



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



“Modelado del microclima de un invernadero”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería

Presenta:

Ing. Pedro Jesús Verdín Rivera

Director de tesis:

M.C. José Antonio Martínez Rivera

Codirector:

M.C. Eduardo Gamero Inda

Durango, Dgo. México, abril, 2024.



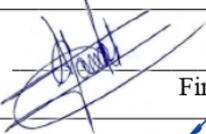


Modelado del microclima de un invernadero

Presenta:

Ing. Pedro Jesús Verdín Rivera

COMITÉ TUTORIAL

<p><u>M.C. José Antonio Martínez Rivera</u> Director</p>	 Firma
<p><u>M.C. Eduardo Gamero Inda</u> Codirector</p>	 Firma
<p><u>Dr. Francisco Javier Godínez García</u> Asesor</p>	 Firma

M.C. Norma Alicia García Vidaña



**Coordinadora del programa de la maestría
en ingeniería.**

Dr. Francisco Javier Godínez García

**Jefe de la División de Estudios de
Posgrado e Investigación**

Durango, Dgo. México

abril de 2024



Victoria de Durango, Dgo., a **16/Mayo/2024**.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI/C/168/24.

ASUNTO: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

C. PEDRO JESÚS VERDÍN RIVERA
No. DE CONTROL G14041191
P R E S E N T E .

De acuerdo al reglamento en vigor y tomando en cuenta el dictamen emitido por el jurado que le fue asignado para la revisión de su trabajo de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería**, esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le autoriza la impresión del mismo, cuyo título es:

“Modelado del microclima de un invernadero”

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E .

Excelencia en Educación Tecnológica®
“La Técnica al Servicio de la Patria”


C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



FJGC/ammc.



Av. Felipe Pescador #1830 Cte. Col. Nueva Viscaya C.P.34080 Durango, Durango.
Tel. (414) 8290900 e-mail: tecna.mx | itdurango.edu.mx



Victoria de Durango, Dgo., a **16 / Mayo / 2024**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 167 / 24.

ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

C. PEDRO JESÚS VERDÍN RIVERA
No. DE CONTROL G14041191
P R E S E N T E .

Con base en el Reglamento en vigor y teniendo en cuenta el dictamen emitido por el Jurado que le fue asignado, se le autoriza a desarrollar el tema de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería** cuyo título es:

"Modelado del microclima de un invernadero"

CONTENIDO:

	RESUMEN
CAPÍTULO I	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II	MARCO TEÓRICO
CAPÍTULO III	MATERIALES Y MÉTODOS
CAPÍTULO IV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN
CAPÍTULO V	CONCLUSIONES
CAPÍTULO VI	REFERENCIAS
	ANEXOS

ATENTAMENTE.

Excelencia en Educación Tecnológica®
"La Técnica al Servicio de la Patria"


C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



FJGG'ammc



Av. Felipe Pescador #1830 Ote. Col. Nueva Vircaya C.P. 34080 Durango, Durango.
Tel. (418) 8290900 e-mail: tecnm.mx | itdurango.edu.mx



Agradecimientos

Me gustaría expresar mi profundo agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por brindarme el apoyo financiero que ha hecho posible la realización y obtención de mis estudios de posgrado.

También me gustaría expresar mi agradecimiento a mis amigos y familiares, gracias a su apoyo incondicional quienes fueron mi apoyo incondicional a lo largo de toda mi trayectoria académica, les estoy profundamente agradecido. Sus palabras de aliento junto a su paciencia fueron fundamentales para sobre llevar y superar cada uno de los desafíos y celebrar las victorias.

Un especial agradecimiento a mis maestros de posgrado y comité educativo por su orientación y apoyo, así como los conocimientos compartidos, particularmente quiero expresar mi agradecimiento a mi director de tesis M.C. José Antonio Martínez Rivera por su dirección y apoyo durante toda esta travesía.

El apoyo en conjunto de CONHACYT, maestros de posgrado, amigos y familiares ha sido el impulso de mi éxito académico, agradezco a todos los que contribuyeron a este logro y estoy emocionado por lo que me depara el futuro.

Resumen

Se analizó el comportamiento dinámico de un invernadero mediante un modelo matemático de dos ecuaciones no lineales acopladas entre sí a través de las variables de temperatura y humedad absoluta internas. Se desarrollo y valido las leyes matemáticas de desacoplamiento del sistema de ecuaciones mediante el modelo de retroalimentación de estado salida-entrada, determinando la función de transferencia de las variables de interés mediante el modelo matemático de forma independiente. Para el caso de la variable de temperatura la función de transferencia obtenida es de primer orden más tiempo muerto, en la variable de la humedad absoluta, la función de transferencia es un integrador más tiempo muerto. Además, se desarrolló el análisis de compensación de tiempo muerto mediante un predictor de Smith considerando la presencia de perturbaciones medibles en ambas ecuaciones. El análisis temporal de los sistemas dinámicos desarrollado mediante simulación valido la operación del sistema de control propuesto con tiempo muerto y perturbaciones medibles, verificando que la respuesta presenta un error en estado estable de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Palabras clave: Análisis termodinámico, Controlador PID, Ecuaciones diferenciales no lineales, Invernadero, Sistemas dinámicos.

Abstract

The dynamic behavior of a greenhouse was analyzed by means of a mathematical model of two nonlinear equations coupled together through the internal temperature and absolute humidity variables. The mathematical laws of decoupling of the system of equations were developed and validated by means of the output-input state feedback model, determining the transfer function of the variables of interest by means of the mathematical model independently. For the case of the temperature variable the transfer function obtained is first order plus dead time, in the case of the absolute humidity variable, the transfer function is an integrator plus dead time. In addition, the dead time compensation analysis was developed by means of a Smith predictor considering the presence of measurable disturbances in both equations. The temporal analysis of the dynamic systems developed by simulation validated the operation of the proposed control system with dead time and measurable disturbances, verifying that the response presents a steady state error of $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Keywords: Thermodynamic analysis, PID controller, Nonlinear differential equations, Greenhouse, Dynamic systems.

Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción	1
Planteamiento del problema.....	2
Objetivos	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
Hipótesis.....	4
Justificación	4
Delimitación del problema.....	6
Estado del arte.....	7
Antecedentes	7
Capítulo 2 Marco teórico	15
2.1 TEORIA DE PID CLASICO	15
2.1.1 Acción integral.....	17
2.1.2 Acción derivada.....	17
Capítulo 3 Materiales y métodos	20
3.1 Modelado matemático de la planta	20
3.1.1 Temperatura:.....	21
3.1.2 Humedad relativa:.....	21
3.1.3 Iluminación:.....	21

3.1.4 Ciclo de vida de las plantas:	22
3.1.5 Dióxido de Carbono (CO_2):.....	22
3.2 Modelo matemático desarrollado.....	24
3.3 Linealización del modelo	27
3.4 El predictor de Smith	42
3.4.1 Propiedades de bucle cerrado del predictor de Smith.....	43
3.4.2 Ventajas y desventajas del predictor de Smith	44
Capítulo 4 Resultados y discusión	48
Simulación en SCI-Lab	49
Capítulo 5 Conclusiones	53
Capítulo 6 Referencias	55
Apéndice A	58
Nomenclatura	60
Apéndice B.....	62

Tabla de Figuras

Figura 1: Diagrama a bloques de un PID clásico	15
Figura 2 Variables dentro de un invernadero	20
Figura 3 Sistema con retardo.....	41
Figura 4 Estructura del predictor de Smith.....	42
Figura 5 El controlador predictor de Smith.....	44
Figura 6 Estructura de control equivalente del Smith Predictor.....	45
Figura 7 Estructura equivalente del predictor de Smith.	46
Figura 8 Estructura del predictor de Smith de dos grados de libertad.....	46
Figura 9 Diagrama a bloques del sistema de control con tiempo muerto.....	49
Figura 10 Respuesta del sistema con la entrada de las perturbaciones.	50
Figura 11 Respuesta del sistema en estado estable.	50
Figura 12 Respuesta del sistema en estado estable con picos.	51
Figura 13 Respuesta del sistema con disminución de los picos	52
Figura 14 Respuesta del sistema en estado estable con variación de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$	52

Capítulo 1 Introducción

Son diversos los factores los que influyen en la actividad agrícola. La agricultura es fundamental para el bienestar humano, es por esto por lo que diversas organizaciones están preocupadas por esta, ya que esta se ha visto afectada por el aumento de las temperaturas anuales, los patrones cambiantes de lluvias, inundaciones y la disminución de las reservas de agua (Khalid et al., 2022). La agricultura, la cría y explotación de animales, el aprovechamiento forestal, la pesca y la caza son las principales actividades económicas en el estado de Durango, aportando un 9.6% del PIB 2020 y un 3.1% en 2021 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2022). El cultivo de semillas oleaginosas, leguminosas y cereales en particular, es una actividad estratégica para el desarrollo rural del estado, ya que tiene un impacto social y económico significativo en la ocupación, autoempleo y generación de empleos en las áreas rurales y periféricas de las concentraciones poblacionales. Sin embargo, dados los retos actuales relacionados con los cambios en los patrones climáticos, la falta de agua, de contaminación y degradación de suelos, la sustentabilidad de dichos cultivos y otras actividades agrícolas se ven sujetas a diferentes tipos de dificultades. La tecnificación de métodos de producción agrícolas pueden ser una alternativa para incrementar la rentabilidad y resiliencia del sector agrícola, tal y como se ha observado en otras regiones del país y del mundo. Dentro de estas alternativas de tecnificación, se han propuesto por ejemplo nuevas técnicas de riego inteligente (Cortés, y otros, 2020) de liberación controlada de agroquímicos, los cuales contribuyen a un mejor aprovechamiento de recursos.

Planteamiento del problema

El cultivo en invernaderos automatizados se ha convertido en una alternativa cada vez más interesante para la elaboración de alimentos y plantas afiligranada debido a su capacidad para controlar las condiciones ambientales y aumentar la eficiencia de la producción. Sin embargo, en el estado de durango, a pesar de las condiciones climatológicas y favorables para la producción agrícola, aún existe una baja adopción de esta tecnología en comparación con otras regiones del país y de otros países.

La falta de acceso a tecnología y capacitación por parte de los productores agrícolas, lo que limita su capacidad para adoptar prácticas más eficientes y rentables en la producción de hortalizas.

Según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), la superficie cultivada en invernaderos en Durango ha venido aumentando en los últimos años, pero aún representa una proporción pequeña del total de superficie cultivada en el estado.

En 2021, la superficie cultivada en invernaderos fue de 327.22 hectáreas de 127,902.48 hectáreas de cielo abierto, lo que representa solo el 0.03% de la superficie cultivada total en Durango (Mexico, 2021).

En estos sentido, en este proyecto de modelado matemático de un invernadero se aborda las variables de proceso de humedad relativa y temperatura internas de un invernadero (Invernaderos tipo capilla o con techumbre curva).

Este proyecto pretende identificar las variables más importantes dentro del invernadero, qué relación tiene cada una de las variables entre sí y obtener su comportamiento mediante una simulación para optimizar y mejorar su rendimiento y disminuyendo costos de operación.

En la actualidad existen una gran variedad de productos para la automatización de los invernaderos, proporcionando una mayor eficacia en el cuidado de los cultivos, reduciendo costos y aumentando la velocidad del trabajo en la que se lleva a cabo. Por lo general estas tecnologías suelen llegar a tener un costo muy elevado para los agricultores, además que, son utilizadas a gran escala.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar y aplicar modelos matemáticos que permitan el uso de variables que afectan dentro del invernadero para simular y optimizar su rendimiento para mejorar el control de las condiciones ambientales y optimizar el rendimiento dentro de un ambiente controlado.

Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo matemático de la temperatura de un invernadero.
- Identificar las variables influyen en la temperatura en el invernadero.
- Desarrollar ecuaciones que describan la dinámica térmica del sistema, teniendo en cuenta la radiación solar y otros factores.
- Desarrollar ecuaciones que relacionen la radiación solar incidente con la geometría y la ubicación geográfica del invernadero.
- Proponer estrategias de gestión basadas en el modelo.

- implementar el modelo para toma de decisiones estratégicas de manejo de invernaderos, como ajustar los programas de riego, ventilación y calefacción para optimizar el rendimiento de los cultivos.
- Simular la humedad relativa.
- Definir variables y parámetros relacionados con la humedad.
- Desarrollar ecuaciones que describan la relación entre la humedad, el riego y la evapotranspiración de las plantas.

Hipótesis

La implementación de un modelo matemático puntual y adecuado a las condiciones específicas de un invernadero permitirá maximizar el control, aumentar su eficiencia energética y mejorar el rendimiento de los cultivos en comparación de los métodos tradicionales aplicados en los invernaderos.

Justificación

El interés académico de los métodos de control automático que utilizan muestreo asincrónico ha visto un aumento significativo en los últimos años, como consecuencia directa de la presencia de redes inalámbricas de sensores (Wireless Sensor Networks (WSN) y sistemas de control basados en redes (Networked Control Systems (NCS), que actualmente se diseñan y aplican en los diferentes ámbitos industriales.

Los efectos de red, que afectan el rendimiento y la estabilidad del lazo de control, son los principales inconvenientes de NCS. Dichos efectos incluyen retrasos y pérdida de paquetes de información, lo que da como resultado una pérdida de sincronización entre el control principal y los diversos agentes o nodos.(García Juárez, 2014)

El diseño de un sistema de control basado en el tiempo considera la respuesta temporal de la planta a una cierta señal de entrada, es decir, la acción de control depende de la dinámica temporal del sistema. Una alternativa a los sistemas de control periódicos, son los sistemas de control basados por eventos, donde la ocurrencia de un evento proporciona una acción de control. Los algoritmos de control basados en eventos pueden ser implementados en sistemas embebidos donde se tiene limitación del número de operaciones a ejecutar y la capacidad de comunicación con otros sistemas es reducida.(Dormido et al., 2008)

Las actividades agropecuarias son cruciales para la población rural, ya que casi una cuarta parte de la población del país, alrededor de 24 millones de personas que viven en zonas rurales de México. En Durango, la población más pobre genera el 42% de sus ingresos familiares de las actividades agropecuarias.

La actividad agrícola se ve afectada por factores tanto internos como externos a la unidad de producción (UP); los productores locales consideran como principales problemas el alto costo de las materias primas y servicios, las pérdidas de cosechas por causas climatológicas, los bajos precios para la comercialización de las cosechas y la falta de educación, acceso y mecanismo de captación de agua es uno de los factores que explican las disparidades en la agricultura. (Hernández Chavarria et al., 2022).

La parte fundamental de un invernadero radica en el desarrollo de los modelos matemáticos para el control de los parámetros, así como, la temperatura y la humedad. La agricultura es altamente vulnerable al cambio climático debido a las incertidumbres irregulares de las altas temperaturas, sequías y precipitaciones.

A lo largo de décadas, se han desarrollado modelos basados en el monitoreo continuo de las variables más importantes, obtenidas de períodos importantes de plantas registradas. La aplicación e implementación de sistemas de riego controlados manualmente han sido una de las prácticas tradicionales más comúnmente usadas, aunque implica una importante inversión de tiempo.

En este contexto la parte fundamental en un invernadero abarca la implementación y mejoramiento continuo de su modelo matemático, por lo cual componen herramientas precisas para mejorar el rendimiento del cultivo y aminorar los efectos negativos provocados por el fenómeno del cambio climático. (Toro Meléndez Sandra Ximena et al., 2019)

Delimitación del problema

La presente investigación busca enfocar el modelado matemático en condiciones prácticas y relevantes para un tipo en específico de invernadero y contexto agrícola, teniendo en cuenta las variables clave, el tipo de clima, la ubicación, escenario operativo y su escalabilidad.

Las simulaciones del sistema de control que se proponen se realizan mediante el software SCILAB, un paquete de uso libre para la propuesta y el diseño de control de un invernadero.

Estado del arte

Antecedentes

En Durango la producción de cultivos agrícolas en invernaderos incrementa el rendimiento y la calidad de la cosecha, mediante el uso de películas plásticas y sistemas de automatización, los invernaderos generan las condiciones óptimas de radiación, temperatura, humedad y dióxido de carbono CO^2 .

Tratándose de la cuarta entidad más extensa del país, con un total de 123,181 Km^2 ubicada al norte de México. Donde su topografía presenta un gran relieve de terreno con una vasta cantidad de suelos y climas, así como, sierra y quebradas en todo el occidente del estado, hasta las llanuras, los llanos y el semi desierto.

El clima y temperatura predominante en el estado se caracteriza por sus diversos microclimas, con un 40% del territorio con clima seco y semiseco, el 34% muestra clima templado subhúmedo, el 14% se encuentra con clima muy seco, el 11% cálido subhúmedo y en el territorio restante el clima es templado húmedo, dando como resultado una temperatura media anual de 17 °C, con una temperatura máxima registrada de 31 °C y una mínima de 1.7 °C.

Durango es uno de los proveedores fundamentales de agua, ya que proporciona un escurrimiento de 11,486 m^3 /año, por lo cual da oportunidad de controlar la eficiencia del uso del agua en los cultivos. Algunos de los cultivos en el estado son frijol, maíz forrajero, avena forrajera, maíz grano, y alfalfa, dando oportunidad a la crianza de diferentes cultivos mediante el uso de las tecnologías en los invernaderos.(Programa de Concurrencia con las Entidades Federativas, 2018)

Debido a los cambios climatológicos del país, surge la necesidad de mejorar los procesos productivos de diferentes tipos de cultivos de una forma automatizada, buscando desarrollar un sistema de control el cual proporcione un monitoreo y control de las variables climáticas dentro del invernadero para mejorar la calidad de la producción y proporcionar seguridad y tranquilidad a los productores, optimizando los procesos productivos y reduciendo costos operativos.

El alcance de este proyecto es proporcionar herramientas para tomar decisiones con información detallada, una gestión eficiente y la optimización en el rendimiento de la producción agrícola en un entorno bajo condiciones controladas, de tal forma que se presente un incremento al valor agregado de los diferentes procesos productivos. Las principales variables de proceso que se deben de controlar en un invernadero son la temperatura interior, humedad relativa, la concentración de CO_2 y la radiación solar, la circulación del aire del exterior al interior será utilizada para prevenir la humedad en el ambiente (Álvarez Pastuña, Mosquera Masabanda, Rojano Tituaña, & Toapanta Ortega, 2020)

Para un riego sostenible se puede tener la información necesaria en tiempo real de la humedad relativa interna de un invernadero y con un control de relación como el goteo, la planta puede recibir de manera inmediata la cantidad de agua necesaria por lo cual se reducirá el desperdicio del agua y a su vez mejorará la calidad de la cosecha (Muñoz Tutillo Tamia Selena, 2021)

Se considera un invernadero inteligente el que puede controlar las principales variables ambientales, tales como, temperatura y humedad entre otros factores ambientales dentro del invernadero que ayuden a favorecer al cultivo proporcionando las condiciones necesarias para un crecimiento óptimo en las diferentes etapas de desarrollo en las diferentes estaciones del año. (Álvarez Pastuña Jorge Enrique et al., 2020)

Los invernaderos permiten el desarrollo de cultivos protegidos donde su principal objetivo es controlar las variables climatológicas que se generan dentro de él, las cuales permitirán alcanzar una vasta producción con un menor costo, en un menor tiempo y evitando los daños por plagas, insectos y algunas variables ambientales exteriores. (Horel Lucio Santizo Velázquez, 2011)

Durante el diseño y la construcción de las diferentes estructuras que existen de los invernaderos se pueden utilizar diversos materiales, comúnmente los más usados son: madera, metal y hormigón. Deberá llevar una cubierta de un material traslucido como el polietileno, poliéster o el policarbonato. (Seuret Jiménez Diego et al., 2020)

Un invernadero facilita el cuidado de los diferentes parámetros ambientales como la temperatura del aire, humedad relativa, porcentaje de CO_2 , radiación solar, etc., para tener las condiciones óptimas mínimas necesarias para la crianza de diversos cultivos. (Toro Meléndez Sandra Ximena et al., 2019)

Barbosa define como un ambiente protegido a las estructuras de algún material como el metal o la madera que están cubiertos con plásticos o cristales en las cuales se pueden cultivar diferentes tipos de cosechas en cualquier época del año. (Pira et al., 2019)

La evapotranspiración dependerá del microclima, incluye la transpiración de la planta y la evaporización del suelo, dando como resultado uno de los principales factores que influyen en la sanidad y desarrollo de los cultivos, la diferencia de presión del vapor (DVP), el cual está relacionado directamente con la evapotranspiración. (Alvarado Zoe et al., 2019)

Para que un invernadero cumpla con el propósito por el cual fue diseñado es fundamental garantizar el microclima con las condiciones adecuadas para el cultivo a sembrar, por lo cual, es necesario contar con un sistema de supervisión y seguimiento el cual indica al operador las condiciones en que se encuentra el sistema. (Tangarife Escobar et al., 2020a)

Existen diferentes modelos de control los cuales son aplicados para controlar las diferentes variables climatológicas que influyen en los invernaderos, los más comúnmente usados son la lógica difusa y lógica clásica. (Álvarez Pastuña Jorge Enrique et al., 2020)

Según (Anaya Solano Daniel Alfonso et al., 2020) la tercera parte de los suelos del planeta no son aptos para ningún tipo de cosecha, es decir, no se pueden desarrollar correctamente, sin embargo, la ciencia opta por modificar las plantas con el fin de lograr hacer más adaptables para cualquier tipo de ambiente.

La implementación de la automatización proporciona todo lo necesario para disminuir el tiempo que se invierte en el cuidado que requiere un cultivo, por desgracia aún es una práctica que no es implementada por una gran parte de los de los agricultores que optan por usar los métodos tradicionales reduciendo la calidad de sus cultivos. (Baron et al., 2020)

La agricultura es muy vulnerable al cambio climático debido al cambio progresivo de temperaturas extremas irregulares, sequías o precipitaciones excesivas. En los invernaderos, los parámetros de temperatura y humedad se han controlado durante décadas mediante modelos matemáticos desarrollados a partir del registro de las variables de interés obtenidos a partir de un sistema de monitoreo continuo de los ciclos vitales de las plantas, con la ayuda de sistemas de riego controlados manualmente, esto también supone una importante inversión de tiempo. La agricultura es muy vulnerable al cambio climático, que trae consigo patrones irregulares y temperaturas

extremas: sequías que provocan la pérdida de tierras cultivadas, precipitaciones excesivas que causan inundaciones y dañan los cultivos. La planificación general de las actividades agrarias se complica, pues, por la imprevisibilidad del clima, que puede acabar ejerciendo presión sobre los sistemas agrarios vulnerables y dañar así la biodiversidad.(Toro Meléndez Sandra Ximena et al., 2019)

Las variables que a controlar en un ambiente protegido son humedad relativa, la temperatura del aire interior, concentración de anhídrido carbónico y la radiación solar, un buen control de estos factores garantizará prevenir enfermedades, debido a que en los excesos de humedad en los periodos fríos pueden ocasionar fuertes enfermedades y/o plagas. por lo cual visto de un punto diferente existen dos tipos de umbral de humedad relativa, uno para el día y otro para la noche. (Álvarez Pastuña Jorge Enrique et al., 2020)

Los especialistas agrícolas de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) consideran que los invernaderos con sistemas de riego automatizados proporcionan una mejor producción y mejoran la rentabilidad y la calidad de los cultivos, dando oportunidad a los agricultores de ejercer otras labores productivas. (Pardo Solano Franklin Vladimir et al., 2020)

En (Pardo Solano & Casa Yanguicela, 2020) se implementó un algoritmo de control en PLC dirigido a la mejora de los ciclos de riego en los diferentes tipos de cosechas, de acuerdo con las diferentes características y necesidades proporcionando una mejora en su producción.

La automatización de invernaderos y los sistemas de riego gestionados con seguimiento continuo se consideran de un aspecto importante en la producción agrícola. Tareas como el uso de mangueras para riego, el uso de depósitos de agua con bombas de distribución, la medición del crecimiento de las plantas mediante modelos matemáticos o su ciclo de vida y la creación de sistemas de monitoreo de tareas en diversos campos plantean desafíos importantes, especialmente cuando es necesario medir o monitorear las plantas. Ante esto, se requiere una modernización integral de los procesos de control y seguimiento de cultivos. La gestión sobre la marcha de condiciones críticas como la temperatura y la humedad es una estrategia clave para mejorar los resultados de producción y reducir costos. La importancia del monitoreo y control radica en la disponibilidad inmediata de información sobre el estado actual de las variables, incluyendo el suelo y el medio ambiente.(Tangarife Escobar et al., 2020a)

En los últimos años, el interés de la investigación académica en los métodos de control automático para el muestreo asincrónico ha crecido significativamente. Este crecimiento puede atribuirse directamente al impacto de las redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Networks, WSN) y los sistemas de control basados en redes (Networked Control Systems NCS), que se están desarrollando e implementando en diversos sectores industriales. Los efectos de la red que afectan el rendimiento y la estabilidad del bucle de control son un desafío importante para NCS.

Estos efectos incluyen retraso y pérdida de paquetes que resultan en la desincronización entre el control principal y varios nodos. Este fenómeno plantea varias cuestiones que requieren especial atención en la investigación y el desarrollo de tecnologías de control para optimizar el rendimiento de los sistemas basados en redes. (García Juárez Moisés, 2014)

Para diseñar sistemas de control basados en el tiempo, se debe considerar la respuesta temporal del dispositivo a señales de entrada específicas. De tal modo, que, las acciones de control están firmemente ligadas a la dinámica temporal del sistema. Una variante a los sistemas de control periódico son los sistemas de control por eventos, en los que la aparición de un evento desencadena acciones de control. Los algoritmos de control basados en eventos se utilizan en sistemas integrados donde la cantidad de operaciones a realizar es muy limitada y la capacidad de comunicación con otros sistemas es reducida. Este enfoque proporciona una visión característica y efectiva de situaciones que requieren una respuesta específica a los diferentes tipos de eventos, en lugar de un monitoreo constante y rutinario. (Dormido et al., 2008)

La automatización de invernaderos y los sistemas de riego gestionados con monitoreo continuo son componentes fundamentales en la producción agrícola. Sin embargo, la gestión y supervisión de muchas empresas y agricultores sigue siendo en gran medida manual. El uso de mangueras para riego artificial, el uso de embalses con bombas de distribución, la evaluación del crecimiento de las plantas mediante modelos matemáticos o según su ciclo de vida, así como la creación de sistemas de monitoreo de tareas en diversos campos plantean importantes desafíos, especialmente en relación con las necesidades de mediciones locales. Por lo tanto, es necesario actualizar los procesos de control y monitoreo de los diversos cultivos y dar prioridad a la acción inmediata en condiciones críticas como la temperatura y la humedad. En este contexto se considera como la clave para lograr resultados y reducir sus costos. (Tangarife Escobar et al., 2020)

La automatización de los invernaderos es de mucha importancia hoy en día, ya que aporta importantes beneficios a los agricultores al aumentar el rendimiento de la diversidad de los cultivos, garantizar su calidad y proteger la vegetación de plagas y enfermedades. Los sistemas de automatización desarrollados e implementados en los invernaderos permiten controlar variables climáticas como la temperatura y la humedad dentro de rangos adecuados para favorecer el correcto y buen desarrollo de las plántulas. En la mayoría de los invernaderos que se utilizan actualmente tienen deficiencias en las variables ambientales, humedad relativa, luminosidad y temperatura interna no están controlados, lo que puede provocar problemas como sequía, baja producción de clorofila y menor crecimiento de las plantas, lo que a su vez afecta a la cosecha. (Ramírez Secundino et al., 2020)

Los invernaderos ayudan al mantenimiento constante de parámetros ambientales como la temperatura, la humedad, la radiación solar, etc. proveyendo condiciones óptimas para el crecimiento de los cultivos al interior o, al menos, proporcionando condiciones favorables al medio ambiente que se encuentra en el exterior. Un invernadero puede considerarse un sistema cerrado capaz de regular diversas variaciones climáticas para garantizar el desarrollo óptimo de la planta huésped. El término control climático se refiere al control de las variables climatológicas que se encuentran dentro del invernadero tales como la humedad y la temperatura. El uso de controladores programables junto con buses de campo y periféricos remotos puede satisfacer los requisitos básicos y óptimos de un sistema de control. Además, el uso de paneles de control y sistemas SCADA facilitan el control y monitoreo del invernadero y el seguimiento de los objetivos planificados. (Calderón Godoy Antonio José et al., 2008)

Capítulo 2 Marco teórico

En esta sección se presentarán algunos conceptos básicos, así como algunas características que deben presentar las técnicas de control de los PID, sus diferentes tipos de implementación y porque son de vital importancia en el desarrollo e implementación de las propuestas de control a desarrollar en este presente proyecto.

2.1 TEORIA DE PID CLASICO

Una de las técnicas de control más populares en la industria es el controlador PID clásico. El nombre se deriva de los términos en inglés Proporcional-Integral-Derivativo, que se refieren a las tres acciones fundamentales que realiza este controlador.

El objetivo principal de esta técnica es responder de forma rápida y precisa a las perturbaciones del sistema.

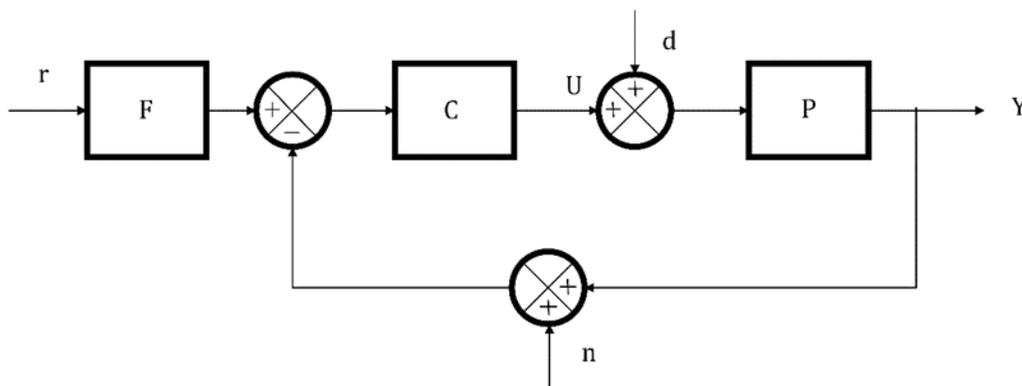


Figura 1: Diagrama a bloques de un PID clásico

Fuente: (Rico & Camacho, 2006)

La acción proporcional del controlador PID es directamente proporcional al error del sistema. La acción proporcional del controlador PID es directamente proporcional al error del sistema. En otras palabras, cuanto mayor sea la discrepancia entre la salida del sistema deseada y la real, mayor será la respuesta proporcional del controlador. Esto ayuda a disminuir el error sistemático y mejorar la respuesta del sistema y mejorar la respuesta del sistema.

La acción integral del controlador PID tiene en cuenta la acumulación de errores pasados. Esto significa que el controlador tiene la capacidad de corregir errores persistentes a lo largo del tiempo. La acción integral se basa en la suma de los errores pasados y se utiliza para eliminar el error en estado estacionario.

La acción derivada del controlador PID tiene en cuenta la tasa de cambio del error. Proporciona una acción de control adicional que es proporcional a la tasa de cambio del error. Esto ayuda a predecir la tendencia futura del error ya tomar medidas para reducir su impacto.

El diseño del controlador PID clásico implica ajustar los tres parámetros: el coeficiente proporcional, el coeficiente integral y el coeficiente derivativo. Estos parámetros se ajustan experimentalmente o utilizando métodos analíticos para lograr un rendimiento óptimo del sistema.

Es importante destacar que el controlador PID tiene limitaciones clásicas y no es adecuado para todos los sistemas. En algunos casos, pueden ser necesarios enfoques de control más avanzados, como controladores basados en modelos o técnicas de control no lineales.

Históricamente, la acción proporcional también se ha denominado banda proporcional (PB).

la comparación es:

$$PB[\%] = \frac{100[\%]}{K_p}$$

El error necesario (medido como un porcentaje de la escala completa) para provocar un cambio del 100 % en la salida del controlador se conoce como banda proporcional.

2.1.1 Acción integral

La acción integral por otro lado resulta en una salida del controlador que es proporcional al error total, indicando que es un modo de control de reacción lenta. Su respuesta de frecuencia de paso bajo también demuestra esta característica. La inversión perfecta de la planta en $\omega = 0$ es posible en gran parte por el modo integral. En presencia de un paso de referencia y una perturbación, esto fuerza el error de estado estable a cero. Cuando se considera por separado, el modo integral adolece de dos inconvenientes importantes: su polo en el origen compromete la estabilidad del bucle y también provoca wind-up, un efecto desfavorable que se produce cuando el actuador está saturado.

2.1.2 Acción derivada

La acción derivada afecta la tasa de cambio del error de control. Como resultado, ante la presencia de errores continuos, es un modo rápido que eventualmente desaparece. Debido a su dependencia de la tendencia del error, en ocasiones se denomina modo predictivo. Cuando se considera por separado, el principal inconveniente del modo derivado es su tendencia a producir grandes señales

de control en respuesta a errores de control de alta frecuencia, como errores provocados por ruido en las mediciones o cambios en el punto de referencia.

Como puede verse en las ecuaciones, normalmente se agrega un polo a la derivada porque la implementación exige que las funciones de transferencia sean apropiadas.

$$C_{PD}(s) = K_p \left(1 + \frac{T_d s}{\tau_D s + 1} \right)$$

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_r s} + \frac{T_d s}{\tau_D s + 1} \right)$$

Los controladores PID y PI se utilizan con frecuencia en el control industrial, por decirlo brevemente.

- Un controlador PID es solo un controlador de segundo orden con un integrador. Sin embargo, los controladores PID se ajustaron históricamente de acuerdo con sus términos P, I, D.
- El término fundamental es el término proporcional, P, que resulta en una acción de control correctivo proporcional al error.
- El término integral, I, proporciona una corrección proporcional a la integral del error. Esto tiene la ventaja de garantizar en última instancia que se utiliza suficiente esfuerzo de control para eliminar el error subsiguiente. Sin embargo, debido al mayor cambio de fase, la acción integral frecuentemente tiene un efecto desestabilizador.

- El término derivativo, D, ofrece una capacidad predictiva que genera una acción de control proporcional a la tasa de cambio del error. El ruido es amplificado por la acción derivativa, que tiende a tener un efecto estabilizador, pero frecuentemente resulta en grandes movimientos de control.
- Los parámetros PID para una aplicación específica se pueden encontrar usando una variedad de técnicas de ajuste empírico.

Capítulo 3 Materiales y métodos

En el presente capítulo se abordan las diferentes ecuaciones elaboradas para la elaboración de la propuesta del sistema de control de un invernadero, se detalla paso a paso el desarrollo de las ecuaciones que contempla las variables que influyen tanto dentro como fuera del invernadero.

También se presenta y se detalla la simulación correspondiente de la propuesta de control y la implementación del predictor de Smith junto al comportamiento del mismo mediante el software de usos libre SCILAB proporcionando graficas del comportamiento del sistema durante el transcurso de un periodo de tiempo.

3.1 Modelado matemático de la planta

El equilibrio entre masas de aire y energía del invernadero es muy importante para la obtención del modelo matemático de la planta. Este modelo revela la complejidad inherente del comportamiento de los invernaderos.

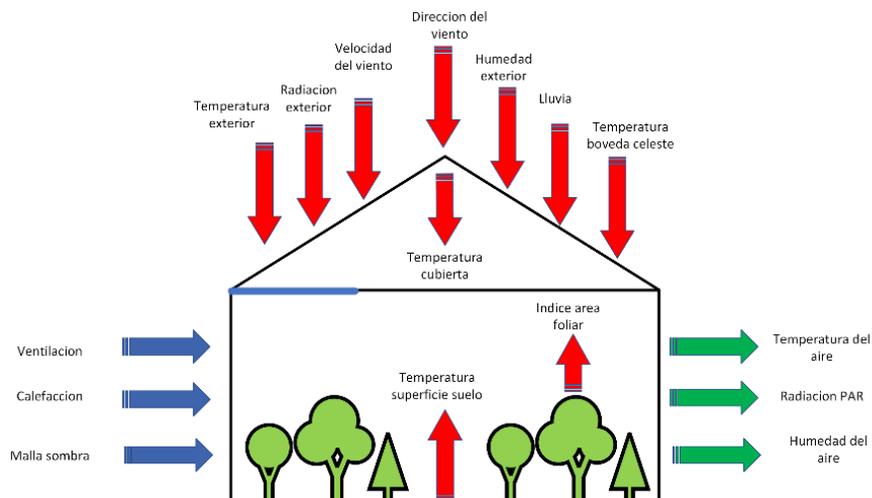


Figura 2 Variables dentro de un invernadero

Fuente: (Diaz & Bulla)

Las variables que intervienen en los invernaderos están conectadas y tienen relaciones complejas que afectan el entorno en el que se desarrollan las plantas. Algunas variables clave son:

3.1.1 Temperatura:

Relación con la luz solar: La temperatura en el invernadero se ve afectada por la cantidad de luz solar que entra en él. Cuanto mayor es la radiación solar, mayor es la temperatura que se suele registrar.

Relación con la humedad: La temperatura también afecta la capacidad del aire para retener la humedad. A medida que aumenta la temperatura, el aire puede retener más humedad.

3.1.2 Humedad relativa:

Relación con la temperatura: La humedad del aire varía con la temperatura, a mayores temperaturas, el aire puede retener más vapor de agua antes de saturarse.

3.1.3 Iluminación:

Relación con la temperatura: La cantidad de luz que ingresa al invernadero afecta a la temperatura interna del mismo.

Relación en el crecimiento de las plantas: La luz que se irradia dentro del invernadero es esencial para el proceso de fotosíntesis y, por ende, afecta directamente en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

3.1.4 Ciclo de vida de las plantas:

La temperatura y la luz: Los requerimientos de la temperatura y la luz que incide dentro del invernadero varían durante todo el ciclo de vida de las plantas, tanto como en las primeras etapas de floración como en las etapas de crecimiento.

3.1.5 Dióxido de Carbono (CO_2):

Relación con la fotosíntesis: El dióxido de carbono es esencial en las plantas durante la fotosíntesis. La concentración de CO_2 dentro del invernadero puede afectar o beneficiar en el proceso de fotosíntesis y, por consiguiente, en el desarrollo del crecimiento de las plantas.

Las relaciones entre las variables que intervienen dentro del invernadero son complejas, tener un cambio en alguna de las variables puede tener efectos directos o indirectos en otras.

Un modelo sencillo no lineal de calentamiento-enfriamiento de un invernadero (Albright, Gates, Arvanitis, & Drysdale, 2001), puede obtenerse teniendo en cuenta las ecuaciones diferenciales que rigen el calor y el vapor de agua en el interior del invernadero. Estas ecuaciones diferenciales son las siguientes:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{\rho C_p V} [q_h(t) + S_i(t) - \lambda q_f(t)] - \frac{\dot{V}(t)}{V} [T_{in}(t) - T_{out}(t)] - \frac{UA}{\rho C_p V} [T_{in}(t) - T_{out}(t)]$$

(3.1)

$$\frac{dW_{in}}{dt} = \frac{1}{\rho V} q_f + \frac{1}{\rho V} E(S_i(t), W_{in}(t)) - \frac{\dot{V}(t)}{\rho V} [w_{in}(t) - w_{out}(t)] \quad (3.2)$$

Donde:

$T_{in}(t)$ Temperatura de interior del invernadero °C

$T_{out}(t)$ Temperatura de exterior del invernadero °C

V Volumen de invernadero m^3

UA Coeficiente de transferencia de calor J/s

ρ Densidad del aire Kg/m^3

C_p Calor específico del aire $J * Kg^{-1} * K^{-1}$

q_h Calor proporcionado al invernadero por el sistema de calefacción °C

S_i Energía solar radiante interceptada por invernadero W/m^2

q_f Capacidad de agua del sistema de vaporización N/m^2

λ Calor latente de vaporización J/Kg

\dot{V} Razón de ventilación Kgf/m^3

w_{in}, w_{out} Razón de humedad absoluta interior y exterior respectivamente g/m^3

$E(S_i, W_i)$ Razón de evapotranspiración de las plantas L/m^2

3.2 Modelo matemático desarrollado

Para lograr la linealización del modelo matemático, se inicia con la condición inicial de $q_h = 0$.

La ecuación 3.1 se transforma en la siguiente expresión:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{\rho C_p V} [S_i(t) - \lambda q_f(t)] - \frac{\dot{V}(t)}{V} [T_{in}(t) - T_{out}(t)] - \frac{UA}{\rho C_p V} [T_{in}(t) - T_{out}(t)] \quad (3.3)$$

En un primer enfoque, la tasa de evapotranspiración se atribuye a la energía solar radiante interceptada por el invernadero, lo cual se expresa mediante la siguiente relación (Albright, Gates, Arvanitis, & Drysdale, 2001):

$$E(S_i(t), W_{in}(t)) = \frac{\alpha}{\lambda} S_i(t) - \beta T w_{in}(t) \quad (3.4)$$

Donde:

α coeficiente que involucra el área del invernadero

βT coeficiente general que involucra otras constantes termodinámicas (movimiento del aire, etc.)

Definiendo las variables de estado como la temperatura y la humedad absoluta dentro del invernadero, representadas por $x_1(t)$ y $x_2(t)$ respectivamente, y las variables de control como la tasa de ventilación y la capacidad de vaporización de agua del sistema de humidificación,

denotadas por $u_1(t)$ y $u_2(t)$ respectivamente; la radiación solar interceptada por el invernadero, la temperatura externa y la humedad absoluta externa se consideran disturbios, representados por $v_1(t) \forall i = 1,2,3$ en el modelo matemático. Las ecuaciones 3.1 y 3.2 pueden ser formuladas en forma de espacio de estado mediante el siguiente procedimiento.

La primera ecuación en espacio de estado se genera de la siguiente forma, recordando que la ec.3.1 se puede expresar como:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = -\frac{UA}{\rho C_p V} T_{in}(t) - \frac{1}{V} T_{in}(t) \dot{V} - \frac{\lambda}{\rho C_p V} q_f + \frac{1}{\rho C_p V} S_i(t) + \frac{UA}{\rho C_p V} T_o(t) + \frac{\dot{V}(t)}{V} T_o(t) \quad (3.5)$$

Se hacen las siguientes ecuaciones:

$$\dot{x}_1(t) = \frac{dT_{in}}{dt} \quad (3.6)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{dW_{in}}{dt} \quad (3.7)$$

$$u_1(t) = \dot{V}(t) \quad (3.8)$$

$$u_2(t) = \dot{q}_f(t) \quad (3.9)$$

$$v_1(t) = S_i(t) \quad (3.10)$$

$$v_2(t) = T_o(t) \quad (3.11)$$

Es decir, la ec. 3.5 en forma de espacio de estado se transforma en la siguiente expresión:

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{UA}{\rho c_p V} x_1(t) - \frac{1}{V} x_{in}(t) u_1(t) - \frac{\lambda}{\rho c_p V} + \frac{1}{\rho c_p V} u_1(t) + \frac{UA}{\rho c_p V} u_2(t) + \frac{1}{V} u_1(t) u_2(t)$$

(3.12)

Para generar la segunda ecuación de espacio de estado, partimos de la siguiente expresión:

$$\frac{dW_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho V} q_f(t) + \frac{1}{\rho V} \left[\frac{\alpha}{\lambda} S_i(t) - \beta T w_i(t) \right] - \frac{\dot{V}(t)}{\rho V} w_{in}(t) + \frac{\dot{V}(t)}{\rho V} w_o(t) \quad (3.13)$$

Distribuyendo el producto:

$$\frac{dW_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho V} q_f(t) + \frac{1}{\rho V} + \frac{\alpha}{\rho V \lambda} S_i(t) - \frac{\beta T}{\rho V} w_i(t) - \frac{\dot{V}(t)}{\rho V} w_{in}(t) + \frac{\dot{V}(t)}{\rho V} w_o(t)$$

Sustituyendo las variables de estado correspondientes:

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\beta T}{\rho c_p V} x_2(t) - \frac{1}{\rho V} u_2(t) \frac{\alpha}{\lambda \rho V} u_1(t) - \frac{1}{\rho V} x_2(t) u_1(t) + \frac{1}{\rho V} u_1(t) u_3(t) \quad (3.14)$$

Reuniendo ambas ecuaciones de estado:

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{UA}{\rho C_p V} x_1(t) - \frac{1}{V} x_1(t) u_1(t) - \frac{\lambda}{\rho C_p V} + \frac{1}{\rho C_p V} u_1(t) + \frac{UA}{\rho C_p V} u_2(t) + \frac{1}{V} u_1(t) u_2(t)$$

(3.15)

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\beta T}{\rho C_p V} x_2(t) - \frac{1}{\rho V} u_2(t) \frac{\alpha}{\lambda \rho V} u_1(t) - \frac{1}{\rho V} x_2(t) u_1(t) + \frac{1}{\rho V} u_1(t) u_3(t) \quad (3.16)$$

Se observa que las ecuaciones 3.15 y 3.16 constituyen un sistema no lineal, que relaciona la humedad absoluta y la temperatura a través de las propiedades del aire del interior de un invernadero las cuales se encuentran altamente acopladas.

3.3 Linealización del modelo

Teniendo en cuenta que los sistemas no lineales pueden ser linealizados y desacoplados de manera global mediante un esquema de retroalimentación (ver apéndice A) se obtiene lo siguiente:

$$u_1 = \frac{\rho C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T + \lambda V \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w - (\alpha + 1) v_1 - U A v_2}{\rho C_p (v_2 - x_1) + \lambda (v_3 - x_2)}$$

u_2

$$= \frac{(\rho C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T - v_1 - U A v_2)(x_2 - v_3) + \rho C_p V (v_2 - x_1) \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w + \frac{\rho \alpha C_p}{\lambda} (x_1 - v_2) v_1}{C_p p (v_2 - x_1) + \lambda (v_3 - x_2)}$$

$$\Delta = \rho C_p (v_2 - x_1) + \lambda (v_3 - x_2)$$

Evaluando la ecuación 3.15 con u1 y u2 obtenemos

$$\frac{x_1(C_p V \overline{K_T U_T} \rho + V \overline{K_w U_w} \lambda + v_1(-\alpha - 1) - UA v_2)}{V(C_p(v_2 - x_1)\rho + (v_3 - x_2)\lambda)}$$

$$\frac{\lambda((x_2 - v_3)(C_p V \overline{K_T U_T} \rho - UA v_2 - v_1) + \frac{C_p v_1 (x_1 - v_2)\rho\alpha}{\lambda} + C_p V \overline{K_w U_w}(v_2 - x_1)\rho)}{C_p V \rho(C_p(v_3 - x_2)\lambda)}$$

$$\left((C_p^2 u_1 v_2 + C_p^2 V \overline{K_T U_T})x_1 - C_p^2 u_1 v_2^2 \right) \rho^2 + \left((C_p u_1 v_2 + C_p V \overline{K_T U_T})x_2 + \right.$$

$$\left. (-C_p u_1 v_2 - C_p V \overline{K_T U_T})v_3 + C_p V \overline{K_w U_w} v_2 \right) \lambda - C_p v_1 v_2 \alpha - C_p UA x_1^2 +$$

$$C_p UA v_2 x_1 - C_p UA v^2 - C_p v_1 v_2 \left) \rho + (UA v_3 x_1 - UA x_1 x_2) \lambda \right) / \left((C_p^2 V x_1 - \right.$$

$$\left. C_p^2 V v_2) \rho^2 + (C_p V x_2 - C_p V v_3) \lambda \rho \right)$$

simplificando

$$\dot{x}_1(t) = \frac{C_p V \overline{K_T U_T} - UA x_1}{\rho C_p V}$$

$$\dot{x}_1(t) = \frac{-UA}{\rho C_p V} x_1(t) + \widetilde{K_T U_T}$$

$$s x_1(s) - x(0) = \frac{-UA}{\rho C_p V} x_1(s) + \widetilde{K_T U_T}(s)$$

$$s x_1(s) + \frac{UA}{\rho C_p V} x_1(s) = \widetilde{K_T U_T}(s)$$

$$\frac{s \rho C_p V x_1(s) + UA x_1(s)}{\rho C_p V} = \widetilde{K_T U_T}(s)$$

$$\frac{(s \rho C_p V + UA) x_1(s)}{\rho C_p V} = \widetilde{K_T U_T}(s)$$

$$x_1(s) = \frac{\rho C_p V \widetilde{K_T U_T}(s)}{s \rho C_p V + UA}$$

$$x_1(s) = \frac{\rho C_p V \widetilde{K_T U_T}(s)}{\frac{UA(s \rho C_p V + UA)}{UA}}$$

$$x_1(s) = \frac{\frac{\rho C_p V \widetilde{K_T}}{UA} \widetilde{U_T}(s)}{\frac{s \rho C_p V}{UA} + 1}$$

Donde:

$$K_T = \frac{\rho C_p V \widetilde{K}_T}{UA} \quad \tau_T = \frac{\rho C_p V}{UA}$$

$$x_1(s) = \frac{K_T \widetilde{U}_T(s)}{\tau_T s + 1} \quad x_1(s) = \frac{K_T e^{-Lns}}{\tau_T s + 1}$$

Evaluando la ecuación 3.16 con u_1 y u_2 obtenemos y simplificando:

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\beta T}{\rho C_p V} x_2(t) - \frac{1}{\rho V} u_2(t) \frac{\alpha}{\lambda \rho V} u_1(t) - \frac{1}{\rho V} x_2(t) u_1(t) + \frac{1}{\rho V} u_1(t) u_3(t)$$

Evaluando la ecuación con u_1 y u_2 :

$$\frac{x_2(C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T \rho V \widetilde{K}_W \widetilde{U}_W \lambda v_1 (-\alpha - 1) - UA v_2)}{V \rho (C_p (v_2 - x_1) \rho + (v_3 - x_2) \lambda)} - \frac{v_3 (C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T \rho + K_W U_w + v_1 (-\alpha - 1) - UA v_2)}{V \rho (C_p (v_2 - x_1) \rho + (v_3 - x_2) \lambda)}$$

$$\frac{(x_2 - v_3) (C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T \rho - UA v_2 - v_1) + \frac{C_p v_1 (x_1 - v_2) \alpha \rho}{\lambda} + C_p V \widetilde{K}_W \widetilde{U}_W (v_2 - x_1) \rho}{V \rho (C_p (v_2 - x_1) \rho + (v_3 - x_2) \lambda)} - \frac{v_1 \alpha}{V \lambda \rho} - \frac{x_2 \beta}{V \rho}$$

Simplificando la ecuación

$$\dot{x}_2 = -\frac{x_2 \beta + V \widetilde{K_w U_w}}{V \rho}$$

$$s x_2(s) - s x(0) = -\frac{x_2(s) \beta + V \widetilde{K_w U_w}(s)}{V \rho}$$

$$s x_2(s) = -\frac{x_2(s) \beta + V \widetilde{K_w U_w}(s)}{V \rho}$$

$$s x_2(s) + \frac{x_2(s) \beta_T V}{V \rho} = \frac{\widetilde{K_w U_w}(s)}{\rho}$$

$$\left[\frac{s \rho V + \beta_T}{\rho V} \right] x_2(s) = \frac{\widetilde{K_w U_w}(s)}{\rho}$$

$$x_2(s) = \frac{\rho V \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w(s)}{\rho(s \rho V + \beta_T)}$$

$$x_2(s) = \frac{V \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w(s)}{s \rho V + \beta_T}$$

$$x_2(s) = \frac{V \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w(s)}{\frac{\beta_T}{\beta_T} (s \rho V + \beta_T)}$$

$$K_w = \frac{V}{\beta_T} \widetilde{K}_w \quad ; \quad T_w = \frac{\rho V}{\beta_T}$$

$$x_2(s) = \frac{K_w e^{-Lns}}{\tau_w s + 1} \widetilde{U}_w(s)$$

Verificación de las leyes de control

Recordando que el modelo matemático de la planta está dado por las siguientes expresiones:

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{UA}{\rho c_p V} x_1(t) - \frac{1}{V} x_1(t) u_1(t) - \frac{\lambda}{\rho c_p V} + \frac{1}{\rho c_p V} u_1(t) + \frac{UA}{\rho c_p V} u_2(t) + \frac{1}{V} u_1(t) u_2(t)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\beta T}{\rho c_p V} x_2(t) - \frac{1}{\rho V} u_2(t) \frac{\alpha}{\lambda \rho V} u_1(t) - \frac{1}{\rho V} x_2(t) u_1(t) + \frac{1}{\rho V} u_1(t) u_3(t)$$

Sustituyendo las leyes de control en el espacio de estado no lineal:

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{UA}{\rho C_p V} x_1(t) - \frac{1}{V} x_1(t) \left[\frac{C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T + \lambda V \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w - (\alpha + 1)v_1(t) - UA v_2(t)}{\Delta(t)} \right] \pm$$

$$\frac{\lambda}{\rho C_p V} \left[\frac{(C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T - v_1(t) - UA v_2(t))(v_3(t) - x_2(t)) + C_p V (v_2(t) - x_1(t)) \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w + \frac{\rho \alpha C_p}{\lambda} (v_2(t) - x_1(t)) v_1(t)}{\Delta(t)} \right] +$$

$$\frac{1}{\rho C_p V} v_1(t) + \frac{UA}{\rho C_p V} v_2(t) + \frac{1}{V} v_2(t) \left[\frac{C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T + \lambda V \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w}{\Delta(t)} - + \frac{(\alpha + 1)v_1(t) - UA v_2(t)}{\Delta(t)} \right]$$

En donde se define:

$$\Delta(t) = \rho C_p [v_2(t) - x_1(t)] + \lambda [v_3(t) - x_2(t)]$$

Agrupando términos:

$$\dot{x}_1(t) = \left[\frac{\rho C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T + \lambda V \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w - (\alpha + 1)v_1(t) - UA v_2(t)}{\Delta(t)} \right]$$

$$\left(\frac{1}{V}v_2(t) - \frac{1}{V}x_1(t)\right) + \frac{1}{\rho C_p V} [v_1(t) + UAv_2(t) - UAx_1(t)]$$

$$- \frac{\lambda}{\rho C_p V} \left[\frac{\rho C_p V (v_2(t) - x_1(t)) \widetilde{K_w U_w} + (\rho C_p V \widetilde{K_T U_T} - v_1(t) - UAv_2(t)) * (x_2(t) - v_3(t))}{\Delta(t)} \right.$$

$$\left. + \frac{\frac{\rho \alpha C_p}{\lambda} (v_2(t) - x_1(t)) v_1(t)}{\Delta(t)} \right]$$

Lo anterior se puede expresar como:

$$\dot{x}_1(t) = \left[\frac{\rho C_p V \widetilde{K_T U_T} + \lambda V \widetilde{K_w U_w} - (\alpha + 1)v_1(t) - UAv_2(t)}{\Delta(t)} \right] \left(\frac{1}{V}v_2(t) - \frac{1}{V}x_1(t) \right)$$

$$+ \frac{1}{\rho C_p V \Delta(t)}$$

$$* (\rho C_p [v_2(t) - x_1(t)] + \lambda [v_3(t) - x_2(t)]) (v_1(t) + UAv_2(t) - UAx_1(t))$$

$$- \lambda \left[(\rho C_p V \widetilde{K_T U_T} - v_1(t) - UAv_2(t)) (v_3(t) - x_2(t)) \right.$$

$$\left. + \rho C_p V (v_2(t) - x_1(t)) \widetilde{K_w U_w} + \frac{\rho \alpha C_p}{\lambda} (v_2(t) - x_1(t)) v_1(t) \right]$$

Asignando común denominador:

$$\dot{x}_1(t) = \frac{1}{\rho C_p V \Delta(t)} * \left(\left[\rho C_p V \left(\rho C_p V \widetilde{K_T U_T} [v_2(t) - x_1(t)] + \lambda \widetilde{K_w U_w} [v_2(t) - x_1(t)] \right. \right. \right. \\ \left. \left. \pm (\alpha + 1) v_1(t) \left[\frac{1}{V} (v_2(t) - x_1(t)) \right] - U A v_2(t) \left(\frac{1}{V} (v_2(t) - x_1(t)) \right) \right] \right) \\ \left. + [\rho C_p V [v_2(t) - x_1(t)] + v_2(t) - x_1(t)] [v_1(t) + U A v_2(t) - U A x_1] \right. \\ \left. \pm \lambda \left[(\rho C_p V \widetilde{K_T U_T} - v_1(t) - U A v_2(t)) (x_2(t) - v_3(t)) \right. \right. \\ \left. \left. + \rho C_p V (v_2(t) - x_1(t)) \widetilde{K_w U_w} \right] + \frac{\rho \alpha C_p}{\lambda} (v_2(t) - x_1(t)) v_1(t) \right)$$

Simplificando:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) = & \frac{1}{\rho C_p V \Delta(t)} \\ & * (-\rho C_p \alpha v_1(t) * [v_2(t) - x_1(t)] - \rho C_p v_1(t) * [v_2(t) - x_1(t)] + \rho C_p v_1(t) \\ & * [v_2(t) - x_1(t)] + \lambda v_1(t) * [v_3(t) - x_2(t)] + \lambda U A v_2(t) * [v_3(t) - x_2(t)] \\ & - \lambda U A x_1(t) * [v_3(t) - x_2(t)] - \lambda \rho C_p V \widehat{K_T U_T} * [v_3(t) - x_2(t)] + \lambda v_1(t) \\ & * [v_3(t) - x_2(t)] + \lambda U A v_2(t) * [v_3(t) - x_2(t)] - \rho C_p \alpha v_1(t) * [v_2(t) - x_1(t)]) \end{aligned}$$

Entonces se puede concluir que:

$$\dot{x}_1(t) = 0$$

Que es lo que se quería demostrar.

Ahora sustituyendo para $\dot{x}_2(t)$, recordando que:

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\beta T}{\rho C_p V} x_2(t) - \frac{1}{\rho V} u_2(t) \frac{\alpha}{\lambda \rho V} u_1(t) - \frac{1}{\rho V} x_2(t) u_1(t) + \frac{1}{\rho V} u_1(t) u_3(t)$$

Sustituyendo las leyes de control de $u_1(t)$ y $u_2(t)$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2(t) = & \frac{\beta_T}{\rho V} x_2(t) + \frac{\alpha}{\lambda \rho V} v_1(t) + \frac{1}{\rho V \Delta(t)} \\ & * \left(\left(\rho C_p V \widetilde{K}_T \overline{U}_T - v_1(t) - U A v_2(t) \right) * (v_3(t) - x_2(t)) \right. \\ & + \rho C_p V \left((v_2(t) - x_1(t)) \widetilde{K}_w \overline{U}_w + \frac{\rho \alpha C_p}{\lambda} (v_2(t) - x_1(t)) v_1(t) \right) v_1(t) \\ & \left. * \left(\frac{1}{\rho V} v_3(t) - \frac{1}{\rho V} x_2(t) \right) \right) \end{aligned}$$

Simplificando:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2(t) = & \frac{\beta_T}{\rho V} x_2(t) + \frac{\alpha}{\lambda \rho V} v_1(t) + \frac{1}{\rho V \Delta(t)} \\ & * \left(\left(\rho C_p V \widetilde{K}_T \overline{U}_T - v_1(t) - U A v_2(t) \right) * (v_3(t) - x_2(t)) \right. \\ & + \rho C_p V \left((v_2(t) - x_1(t)) \widetilde{K}_w \overline{U}_w + \frac{\rho \alpha C_p}{\lambda} (v_2(t) - x_1(t)) v_1(t) \right) v_1(t) + \frac{1}{\rho V \Delta(t)} \\ & \left. * (v_3(t) - x_2(t)) * \left(\rho C_p V \widetilde{K}_T \overline{U}_T + \lambda \widetilde{K}_w \overline{U}_w - (\alpha + 1) v_1(t) - U A v_2(t) \right) \right) \end{aligned}$$

Sustituyendo los dos últimos términos:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2(t) = & \frac{\beta_T}{\rho V} x_2(t) + \frac{\alpha}{\lambda \rho V} v_1(t) + \frac{1}{\rho V \Delta(t)} \\ & * \left(\left(\rho C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T - v_1(t) - U A v_2(t) \right) * \left(v_3(t) - x_2(t) \right) \right. \\ & + \rho C_p V \left(\left(v_2(t) - x_1(t) \right) \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w + \frac{\rho \alpha C_p}{\lambda} \left(v_2(t) - x_1(t) \right) v_1(t) \right) v_1(t) \\ & \left. + \left(v_3(t) - x_2(t) \right) * \left(\rho C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T + \lambda \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w - (\alpha + 1) v_1(t) - U A v_2(t) \right) \right) \end{aligned}$$

Asignando común denominador:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_2(t) = & \frac{1}{\lambda \rho V \Delta(t)} \\
 & * \left(-\beta_T x_2(t) \lambda [\rho C_p (v_2(t) - x_1(t)) + \lambda (v_3(t) - x_2(t))] + \alpha v_1(t) \right. \\
 & * [\rho C_p (v_2(t) - x_1(t)) + \lambda * (v_3(t) - x_2(t))] \\
 & + \lambda \left[(\rho C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T - v_1(t) - U A v_2(t)) * (v_3(t) - x_2(t)) \right] + \lambda \rho C_p V \\
 & * (v_3(t) - x_2(t)) \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w + \rho C_p v_1(t) (v_2(t) - x_1(t)) + \lambda * (v_3(t) - x_2(t)) \\
 & * \left. \rho C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T + \lambda V \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w - (\alpha + 1) v_1(t) - U A v_2(t) \right)
 \end{aligned}$$

Simplificando:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_2(t) = & \frac{1}{\lambda \rho V \Delta(t)} \\
 & * \left(-\beta_T x_2(t) \lambda \rho C_p * (v_2(t) - x_1(t)) - \beta_T x_2(t) \lambda^2 (v_3(t) - x_2(t)) \right) \\
 & + \alpha v_1 \rho C_p (v_2(t) - x_1(t)) + \alpha v_1(t) \lambda (v_3(t) - x_2(t)) \\
 & + \lambda \rho C_p V \overline{K_T U_T} (v_3(t) - x_2(t)) - U A v_2(t) \lambda (v_3(t) - x_2(t)) \\
 & + \lambda \rho C_p V (v_2(t) - x_1(t)) \overline{K_w U_w} + \alpha \rho C_p (v_2(t) - x_1(t)) v_1(t) \\
 & + \lambda \rho C_p V \overline{K_T U_T} (v_3(t) - x_2(t)) + \lambda^2 V \overline{K_w U_w} (v_3(t) - x_2(t)) - \lambda \\
 & * (\alpha + 1) v_1(t) (v_3(t) - x_2(t)) - \lambda U A v_2(t) (v_3(t) - x_2(t))
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, $\dot{x}_2(t) = 0$, que es el resultado deseado.

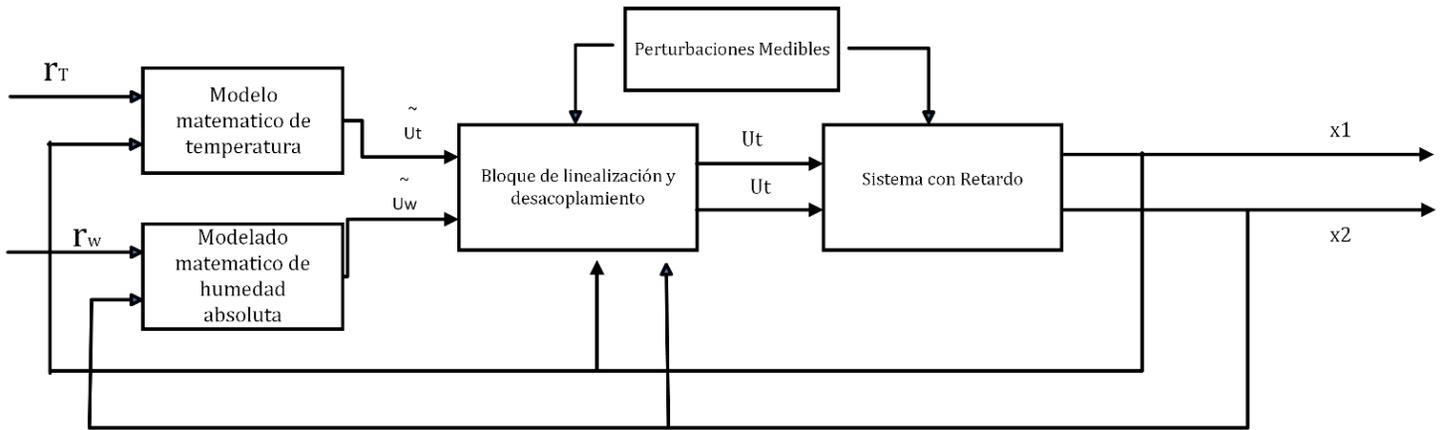


Figura 3 Sistema con retardo.
Fuente: (Albright, Gates, Arvanitis, & Drysdale, 2001)

Para lograr un comportamiento aceptable y confiable del sistema de control de acuerdo con algunos criterios de rendimiento predeterminados, el ajuste del controlador, en particular para los controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID), identifica el ajuste de sus parámetros (K_c, T_i, T_d). En otras palabras, el ajuste del controlador tiene como objetivo modificar los parámetros del controlador para que el sistema de control reaccione adecuadamente a las perturbaciones y cambios en el valor deseado, así como para cumplir con los requisitos de rendimiento del lazo de control.

Algunas de las técnicas de ajuste más populares para controladores PID que actúan como reguladores e incorporan un modelo de proceso. (Ruíz, 2002)

3.4 El predictor de Smith

La estructura del predictor de Smith, que se muestra en la fig.4, se divide en dos partes fundamentales: El controlador primario $C(s)$ y su estructura predictora, el controlador $C(s)$ suele ser un Proporcional Integrador Derivativo, pero también puede ser un controlador de orden superior. (J.E. Normey-Rico, E.F. Camacho, 2007)

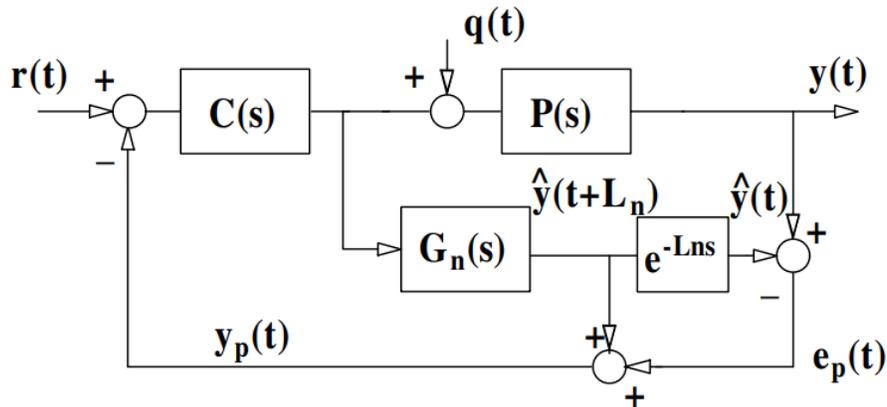


Figura 4 Estructura del predictor de Smith.

Fuente: (J.E. Normey-Rico, E.F. Camacho, 2007)

El predictor consiste en un modelo de un sistema sin tiempo muerto $G_n(s)$, conocido en algunas literaturas como modelo rápido y un modelo de tiempo muerto e^{-Lns} . Por tanto, el proceso completo es $P_n(s) = C(s) e^{-Lns}$. El modelo rápido $G_n(s)$ se aplica para calcular la predicción de bucle abierto. Para tener en cuenta los errores de modelado, la diferencia entre el proceso y su salida, incluido el tiempo muerto, se agrega a la predicción de bucle abierto.

3.4.1 Propiedades de bucle cerrado del predictor de Smith

Para el caso nominal (sin error de modelado), la estructura del predictor de Smith tiene tres características fundamentales:

1.- Compensación por tiempo muerto

La ecuación característica de lazo cerrado carece de tiempo muerto, de la figura 4 del diagrama a bloques de sistema con retardo, se observa que si $q(t) = 0$ y $G_n(s)e^{-Ln_s} = G_n(s) e^{-Ln_s}$ la señal de error $e_p(t)$ es cero.

2.-prediccion

La señal de realimentación $y_p(t)$ generada por el predictor en el diagrama de bloques del sistema retardado de la figura 4 prevé la salida del sistema en caso de que cambie el set-point, pero no en caso de perturbaciones.

3.- Compensación Dinámica Ideal

La planta está implícitamente dividida en dos partes por la estructura predictora de Smith: $G_n(s)$, que ocasionalmente puede ser invertible, y e^{-Ln_s} , que no es invertible debido al tiempo muerto. Usando este concepto, es posible aplicar un controlador "ideal" (uno con ganancia infinita).

3.4.2 Ventajas y desventajas del predictor de Smith

Al analizar el predictor de Smith en esta sección, se hacen las siguientes consideraciones importantes:

- Respuestas al seguimiento de referencias y rechazo de perturbaciones.
- La robustez.
- El caso general de procesos inestables.
- La instancia específica de los procesos integradores.

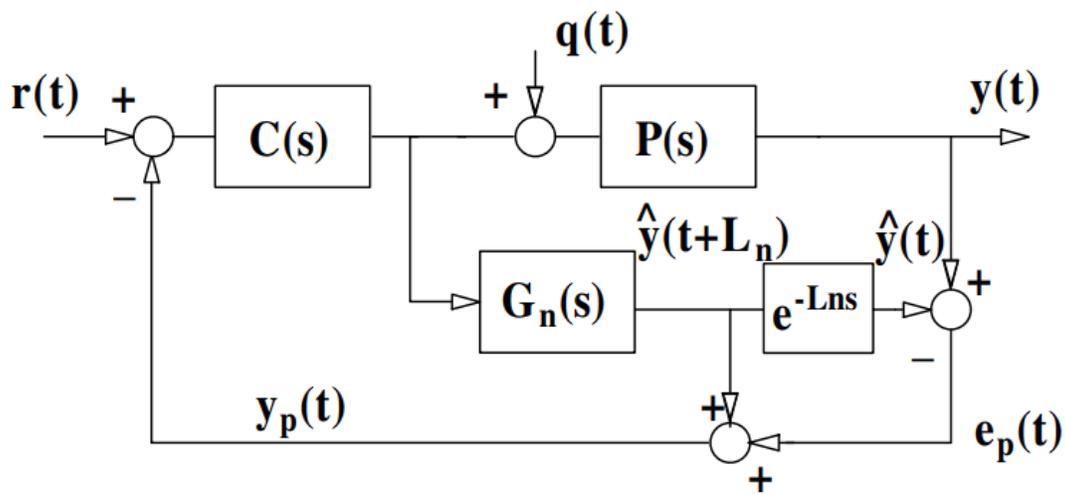


Figura 5 El controlador predictor de Smith.

Fuente: (J.E. Normey-Rico, E.F. Camacho, 2007)

e^{-Ln_s} = Tiempo muerto

$$P_n(s) = G_n(s)e^{-Ln_s}$$

$C(s)$ = Controlador

Considerando

$$P(s) = P_n(s) \quad G(s) = G_n(s) \quad L = L_n$$

Se supone que $q(t) = 0$

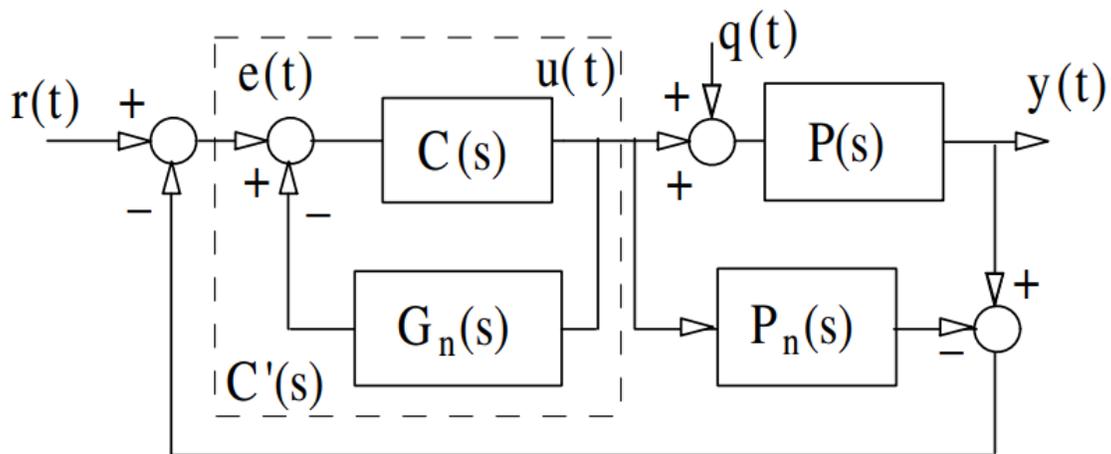


Figura 6 Estructura de control equivalente del Smith Predictor.
Fuente: (J.E. Normey-Rico, E.F. Camacho, 2007)

$$\tilde{C}(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)G_n(s)}$$

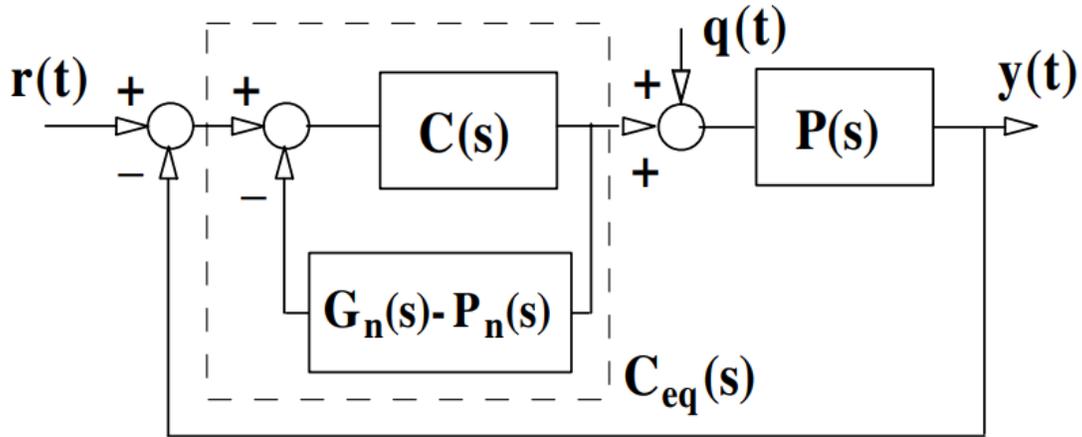


Figura 7 Estructura equivalente del predictor de Smith.
Fuente: (J.E. Normey-Rico, E.F. Camacho, 2007)

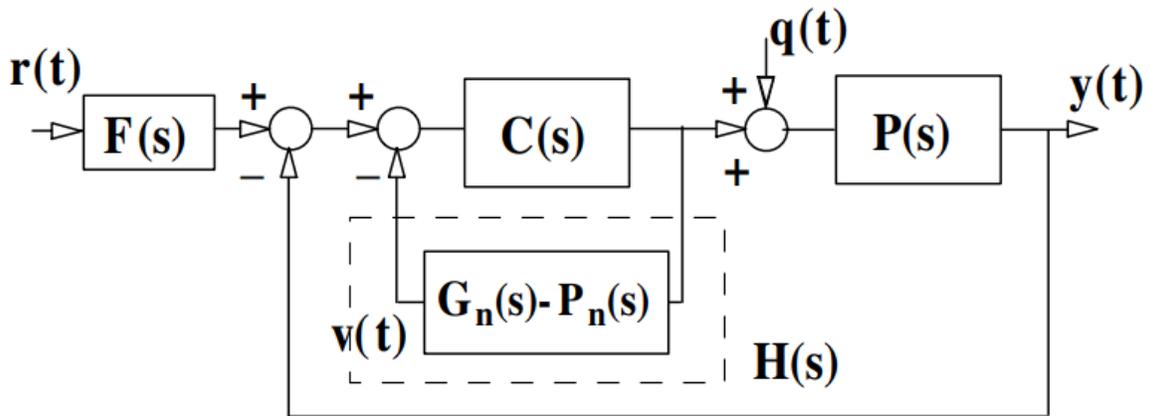


Figura 8 Estructura del predictor de Smith de dos grados de libertad.
Fuente: (Rico & Camacho, 2006)

$$C_{eq}(s) = \frac{\tilde{c}(s)}{1 - \tilde{c}(s)p_n} (s) p_n(s) = \frac{\frac{C(s)}{1 + C(s)G_n(s)}}{1 - \frac{C(s)}{1 + C(s)G_n(s)} p_n(s)}$$

$$= \frac{\frac{C(s)}{1+C(s)G_n(s)}}{\frac{1+C(s)G_n(s)-c(s)G_n(s)}{1+c(s)G_n(s)}} = \frac{C(s)}{1+C(s)G_n(s)-C(s)G_n(s)}$$

$$H(s) = \frac{Ceq(s)P}{1+Ce q(s)} \quad \text{però} \quad Ce q(s) = \frac{C(s)}{1+C(s)G_n(s)-c(s)G_n(s)}$$

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{C(s)}{1+C(s)G_n(s)-c(s)G_n(s)} = \frac{C(s)P_n(s)}{1+C(s)G_n(s)-C(s)P_n(s)} \\ &= \frac{C(s)P(s)}{1+\frac{C(s)P(s)}{1+C(s)G_n(s)-C(s)P_n(s)}} \\ &= \frac{C(s)P_n(s)}{H_c(s)[P(s)-P_n(s)+G_n(s)]} \end{aligned}$$

Pero:

$$P_n(s) = P(s)$$

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{C(s)P_n(s)}{1+C(s)[P(s)-P_n(s)+G_n(s)]} = \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)G_n(s)} \\ &= \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)G_n(s)} e^{-L_n s} \end{aligned}$$

Capítulo 4 Resultados y discusión

Se realizó el análisis de la respuesta temporal del sistema desacoplado para la variable de interés de temperatura interna del invernadero, el tiempo de simulación fue de 50 minutos sometiendo el sistema a una señal de referencia de 25 °C, el modelo matemático del invernadero es de una función de transferencia más tiempo muerto de 33 minutos. La compensación del tiempo muerto se realizó mediante un predictor de Smith con un buffer de 9192 bit's para una simulación óptima. La sintonización del sistema de control se desarrolló mediante el método de ziegler-nichols, posteriormente los valores de los parámetros de sintonización fueron afinados a prueba y error. La respuesta de salida del sistema de control se estabilizó a los 40 min. Teniendo un error de estado estable de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Se añadió una señal de perturbación al sistema de control que incide a los 300 segundos, el comportamiento dinámico del sistema de control permite anular la señal de perturbación. Es necesario aclarar que la señal de salida del sistema de control presenta picos dentro de su respuesta por periodos cortos de tiempo.

Simulación en SCI-Lab

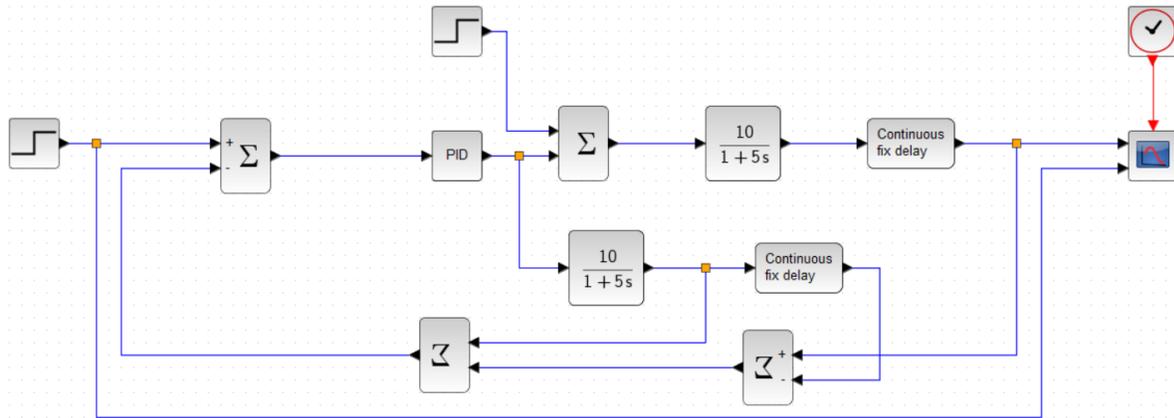


Figura 9 Diagrama a bloques del sistema de control con tiempo muerto.

Fuente: Elaboración propia.

En la fig. 9 se muestra el diagrama a bloques de la propuesta de un sistema de control por retroalimentación, para efectos de la simulación se propone una señal de referencia de 25 °C. El valor respectivo del tiempo muerto representado por bloque de continuous fix delay es de 2000 segundos y con 9192 bit's, se muestra la entrada de una perturbación que se hará presente en los 300 segundos aproximadamente para comprobar la propuesta de control.

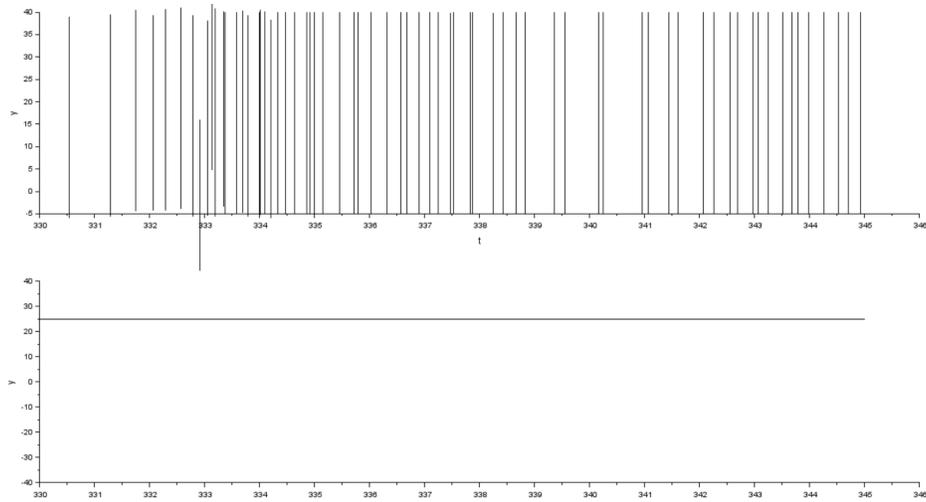


Figura 10 Respuesta del sistema con la entrada de las perturbaciones.
Fuente: Elaboración propia.

En la fig. 10 se muestra como el sistema reacciona ante la perturbación medible que entra a los 320 segundos con la señal de referencia.

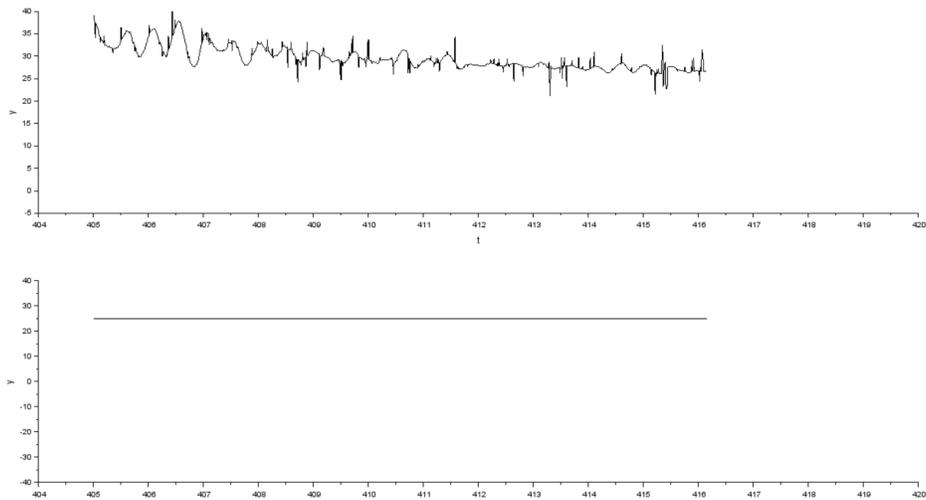


Figura 11 Respuesta del sistema en estado estable.
Fuente: Elaboración propia.

Durante el transcurso de la simulación la respuesta del sistema llega a su valor de estado estable,
fig. 11

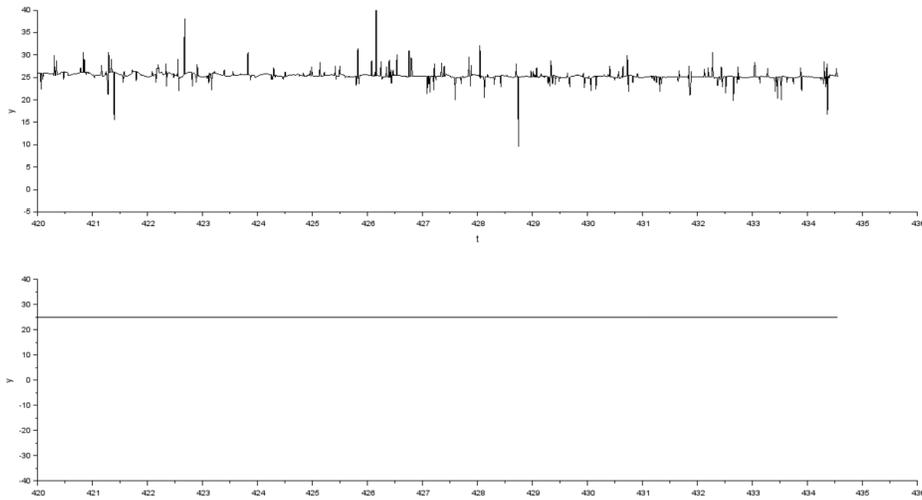


Figura 12 Respuesta del sistema en estado estable con picos.
Fuente: Elaboración propia.

En esta parte de la simulación nuestro sistema siempre está dentro del rango establecido, presentado por breves momentos por unos picos, los cuales serán muy constantes por un periodo corto de tiempo.

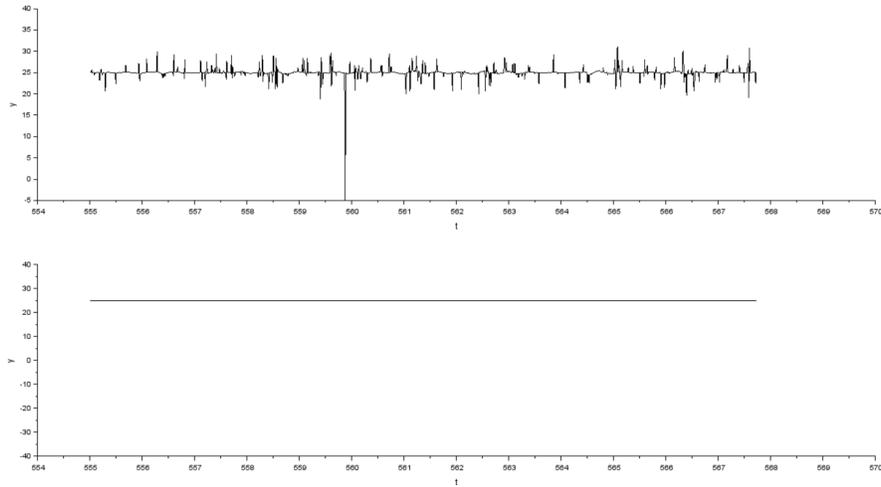


Figura 13 Respuesta del sistema con disminución de los picos
Fuente: Elaboración propia.

Durante la simulación con una duración de 3000 segundos o lo equivalente a 50 minutos, los picos disminuyen hasta obtener un valor casi nulo.

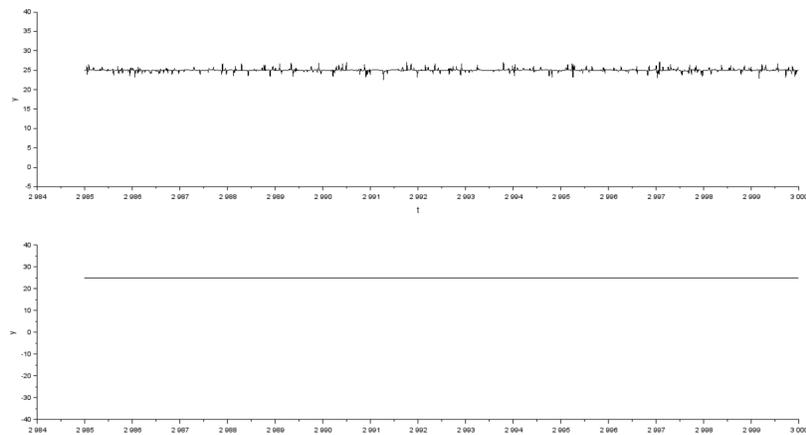


Figura 14 Respuesta del sistema en estado estable con variación de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fuente: Elaboración propia.

La simulación del sistema de control es completamente estable, desapareciendo los picos y manteniendo nuestra referencia de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una variación de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un lapso de 40 minutos aproximadamente.

Capítulo 5 Conclusiones

En conclusión, un análisis detallado de los sistemas de control utilizados para el control de la temperatura en invernaderos ha demostrado ser exhaustivo y eficaz. Utilizando métodos que van desde la modelización matemática del invernadero hasta la implementación práctica del sistema de control, se logra una comprensión más profunda de su comportamiento dinámico y su capacidad para mantener condiciones térmicas estables.

La simulación duró 50 minutos y proporcionó un escenario adecuado para evaluar la respuesta del sistema a diversas condiciones y perturbaciones. Se empleó una señal de referencia de 25 °C, lo que representa una temperatura óptima para el cultivo de las plantas en el invernadero. El modelo matemático del invernadero, que incluyó una función de transferencia con un tiempo muerto de 33 minutos, sirvió como base para el diseño y la implementación del sistema de control.

Para resolver el problema del tiempo muerto se utiliza un predictor Smith con un buffer de 9192 bits, que proporciona una simulación óptima y una compensación eficiente. Además, se utilizó el método Ziegler-Nichols para ajustar los parámetros del controlador, seguido de un refinamiento por prueba y error.

La respuesta de salida del sistema de control es estable durante aproximadamente 40 minutos y el error en estado estable es de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, lo que indica que la precisión del control de temperatura es satisfactoria. La introducción de una señal de perturbación en el sistema de control en el segundo 300 de la simulación permite evaluar la capacidad de respuesta dinámica del sistema.

Se observó que el sistema fue capaz de eliminar eficazmente esta perturbación, demostrando su capacidad para mantener condiciones estables incluso en presencia de factores externos que pudieran afectar la temperatura del invernadero. Durante la simulación, se registraron picos de

respuesta del sistema, especialmente al principio, pero con el tiempo estos picos disminuyeron gradualmente hasta un nivel cercano a cero. Esto muestra que la estabilidad y precisión del sistema continúan mejorando a medida que avanza la simulación.

En general, los resultados de la simulación confirman la eficiencia y robustez del sistema de control propuesto para mantener las condiciones térmicas adecuadas en el invernadero. Una combinación de modelos matemáticos, técnicas de control avanzadas y refinamiento ha demostrado ser eficaz para crear un sistema que puede adaptarse y responder eficazmente a las necesidades cambiantes del entorno de los invernaderos.

Capítulo 6 Referencias

- Albright, L., Gates, R., Arvanitis, K., & Drysdale, A. (2001). Environmental control for plants on Earth and in space. *IEEE*.
- Alvarado Zoe, Durán García, Héctor M., Rossel Kipping, Erich D., Algara Siller Marcos, & Cisneros Almazán Rodolfo. (2019). Semi-automatización de un invernadero de pequeña escala. *Agro Productividad*, 12(9), 53–59. doi: 10.32854/agrop.v12i9.1389
- Álvarez Pastuña, J. E., Mosquera Masabanda, B. S., Rojano Tituaña, A. P., & Toapanta Ortega, W. A. (2020). Control of water and humidity consumption in a greenhouse. *Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas*.
- Álvarez Pastuña Jorge Enrique, Mosquera Masabanda Bryan Stalin, & Secundino Marrero Ramírez. (2020). *IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SCADA PARA EL CONTROL, MONITOREO Y ANÁLISIS DE INDICADORES DE OPERACIÓN DEL INVERNADERO DEL CAMPUS SALACHE*.
- Anaya Solano Daniel Alfonso, & Ojeda Field Luis Felipe. (2020). *Elaboración del prototipo de un sistema de control de variables atmosféricas automatizado para el cultivo de plantas bajo invernadero en ambiente indoor en la Región Caribe*. Barranquilla.
- Baron, J., Vanegas, S., & Rocha, C. (2020). *Gestión del ambiente del invernadero mediante un microcontrolador electrónico para el cultivo de vegetales Managing the greenhouse environment by an electronic microcontroller to cultivate vegetables*.
- Calderón Godoy Antonio José, & González Pérez Isaías. (2008). *AUTOMATIZACIÓN DE INVERNADERO MEDIANTE AUTÓMATA PROGRAMABLE Y PERIFERIA DESCENTRALIZADA A TRAVÉS DE PROFIBUS-DP*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/266182638>
- Cortés, J. d., Ignacio, M. S., Eduardo, B. V., Puga Vega, F. G., Arellano Fabian, Á. E., & de Los Santos Larios, D. (2020). Transmisor de temperatura con salida alámbrica de 4 a 20 ma, salida inalámbrica con el protocolo zigbee, y con salida de control on-off programable. *Pistas Educativas*, 42(137), 12.
- Diaz, W. O., & Bulla, J. P. (s.f.). *Diseño y Construcción de un Invernadero para el Cultivo de Fresa*. Universidad Militar Nueva Granada, Bogota.
- Dormido, S., Sánchez, J., & Kofman, E. (2008). MUESTREO, CONTROL Y COMUNICACIÓN BASADOS EN EVENTOS. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 5(1), 5–26. doi: 10.1016/s1697-7912(08)70120-1
- García Juárez, M. (2014). *Estudio de estrategias de control PID basado en eventos para la implementación de controles embebidos*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Facultad de Ciencias de la Electrónica, Puebla, México.

- García Juárez Moisés. (2014). Estudio de estrategias de control PID basado en eventos para la implementación de controles embebidos. *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*.
- Hernández Chavarria, J., González Lazalde, I., & Galván Ismael, M. Q. (2022). La productividad en los distritos agrícolas de Durango, México. *Revista de Investigación Académica Sin Frontera: División de Ciencias Económicas y Sociales*, 37, 37. doi: 10.46589/rdiasf.vi37.441
- Horel Lucio Santizo Velázquez. (2011). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INVERNADEROS PARA LA PRODUCCION DE HORTALIZAS*. COAHUILA, MEXICO.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022, December 7). *Producto Interno Bruto por Entidad Federativa*. Cifras Preliminares 2021. Retrieved from <https://bit.ly/3LgbrQG>
- J.E. Normey-Rico, E.F. Camacho. (2007). *Control of Dead-time*. Sevilla, España: Springer.
- Khalid, M. F., Iqbal Khan, R., Jawaid, M. Z., Shafqat, W., Hussain, S., Ahmed, T., Rizwan, M., Ercisli, S., Pop, O. L., & Alina Marc, R. (2022). Nanoparticles: The Plant Saviour under Abiotic Stresses. *Nanomaterials*, 12(21), 2–7. doi: 10.3390/nano12213915
- Mexico, G. d. (01 de 01 de 2021). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Obtenido de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Muñoz Tuttillo Tamia Selena. (2021). *AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO PARA CONTROL DE HUMEDAD DEL SUELO EN UN INVERNADERO DE ROSAS*. IBARRA, ECUADOR.
- Nongbet, A., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., Mahanta, S., Ray, M. K., Khan, M., Baek, K.-H., & Chakrabartty, I. (2022). Nanofertilizers: A Smart and Sustainable Attribute to Modern Agriculture. *Plants*, 11(19), 2587. doi: 10.3390/plants11192587
- Pardo Solano, F. V., & Casa Yanguicela, J. C. (2020). *Automatización de un sistema de riego para el control de humedad en los cultivos del invernadero #2 del centro experimental salache*. Universidad técnica de cotopaxi, Latacunga.
- Pardo Solano Franklin Vladimir, & Casa Yanguicela Juan Carlos. (2020). *AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO PARA EL CONTROL DE HUMEDAD EN LOS CULTIVOS DEL INVERNADERO #2 DEL CENTRO EXPERIMENTAL SALACHE EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI*. Latacunga-Ecuador.
- Pira, B., David, D., Rodríguez, S., Sebastián, J., Mesa, B., Camilo, H., Castro, V., Buenaventura, A., Duvan David Barbosa Pira, E., Sebastián Sanabria Rodríguez, J., Camilo Bueno Mesa cris-ha-, H., Vega Castro, D., Aguirre Buenaventura, E., & Nacional Abierta Distancia, U. (2019). RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA EL MONITOREO DE VARIABLES AGROECOLÓGICAS EN CULTIVOS BAJO INVERNADERO. *Periodicidad: Semestral*, 13(1).
- Programa de Concurrencia con las Entidades Federativas. (2018). *Compendio de indicadores*.

- Ramírez Secundino, M., Vinueza Rommel, S., Rivera Edison David, N., Pilaguano Jonathan Stalin, S., Pastuña Jorge, Á., & Estrada, R. (2020). Automatización y control de un invernadero Automation and control of a greenhouse. *Ciencias de La Ingeniería y Aplicadas*.
- Rico, N., & Camacho, E. (2006). *Control of Dead-time Processes*. Glasgow: Springer.
- Ruíz, V. M. (2002). MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID QUE OPERAN COMO REGULADORES. *ingeniería* , 21-36.
- Seuret Jiménez Diego, Palillero Sandoval Omar Velázquez, & Aguilar José Guadalupe. (2020). *DISEÑO DE UN SISTEMA INTELIGENTE PARA EL CONTROL AUTOMATIZADO DE INVERNADEROS*. CUERNAVACA, MORELOS.
- Tangarife Escobar, H. I., Toro Meléndez, S. X., & Carmona Cadavid, C. V. (2020a). Sistemas automatizados para el control del recurso hídrico y variables ambientales bajo invernadero: aplicaciones y tendencias. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 91–98. doi: 10.31908/19098367.1796
- Tangarife Escobar, H. I., Toro Meléndez, S. X., & Carmona Cadavid, C. V. (2020b). Sistemas automatizados para el control del recurso hídrico y variables ambientales bajo invernadero: aplicaciones y tendencias. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 91–98. doi: 10.31908/19098367.1796
- Toro Melendez Sandra Ximena, Tangarife Escobar Héctor Iván, & Carmona Cadavid Cindy Vanessa. (2019). *Implementación del sistema SCADA, aplicación a invernaderos para optimizar el control y la monitorización del microclima en el cultivo de hortalizas*. COLOMBIA.

Apéndice A

- Desarrollo de la ecuación 3.12

(%i2) $f(x):=(-UA/(p\cdot C\cdot V))\cdot x1-(1/V)\cdot x1\cdot u1-(\lambda/(p\cdot C\cdot V))\cdot u2+(1/(p\cdot C\cdot V))\cdot u1+UA/(p\cdot C\cdot V)\cdot u2+(1/V)\cdot u1\cdot u2$
 ev(f(x),u1=(p\cdot C\cdot V\cdot k1\cdot k2+\lambda\cdot V\cdot k3\cdot k4-(\alpha+1)\cdot v1-UA\cdot v2)/(p\cdot C\cdot (v2-x1)+\lambda\cdot (v3-x2)),u2=((p\cdot C\cdot V\cdot k1\cdot k2-v1-UA\cdot v2)\cdot (x2-v3)+p\cdot C\cdot V\cdot (v2-x1)\cdot k3\cdot k4+(p\cdot \alpha\cdot C/\lambda)\cdot (x1-v2)\cdot v1)/(C\cdot p\cdot (v2-x1)+\lambda\cdot (v3-x2)));

$$\frac{C V k1 k2 p + V k3 k4 \lambda + v1 (-\alpha - 1) - UA v2}{C V p (C (v2 - x1) p + (v3 - x2) \lambda)} - \frac{x1 (C V k1 k2 p + V k3 k4 \lambda + v1 (-\alpha - 1) - UA v2)}{V (C (v2 - x1) p + (v3 - x2) \lambda)} - \frac{\lambda \left((x2 - v3) (C V k1 k2 p - UA v2 - v1) + \frac{C v1 (x1 - v2) \alpha p}{\lambda} + C V k3 k4 (v2 - x1) p \right)}{C V p (C (v2 - x1) p + (v3 - x2) \lambda)} +$$

$$\frac{UA \left((x2 - v3) (C V k1 k2 p - UA v2 - v1) + \frac{C v1 (x1 - v2) \alpha p}{\lambda} + C V k3 k4 (v2 - x1) p \right)}{C V p (C (v2 - x1) p + (v3 - x2) \lambda)} + \frac{(C V k1 k2 p + V k3 k4 \lambda + v1 (-\alpha - 1) - UA v2) \left((x2 - v3) (C V k1 k2 p - UA v2 - v1) + \frac{C v1 (x1 - v2) \alpha p}{\lambda} + C V k3 k4 (v2 - x1) p \right)}{V (C (v2 - x1) p + (v3 - x2) \lambda)^2} - \frac{UA x1}{C V p}$$

(%i3) fullratsimp((C\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot p+V\cdot k3\cdot k4\cdot \lambda+v1\cdot (-\alpha-1)-UA\cdot v2)/(C\cdot V\cdot p\cdot (C\cdot (v2-x1)\cdot p+(v3-x2)\cdot \lambda))-(x1\cdot (C\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot p+V\cdot k3\cdot k4\cdot \lambda+v1\cdot (-\alpha-1)-UA\cdot v2))/(V\cdot (C\cdot (v2-x1)\cdot p+(v3-x2)\cdot \lambda))-(\lambda\cdot (x2-v3)\cdot (C\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot p-UA\cdot v2-v1)+(C\cdot v1\cdot (x1-v2)\cdot \alpha\cdot p)/\lambda+C\cdot V\cdot k3\cdot k4\cdot (v2-v3)))/((C^3\cdot V^2\cdot k1^2\cdot k2^2\cdot x2+C^3\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot x1^2+(-C^3\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot v2-C^3\cdot V^2\cdot k1\cdot k2\cdot k3\cdot k4)\cdot x1-C^3\cdot V^2\cdot k1^2\cdot k2^2\cdot v3+C^3\cdot V^2\cdot k1\cdot k2\cdot k3\cdot k4\cdot v2)\cdot \lambda+(C^3\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot v1\cdot x1-C^3\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot v1\cdot v2)\cdot \alpha)\cdot \rho^3+((2\cdot C^2\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot x1-C^2\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot v2+C^2\cdot V^2\cdot k1\cdot k2\cdot k3\cdot k4)\cdot x2+(-2\cdot C^2\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot v3+C^2\cdot V\cdot k3\cdot k4\cdot v2-C^2\cdot V^2\cdot k3^2\cdot k4^2)\cdot x1+(C^2\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot v2-C^2\cdot V^2\cdot k1\cdot k2\cdot k3\cdot k4)\cdot v3-C^2\cdot V\cdot k3\cdot k4\cdot v2^2+C^2\cdot V^2\cdot k3^2\cdot k4^2\cdot v2)\cdot \lambda^2+((-C^2\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot v1\cdot x2+(2\cdot C^2\cdot V\cdot k3\cdot k4\cdot v1-C^2\cdot v1\cdot v2)\cdot x1+C^2\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot v1\cdot v3+C^2\cdot v1\cdot v2^2-2\cdot C^2\cdot V\cdot k3\cdot k4\cdot v1\cdot v2)\cdot \alpha+(-C^2\cdot UA\cdot v\cdot k1\cdot k2\cdot x1-C^2\cdot UA\cdot v\cdot k1\cdot k2\cdot v2-2\cdot C^2\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot v1)\cdot x2-C^2\cdot UA\cdot x1^3+(C^2\cdot UA\cdot v2-C^2\cdot v1+C^2\cdot UA\cdot V\cdot k3\cdot k4)\cdot x1^2+(C^2\cdot UA\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot v3+(C^2\cdot v1-C^2\cdot UA\cdot V\cdot k3\cdot k4)\cdot v2+C^2\cdot V\cdot k3\cdot k4\cdot v1-C^2\cdot V\cdot k1\cdot k2)\cdot x1+(C^2\cdot UA\cdot v\cdot k1\cdot k2\cdot v2+2\cdot C^2\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot v1)\cdot v3+(C^2\cdot V\cdot k1\cdot k2-C^2\cdot V\cdot k3\cdot k4\cdot v1)\cdot v2)\cdot \lambda+(C^2\cdot v1^2\cdot v2-C^2\cdot v1^2\cdot x1)\cdot \alpha^2+(-C^2\cdot UA\cdot v1\cdot x1^2+(C^2\cdot UA\cdot v1\cdot v2-C^2\cdot v1^2)\cdot x1+C^2\cdot v1^2\cdot v2)\cdot \alpha)\cdot \rho^2+((C\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot x2^2+(C\cdot V\cdot k3\cdot k4\cdot v2-2\cdot C\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot v3)\cdot x2+C\cdot V\cdot k1\cdot k2\cdot v3^2-C\cdot V\cdot k3\cdot k4\cdot v2\cdot v3)\cdot \lambda^3+(C\cdot V\cdot v1\cdot v2\cdot v3-C\cdot v1\cdot v2\cdot x2)\cdot \alpha-C\cdot UA\cdot v\cdot k1\cdot k2\cdot x2^2+(-2\cdot C\cdot UA\cdot x1^2+(C\cdot UA\cdot V\cdot k3\cdot k4-2\cdot C\cdot v1)\cdot x1+2\cdot C\cdot UA\cdot v\cdot k1\cdot k2\cdot v3+C\cdot UA\cdot v2^2+(C\cdot v1-2\cdot C\cdot UA\cdot V\cdot k3\cdot k4)\cdot v2-C\cdot V\cdot k3\cdot k4\cdot v1-C\cdot V\cdot k1\cdot k2)\cdot x2+2\cdot C\cdot UA\cdot v3\cdot x1^2+(2\cdot C\cdot v1-C\cdot UA\cdot V\cdot k3\cdot k4)\cdot v3-C\cdot V\cdot k3\cdot k4)\cdot x1-C\cdot UA\cdot v\cdot k1\cdot k2\cdot v3^2+(-C\cdot UA\cdot v2^2+(2\cdot C\cdot UA\cdot V\cdot k3\cdot k4-C\cdot v1)\cdot v2+C\cdot V\cdot k3\cdot k4\cdot v1+C\cdot V\cdot k1\cdot k2)\cdot v3+C\cdot V\cdot k3\cdot k4\cdot v2)\cdot \lambda^2+((-C\cdot UA\cdot v1\cdot x1+2\cdot C\cdot UA\cdot v1\cdot v2+C\cdot v1^2)\cdot x2+(C\cdot UA\cdot v1\cdot v3+C\cdot v1)\cdot x1+(-2\cdot C\cdot UA\cdot v1\cdot v2-C\cdot v1^2)\cdot v3-C\cdot v1\cdot v2)\cdot \alpha+((C\cdot UA^2\cdot v2+C\cdot UA\cdot v1)\cdot x1+C\cdot UA\cdot v1\cdot v2+C\cdot v1^2)\cdot x2+((-C\cdot UA^2\cdot v2-C\cdot UA\cdot v1)\cdot v3+C\cdot UA\cdot v2+C\cdot v1)\cdot x1+(-C\cdot UA\cdot v1\cdot v2-C\cdot v1^2)\cdot v3-C\cdot UA\cdot v2^2-C\cdot v1\cdot v2)\cdot \lambda)\cdot \rho+((-UA\cdot x1-UA\cdot v2-v1)\cdot x2^2+(2\cdot UA\cdot v3\cdot x1+(2\cdot UA\cdot v2+2\cdot v1)\cdot v3-V\cdot k3\cdot k4)\cdot x2-UA\cdot v3^2\cdot x1+(-UA\cdot v2-v1)\cdot v3^2+V\cdot k3\cdot k4\cdot v3)\cdot \lambda^3+(v1\cdot x2-v1\cdot v3)\cdot \alpha+(UA^2\cdot v2+UA\cdot v1)\cdot x2^2+((-2\cdot UA^2\cdot v2-2\cdot UA\cdot v1)\cdot v3+UA\cdot v2+v1)\cdot x2+(UA^2\cdot v2+UA\cdot v1)\cdot v3^2+(-UA\cdot v2-v1)\cdot v3)\cdot \lambda^2)/((C^3\cdot V\cdot x1^2-2\cdot C^3\cdot V\cdot v2\cdot x1+C^3\cdot V\cdot v2^2)\cdot \lambda\cdot \rho^3+(2\cdot C^2\cdot V\cdot x1-2\cdot C^2\cdot V\cdot v2)\cdot x2-2\cdot C^2\cdot V\cdot v3\cdot x1+2\cdot C^2\cdot V\cdot v2\cdot v3)\cdot \lambda^2\cdot \rho^2+(C\cdot V\cdot x2^2-2\cdot C\cdot V\cdot v3\cdot x2+C\cdot V\cdot v3^2)\cdot \lambda^3\cdot \rho)

• Desarrollo de la ecuación 3.14

(%i6) $g(x) := -(\beta/(p \cdot V)) \cdot x^2 + (1/(p \cdot V)) \cdot u_2 + (\alpha/(\lambda \cdot p \cdot V)) \cdot v_1 - ((1/(p \cdot V)) \cdot x^2 - u_1) + (1/(p \cdot V)) \cdot u_1 \cdot v_3$

$ev(f(x), u_1) = (p \cdot C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 + \lambda \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 - (\alpha + 1) \cdot v_1 - UA \cdot v_2) / (p \cdot C \cdot (v_2 - x_1) + \lambda \cdot (v_3 - x_2)), u_2 = ((p \cdot C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 - v_1 - UA \cdot v_2) \cdot (x_2 - v_3) + p \cdot C \cdot V \cdot (v_2 - x_1) \cdot k_3 \cdot k_4 + (p \cdot \alpha \cdot C / \lambda) \cdot (x_1 - v_2) \cdot v_1) / (C \cdot p \cdot (v_2 - x_1) + \lambda \cdot (v_3 - x_2))$

(%o6)
$$\frac{C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot p + V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \lambda + v_1 \cdot (-\alpha - 1) - UA \cdot v_2}{C \cdot V \cdot p \cdot (C \cdot (v_2 - x_1) \cdot p + (v_3 - x_2) \cdot \lambda)} - \frac{x_1 \cdot (C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot p + V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \lambda + v_1 \cdot (-\alpha - 1) - UA \cdot v_2)}{V \cdot (C \cdot (v_2 - x_1) \cdot p + (v_3 - x_2) \cdot \lambda)} - \frac{\lambda \cdot \left((x_2 - v_3) \cdot (C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot p - UA \cdot v_2 - v_1) + \frac{C \cdot v_1 \cdot (x_1 - v_2) \cdot \alpha \cdot p}{\lambda} + C \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (v_2 - x_1) \cdot p \right)}{C \cdot V \cdot p \cdot (C \cdot (v_2 - x_1) \cdot p + (v_3 - x_2) \cdot \lambda)} +$$

$$\frac{UA \cdot \left((x_2 - v_3) \cdot (C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot p - UA \cdot v_2 - v_1) + \frac{C \cdot v_1 \cdot (x_1 - v_2) \cdot \alpha \cdot p}{\lambda} + C \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (v_2 - x_1) \cdot p \right)}{C \cdot V \cdot p \cdot (C \cdot (v_2 - x_1) \cdot p + (v_3 - x_2) \cdot \lambda)} + \frac{(C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot p + V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \lambda + v_1 \cdot (-\alpha - 1) - UA \cdot v_2) \cdot \left((x_2 - v_3) \cdot (C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot p - UA \cdot v_2 - v_1) + \frac{C \cdot v_1 \cdot (x_1 - v_2) \cdot \alpha \cdot p}{\lambda} + C \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (v_2 - x_1) \cdot p \right)}{V \cdot (C \cdot (v_2 - x_1) \cdot p + (v_3 - x_2) \cdot \lambda)^2} - \frac{UA \cdot x_1}{C \cdot V \cdot p}$$

(%i7) $fullratsimp((C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot p + V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \lambda + v_1 \cdot (-\alpha - 1) - UA \cdot v_2) / (C \cdot V \cdot p \cdot (C \cdot (v_2 - x_1) \cdot p + (v_3 - x_2) \cdot \lambda)) - (x_1 \cdot (C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot p + V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \lambda + v_1 \cdot (-\alpha - 1) - UA \cdot v_2)) / (V \cdot (C \cdot (v_2 - x_1) \cdot p + (v_3 - x_2) \cdot \lambda)) - \lambda \cdot ((x_2 - v_3) \cdot (C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot p - UA \cdot v_2 - v_1) + (C \cdot v_1 \cdot (x_1 - v_2) \cdot \alpha \cdot p) / \lambda + C \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (v_2 - x_1) \cdot p)) / (C \cdot V \cdot p \cdot (C \cdot (v_2 - x_1) \cdot p + (v_3 - x_2) \cdot \lambda)) + UA \cdot ((x_2 - v_3) \cdot (C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot p - UA \cdot v_2 - v_1) + \frac{C \cdot v_1 \cdot (x_1 - v_2) \cdot \alpha \cdot p}{\lambda} + C \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (v_2 - x_1) \cdot p) / (C \cdot V \cdot p \cdot (C \cdot (v_2 - x_1) \cdot p + (v_3 - x_2) \cdot \lambda)) + \frac{(C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot p + V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \lambda + v_1 \cdot (-\alpha - 1) - UA \cdot v_2) \cdot ((x_2 - v_3) \cdot (C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot p - UA \cdot v_2 - v_1) + \frac{C \cdot v_1 \cdot (x_1 - v_2) \cdot \alpha \cdot p}{\lambda} + C \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (v_2 - x_1) \cdot p)}{V \cdot (C \cdot (v_2 - x_1) \cdot p + (v_3 - x_2) \cdot \lambda)^2} - \frac{UA \cdot x_1}{C \cdot V \cdot p}$

(%o7)
$$\left(\left(C^3 \cdot V^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 \cdot x_2^2 + C^3 \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot x_1^2 + \left(-C^3 \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_2 - C^3 \cdot V^2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \right) x_1 - C^3 \cdot V^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 \cdot v_3 + C^3 \cdot V^2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot v_2 \right) x_1 - C^3 \cdot V^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 \cdot v_3 + C^3 \cdot V^2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot v_2 \right) \lambda + \left(C^3 \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_1 \cdot x_1 - C^3 \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_1 \cdot v_2 \right) \alpha \right) \rho^3 + \left(\left(2 \cdot C^2 \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot x_1 - C^2 \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_2 + C^2 \cdot V^2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \right) x_2 + \left(-2 \cdot C^2 \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_3 + C^2 \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot v_2 - C^2 \cdot V^2 \cdot k_3^2 \cdot k_4^2 \right) x_1 + \left(C^2 \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_2 - C^2 \cdot V^2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \right) v_3 - C^2 \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot v_2^2 + C^2 \cdot V^2 \cdot k_3^2 \cdot k_4^2 \cdot v_2 \right) \lambda^2 + \left(-C^2 \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_1 \cdot x_2 + \left(2 \cdot C^2 \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot v_1 - C^2 \cdot v_1 \cdot v_2 \right) x_1 + C^2 \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_1 \cdot v_3 + C^2 \cdot v_1 \cdot v_2^2 - 2 \cdot C^2 \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot v_1 \cdot v_2 \right) \alpha + \left(-C^2 \cdot UA \cdot v \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot x_1 - C^2 \cdot UA \cdot v \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_2 - 2 \cdot C^2 \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_1 \right) x_2 - C^2 \cdot UA \cdot x_1^3 + \left(C^2 \cdot UA \cdot v_2 - C^2 \cdot v_1 + C^2 \cdot UA \cdot v \cdot k_3 \cdot k_4 \right) x_1^2 + \left(C^2 \cdot UA \cdot v \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_3 + \left(C^2 \cdot v_1 - C^2 \cdot UA \cdot v \cdot k_3 \cdot k_4 \right) v_2 + C^2 \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot v_1 - C^2 \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \right) x_1 + \left(C^2 \cdot UA \cdot v \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_2 + 2 \cdot C^2 \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_1 \right) v_3 + \left(C^2 \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 - C^2 \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot v_1 \right) v_2 \right) \lambda + \left(C^2 \cdot v_1^2 \cdot v_2 - C^2 \cdot v_1^2 \cdot x_1 \right) \alpha^2 + \left(-C^2 \cdot UA \cdot v_1 \cdot x_1^2 + \left(C^2 \cdot UA \cdot v_1 \cdot v_2 - C^2 \cdot v_1^2 \right) x_1 + C^2 \cdot v_1^2 \cdot v_2 \right) \alpha \right) \rho^2 + \left(C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot x_2^2 + (C \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot v_2 - 2 \cdot C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_3) x_2 + C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_3^2 - C \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot v_2 \cdot v_3 \right) \lambda^3 + \left(C \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot v_3 - C \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot x_2 \right) \alpha - C \cdot UA \cdot v \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot x_2^2 + \left(-2 \cdot C \cdot UA \cdot x_1^2 + (C \cdot UA \cdot v \cdot k_3 \cdot k_4 - 2 \cdot C \cdot v_1) x_1 + 2 \cdot C \cdot UA \cdot v \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_3 + C \cdot UA \cdot v_2^2 + (C \cdot v_1 - 2 \cdot C \cdot UA \cdot v \cdot k_3 \cdot k_4) v_2 - C \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot v_1 - C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \right) x_2 + 2 \cdot C \cdot UA \cdot v_3 \cdot x_1^2 + \left((2 \cdot C \cdot v_1 - C \cdot UA \cdot v \cdot k_3 \cdot k_4) v_3 - C \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot x_1 - C \cdot UA \cdot v \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot v_3^2 + \left(-C \cdot UA \cdot v_2^2 + (2 \cdot C \cdot UA \cdot v \cdot k_3 \cdot k_4 - C \cdot v_1) v_2 + C \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot v_1 + C \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \right) v_3 + C \cdot V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot v_2 \right) \lambda^2 + \left(\left(-C \cdot UA \cdot v_1 \cdot x_1 + 2 \cdot C \cdot UA \cdot v_1 \cdot v_2 + C \cdot v_1^2 \right) x_2 + (C \cdot UA \cdot v_1 \cdot v_3 + C \cdot v_1) x_1 + \left(-2 \cdot C \cdot UA \cdot v_1 \cdot v_2 - C \cdot v_1^2 \right) v_3 - C \cdot v_1 \cdot v_2 \right) \alpha + \left(C \cdot UA^2 \cdot v_2 + C \cdot UA \cdot v_1 \right) x_1 + C \cdot UA \cdot v_1 \cdot v_2 + C \cdot v_1^2 \right) x_2 + \left(\left(-C \cdot UA^2 \cdot v_2 - C \cdot UA \cdot v_1 \right) v_3 + C \cdot UA \cdot v_2 + C \cdot v_1 \right) x_1 + \left(-C \cdot UA \cdot v_1 \cdot v_2 - C \cdot v_1^2 \right) v_3 - C \cdot UA \cdot v_2^2 - C \cdot v_1 \cdot v_2 \right) \lambda \right) \rho + \left((-UA \cdot x_1 - UA \cdot v_2 - v_1) x_2^2 + (2 \cdot UA \cdot v_3 \cdot x_1 + (2 \cdot UA \cdot v_2 + 2 \cdot v_1) v_3 - V \cdot k_3 \cdot k_4) x_2 - UA \cdot v_3^2 \cdot x_1 + (-UA \cdot v_2 - v_1) v_3^2 + V \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot v_3 \right) \lambda^3 + \left((v_1 \cdot x_2 - v_1 \cdot v_3) \alpha + \left(UA^2 \cdot v_2 + UA \cdot v_1 \right) x_2^2 + \left(\left(-2 \cdot UA^2 \cdot v_2 - 2 \cdot UA \cdot v_1 \right) v_3 + UA \cdot v_2 + v_1 \right) x_2 + \left(UA^2 \cdot v_2 + UA \cdot v_1 \right) v_3^2 + (-UA \cdot v_2 - v_1) v_3 \right) \lambda^2 \right) / \left(\left(C^3 \cdot V \cdot x_1^2 - 2 \cdot C^3 \cdot V \cdot v_2 \cdot x_1 + C^3 \cdot V \cdot v_2^2 \right) \lambda \rho^3 + \left(\left(2 \cdot C^2 \cdot V \cdot x_1 - 2 \cdot C^2 \cdot V \cdot v_2 \right) x_2 - 2 \cdot C^2 \cdot V \cdot v_3 \cdot x_1 + 2 \cdot C^2 \cdot V \cdot v_2 \cdot v_3 \right) \lambda^2 \rho^2 + \left(C \cdot V \cdot x_2^2 - 2 \cdot C \cdot V \cdot v_3 \cdot x_2 + C \cdot V \cdot v_3^2 \right) \lambda^3 \rho \right)$$

Nomenclatura

$T_{in}(t)$ Temperatura de interior del invernadero.

$T_{out}(t)$ Temperatura de exterior del invernadero.

V Volumen de invernadero.

UA Coeficiente de transferencia de calor.

ρ Densidad del aire.

C_p Calor específico del aire.

q_h Calor proporcionado al invernadero por el sistema de calefacción.

S_i Energía solar radiante interceptada por invernadero.

q_f Capacidad de agua del sistema de vaporización.

λ Calor latente de vaporización.

\dot{V} Razón de ventilación.

w_{in}, w_{out} Razón de humedad absoluta interior y exterior respectivamente.

$E(S_i, W_i)$ Razón de evapotranspiración de las plantas.

α coeficiente que involucra el área del invernadero.

βT coeficiente general que involucra otras constantes termodinámicas (movimiento del aire, etc.).

P Proporcional

I Integral

D Derivativo

PB Banda Proporcional

WSN Wireless Sensor Networks

DVP Diferencia De Presión Del Vapor

NCS Networked Control Systems

Wind – up Anti-saturación

Apéndice B

ISBN: 978-607-5893-00-6

INNOVACIÓN SIN LÍMITES

NAVEGANDO EL MUNDO TECNOLÓGICO

COORDINADORES.

OLAYA PIRENE CASTELLANOS ONORIO, MARIO DÍAZ GONZÁLEZ, BRISSA SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, ANA GRACIELA PÉREZ SOLÍS, JOSÉ ADRIÁN ROMERO PEÑA



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNM
MEXICO



Universidad Veracruzana



Instituto de Investigaciones y Estudios Superiores
de las Ciencias Administrativas



CONACYT

CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA



RED
IBAI



COLEGIO DE ESTUDIOS
AVANZADOS DE IBEROAMÉRICA



MIGRACIÓN Y DESARROLLO
RED IBAI - MEXICO



RED IBAI
I-TEC

RED IBEROAMERICANA
DE ACADEMIAS DE
INVESTIGACIÓN
INNOVACIÓN Y
TECNOLOGÍA

Xalapa, Veracruz. México a 22 de noviembre de 2023

DICTAMEN EDITORIAL

La presente obra fue arbitrada y dictaminada en dos procesos; el primero, fue realizado por el COMITÉ EDITORIAL RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C. con sede en México; que sometió a los capítulos incluidos en la obra a un proceso de dictaminación a doble ciego para constatar de forma exhaustiva la temática, pertinencia y calidad de los textos en relación a los fines y criterios académicos de la misma, cumpliendo así con la primera etapa del proceso editorial. El segundo proceso de dictaminación estuvo a cargo del COMITÉ CIENTÍFICO de la RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C., del INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VERACRUZ y del INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ÚRSULO GALVÁN; donde se seleccionaron expertos en el tema para la evaluación de los capítulos de la obra y se procedió con el sistema de dictaminación a doble ciego. Cabe señalar que previo al envío a los dictaminadores, todo trabajo fue sometido a una prueba de detección de plagio. Una vez concluido el arbitraje de forma ética y responsable y por acuerdo del Comité Editorial y Científico, se dictamina que la obra **"Innovación sin límites. Navegando el mundo tecnológico"** cumple con la relevancia y originalidad temática, la contribución teórica y aportación científica, rigurosidad y calidad metodológica, actualidad de las fuentes que emplea, redacción, ortografía y calidad expositiva.

Dr. Daniel Armando Olivera Gómez

Director Editorial

Sello Editorial: Red Iberoamericana de Academias de Investigación, A.C. (978-607-5893)

Dublín 34, Residencial Monte Magno

C.P. 91190. Xalapa, Veracruz, México.

Cel 2282386072

Xalapa, Veracruz. México a 22 de noviembre de 2023

CERTIFICACIÓN EDITORIAL

RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C. (REDIBAI) con sello editorial N° 978-607-5893 otorgado por la Agencia Mexicana de ISBN, hace constar que el libro "Innovación sin límites. Navegando el mundo tecnológico" registrado con el ISBN 978-607-5893-00-6 fue publicado por nuestro sello editorial con fecha de aparición del 22 de noviembre de 2023 cumpliendo con todos los requisitos de calidad científica y normalización que exige nuestra política editorial.

Fue evaluado por pares académicos externos y aprobado los Comités Editorial y Científico de la RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C., del INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VERACRUZ y del INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ÚRSULO GALVÁN

Todos los soportes concernientes a los procesos editoriales y de evaluación se encuentran bajo el poder y disponibles en Editorial RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C. (REDIBAI), los cuales están a disposición de la comunidad académica interna y externa en el momento que se requieran. La normativa editorial y repositorio se encuentran disponibles en la página <http://www.redibai-myd.org>

Doy fe.

Dr. Daniel Armando Olivera Gómez
Director Editorial

Sello Editorial: Red Iberoamericana de Academias de Investigación, A.C. (978-607-5893)

Dublín 34, Residencial Monte Magno
C.P. 91190. Xalapa, Veracruz, México.
Cel 2282386072



INNOVACIÓN SIN LÍMITES

NAVEGANDO EL MUNDO TECNOLÓGICO

COORDINADORES

OLAYA PIRENE CASTELLANOS ONORIO, MARIO DÍAZ GONZÁLEZ, BRISSA SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, ANA GRACIELA PÉREZ SOLÍS, JOSÉ ADRIÁN ROMERO PEÑA

AUTORES

ALEJANDRA DANIELA LÓPEZ GRIJALVA, ALEJANDRO ZAVALA BORDONAVE, ALFONSO BARBOSA MORENO, ANA GRACIELA PÉREZ SOLÍS, ANAI GRACIELA ARITZMENDI HERNÁNDEZ, ANGÉLICA MURILLO RAMÍREZ, ANGELITA VENTURA SÁNCHEZ, ARELY VELÁZQUEZ LÓPEZ, ARMANDO RAÚL MATURINO BARRAZA, ARTURO BARBOSA OLIVARES, BRISSA SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, CARLOS EUSEBIO MAR OROZCO, DANIELA ALEJANDRA LÓPEZ GRIJALVA, DAVID CRUZ ALEJANDRE, DENISSE ALEJANDRA DÍAZ ROMO, DORIS IVETTE VILLALOBOS VERA, EDUARDO GAMERO INDA, ESMERALDA DELGADO PÉREZ, ESTEBAN ALBERTO GONZÁLEZ GARCÍA, EVA MORA COLORADO, FÉLIX DAVID MURILLO CUEVAS, FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA, GRISELDA RODRÍGUEZ AGUSTÍN, HÉCTOR MANUEL ALDANA MARÍN, HÉCTOR PÉREZ ORTIZ, IGNACIO GARAY PERALTA, IVÁN MENDOZA BRAVO, JACEL ADAME GARCÍA, JAIME HERRERA GAMBOA, JAZMÍN BALDERRABANO BRIONES, JESÚS HERRERA ALARCÓN, JORGE LUIS TEJEDA MORALES, JOSÉ ADRIÁN ROMERO PEÑA, JOSÉ ANTONIO FERNÁNDEZ VIVEROS, JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ RIVERA, JOSÉ ARTURO BARBOSA MORENO, JOSÉ LUIS CONTRERAS ROBLES, JOSUÉ ORTIZ MEDINA, JUAN CARLOS FLORES GARCÍA, LEIRA CAROL ESCUDERO RAMÍREZ, LUIS ALBERTO MONTES GUTIÉRREZ, LUIS GERARDO HERNÁNDEZ VELA, MARCO ANTONIO DÍAZ RAMOS, MARÍA DEL PILAR RODRÍGUEZ GARCÍA, MARÍA DEL ROSARIO MORENO FERNÁNDEZ, MARIO DÍAZ GONZÁLEZ, MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ RAMÍREZ, MONSERRAT ACOSTA CADENAS, OLAYA PIRENE CASTELLANOS ONORIO, OSCAR GILBERTO ALANIZ VILLANUEVA, OSCAR SILVA MARRUFO, PATRICIA HORTA ROSADO, **PEDRO JESÚS VERDÍN RIVERA**, RICARDO FABIAN ALVARADO MAR, ROSA MARÍA TORRES HERNÁNDEZ, RUBÉN DARÍO DOMÍNGUEZ USCANGA, RUBÉN GUERRERO RIVERA, VALERIA ISABEL HERRERA BANDALA, VANESSA ALEJANDRA DELGADO MAY, VERÓNICA HERNÁNDEZ MORALES, VERÓNICA ROMO LÓPEZ, YOUSSEF UTRERA VELEZ



ISBN: 978-607-5893-00-6



INNOVACIÓN SIN LÍMITES

NAVEGANDO EL MUNDO TECNOLÓGICO

COORDINADORES

OLAYA PIRENE CASTELLANOS ONORIO, MARIO DÍAZ GONZÁLEZ, BRISSA SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, ANA GRACIELA PÉREZ SOLÍS, JOSÉ ADRIÁN ROMERO PEÑA

AUTORES

ALEJANDRA DANIELA LÓPEZ GRIJALVA, ALEJANDRO ZAVALA BORDONAVE, ALFONSO BARBOSA MORENO, ANA GRACIELA PÉREZ SOLÍS, ANAI GRACIELA ARITZMENDI HERNÁNDEZ, ANGÉLICA MURILLO RAMÍREZ, ANGELITA VENTURA SÁNCHEZ, ARELY VELÁZQUEZ LÓPEZ, ARMANDO RAÚL MATORINO BARRAZA, ARTURO BARBOSA OLIVARES, BRISSA SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, CARLOS EUSEBIO MAR OROZCO, DANIELA ALEJANDRA LÓPEZ GRIJALVA, DAVID CRUZ ALEJANDRE, DENISSE ALEJANDRA DÍAZ ROMO, DORIS IVETTE VILLALOBOS VERA, EDUARDO GAMERO INDA, ESMERALDA DELGADO PÉREZ, ESTEBAN ALBERTO GONZÁLEZ GARCÍA, EVA MORA COLORADO, FÉLIX DAVID MURILLO CUEVAS, FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA, GRISELDA RODRÍGUEZ AGUSTÍN, HÉCTOR MANUEL ALDANA MARÍN, HÉCTOR PÉREZ ORTIZ, IGNACIO GARAY PERALTA, IVÁN MENDOZA BRAVO, JACEL ADAME GARCÍA, JAIME HERRERA GAMBOA, JAZMÍN BALDERRABANO BRIONES, JESÚS HERRERA ALARCÓN, JORGE LUIS TEJEDA MORALES, JOSÉ ADRIÁN ROMERO PEÑA, JOSÉ ANTONIO FERNÁNDEZ VIVEROS, JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ RIVERA, JOSÉ ARTURO BARBOSA MORENO, JOSÉ LUIS CONTRERAS ROBLES, JOSUÉ ORTIZ MEDINA, JUAN CARLOS FLORES GARCÍA, LEIRA CAROL ESCUDERO RAMÍREZ, LUIS ALBERTO MONTES GUTIÉRREZ, LUIS GERARDO HERNÁNDEZ VELA, MARCO ANTONIO DÍAZ RAMOS, MARÍA DEL PILAR RODRÍGUEZ GARCÍA, MARÍA DEL ROSARIO MORENO FERNÁNDEZ, MARIO DÍAZ GONZÁLEZ, MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ RAMÍREZ, MONSERRAT ACOSTA CADENAS, OLAYA PIRENE CASTELLANOS ONORIO, OSCAR GILBERTO ALANIZ VILLANUEVA, OSCAR SILVA MARRUFO, PATRICIA HORTA ROSADO, PEDRO JESÚS VERDÍN RIVERA, RICARDO FABIAN ALVARADO MAR, ROSA MARÍA TORRES HERNÁNDEZ, RUBÉN DARIO DOMÍNGUEZ USCANGA, RUBÉN GUERRERO RIVERA, VALERIA ISABEL HERRERA BANDALA, VANESSA ALEJANDRA DELGADO MAY, VERÓNICA HERNÁNDEZ MORALES, VERÓNICA ROMO LÓPEZ, YOUSSEF UTRERA VELEZ

EDITORIAL

©RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C. 2023



EDITA: RED IBEROAMERICANA DE ACADEMIAS DE INVESTIGACIÓN A.C
DUBLÍN 34, FRACCIONAMIENTO MONTE MAGNO
C.P. 91190. XALAPA, VERACRUZ, MÉXICO.
CEL 2282386072
www.redibai.org
redibai@hotmail.com

ISBN: 978-607-5893-00-6



Sello editorial: Red Iberoamericana de Academias de Investigación, A.C. (978-607-5893)
Primera Edición, Xalapa, Veracruz, México.
No. de ejemplares: 2
Presentación en medio electrónico digital
Formato PDF 16 MB
Fecha de aparición 22/11/2023
ISBN 978-607-5893-00-6

Derechos Reservados © Prohibida la reproducción total o parcial de este libro en cualquier forma o medio sin permiso escrito de la editorial.

**MODELADO Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN
INVERNADERO**

PEDRO JESÚS VERDÍN RIVERA, JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ RIVERA, EDUARDO GAMERO INDA, FRANCISCO JAVIER
GODÍNEZ GARCÍA
106

**ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO SBS UNA ALTERNATIVA PARA MEJORAR
LA VIDA Y COMPORTAMIENTO TERMO MECÁNICO DE LA CARPETA ASFÁLTICA**

JUAN CARLOS FLORES GARCÍA, DAVID CRUZ ALEJANDRE, ESTEBAN ALBERTO GONZÁLEZ GARCÍA
122

**COMPOSICIÓN QUÍMICA Y FÍSICA EN FRUTOS DE FRESA BIOFERTILIZADAS CON
COMPUESTOS NITROGENADOS**

OSCAR SILVA MARRUFO, JAIME HERRERA GAMBOA, OSCAR GILBERTO ALANIZ VILLANUEVA
135

**ANÁLISIS MERCADOLÓGICO DE UN SISTEMA ERGONÓMICO CONSIDERANDO LA
ANTROPOMETRÍA DE PRODUCTORES DE LEGUMINOSAS EN MÉXICO**

CARLOS EUSEBIO MAR OROZCO, ALFONSO BARBOSA MORENO, VERÓNICA HERNÁNDEZ MORALES, RICARDO FABIAN
ALVARO MAR
147

**GESTIÓN DE LA BASE DE DATOS COMO FACTOR DE TOMA DE DECISIONES PARA
LOS NEGOCIOS**

BRISSA SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, ALEJANDRA DANIELA LÓPEZ GRIJALVA, DANIELA ALEJANDRA LÓPEZ GRIJALVA
156

**MIGRACION DEL SOFTWARE ACTUAL “TEN” AL SOFTWARE “SAP” EN UNA
EMPRESA DEL RAMO METALURGICO**

PATRICIA HORTA ROSADO, HÉCTOR PÉREZ ORTIZ, HÉCTOR MANUEL ALDANA MARÍN
167

**PARED VERDE COMO SISTEMA DE FITORREMEDIAACION PARA REDUCIR LA
POLUCIÓN DEL AIRE EN CUIDADES CON ALTA CONTAMINACIÓN**

DENISSE ALEJANDRA DÍAZ ROMO, VERÓNICA ROMO LÓPEZ, MARCO ANTONIO DÍAZ RAMOS
181

**PREVALENCIA DE PARASITOSIS ZONÓTICAS GASTROINTESTINALES EN NIÑOS
MENORES DE 5 AÑOS EN ÚRSULO GALVÁN**

VALERIA ISABEL HERRERA BANDALA, RUBÉN DARÍO DOMÍNGUEZ USCANGA, ROSA MARÍA TORRES HERNÁNDEZ, JESÚS
HERRERA ALARCÓN
191

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN INVERNADERO

PEDRO JESÚS VERDÍN RIVERA¹, JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ RIVERA², EDUARDO GAMERO INDA³,
FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA⁴

RESUMEN

Se analizó el comportamiento dinámico de un invernadero mediante un modelo matemático de dos ecuaciones no lineales acopladas entre sí a través de las variables de temperatura y humedad absoluta internas. Se desarrollo y valido las leyes matemáticas de desacoplamiento del sistema de ecuaciones mediante el modelo de retroalimentación de estado salida-entrada, determinando la función de transferencia de las variables de interés mediante el modelo matemático de forma independiente. Para el caso de la variable de temperatura la función de transferencia obtenida es de primer orden más tiempo muerto, en la variable de la humedad absoluta, la función de transferencia es un integrador más tiempo muerto. Además, se desarrolló el análisis de compensación de tiempo muerto mediante un predictor de Smith considerando la presencia de perturbaciones medibles en ambas ecuaciones. El análisis temporal de los sistemas dinámicos desarrollado mediante simulación valido la operación del sistema de control propuesto con tiempo muerto y perturbaciones medibles, verificando que la respuesta presenta un error en estado estable de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Palabras clave: Análisis termodinámico, Controlador PID, Ecuaciones diferenciales no lineales, Invernadero, Sistemas dinámicos.

ABSTRACT

The dynamic behavior of a greenhouse was analyzed using a mathematical model of two non-linear equations coupled together through the internal variables of temperature and absolute humidity. The mathematical laws of decoupling of the

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Durango. 14041191@itdurango.edu.mx

² Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Durango. jamartinez@itdurango.edu.mx

³ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Durango. egamero@itdurango.edu.mx

⁴ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Durango. fgodinez@itdurango.edu.mx

system of equations were developed and validated through the output-input state feedback model, determining the transfer function of the variables of interest through the mathematical model independently. In the case of the temperature variable, the transfer function obtained is first order plus dead time, in the absolute humidity variable, the transfer function is an integrator plus dead time. In addition, the dead time compensation analysis was developed using a Smith predictor considering the presence of measurable disturbances in both equations. The temporal analysis of the dynamic systems developed through simulation validated the operation of the proposed control system with dead time and measurable disturbances, verifying that the response presents a steady state error of $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Keywords: Thermodynamic analysis, PID controller, Nonlinear differential equations, Greenhouse, Dynamic systems.

INTRODUCCIÓN

Un invernadero es un área cerrada cubierta de material translúcido, su estructura está cubierta típicamente de vidrio o plástico, que deja pasar los rayos del sol. En el interior del invernadero se genera el microclima ideal para el sano desarrollo de las diferentes variedades de cultivos.

Además, un invernadero permite controlar una serie de variables, incluida la temperatura y humedad relativa internas, concentración de dióxido de carbono e intensidad luminosa que influyen directamente en el desarrollo de las plantas y sus frutos (SL, 2023).

La automatización en los invernaderos resulta ser de gran utilidad hoy en día, debido que proporciona varios beneficios al agricultor, mejorando la productividad y la calidad de los diferentes cultivos. A través de la automatización en los invernaderos ha sido posible controlar las variables de temperatura y de humedad relativa en los rangos adecuados permitiendo un correcto desarrollo de las semillas (Marrero Ramírez Secundino, 2020).

Según (Rijswick, 2018) , los países con mayor superficie agrícola dedicada a la producción hortofrutícola bajo invernadero son la República Popular de China y España con 82 mil Ha y 70 mil Ha respectivamente, mediante cristal o aislamiento

de plástico, convirtiéndolos en los dos principales países líderes que implementan la técnica de producción de cultivos protegidos.

En este contexto, México solo posee un área de 20 mil Ha dedicadas al sector hortofrutícola y su mayor concentración está en el tipo de invernaderos en aislamiento plástico ubicando a México en el sexto lugar en adoptar esta técnica junto a Morocco.

Según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), la superficie cultivada en invernaderos en Durango es de 334.32Ha, representando una proporción pequeña del total de superficie cultivada en el estado con 148,075.11Ha. (Mexico, Anuario Estadístico de la Producción Agrícola, 2022)

Los cambios abruptos en la temperatura interna de un invernadero afectan el rendimiento de los procesos biológicos de las plantas, especialmente la fotosíntesis, respiración y la absorción de agua y minerales, por lo tanto, la regulación de la temperatura debe ajustarse a las condiciones más favorables para el crecimiento de la planta porque su relación determina la tasa del proceso de fotosíntesis y por lo tanto su crecimiento (José de Jesús García Cortés, 2020).

Dado que la energía solar y el agua son recursos que ya existen y no son finitos, discutir su uso y aprovechamiento dentro de un invernadero hace que el tema sea más relevante. Estos recursos se aplican como parte de una solución inteligente que está determinada por la integración de la energía solar directamente en la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas (Barbosa Rodriguez, 2020).

Durango es uno de los proveedores fundamentales de agua, ya que proporciona un escurrimiento de $11,486 \text{ m}^3/\text{año}$, por lo cual da oportunidad de controlar la eficiencia del uso del agua en los cultivos. Entre los cultivos que se cultivan en el estado se encuentran la alfalfa, el maíz en grano, el frijol, el maíz y la avena forrajeros. Dando oportunidad a la crianza de diferentes cultivos mediante el uso de las tecnologías en los invernaderos (Programa de Concurrencia con las Entidades Federativas, 2018).

Se considera un invernadero inteligente el que puede controlar las principales variables ambientales, tales como, temperatura y humedad relativa entre otros factores ambientales dentro del invernadero que ayuden a favorecer al cultivo

proporcionando las condiciones necesarias para un crecimiento óptimo en las diferentes etapas de desarrollo en las diferentes estaciones del año (Pastuña Jorge Enrique Mosquera Masabanda Bryan Stalin et al., 2020, pág. 27) .

La evapotranspiración dependerá del microclima, incluye la transpiración de la planta y la evaporización del suelo, dando como resultado uno de los principales factores que influyen en la sanidad y desarrollo de los cultivos, la diferencia de presión del vapor (DVP), el cual está relacionado directamente con la evapotranspiración (Alvarado Zoe et al., 2019).

Un invernadero facilita el cuidado de los diferentes parámetros ambientales como la temperatura del aire, humedad relativa, porcentaje de CO_2 , radiación solar, entre otras, para tener las condiciones óptimas mínimas necesarias para la crianza de diversos cultivos (Sandra Ximena Toro Melendez et al., 2019).

Existen diferentes modelos de control los cuales son aplicados para controlar las diferentes variables climatológicas que influyen en los invernaderos, los más comúnmente usados son la lógica difusa y lógica clásica (Pastuña Jorge Enrique Mosquera Masabanda Bryan Stalin et al., 2020, pág. 27).

Este artículo trata del método de desacoplamiento, linealización y control del modelo matemático de un invernadero mediante el modelo de retroalimentación de estado salida-entrada.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelado matemático del invernadero es obtenido a través de un balance de masa y energía del aire que se encuentra en el interior del invernadero, dicho modelo matemático muestra que el comportamiento del invernadero es altamente complejo.

Un modelo sencillo no lineal de calentamiento-enfriamiento de un invernadero (Louis D. Albright, Richard S. Gates, Kostas G. Arvanitis, Alan E. Drysdale, 2001) puede ser obtenido considerando las ecuaciones diferenciales que gobiernen el calor y el vapor de agua del interior del invernadero, estas ecuaciones diferenciales son las siguientes:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{\rho c_p V} [q_h(t) + S_i(t) - \lambda q_f(t)] - \frac{\dot{V}(t)}{V} [T_{in}(t) - T_{out}(t)] - \frac{UA}{\rho c_p V} [T_{in}(t) - T_{out}(t)]$$

Ec.1

$$\frac{dW_{in}}{dt} = \frac{1}{\rho V} q_f + \frac{1}{\rho V} E(S_i(t), W_{in}(t)) - \frac{\dot{V}(t)}{\rho V} [w_{in}(t) - w_{out}(t)]$$

Ec.2

Donde:

- $T_{in}(t)$ Temperatura de interior del invernadero °C
- $T_{out}(t)$ Temperatura de exterior del invernadero °C
- V Volumen de invernadero m^3
- UA Coeficiente de transferencia de calor J/s
- ρ Densidad del aire Kg/m^3
- c_p Calor específico del aire $J * Kg^{-1} * K^{-1}$
- q_h Calor proporcionado al invernadero por el sistema de calefacción °C
- S_i Energía solar radiante interceptada por invernadero W/m^2
- q_f Capacidad de agua del sistema de vaporización N/m^2
- λ Calor latente de vaporización J/Kg
- \dot{V} Razón de ventilación Kgf/m^3
- w_{in}, w_{out} Razón de humedad absoluta interior y exterior respectivamente g/m^3
- $E(S_i, W_i)$ Razón de evapotranspiración de las plantas L/m^2

Modelo matemático desarrollado

Para linealizar el modelo matemático se parte de la siguiente condición de $q_h = 0$.

Transformando la Ec.1 en la siguiente expresión:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{\rho c_p V} [S_i(t) - \lambda q_f(t)] - \frac{\dot{V}(t)}{V} [T_{in}(t) - T_{out}(t)] - \frac{UA}{\rho c_p V} [T_{in}(t) - T_{out}(t)]$$

Ec.3

En una primera aproximación, la razón de evapotranspiración es debido a la energía solar radiante interceptada por invernadero, esto se expresa a través de la siguiente relación:

$$E(S_i(t), W_{in}(t)) = \frac{\alpha}{\lambda} S_i(t) - \beta_T W_{in}(t) \quad \text{Ec.4}$$

Donde:

- α coeficiente que involucra el área del invernadero m^2
- β_T coeficiente general que involucra otras constantes termodinámicas (movimiento del aire, etc.) m/s

Definiendo la temperatura y la humedad absoluta del interior del invernadero como las variables de estado, $x_1(t)$ y $x_2(t)$, respectivamente, la razón de ventilación, la capacidad de vaporización de agua del sistema de humidificación como las variables de control, $u_1(t)$ y $u_2(t)$ respectivamente; la energía solar radiante interceptada por el invernadero, la temperatura externa y la humedad absoluta externa como disturbios representados por $v_1(t) \forall i = 1,2,3$ del modelo matemático, las Ec.1 y 2 pueden ser puestas en forma de espacio de estado procediendo de la siguiente manera.

- | | |
|---------------------------------------|---------------------------|
| • $\dot{x}_1(t) = \frac{dT_{in}}{dt}$ | • $u_2(t) = \dot{q}_f(t)$ |
| • $\dot{x}_2(t) = \frac{dW_{in}}{dt}$ | • $v_1(t) = S_i(t)$ |
| • $u_1(t) = \dot{V}(t)$ | • $v_2(t) = T_o(t)$ |

Es decir, la Ec.1 en forma de espacio de estado se transforma en la siguiente expresión:

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{UA}{\rho c_p V} x_1(t) - \frac{1}{V} x_{in}(t) u_1(t) - \frac{\lambda}{\rho c_p V} + \frac{1}{\rho c_p V} u_1(t) + \frac{UA}{\rho c_p V} u_2(t) + \frac{1}{V} u_1(t) u_2(t)$$

Ec.5

Para generar la segunda ecuación de espacio de estado, se parte de la siguiente expresión:

$$\frac{dW_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho V} q_f(t) + \frac{1}{\rho V} \left[\frac{\alpha}{\lambda} S_i(t) - \beta_T w_i(t) \right] - \frac{\dot{V}(t)}{\rho V} w_{in}(t) + \frac{\dot{V}(t)}{\rho V} w_o(t) \quad \text{Ec.6}$$

Distribuyendo el producto:

$$\frac{dW_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho V} q_f(t) + \frac{1}{\rho V} + \frac{\alpha}{\rho V \lambda} S_i(t) - \frac{\beta_T}{\rho V} w_i(t) - \frac{\dot{V}(t)}{\rho V} w_{in}(t) + \frac{\dot{V}(t)}{\rho V} w_o(t) \quad \text{Ec.7}$$

Sustituyendo las variables de estado correspondientes:

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\beta_T}{\rho c_p V} x_2(t) - \frac{1}{\rho V} u_2(t) - \frac{\alpha}{\lambda \rho V} u_1(t) - \frac{1}{\rho V} x_2(t) u_1(t) + \frac{1}{\rho V} u_1(t) u_3(t) \quad \text{Ec.8}$$

Reuniendo ambas ecuaciones de estado:

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{UA}{\rho c_p V} x_1(t) - \frac{1}{V} x_1(t) u_1(t) - \frac{\lambda}{\rho c_p V} + \frac{1}{\rho c_p V} u_1(t) + \frac{UA}{\rho c_p V} u_2(t) + \frac{1}{V} u_1(t) u_2(t)$$

Ec.7

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\beta_T}{\rho c_p V} x_2(t) - \frac{1}{\rho V} u_2(t) - \frac{\alpha}{\lambda \rho V} u_1(t) - \frac{1}{\rho V} x_2(t) u_1(t) + \frac{1}{\rho V} u_1(t) u_3(t) \quad \text{Ec.8}$$

Se observa que las ecuaciones 7 y 8 constituyen un sistema no lineal, que relaciona la humedad absoluta y la temperatura a través de las propiedades del aire del interior de un invernadero las cuales se encuentran altamente acopladas.

Linealización del modelo

Recordando que los sistemas no lineales pueden ser globalmente linealizados y desacoplados mediante un esquema de retroalimentación:

$$u_1 = \frac{\rho C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T + \lambda V \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w - (\alpha + 1) v_1 - U A v_2}{\rho C_p (v_2 - x_1) + \lambda (v_3 - x_2)}$$

$$u_2 = \frac{(\rho C_p V \widetilde{K}_T \widetilde{U}_T - v_1 - U A v_2)(x_2 - v_3) + \rho C_p V (v_2 - x_1) \widetilde{K}_w \widetilde{U}_w + \frac{\rho \alpha C_p}{\lambda} (x_1 - v_2) v_1}{C_p p (v_2 - x_1) + \lambda (v_3 - x_2)}$$

$$\Delta = \rho C_p (v_2 - x_1) + \lambda (v_3 - x_2)$$

Evaluando la ecuación 7 con u_1 y u_2 se simplifica y se obtiene:

$$x_1(s) = \frac{K_T e^{-L_n s}}{\tau_T s + 1}$$

Donde:

$$K_T = \frac{\rho C_p V \tilde{K}_T}{UA} \quad \tau_T = \frac{\rho C_p V}{UA}$$

Evaluando la ecuación 8 con u_1 y u_2 simplificando obtenemos:

$$x_2(s) = \frac{K_w e^{-e^{-L_n s}}}{\tau_w s + 1} \tilde{U}_w(s) \quad \text{Ec.9}$$

Donde:

$$K_w = \frac{V}{\beta_T} \tilde{K}_w \quad T_w = \frac{\rho V}{\beta_T}$$

Verificación de las leyes de control

Recordando que el modelo matemático de la planta está dado por las siguientes expresiones:

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{UA}{\rho C_p V} x_1(t) - \frac{1}{V} x_1(t) u_1(t) - \frac{\lambda}{\rho C_p V} + \frac{1}{\rho C_p V} u_1(t) + \frac{UA}{\rho C_p V} u_2(t) + \frac{1}{V} u_1(t) u_2(t) \quad \text{Ec.7}$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\beta_T}{\rho C_p V} x_2(t) - \frac{1}{\rho V} u_2(t) \frac{\alpha}{\lambda \rho V} u_1(t) - \frac{1}{\rho V} x_2(t) u_1(t) + \frac{1}{\rho V} u_1(t) u_3(t) \quad \text{Ec.8}$$

Sustituyendo las leyes de control en el espacio de estado no lineal:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) = & -\frac{UA}{\rho C_p V} x_1(t) - \frac{1}{V} x_1(t) \left[\frac{C_p V \tilde{K}_T \tilde{U}_T + \lambda V \tilde{K}_w \tilde{U}_w - (\alpha + 1) v_1(t) - UA v_2(t)}{\Delta(t)} \right] \\ & \pm \frac{\lambda}{\rho C_p V} \\ & \left[\frac{(C_p V \tilde{K}_T \tilde{U}_T - v_1(t) - UA v_2(t))(v_3(t) - x_2(t)) + C_p V (v_2(t) - x_1(t)) \tilde{K}_w \tilde{U}_w + \frac{\rho \alpha C_p}{\lambda} (v_2(t) - x_1(t)) v_1(t)}{\Delta(t)} \right] + \\ & \frac{1}{\rho C_p V} v_1(t) + \frac{UA}{\rho C_p V} v_2(t) + \frac{1}{V} v_2(t) \left[\frac{C_p V \tilde{K}_T \tilde{U}_T + \lambda V \tilde{K}_w \tilde{U}_w}{\Delta(t)} \mp \frac{(\alpha + 1) v_1(t) - UA v_2(t)}{\Delta(t)} \right] \quad \text{Ec.10} \end{aligned}$$

En donde se define:

$$\Delta(t) = \rho C_p [v_2(t) - x_1(t)] + \lambda [v_3(t) - x_2(t)]$$

Agrupando términos, asignando común denominador y simplificando:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) = & \frac{1}{\rho C_p V \Delta(t)} * (-\rho C_p \alpha v_1(t) * [v_2(t) - x_1(t)] - \rho C_p v_1(t) * [v_2(t) - x_1(t)] + \\ & \rho C_p v_1(t) * [v_2(t) - x_1(t)] + \lambda v_1(t) * [v_3(t) - x_2(t)] + \lambda U A v_2(t) * [v_3(t) - x_2(t)] - \\ & \lambda U A x_1(t) * [v_3(t) - x_2(t)] - \lambda \rho C_p V \bar{K}_T \bar{U}_T * [v_3(t) - x_2(t)] + \lambda v_1(t) * [v_3(t) - \\ & x_2(t)] + \lambda U A v_2(t) * [v_3(t) - x_2(t)] - \rho C_p \alpha v_1(t) * [v_2(t) - x_1(t)]) \end{aligned}$$

Ec.11

Entonces se puede concluir que:

$$\dot{x}_1(t) = 0$$

Ahora sustituyendo para $\dot{x}_2(t)$, recordando que:

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\beta_T}{\rho C_p V} x_2(t) - \frac{1}{\rho V} u_2(t) \frac{\alpha}{\lambda \rho V} u_1(t) - \frac{1}{\rho V} x_2(t) u_1(t) + \frac{1}{\rho V} u_1(t) u_3(t) \quad \text{Ec.8}$$

Sustituyendo las leyes de control de $u_1(t)$ y $u_2(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2(t) = & \frac{\beta_T}{\rho V} x_2(t) + \frac{\alpha}{\lambda \rho V} v_1(t) + \frac{1}{\rho V \Delta(t)} * \left((\rho C_p V \bar{K}_T \bar{U}_T - v_1(t) - U A v_2(t)) * \right. \\ & \left. (v_3(t) - x_2(t)) + \rho C_p V \left((v_2(t) - x_1(t)) \bar{K}_w \bar{U}_w + \frac{\rho \alpha C_p}{\lambda} (v_2(t) - x_1(t)) v_1(t) \right) v_1(t) * \right. \\ & \left. \left(\frac{1}{\rho V} v_3(t) - \frac{1}{\rho V} x_2(t) \right) \right) \quad \text{Ec.12} \end{aligned}$$

Asignando común denominador y simplificando:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2(t) = & \frac{1}{\lambda \rho V \Delta(t)} * \left(-\beta_T x_2(t) \lambda \rho C_p * (v_2(t) - x_1(t)) - \beta_T x_2(t) \lambda^2 (v_3(t) - x_2(t)) + \right. \\ & \alpha v_1 \rho C_p (v_2(t) - x_1(t)) + \alpha v_1(t) \lambda (v_3(t) - x_2(t)) + \lambda \rho C_p V \bar{K}_T \bar{U}_T (v_3(t) - x_2(t)) - \\ & U A v_2(t) \lambda (v_3(t) - x_2(t)) + \lambda \rho C_p V (v_2(t) - x_1(t)) \bar{K}_w \bar{U}_w + \alpha \rho C_p (v_2(t) - x_1(t)) v_1(t) + \\ & \lambda \rho C_p V \bar{K}_T \bar{U}_T (v_3(t) - x_2(t)) + \lambda^2 V \bar{K}_w \bar{U}_w (v_3(t) - x_2(t)) - \lambda * (\alpha + 1) v_1(t) (v_3(t) - \\ & x_2(t)) - \lambda U A v_2(t) (v_3(t) - x_2(t)) \left. \right) \quad \text{Ec.13} \end{aligned}$$

Por lo tanto, \dot{x}_1 y $\dot{x}_2(t) = 0$, que son los resultados deseados.

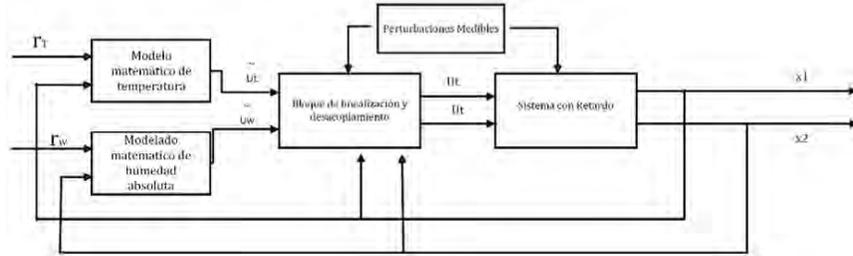


Fig. 1 Sistema con retardo.

Para lograr un comportamiento aceptable y confiable del sistema de control de acuerdo con algunos criterios de rendimiento predeterminados, el ajuste del controlador, en particular para los controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID), identifica el ajuste de sus parámetros (K_c, T_i, T_d). En otras palabras, el ajuste del controlador tiene como objetivo modificar los parámetros del controlador para que el sistema de control reaccione adecuadamente a las perturbaciones y cambios en el valor deseado, así como para cumplir con los requisitos de rendimiento del lazo de control.

Algunas de las técnicas de ajuste más populares para controladores PID que actúan como reguladores e incorporan un modelo de proceso (Ruíz, 2002).

El predictor de Smith

La estructura del predictor de Smith, que se muestra en la fig. 1, se divide en dos partes fundamentales: El controlador primario $C(s)$ y su estructura predictora, el controlador $C(s)$ suele ser un Proporcional Integrador Derivativo, pero también puede ser un controlador de orden superior (J.E. Normey-Rico and E.F. Camacho, 2007).

El predictor consiste en un modelo de un sistema sin tiempo muerto $G_n(s)$, conocido en algunas literaturas como modelo rápido y un modelo de tiempo muerto e^{-Ln_s} . Por tanto, el proceso completo es $P_n(s) = C(s) e^{-Ln_s}$. El modelo rápido $G_n(s)$ se aplica para calcular la predicción de bucle abierto. Para tener en cuenta los errores de modelado, la diferencia entre el proceso y su salida, incluido el tiempo muerto, se agrega a la predicción de bucle abierto.

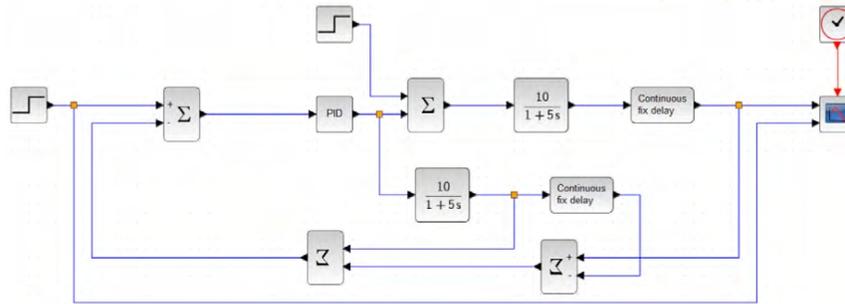


Fig. 2 Diagrama a bloques del sistema de control con tiempo muerto.

En la fig. 2 se muestra el diagrama a bloques de la propuesta de un sistema de control por retroalimentación, para efectos de la simulación se propone una señal de referencia de 25 °C. El valor respectivo del tiempo muerto representado por bloque de continuous fix delay es de 2000 segundos y con 9192 bit's, se muestra la entrada de una perturbación que se hará presente en los 300 segundos aproximadamente para comprobar la propuesta de control.

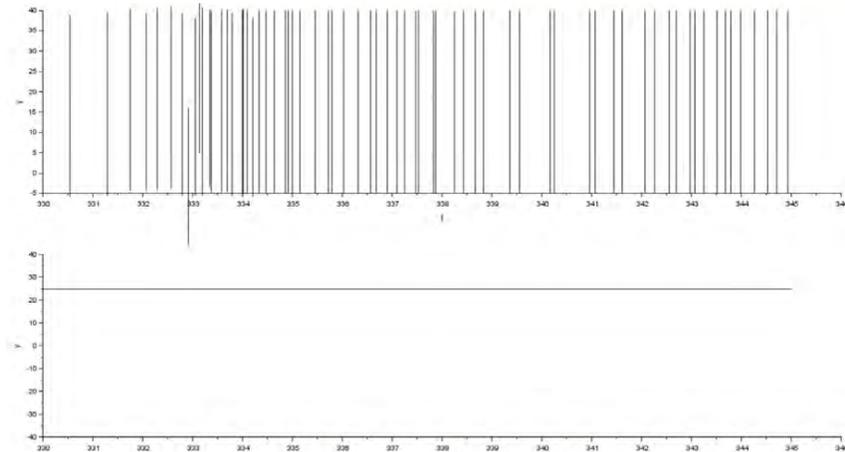


Fig. 3 Respuesta del sistema con la entrada de las perturbaciones.

En la fig. 3 se muestra como el sistema reacciona ante la perturbación medible que entra a los 320 segundos con la señal de referencia.

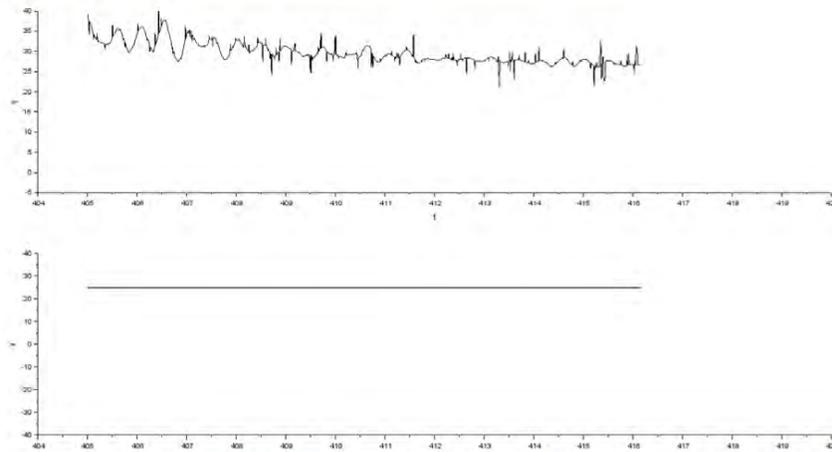


Fig.4 Respuesta del sistema en estado estable.

Durante el transcurso de la simulación la respuesta del sistema llega a su valor de estado estable, fig. 4

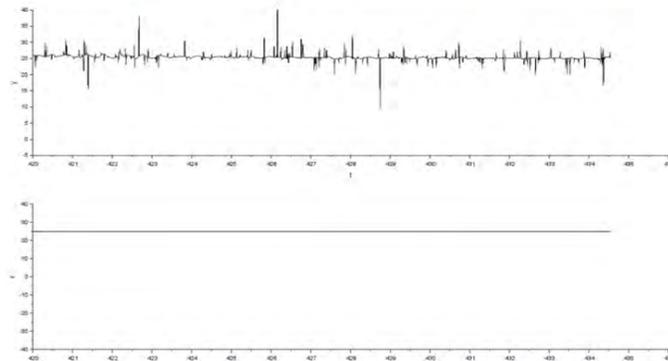


Fig.5 Respuesta del sistema en estado estable con picos.

En esta parte de la simulación nuestro sistema siempre está dentro del rango establecido, presentado por breves momentos por unos picos, los cuales serán muy constantes por un periodo corto de tiempo.

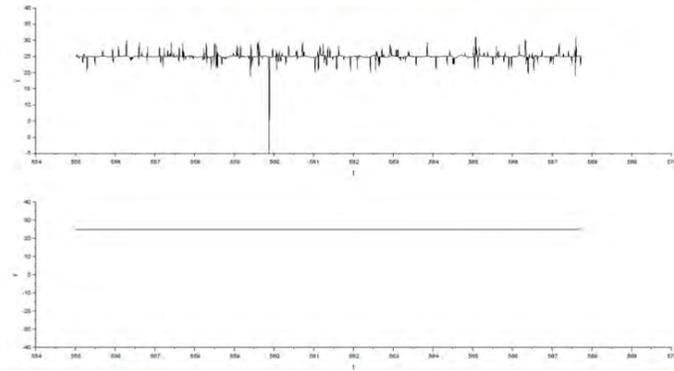


Fig.6 Respuesta del sistema con disminución de los picos

Durante la simulación con una duración de 3000 segundos o lo equivalente a 50 minutos, los picos disminuyen hasta obtener un valor casi nulo.

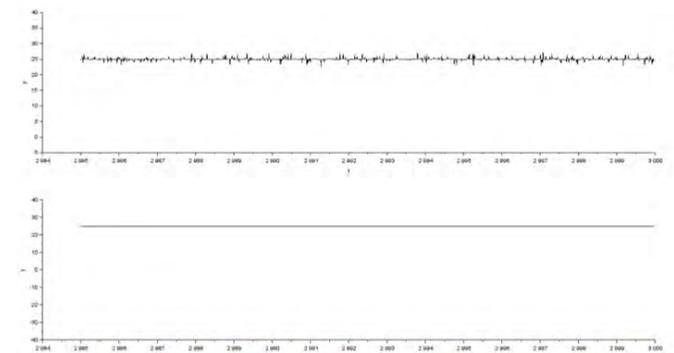


Fig.7 Respuesta del sistema en estado estable con variación de $\pm 2^\circ\text{C}$

La simulación del sistema de control es completamente estable, desapareciendo los picos y manteniendo nuestra referencia de 25°C con una variación de $\pm 2^\circ\text{C}$ en un lapso de 40 minutos aproximadamente.

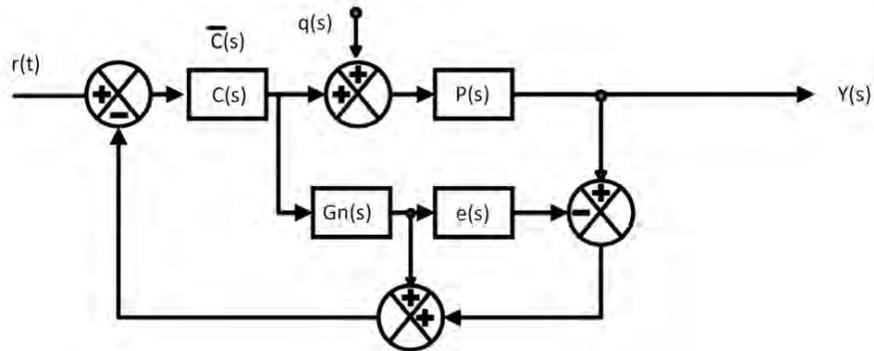


Fig.8 Diagrama a bloques de sistema con retardo.

$$e(s) = e^{-Ln_s} = \text{Tiempo muerto}$$

$$P_n(s) = G_n(s)e^{-Ln_s}$$

C(s)=Controlador

Considerando

$$P(s) = P_n(s)$$

$$G(s) = G_n(s)$$

$$L = L_n$$

Se supone que $q(t)=0$

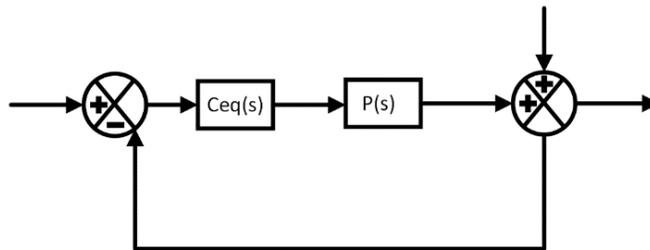


Fig. 9 Diagrama a bloques del sistema de control simplificado.

$$H(s) = \frac{Ceq(s)P}{1+Ceq(s)} \quad \text{pero} \quad Ceq(s) = \frac{C(s)}{1+C(s)G_n(s)-C(s)G_n(s)} \quad \text{Ec.14}$$

$$H(s) = \frac{C(s)}{\frac{1+C(s)G_n(s)-C(s)G_n(s)}{1+C(s)G_n(s)-C(s)P_n(s)}} = \frac{C(s)P_n(s)}{1+C(s)G_n(s)-C(s)P_n(s)} = \frac{C(s)P_n(s)}{H_c(s)[P(s)-P_n(s)+G_n(s)]}$$

Ec.15

Pero:

$$P_n(s) = P(s)$$

$$H(s) = \frac{C(s)P_n(s)}{1+C(s)[P(s)-P_n(s)+G_n(s)]} = \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)G_n(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)G_n(s)} e^{-Lns}$$

Ec.16

DISCUSIÓN

Se realizó el análisis de la respuesta temporal del sistema desacoplado para la variable de interés de temperatura interna del invernadero, el tiempo de simulación fue de 50 minutos sometiendo el sistema a una señal de referencia de 25 °C, el modelo matemático del invernadero es de una función de transferencia más tiempo muerto de 33 minutos. La compensación del tiempo muerto se realizó mediante un predictor de Smith con un buffer de 9192 bit's para una simulación óptima. La sintonización del sistema de control se desarrolló mediante el método de ziegler-nichols, posteriormente los valores de los parámetros de sintonización fueron afinados a prueba y error. La respuesta de salida del sistema de control se estabilizó a los 40 min. Teniendo un error de estado estable de $\pm 2^\circ\text{C}$. Se añadió una señal de perturbación al sistema de control que incide a los 300 segundos, el comportamiento dinámico del sistema de control permite anular la señal de perturbación. Es necesario aclarar que la señal de salida del sistema de control presenta picos dentro de su respuesta por periodos cortos de tiempo.

REFERENCIAS

- Alvarado Zoe, Durán García, Héctor M., Rossel Kipping, Erich D., Algara Siller Marcos, & Cisneros Almazán Rodolfo. (2019). Semi-automatización de un invernadero de pequeña escala. *Agro Productividad*, 12(9), 53–59. doi: 10.32854/agrop.v12i9.1389
- Barbosa Rodriguez, R. A. (2020). Invernadero Inteligente, la contribución para el mejoramiento de la calidad de vida en la Guajira Colombiana. *UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA*, 1(1), 9.
- J.E. Normey-Rico and E.F. Camacho. (2007). *Control of Dead-time*. Sevilla, España: Springer.

- José de Jesús García Cortés, I. M. (2020). TRANSMISOR DE TEMPERATURA CON SALIDA ALÁMBRICA DE 4 A 20 mA, SALIDA INALÁMBRICA CON EL PROTOCOLO ZIGBEE, Y CON SALIDA DE CONTROL ON-OFF PROGRAMABLE. *Pistas Educativas*, 42(137), 12.
- Louis D. Albright, Richard S. Gates, Kostas G. Arvanitis, Alan E. Drysdale. (2001). Environmental control for plants on Earth and in space. *IEEE*, 21.
- Marrero Ramírez Secundino, S. V. (2020). Automatización y control de un invernadero. *CIENCIAS DE LA INGIENERIA Y APLICADAS*, 4(1), 12.
- Mexico, G. d. (01 de 01 de 2022). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. (Gobierno de Mexico) Recuperado el 01 de 01 de 2022, de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Pastuña Jorge Enrique Mosquera Masabanda Bryan Stalin, Á., & Marrero Ramírez, S. (2020). *IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SCADA PARA EL CONTROL, MONITOREO Y ANÁLISIS DE INDICADORES DE OPERACIÓN DEL INVERNADERO DEL CAMPUS SALACHE*.
- Programa de Concurrencia con las Entidades Federativas. (2018). *Compendio de indicadores*.
- Rijswick, c. v. (26 de 01 de 2018). *Rabobank*. Recuperado el 26 de 01 de 2018, de <https://www.rabobank.com/en/raboworld/articles/the-world-vegetable-map.html>
- Ruíz, V. M. (2002). MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID QUE OPERAN COMO REGULADORES. *ingeniería*, 21-36.
- Sandra Ximena Toro Melendez, Héctor Iván Tangarife Escobar, & Cindy Vanessa Carmona Cadavid. (2019). *Implementación del sistema SCADA, aplicación a invernaderos para optimizar el control y la monitorización del microclima en el cultivo de hortalizas*. COLOMBIA.
- SL, A. (01 de 01 de 2023). *MUNDORIEGO*. (MUNDORIEGO) Recuperado el 01 de 01 de 2023, de <https://mundoriego.es/invernaderos-que-son-y-para-que-tipo-de-cultivos-se-utilizan/>