El modelo planteado por Su *et al.* (2017) considera que la condensación  $\Phi_{cond}$  está definida por la ecuación (121), en donde se establece una función por partes. Si la presión de vapor del

aire al interior  $VP_{air}$  en pascales ( $Pa$ ), es menor que la presión de vapor de la cobertura  $VP_{cov}$  en pascales ( $Pa$ ), la función entrega como respuesta el valor cero, y si la presión de vapor del aire  $VP_{air}$  ( $Pa$ ), es mayor que la presión de vapor de la cobertura  $VP_{cov}$  ( $Pa$ ), la función por partes entrega la ecuación asociada al diferencial de presiones en el aire y en la cobertura, multiplicada por el coeficiente de transferencia de calor entre el aire interior y la cobertura  $k_{air\_cov}$  en  $\frac{W}{m^2K}$ , acompañada de una constante, como sigue:

$$\Phi_{cond} = \begin{cases} 0, & VP_{air} < VP_{cov} \\ 6.4 \times 10^{-6} k_{air\_cov} (VP_{air} - VP_{cov}), & VP_{air} \geq VP_{cov} \end{cases} \quad (121)$$

En donde  $VP_{cov}$  se calcula con la ecuación (122) a partir de la temperatura de la cobertura  $T_{cov}$  a la cual se la suma 273.15 para obtener la temperatura absoluta en  $K$ :

$$VP_{cov} = 2.229 \times 10^{-11} e^{-\frac{5385}{T_{cov} + 273.15}} \quad (122)$$

Por otro lado,  $VP_{air}$  puede ser calculado a partir de la humedad absoluta del aire interior determinada previamente y la temperatura del aire, mediante la ecuación (123), las cuales se relacionan con la constante molar del gas  $R = 8314 \frac{J}{Kmol \cdot K}$  y con la masa molar del agua  $M_{H_2O} = 18 \frac{kg}{Kmol}$ , así:

$$VP_{air} = \frac{H_{air} * R * (T_{air} + 273.15)}{M_{H_2O}} \times 10^{-3} \quad (123)$$

Lo datos relacionados con la transpiración se extraen de Koning & Tsafaras (2017), posteriormente se realizan los cambios de unidad de medida acorde a los requerimientos del modelo planteado por Su & Xu (2017).

La revisión bibliográfica, permite obtener información cercana a un escenario real provenientes de diversas fuentes, la cual incluye todos los disturbios para un intervalo de 24 horas, un dato por hora.

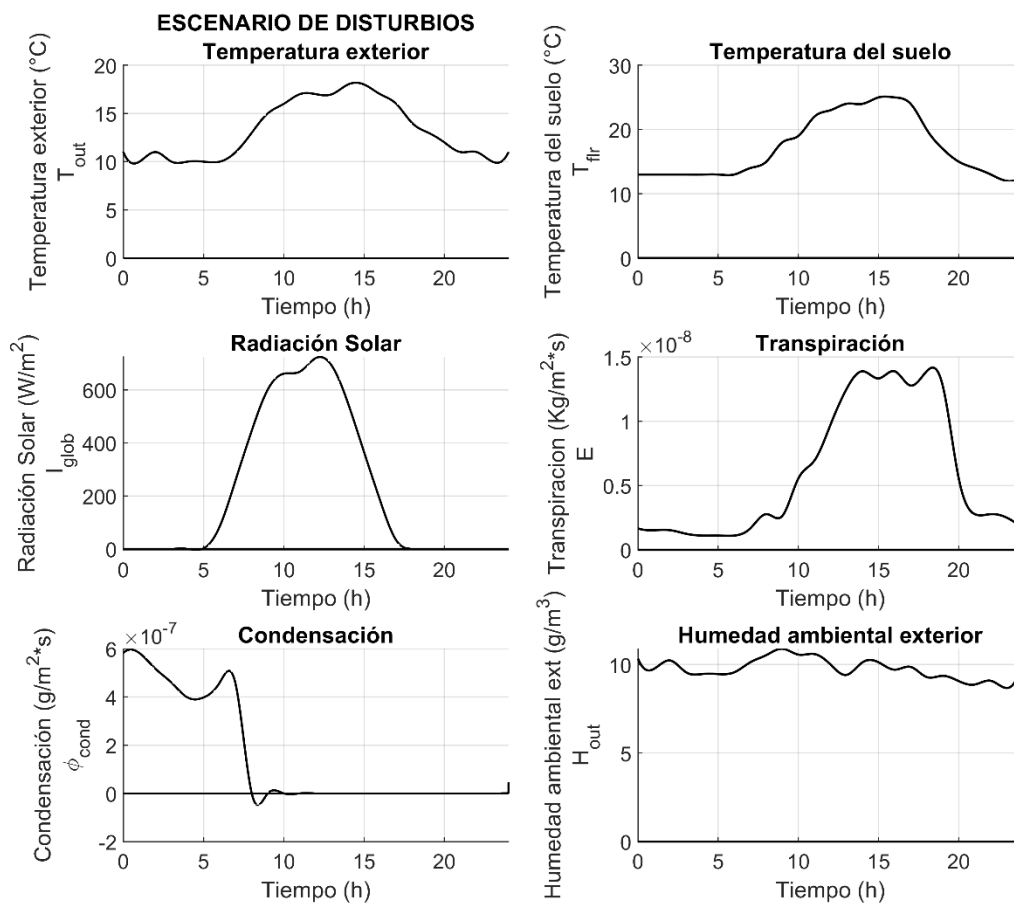
Se ingresan 3600 datos en cada intervalo, mediante la función spline con la ayuda del software Matlab, devuelve un vector de valores interpolados correspondiente a los puntos de consulta, para generar un total de 86400 datos, es decir, la representación en segundos. Los valores permiten definir un escenario de variables asociado a un día convencional, próximos a un escenario real y el comportamiento de la señal ascendente o descendente de acuerdo a las magnitudes de lectura cada hora.

Como resultado se obtiene la señal de la Figura 9. Allí se observa que la radiación solar tiene el pico hacia la 1pm, la temperatura exterior muestra el valor máximo hacia las 2:30pm, lo que permite ver, una diferencia en el tiempo debido a que la temperatura es un variable lenta, es decir, respecto a la radiación, la cantidad de calor se empieza a ver reflejado en la lectura un lapso de tiempo posterior. Las temperatura del suelo hacia las 3:30pm empiezan a subir logrado almacenar un pico máximo de energía en forma de calor posterior a las 3pm, representado alrededor de 24°C.

La humedad es poco variable a través del tiempo, en la noche fuera del invernadero es alta y procura un equilibrio entre el interior y el exterior del sistema, sin embargo, este balance está regulado por la cobertura. Por otro lado, durante el día aumenta la temperatura, aumenta la evaporación de agua del suelo y la transpiración de las plantas por apertura de las estomas, consecuencia de esto, la cantidad de agua en el ambiente se incrementa durante el día bajo la cubierta, los valores más altos de esta variable se presentan entre las 2 pm y las 6 pm, cuando hay más calor almacenado.



Figura 9. Primer escenario señales de disturbios.



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la condensación tiene los valores más altos alrededor de la media noche, decremanta hacia la madrugada, se obtiene un valle sobre las 5 am e incrementado de nuevo hacia las 7 am, la relación está dada por  $VP_{air} \geq VP_{cov}$ , es decir, la presión de vapor del aire  $VP_{air}$ , es mayor que la presión de vapor de la cobertura  $VP_{cov}$ , siendo así, la salida de la ecuación (121) existe.

Es importante resaltar que, los datos iniciales corresponden a lecturas cada 24 horas, vectores de 24 datos y el nuevo arreglo corresponde a valores interpolados con 3600 datos entre una hora y otra, para obtener finalmente, seis vectores cada uno con 86400 datos, es decir, el escenario que corresponde a un día convencional de temperaturas, radiación solar, condensación, transpiración y humedad absoluta ambiental que incluye datos interpolados cada segundo.

## 2.9.2 Segundo escenario de variables ambientales

Los datos de los disturbios para el segundo escenario de prueba que será utilizado en el modelo se muestran Tabla 19, el intervalo de lectura es de 24 horas, un dato por cada hora. La temperatura y radiación solar fueron extraídas de la estación de red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá (RMCAB, 2020), estación para recolección de datos relacionados a contaminantes y el comportamiento de variables meteorológicas que inciden sobre la distribución en la atmosfera, información centralizada que es validada mediante un análisis y evaluación del cumplimiento, la red de monitoreo dispone de trece estaciones de las cuales de toma a información de la estación del tunal.

Por otro lado, el segundo escenario considera la temperatura del suelo a 10 cm de profundidad (IDEAM, 2020a), para el día 20 de septiembre de 2018, la información es considerable, dado que la lectura se realiza durante el mismo mes y específicamente en mismo día que la temperatura y la radiación, sin embargo, en un año diferente. Cabe resaltar que, en el segundo escenario, la temperatura del suelo es constante a través del tiempo debido a que la medición se realiza a 10 cm de profundidad, información que se vuelve relevante porque el sistema radical se encuentra a 10 cm de distancia respecto a la superficie, las temperaturas relacionadas a los dos escenarios son considerables debido a que el invernadero modelo tiene suelo y partes en concreto que puede ejercer un efecto exógeno diferenciado en cada caso. Por otro lado, según Castilla (2007) la temperatura del suelo también podría tener un comportamiento asociado a la evolución de la cantidad de calor en el aire de aspecto sinusoidal y retrasada similar a la mostrada en el primer escenario.

Los datos asociados a la condensación son calculados a partir de la ecuación (121) determinados en el primer escenario mediante de las presiones de vapor al interior y en la cobertura. La tendencia es la misma se presenta mayores niveles de condensación en la madrugada entre la media noche y las ocho de la mañana, a partir de esta hora se vuelve nula la variable. Finalmente, la tendencia de la traspiración es la misma que en el primer escenario, la variable incrementa con la temperatura a través del día y decrementa en la noche y la madrugada, la diferencia es que este dato es para un día donde la magnitud es mayor.

Tabla 19. Segundo escenario de disturbios en un intervalo de 24 horas.

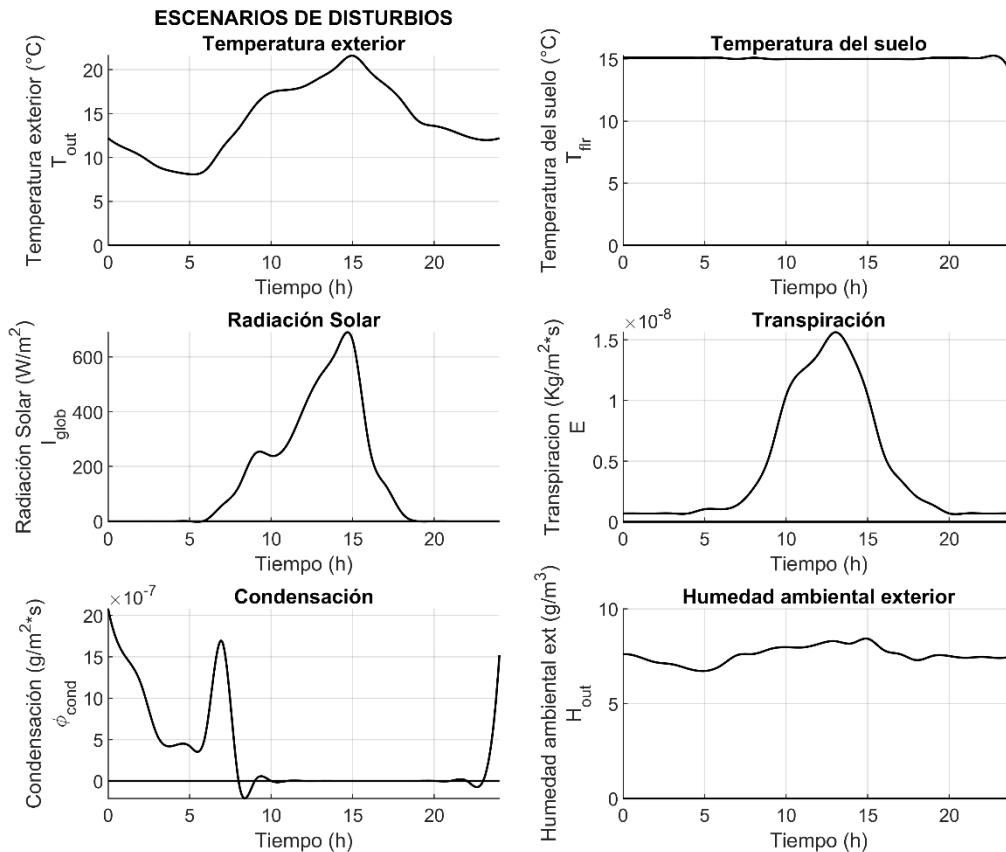
Hora del día	Temperatura exterior (°C)	Temperatura del suelo (°C)	Radiación solar (W/m2)	Condensación (g/m2*s)	Flujo de transpiración (kg/m2*s) $\times 10^{-6}$	Humedad Absoluta exterior (g/m3)
0	12,2	15.1	0	0.0208	0.694	7.602
1	11.1	15.1	0	0.0152	0.694	7.453
2	10.2	15.1	0	0.0118	0.694	7.179
3	9	15.1	0	0.00556	0.694	7.075
4	8.4	15.1	0	0.00425	0.694	6.836
5	8.1	15.1	0	0.0042	1.04	6.720
6	8.6	15.1	5	0.0059	1.04	7.006
7	11.1	15	59	0.0168	1.39	7.558
8	13.3	15.1	125	0	2.78	7.619
9	15.9	15	246	0	5.56	7.874
10	17.4	15	239	0	10.4	7.977
11	17.7	15	282	0	12.5	7.962
12	18.1	15	413	0	13.9	8.147
13	19.1	15	530	0	15.6	8.295
14	20.3	15	621	0	13.9	8.173
15	21.6	15	660	0	10.4	8.421
16	19.9	15	279	0	5.56	7.815
17	18.3	15	133	0	3.47	7.607
18	16.5	15	32	0	2.08	7.291
19	14.2	15.1	0	0	1.39	7.520
20	13.6	15.1	0	0	0.694	7.509
21	13.1	15.1	0	0	0.694	7.415
22	12.4	15.1	0	0	0.694	7.463
23	12	15.2	0	0.0208	0.694	7.405

Fuente: Elaboración propia

La Figura 10, muestra las señales asociadas a un segundo escenario, el pico de radiación es a las 3 pm con  $660 \frac{W}{m^2}$ , mientras que en el primer escenario la radiación es de  $720 \frac{W}{m^2}$  hacia el mediodía, la temperatura muestra un dato mínimo de  $8.1^\circ\text{C}$  a las 5 am y un pico de  $21^\circ\text{C}$  a las 3 pm, dentro de este rango se encuentran los demás valores, la temperatura del suelo se toma a 10 cm de profundidad lo que genera como resultado un valor constante a través del tiempo alrededor de  $15^\circ\text{C}$ . La humedad ambiental exterior no presenta variaciones significativas se encuentra entre  $6 \frac{g}{m^3}$  y  $8 \frac{g}{m^3}$ , la mayor transpiración se presenta

a la 1 pm, momento en el cual la radiación y la temperatura almacenada está cerca de los picos altos.

Figura 10. Segundo escenario señales de disturbios.



Fuente: Elaboración propia

La condensación tiene un comportamiento similar a la del primer escenario, en donde decreta entre la media noche y las 3 am, se mantiene en un valle y empieza a incrementar a las 6 am hasta obtener el pico de condensación a las 7 am, en donde las diferenciales de presión de vapor cumplen la condición  $VP_{air} \geq VP_{cov}$ , dado el aumento de la radiación solar y la temperatura la condensación decreta hasta las 9am, finalmente, se mantiene en cero el resto del día, hasta las 10 pm donde empieza a incrementar de nuevo.

A partir del estudio de los datos de concluye que las variables climáticas en un día convencional se ven afectadas por diferentes factores ambientales. Días opacos afectan

la incidencia de radiación solar, altos niveles de pluviosidad pueden llegar a afectar las condiciones de humedad, estas situaciones particulares cambian el clima local. La nubosidad impiden que la radiación solar llegue a la superficie de la tierra y como consecuencia la acumulación de calor en invernaderos, por otro lado, las cantidades de agua en el ambiente externo al invernadero afectan el diferencial de presión de vapor y por tanto la condensación, igualmente, consecuencia de los dos factores, la transpiración puede cambiar, por tanto, se concluye que un escenario puede ser muy cambiante y considerar valores altos y bajos de las variables en el mismo lugar, siendo así, los disturbios identificados pueden ser susceptible de estudio siempre que esté dentro de los rango de trabajo convencionales de la variables, dado que las condiciones climáticas depende de muchos factores no se puede establecer una regla general para predecir el comportamiento del clima, pero si se puede determinar una tendencia en particular.

## 2.10 Resultados sobre la simulación del modelo del sistema dinámico

La simulación en lazo abierto busca identificar que el comportamiento de la planta, entendiéndose ésta como el modelo utilizado, esté dentro de rangos coherentes, se pretende ingresar los disturbios para determinar la tendencia de los datos ambientales, a través de un segundo escenario. El modelo en lazo abierto deja ver el comportamiento del sistema en ausencia de entradas, la Figura 11 muestra inactivos los sistemas de flujo de calor y flujo de humedad representado en el sistema de aspersión.

La primera gráfica  $T. int$  hace referencia a la temperatura del aire al interior del invernadero,  $H. int$  es la humedad absoluta al interior del invernadero, los actuadores son de flujo de calor y de humedad.  $T. suelo$  es la temperatura del suelo al interior del invernadero,  $T. ext$  es la temperatura al exterior del invernadero,  $R. solar$  es la radiación solar exterior,  $Transp$  es la transpiración estimada de un cultivo,  $cond$  es la condensación que se presenta en horas de la mañana y  $H. ext$  es la humedad ambiental absoluta el exterior del invernadero.

En general, se visualiza el comportamiento de las salidas en ausencia de entradas controladas y en presencia de diversos disturbios que afectan el sistema, no se dispone

de lazo de realimentación, ni se ejerce ningún tipo de control diferente a las variables que afectan el sistema.

El comportamiento de la radiación solar se observa durante un día convencional, como consecuencia de esto, se incrementa la temperatura exterior, por efecto invernadero aumenta el calor al interior de la estructura, la temperatura del suelo se incrementa y alcanza una magnitud mayor que la del aire por su capacitancia, ya que funciona como un elemento almacenador, esto es función también del tipo de suelo.

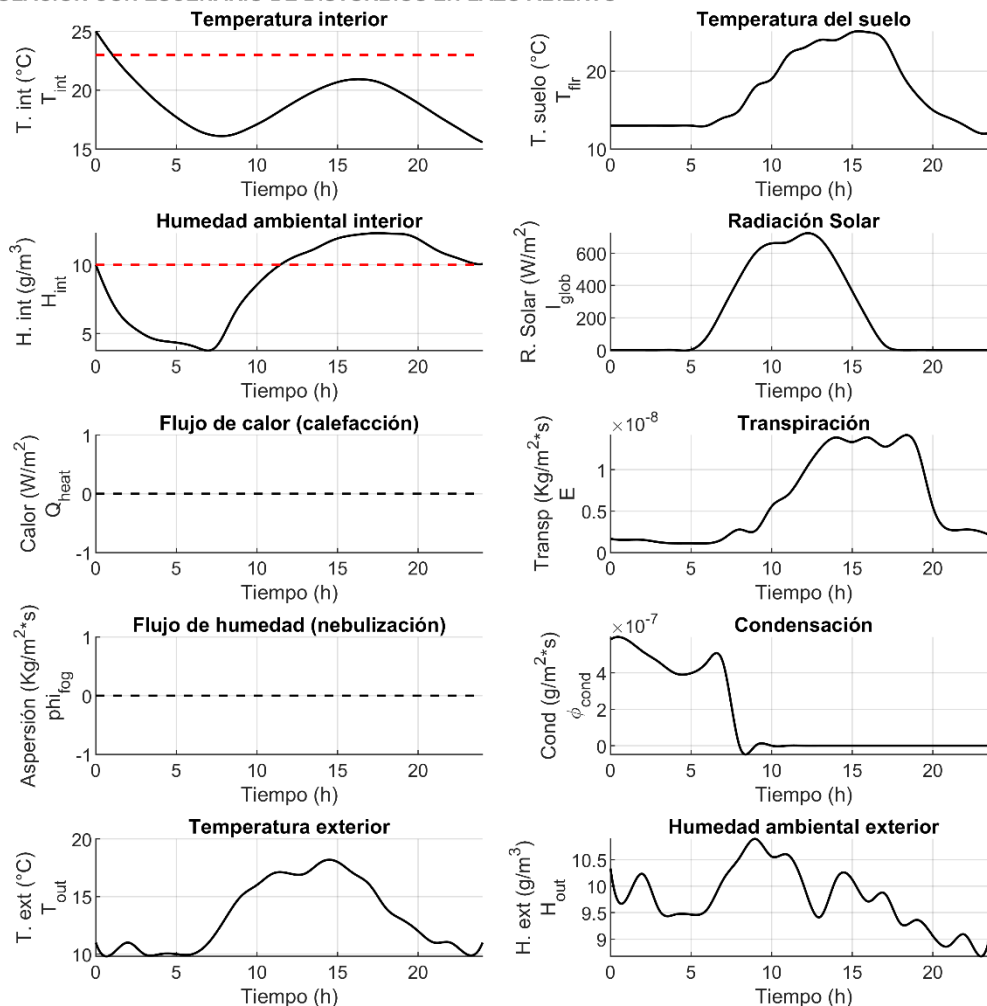
Debido al aumento de la radiación solar y el consecuente aumento de la temperatura al interior de la cubierta, se presenta la apertura de los estomas favoreciendo la pérdida de humedad producto de la absorción de agua por medio de la raíces, pérdida que se presenta a través del dosel de cultivo, en otras palabras la transpiración aumenta en función de la apertura de los estomas, la interacción de estas variables en un entorno determinado afectan la humedad al interior debido a la acumulación de masa de agua por unidad de volumen.

El primer escenario de disturbios muestra que la temperatura interior depende del comportamiento de las variables ambientales externas, se puede ver un efecto de la radiación solar y la temperatura exterior, igualmente la temperatura del aire se verá afectada por la cantidad de calor que almacena el suelo a través del día, el cual es disipado cuando la temperatura empieza a decrementar, por otro lado, la humedad interior se ve afectada por la humedad exterior, la condensación y la transpiración.

Todas las variables están relacionadas, consecuencia del cambio en una se generan diferentes comportamientos en las variables de estado y en los mismos disturbios, siendo así, las no linealidades existen y se deben tener en cuenta al controlar el sistema.

Figura 11. Comportamiento del modelo en lazo abierto primer escenario.

## SIMULACIÓN CON ESCENARIO DE DISTURBIOS EN LAZO ABIERTO



Fuente: Elaboración propia

Las variables de estado parten de un punto deseado sobre el cual debería mantenerse el sistema, sin embargo, en ausencia de entradas actuadas, y frente a la ausencia de disturbios como la radiación solar y la temperatura, las salidas deseadas decremantan en la madrugada logrando un valle alrededor de 15°C, a partir de las 8 am empieza a aumentar la radiación solar, la cual inyecta energía al sistema para calentar el invernadero, siendo el punto deseado 22°C y llegando hasta 20°C, lo que está relacionado con la temperatura exterior. Cabe resaltar que se presenta un desfase en los picos de radiación solar, temperatura exterior y temperatura interior que es consistente dentro del sistema dado que la variable temperatura interior es lenta respecto a los cambios externos.

Para el caso de la humedad igualmente decrementa durante la madrugada por ausencia de actuador, pero se regula con la transformación de humedad en agua mediante condensación. Aumenta la concentración de partículas de agua en el aire con el ascenso de la humedad relativa y con el ascenso de la temperatura en la mañana, a tal punto que la humedad excede el valor deseado, es decir, sobrepasa los  $10 \frac{g}{m^3}$  o en otras palabras el 70% de humedad relativa a las condiciones dada por los disturbios.

### **2.10.1 Descripción de la familia de disturbios**

Se implementan dos escenarios con características diferenciadas en un intervalo de 24 horas, es decir un día, con el fin de obtener datos iniciales y finales del comportamiento de las variables los escenarios se extienden a 48 horas, dos días. Las variables de disturbios que se generan están relacionadas con la radiación solar que afecta directamente temperatura exterior, la temperatura del suelo a nivel del cultivo, la transpiración, condensación y humedad ambiental exterior.

Para generar diversos escenarios de prueba relacionados con las variables ambientales, se implementa un algoritmo para hacer una variación de los disturbios, se parte de la señal original y en cada iteración se realiza un incremento, esta familia de disturbios, permite analizar las variables en un rango amplio de trabajo, se identifica el comportamiento de las salidas respecto a diversos efectos de las señales externas que afectan el sistema.

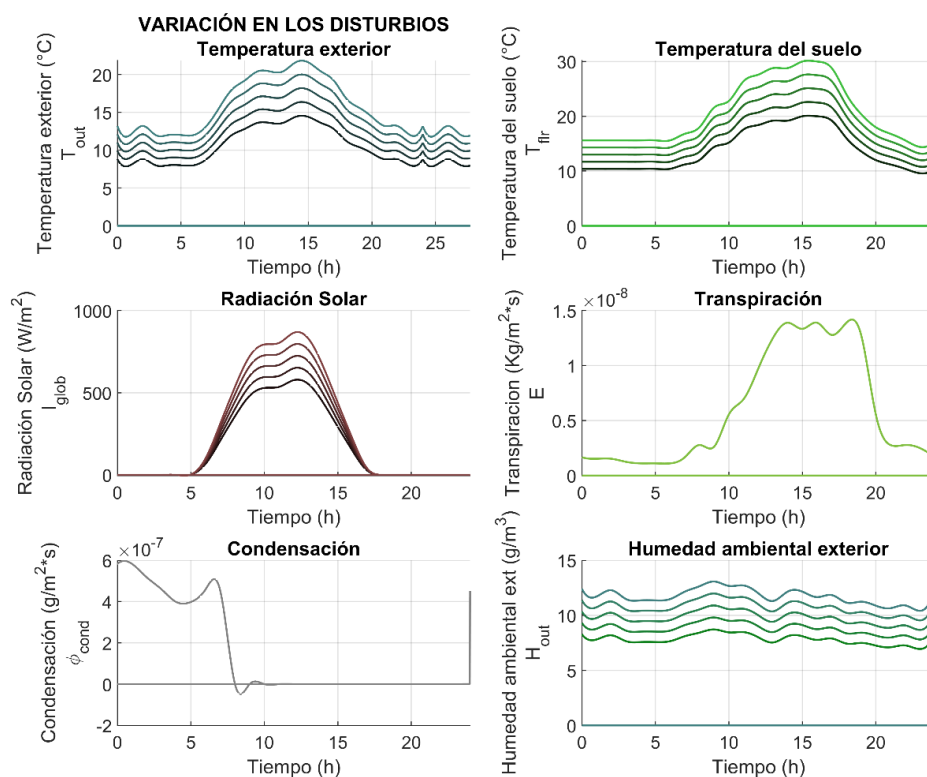
Las variables climáticas que afectan un cultivo en periodos diarios generan dinámicas diferentes en el sistema invernadero, es poco usual que un día sea idéntico a otro en relación a la magnitud de las variables o el comportamiento en particular. Esto debido a que las condiciones físicas de los entornos agrícolas son diferentes. Se puede afirmar, que las personas tienen efectos sobre estas condiciones locales, especialmente sobre las variables que están dentro del dominio de las personas, un cambio mínimo puede hacer que el microclima dentro del sistema invernadero se vea afectado, esto genera un resultado distinto sobre las variables de estado través del tiempo. Inclusive, sí los factores



externos al invernadero, como la radiación solar, temperatura y humedad exterior fuesen iguales en periodos de tiempo, los efectos exógenos aleatorios hacen que estos sistemas se comporten diferente.

Por tanto, es factible simular una familia de disturbios, los cuales pueden representar un día bajo condiciones diferentes, la Figura 12 muestra una familia de disturbios para el primer escenario. Al conjunto de datos iniciales, se le generan dos señales nuevas de magnitud inferior, pero con el mismo comportamiento, es decir, el 10% y el 20% por debajo y dos señales con el 10% y 20% por encima de la señal del escenario inicial, la cual, incluye los datos producto de la búsqueda de información, la familia de disturbio deja ver la misma tendencia de la señal inicial y permite analizar el comportamiento cuando las condiciones ambientales son más cálidas o más frías que el día analizado inicialmente.

Figura 12. Familia de disturbio primer escenario.



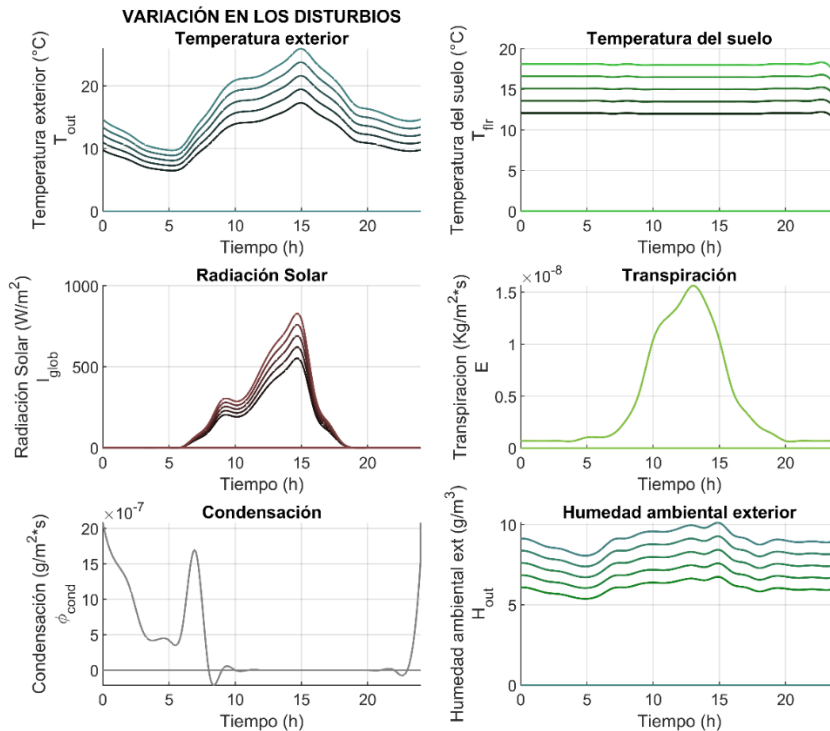
Fuente: Elaboración propia

Para verificar el comportamiento ante diferentes magnitudes del segundo escenario de pruebas, se implementa una familia de disturbios igual que en el primer escenario, la Figura

13 muestra un conjunto de disturbios asociados a radiación solar, temperatura exterior, temperatura del suelo, humedad absoluta exterior y variables asociadas a la humedad interior como la condensación y transpiración. Cada una, muestra un conjunto de variaciones del 10% y 20% por encima y por debajo de escenario inicial, esto con el fin ampliar el rango de estudio de las señales y los posibles efectos sobre las variables de estado al incrementar o decrementar la magnitud de la señal de disturbios para simular días más soleados y días más fríos.

Diferencias significativas entre la familias de disturbios del primer escenario y el segundo, están relacionadas con los pico de temperatura, en el primer escenario es de 23°C y para el segundo 26°C, la transpiración en el primer escenario es más prologada durante el día que en el segundo caso, se presenta un pico a la hora más soleada, en el primer escenario la temperatura el suelo es variables a través de día, logrando un valor máximo de 30°C para un suelo en concreto y contrastante para el segundo escenario, la temperatura es de máximo 18°C a 10 cm de profundidad.

Figura 13. Familia de disturbio segundo escenario.



Fuente: Elaboración propia

## Capítulo 3

### 3. Diseño y resultados de la simulación del control de Temperatura a partir de los reguladores óptimo y robusto

#### 3.1 Diseño del LQR para el sistema con disturbios

Las matrices implementadas en la simulación que se relacionan con el LQR, se muestran desde las ecuaciones (126) a (130), en donde,  $F$  es la matriz de transición de estados,  $G_{LQR}$  es la matriz de entrada que incluyen los parámetros nominales del sistema como sigue:

De acuerdo a lo anterior considere el siguiente modelo:

$$x_{k+1} = Fx_k + Gu_k \quad (124)$$

$$r_k = [T_{d_{air}}, H_{d_{air}}]^T, \quad u = Kx_k + K_r ref_k \quad (125)$$

$ref_k$ , es la referencia de temperatura y de humedad del aire en el invernadero,  $u$  es la acción de control, cuya ley de control es definida por el vector de realimentación de estados  $K_{LQR}$  y la ganancia de pre compensación  $K_r$ .

$$F = \begin{bmatrix} 0.9999 & 0 \\ 0 & 0.9998 \end{bmatrix} \quad (126)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0.000005542351840 & -0.007097937493115 \\ 0 & 30.364754901960787 \end{bmatrix} \quad (127)$$

$Q_{LQR}$  y  $R_{LQR}$  son las matrices de ponderación del controlador que permiten obtener los tiempos de estado estacionario deseados en el sistema. En condiciones nominales el LQR brinda una respuesta óptima del sistema y garantiza estabilidad nominal. Es necesario tener en cuenta algunos criterios, como el conocimiento del modelo de la planta, y que las matrices de ponderación sean definidas positivas. Para determinar el vector de realimentación de estados la matriz  $R_{LQR}$  es elegida como identidad para garantizar que todas las variables de control ejerzan la misma influencia (Poveda & Martínez, 2016) y la matriz  $Q_{LQR}$  se encontró de forma empírica mediante simulación.

$$Q_{LQR} = \begin{bmatrix} 1 \times 10^5 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (128)$$

$$R_{LQR} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (129)$$

Matriz de control  $K_{LQR}$  y la matriz de pre compensación  $K_{ref}$  se muestran como sigue:

$$K_{LQR} = - \begin{bmatrix} 307.469 & 0.0718 \\ -0.79 & 0.0327 \end{bmatrix}, K_{ref} \begin{bmatrix} 315.1289 & 0.0764 \\ -0.7907 & 0.0327 \end{bmatrix} \quad (130)$$

### 3.2 Resultados del LQR para el sistema con disturbios

El control LQR se implementa para el primer y segundo escenario, en cada contexto ambiental se relacionan posibles variaciones en los disturbios, se cuantifica un 10% y 20%

de variación inferior y un 10% y 20% y por encima de la señal que se usa como referente. Siendo así, las señales de disturbio se ingresan al controlador y se determina el efecto sobre las variables de estado temperatura y humedad, igualmente se identifica la necesidad de accionamiento o no de los actuadores

### 3.2.1 LQR primer y segundo escenario

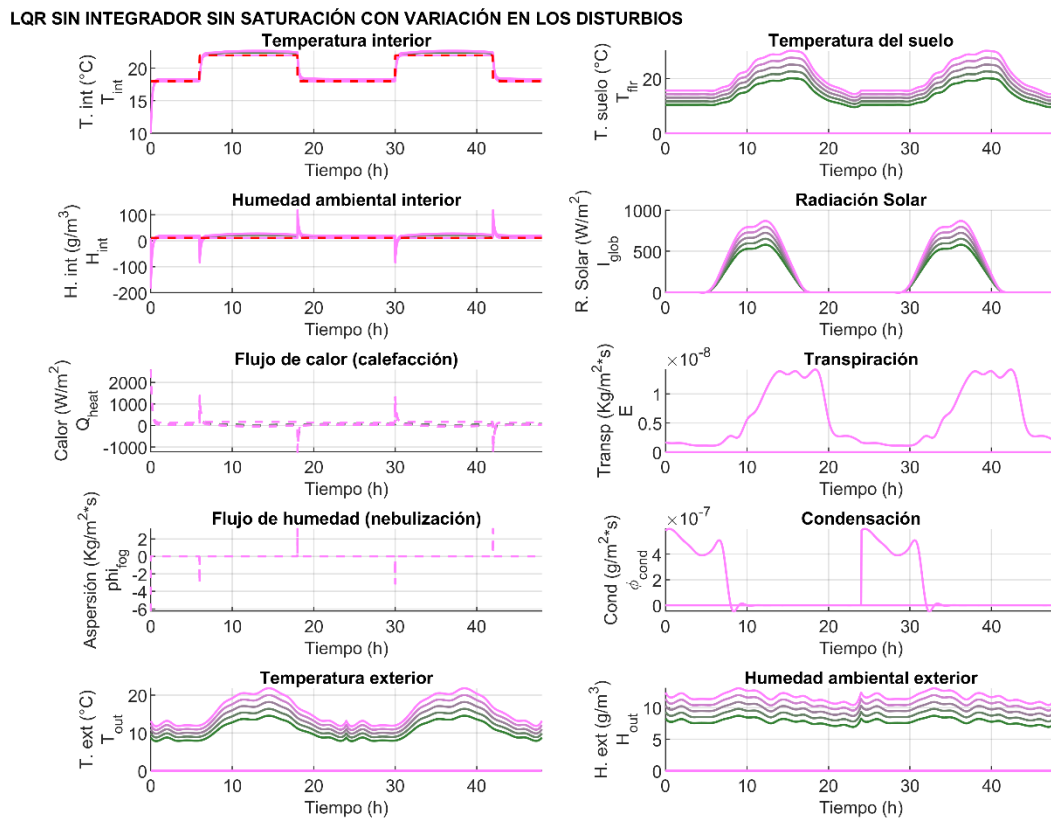
Se trabaja con diez experimentos, cinco para cada escenario, dos superiores al escenario inicial y dos inferiores, como se mencionó previamente. Se establece un punto de trabajo para el cual las condiciones bajo cubierta son nominales. El LQR tiene una referencia para la temperatura, entre 18°C y 22°C y para la humedad absoluta de  $11 \frac{g}{m^3}$ , los dos puntos deseados se establecen basados en las condiciones promedio para diversos tipos de cultivos altamente susceptible a cambios de condiciones ambientales.

El sistema con la implementación del control LQR se muestra en la Figura 14, la referencia para la temperatura oscila entre 18°C en la noche y 22°C en el día y la referencia de la humedad debe ser constante en  $11 \frac{g}{m^3}$ , la línea pinteada define la referencia. Parte con valor inicial de 10°C a la media noche, asciende hasta la temperatura de referencia 18°C con un sobre impulso de 0.3°C, es decir, un error del 1,6%, que no logra regular y controlar, por lo tanto, este error se mantiene en estado estacionario. En promedio el sistema logra la temperatura de referencia en 30 minutos. Al cambiar la referencia a 22°C en horas de la mañana, la temperatura empieza a ascender y cruza por la referencia en 24 minutos, sin embargo, el sistema permanece con un error de estado estacionario de 2.7%, es decir, el sistema no logra establecerse en la referencia.

El flujo de calor para aumentar la temperatura del sistema en 4°C, es decir, de 18°C a 22°C es de  $1385 \frac{W}{m^2}$ . Para mantener la temperatura en este último valor, se inyecta constantemente  $43 \frac{W}{m^2}$ , esto hace que el sistema incurra en un error de estado estacionario, en donde, entre menor sea la cantidad de calor inyectada por el sistema de calefacción mayor es el error con respecto al valor deseado de la temperatura.

Por otro lado, la humedad no logra establecerse en la referencia  $11 \frac{g}{m^3}$ , (Figura 14 línea roja punteada) para el mejor de los casos se establece en  $16 \frac{g}{m^3}$ , cuando los disturbios tienen más efecto sobre el sistema, se establece en  $19 \frac{g}{m^3}$ . En función de las perturbaciones y el efecto sobre las variables de estado, se incurre en un error de estado estacionario entre 45% el 72% por encima de la referencia dependiendo del disturbio ocasionado. Adicionalmente la humedad presenta una particularidad relacionadas con el actuador de flujo.

Figura 14. LQR sin integrador sin saturación primer escenario.



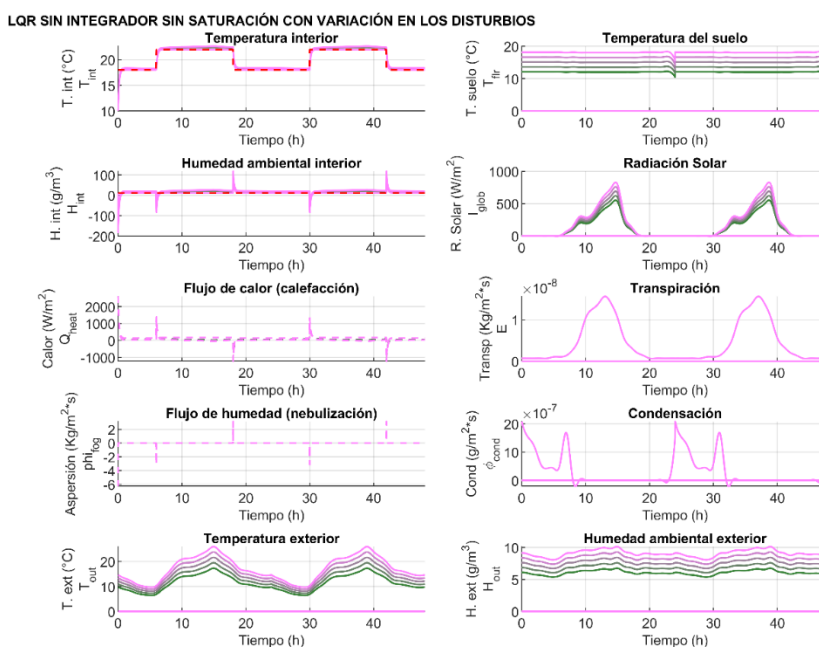
Fuente: Elaboración propia

El aspersor está en capacidad de inyectar humedad al sistema mediante irrigación por nebulización, sin embargo, no hay actuador para extracción de humedad, existen ventanas que permite reducir la concentración de humedad debido al diferencial de presión de vapor, pero no es una condición que este dentro de las posibilidades de la acción de control. En

el caso en que la humedad esta fuera del dominio del actuador, se implementa un saturador para representar de mejor manera el actuador.

El segundo escenario de disturbios implementado sobre el sistema de control, se puede ver en la Figura 15. En donde, se presentan las mismas particularidades del primer escenario, un error de estado estacionario diferente de cero, la señal no se establece en el valor deseado en la noche  $18^{\circ}\text{C}$ , ni en el día sobre  $22^{\circ}\text{C}$ . Adicionalmente, al sistema de aspersión se le demanda aplicación de aspersión de magnitud positiva, es decir irrigación, la cual está dentro de los rangos posibles. Sin embargo, se presentan picos negativos de aspersión, situación que no está dentro de los rangos de trabajo del actuador, ya que el sistema no está en capacidad de extraer masa de agua por unidad de área y por unidad de tiempo.

Figura 15. LQR sin integrador sin saturación segundo escenario.



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el sistema sin integrador y sin saturación en los dos escenarios muestran dinámicas similares respecto a las variables de estado, el control LQR sigue la referencia establecida de la temperatura en  $18^{\circ}\text{C}$  y  $22^{\circ}\text{C}$  y la humedad absoluta en  $10 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ , no obstante, presenta error de estado estacionario para las dos variables de estado y el actuador de

aspersión presenta una dinámica que esta fuera del dominio físico de la acción de control. Con el fin de realizar una simulación más cercana a la realidad se deberá implementar un saturador, que restringe las magnitudes que no está dentro del rango de trabajo del actuador de aspersión.

### 3.3 El problema de la saturación

En los sistemas que involucran recortes en la señal de salida de los actuadores, se genera saturación, esta puede llegar a presentar efectos negativos y deterioro de la estabilidad de los sistemas. Según Rios & Garcia (2004), la mayoría de los procesos industriales controlados presentan problema de saturación del actuador, a la restricción se le denomina el problema del control acotado. En donde, la entrada de la planta conserva una diferencia con respecto a la salida, siendo así, los estados del controlador serán actualizados (Kathore, Campo, Morari, & Nett, 1994; Morari, 1993), la diferencia entre la entrada de control y los estados internos, genera un efecto denominado rebote, están relacionados con sobre disparos e inestabilidad (Campo & Morari, 1990; Morari, 1993). Si el controlador es estable y la degradación es pronunciada, con una dinámica lenta, la situación puede agravarse.

### 3.4 Diseño del LQR con integrador con saturación

Las matrices implementadas en la simulación que se relacionan con la acción integral dentro del LQR, se muestran desde las ecuaciones (133) a (137), en donde,  $F$  es la matriz de transición de estados, la cual ha sido aumentada para incluir la acción integral de la temperatura y la humedad,  $G$  es la matriz de entrada.

De acuerdo a lo anterior considere el siguiente modelo que incluye la acción integral:

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ xint_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & 0 \\ -I & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ xint_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} T_s r_k, \quad (131)$$



$$r_k = [T_{d_{air}}, H_{d_{air}}]^T, \quad u = K_{LQR} x_k \quad (132)$$

$r_k$ , es la referencia de temperatura y de humedad del aire en el invernadero y  $u$  es la acción de control, cuya ley de control es definida por el vector de realimentación de estados.

$$F = \begin{bmatrix} 0.9999 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9998 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (133)$$

$$G = \begin{bmatrix} 5.54 \times 10^{-6} & -0.007097 \\ 0 & 30.3647 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (134)$$

$Q_{LQR_i}$  y  $R_{LQR_i}$  son las matrices definidas positivas, determinadas empíricamente para seleccionar tiempos de respuesta adecuados.

$$Q_{LQR_i} = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (135)$$

$$R_{LQR_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (136)$$

El vector de realimentación de estados  $K_{LQR_i}$  que incluye el integrador del sistema se muestra como sigue:

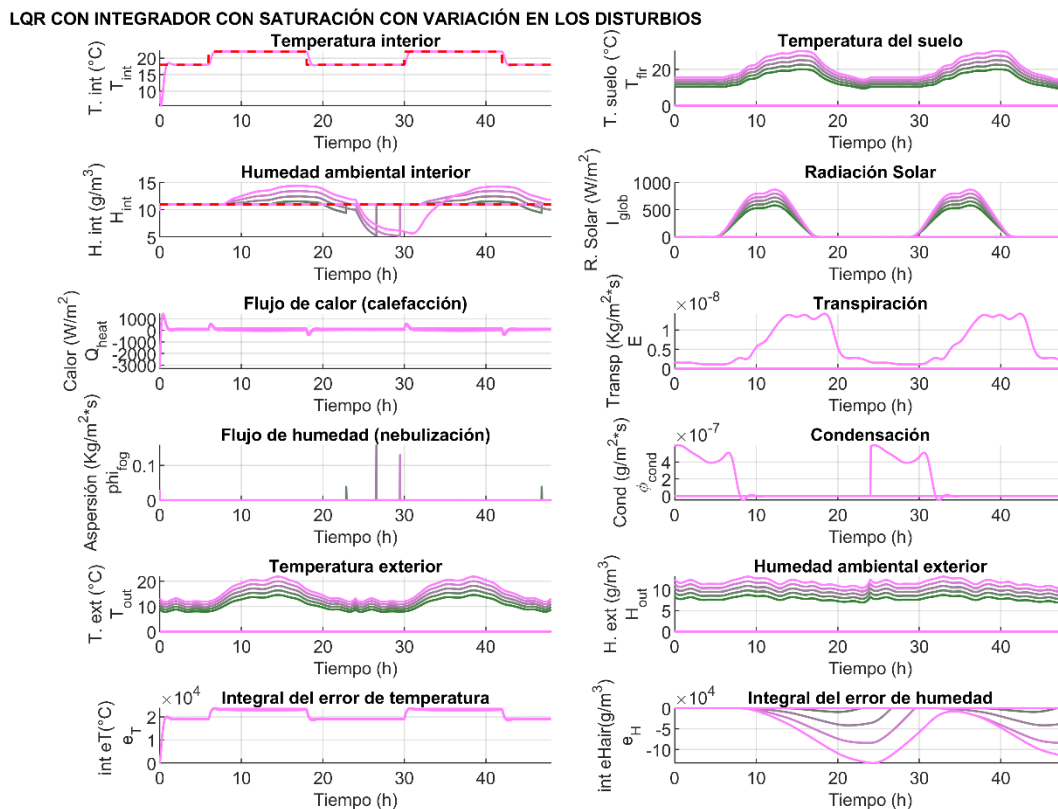
$$K_{LQR_i} = - \begin{bmatrix} 330.23 & 0.0077 & -0.03159 & -0.0000788 \\ -0.000256 & 0.06211 & 0.0000073 & -0.02947 \end{bmatrix} \quad (137)$$

### **3.5 Resultados LQR con integrador y con saturación primer y segundo escenario**

Se establecen cinco experimentos por cada escenario a partir de las variaciones establecidas previamente. Con el fin de corregir el error de estado estacionario se implementa un integrador, para el cual, se extrae la diferencia entre la salida del sistema y la señal de referencia, esta diferencia, se relaciona con la integral que permiten corregir el error de estado estacionario, la Figura 16 deja ver que, para el modelo de invernadero estudiado, la temperatura iguala al valor de referencia, tanto en la noche a 18°C como en el día a 22°C.

Para el problema de la humedad se implementa un saturador, si la señal de salida del actuador de flujo es negativa, se asigna cero a todo el rango que este por fuera de esta condición. La saturación, genera un comportamiento diferente sobre la variable de estado humedad. Igualmente, dentro algunos intervalos de tiempo de la simulación la variable es corregida de manera precisa, con error igual a cero, sin embargo, se presenta intervalos que no se pueden controlar con acciones de actuadores, es el caso de la humedad cuando está por encima de la referencia, ya que no se tienen deshumidificadores considerados en el modelo para bajar la humedad, la cual, baja por acción de la evaporación, ventilación natural del sistema y el efecto de los disturbios, caso contrario cuando la humedad está por debajo de la referencia en donde se puede activar los nebulizadores para aplicación de agua al sistema.

Figura 16. LQR con integrador con saturación primer escenario.



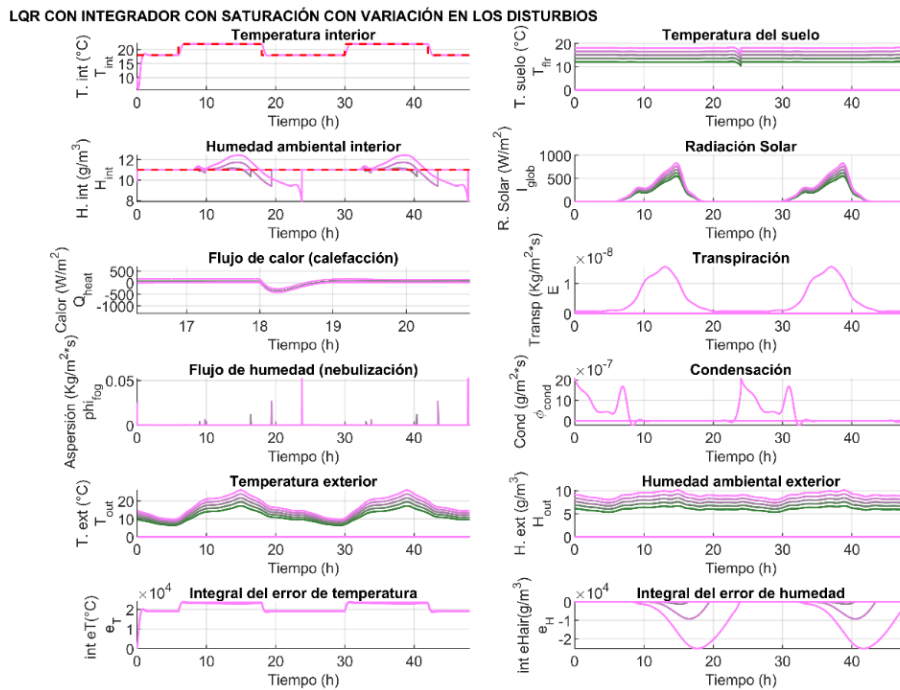
Fuente: Elaboración propia

Es importante resaltar que el valor máximo de la humedad es de  $14.3 \frac{g}{m^3}$  entre las 8am cuando empieza a aumentar la temperatura y la media noche cuando está decreciendo la diferencia, esto debido al aumento de temperatura en el día acompañado de la evaporación, y en la noche cuando la temperatura de referencia es más baja y se presenta condensación del vapor de agua dentro del sistema, el valor mínimo es de  $5.29 \frac{g}{m^3}$ . La deficiencia de humedad se corrige con la aplicación de un flujo de aspersión alto, cerca de  $0.15 \frac{kg}{m^2s}$  para el caso donde la diferencia entre la señal de referencia y el error es de gran magnitud, en otros casos es  $0.13 \frac{kg}{m^2s}$  y  $0.03 \frac{kg}{m^2s}$ , valor de aspersión que depende del disturbio.

La Figura 17 muestra el comportamiento para las variables de estado asociadas al segundo escenario, las condiciones de humedad absoluta del ambiente son afectadas por los disturbios, sin embargo, el control realiza una corrección de error de estado estacionario,

aproximando a cero en la zona de control, para los intervalos donde no hay acción de control dentro del rango de trabajo de las variables, no se reduce la humedad porque se vería afectada la temperatura, se deja incrementar la variable de interés, obteniéndose picos cerca de  $13 \frac{g}{m^3}$ , la mejora en este sistema está relacionada con los intervalos de estabilidad y la reducción de los errores respecto a la referencia impuesta para el sistema.

Figura 17. LQR con integrador con saturación segundo escenario.



Fuente: Elaboración propia

Los picos inferiores están cerca de  $8 \frac{g}{m^3}$ , lo que lleva a concluir es que este último escenario presenta mejor desempeño en relación a la variable temperatura y hace que el sistema incurra en menos errores, igualmente, el error de estado estacionario de la temperatura se corrige, obteniéndose un seguimiento de la referencia acorde a lo estimado entre el día y la noche.

La Tabla 20 y la Tabla 21 muestra el tiempo de subida  $t_s$ , tiempo de pico del sistema  $t_p$ , tiempo de establecimiento  $t_e$ , para las tres variables en horas (h), el sobre impulso máximo  $M_p$  en  $^{\circ}C$  para la temperatura y  $\frac{g}{m^3}$  para la humedad, error de estado estacionario  $E_{ss}$  en

$^{\circ}\text{C}$  y el error de humedad superior e inferior en  $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ , determinado por la diferencia entre *ref* y *Hint*, en donde *ref* es la referencia y *Hint* es la humedad interior del invernadero.

Tabla 20. Temperatura del aire interior primer y segundo escenario.

	$t_s$ [h]	$t_p$ [h]	$t_e$ [h]	$M_p$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$e_{ssT}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
<b>LQR-E1</b>	0.84889	1.0808	2.0883	0.5354	0
<b>LQR-E2</b>	0.8505	1.0742	1.7944	0.5354	0

Fuente: Elaboración propia

El primer y segundo escenario tienen tiempos de subida inferiores a la hora, en relación a los tiempos de establecimiento se identifica que para el segundo escenario es más rápido en relación al tiempo de establecimiento, no se presenta error de estado estacionario, lo que demuestra estabilidad frente a las diferentes magnitudes de los disturbios.

Tabla 21. Humedad absoluta interior primer y segundo escenario.

<b>Control</b>	$t_s$ [h]	$t_p$ [h]	$t_e$ [h]	$M_p$ [ $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ ]	$e_{ssH-sup}$ [ $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ ]	$e_{ssH-inf}$ [ $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ ]
<b>LQR-E1</b>	0.069	0	0.069	0	-6.2	5.3126
<b>LQR-E2</b>	0.075	0	0.075	0	-1.4282	3.1201

Fuente: Elaboración propia

La humedad interior en el ambiente incrementa mediante la inyección de agua del sistema de nebulización, logra subir a la referencia en aproximadamente cuatro minutos, el control de ascenso se realiza mediante actuador, sin embargo, el descenso se lo determina el efecto de medio ambiente, el sistema se establece en la referencia sin sobre impulso, pero presenta errores altos en estado estacionario, para el primer escenario se presentan picos de grandes magnitudes por encima de la referencia y por debajo, lo que demuestra el efecto del cambio del escenario de disturbios, sin dejar de estar dentro de los rangos de rango de control.

### 3.6 Diseño del RLQR para el sistema con disturbios

Las matrices implementadas en la simulación que se relacionan con la acción del RLQR, se muestran desde las ecuaciones (138) a (145), en donde,  $F$  es la matriz asociada a las variables de estado extendida por la acción integral,  $G$  es la matriz de entrada, los parámetros de esta matrices son definidos de la misma forma que en la sección 3.4.

$$F = \begin{bmatrix} 0.9999 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9998 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (138)$$

$$G = \begin{bmatrix} 5.54 \times 10^{-6} & -0.007097 \\ 0 & 30.3647 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (139)$$

$Q_{RLQR}$  y  $R_{RLQR}$  son las matrices de ponderación, note que son definidas de forma idéntica que en la sección 3.4

$$Q_{RLQR} = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (140)$$

$$R_{RLQR} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (141)$$

$$H_{RLQR} = [0.9 \ 0.5 \ 1 \ 1]^T \quad (142)$$

Las matrices de incertidumbres ya fueron definidas en la sección 2.8, a partir de un análisis similar al mostrado en esa sección la matriz  $E_{fRLQR}$  ha sido aumentada para tener dimensiones apropiadas,

$$E_{fRLQR} = [3.2 \times 10^{-6} \quad 8 \times 10^{-6} \quad 8 \times 10^{-11} \quad 8 \times 10^{-11}] \quad (143)$$

$$E_{gRLQR} = [1 \times 10^{-13} \quad 1 \times 10^{-13}] \quad (144)$$

La matriz de control  $K_{RLQR}$  que incluye la ganancia integral del sistema se muestra como sigue:

$$K_{RLQR} = \begin{bmatrix} -340.89 & -0.0108 & 0.03066 & -0.07609 \\ -0.01238 & -0.03294 & 0.0000032 & 0.000013 \end{bmatrix} \quad (145)$$

### 3.7 Resultados del RLQR para el sistema con disturbios

Los resultados obtenidos a partir del Regulador Lineal Cuadrático Robusto RLQR son diferentes al Regulador Lineal Cuadrático LQR, es analizado a partir de las variables de estado, los actuadores involucrados en el control, el efecto de los disturbios externos al sistema y las no linealidades incluidas en la nube de incertidumbres en dos escenarios diferenciados.

#### 3.7.1 RLQR con integrador con saturación primer y segundo escenario

La simulación se realiza teniendo en cuenta dos escenarios de referencia en cada uno se generan dos posibles escenarios superiores y dos inferiores, lo que genera una condiciones externas de disturbios. Siendo así, el sistema de control inicia en  $10^{\circ}\text{C}$ , asciende a  $17.7^{\circ}\text{C}$ , logra establecerse sobre la referencia a las 5h, todas las señales tienen este mismo comportamiento, el cambio de referencia de  $18^{\circ}\text{C}$  a  $22^{\circ}\text{C}$  implica una duración de 55 minutos, más lento que el LQR pero no presenta sobre impulso, el sistema en estado estable tiende a aumentar el error iniciando en cero, hasta 0.7 sobre la referencia, esto es, 3.2%, acorde a la Figura 18, la temperatura no logra establecerse en la referencia. Para mantener estas condiciones de temperatura el sistema genera un flujo de calor de  $30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  y

una extracción de  $30 \frac{W}{m^2}$  con picos positivos para salto de 18°C a 22°C y picos negativos cuando la referencia pasa de 22°C a 18°C, es decir extracción de cantidad de calor. La Tabla 22 Relaciona características descriptivas de tiempos de subida  $t_s$  (s), tiempo pico  $t_p$  (s), tiempos de establecimiento  $t_e$  (s), máximo sobre impulso  $M_p$  y error de estado estacionario  $E_{ss}$  para las señales, cabe resaltar que, dentro de los disturbios estudiados, se hace énfasis en la señal que considera las condiciones más extremas de las variables climáticas, podría decirse que las condiciones que se resaltan son las condiciones extremas las variables de estado.

Los tiempos de establecimiento exceden la hora, esto debido a la naturaleza de la variable, sin embargo, se observa que la temperatura no presenta sobre impulso, es decir, la señal sube, pero se mantiene por debajo de la referencia establecida, por tanto, el tiempo de subida y el tiempo de pico son idénticos, los tiempos de establecimiento son altos, sin dejar de controlar la variable de estado temperatura alrededor del valor de referencia.

Tabla 22 Temperatura del aire interior primer y segundo escenario.

	$t_s$ [h]	$t_p$ [h]	$t_e$ [h]	$M_p$ [°C]	$e_{ssT}$ [°C]
<b>RLQR-E1</b>	1.0994	1.0769	5	0	0.3226
<b>RLQR-E2</b>	1.0808	1.0808	5	0	0.03

Fuente: Elaboración propia

En relación a la humedad, cuando las variables radiación solar, temperatura exterior, humedad exterior, son más altas, presenta un comportamiento con un error de estado estacionario de máximo  $16.7 \frac{kg}{m^2s}$  es decir  $5.7 \frac{kg}{m^2s}$  por encima de la referencia y por debajo de  $5.6 \frac{kg}{m^2s}$ , los disturbios afectan significativamente el control, impidiendo que se establezca en el valor de referencia, a pesar se presentar acciones correctivas asociadas a la aspersión cuando la variable está por debajo de la referencia, el control no logra establecerse sobre el valor deseado. La Tabla 23 deja ver la información de interés determinada a partir de la interpretación de señal de salida de humedad en donde se identifica que el tiempo de subida es de alrededor de 5 horas y media, condición que está relacionada con un descenso de la humedad al inicio de cada periodo de ingreso de disturbios es decir 24 horas, sobre impulso no se presenta en la humedad por tanto no hay



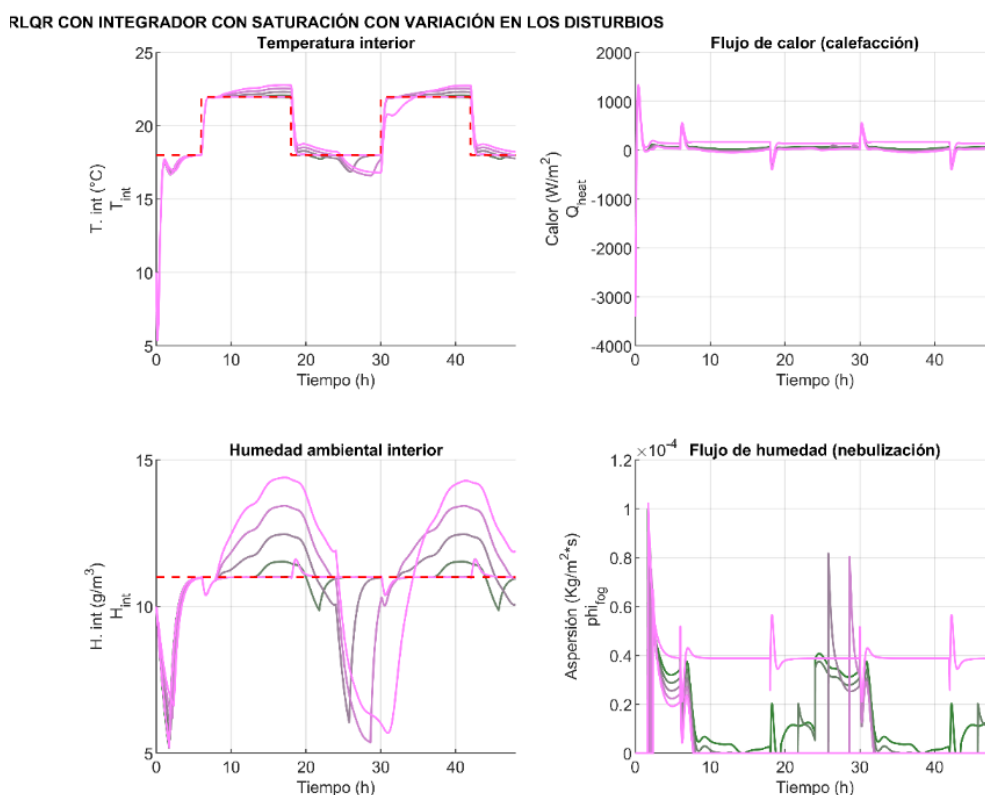
tiempo pico, el tiempo de establecimiento es el mismo tiempo de subida, se presenta una diferencia significativa en la capacidad de control que se ejerce en función de los dos escenarios estudiados presentado mejor desempeño en el escenario número dos.

Tabla 23 Humedad absoluta del aire interior primer y segundo escenario

Control	$t_s$ [h]	$t_p$ [h]	$t_e$ [h]	$M_p$ [ $\frac{g}{m^3}$ ]	$e_{ssH-sup}$ [ $\frac{g}{m^3}$ ]	$e_{ssH-inf}$ [ $\frac{g}{m^3}$ ]
RLQR-E1	5.5	0	5.5	0	-3	6
RLQR-E2	5.5	0	5.5	0	-1.422	2.5701

Fuente: Elaboración propia

Figura 18. RLQR con integrador con saturación primer escenario.



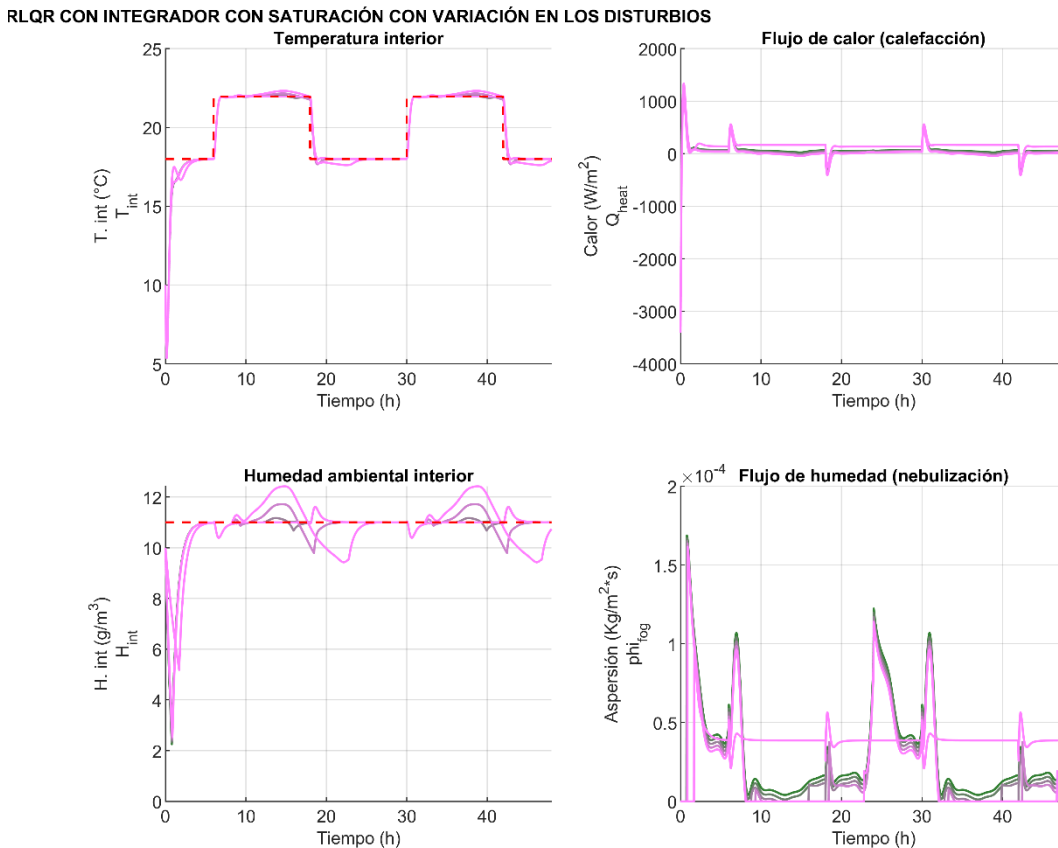
Fuente: Elaboración propia

Se identifica que entre menor sea la magnitud de los disturbios, más rápido se establecen en la referencia las variables de estado y más preciso es el sistema de la Figura 19. Para las condiciones del segundo escenario la temperatura no logra establecerse en la referencia deseada, igualmente sucede con la humedad, sin embargo, es importante

resaltar que el segundo escenario tiene mejor desempeño para la humedad, debido a que el error es menor en los segmentos donde la señal está por encima de la referencia.

La temperatura no se corrige el error de estado en la noche, en el día, al cambiar el valor referencia, se presenta una transición más lenta, tarda alrededor de 54 min para llegar al valor deseado, sin embargo, no logra establecerse debido a que existe un error significativo Figura 19, para el caso más extremo la temperatura a las 6pm tiene 0.8°C por encima de la referencia, situación que está relacionada con los disturbios asociados al sistema y el efecto de la saturación.

Figura 19. RLQR con integrador con saturación segundo escenario.



Fuente: Elaboración propia

El control RLQR mejora el seguimiento de la referencia de la humedad, pero se presenta error de estado estacionario en la temperatura, a pesar de activarse el actuador de

aspersión para controlar la variable humedad, esta sigue presentando valores altos cerca de  $14.3 \frac{g}{m^3}$  y por debajo de la referencia las humedades caen a  $5.1 \frac{g}{m^3}$ , para los casos extremos de los disturbios, la mayor parte del tiempo la humedad esta por fuera de los valores deseados. Siendo así, el regulador lineal cuadrático robusto mejora el seguimiento de la variable humedad, desmejora la temperatura, por tanto, existen mejoras que se pueden realizar con el control Markoviano.



## Capítulo 4

### 4. Diseño y resultados de la simulación del control de temperatura a partir del regulador robusto sujeto a saltos Markovianos

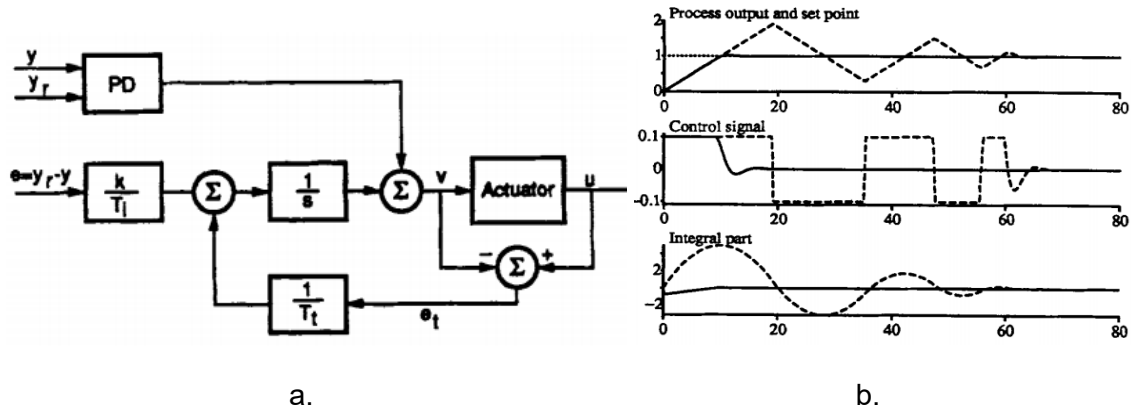
#### 4.1 Solución al problema de la saturación

Según Astrom & Rundqwist (1989), una gran cantidad de sistemas de control están diseñados acorde a la teoría lineal. Sin embargo, para controlar un sistema en un rango amplio, es necesario considerar las no lineales. En el caso de la acción integral, cuando se satura el actuador la acción se interrumpe, esto puede generar valores indeseables, lo que puede llevar a largos tiempos para alcanzar el equilibrio, este fenómeno se denomina windup.

La Figura 20a, muestra un esquema de control que permite corregir el fenómeno de windup a partir de un control PID. La entrada del integrador es alimentada con  $e_t$ , donde  $e_t = u - v$ , además,  $u$  es la acción de control y  $v$  es la entrada al actuador. Note que, la señal de error entre la acción de control y la entrada del actuador  $e_t$ , es cero cuando no hay saturación. Cuando el actuador se satura, la señal de retroalimentación evita que el integrador se detenga. (Astrom & Rundqwist, 1989). La Figura 20b muestra que el término integral aumenta inicialmente y alcanza su valor más grande en  $t = 10$  cuando el error

pasa por cero. La salida permanece saturada en este punto debido al gran valor del término integral. Cuando la salida se satura, la integral se vuelve a calcular para que su nuevo valor entregue una salida en el límite de saturación.

Figura 20. Windup a) Descripción en PID. b) Regulador con anti windup.



Fuente: (Astrom & Rundqwist, 1989)

Un modelo dinámico que describe la operación del control anti rebote en tiempo discreto es mostrado enseguida:

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ e_{s_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ e_{s_{k-1}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G \\ T_s \end{bmatrix} sat(u_k) + \begin{bmatrix} G_d \\ T_s \end{bmatrix} w_k \quad (146)$$

$$e_s = u_e - sat(kx_k) \quad (147)$$

$$e_{s_k} = u_e - sat(u_k) \quad (148)$$

Donde  $x_k$  son los estados del sistema,  $w_k$  son los disturbios exógenos, y  $e_{s_k}$  es el error entre la acción de control estimada  $u_e = Kx_k$  y la acción de control a la salida del actuador  $sat(u_k)$ . Además,  $e_{s_{k-1}} \approx \int e_{s_k}$ , es la integral del error en el actuador. Las matrices del proceso son  $F, G$  y  $G_d$ .

## 4.2 Diseño del control Markoviano con acción integral y saturación

De acuerdo con la teoría de control Markoviano, el sistema descrito anteriormente puede realizar las correcciones mediante modos de operación y el parámetro de salto. Considere el siguiente modelo, el cual tiene en cuenta acciones integrales y una corrección anti windup, desde un enfoque de control Markoviano,

$$\begin{bmatrix} x_{i,k+1} \\ xint_{i,k+1} \\ e_{s_{i,k}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{i,k} & 0 & 0 \\ -I & I & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i,k} \\ xint_{i,k} \\ e_{s_{i,k-1}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{i,k} \\ 0 \\ T_s \end{bmatrix} sat(u_{i,k}) + \begin{bmatrix} G_{d_{i,k}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & T_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{i,k} \\ u_{e_{i,k}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \\ 0 \end{bmatrix} T_s r_{i,k}, \quad (149)$$

$$r_k = [T_{d_{air}}, H_{d_{air}}]^T, \quad u = K_{r_{mi}} \begin{bmatrix} x_k \\ xint_k \\ e_{s_k} \end{bmatrix} \quad (150)$$

$$e_{s_{i,k}} = u_{e_{i,k}} - sat\left(K \begin{bmatrix} x_k \\ xint_k \\ e_{s_{k-1}} \end{bmatrix}\right) \quad (151)$$

$$e_{s_k} = u_{e_{i,k}} - sat(u_{i,k}) \quad (152)$$

El parámetro de salto se define como,  $i = \theta_k = 1$  si  $e_s = 0$ , es decir, si no existe saturación se considera el modo uno, y en otro caso el modo dos con  $i = \theta_k = 2$  si  $e_s \neq 0$ . De acuerdo con lo anterior, el sistema en el modo uno, funciona sin saturación y es similar al control RLQR descrito anteriormente. Note que, para este modo de operación no es incluida la integral de la acción de control en la matriz de transición de estados  $F_{a_{mi}}$ , por lo tanto  $\gamma_i = 0$ . Sin embargo, y de acuerdo con Astrom & Rundqwist (1989) ante la saturación, la acción integral del controlador (para la variable humedad en este caso particular), no permite corregir el error de estado para la variable de interés. Por lo tanto, en este proyecto se propone resetear esta acción integral durante el modo de operación dos, para lo cual se considera la integral del error de saturación de la acción de control, por lo tanto  $\gamma_i = 1$ .

A continuación, se definen las matrices que describen el sistema dinámico y que son usadas como entradas al algoritmo de optimización. Es de resaltar que, para el primer modo de operación, la integral del estado de la acción de control  $\int e_{s_k}$  es cero, es decir, no se integra el error de saturación, dado que no hay error de acuerdo con el parámetro de salto  $\theta_k$ .

$$F_{a\_m1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (153)$$

$$F_{a\_m2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (154)$$

$$G_{a\_m1} = \begin{bmatrix} 5.542 \times 10^{-5} & -0.00709 \\ 0 & 30.36475 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (155)$$

$$G_{a\_m2} = \begin{bmatrix} 5.542 \times 10^{-5} & -0.00709 \\ 0 & 30.36475 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (156)$$

Se definen las matrices de incertidumbre para cada modo de trabajo con cinco estados que incluyen la corrección del error de saturación. Las matrices relacionadas con las incertidumbres del primer modo se establecen iguales a las del RLQR, ver ecuaciones (157) a (160).



$$H_{r_{m1}} = H_{r_{m2}} = \begin{bmatrix} 0.9 \\ 0.5 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (157)$$

$$E_{g_{m1}} = E_{g_{m2}} = [1x10^{-14} \quad 1x10^{-14}] \quad (158)$$

$$E_{f_{m1}} = [4x10^{-15} \quad 8x10^{-14} \quad 8x10^{-15} \quad 8x10^{-15} \quad 0] \quad (159)$$

$$E_{f_{m2}} = [4x10^{-15} \quad 8x10^{-8} \quad 8x10^{-15} \quad 8x10^{-15} \quad 1x10^{-9}] \quad (160)$$

Para el RR-DMJLS se debe establecer la matriz de probabilidad de transición entre los modos de operación,  $p_{ij}$  como sigue: Si el sistema se encuentra en el primer modo de trabajo, la probabilidad de permanencia es del 90%, y de 10% para saltar al modo dos. Si el control se encuentra trabajando en el segundo modo de operación, la probabilidad de permanencia es de 90% y la probabilidad para saltar al modo uno es de 10%. Es importante aclarar, que la selección de esta matriz se realizó empíricamente. La matriz de probabilidad relacionada a la cadena de Markov se muestra a continuación:

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.1 & 0.9 \end{bmatrix} \quad (161)$$

$Q_{m_i}$  y  $R_{m_i}$  son las matrices de ponderación del regulador y se eligen similarmente que para el RLQR.

Modo 1 y 2:

$$Q_{m_1} = Q_{m_2} = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (162)$$

$$R_{m_1} = R_{m_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (163)$$

Las matrices de control  $K_{R\_M1}$  y  $K_{R\_M2}$  que incluyen las constantes integradoras del sistema se muestran en las matrices (164) y (165) como sigue:

$$K_{r\_m1} = \begin{bmatrix} -329.78 & -0.077 & 0.31 & 8x10^{-5} & 0 \\ 1.71x10^{-4} & -0.044 & -3.08x10^{-6} & 0.01194 & 0 \end{bmatrix} \quad (164)$$

$$K_{r\_m2} = \begin{bmatrix} -329.78 & -0.077 & 0.31 & 8x10^{-5} & -1.3x10^{-8} \\ 4.96x10^{-5} & -0.036 & -8.59x10^{-7} & 3.32x10^{-3} & -2.02x10^{-4} \end{bmatrix} \quad (165)$$

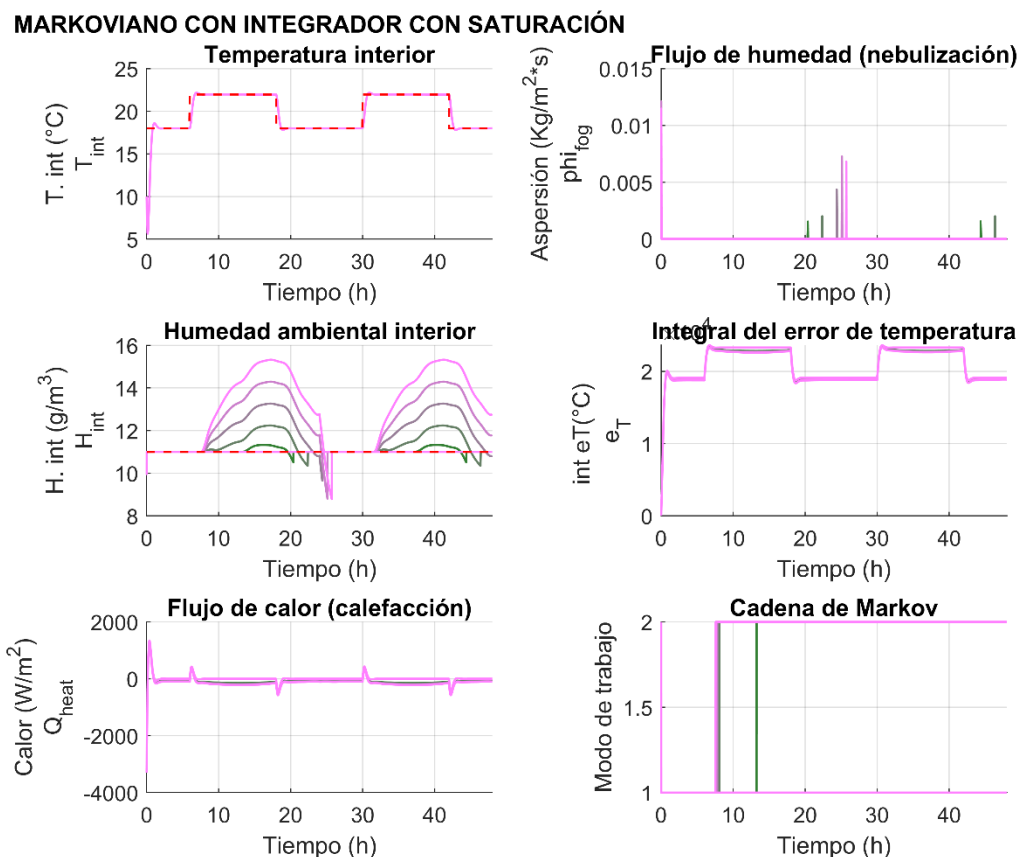
### 4.3 Resultados control Markoviano con integrador y saturación 1er escenario

La Figura 21 muestra los resultados de la implementación del control Markoviano al sistema, cabe resaltar que la temperatura óptima en invernadero es de 18°C en la noche, desde las 6pm hasta las 6am y de 21°C en el día, entre las 6am y las 6pm. Siendo así, sobre las condiciones iniciales estudiadas, se observa que la temperatura a las 00h es baja y la requerida por el sistema es de 18°C para garantizar unas condiciones óptimas para el desarrollo fenológico del cultivo en horas de la noche, por tanto, el sistema sigue la referencia que parte de un pico mínimo de 6°C, para lo cual el sistema de calefacción genera una inyección de calor de alrededor  $1300 \frac{W}{m^2}$  para llevar la temperatura a 18°C ascenso que se presenta en 53 minutos aproximadamente, con un sobre impulso que esta alrededor de 0.5°C, al sistema sigue dentro del valor deseado y a las 6am cuando la referencia de temperatura cambia a 22°C, el sistema se estabiliza en la nueva referencia en aproximadamente 53 minutos con un sobre impulso de 0.15°C.

Se estima que la cantidad de energía por unidad de área para subir la temperatura en un grado Celsius es de  $83 \frac{W}{m^2}$ , para subir la temperatura en 4°C la cantidad de energía esta alrededor de los  $332 \frac{W}{m^2}$ , el sistema inyecta alrededor de  $320 \frac{W}{m^2}$ , para subir la temperatura de 18°C a 22°C lo que permite identificar que la cantidad de energía mostrada en la simulación a través del modelo, es consistente con lo que se presenta en campo Figura 21. Debido a que el sistema invernadero en ausencia de calefacción, tiene disturbios asociados que inyectan energía al sistema, lo normal es que, en presencia de actuadores,

exista una energía que es necesario atenuar para regresar a los puntos de referencia, por lo tanto, la calefacción se muestra negativa debido a que el actuador extrae energía.

Figura 21. Control Markoviano con integrador con saturación primer escenario.



Fuente: Elaboración propia

Los sistemas mixtos permiten suministrar y extraer calor acorde a la necesidad, la inyección de calor al sistema se representa como una magnitud positiva y la extracción de cierta cantidad de calor se representa como una magnitud negativa. La cual, puede ser extraída del sistema para atenuar el calor y disminuir la temperatura, es así, como para la familia de disturbios la magnitud está entre  $-68 \frac{W}{m^2}$  y  $-112 \frac{W}{m^2}$ . La regulación negativa estará entre un 1°C y 1,4°C, esto aplica cuando la temperatura de referencia es de 18°C, por otro lado, cuando la temperatura que se desea es de 22°C la cantidad de energía a extraer del calefactor del sistema está entre  $-130 \frac{W}{m^2}$  y  $-198 \frac{W}{m^2}$ , para el primer caso se requiere lograr temperatura de 18°C, por lo tanto se requiere extraer más energía, es decir la magnitud es

negativa por la necesidad de atenuar y más cercana a cero. Para el segundo caso se requiere extraer menos energía ya que el sistema debe estar en 22°C, siendo así, se necesita menos energía teniendo en cuenta que la magnitud es más negativa que en primer caso.

La variable de estado humedad, es controlada por el actuador de aspersión, sin embargo, tiene varios disturbios asociados, entre ellos, la temperatura exterior, la humedad exterior, la condensación y la transpiración. El sistema por la condición de temperatura existente facilita la transpiración y la evaporación de humedad del suelo. Por tanto, una humedad alta en la variable de estado es normal debido al aumento de la temperatura en el día, siendo así, el actuador de aspersión no se activa durante este intervalo de tiempo, sino en la noche, cuando la temperatura es más baja que la del día y la humedad ambiental ha decaído por debajo de la temperatura de referencia, para lo sistemas con error de humedad bajos, los picos de aspersión son de poca magnitud, en contraste con los picos de humedad altos que están relacionados con diferencias significativas de la humedad respecto al set point deseado.

La Figura 21 en la gráfica titulada flujo de humedad (nebulización), muestra la acción de control de nebulización. La aplicación en el mejor de los casos es de  $1.5 \times 10^{-3} \frac{kg}{m^2s}$  y en el caso donde el error de humedad es mayor, la aplicación es de  $7.2 \times 10^{-3} \frac{kg}{m^2s}$ , si se compara este pico de humedad con la transpiración en un instante determinado, equivale a aproximadamente un valor entre 115000 y 553000 veces más, lo que sería suficiente para cambiar el estado de humedad ambiental, y corregir en un instante muy corto, esta aplicación realiza una corrección de la humedad absoluta de  $2.22 \frac{g}{m^3}$ , para llevarla de  $8.78 \frac{g}{m^3}$  a  $11 \frac{g}{m^3}$ , bajo las condiciones dadas previamente de 18°C mediante aplicación de pulsos de flujo de humedad a partir de un aspersor.

El caso del regulador robusto para sistemas lineales de salto Markoviano en tiempo discreto se puede ver en la Figura 21 en la gráfica titulada cadena de Markov. La probabilidad de permanencia en el modo de trabajo es del 90%, el comportamiento de cambio, es función, por un lado, de la magnitud del error de humedad y por el otro, del momento en el cual se presenta el error. La saturación de la señal y la diferencia entre la

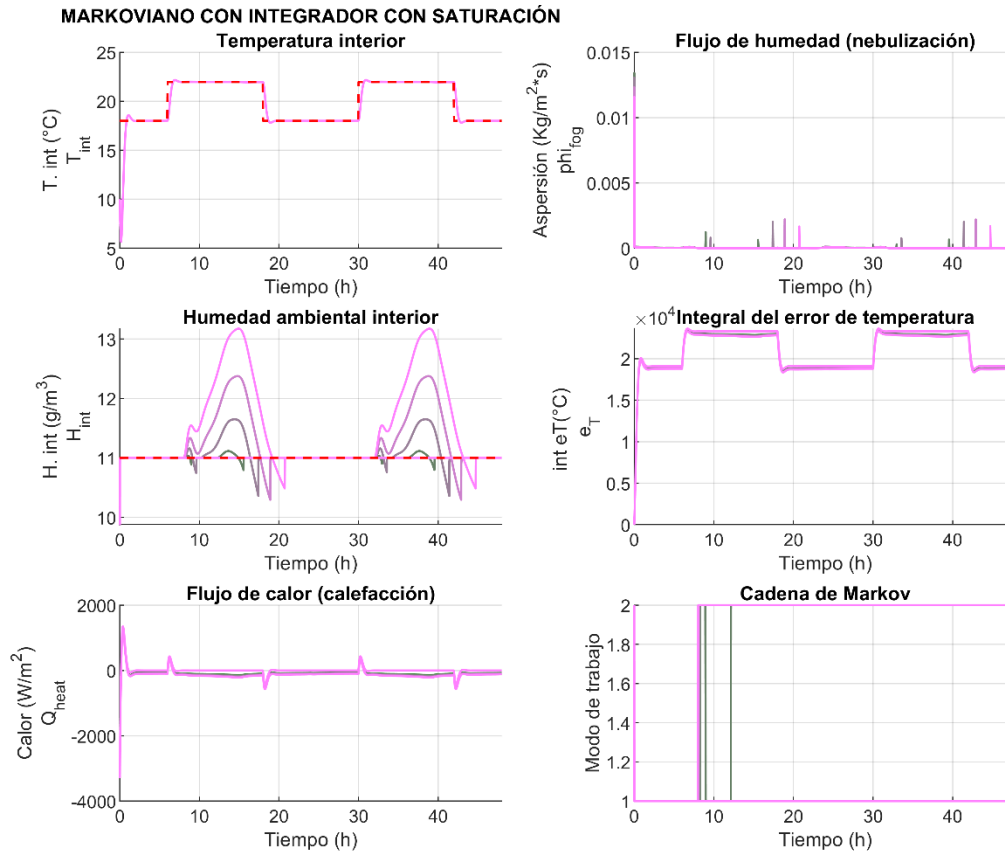
señal de saturación y la señal de salida del actuador definen el cambio. Las señales rosadas, están más alejadas de la referencia, cambian primero en el tiempo y las señales más oscuras, que están más cercanas a la referencia, cambian posteriormente, esta transición delimita el modo de trabajo y consecuentemente las constantes a utilizar para corregir los errores en las variables de estado.

#### 4.4 Resultados control Markoviano con integrador y saturación 2do escenario

El segundo escenario deja ver la estabilidad y desempeño robusto del sistema ante un conjunto de señales que tiene variaciones significativas con respecto al primero. La radiación solar es similar en relación a la magnitud máxima, pero el pico máximo desplazado en el tiempo cerca de la 3 pm, un pico más pronunciado en la condensación, temperatura del suelo constante y humedad ambiental exterior más baja que el primer escenario, en promedio  $8 \frac{g}{m^3}$ . Bajo estas condiciones la Figura 22 deja ver el comportamiento del sistema, en donde, las condiciones iniciales del sistema son similares, el valor de inicio es  $10^\circ\text{C}$ , la temperatura desciende a  $5.6^\circ\text{C}$  durante los primeros 9 minutos, en este instante el suministro de calor del sistema se activa empieza a aumentar hasta lograr un pico de  $1346 \frac{W}{m^2}$  a los 22 minutos, lo que garantiza que la temperatura al interior del invernadero este en  $18^\circ\text{C}$  al minuto 49 y se logre un sobre impulso de  $18.5^\circ\text{C}$ , el cual logra estabilizarse a la hora y 34 minutos.

En las horas que cambia la temperatura de referencia, el actuador de funcionalidad mixta inyecta calor o extrae calor. La energía que se extrae del sistema para las diversas variaciones de los disturbios están entre  $-70 \frac{W}{m^2}$  y  $-107 \frac{W}{m^2}$  para el caso en que la referencia es de  $18^\circ\text{C}$ , en este momento el extractor se activa, para el caso en que la temperatura de referencia es  $22^\circ\text{C}$  la cantidad de calor que se extrae esta entre  $-108 \frac{W}{m^2}$  y  $-162 \frac{W}{m^2}$ , se activa el extractor de calor. Cuando es necesario subir la temperatura de 18 a  $22^\circ\text{C}$  se activa el calefactor para entregar alrededor de  $431 \frac{W}{m^2}$ , energía en forma de calor y así, subir rápidamente la temperatura interior a la establecida por la referencia.

Figura 22. Control Markoviano con integrador con saturación segundo escenario.



Fuente: Elaboración propia

Una particularidad del segundo escenario es que presenta picos de descenso por debajo de la humedad de referencia, los cuales se controlan con picos de aspersión, y son función de la magnitud del error de humedad, adicionalmente se presentan flujos de humedad del orden de  $1 \times 10^{-4} \frac{kg}{m^2 \cdot s}$ , cerca de los valores en los cuales se debe bajar la temperatura cerca del pico máximo del sobre impulso, esto incrementa la humedad por activación del sistema de aspersión, consecuencia de lo anterior y de los disturbios se incrementa la humedad.

La gráfica de la cadena de Markov muestra los cambios del modo de trabajo (Figura 22), en donde la transición del modo 1 al modo 2, es función de la saturación dada por el error de humedad ambiental que es necesario corregir, entre mayor sea el error de la salida del sistema, mayor será la diferencia entre las señales del error de saturación.

La integral del error de temperatura tiene una magnitud del orden de  $10^4$ , sin embargo, sigue la misma tendencia de la temperatura interior del invernadero, se reduce en los momentos en que la temperatura es de  $18^{\circ}\text{C}$  y se incrementa cuando la temperatura es de  $22^{\circ}\text{C}$ .

El sistema muestra una mejora con respecto al controlador LQR y el controlador RLQR, para la temperatura interior y para la humedad interior del invernadero, el seguimiento de la referencia no presenta error de estado estacionario para la temperatura y la velocidad de establecimiento se incrementa.

## Capítulo 5

### 5. Resultados: comparación de las estrategias de control 1er y 2do escenario

El resultado principal de este proyecto se encuentra en la Figura 23, en donde se puede comparar el comportamiento de las variables climáticas del invernadero, ante la familia de disturbios seleccionada y bajo la acción de control del LQR, el RLQR y el RR-DMJLS. Para realizar la simulación se consideraron diez experimentos, cinco por cada escenario de disturbios contemplado. El principal resultado a destacar es que el sistema alcanza la estabilidad en todos los experimentos. Es importante resaltar esto, ya que los tres reguladores tratados cuentan con garantías de estabilidad diferentes. El LQR, por ejemplo, solo brinda garantías de estabilidad cuando el sistema es nominal. Sin embargo, en los experimentos realizados el sistema se comportó de forma estable, a pesar de que en la simulación se consideraron las no linealidades, como se muestra en la Figura 23 (izquierda).

Para el RLQR, la garantía de estabilidad está dada a partir de la selección adecuada de un conjunto de incertidumbres limitadas. Para realizar la simulación se usó un grupo de incertidumbres a partir del análisis realizado en la sección 2.4, como resultado existe



garantía de la estabilidad. Sin embargo, es importante mencionar, que el efecto no lineal, debido a la saturación en el nebulizador, deteriora el desempeño alcanzado, por los dos reguladores mencionados anteriormente, esto se puede ver en la Figura 23 (izquierda y centro). Por lo tanto, con el objetivo de solventar este problema se ha considerado el RR-DMJLS. Así, para el diseño del regulador Markoviano, se han considerado dos modos de operación, en el modo 1, el sistema es modelado de la misma manera que se hizo para el RLQR y además han sido consideradas las mismas matrices de ponderación; para el modo 2, el sistema considera una estrategia anti rebote, con la cual se logra mejorar el desempeño tanto para la temperatura como para la humedad al interior del invernadero. Como garantía de estabilidad, se ha verificado el radio espectral para el caso nominal, de acuerdo con (Costa, Fragoso, & Marques, 2005). También, es importante mencionar, que el análisis de estabilidad para el caso incierto se deja como trabajo futuro, debido al alcance del proyecto. Sin embargo, considere que el uso de un modo de operación como sistema anti rebote, a pesar de haber sido considerado ampliamente por otras teorías, está siendo tratado para el RR-DMJLS, por primera vez en este proyecto y los resultados de simulación muestran que el sistema se comportó estable para todos los experimentos, esto se puede ver en la Figura 23.

Para análisis de desempeño del sistema, se compararon algunos índices relevantes para cada experimento. Por lo tanto, a partir de la simulación se identifican: el tiempo de establecimiento, el tiempo de subida, el tiempo de pico, el error de estado estacionario, y los picos mínimos y máximos durante el estado estacionario. El estudio se realiza sobre la señal que presenta mayores disturbios en el sistema, en otras palabras, el caso más extremo, dado que para las demás señales las condiciones son mejores. Se contempla entonces que, si en el peor de los casos el sistema alcanza un desempeño satisfactorio, las demás variaciones para los demás casos están dentro de las condiciones de trabajo deseadas.

Algunas características de las señales de las variables de estado han sido tenidas en cuenta durante el análisis, cabe destacar el tiempo de subida  $t_s$ , tiempo de pico  $t_p$ , tiempo de establecimiento  $t_e$  todas las características mencionadas en horas  $h$ , por otro lado, se analiza el máximo sobre impulso  $M_p$  en las unidades correspondientes a la variable de estado  $^{\circ}C$  o  $\frac{g}{m^3}$ , el error de estado estacionario de la temperatura  $e_{ssT}$  en  $^{\circ}C$  y finalmente el

error de estado estacionario de la humedad  $e_{ssH}$  que determina los pico máximos y mínimos en régimen de estado estacionario en  $\frac{g}{m^3}$ , dado por la diferencia entre la referencia y la humedad absoluta del aire  $e_{ssH} = r - H_{air}$ .

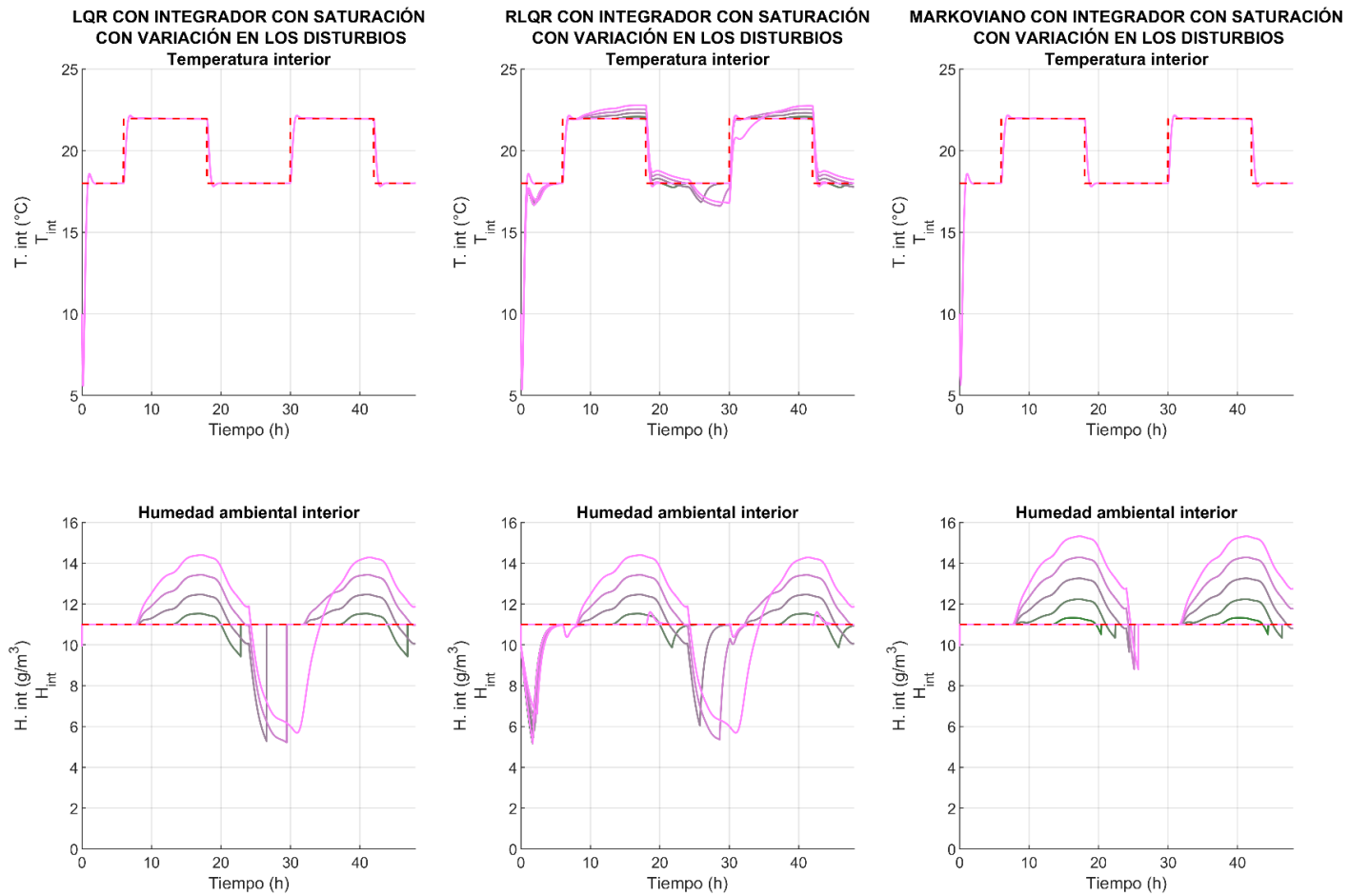
La Tabla 24 y Tabla 25 muestran los datos correspondientes al estudio de la temperatura y humedad, respectivamente. Se comparan los tres controladores el LQR, el RLQR y el RR-DMJLS sobre dos escenarios, E1 y E2 en el caso más extremo. Respecto de la temperatura en el interior del invernadero, el regulador lineal cuadrático demuestra manejar tiempos reducidos de subida y establecimiento, presenta un sobre impulso después de la hora, que alcanza  $0.5354^{\circ}\text{C}$ , y logra un error de estado estacionario igual a cero, como se muestra en la Figura 23 (izquierda). Por otro lado, el regulador RLQR es más lento y en régimen de estado estacionario queda con un error de  $0.3^{\circ}\text{C}$ , sin embargo, no tiene sobre picos Figura 23 (centro). En el sistema con control Markoviano la temperatura se controla ligeramente más rápido con características similares al control LQR, pero al analizar la humedad se presentan situaciones diferentes que merecen atención, ver la Figura 23 (derecha). Note que durante la noche el RR-DMJLS, consigue disminuir el efecto de los disturbios relacionados con la humedad en el interior del invernadero, lo cual a su vez tiene el efecto de permitir un desempeño adecuado para la variable temperatura, lo anterior considerando que los parámetros de diseño usados para el modo 1 del RR-DMJLS son los mismos que para el RLQR.

Tabla 24. Temperatura del aire interior primer y segundo escenario.

	$t_s$ [h]	$t_p$ [h]	$t_e$ [h]	$M_p$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$e_{ssT}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
<b>LQR-E1</b>	0.84889	1.0808	2.0883	0.5354	0
<b>RLQR-E1</b>	1.0994	1.0769	5	0	0.3226
<b>DMJLS-E1</b>	0.84806	1.0797	2.04	0.5883	0
<b>LQR-E2</b>	0.8505	1.0742	1.7944	0.5354	0
<b>RLQR-E2</b>	1.0808	1.0808	5	0	0.03
<b>DMJLS-E2</b>	0.8430	1.0733	1.7461	0.5883	0

Fuente: Elaboración propia

Figura 23. Control LQR (izquierda). Control RLQR (centro). Control Markoviano (derecha) para el primer escenario.



Fuente: Elaboración propia



El primer y segundo escenario de la variable humedad Tabla 25, muestra tiempos de establecimiento de cuatro minutos, no se presenta sobreimpulso en ningún controlador, por lo tanto, no se identifican tiempos pico. El RLQR es más lento con variaciones previas al establecimiento en la referencia. La humedad de salida en el LQR y el RLQR presenta variaciones con respecto a la referencia durante la noche, situación que es controlada con el RR-DMJLS.

Durante el día, la humedad en el interior del invernadero presenta variaciones para los tres reguladores, esto ocurre dado que el sistema no cuenta con un actuador que permita disminuir la humedad del interior del invernadero y dado que se le ha dado prioridad al seguimiento de la referencia de temperatura al interior del invernadero, esta no se puede aumentar. Por lo tanto, la humedad durante este tiempo queda en lazo abierto. Para solucionar este problema se podría aumentar la referencia de temperatura, pero esto debe depender de las características del cultivo. También se podría considerar, el uso de un actuador de extracción de humedad por deshumidificación.

El control Markoviano logra conciliar las ventajas del LQR y el RLQR, es decir, maneja tiempos reducidos y atenúa los errores de humedad, lo que se logra encontrando un punto intermedio de desempeño entre el LQR y el RLQR, siendo así, el control Markoviano demuestra ser más rápido que el RLQR dejando ver menores tiempos de establecimiento.

El error de humedad se presenta en el día con un valor negativo, denominado error superior  $e_{ssH-sup}$ , el cual es la diferencia en estado estacionario de la referencia menos la señal de salida. El segundo error denominado error inferior  $e_{ssH-inf}$ , está relacionado con la diferencia entre la referencia y la señal de salida, la cual es positiva.

Tabla 25. Humedad absoluta interior primer y segundo escenario.

Control	$t_s$ [h]	$t_p$ [h]	$t_e$ [h]	$M_p$ [ $\frac{g}{m^3}$ ]	$e_{ssH-sup}$ [ $\frac{g}{m^3}$ ]	$e_{ssH-inf}$ [ $\frac{g}{m^3}$ ]
LQR-E1	0.069	0	0.069	0	-6.2	5.3126
RLQR-E1	5.5	0	5.5	0	-1.422	1.5722
DMJLS-E1	0.015	0	0.015	0	-4.32	2.2111
LQR-E2	0.075	0	0.075	0	-1.4282	3.1201
RLQR-E2	5.5	0	5.5	0	-1.422	2.5701
DMJLS-E2	0.015	0	0.015	0	-2.1741	0.5138

Fuente: Elaboración propia

Se identifica que el controlador Markoviano es robusto para los dos escenarios, los controla, reduciendo el error y los tiempos de establecimiento, elimina el sobre impulso en la humedad absoluta y encuentra un punto de trabajo intermedio en comparación con los demás controladores para los picos máximos y mínimos durante el día. Por otro lado, las variaciones en los disturbios no afectan el sistema, ya que todas las señales tienen un comportamiento similar y muy cercano a los valores deseados.

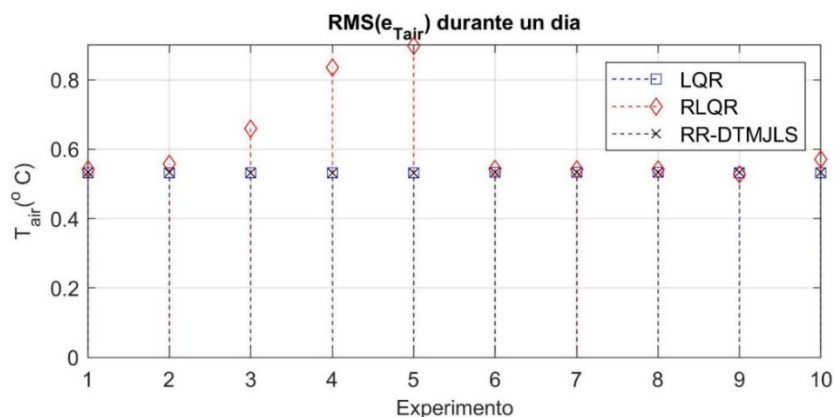
Para tomar una decisión frente a la elección del regulador más adecuado para el cultivo, además de los índices de desempeño analizados anteriormente, se realizó un análisis del valor RMS de los errores de temperatura y humedad al interior del invernadero para cada experimento. El índice de desempeño fue calculado de la siguiente manera:

$$RMS(e_{(x)}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{1}^N e_{(x)}^2} \quad (166)$$

Con  $e_{(x)} = ref_{x,k} - x_k$ , siendo  $x$  la variable de interés, ya sea la temperatura o la humedad al interior del invernadero y  $ref$  la señal de referencia correspondiente.

La Figura 24 describe la tendencia del valor RMS de la temperatura en función de los experimentos realizados, el valor RMS del error para el control RLQR es el que presenta mayor diferencia respecto a la referencia y por tanto la raíz media cuadrática se ve afectada, ésta aumenta en función del incremento de los disturbios en los escenarios propuestos, los controles RLQR y RR-DMJLS presentan características similares con errores cercanos a 0.5°C, dejando ver que en la mayoría de los experimentos el control Markoviano muestra mejor desempeño que el LQR y que el RLQR.

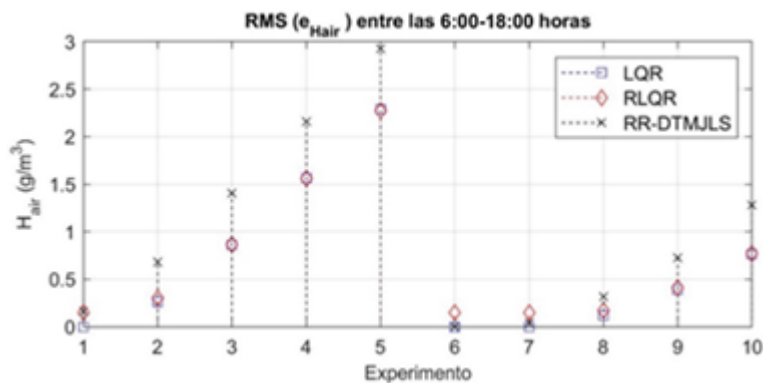
Figura 24. Valor RMS de la temperatura.



Fuente: Elaboración propia

Figura 25 y la Figura 26 están relacionadas al análisis del valor RMS de la humedad, se estudian dos momentos diferentes, ya que debido a que no se cuenta con un actuador que extraiga humedad, el comportamiento del sistema es diferente durante el día que durante la noche. Primero se analiza en el desempeño del control durante el día, Figura 25, dejando ver que el error de humedad para el control LQR presenta diferencias mayores a  $3 \frac{g}{m^3}$ , hacia los escenarios con disturbios extremos, mientras que el menor error se consigue con el control RR-DMJLS. Lo anterior, permite determinar que con el enfoque Markoviano sobre los dos escenarios de prueba se consigue un desempeño superior.

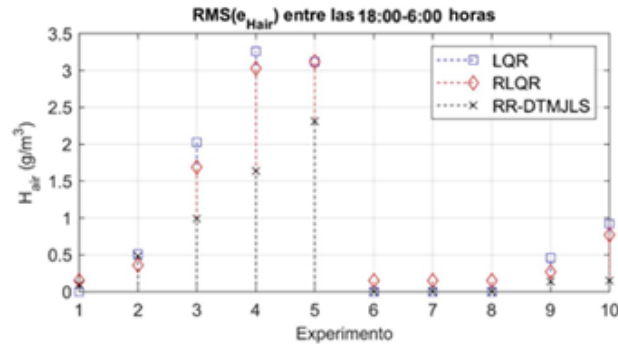
Figura 25. Valor RMS de la humedad durante el día.



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se realiza un análisis durante el comportamiento nocturno y se identifica que los controles LQR y RLQ tienen errores menores que el control Markoviano en los escenarios analizados.

Figura 26. Valor RMS de la humedad durante la noche.



Fuente: Elaboración propia

En síntesis, el RR-DMJLS presenta mejor desempeño frente al control de la variable temperatura, en relación a la variable humedad representa mejor desempeño durante el día, en los dos escenarios analizados y ante incertidumbres relacionadas a los disturbios extremos y no linealidades supera al LQR y RLQR. Durante la noche los controles LQR y RLQR presentan mejores condiciones, sin embargo, el control Markoviano no deja estar cerca de la referencia. Para finalizar, es importante resaltar, que la configuración obtenida por medio de los tres reguladores estudiados en este proyecto es de tipo PI, lo cual representa una simplicidad importante en el momento de una implementación práctica, ya que se basa en una estructura conocida en la industria, aclarando que los valores de las constantes fueron encontrados a través de los algoritmos óptimos y robustos.



## Conclusiones

Se diseñaron dos estrategias de control de temperatura mediante técnicas robustas basadas en el RLQR y RR-DMJLS. Adicionalmente, se diseñó una estrategia basada en LQR para comparar los controladores respecto de una estrategia tradicional basada en el modelo del sistema. Se usa el modelo dinámico de un invernadero propuesto en Su & Xu (2017). Los resultados simulados obtenidos del sistema y sometidos a una familia de disturbios con dos escenarios diferentes, en intervalos de cuarenta y ocho horas mostraron mejor desempeño para la simulación del regulador Markoviano que para el regulador lineal cuadrático LQR y el regulador robusto lineal cuadrático RLQR. La incorporación de la humedad al sistema permitió caracterizar un modelo más cercano a un sistema productivo real y las saturaciones de esta variable de estado permitieron detectar el parámetro de salto que relaciona el sistema con el comportamiento del control en el invernadero.

Se implementó la simulación de un modelo dinámico de invernadero en tiempo discreto propuesto en la bibliografía, que relaciona las variables temperatura y humedad, se identificaron dos escenarios de disturbios próximos a los contextos reales que permiten usar las técnicas de control robustas para establecer un comportamiento deseado, y se logró que las variables siguieran la referencia reduciendo los errores.

Se desarrolló una estrategia de control de temperatura para el sistema invernadero usando los algoritmos "Regulador robusto recursivo para sistemas lineales sujetos a saltos Markovianos de tiempo discreto", que se relaciona con la humedad y con los efectos de la saturación del sistema para definir los parámetros de salto de la cadena de Markov.

Se estudiaron los resultados obtenidos de las simulaciones basadas en diversos criterios como: tiempo de subida, tiempo de establecimiento, tiempo de pico, máximo pico y error de estado estacionario y el estudio de los dos escenarios con las dos variables de estado,

y se identifica que el regulador Markoviano permite seleccionar modos de trabajo que mejoran el desempeño del sistema y brindan mayor robustez al controlador.

## Recomendaciones

Se recomienda implementar trabajos futuros, que incluyan un actuador de extracción de humedad por deshumidificación, el cual toma el aire del medio, lo condensa en las bobinas de un evaporador, y saca aire seco para controlar las masas de agua por unidad de volumen dentro del invernadero. Mediante la teoría de los saltos Markovianos se propone mejorar el comportamiento de la humedad, para impedir que se generen picos durante la noche, y relacionar los actuadores acordes a la necesidad de humedad absoluta para garantizar la estabilidad del sistema.

Dentro del modelo de invernadero existe el  $CO_2$  como variable de estado, sin embargo, no está dentro del alcance del proyecto implementar una estrategia de control, por tanto, se propone incluirla dentro de un proyecto futuro.

Se sugiere implementar la instrumentación para extracción de datos de una sola fuente en un invernadero real, caracterizar el sistema mediante la toma de información en campo sobre diversos cultivos e ingresar al modelo la información para determinar el efecto dado por el cambio de sistema productivo. Finalmente identificar qué tan acertada es la salida del modelo en relación a las variables de estado. Se recomienda implementar sobre el modelo variables como luminosidad y efectos de las variaciones del viento en lugares donde es significativo el cambio.

Se puede incorporar un segundo modelo relacionado con el crecimiento del cultivo, que puede hacer parte de un modo de operación, para determinar el efecto del desarrollo del cultivo sobre las variables de estado temperatura y humedad.

## Anexo A: Linealización del sistema

Considere que el sistema será operado alrededor de un punto de consigna, por lo tanto, se puede realizar la siguiente linealización:

$$\delta x_{k+1} = F\delta x_k + G\delta u_k + G_d\delta w + J(\zeta(x_k, w_k, u_k)),$$

La variable  $J$  denota el Jacobiano usado para aproximar el sistema, en el punto de operación,

$$J(\zeta_1(x_k, w_k, u_k)) = \frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{air}} + \frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial H_{air}} + \frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{out}} + \frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial I_{glob}} + \frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{flr}},$$

A continuación, se muestran las ecuaciones que describen los coeficientes del modelo, note que,  $T_{air0}$ ,  $H_{air0}$ ,  $I_{glob0}$ ,  $T_{flr0}$  y  $T_{out0}$ , son definidos como valores constantes de consigna.

$$\frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{air}} = (\phi_{1a} + \phi_{2a} + \phi_{3a} + \phi_{4a})\delta T_{air},$$

Para el cálculo de los coeficientes,  $\phi_{1a}$  hasta  $\phi_{4a}$  han sido despreciados los exponenciales negativos, ya que no son significativos,

$$\Phi_{1a} = \frac{\Delta HRx10^{-3}}{\rho_{air} C_{p,air} H_g(\varepsilon+1)M_{H_2O}} \left( \theta_{qc1} H_{air0} + 2\theta_{qc2}(T_{air0} + 273.15) H_{air0} + 3\theta_{qc3}(T_{air0} + 273.15)^2 H_{air0} \right),$$

$$\Phi_{2a} = -\frac{\Delta H}{C_{apair}} \left( \theta_{qE1} b_3 + \theta_{qE3} b_3 + \theta_{qE4} b_3 H_{air0} + 3\theta_{qE6} H_{air0} (b_3 T_{air0} + b_4 \eta_{can} I_{glob0})^2 + 2\theta_{qE7} H_{air0} (b_3 T_{air0} + b_4 \eta_{can} I_{glob0}) + \theta_{qE8} b_3 H_{air0} \right),$$

$$\Phi_{3a} = \frac{K_s}{C_{apair}} \left( -\theta_{T2} - 2\theta_{T3}(T_{flr0} - T_{air0}) - 3\theta_{T4}(T_{flr0} - T_{air0})^2 - 3\theta_{T5}(T_{flr0} - T_{air0})^3 \right),$$

$$\Phi_{4a} = -\frac{Kv+Kr}{C_{apair}} \left( \theta_{T7} + 2\theta_{T8}(T_{air0} - T_{out0}) + 3\theta_{T9}(T_{air0} - T_{out0})^2 + 4\theta_{T10}(T_{air0} - T_{out0})^3 \right),$$

$$\frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial H_{air}} = (\Phi_{1b} + \Phi_{2b}) \delta H_{air},$$

$$\Phi_{1b} = \frac{\Delta HRx10^{-3}}{\rho_{air} C_{p,air} H_g(\varepsilon+1)M_{H_2O}} \left( \theta_{qc1}(T_{air0} + 273.15) + \theta_{qc2}(T_{air0} + 273.15)^2 + \theta_{qc3}(T_{air0} + 273.15)^3 \right),$$

$$\Phi_{2b} = -\frac{\Delta H}{C_{apair}} \left( \theta_{qE2} + \theta_{qE4}(b_3 T_{air0} + b_4 \eta_{can} I_{glob0}) + 2\theta_{qE5} H_{air0} + \theta_{qE7}(b_3 T_{air0} + b_4 \eta_{can} I_{glob0}) + \theta_{qE8} b_3 (b_3 T_{air0} + b_4 \eta_{can} I_{glob0}) + 3\theta_{qE9} H_{air0}^2 \right),$$

Linealización respecto a temperatura exterior  $T_{out}$

$$\frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{out}} = \Phi_{1c} \delta T_{out},$$

$$\Phi_{1c} = -\frac{Kv + Kr}{C_{apair}} \left( -\theta_{T7} - 2\theta_{T8}(T_{air0} - T_{out0}) - 3\theta_{T9}(T_{air0} - T_{out0})^2 - 4\theta_{T10}(T_{air0} - T_{out0})^3 \right),$$

$$\frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial I_{glob}} = \Phi_{1d} \delta I_{glob},$$

$$\Phi_{1d} = -\frac{\Delta H}{C_{apair}} \left( \theta_{qE1} b_4 \eta_{can} + \theta_{qE3} b_4 \eta_{can} + \theta_{qE4} b_4 \eta_{can} H_{air0} + 3\theta_{qE6} b_4 \eta_{can} (b_3 T_{air0} + b_4 \eta_{can} I_{glob0})^2 + 2\theta_{qE7} H_{air0} (b_3 T_{air0} + b_4 \eta_{can} I_{glob0}) + \theta_{qE8} b_4 \eta_{can} H_{air0} \right),$$

$$\frac{\partial \zeta_1(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{flr}} = \Phi_{1e} \delta T_{flr},$$

$$\Phi_{1e} = \frac{K_s}{C_{apair}} (\theta_{T2} + 2\theta_{T3} (T_{flr0} - T_{air0}) + 3\theta_{T4} (T_{flr0} - T_{air0})^2 + 3\theta_{T5} (T_{flr0} - T_{air0})^3),$$

Se realiza la linealización de  $\zeta_2(x_k, w_k, u_k)$  en donde, el Jacobiano  $J$  es usado para aproximar el sistema, en el punto de operación,

$$J(\zeta_2(x_k, w_k, u_k)) = \frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{air}} + \frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial H_{air}} + \frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{out}} + \frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial I_{glob}} + \frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial H_{out}},$$

A continuación, se muestran las ecuaciones que describen los coeficientes del modelo, note que,  $T_{air0}$ ,  $H_{air0}$ ,  $T_{out0}$ ,  $H_{out0}$  y  $I_{glob0}$ , son definidos como valores constantes de consigna.

$$\frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{air}} = (\Phi_{1T_{air}} + \Phi_{2T_{air}}) \delta T_{air},$$

Para el cálculo de los coeficientes,  $\Phi_{1T_{air}}$  y  $\Phi_{2T_{air}}$  han sido despreciados los exponenciales negativos, ya que no eran significativos,

$$\begin{aligned} \phi_{1T_{air}} = & \frac{1}{H_g} [\theta_{E1} b_3 + 2\theta_{E3} (b_3 T_{air0} + b_4 \eta_{can} I_{glob0}) b_3 + \theta_{E4} H_{air0} b_3 + \\ & 3\theta_{E6} (b_3 T_{air0} + b_4 \eta_{can} I_{glob0})^2 b_3 + 2\theta_{E7} H_{air0} (b_3 T_{air0} + b_4 \eta_{can} I_{glob0}) b_3 + \\ & \theta_{E8} H_{air0}^3 b_3], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_{2T_{air}} = & -\frac{1}{H_g} \left[ \frac{\Delta HR x 10^{-3}}{\rho_{air} C_{p,air} H_g (\varepsilon + 1) M_{H_2O}} (\theta_{c1} H_{air0} + 2\theta_{c2} (T_{air0} + 273.15) H_{air0} + \right. \\ & \left. 3\theta_{c3} (T_{air0} + 273.15)^2 H_{air0}) \right], \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial H_{air}} = (\phi_{1H_{air}} + \phi_{2H_{air}} + \phi_{3H_{air}}) \delta H_{air},$$

Para el cálculo de los coeficientes,  $\phi_{1H_{air}}$  hasta  $\phi_{2H_{air}}$  han sido despreciados los exponenciales negativos, ya que no eran significativos,

$$\begin{aligned} \phi_{1H_{air}} = & \frac{1}{H_g} [\theta_{E4} (b_3 T_{air0} + b_4 \eta_{can} I_{glob0}) + \theta_{E3} H_{air0} + \theta_{E7} (b_3 T_{air0} + \\ & b_4 \eta_{can} I_{glob0})^2 + 2\theta_{E8} (b_3 T_{air0} + b_4 \eta_{can} I_{glob0}) H_{air0} + 2\theta_{E9} H_{air0}], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_{2H_{air}} = & -\frac{1}{H_g} [\theta_{c1} (T_{air0} + 273.15) + \theta_{c2} (T_{air0} + 273.15)^2 + \theta_{c3} (T_{air0} + \\ & 273.15)^3], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_{3H_{air}} = & -\frac{\phi_{vent}}{H_g} [\theta_{H2} + 2\theta_{H3} (H_{air0} - H_{out0}) + 3\theta_{H4} (H_{air0} - H_{out0})^2 + \\ & 5\theta_{H4} (H_{air0} - H_{out0})^4], \end{aligned}$$

El coeficiente con respecto a la variable  $T_{out}$  es igual a cero, debido a la dependencia multiplicativa de la exponencial donde esta última tiende a cero.

$$\frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial T_{out}} = (\phi_{2T_{out}}) \delta T_{out}; \quad \phi_{2T_{out}} = 0,$$

La derivada con respecto a  $I_{glob}$  está asociada al primer término de  $\zeta_2$ :

$$\frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial I_{glob}} = (\phi_{1I_{glob}}) \delta I_{glob},$$

$$\begin{aligned} \phi_{1I_{glob}} = & -\frac{1}{H_g} [\theta_{E1} b_4 \eta_{can} + 2\theta_{E3} (b_3 T_{air0} + b_4 \eta_{can} I_{glob0}) b_4 \eta_{can} + \\ & \theta_{E4} H_{air0} b_4 \eta_{can} + 3\theta_{E6} (b_3 T_{air0} + b_4 \eta_{can} I_{glob0})^2 b_4 \eta_{can} + 2\theta_{E7} (b_3 T_{air0} + \\ & b_4 \eta_{can} I_{glob0}) b_4 \eta_{can} + \theta_{E8} H_{air0}^2 b_4 \eta_{can}], \end{aligned}$$

Finalmente, se deriva respecto a  $H_{out}$  tercer término contenido en la no linealidad de  $\zeta_2$  quedando como sigue:

$$\frac{\partial \zeta_2(x_k, w_k, u_k)}{\partial H_{out}} = (\phi_{3H_{out}}) \delta H_{out},$$

$$\begin{aligned} \phi_{3H_{out}} = & \frac{\phi_{vent}}{H_g} [\theta_{H2} + 2\theta_{H3} (H_{air0} - H_{out0}) + 3\theta_{H4} (H_{air0} - H_{out0})^2 + \\ & 5\theta_{H4} (H_{air0} - H_{out0})^4], \end{aligned}$$



## Bibliografía

- Agmail, Waleed, R. I., Linker, R., & Arbel, A. (2009). Robust control of greenhouse temperature and humidity. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol. 6). <https://doi.org/10.3182/20090616-3-IL-2002.0090>
- Alpi, A., & Tognoni, F. (1999). *Cultivo en invernadero: Actual y orientación científica y técnica* (Tercera; C. Cerisola, Ed.). Madrid España: Prensa, Mundi.
- Alvarado, P. V., & Urrutia, G. S. (2003). Invernaderos. *Version Preeliminar Para La Revista El Agroeconómico de La Fundación de Chile*, 11.
- Astrom, K. J., & Rundqwist, L. (1989). Integrator Windup and how to avoid it. *IEEEExplore*, 51(3), 736–738.
- Atia, D. M., & El-madany, H. T. (2017). Analysis and design of greenhouse temperature control using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 4(1), 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.10.014>
- Baerdemaeker, J. De, Ramon, H., Anthonis, J., Speckmann, H., & Munack, A. (2009). Advanced technologies and automation in agriculture. *Controls Systems, Robotics and Automation*, XIX(1), 11.
- Blasco, X., Martínez, M., Herrero, J. M., Ramos, C., & Sanchis, J. (2007). Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption. *Computers and Electronics in Agriculture*, 55(1), 49–70. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.12.001>
- Burgos, M., Aldana, S., & Rodríguez, D. (2015). Análisis del recurso energético eólico para la ciudad de Bogotá DC para los meses de diciembre y enero, Colombia. *Avances Investigación En Ingeniería*, 12(2). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.278>
- Campo, P., & Morari, M. (1990). Robust control of processes subject to saturation

- nonlinearities. *Computers & Chemical Engineering*, 14(4–5), 343–358. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(90\)87011-D](https://doi.org/10.1016/0098-1354(90)87011-D)
- Cañadas, J., Sánchez-Molina, J. A., Rodríguez, F., & del Águila, I. M. (2017). Improving automatic climate control with decision support techniques to minimize disease effects in greenhouse tomatoes. *Information Processing in Agriculture*, 4(1), 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.12.002>
- Castilla, N. (2007). *Invernaderos de plástico: Tecnología y manejo* (Ediciones; Mundi-Prensa, Ed.). Madrid, España.
- Cerri, J. P. (2009). *Regulador Robusto Recursivo para Sistemas Lineales de Tempo Discreto no Espaço de Estado*. 126.
- Cerri, J. P. (2013). *Controle e Filtragem para Sistemas Lineares Discretos Incertos Sujeitos a Saltos Markovianos*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Cerri, J. P., & Terra, M. H. (2017). Recursive robust regulator for discrete-time markovian jump linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1(99).
- Cerri, J. P., Terra, M. H., & Ishiara, J. Y. (2014). Optimal robust linear quadratic regulator for systems subject to uncertainties. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(9), 2586–2591.
- 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>
- Costa, O., Fragoso, M., & Marques, R. (2005). Probability and Its Applications Discrete-Time Jump Linear System. In J. Gani, C. Heyde, P. Jaguers, & T. Kurtz (Eds.), *The Mathematical Gazette* (Published, Vol. 15). <https://doi.org/10.2307/3606686>
- Costa, O., Fragoso, M., & Marquez, R. (2005). Discrete-time Markov jump linear systems. *Springer, Verlag London*, 1((Probability and its applications).), 283.
- Cotes, A. M., Zapata, Y., Beltrán-acosta, C., Kobayashi, S., Uribe, L., & Elad, Y. (2018). Biological control of foliar pathogens. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia)*, 1(1), 143.
- DryGair. (2020). Deshumidificación del Invernadero Combinada con la Calefacción/Refrigeración. Retrieved from <https://drygair.com/es/deshumidificacion-del-invernadero-combinada-con-la-calefaccion-y-refrigeracion/>

- Edan, Y., Han, S., & Kondo, N. (2009). Automation in agriculture. *Springer Journal, 1*, 1095–1128.
- Estrada, J. J. P. (2012). Guía para la construcción de invernaderos o fitotoldos. *FAO Bolivia*, 80.
- FAO, FIDA, & PMA. (2012). La contribución del crecimiento agrícola a la reducción de la pobreza, el hambre y la malnutrición. *El Estado de La Inseguridad Alimentaria En El Mundo 2012*, 30–39. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/017/i3027s/i3027s04.pdf>
- Francescangeli, N., & Mitidieri, M. (2006). El Invernadero Hortícola estructura y manejo de cultivo. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Centro Regional Buenos Aires Norte Estación Experimental Agropecuaria San Pedro*, (Abril).
- Gruber, J. K., Guzmán, J. L., Rodríguez, F., Bordons, C., Berenguel, M., & Sánchez, J. A. (2011). Nonlinear MPC based on a Volterra series model for greenhouse temperature control using natural ventilation. *Control Engineering Practice, 19*(4), 354–366. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.12.004>
- Gu, D. W., Petkov, P. H., & Konstantinov, M. M. (2005). Robust control design with Matlab. In *Soft Computing* (2nd ed.).
- Huertas, L. (2007). Prevenir enfermedades y plagas. El control ambiental en invernaderos: Humedad relativa. *Industria Hortícola, No 203*, 44–47.
- IDEAM. (2019). Evaluación de la radiación global en Colombia. *IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, 2019. Retrieved from <https://feriaexposolar.com/wp-content/uploads/2019/09/Evaluacion-de-la-radiacion-global-en-Colombia.pdf>
- IDEAM. (2020a). Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos. Retrieved from Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) website: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- IDEAM. (2020b). Estudio de caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21135/CARACTERIZACION+CLIMATIC+A+BOGOTA.pdf/d7e42ed8-a6ef-4a62-b38f-f36f58db29aa>
- Iglesias, N. (2006). Producción de hortalizas bajo cubierta Estructura y manejo de cultivo para la Patagonia Norte Publicaciones Regionales. *Boletín de Divulgación Técnica N° 49, 1*(1), 88. Retrieved from <http://www.inta.gov.ar/altovalle>

- INTAGRI S.C. (2020). Importancia de la Radiación Solar en la Producción Bajo Invernadero. Retrieved from <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/importancia-de-la-radiacion-solar-en-la-produccion-bajo-invernadero>
- Ishihara, J. Y., Terra, M. H., & Cerri, J. P. (2015). Optimal robust filtering for systems subject to uncertainties. *Automatica*, *52*(0), 111–117.
- J.Huete, S. . (2020). La condensación en invernaderos. Retrieved from [www.jhuete.com](http://www.jhuete.com)
- Jutinico, A. L., Escalante, F. M., Jaimes, J. C., Terra, M. H., & Siqueira, A. A. G. (2018). Markovian Robust Compliance Control Based on Electromyographic Signals. *Proceedings of the IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, 2018-Augus*, 1218–1223. <https://doi.org/10.1109/BIOROB.2018.8487672>
- Katariya, S. S., Gundal, S. S., Kanawade, M. ., & Mashar, K. (2015). Automation in Agriculture. *International Journal of Recent Scientific Research*, *6*(6), 4454–4456. <https://doi.org/10.1177/003072706500400605>
- Kathore, M., Campo, P., Morari, M., & Nett, C. (1994). Unified framework for the study of anti-windup design. *Automatica*, *30*(12), 1869–1883.
- Koning, A. N. M., & Tsafaras, I. (2017). Real-time comparison of measured and simulated crop transpiration in greenhouse process control. *Acta Horticulturae*, *1170*, 301–307. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.36>
- Lijun, C., Shangfeng, D., Yaofeng, H., & Meihui, L. (2018). Linear Quadratic Optimal Control Applied to the Greenhouse Temperature Hierarchical System. *IFAC-PapersOnLine*, *51*(17), 712–717. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.112>
- Ma, D., Carpenter, N., Maki, H., Rehman, T. U., Tuinstra, M. R., & Jin, J. (2019). Greenhouse environment modeling and simulation for microclimate control. *Computers and Electronics in Agriculture*, *162*(November 2018), 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.013>
- Mahdavian, M., Sudeng, S., & Wattanapongsakorn, N. (2017). Multi-objective optimization and decision making for greenhouse climate control system considering user preference and data clustering. *Cluster Computing*, *20*(1), 835–853. <https://doi.org/10.1007/s10586-017-0772-0>
- Miller, R. H. (2019). Factores bióticos Plagas de la parte aérea. Retrieved October 15,

- 2019, from <http://www.fao.org/3/x8234s/x8234s0a.htm>
- Mohamed, S., & Hameed, I. A. (2018). A GA-Based Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Greenhouse Climate Control System. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 773–779. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.04.009>
- Morari, M. (1993). Some control problem in process industries, essays on control: perspective on theory and applications. *Birkhauser Springer Journal*, 1(1).
- Olivares, A., Castro, E., Peralta, P., Espinoza, F., & Suástegui, C. (2019). Competitividad Organizacional: Estudio de Factores. In E. Qartuppi (Ed.), *Competitividad Organizacional: Estudio de Factores* (Primera ed). <https://doi.org/10.29410/qtp.19.01>
- Pahuja, R., Verma, H. K., & Uddin, M. (2015). Implementation of greenhouse climate control simulator based on dynamic model and vapor pressure deficit controller. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 8(4), 273–288. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2015.04.009>
- Perez, J., & Diaz, M. (2002). Actividades del ICIA en Platanera: Capitulo Aplicaciones de la biotecnología en platanera. *Instituto Canario de Investigaciones Agrarias*, 75–81.
- Poveda, L., & Martínez, J. (2016). *Diseño e implementación de un Control Óptimo LQR con la tarjeta Raspberry Pi*.
- Rios, A., & Garcia, G. (2004). Control mediante compensación de la saturación y de los filtros de detección de fallas. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 25(1), 51–59.
- RMCAB. (2020). Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá. Retrieved from Alcaldía mayor de Bogotá website: <http://201.245.192.252:81/home/map>
- Salazar-Moreno, R., López-Cruz, I. L., & Cruz, A. C. S. (2018). Dynamic energy balance model in a greenhouse with tomato cultivation: Simulation, calibration and evaluation. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 25(1), 45–60. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2018.07.014>
- Salazar-Moreno, R., Mauricio-Perez, A. M., Lopez-Cruz, I. L., & Rojano-Aguilar, A. (2016). Modelo de humedad en un invernadero semicerrado. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 22(1), 27–43. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2015.06.011>
- Senniger irrigation, I. (2020). Instalación del nebulizador fogger. Retrieved from Senniger website: <https://www.irrigaciones.co/nebulizadores/senninger-fogger.html>
- Squeo, F., & León, M. (2007). Transpiración. In *Fisiología Vegetal* (pp. 67–84).
- Su, Y., & Xu, L. (2015). A greenhouse climate model for control design. *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEEIC 2015 -*

- Conference Proceedings*, 47–53. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2015.7165318>
- Su, Y., & Xu, L. (2017). Towards discrete time model for greenhouse climate control. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 10(2), 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2017.01.001>
- Su, Y., Xu, L., & Goodman, E. D. (2018). Control allocation-based adaptive control for greenhouse climate. *International Journal of Systems Science*, 49(6), 1146–1163. <https://doi.org/10.1080/00207721.2018.1440025>
- Su, Y., Xu, L., & Li, D. (2016). Adaptive Fuzzy Control of a Class of MIMO Nonlinear System with Actuator Saturation for Greenhouse Climate Control Problem. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(2), 772–788. <https://doi.org/10.1109/TASE.2015.2392161>
- Terra, M. H., Cerri, J. P., & Ishihara, J. Y. (2014). Optimal robust linear quadratic regulator for systems subject to uncertainties. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(9), 2586–2591. <https://doi.org/10.1109/TAC.2014.2309282>
- van Beveren, P. J. M., Bontsema, J., van Straten, G., & van Henten, E. J. (2015). Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds. *Applied Energy*, 159(2015), 509–519. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.012>
- van Mourik, S., van Beveren, P. J. M., López-Cruz, I. L., & van Henten, E. J. (2019). Improving climate monitoring in greenhouse cultivation via model based filtering. *Biosystems Engineering*, 181, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.03.001>
- Vanthoor, B. (2011). *A model-based greenhouse design method*. Wageningen University.
- Wang, Z., Lam, J., & Liu, X. (n.d.). Exponential filtering for uncertain Markovian jump time-delay systems with nonlinear disturbances. *Circuits and Systems II: Express Briefs IEEE Transactions*, 51(5), 262–268.
- Wang, Z., Liu, Y., & Liu, X. (n.d.). Exponential stabilization of a class of stochastic system with Markovian jump parameters and mode-dependent mixed time-delays. *Automatic Control, IEEE Transactions On*, 55(7), 1653–1662.
- Weather. (2020). The weather channel. Retrieved from Bogotá website: <https://weather.com/es-CO/tiempo/hoy//COXX0004:1:CO>
- Xu, D., Du, S., & van Willigenburg, G. (2019). Double closed-loop optimal control of greenhouse cultivation. *Control Engineering Practice*, 85(September 2018), 90–99.

<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.01.010>

Yaofeng, H. E., Meihui, L., Lijun, C. H. E. N., Xiaohui, Q. I. A. O., & Shangfeng, D. U. (2018). Greenhouse modelling and control based on T-S model. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), 802–806. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.097>