

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESQUEMAS DE
CONTROL PARA PROCESOS NO LINEALES**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN MEDIANTE “HARDWARE IN THE
LOOP” DE CONTROLADORES APLICADOS AL MODELO DE UN
INVERNADERO**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
AUTOMATIZACIÓN**

JEFFERSON JAVIER PINZÓN SOLANO

jefferson.pinzon@epn.edu.ec

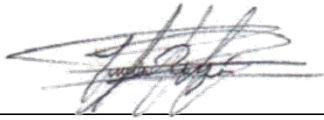
DIRECTOR: ING. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO PhD

oscar.camacho@epn.edu.ec

DMQ, octubre 2022

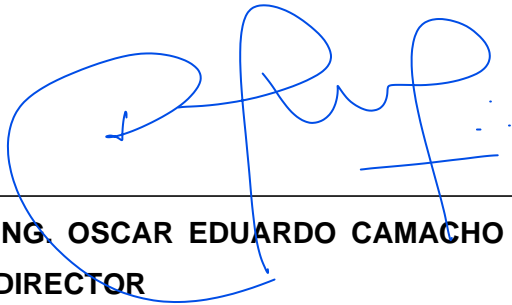
CERTIFICACIONES

Yo, JEFFERSON JAVIER PINZÓN SOLANO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



JEFFERSON JAVIER PINZÓN SOLANO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JEFFERSON JAVIER PINZÓN SOLANO, bajo mi supervisión.



**ING. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO PhD
DIRECTOR**

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como los productos resultantes del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JEFFERSON JAVIER PINZÓN SOLANO

ING. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO PhD.

AGRADECIMIENTO

A mi profesor, tutor y director, Ing. Oscar Camacho, PhD, quien me ha brindado sus sabios consejos y palabras de aliento en los momentos más oportunos e, igualmente, por su valiosa guía en el desarrollo de este proyecto.

A mi madre, Flor, por su apoyo y amor incondicional, una mujer fuerte a la que le atribuyo todos mis pequeños y grandes logros.

A mi hermano, Alex, por estar a mi lado sin importar la situación, por ser la persona quien ha alumbrado y guiado el sendero de mi vida.

A mi hermana, Verónica, por siempre apoyarme en todos mis proyectos.

A mi padrastro, Enrique, por enseñarme el valor del trabajo duro.

A mis grandes amigos, José y Gustavo, quienes recorrieron junto a mi este largo camino desde sus inicios. En particular, quiero hacer una mención especial a Mirkka, Andrés, Daniel, Erika, Alisson, Nancy, quienes me han ofrecido una amistad sincera.

“La vida es y siempre será una ecuación sin solución, pero contiene algunos factores conocidos ”.

- Nikola Tesla

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IV
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Alcance	3
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Modelo matemático que describe el comportamiento de un invernadero	4
1.4.2 Aproximación de sistemas de orden elevado a modelos de primer orden	5
1.4.3 Esquema de control tipo PID	6
1.4.3.1 Sintonización de controladores tipo PID	7
1.4.4 Esquema de control por modos deslizantes (SMC)	7
1.4.4.1 Sintonización de controladores por modos deslizantes (SMC)	9
1.4.5 Esquema de control selectivo	9
1.4.6 Implementación de controladores en un sistema embebido	10
2 METODOLOGÍA.....	10
2.1 Obtención y validación del modelo matemático.....	11
2.2 Aproximaciones del modelo matemático	17
2.3 Sintonización y discretización de los controladores.....	26
2.3.1 Controladores PI de temperatura.....	26
2.3.2 Controladores por modos deslizantes de temperatura.....	28
2.3.3 Controladores PI de temperatura y humedad del esquema de control selectivo	32
2.4 Implementación del hardware in the loop	33
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	35
3.1 Resultados	37

3.1.1	Respuesta de los controladores PI	37
3.1.2	Respuesta de los controladores por modos deslizantes (SMC)	41
3.1.3	Respuesta del controlador selectivo	43
3.1.4	Comparación de los esquemas de control	45
3.2	Conclusiones	46
3.3	Recomendaciones	47
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación, se expone el modelamiento matemático de un invernadero junto con su validación a través de la comparación de los resultados obtenidos con datos reales medidos, para lo cual se realiza un análisis estadístico en base al error cuadrático medio (RMSE). Se obtiene una aproximación del modelo matemático a un modelo de orden reducido, el cual permitirá la sintonización y diseño de esquemas de control tipo PID, SMC y selectivo, los dos primeros esquemas se enfocan al control de temperatura, mientras que el último esquema mencionado es orientado al control tanto de temperatura como de humedad. Se trabaja bajo el concepto de hardware in the loop, para lo cual los controladores discretizados serán implementados en una tarjeta Arduino Mega 2560 que se comunicará por medio de comunicación serial con el software de simulación Simulink de Matlab® en donde se encuentra simulado el modelo matemático del invernadero junto con sus cambios de referencia y perturbaciones correspondientes a datos reales.

Se diferencia cual es el esquema de control que presenta mejores resultados en base al análisis de los datos obtenidos, tomándose como referencia ciertos parámetros como máximo sobreimpulso (M_p), tiempo de establecimiento (t_s) e índices de desempeño (ISE, ISCO).

PALABRAS CLAVE: PID, SMC, selectivo, hardware in the loop, RMSE.

ABSTRACT

In the present work, the mathematical modeling of a greenhouse is presented together with its validation through the comparison of the results obtained with real measured data, for which a statistical analysis is performed based on the root mean square error (RMSE). An approximation of the mathematical model to a reduced order model is obtained, which will allow the tuning and design of PID, SMC and selective control schemes, the first two schemes are focused on temperature control, while the last mentioned scheme is oriented to control both temperature and humidity. We work under the concept of hardware in the loop, for which the discretized controllers will be implemented in an Arduino Mega 2560 board that will communicate through serial communication with the simulation software Simulink of Matlab ® where the mathematical model of the greenhouse is simulated along with its reference changes and disturbances corresponding to real data.

A differentiation is made as to which control scheme shows the best results based on the analysis of the data obtained, taking as reference certain parameters such as maximum overshoot (M_p), settling time (t_s) and performance indexes (ISE, ISCO).

KEYWORDS: PID, SMC, selective, hardware in the loop, RMSE.

1 INTRODUCCIÓN

Ecuador se caracteriza por ser un país exportador de diferentes productos, en [1] se menciona que el sector agrícola, ganadero, silvicultura y pescadero contribuyen al PIB con 9.63%, siendo así este el cuarto sector más relevante para el Ecuador, también se señala que del 100% de los cultivos planteados tan solo el 89.06% se logra cosechar (de dicho porcentaje solo el 91.14% es comercializado) esto debido a varios factores como plagas, sequias, inundaciones, etc. Una de las opciones para reducir las pérdidas de los cultivos es a través del uso de invernaderos, los invernaderos son espacios donde se mantienen invariables a la temperatura, humedad y otro tipo de parámetros de modo que se favorezca al crecimiento de los cultivos [2].

Según [2], [3] los beneficios de cultivar en un invernadero son: control de plagas, lo que conlleva una reducción en el uso de pesticidas; modificación de las condiciones del ambiente; reducción del ciclo vegetativo; modificación de la temporada de cosecha; cultivo protegido a los cambios bruscos del clima; incremento de la cantidad de cosechas al año.

Las flores son el tipo de cultivo que exige mayores demandas climáticas para su correcto crecimiento tal y como se menciona en [2], en este ejemplo de cultivo se evidencia la necesidad de invernaderos. Rescatando los datos de [4] tenemos que en el año 2009 y 2010 en Ecuador se produjo un incremento en la producción de rosas del 31.6%, de donde el 94.1% de este cultivo provino de invernaderos y tan solo el 5.1% resultado de la cosecha a campo abierto, en la Figura 1.1 se presenta más a detalle la producción de rosas mencionadas.

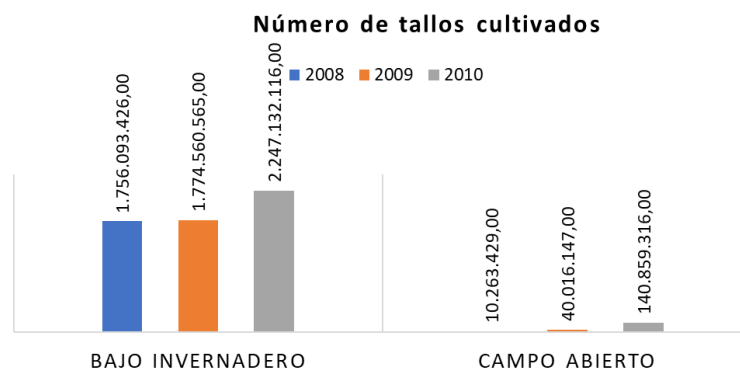


Figura 1.1. Número de tallos de rosa cosechados entre 2008 y 2010 [4]

En [2] se indica que el uso de invernaderos en Ecuador ha crecido considerablemente. El año en que se realizó el estudio (2018) existían 30 empresas dedicadas a construir invernaderos y, además, se conoce que el costo de construir un invernadero de metal

variaba de los \$24.00 a \$40.00 el m^2 , en tanto que si la estructura era de madera entonces el precio variaba de \$11.00 a \$15.00 el m^2 , la variabilidad de los precios dependen en gran medida de los diferentes aspectos que hay que tener en cuenta para la implementación de un invernadero como: tipología (a-frame, quonset, arch-roof), dimensiones (alto, ancho, largo), forma de ventilación (lateral, frontal, central), apertura manual o automática de las ventanas, material del cobertor.

En [5] se propuso utilizar la energía geotérmica de los páramos del Ecuador para mediante un intercambiador de calor lograr controlar la temperatura mínima interna del invernadero durante las noches, llegando a obtener que es rentable la producción de tomates siempre y cuando se utilice un intercambiador de calor de PVC.

En [3] se planteó la automatización de un invernadero enfocando en controlar el riego de los cultivos y la temperatura interna, este último a través de un ventilador encargado de reducir la temperatura, la lógica de control es un control ON-OFF encargado de manipular las variables en base a las mediciones de temperatura y humedad relativa comparadas con la referencia requerida.

En el presente estudio, se plantea el diseño de diversos controladores enfocados en un principio al control de temperatura interna de un modelo matemático del invernadero a través de un calefactor y un sistema de refrigeración (nebulización), proponiéndose como base a dos esquemas de control, el primero es el tradicional esquema de control tipo PID; en segundo lugar se presenta un esquema de control más robusto conocido como control por modos deslizantes (SMC), ambos esquemas de control serán implementados dentro de una tarjeta embebida para de este modo trabajar bajo el concepto de hardware in the loop mientras que el modelo matemático se encontrara en el software de simulación Simulink de Matlab ®, con este método se busca obtener resultados más aproximados a la implementación real del sistema. Como material adicional a los alcances del presente trabajo se propone un controlador tipo selectivo para el control tanto de temperatura como de humedad.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar dos esquemas de control tipo PID y SMC en un sistema embebido con capacidad de conexión a una planta de un invernadero simulado en el software Simulink de Matlab ®, bajo el concepto de hardware in the loop.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una revisión bibliográfica referente al modelo matemático que describa el invernadero.
2. Realizar una revisión bibliográfica acerca del diseño y sintonización de controladores PID y SMC.
3. Realizar una revisión bibliográfica sobre la implementación de controladores en una tarjeta embebida.
4. Implementar en el software Simulink de Matlab ® un modelo matemático de un invernadero.
5. Diseñar dos esquemas de control tipo PID y SMC para el invernadero.
6. Implementar los controladores diseñados en un tarjeta embebida de modo que se verifique y compruebe el desempeño de los controladores implementados mediante el concepto hardware in the loop junto con el modelo matemático de la planta en el software Simulink de Matlab ®.

1.3 ALCANCE

Se realizará una revisión bibliográfica del modelo matemático que describe el comportamiento del invernadero, para validarlo con datos reales y seguidamente obtener su aproximación a un modelo de orden reducido.

Se realizará una revisión bibliográfica acerca del diseño y sintonización de controladores PID y SMC identificando ventajas y desventajas de cada uno.

Se realizará una revisión bibliográfica sobre la implementación de controladores en una tarjeta embebida definiendo los puntos a tener en cuenta para llevar a cabo dicha implementación.

Se implementará el modelo matemático del invernadero en el software Simulink de Matlab ® bajo los parámetros de un invernadero real expuesto en [6], [7].

Se diseñarán dos esquemas de control tipo PID y SMC para el control de temperatura, tanto para la refrigeración como para la calefacción.

Se implementarán los dos esquemas de control diseñados en una tarjeta embebida de modo que se verifique y compruebe el desempeño de los controladores bajo el concepto

de hardware in the loop junto con el modelo matemático de la planta en el software Simulink de Matlab®.

1.4 MARCO TEÓRICO

En esta sección, se presenta el sustento teórico y matemático que sirve de base para la investigación a realizarse, se realiza un resumen de la información investigada para el planteo del modelo matemático que describe el comportamiento de un invernadero así como los fundamentos de los controladores tipo PID, SMC (junto con su implementación en una tarjeta embebida) y selectivo.

1.4.1 MODELO MATEMÁTICO QUE DESCRIBE EL COMPORTAMIENTO DE UN INVERNADERO

De acuerdo con [8] en los invernaderos se produce un complejo conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren simultáneamente y presentan una alta interacción entre ellos, el crecimiento de las plantas se ve afectado principalmente por las variables externas como radiación fotosintéticamente activa, temperatura, humedad y concentración de CO₂ al interior del aire del invernadero. Para el modelado del clima del invernadero se deben aplicar balances de masa y energía, en [6] se plantea que se requieren mínimo cuatro ecuaciones diferenciales para el modelado de un invernadero (dependiendo de los parámetros requeridos). Tomándose como referencia a [8] se presenta cuáles son los diferentes tipos de variables presentes en un invernadero:

- Variables controladas: radiación interior (mediante mallas de sombreo), temperatura interior (mediante sistemas de refrigeración o calefacción), concentración de CO₂ y humedad.
- Variables manipuladas: ventilación natural, mallas de sombreo, sistemas de calefacción, sistemas de nebulización y sistemas de enriquecimiento de CO₂.
- Perturbaciones: ambientales (temperatura, humedad, radiación, lluvia, velocidad y dirección del viento), transpiración del cultivo, características del invernadero (techo, superficie del suelo).

En [8] se señala que las hipótesis asumidas por varios autores para simplificar el modelado de un invernadero son:

- El material de la cubierta es homogéneo y capacidad calorífica insignificante.

- La capacidad térmica del cultivo es despreciable y la temperatura del mismo es uniforme en todo su volumen.
- El aire se considera homogéneo.
- La tierra es la composición de un número infinito de capas horizontales homogéneas y el flujo de calor es unidireccional.

Para el presente trabajo se toma como referencia el modelo matemático expuesto en [9], dicho modelo describe el comportamiento dinámico del invernadero en tres ecuaciones diferenciales de primer orden, derivadas del balance de energía y masa. Las ecuaciones describen el comportamiento de la temperatura interna, humedad absoluta interna y temperatura de la superficie del suelo. En un principio, se plantea un control solamente de temperatura interna; sin embargo, como se observara en la Sección 2.2 dicho planteamiento puede ser modificado a un control de humedad relativa y temperatura, por lo cual se utilizan las dos ecuaciones diferenciales previamente indicadas a excepción de la ecuación de la temperatura del suelo debido a que no se encuentra vinculada a los objetivos que se desean alcanzar. El modelo matemático será revisado con mayor detenimiento en la Sección 2.1.

1.4.2 APROXIMACIÓN DE SISTEMAS DE ORDEN ELEVADO A MODELOS DE PRIMER ORDEN

Con la obtención del modelo matemático el siguiente paso es la sintonización de los controladores; sin embargo, dependiendo del sistema modelado se pueden llegar a obtener modelos matemáticos no lineales de un elevado orden, una solución es la aproximación a modelos de primer orden que presentan una respuesta muy similar al sistema modelado como por ejemplo los modelos de primer orden con retardo (FOPDT):

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-t_0 s} \quad (1.1)$$

El proceso para obtener las aproximaciones es mediante la curva de reacción en lazo abierto, la cual consiste en establecer en un punto de operación al sistema para posteriormente ingresar un cambio tipo escalón en la entrada y observar su respuesta en la salida, dependiendo del método a utilizar se toman datos de diferentes puntos de interés y se calculan los parámetros de la aproximación. A continuación, se presentan las ecuaciones para obtener la aproximación de primer orden sin retardo según el método de Alfaro [10]:

$$k = \frac{\Delta Y}{\Delta U} \quad (1.2)$$

$$\tau = -0.91t_{25\%} + 0.91t_{75\%} \quad (1.3)$$

$$t_0 = 1.262t_{25\%} - 0.262t_{75\%} \quad (1.4)$$

En la Figura 1.2, se presenta los puntos de interés en la curva de reacción según el método de Alfaro.

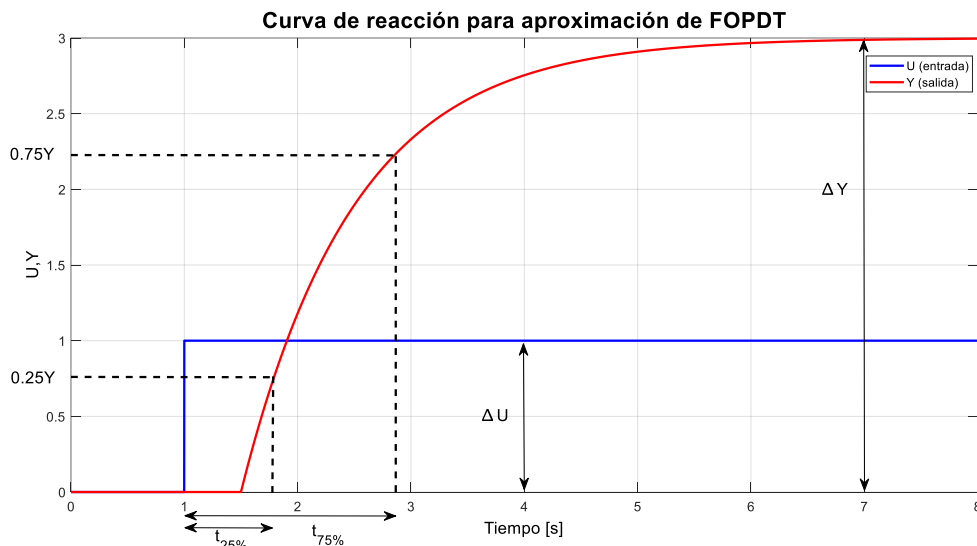


Figura 1.2. Curva de reacción con los puntos de interés según el método de Alfaro

1.4.3 ESQUEMA DE CONTROL TIPO PID

Como se menciona en [11] los controladores tipo PID están compuestos por tres tipos de acciones:

1. Acción proporcional (k_p): se enfoca en actuar en base a una proporcionalidad del error por lo cual reduce el error en estado estable. Sin embargo, no logra disminuirlo a cero.
2. Acción integral (k_i): se enfoca en actuar en base al error acumulado por lo cual el error en estado estable es cero; sin embargo, es relativamente lento.
3. Acción derivativa (k_d): se enfoca en actuar de forma predictiva, por lo cual se presenta una acción de control más rápida. Sin embargo, amplifica señales de ruido y consecuentemente se pueden llegar a saturar las acciones de control.

La combinación o simple acción de estos tres tipos de acciones desemboca en varios tipos de controladores PID como son: P, PI, PD y PID; para el presente proyecto se plantea el uso del esquema tipo PI teniéndose que su ecuación característica es:

$$U_{PI}(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \quad (1.5)$$

1.4.3.1 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES TIPO PID

La sintonización de los controladores tipo PID se la puede realizar en lazo abierto (curvas de reacción) o lazo cerrado (oscilación mantenida, good gain) tal y como se indica en [12]. En la Sección 1.4.2 se planteó trabajar con curvas de reacción por lo cual se hará más énfasis en la sintonización de controladores PID en lazo abierto, las ecuaciones de sintonización variaran acorde al método escogido, métodos como Ziegler-Nichols, Cohen y Coon o Dahlin son útiles cuando la aproximación obtenida es del tipo FOPDT; sin embargo, si la aproximación es diferente a una de primer orden con retardo entonces es recomendable trabajar según la Tabla 4.5 de [13], en la cual se presentan ecuaciones de sintonización de controladores PID para diferentes tipos de modelos.

La aproximación del invernadero (que se obtendrá en la Sección 2.2) será del tipo de primer orden sin retardo y basándose en [13] las ecuaciones de sintonización de los controladores PI serán:

$$k_p = \frac{\tau}{T_c k} \quad (1.6)$$

$$k_i = \frac{k_p}{\tau} \quad (1.7)$$

De la ecuación 1.6 se tiene que T_c es un parámetro de ajuste.

1.4.4 ESQUEMA DE CONTROL POR MODOS DESLIZANTES (SMC)

El controlador por modos deslizantes (SMC) es un esquema de control robusto de simple implementación tanto para procesos lineales como no lineales, el cual requiere el modelo que relaciona la variable controlada con la variable manipulada. Lo que caracteriza a este tipo de controladores es que su robustez compensa los errores de modelado que se presentan al linealizar un modelo de naturaleza no lineal [14].

En los SMC se debe definir una superficie de deslizamiento, la cual determinara el comportamiento que la variable manipulada deberá seguir para que la variable controlada alcance un valor establecido, dichas superficies de deslizamiento pueden presentar diferentes esquemas y dependerán del orden del modelo aproximado del sistema, en las ecuaciones 1.8 y 1.9 se presentan superficies de deslizamiento de tipo derivativa e integral respectivamente,

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(t) \quad (1.8)$$

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^n \int e(t) dt \quad (1.9)$$

Donde:

λ : parámetro de ajuste.

n : orden del modelo aproximado.

$e(t)$: error.

La acción de control de los SMC está compuesta por la suma de dos acciones de control, una acción de control llamada discontinua (U_D) y otra llamada equivalente (U_{eq}), esta última se obtiene en base a la superficie de deslizamiento, mientras que por otro lado la parte discontinua está representada por la ecuación 1.10.

$$U_D = k_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (1.10)$$

Donde:

k_D : constante de alcanzabilidad.

δ : parámetro de ajuste encargado de reducir el chattering.

En la Figura 1.3, se puede apreciar como el sistema se encuentra en un punto X_0 y mediante la acción de control discontinua se logra llevar al sistema a la superficie de deslizamiento, en este punto actuará la acción de control equivalente para llevar al sistema al valor deseado.

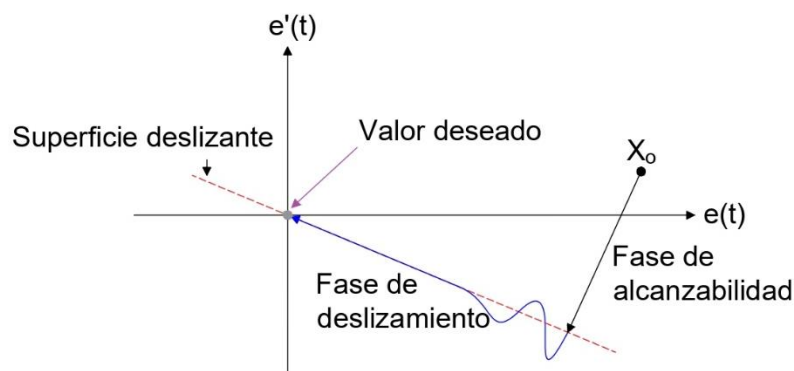


Figura 1.3. Comportamiento de un control por modos deslizantes

1.4.4.1 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES POR MODOS DESLIZANTES (SMC)

La falta de ecuaciones de sintonización para los SMC es una de las desventajas de estos esquemas de control, en lo general la sintonización se realiza en base a métodos heurísticos. Sin embargo, se han realizado investigaciones para hallar ecuaciones que permitan un ajuste de los diferentes parámetros requeridos. En [14] se presenta las ecuaciones para una aproximación FOPDT asumiendo una superficie tipo PID:

$$S(t) = \frac{de(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int e(t) dt \quad (1.11)$$

Las ecuaciones de sintonización son:

$$\lambda_1 = \frac{t_0 + \tau}{t_0 \tau} \quad (1.12)$$

$$\lambda_0 \leq \frac{\lambda_1^2}{4} \quad (1.13)$$

$$k_D = \frac{0.51}{|k|} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)^{0.76} \quad (1.14)$$

$$\delta = 0.68 + 0.12|k|k_D\lambda_1 \quad (1.15)$$

1.4.5 ESQUEMA DE CONTROL SELECTIVO

El control selectivo se caracteriza por ser un esquema que permite el control de un sistema que tiene más salidas que entradas, esto se lo logra a través de criterios de selección que permiten tomar la acción de control que afectara a una salida o a otra, en otras palabras se debe seleccionar cual es la salida primordial y cuál es la secundaria, a la salida principal se le asigna un rango de valores que son admisibles, si la salida principal se encuentra dentro de dichos rangos entonces se intercambia la acción de control para regular la salida secundaria, pero si la variable principal no se encuentra dentro de los rango establecidos entonces la acción de control se intercambia para regular la salida principal. El esquema de control requiere dos controladores que comparten el mismo actuador, pero poseen diferentes referencias, estos controladores pueden ser de diferentes tipos PID, SMC, etc.

1.4.6 IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES EN UN SISTEMA EMBEBIDO

Un sistema embebido es un sistema electrónico diseñado con el objetivo de cumplir una tarea en específica dentro de un proceso mucho más grande, de modo que proporcionan flexibilidad y funcionalidad [15].

El objetivo de implementar los controladores en un sistema embebido es obtener resultados un poco más apegados a los datos que se obtendrían en la realidad, para la implementación de los controladores en un sistema embebido se debe tener varios puntos en cuenta:

- La velocidad a la que la tarjeta embebida envía los datos debe ser la adecuada para el proceso debido a que existen procesos que requieren un rápido procesamiento de información.
- La comunicación entre la tarjeta embebida y los demás componentes del sistema se puede ver afectada por el ruido externo presente en la área industrial.
- El protocolo de comunicación escogido debe tener concordancia con la velocidad a la que la tarjeta embebida puede enviar los datos.
- Las ecuaciones de control deben representarse en su forma discreta, para lo cual se requiere el tiempo de muestreo, para el tipo de respuestas no periódica se recomienda que el tiempo de muestreo sea la décima parte de la constante de tiempo del sistema en lazo cerrado, tal y como lo expresa la ecuación 2.19.

Una de las ventajas de implementar los controladores en sistemas embebidos es la facilidad de la reprogramación de los controladores como cambios en la estructura de control o modificación de los parámetros de sintonización [16].

2 METODOLOGÍA

En [8] se señala que al trabajarse en un ambiente cerrado como son los invernaderos, se obtiene un mejor control sobre los cultivos; sin embargo, la alta interacción de los diferentes procesos existentes internamente en el sistema hace que sea necesarias ciertas estrategias de control que permitan mantener dentro de un rango adecuado a las variables controladas (humedad, temperatura, etc.).

El método de investigación a utilizarse es del tipo cuantitativo debido a que se obtienen resultados en base a un modelo matemático el cual ya fue expuesto en el literal 1.4.1,

para validar dicho modelo matemático se toma como referencia los datos reales medidos en [7], [6] (los datos se midieron en las fechas del 11/11/06 al 16/11/06) de temperatura interna y externa en $[^{\circ}C]$, radiación fotosintéticamente activa interna y externa en $[\mu moles\ m^{-2}\ s^{-1}]$, humedad relativa externa e interna en %. El objetivo es que al introducirse los valores externos al sistema, se compare los valores obtenidos con los medidos reales, esta comparación se realizará mediante la raíz del error cuadrático medio.

Al verificarse la veracidad del modelo matemático se procederá a la obtención de su aproximación a un modelo simplificado, el cual permitirá una fácil sintonización y diseño de los controladores propuestos que posteriormente serán discretizados para poder ser utilizados en un sistema embebido. Mediante la simulación en el software Simulink de Matlab ® junto con una tarjeta embebida en la cual se encontraran los controladores, se obtendrán resultados que serán analizados mediante índices de desempeño (ISE, ISCO) y parámetros de la respuesta dinámica como tiempo de establecimiento (t_s) y máximo sobreimpulso (M_p), comparándose dichos parámetros se llegara a evidenciar cuál de los controladores planteados es el más óptimo para el sistema, la naturaleza de este método refleja la cualidad deductiva de la investigación planteada.

2.1 OBTENCIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático del invernadero es el propuesto en [9], este modelo está compuesto por diversas entradas, salidas y perturbaciones tal y como se aprecia en la Figura 2.1, en el modelo se pueden configurar ciertos parámetros como:

- Magnitud del cultivo: nada de cultivo, poco cultivo, gran cultivo.
- Tipología del invernadero: a-frame, arch-roof, quonset.
- Capas del cobertor: simple, doble.
- Material del cobertor: vidrio, polietileno, policarbonato, doble polietileno, policarbonato.

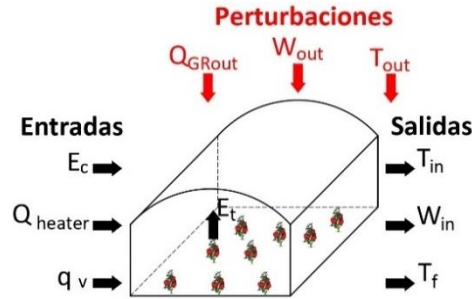


Figura 2.1. Esquema de las entradas, salidas y perturbaciones de un invernadero, la temperatura del suelo T_f no se toma en cuenta para los fines propuestos

Al realizarse el balance de masa se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{C_p \rho H} [Q_{GRin} + Q_{heater} - LE - (T_{in} - T_{out}) (q_v C_p \rho + wk)] \quad (2.1)$$

$$\frac{dW_{in}}{dt} = \frac{1}{H \rho} [E - (W_{in} - W_{out}) q_v \rho] \quad (2.2)$$

Planteándose el balance de energía se tiene que la radiación solar absorbida dentro del invernadero se define mediante la ecuación 2.3.

$$Q_{GRin} = \tau_c (1 - \rho_g) Q_{GRout} \quad (2.3)$$

Mediante el balance de energía se tiene que la ecuación 2.4 define el flujo de calor del sistema de calefacción.

$$Q_{heater} = N_H \frac{H_{cap}}{A_{fl}} \quad (2.4)$$

La tasa de evapotranspiración dentro del invernadero obedece a la ecuación 2.5.

$$E = E_C + E_T \quad (2.5)$$

La transpiración de las plantas se define como:

$$E_T = \begin{cases} (0.0003\tau_c Q_{GRout} + 0.0021)/86400 & \text{para una gran cosecha} \\ (0.00006\tau_c Q_{GRout} + 0.0004)/84600 & \text{para una pequeña cosecha} \\ 0 & \text{sin cosecha} \end{cases} \quad (2.6)$$

Donde:

C_p : Calor específico del aire húmedo $\left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right]$.

E : Tasa de evapotranspiración dentro del invernadero $\left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]$.

E_C : Sistema de refrigeración (nebulización) $\left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]$.

- E_T : Tasa de evapotranspiración por cultivo $\left[\frac{kg}{m^2 s}\right]$.
- H : Altura promedio del invernadero $[m]$.
- H_{cap} : Capacidad calorífica del calefactor $[W]$.
- k : Coeficiente de transmisión de calor del cobertor $\left[\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}\right]$.
- L : Calor latente de vaporización de agua $\left[\frac{J}{kg}\right]$.
- N_H : Numero de calefactores.
- Q_{GRin} : Radiación solar absorbida dentro del invernadero $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.
- Q_{GRout} : Radiación solar fuera del invernadero $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.
- Q_{heater} : Flujo de calor del sistema de calefacción $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.
- q_v : Tasa de ventilación $\left[\frac{m}{s}\right]$.
- T_{in} : Temperatura del aire dentro del invernadero $[^\circ C]$.
- T_{out} : Temperatura del aire fuera del invernadero $[^\circ C]$.
- w : Relación entre la superficie del cobertor y la superficie del piso $[adimensional]$.
- W_{in} : Humedad absoluta del aire dentro del invernadero $\left[\frac{kg_{agua}}{kg_{aire seco}}\right]$.
- W_{out} : Humedad absoluta del aire fuera del invernadero $\left[\frac{kg_{agua}}{kg_{aire seco}}\right]$.
- ρ : Masa específica del aire $\left[\frac{kg_{aire seco}}{m^3}\right]$.
- ρ_g : Reflectancia de la radiación solar sobre el terreno %.
- τ_c : Transmitancia del material del cobertor %.

Planteadas las ecuaciones pertinentes al modelo matemático de un invernadero, se procede a validar al mismo, para lo cual, se debe hacer coincidir los parámetros del invernadero en el que se realizaron las mediciones con el invernadero simulado, parámetros como unidades de las variables, dimensiones del invernadero, tipo de invernadero entre otros. A continuación se exhiben cuáles son las características del

invernadero real utilizado en [7], [6] junto con su repercusión en los datos de la planta a simular:

- El invernadero cuenta con un cobertor que se asemeja al doble polietileno, según [9] esto implica que $\tau_c = 76\%$ y $k = 4 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$.
- La tipología del invernadero es Arch-roof, según [9] esto implica que $w = 2.3$ [adimensional].
- La cantidad del cultivo fue de una gran cosecha, lo que implica que $E_T = (0.0003\tau_c Q_{GRout} + 0.0021)/86400$.
- El invernadero no cuenta ni con calefacción ni con ningún sistema de refrigeración, pero por otro lado, si cuenta con ventilación natural, por lo cual, a modo de realizar una aproximación se configurara la ventilación del invernadero a simular en la mitad de su rango es decir a $q_v = 0.091 \left[\frac{m}{s} \right]$.
- La altura a la que se encuentra el invernadero es a 1926 [m] sobre el nivel del mar.
- Las mediciones de radiación solar externa e interna se realizaron en unidades de $[\mu moles m^{-2} s^{-1}]$. Sin embargo, el modelo matemático requiere que la variable se encuentre en unidades de $\left[\frac{W}{m^2} \right]$, la relación entre estas dos unidades es de $2.1 [\mu moles m^{-2} s^{-1}] = 1 \left[\frac{W}{m^2} \right]$.
- Las mediciones de humedad externa e interna se realizaron en base a la humedad relativa; sin embargo, el modelo matemático requiere que la variable se encuentre en humedad absoluta $\left[\frac{kg_{agua}}{kg_{aire seco}} \right]$, por lo cual basándose en [17], [18] y [19] se tiene que la ecuación requerida es:

$$W_{abs} = \frac{3.798 W_{rel} e^{\frac{17.27T}{T+237.3}}}{101325(1 - 2.255 \cdot 10^{-5} A)^{5.255} - 6.107 W_{rel} e^{\frac{17.27T}{T+237.3}}} \quad (2.7)$$

Donde:

W_{abs} : Humedad absoluta $\left[\frac{kg_{agua}}{kg_{aire seco}} \right]$.

W_{rel} : Humedad relativa %.

T : Temperatura [$^\circ C$].

A : Altura sobre el nivel del mar [m].

- Las dimensiones del invernadero son las indicadas en la Figura 2.2 y teniendo en cuenta que según [9] la variable de capacidad calorífica del calefactor (H_{cap}) debe encontrarse en los valores de 0 a 150 [kW], se propone recalcular el rango de dicha variable de modo que el nuevo rango se acomode mejor a las dimensiones del invernadero.

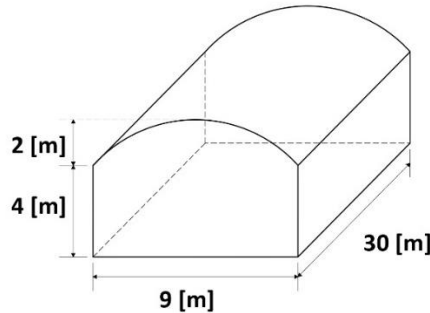


Figura 2.2. Dimensiones del invernadero en el cual se realizaron las mediciones según [7], [6]

Según los datos medidos en [2], [3] de temperatura interna, se tiene que la temperatura interna mínima fue de 10.6 [°C] a las 6 am en el día 12/11/06, cómo se verá en la Sección 3 los rangos de temperatura aceptables para la mañana serán de 13 a 16 [°C], asumiendo el peor de los casos el sistema de calefacción deberá poder subir la temperatura de 10.6 [°C] a 16 [°C], por lo cual el incremento de temperatura en las peores condiciones deberá ser de $5.4\text{ }^{\circ}\text{C} = 41.72\text{ }^{\circ}\text{F}$, la capacidad del sistema de calefacción se obtiene en base a la ecuación 2.8.

$$BTU = 0.133V\Delta_T \quad (2.8)$$

Donde:

BTU : Potencia requerida por el sistema de calefacción [BTU].

V : Volumen del invernadero [ft^3].

Δ_T : Incremento de temperatura [°F].

En base a las dimensiones del invernadero mostradas en la Figura 2.2, se tiene que el mismo posee un volumen de $1453.844\text{ }[m^3] = 51342.016\text{ }[ft^3]$, por lo cual reemplazando los datos en la ecuación 2.8 y transformando las unidades, se obtiene que la potencia requerida por el sistema de calefacción es de aproximadamente 84 [kW], por lo cual el nuevo rango del sistema de calefacción será de 0 a 84 [kW]. Se requiere tan solo un calefactor es decir $N_H = 1$.

Al plantearse los parámetros generales del invernadero a simular, se procede a validar el modelo matemático, para lo cual se utilizara el cálculo de la raíz del error cuadrático medio (*RMSE*) según la ecuación 2.9.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (2.9)$$

Donde:

RMSE : Raíz del error cuadrático medio.

y_i : Valor real.

\hat{y}_i : Valor estimado.

n : Tamaño de la muestra.

Según [20] un modelo es aceptable cuando el valor *RMSE* es menor a la mitad de la desviación estándar (*SD*) de los valores medidos, teniendo esto en cuenta en la Tabla 2.1 se presentan los valores obtenidos referentes a la validación del sistema para los diferentes días en que se realizaron las medidas.

Tabla 2.1. Valores estadísticos referentes a la validación del modelo matemático

Día	(RMSE/SD) 100 %		
	Q_{GRin}	T_{in}	$W_{inrelativa}$
11/11/06	26.994	6.947	13.535
12/11/06	17.637	11.956	5.104
13/11/06	19.020	14.061	2.009
14/11/06	17.942	14.335	3.930
15/11/06	17.311	13.157	1.549
16/11/06	18.713	10.676	10.414

Apreciarse que en la Tabla 2.1 ninguno de los valores calculados sobrepasa el 50 %, por lo cual el modelo matemático desarrollado presentara valores concordantes con los que se llegase a obtener de manera física en un invernadero real, tanto como para la temperatura interna, radiación solar absorbida internamente y humedad relativa interna.

Una vez que se validó el modelo matemático, se puede proceder a sintonizar los diferentes esquemas de control propuestos.

2.2 APROXIMACIONES DEL MODELO MATEMÁTICO

Previo a la sintonización de los controladores se debe definir el esquema general de control, para lo cual se deben mencionar los siguientes puntos:

- Conforme con [21], [22], [23] la temperatura interna del invernadero es uno de los parámetros más importantes a controlar dentro de un invernadero debido a que la misma afecta a funciones como: fotosíntesis, respiración y permeabilidad de la membrana celular, teniéndose que para temperaturas por debajo de los 5 [°C] la fotosíntesis se detiene [24].
- Según [25] la humedad interna del invernadero se encuentra relacionada con las enfermedades del cultivo por lo cual, esta variable también se la debería tomar en cuenta.

Basándose en los puntos previamente mencionados, se propone que el presente trabajo tenga una mayor inclinación al control de temperatura. Sin embargo, también se propondrá un control que tome en cuenta levemente a la temperatura y la humedad.

Para el control de temperatura interna del invernadero tenemos que en el modelo matemático propuesto se dispone dos entradas encargadas de bajar la temperatura (ventilación y nebulización) y una entrada encargada de subir la temperatura (calefacción). Se debe seleccionar una de las dos entradas referentes a la disminución de temperatura, para lo cual se simula el modelo matemático frente a cambios de referencia en las dos entradas por separado para observar la influencia que presentan en el sistema, el resultado de variar la ventilación gradualmente se observa en la Figura 2.3 mientras que el resultado de variar gradualmente la nebulización se presenta en la Figura 2.4.

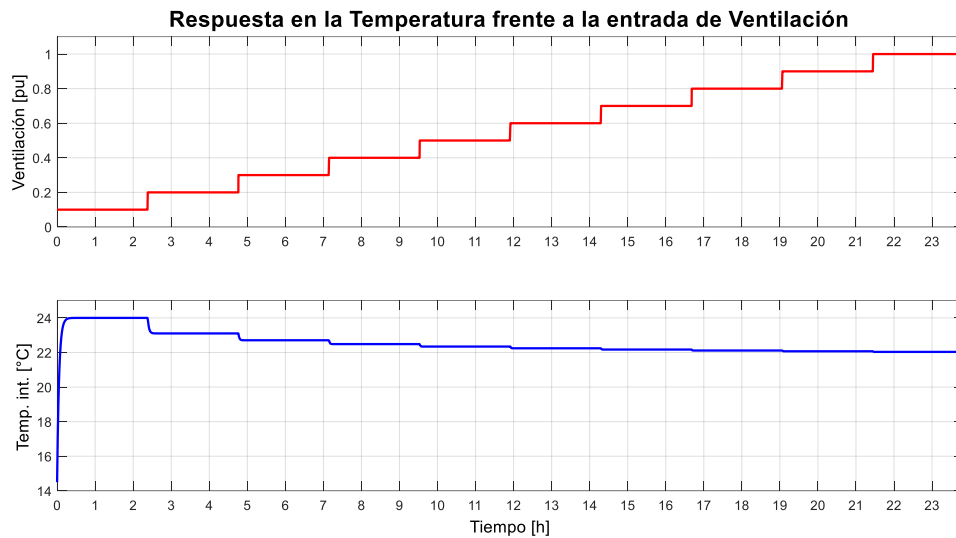


Figura 2.3. Respuesta de la temperatura al variar la ventilación (simulación en base a los valores de estado estable de la Tabla 2.2)

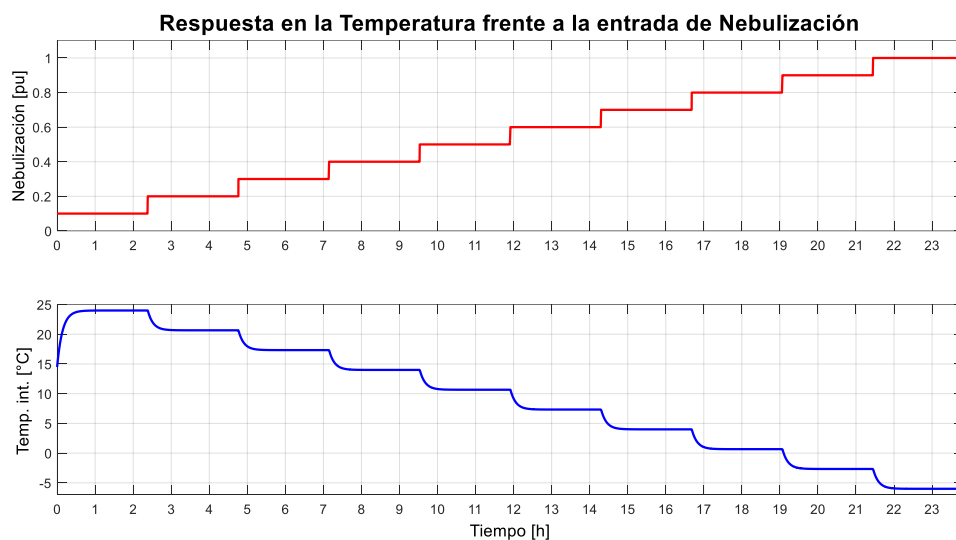


Figura 2.4. Respuesta de la temperatura al variar la nebulización (simulación en base a los valores de estado estable de la Tabla 2.2)

De las Figuras 2.3 y 2.4 se puede notar que la variable nebulización presenta una respuesta más lineal que la ventilación en cuanto a la temperatura interna del invernadero. Para los cambios de nebulización se obtuvo que un cambio del 10% del rango genera un cambio de $3.33\text{ [}^\circ\text{C]}$ en la temperatura interna, mientras que para los cambios de ventilación se obtuvo que un cambio del 10% del rango genera diferentes cambios de temperatura que varían de $0.897\text{ [}^\circ\text{C]}$ a $0.035\text{ [}^\circ\text{C]}$.

Por cuestiones de linealidad entre las variables de entrada y salida se opta por escoger como variable de entrada a la nebulización para realizar la disminución de temperatura dentro del invernadero.

Observarse que se tendrán dos variables controladas (nebulización y calefacción) para realizar control sobre una sola variable de salida (temperatura interna del invernadero), esto se debe a que con cada una de las variables controlados tan solo se puede subir o bajar la temperatura, es decir, con la calefacción se podrá subir la temperatura más no bajarla e inversamente sucede con la nebulización, partiendo de este principio, el esquema general planteado para realizar el control de temperatura se ilustra en la Figura 2.5.

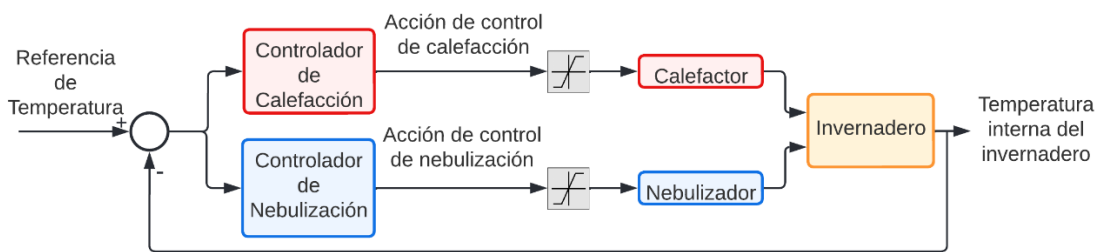


Figura 2.5. Esquema de control de la temperatura interna del invernadero

En cuanto al control de temperatura y humedad se tiene que según [26] actualmente no se rentable el uso de calefactores para invernaderos ya que presentan un gran consumo de energía y los beneficios obtenidos no son muy representativos, además se menciona que en un invernadero la variable primordial a controlar es la temperatura; sin embargo, no se debe ignorar a la humedad, por lo cual en base a lo mencionado y buscando la rentabilidad del proyecto planteado, se propone un controlador adicional a los alcances de este trabajo, enfocado en dos aspectos, primero se realizará control tanto de temperatura como de humedad, segundo se utilizara un solo elemento final de control que represente la menor inversión (ventilación). Como se observa se plantea el control de un sistema con dos salidas y una entrada, de acuerdo con [27] el control de temperatura y humedad interna de un invernadero es complejo debido a la alta interacción existente entre estas dos variables. Sin embargo, uno de los esquemas de control que permite cumplir dichos requerimientos es el control selectivo [28], el esquema de dicho controlador se aprecia en la Figura 2.6.

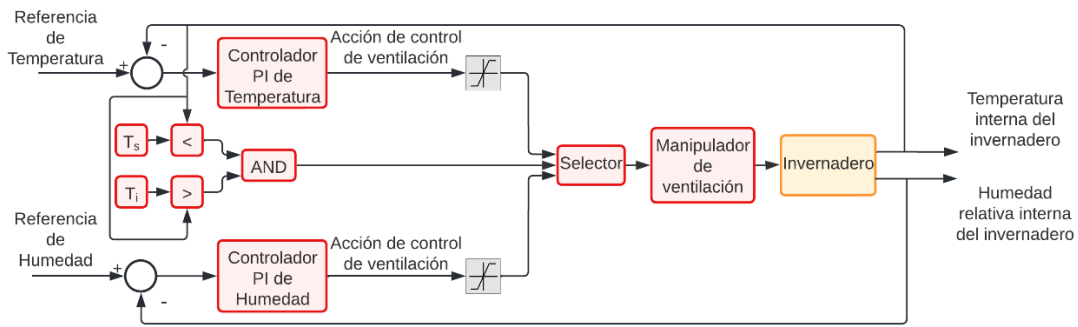


Figura 2.6. Esquema de control tipo selectivo para temperatura y humedad

Planteado el esquema de control de la Figura 2.5, se procede a sintonizar los respectivos controladores, para lo cual se requiere la aproximación del modelo matemático, para obtenerlo se utiliza el método de curva de reacción en busca de obtener una función de transferencia de primer orden sin retardo, el retardo no se toma en cuenta para este tipo de procesos debido a que como se aprecian en las Figuras 2.7 y 2.10 no existe un tiempo muerto considerable entre la respuesta del sistema y los cambios de referencia ingresados al tiempo 4.16 [horas]. La técnica utilizada para la identificación es el método de dos puntos de Alfaro expuesto en [10].

Los valores en estado estable para la obtención de la función de transferencia de temperatura interna del invernadero en función de la nebulización se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Valores en estado estable para la aproximación de la temperatura interna del invernadero en función de la nebulización

Variable	Valor
$Q_{GR_{out}}$	$218 \left[\frac{W}{m^2} \right]$
$Q_{GR_{in}}$	$82.840 \left[\frac{W}{m^2} \right]$
q_v	$0.003 \left[\frac{m}{s} \right]$
T_{in}	$24 [^{\circ}C]$
Q_{heater}	$0 [pu]$
E_c	$0.1 [pu]$
T_{out}	$21.001 [pu]$

La repuesta del sistema para los valores de la Tabla 2.2 se presentan en la Figura 2.7, considerando un aumento en la nebulización del 10% del rango.

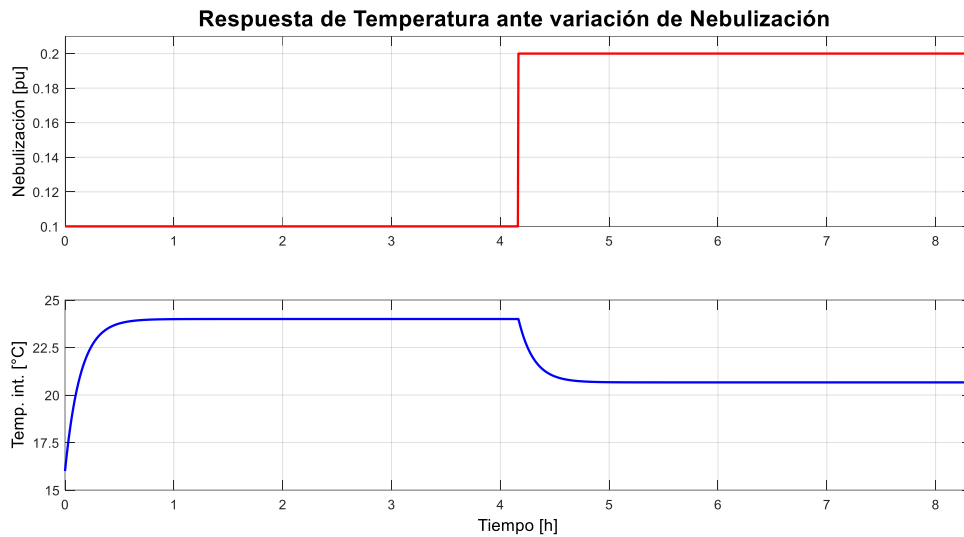


Figura 2.7. Respuesta de temperatura del sistema ante una variación de nebulización del 10% del rango

En la Figura 2.8, se realizó una ampliación de la Figura 2.7 junto con los puntos de interés para obtener la identificación de la planta.

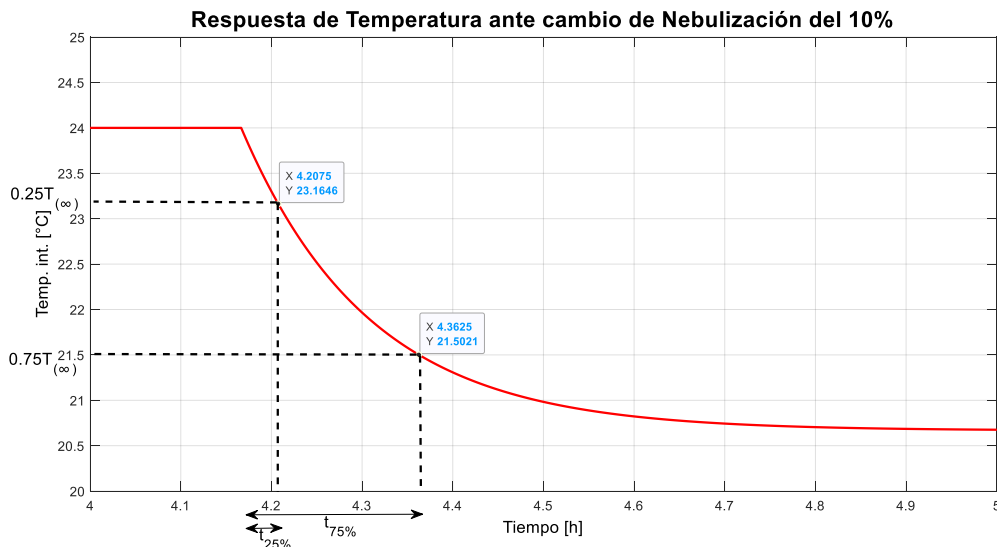


Figura 2.8. Puntos de interés para la aproximación del modelo de temperatura en función de la nebulización

Aplicando las ecuaciones expuestas en [10] se tiene que la función de transferencia que representa la temperatura en función de la nebulización es la mostrada en la ecuación 2.10.

$$G_{TN}(s) = \frac{-33.3}{507.804s + 1} \quad (2.10)$$

La validación de la aproximación obtenida de temperatura interna en función de la nebulización se aprecia en la Figura 2.9.

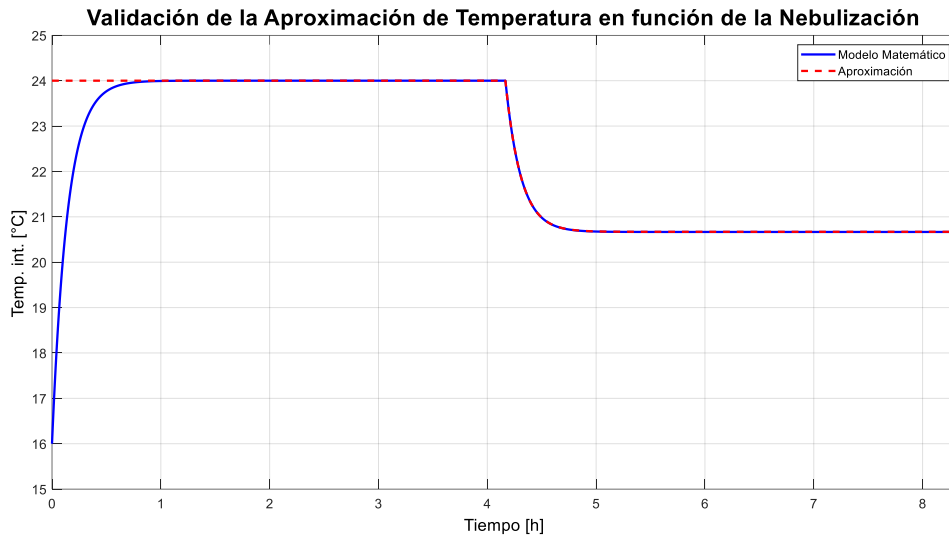


Figura 2.9. Validación del modelo de temperatura en función de la nebulización

La siguiente aproximación a obtener es la de la temperatura interna en función de la calefacción, los valores en estado estable para la obtención de dicha función de transferencia se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Valores en estado estable para la aproximación de la temperatura interna del invernadero en función de la calefacción

Variable	Valor
Q_{GRout}	$218 \left[\frac{W}{m^2} \right]$
Q_{GRin}	$82.840 \left[\frac{W}{m^2} \right]$
q_v	$0.003 \left[\frac{m}{s} \right]$
T_{in}	$24 [^{\circ}C]$
Q_{heater}	$0.1 [pu]$
E_c	$0 [pu]$
T_{out}	$13.632 [pu]$

La repuesta del sistema para los valores de la Tabla 2.3 se presentan en la Figura 2.10, considerando un aumento en la calefacción del 10% del rango.

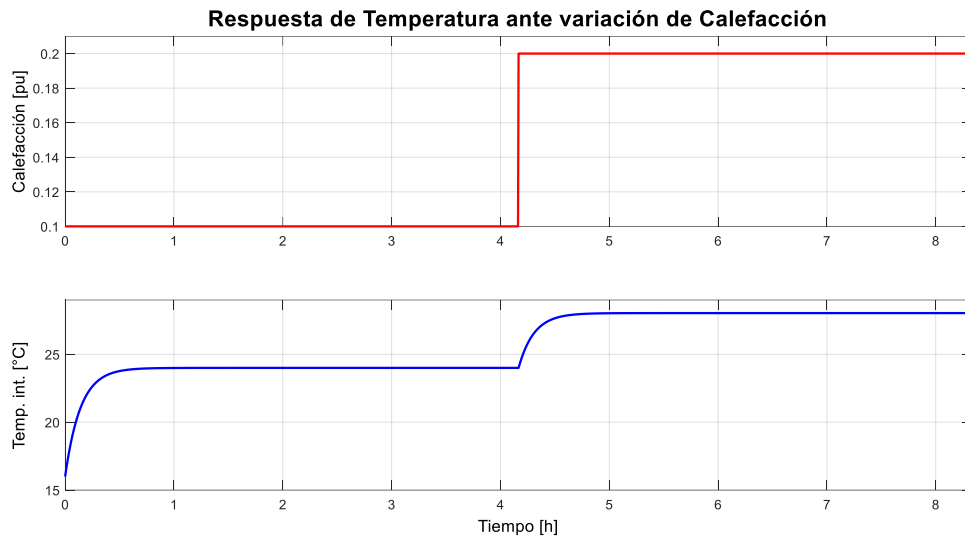


Figura 2.10. Respuesta de temperatura del sistema ante una variación de calefacción del 10% del rango

En la Figura 2.11, se realizó una ampliación de la Figura 2.10 junto con los puntos de interés para obtener la identificación de la planta.

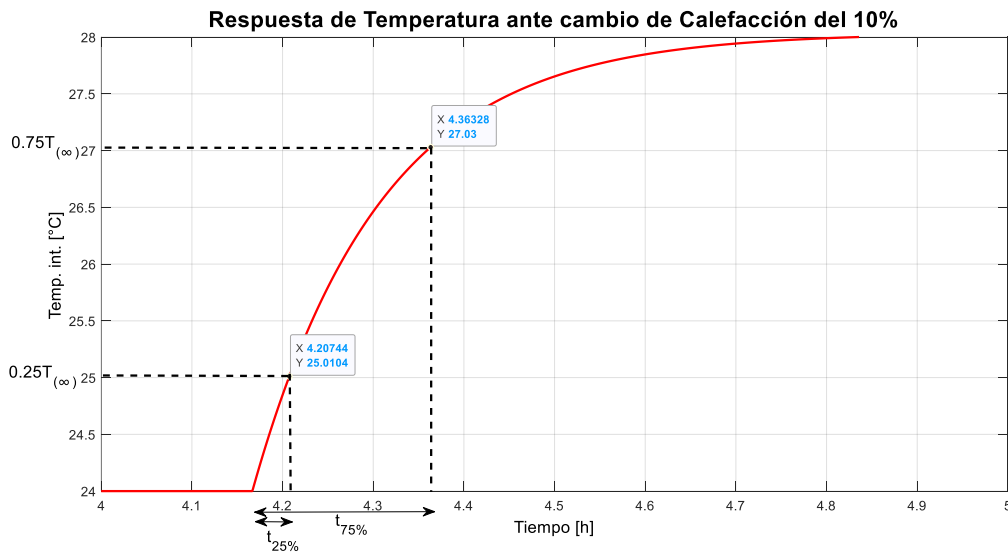


Figura 2.11. Respuesta de temperatura del sistema ante una variación de calefacción del 10% del rango

Aplicando las ecuaciones expuestas en [10] se tiene que la función de transferencia que representa la temperatura en función de la calefacción es la mostrada en la ecuación 2.11.

La validación de la aproximación obtenida de temperatura interna en función de la calefacción se aprecia en la Figura 2.12.

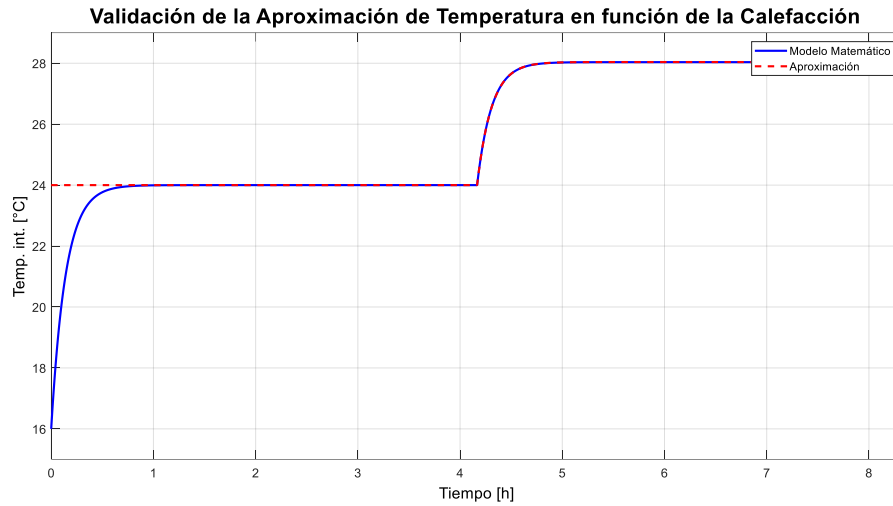


Figura 2.12. Validación del modelo de temperatura en función de la calefacción

Para el esquema de control adicional selectivo se requieren las funciones de transferencia de la temperatura y humedad en función de la ventilación, en la Tabla 2.4 se presentan los valores en estado estable para dichas identificaciones.

Tabla 2.4. Valores en estado estable para la aproximación de la temperatura y humedad relativa interna del invernadero en función de la ventilación

Variable	Valor
$Q_{GR_{out}}$	218 [W/m ²]
$Q_{GR_{in}}$	82.840 [W/m ²]
q_v	0.1 [pu] = 0.0214 [m/s]
T_{in}	24 [°C]
Q_{heater}	0 [pu]
E_c	0 [pu]
T_{out}	21.690 [pu]
$W_{in_{relativa}}$	50 %
$W_{in_{absoluta}}$	0.011 [kg _{agua} /kg _{aire seco}]
$W_{out_{absoluta}}$	0.011 [kg _{agua} /kg _{aire seco}]

Las repuestas de temperatura interna y humedad relativa interna en función de los valores de la Tabla 2.3 se presentan en la Figura 2.13, considerando un aumento del 10%.

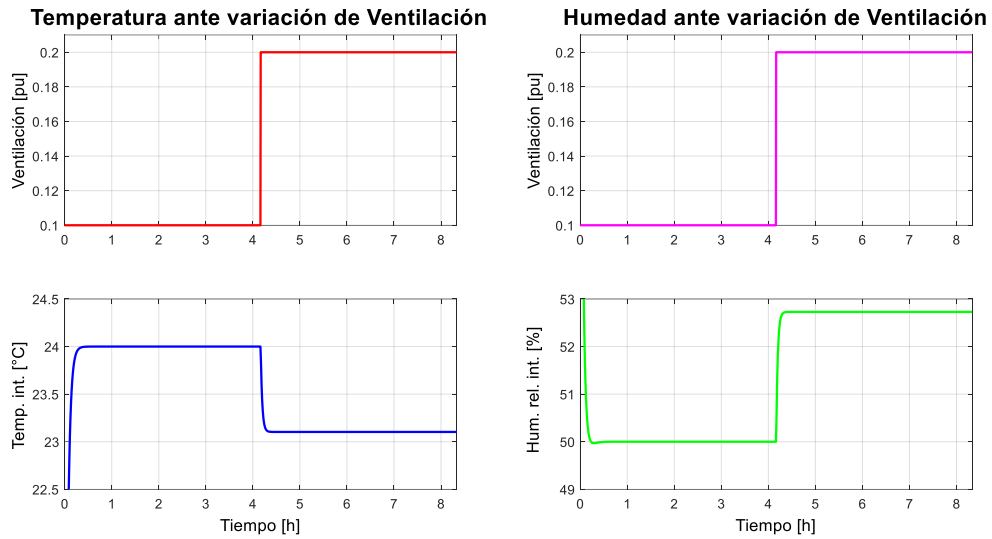


Figura 2.13. Respuesta de temperatura y humedad relativa del sistema ante una variación de ventilación del 10% del rango

Aplicando las ecuaciones expuestas en [10] se tiene que las funciones de transferencia que representa la temperatura y humedad relativa en función de la ventilación son las mostrada en la ecuación 2.12 y 2.13 respectivamente.

$$G_{TV}(s) = \frac{-9}{117.553s + 1} \quad (2.12)$$

$$G_{HV}(s) = \frac{27.3}{113.734s + 1} \quad (2.13)$$

La validación de las aproximaciones obtenidas de temperatura interna y humedad relativa interna en función de la ventilación se aprecia en la Figura 2.14.

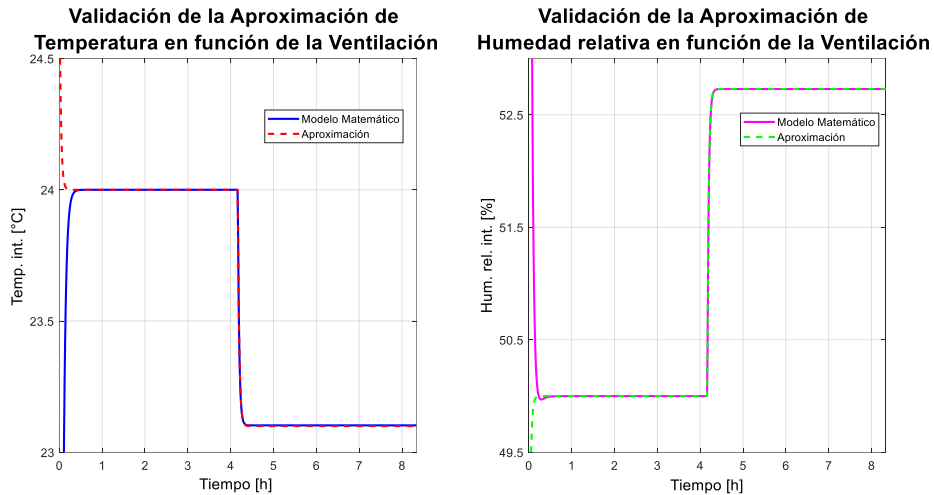


Figura 2.14. Validación de los modelos de temperatura y humedad relativa en función de la ventilación

2.3 SINTONIZACIÓN Y DISCRETIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES

Los esquemas de control propuestos tendrán como base dos tipos de controladores, un esquema de control basado en controladores tipo PI y un esquema de control basado en controladores por modos deslizantes (SMC).

2.3.1 CONTROLADORES PI DE TEMPERATURA

En la Tabla 4.5 de [13] se presentan las ecuaciones de sintonización de controladores PID para diferentes modelos matemáticos expresados en el dominio de Laplace, tomándose dicha referencia con el parámetro de ajuste igual a la unidad más las ecuaciones obtenidas en 2.10 y 2.11, se tiene que los parámetros de los controladores tipo PI son los mostrados en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Parámetros de los controladores de nebulización y calefacción

Controlador	k_p	τ_i
Controlador PI de nebulización	-15.249	507.804
Controlador PI de calefacción	12.652	511.142

En la Figura 2.15, se presenta las entradas y salidas de un controlador tipo PI tradicional.



Figura 2.15. Entradas y salidas de un controlador tipo PI

La Figura 2.15 se puede describir mediante la ecuación 2.14.

$$\frac{U}{E} = k_p + \frac{k_p}{\tau_i s} \quad (2.14)$$

Para la discretización se escoge el método de Tustin, siendo T_m el tiempo de muestreo.

$$s = \frac{2(z-1)}{T_m(z+1)} \quad (2.15)$$

Remplazando la ecuación 2.15 en la ecuación 2.14 se obtiene la siguiente expresión.

$$U_{(z)} - U_{(z)}z^{-1} = \left(k_p + \frac{k_p T_m}{2\tau_i}\right) E_{(z)} + \left(\frac{k_p T_m}{2\tau_i} - k_p\right) E_{(z)}z^{-1} \quad (2.16)$$

Aplicando la equivalencia expresada en 2.17 se tiene que la ecuación discretizada de un controlador PI es la mostrada en la ecuación 2.18.

$$z^{-k}X_{(z)} = X_{[n-k]} \quad (2.17)$$

$$U_{[n]} = U_{[n-1]} + \left(k_p + \frac{k_p T_m}{2\tau_i}\right) E_{[n]} + \left(\frac{k_p T_m}{2\tau_i} - k_p\right) E_{[n-1]} \quad (2.18)$$

El tiempo de muestreo es igual a la constante de tiempo del sistema en lazo cerrado dividido para 10, tal y como se expresa en la ecuación 2.19.

$$T_m = \frac{\tau_{\text{lazo cerrado}}}{10} \quad (2.19)$$

Para obtener el tiempo de muestreo se debe aplicar algebra de bloques al sistema en lazo cerrado presentado en la Figura 2.16.

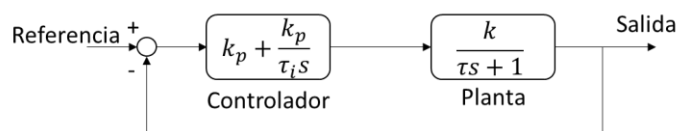


Figura 2.16. Diagrama de bloques de un controlador tipo PI

Al aplicar algebra de bloques al diagrama expuesto en la Figura 2.16, se tiene que la ecuación en lazo cerrado es la obtenida en la ecuación 2.20.

$$FT_{LC} = \frac{\frac{k_p k \tau_i s + k_p k}{\tau \tau_i}}{s^2 + \left(\frac{1 + k k_p}{\tau}\right) s + \frac{k k_p}{\tau \tau_i}} \quad (2.20)$$

La constante de tiempo de la Figura 2.16 se consigue igualando a cero el denominador de la ecuación 2.20. Al remplazarse los valores de la planta y de los controladores se obtienen raíces similares para el sistema en lazo cerrado con el controlador de nebulización y calefacción, con el valor de $|\tau_{lazo\ cerrado_1}| = 0.001 [s]$ y $|\tau_{lazo\ cerrado_2}| = 0.999 [s]$, por lo cual los tiempos de muestreo serian aproximadamente $T_{m_1} = 0.0001 [s]$ y $T_{m_2} = 0.1 [s]$. Tal y como se evidenciara en la Sección 3.1.1 el tiempo de muestreo igual a $0.1 [s]$ presenta resultados aceptables, por lo cual no es necesario tomar un tiempo de muestreo más pequeño, de este modo el tiempo de muestreo para la implementación del sistema embebido será de $T_m = 0.1 [s]$.

Con el tiempo de muestreo calculado más los parámetros de la planta presentados en la ecuación 2.10 y en la Tabla 2.5, se puede escribir que la ecuación discretizada del controlador PI de nebulización es la expuesta en la ecuación 2.21.

$$U_{N[n]} = U_{N[n-1]} - 15.250E_{[n]} + 15.247E_{[n-1]} \quad (2.21)$$

Tomándose de igual forma el tiempo de muestreo de $T_m = 0.1 [s]$ más los parámetros de la planta presentados en la ecuación 2.11 y en la Tabla 2.5, se puede escribir que la ecuación discretizada del controlador PI de calefacción es la expuesta en la ecuación 2.22.

$$U_{C[n]} = U_{C[n-1]} + 12.653E_{[n]} - 12.650E_{[n-1]} \quad (2.22)$$

2.3.2 CONTROLADORES POR MODOS DESLIZANTES DE TEMPERATURA

Se parte buscando la acción de control equivalente, la cual depende del sistema que se desea controlar el sistema a analizar presenta un diagrama de bloques tal y como el expuesto en la Figura 2.17.

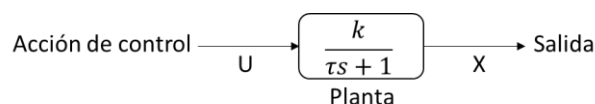


Figura 2.17. Diagrama de bloques de un controlador tipo PI

La Figura 2.17 se puede describir mediante la ecuación 2.23.

$$\frac{X}{U} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (2.23)$$

Despejando se tiene la siguiente ecuación.

$$\dot{X} = \frac{kU - X}{\tau} \quad (2.24)$$

La superficie escogida es del tipo integral, sabiendo que el orden de la planta es igual a uno, se consigue que la superficie deslizante es la presentada en la ecuación 2.25.

$$S = e(t) + \frac{1}{s} \lambda e(t) \quad (2.25)$$

El error es la diferencia entre la referencia y la salida del sistema tal y como se expresa en la ecuación 2.26.

$$e(t) = R - X \quad (2.26)$$

Remplazando la ecuación 2.26 en la 2.25, se obtiene la siguiente expresión.

$$\frac{dR}{dt} - \frac{dX}{dt} + \lambda e(t) = 0 \quad (2.27)$$

Al remplazarse la ecuación 2.24 en la 2.27, se obtiene la ecuación 2.28.

$$\frac{dR}{dt} - \frac{kU - X}{\tau} + \lambda e(t) = 0 \quad (2.28)$$

El sistema completo trabajara con referencias de tipo escalón, por lo cual se eliminan las derivadas de la referencia ya que producirían expresiones de tipo pulso. Despejando la ecuación 2.28 se consigue que la acción de control equivalente obedece a la ecuación 2.29.

$$U_{eq} = \frac{\tau}{k} \left(\lambda e(t) + \frac{X}{\tau} \right) \quad (2.29)$$

La ecuación para la parte discontinua es la siguiente.

$$U_D = k_D \frac{S}{|S| + \delta} \quad (2.30)$$

La acción de control por modos deslizantes es igual a la suma de la parte equivalente más la discontinua obteniéndose así que la ecuación final es la presentada en la ecuación 2.31.

$$U_{SMC} = \frac{\tau}{k} \left(\lambda e(t) + \frac{\dot{X}}{\tau} \right) + k_D \frac{S}{|S| + \delta} \quad (2.31)$$

En [14] se presentan ecuaciones para la obtención de los parámetros de ajuste λ , k_D y δ para una aproximación del tipo FOPDT; sin embargo, la aproximación obtenida del invernadero no tiene retardo por lo cual no se pueden aplicar dichas formulas, he aquí presente una de las desventajas de los controladores por modos deslizantes, no existen ecuaciones generales para la sintonización de los parámetros de ajuste como λ , k_D y δ para los diferentes tipos de plantas que se pueden llegar a presentar. Los parámetros de ajuste se los obtendrá de forma heurística teniendo como objetivo la búsqueda del menor índice de despeño ISE junto con una acción de control aceptable, ahora bien, los resultados de dicho experimento para el controlador de nebulización y calefacción se aprecian en la Figuras 2.18 y 2.19 respectivamente.

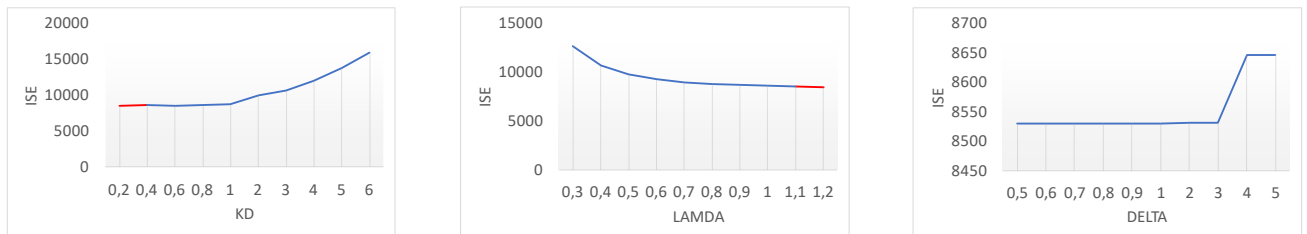


Figura 2.18. Variación del índice ISE en función de los parámetros λ , k_D y δ para el controlador de nebulización

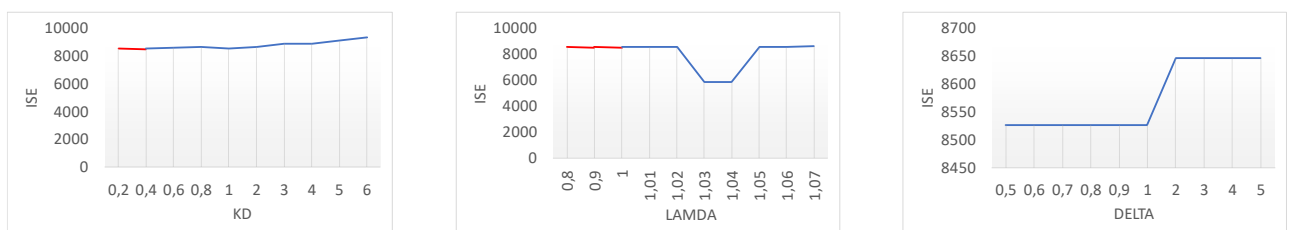


Figura 2.19. Variación del índice ISE en función de los parámetros λ , k_D y δ para el controlador de calefacción

En la Figuras 2.18 y 2.19 se presentan los resultados del índice ISE frente a la variación individual de los diferentes parámetros de ajuste λ , k_D y δ para los distintos SMC de nebulización y calefacción, de las pruebas realizadas podemos apreciar cuales son los parámetros de los controladores más adecuados para el sistema, mencionando que las líneas rojas en las curvas representan valores no permitidos, debido a que generan

oscilaciones en la acciones de control, teniendo esto en cuenta y tomando valores levemente lejanos a los limites prohibidos se tiene que los parámetros de ajuste adecuados para los diferentes controladores son los presentados en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Parámetros de los controladores de nebulización y calefacción

Controlador	k_D	λ	δ
Controlador SMC de nebulización	0.4	1.1	1
Controlador SMC de calefacción	1	1.03	1

Para la discretización del controlador por modos deslizantes basta solo con discretizar la superficie de deslizamiento (obtenida en la ecuación 2.25) y no toda la acción de control (obtenida en la ecuación 2.31). Aplicando el método de Tustin y procediendo de igual forma que con la discretización del controlador PI de la Sección 2.3.1 se obtiene que la superficie de deslizamiento discretizada es la presentada en la ecuación 2.32.

$$S_{[n]} = S_{[n-1]} + \left(1 + \frac{\lambda T_m}{2}\right) E_{[n]} + \left(\frac{\lambda T_m}{2} - 1\right) E_{[n-1]} \quad (2.32)$$

La respuesta del controlador por modos deslizantes presentara una dinámica similar al controlador PI tal y como se apreciara en la Sección 3.1.2, por lo cual se asume el mismo tiempo de muestreo para los dos esquemas de control $T_m = 0.1$ [s]. Con el tiempo muestreo expuesto más los parámetros de ajuste presentados en la Tabla 2.6 se puede escribir que la ecuación de la superficie de deslizamiento discretizada del controlador SMC de nebulización es la presentada en la ecuación 2.33.

$$S_{N[n]} = S_{N[n-1]} + 1.055E_{[n]} - 0.945E_{[n-1]} \quad (2.33)$$

Reemplazando los datos obtenidos de la ecuación 2.10 en la ecuación 2.31 se obtiene que la acción de control por modos deslizantes para nebulización es la mostrada en la ecuación 2.34.

$$U_{N[n]} = -16.774E_{[n]} + \frac{X_{[n]}}{-33.3} + \frac{0.4S_{N[n]}}{|S_{N[n]}| + 1} \quad (2.34)$$

De igual manera tomándose como tiempo de muestreo a $T_m = 0.1$ [s] más los parámetros de ajuste presentados en la Tabla 2.6 se puede escribir que la ecuación de la superficie

de deslizamiento discretizada del controlador SMC de calefacción es la presentada en la ecuación 2.35.

$$S_{C[n]} = S_{C[n-1]} + 1.051E_{[n]} - 0.948E_{[n-1]} \quad (2.35)$$

Remplazándose los datos obtenidos de la ecuación 2.11 en la ecuación 2.31 se obtiene que la acción de control por modos deslizantes para calefacción es la mostrada en la ecuación 2.36.

$$U_{C[n]} = 13.031E_{[n]} + \frac{X_{[n]}}{40.4} + \frac{S_{C[n]}}{|S_{C[n]}| + 1} \quad (2.36)$$

2.3.3 CONTROLADORES PI DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL ESQUEMA DE CONTROL SELECTIVO

En cuanto a los controladores referentes al esquema selectivo se realizará en base a controladores de tipo PI y sin tomar en cuenta el concepto de hardware in the loop, para lo cual de igual forma que en la Sección 2.3.1 en la que se toma como referencia las ecuaciones de sintonización presentadas en [13] y más los resultados obtenidos de las aproximaciones exhibidas en las ecuaciones 2.12 y 2.13, se procede a sintonizar los controladores de humedad y temperatura, teniéndose que los valores calculados son los presentados en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Parámetros de los controladores PI del esquema de control selectivo

Controlador	k_p	τ_i
Controlador de temperatura	-13.061	117.553
Controlador de humedad	4.166	113.734

Adicional se debe establecer los rangos permisibles de temperatura para el cultivo, tal y como se aprecia en la Figura 2.6, dichos rangos serán revisados más a profundidad en el la Sección 3. Se definen dos límites superiores (T_s), uno para la mañana de 26 [°C] y otro para la noche de 16 [°C], de igual forma para el límite inferior (T_i) se tiene que el mismo será de 22 [°C] para la mañana y de 13 [°C] para la noche.

El diagrama de flujo que ejemplifica la lógica del esquema de control selectivo se presenta en la Figura 2.20.

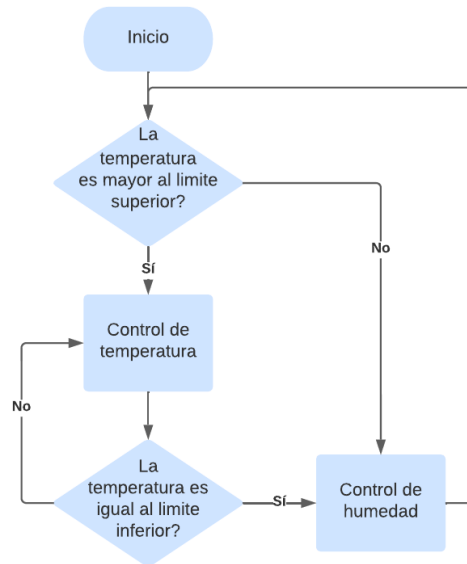


Figura 2.20. Lógica de funcionamiento del controlador selectivo

2.4 IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE IN THE LOOP

En este apartado se presenta el procedimiento a seguir para poder realizar la comunicación entre el software Simulink de Matlab ® y la tarjeta embebida de la marca Arduino en específico la tarjeta Mega 2560. En la interface de Arduino las líneas de código son relativamente simples, ya que los datos se envían y reciben mediante los comandos “Serial.print” y “Serial.parseFloat” respectivamente, con dichos comandos se trabaja con datos de tipo flotantes que son más fáciles de manipular e interpretar, adicional a esto se tiene el comando “Serial.available” que me indica el instante en que se están recibiendo datos por el puerto de comunicación serial.

Ahora bien, desde el punto de vista del software Simulink de Matlab ® se utiliza la librería “Instrument Control Toolbox” en específico los bloques de “Query Instrument” y “To Instrument”, el primero para enviar datos y segundo para recibirlos, dichos bloques son muy dinámicos y fáciles de configurar, los parámetros a configurar se pueden apreciar en la Figura 2.21 y son los siguientes:

- Block sample time: tiempo de muestreo T_m
- Interface: tipo de conexión a utilizar en la comunicación
- Port: puerto de la computadora a utilizar para la comunicación
- Baudrate: velocidad de comunicación

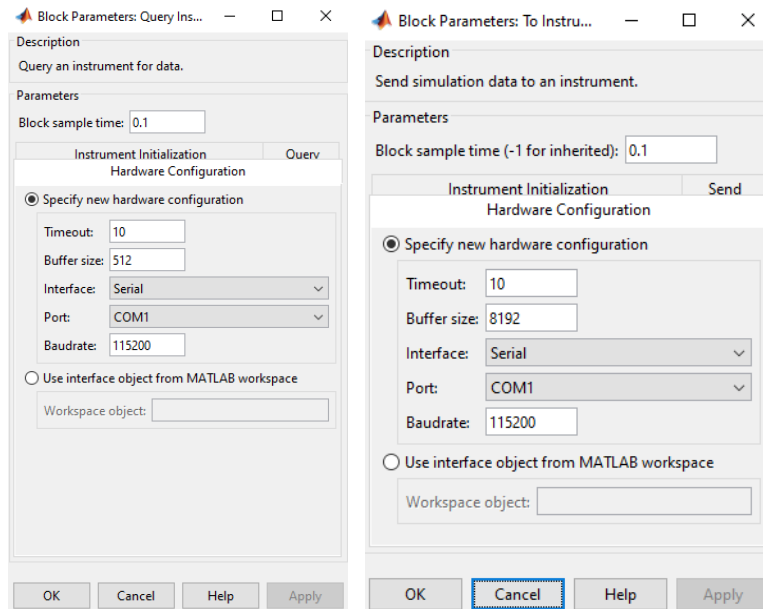


Figura 2.21. Ventana de configuración de los bloques “Query Instrument” y “To Instrument”

Se debe tener en cuenta que en el control PI se debe enviar tan solo la diferencia de la salida y la referencia (el error). Sin embargo, en el controlador por modos deslizantes se debe enviar el error y también la salida del sistema, en la Figura 2.22 se presenta un esquema físico general de la implementación del hardware in the loop.

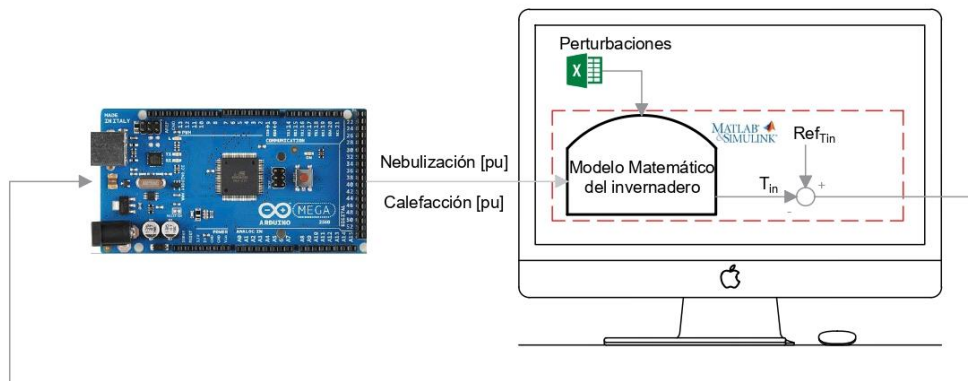


Figura 2.22. Esquema de la implementación del hardware in the loop

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este apartado se presentan los análisis de las respuestas obtenidas de los controladores implementados bajo el concepto de hardware in the loop, dichos resultados se evalúan mediante la comparación de aspectos importantes como: máximo sobreimpulso, tiempo de establecimiento y además, se toman en cuenta los índices de desempeño que permiten valorar tanto el error en la respuesta ISE como los requerimientos de la acción de control ISCO, teniendo en cuenta que el esquema de control que presente los menores índices será el más adecuado para el sistema, siempre y cuando las acciones de control no presenten chattering y la respuesta del sistema siga la referencia establecida.

Se toman como referencia los datos reales pertenecientes al día 15/11/06 los cuales se pueden apreciar en la Figura 3.1.

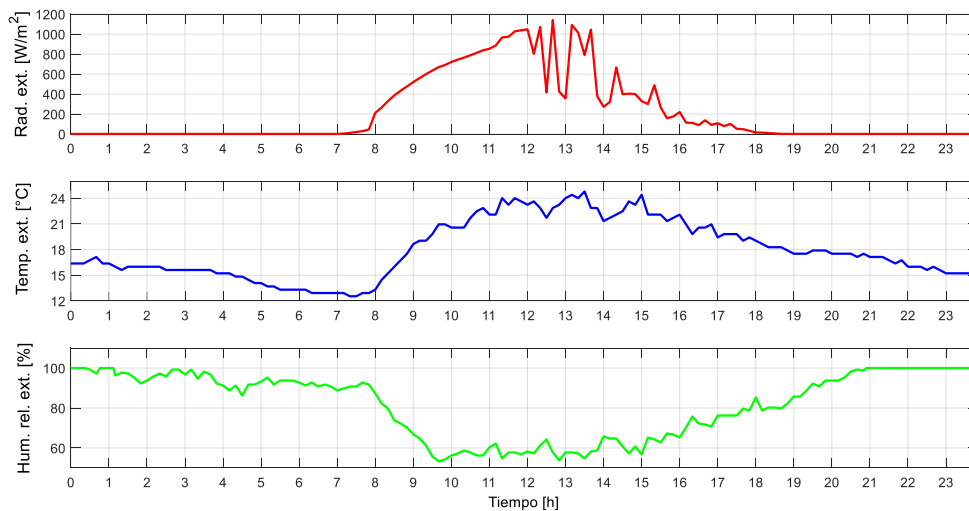


Figura 3.1. Perturbaciones reales correspondientes al día 15/11/06 [7], [6]

Los parámetros de prueba que se seleccionan son los mismos que se utilizaron para validar la planta en la Sección 2.1, basándose en estas acotaciones la respuesta en lazo abierto del sistema es la que se observa en la Figura 3.2.

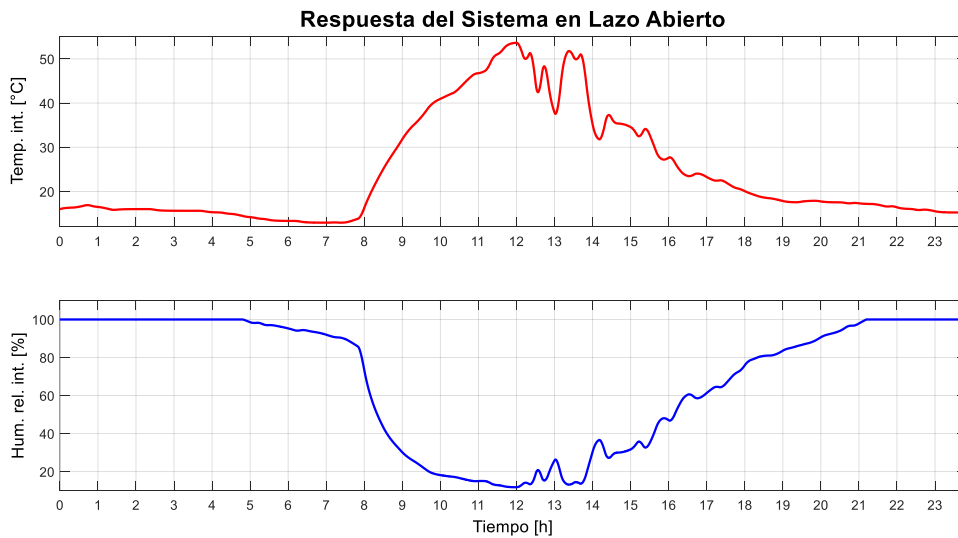


Figura 3.2. Respuesta del sistema en lazo abierto

Los valores óptimos de temperatura interna de un invernadero dependen de varios factores como el cultivo o la hora del día, en [29] se presentan los valores adecuados de temperatura para diferentes tipos de cultivo, se asume como producto a cultivar al tomate de riñón, teniéndose que los valores de temperatura son de 13 a 16 °C en la noche (de 19:00 a 06:00), mientras que en la mañana (de 06:00 a 19:00) la temperatura es de 22 a 26 °C, en base a estos datos y tomándose la media de los rangos expuestos, se establecen los cambios de referencia que se ingresan al sistema, dichos cambios se visualizan en la Figura 3.3.

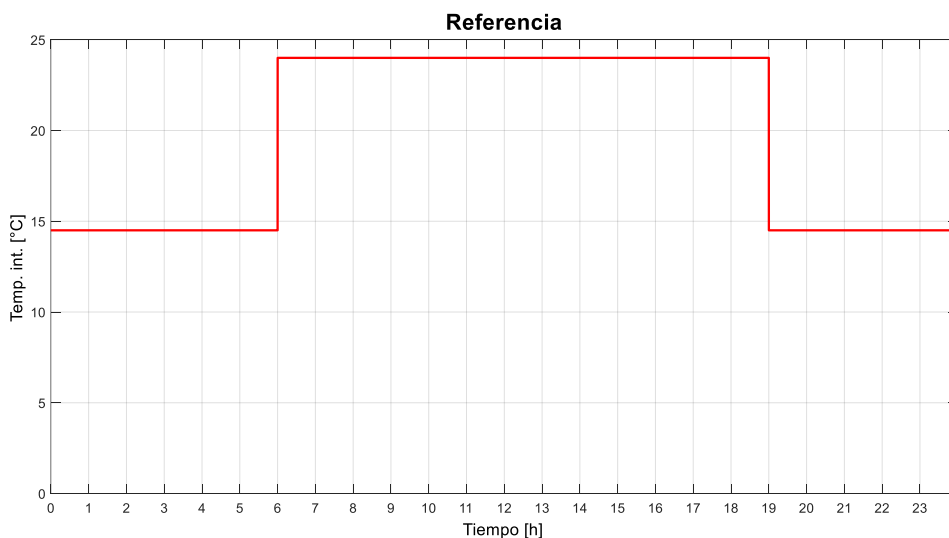


Figura 3.3. Referencia de temperatura interna del invernadero

La referencia de temperatura de la Figura 3.3 es lo requerido por el tipo de cultivo, específicamente el tomate de riñón, esta referencia presenta un cambio muy agresivo del 65.5 % del valor de la referencia, por lo cual, se espera que en dicho punto la exigencia

de los controladores sea elevada tal y como se observara en el capítulo 3.1; sin embargo, se trabajara con la misma solo con el objetivo de evaluar el rendimiento de los controladores, para fines prácticos se puede modificar dicho tipo de referencia tal y como se realizara en el experimento del capítulo 3.1, al cambiarse la referencia de tipo paso a tipo rampa para eliminar las saturaciones de las acciones de control.

3.1 RESULTADOS

3.1.1 RESPUESTA DE LOS CONTROLADORES PI

La respuesta del esquema de control tipo PI frente a los cambios de referencia y perturbaciones mostradas se puede observar en la Figura 3.4.

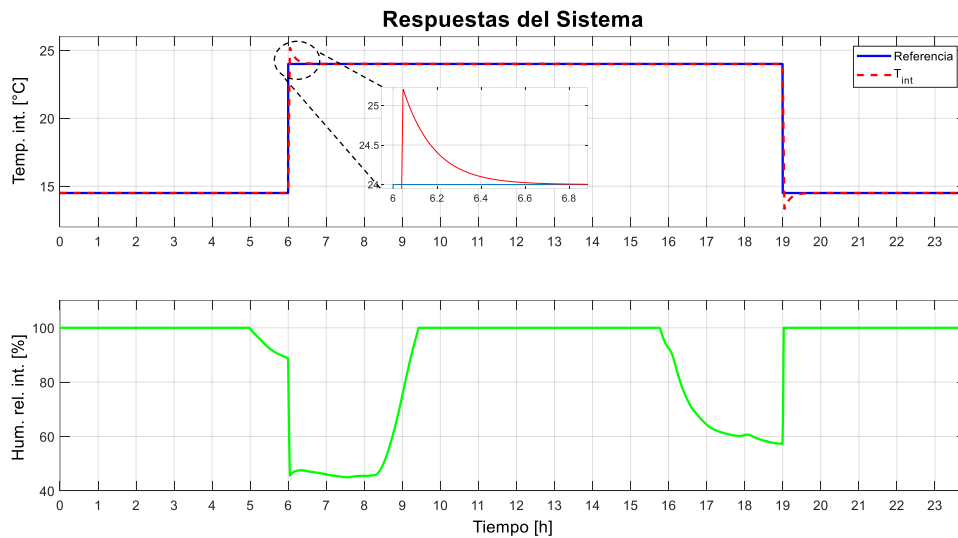


Figura 3.4. Respuesta del invernadero con esquemas de control PI

Como se aprecia en la Figura 3.4 existe un fiel seguimiento de la referencia de temperatura, en cuanto al máximo sobreimpulso y al tiempo de establecimiento (con un margen de error del 2 %) se debe mencionar que existirán dos de cada uno debido a que se tienen dos controladores PI, el resumen de dichos valores se presenta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros de la respuesta dinámica e índices de desempeño de los controladores PI

Controlador	M_p %	t_s [min]	ISCO	ISE
PI de nebulización	-8.237	18.266	8899	8971
PI de calefacción	5.024	18.486	679	

Obsérvese que en la respuesta en lazo abierto (Figura 3.2) la temperatura interna llegaba a tomar valores muy elevados de hasta alrededor de $53.63 [^{\circ}C]$, lo cual podría llegar a ser perjudicial dependiendo del cultivo. Sin embargo, si se implementa un sistema de nebulización en lazo cerrado se llega a limitar a la temperatura interna en un máximo de $24 [^{\circ}C]$ (Figura 3.4).

Al igual que el seguimiento de la referencia también es importante observar las acciones de control, dado que el comportamiento de estas podría llegar a afectar al elemento final de control que en el sistema planteado son calefactores y nebulizadores. Las acciones de control para el esquema de control PI se ilustra en la Figura 3.5.

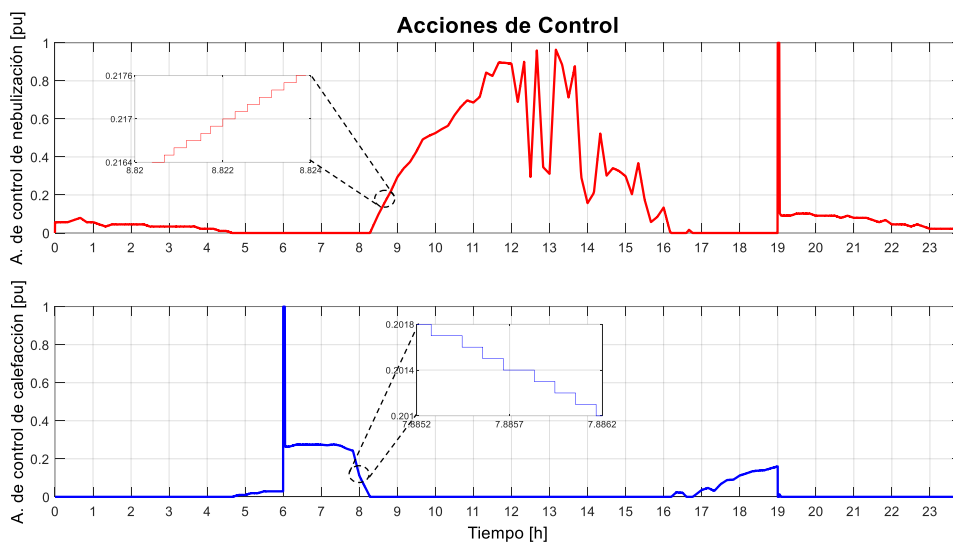


Figura 3.5. Acciones de control del esquema de control PI

Es importante aludir que las acciones de control se estandarizan al valor en por unidad, a fin de dar una mejor comprensión de los valores requeridos por el controlador para alcanzar el valor de referencia establecido.

La acción de control de nebulización se utiliza para bajar la temperatura mientras que la acción de control de calefacción se utiliza para elevar la temperatura, por lo cual ambas acciones de control no deberían funcionar al mismo instante de tiempo, dicho aspecto es visible en la Figura 3.5.

Las acciones de control de la Figura 3.5 no representan una gran exigencia para los elementos finales de control, por lo cual su tiempo de vida útil no se verá afectado por dicho aspecto, por otro lado, se debe observar que en los cambios de referencia donde se presenta un aumento ($t = 6$ horas) o decremento de temperatura ($t = 19$ horas) es necesario el 100 % de la acción de control correspondiente, esto se debe a que el cambio de referencia de la temperatura interna es instantáneo y de un valor alto, de casi el

65.5 % del valor de la referencia, entonces para subyugarse dicha problemática del valor pico presente en las acciones de control se puede modificar la referencia para que no sea de tipo escalón si no de tipo rampa, se realiza dicho experimento teniéndose que para la rampa el cambio de referencia se logra alcanzar a los 10 minutos, la respuesta del sistema y las acciones de control se observan en las Figuras 3.6 y 3.7 respectivamente.

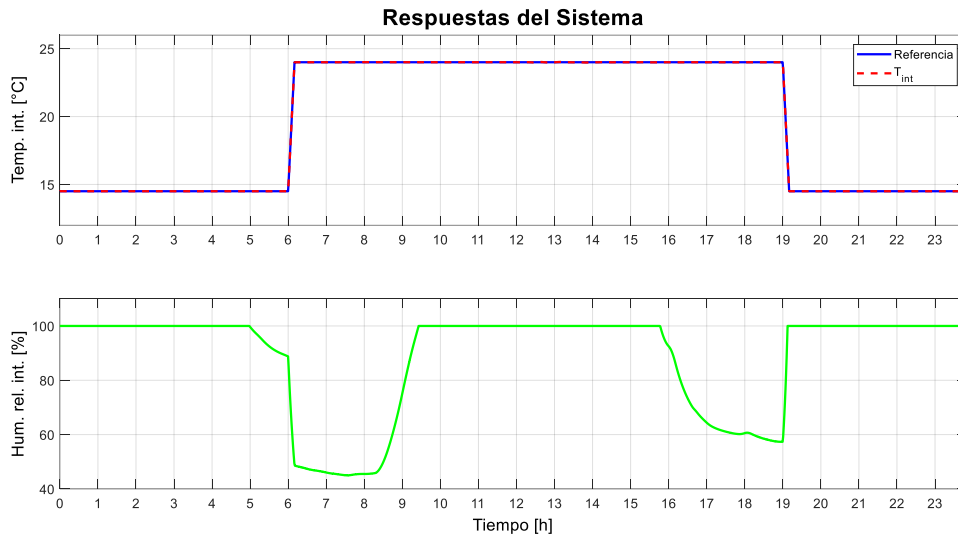


Figura 3.6. Respuesta del invernadero con esquemas de control PI tomándose como referencia cambios tipo rampa

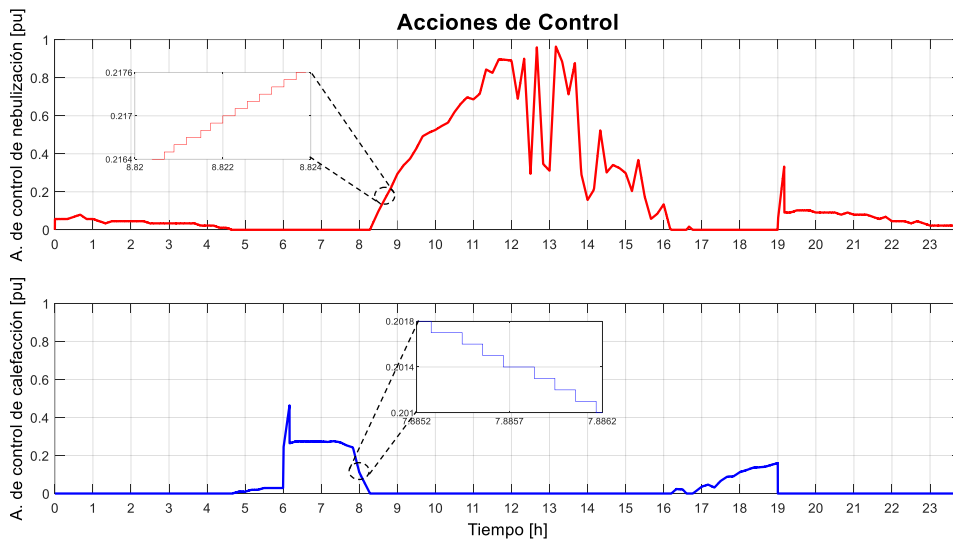


Figura 3.7. Acciones de control del esquema de control PI tomándose como referencia cambios tipo rampa

Al cambiar la referencia de modelo escalón a rampa se obtiene un correcto seguimiento de la señal predispuesta tal y como se aprecia en la Figura 3.6 y adicionalmente se eliminan los máximos sobreimpulsos obtenidos en la Figura 3.4, pero el cambio más evidente se da en las acciones de control (Figura 3.7) ya que al configurar un cambio de

referencia de tipo rampa se presenta menos agresividad al sistema que si se usara un cambio de tipo escalón, esto se demuestra al ver que las acciones de control mencionadas no se saturan. Cabe mencionar que al utilizarse un cambio de referencia tipo rampa se tendrá la particularidad de que dicho cambio de temperatura interna se lograra obtener en un intervalo mayor de tiempo al que si se usara un cambio de referencia tipo escalón; sin embargo, para nuestro sistema de invernadero que opera en unidades de tiempo de horas no representa una gran afcción el aumento de unos minutos más en sus variaciones de temperatura interna.

Al visualizar la Figura 3.5 se puede decir que cuando la acción de control de nebulización actúa para disminuir la temperatura interna del invernadero se tiene por consecuencia un aumento en la humedad relativa interna del invernadero e inversamente sucede algo parecido al manipular la acción de control de calefacción, de ahí que se evidencia lo mencionado en el literal 1.4.5 en cuanto a la relación existente entre la temperatura y la humedad, evidenciando que dicha relación es de tipo inversa.

Los acercamientos realizados en las acciones de control de la Figura 3.5 permiten observar que la señal ha sido muestreada y que el tiempo de muestreo es el correcto ($T_m = 0.1 [s]$), por lo cual se evidencia que la prueba se realizó bajo el concepto de hardware in the loop. Si se disminuye el tiempo de muestreo se obtiene una señal que presenta mayor similitud a la señal muestreada. Sin embargo, los recursos computacionales son mayores, por consiguiente es importante la correcta selección del tiempo de muestreo, entonces se podría plantear la duda de: ¿Qué pasaría si se escoge un tiempo de muestreo mayor al calculado?, para subyugarse dicha anécdota se presentan en las Figuras 3.8 y 3.9 los resultados del sistema frente un tiempo de muestreo de $T_m = 1 [s]$.

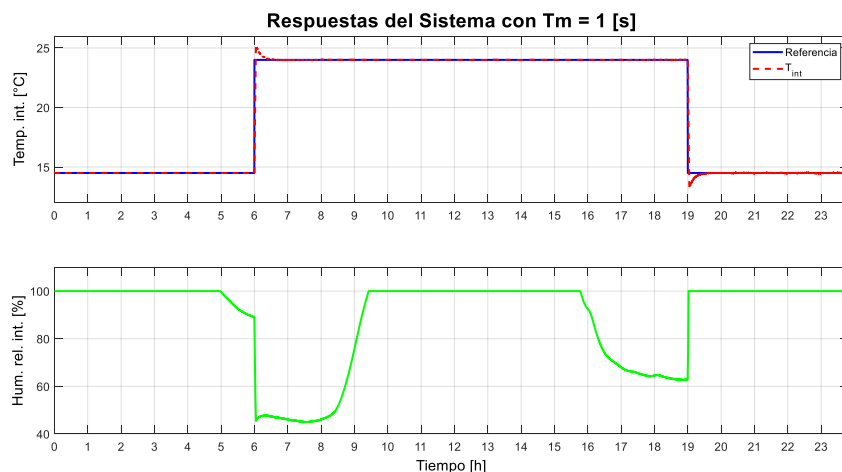


Figura 3.8. Respuesta del invernadero con esquemas de control PI frente a un tiempo de muestreo de $T_m = 1 [s]$

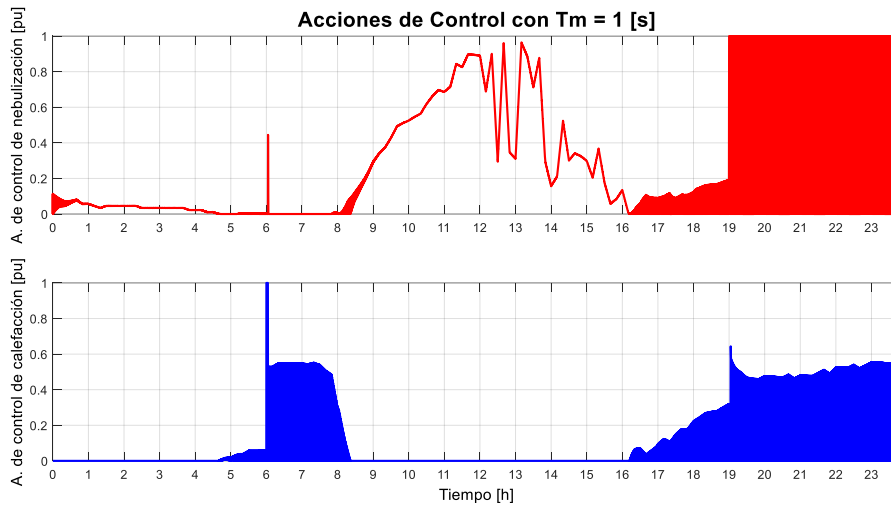


Figura 3.9. Acciones de control con esquemas de control PI frente a un tiempo de muestreo de $T_m = 1$ [s]

En cuanto a la temperatura y humedad relativa interna no resultan muy afectadas al aumentar el tiempo de muestreo; sin embargo, las acciones de control se ven alteradas al presentar un chattering que terminara reduciendo en gran medida la vida útil del elemento final de control.

3.1.2 RESPUESTA DE LOS CONTROLADORES POR MODOS DESLIZANTES (SMC)

La respuesta del esquema de SMC frente a los cambios de referencia y perturbaciones indicadas se puede apreciar en la Figura 3.10.

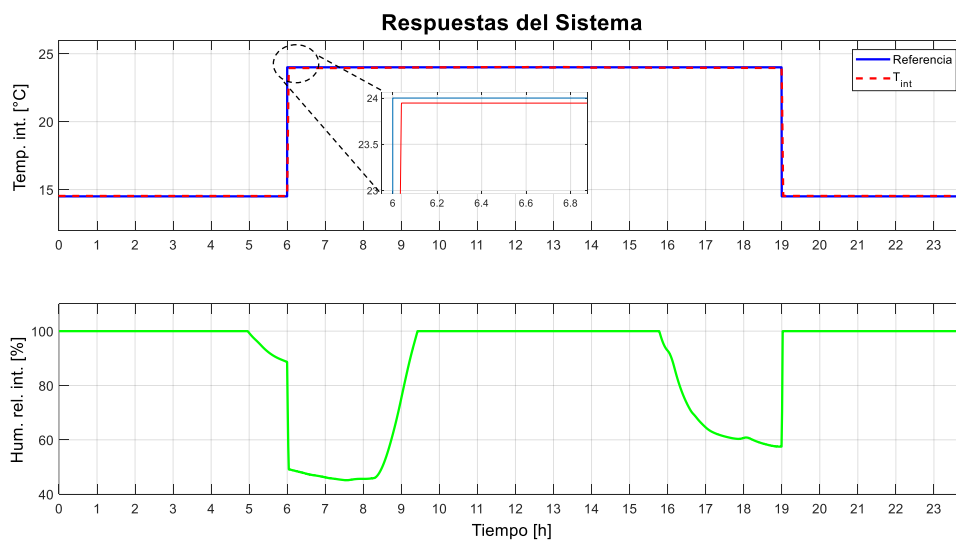


Figura 3.10. Respuesta del invernadero con esquemas de SMC

En comparación con el esquema de control PI lo primero a resaltarse de la Figura 3.10 es que con el control por modo deslizantes no existe máximo sobreimpulso. Se toma un

margen de error del 2 % para el tiempo de establecimiento, de modo que los resultados numéricos se pueden apreciar en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros de la respuesta dinámica e índices de desempeño de los controladores por modos deslizantes

Controlador	M_p %	t_s [min]	ISCO	ISE
SMC de nebulización	0	2.256	8782	8559
SMC de calefacción	0	2.3034	658.6	

En cuanto a la humedad relativa interna del esquema SMC (Figura 3.10) y la del esquema PI (Figura 3.4) se tiene una gran variación en los valores de humedad relativa a costa de un excelente control en la variable temperatura interna.

Las acciones de control correspondientes al esquema de SMC, se visualiza en la Figura 3.11.

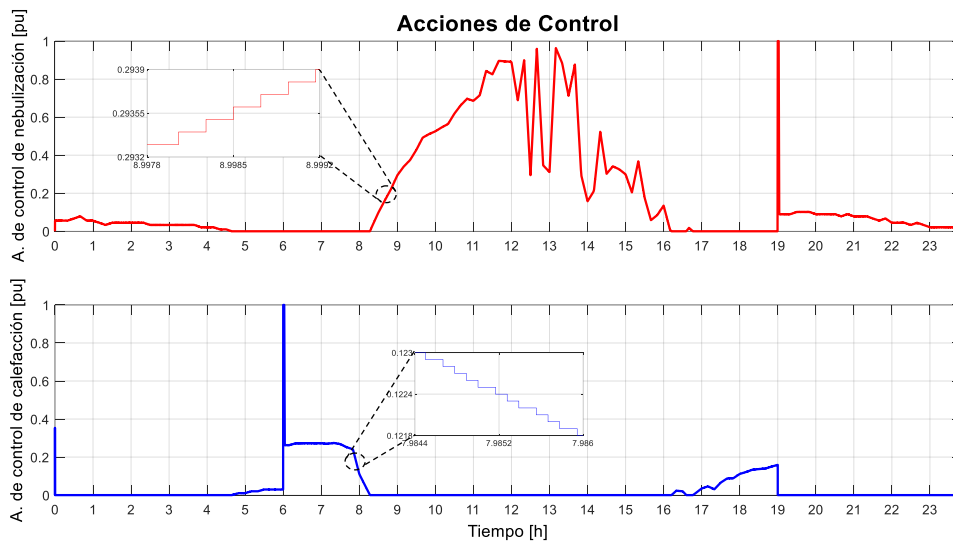


Figura 3.11. Acciones de control del esquema de SMC

Observándose las acciones de control del esquema de control por modos deslizantes (Figura 3.11) a primera vista no se aprecia una diferencia frente a las acciones de control del esquema PI (Figura 3.5), por lo cual se aplican los mismo análisis realizados para el esquema PI como para el esquema SMC. Sin embargo, en el literal 3.1.4 se evidenciara una diferencia numérica entre las acciones de control de los diferentes esquemas desde el punto de vista del índice de desempeño ISCO.

3.1.3 RESPUESTA DEL CONTROLADOR SELECTIVO

Es importante mencionar que en este esquema de control se buscó manipular tanto la variable temperatura interna (variable primordial) como humedad relativa interna, por lo cual falta aclarar y agregar ciertos parámetros de prueba como:

- En este esquema de control es necesario definir el rango de temperaturas adecuadas para el cultivo, dichos rangos ya se mencionaron en el literal 3, teniendo que para la mañana la temperatura puede variar de 22 a 26 [°C], mientras que en la noche el rango de temperaturas admisibles será de 13 a 16 [°C].
- La referencia de temperatura es el valor mínimo permisible, de modo que para la mañana será de 22[°C] mientras que para la noche será de 13 [°C].
- En [30] se muestran cuáles son los valores de humedad relativa adecuados para diferentes tipos de cultivos, tomándose como referencia nuevamente al tomate de riñón, los valores ideales de humedad relativa son de 40 a 60 % y el valor optimo es de 50 %, de aquí que la referencia de humedad relativa para las pruebas a realizarse será del 50 %.

Una vez planteadas las especificaciones de las pruebas a realizarse, se obtienen los resultados de temperatura y humedad relativa interna en el invernadero, dichas respuestas se ilustran en la Figura 3.12.

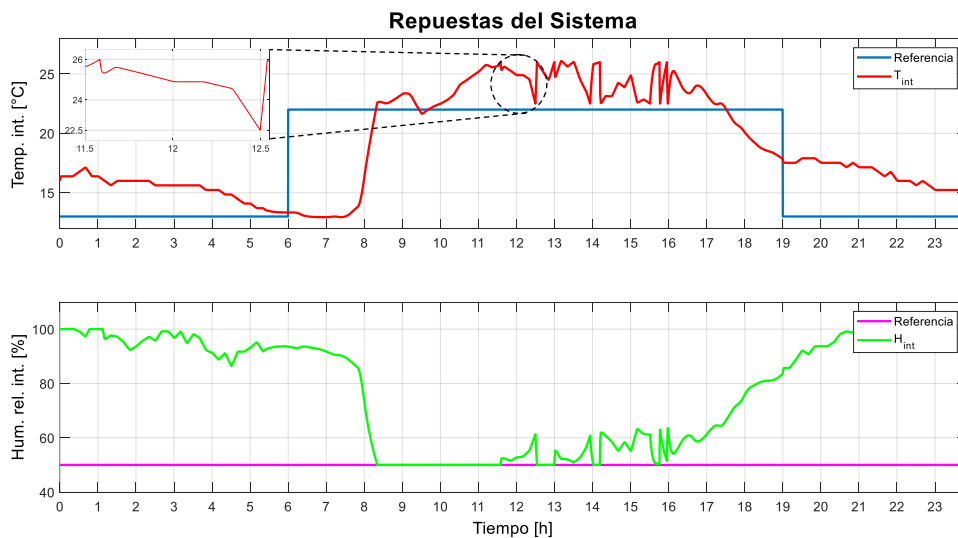


Figura 3.12. Respuesta del invernadero con esquema de control selectivo en base a controladores PI

Antes de destacarse los puntos importantes de las respuestas es primordial observar los resultados de la acción de control para lograr una mejor comprensión global del sistema. Se habla de una sola acción de control debido a que solo se tiene un elemento final de control (la ventilación); sin embargo, no se debe olvidar que dicha acción de control resulta de la combinación de dos acciones de control provenientes de un control PI de humedad relativa y de temperatura, dichas acciones de control se aprecian en la Figura 3.13.

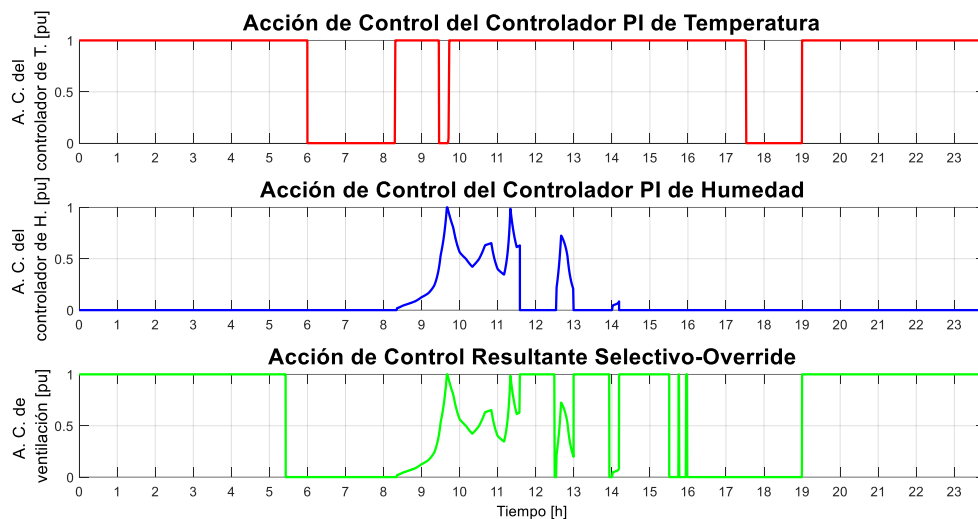


Figura 3.13. Acciones de control del esquema selectivo

Se pueden destacar los siguientes puntos importantes en base a los resultados obtenidos en las Figuras 3.12 y 3.13:

- En el tiempo de $11.5 \text{ [horas]} < t < 12.5 \text{ [horas]}$ se realiza control de temperatura debido a que la temperatura interna excedió el límite superior de $26 [^{\circ}C]$, en dicho control se tiene la ventilación al 100 %. Sin embargo, dicha acción de control se demora alrededor de 54 minutos en poder llevar a la temperatura interna al límite inferior de $22.5 [^{\circ}C]$, una vez que la temperatura interna se encuentra dentro de los límites establecidos para la mañana ($22 [^{\circ}C] < T_{in} < 26 [^{\circ}C]$), el esquema de control cambia de hacer control de temperatura a hacer control de humedad relativa y de esta forma se mantendrá hasta que la temperatura interna vuelva a superar los $26 [^{\circ}C]$. Este análisis realizado de $11.5 \text{ [horas]} < t < 12.5 \text{ [horas]}$ es importante debido a que evidencia el comportamiento del esquema de control selectivo.

- Tener en cuenta que la ventilación solo puede elevar la humedad relativa más no puede disminuirla y sucede de forma inversa con la temperatura, la ventilación solo puede disminuirla más no elevarla.
- Apreciar que efectivamente la acción de control de ventilación es una combinación de las dos acciones del controlador de temperatura y humedad relativa. No se tiene un fiel seguimiento de las referencias como en los controladores previamente revisados; sin embargo, se logra realizar control de humedad relativa y temperatura, mantenido a esta última dentro de los rangos establecidos, esto debido a que se impuso a la variable temperatura como primordial.
- En comparación con los resultados del invernadero en lazo abierto (Figura 3.2), se tenía que la humedad relativa llegaba a valores mínimos de 11.75 %. Sin embargo, al trabajarse con un esquema selectivo basado en controladores PI en lazo cerrado se tiene que la humedad relativa mínima es de 49.95 %.

3.1.4 COMPARACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE CONTROL

Para realizar la comparación de los controladores implementados se toma en cuenta los parámetros de la respuesta dinámica como máximo sobreimpulso y tiempo de establecimiento, adicional a estos se toma en cuenta los índices de desempeño ISE e ISCO, el resumen de todos estos resultados normalizados se visualizan en la Figura 3.14.

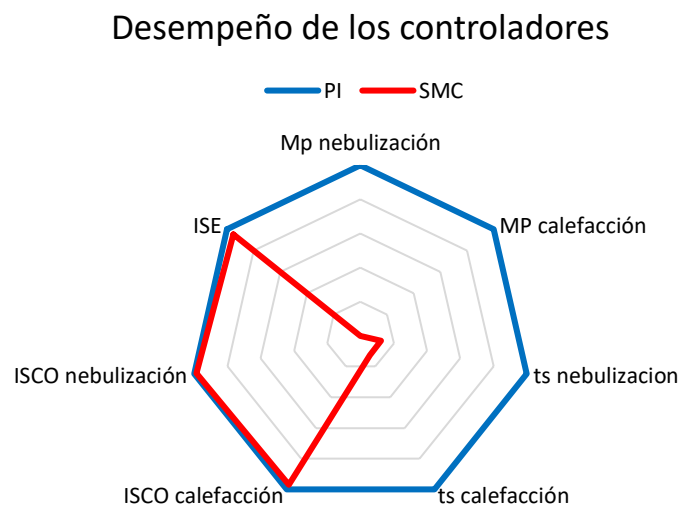


Figura 3.14. Resumen de los parámetros de desempeño de los diferentes controladores

Como se aprecia en la Figura 3.14 los controladores basados en modos deslizantes presentan los mejores índices de desempeño y parámetros de respuesta dinámica tanto para el controlador de calefacción como el de nebulización.

El índice ISCO menor nos indica que se requerirá menos esfuerzo por los elementos finales de control para obtener mejor resultados, por otro lado el índice ISE menor denota que tanto en estado estable como en el estado dinámico se tendrá menor error entre la referencia y la salida de la temperatura interna del invernadero.

Los máximos sobreimpulsos de valor nulo en los controladores basados en modos deslizantes dan a entender que la acción de control es menos agresiva que en el controlador basado en esquema PID, lo que implica que la vida útil del elemento final de control (nebulizadores y calefactores) no se verá afectada.

Algo importante a denotar en cuanto a los tiempos de establecimiento, es que a pesar de que la temperatura es una variable lenta, con el esquema de control por modos deslizantes se logra llegar a la referencia en menos de 3 minutos, mientras que para el esquema PI es necesario un tiempo de alrededor de 18 minutos, es decir 6 veces más el tiempo requerido por el esquema SMC.

3.2 CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó dos esquemas de control de temperatura tipo PID y SMC en un sistema embebido el cual se comunica con el software Simulink de Matlab® para de este modo trabajar bajo el concepto de hardware in the loop, adicional se diseñó un controlador selectivo enfocado en el control tanto de temperatura como de humedad.
- Se apreció que el modelo matemático que representa el comportamiento de un invernadero puede llegar a ser muy complejo debido a causas como la alta interacción existente entre las diferentes variables, las múltiples entradas y salidas del sistema y las diversas perturbaciones inherentes al sistema, por lo cual varios autores recomiendan asumir varias hipótesis para simplificar el modelo matemático, en cuanto al modelo matemático presentado se evidenció que el mismo presenta buenas aproximaciones al comportamiento dinámico de un invernadero real.
- Se observó que el esquema de control basado en modos deslizantes presentó mejores respuestas que el esquema de control basado en PI, lográndose a obtener que para los SMC no se presenta máximo sobre impulso, los índices de desempeño ISE e ISCO son los menores y el tiempo de establecimiento es aproximadamente igual a 3 minutos comparando se tiene que es 6 veces menor que el tiempo de establecimiento de los controladores PI.

- Se visualizo que los esquemas de control enfocados en controlar la variable temperatura funcionan de manera adecuada; sin embargo, es recomendable también realizar un control de la humedad, para lo cual se planteó un esquema de control adicional más rentable, el selectivo, que a cambio de perder un fiel seguimiento de la referencia de temperatura y al contrario mantenerla dentro de un rango se obtuvo que la humedad relativa mínima fue de 49.95% a diferencia de los esquemas enfocados en el control de temperatura donde la humedad relativa mínima llego a 11.75%.
- Se evidencio la importancia del tiempo de muestreo para el concepto de hardware in the loop, obteniendo que al trabajar con un tiempo de muestreo de diez veces mayor al tiempo de muestreo calculado se comienzan a presentar oscilaciones en las variables que se envían de la tarjeta embebida al software de simulación, variables que en este caso son las acciones de control.

3.3 RECOMENDACIONES

- Se recomienda que para fines operativos se trabaje con cambios de referencia (de temperatura) tipo rampa de modo que se evite la saturación de las acciones de control.
- Para evidenciar la correcta selección del tiempo de muestreo se debe visualizar las variables de comunicación recibidas, en este caso las acción de control, más no se debe tomar como guía las salidas del sistema.
- Los controladores por modos deslizantes en su mayoría no cuentan con ecuaciones de sintonización, por lo cual se debe recurrir a métodos heurísticos, una manera de tener un indicador numérico de referencia para obtener los parámetros de ajuste más adecuados es en base a índices de desempeño como ISE o ISCO, es decir se debe variar los parámetros de ajuste y buscar aquellos valores que den como resultado el mejor índice de desempeño.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Sánchez, T. Vayas, F. Mayorga, y C. Freire, “Sector agrícola Ecuador”. Universidad Técnica de Ambato, 2020. Consultado: el 12 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.cedia.org.ec/obest/wp-content/uploads/sites/7/2020/06/Diagn%C3%B3stico-sector-agr%C3%ADcola-Ecuador.pdf>
- [2] E. Gonzáles, “Invernaderos, materiales e insumos en Ecuador”. ICEX, el 23 de marzo de 2018. Consultado: el 12 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.icex.es/icex/GetDocumento?dDocName=DAX2018791783&site=icexES>
- [3] J. Chafra y D. Monta, “Diseño e implementación de un módulo electrónico para la automatización de un invernadero comunitario de producción de hortalizas y legumbres”, Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador, 2016. Consultado: el 12 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12361/1/UPS%20-%20ST002206.pdf>
- [4] Instituto nacional de estadísticas y censos, “Reporte estadístico del sector agropecuario”. agosto de 2011. Consultado: el 12 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Presentaciones/espac_2010.pdf
- [5] M. Campuzano, A. Portilla, y C. Lowe, “Calentamiento de invernaderos con energía geotérmica en el páramo ecuatoriano”, 28/02/2015, vol. 35, núm. 3, p. 8.
- [6] L. Briceño, M. Ávila, y R. Jaimez, “SIMICROC: Modelo de simulación del microclima de un invernadero”, SIMICROC, vol. 45, núm. 7, p. 13, ago. 2011.
- [7] L. Briceño y R. Jaimez, “Influencia de la condición climática de diferentes localidades en el microclima del invernadero: región andina y central de Venezuela”, vol. 35, p. 9, 2010.
- [8] F. Rodríguez, M. Berenguel, J. Guzmán, y A. Ramírez, *Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth*. Cham: Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-11134-6.
- [9] E. Fitz, C. Kubota, G. Giacomelli, M. Tignor, S. Wilson, y M. McMahon, “Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application”, *Comput. Electron. Agric.*, vol. 70, núm. 1, pp. 105–116, ene. 2010, doi: 10.1016/j.compag.2009.09.010.
- [10] V. Alfaro, “Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo cerrado”, *Rev. Ing.*, vol. 11, núm. 1–2, jul. 2011, doi: 10.15517/ring.v11i1-2.604.
- [11] V. Mazzone, “Controladores PID”. Universidad Nacional de Quilmes, marzo de 2022. Consultado: el 13 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- [12] J. Henríquez y W. Martínez, “Identificación y sintonización de controladores PID para procesos de integración”, Universidad de la Costa, Barranquilla - Colombia, 2019. Consultado: el 13 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/5557/Identificaci%C3%B3n%20y%20sintonizaci%C3%B3n%20de%20controladores%20PID%20para%20procesos%20de%20integraci%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [13] O. Camacho, A. Rosales, y F. Rivas, *Control de Procesos*, 1a ed. Quito-Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [14] O. Camacho y C. Smith, “Sliding mode control: an approach to regulate nonlinear chemical processes”, *ISA Trans.*, vol. 39, núm. 2, pp. 205–218, abr. 2000, doi: 10.1016/S0019-0578(99)00043-9.
- [15] J. Palomares, “Diseño e implementación de un sistema embebido para la adquisición y gestión de variables relevantes en equipos trifásicos”. Universidad de la Salle, 2019.

- [16] J. Fuentes, S. Castro, B. Medina, F. Moreno, y S. Sepúlveda, “Experimentación de controladores digitales clásicos en un sistema embebido aplicado en un proceso térmico”, *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, núm. 1, pp. 81–92, 2018.
- [17] Departamento de física aplicada III, “Propiedades del agua”, Universidad de Sevilla, octubre de 2019. http://laplace.us.es/wiki/index.php/Propiedades_del_agua (consultado el 31 de julio de 2022).
- [18] Departamento de ingeniería química, “Higrometría”. Universidad tecnológica nacional. Consultado: el 31 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/3_anio/integracion3/Psicrometria.pdf
- [19] Air vision, “Calculation of the density”. Consultado: el 31 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.airvision.be/wp-content/uploads/AIR-VISION-Calculation-of-the-density.pdf>
- [20] A. Ritter, R. Muñoz, y C. Regalado, “Capacidad de predicción de modelos aplicados a la ZNS: herramienta informática para la adecuada evaluación de la bondad-de-ajuste con significación estadística”, p. 6.
- [21] J. Quispe, C. Balboa, M. Morales, y O. García, “Control de humedad y temperatura en un invernadero familiar mediante tiro, San Melchor-Ayacucho”, *XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente*, p. 12, nov. 2017.
- [22] Plant production and protection division, “El cultivo protegido en clima mediterráneo”, p. 338, 2002.
- [23] G. Fico, “Importancia del control de temperaturas en el invernadero. Cómo conseguir una temperatura óptima en invierno”, Grupo Fico, el 27 de enero de 2021. <https://grupofico.com/importancia-del-control-de-temperaturas-en-el-invernadero-como-conseguir-una-temperatura-optima-en-invierno/> (consultado el 21 de agosto de 2022).
- [24] F. García y J. Martínez, “Control climático en invernaderos y las nuevas aplicaciones”, *Nutricontrol*, el 11 de agosto de 2016. Consultado: el 21 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://nutricontrol.com/es/control-climatico-en-invernaderos-y-las-nuevas-aplicaciones/>
- [25] Y. López, “Control climático en invernaderos”, *Interempresas*. <https://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/77307-Control-climatico-en-invernaderos.html> (consultado el 23 de agosto de 2022).
- [26] C. Pérez, “Modelado y control multivariable de temperatura y humedad en un invernadero”, Universidad de Almería, España, 2014. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/3401/3354_MemoriaV5.pdf?se
- [27] M. Guerrero, “Control en invernaderos hidropónicos”, Universidad de Sevilla, Sevilla - España, 2013. Consultado: el 13 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70476/>
- [28] C. Angulo y C. Raya, *Tecnología de sistemas de control*. Barcelona - España: Edicions UPC, 2014.
- [29] N. Iglesias, “Estudio de condiciones térmicas y lumínicas y determinación de alternativas tecnológicas para el ahorro de energía en invernaderos de la Patagonia norte – argentina”, Universidad de Lleida, Argentina, 2005. Consultado: el 10 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/1699/INTA_CRPatagoniaNorte_EEAAltoValle_Iglesias_N_Estudio_de_condiciones_termicas_y_luminicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [30] “La humedad relativa en invernadero”, *Nutricontrol*, el 29 de enero de 2020. <https://nutricontrol.com/es/la-humedad-relativa-en-invernadero/> (consultado el 17 de julio de 2022).