

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

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**

CARLOS DANIEL CÓNDOR MOROCHO

carlos.condor01@epn.edu.ec

DIRECTOR: PH. D OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO

oscar.camacho@epn.edu.ec

DMQ, octubre 2022

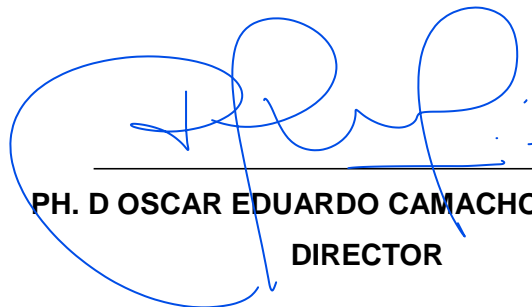
CERTIFICACIONES

Yo, CARLOS DANIEL CÓNDOR MOROCHO 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.



CARLOS DANIEL CÓNDOR MOROCHO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por CARLOS DANIEL CÓNDOR MOROCHO, bajo mi supervisión.



PH. D OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) 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.

CARLOS DANIEL CÓNDOR MOROCHO

PH. D OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a mis padres Juan Carlos y Narcisa, mi principal fuente de apoyo y aliento, gracias porque con su esfuerzo me han dado la oportunidad de llegar hasta donde estoy.

A mis hermanas, Andrea, Emily y Sofía, mi gran orgullo, gracias por confiar siempre en mí.

A mis abuelitos, tíos y primos, gracias por sus palabras de aliento y motivación.

A mí mejor amiga, Mary, gracias por el apoyo incondicional y por estar conmigo en todo momento, sobre todo en los que el mundo se venía encima.

A mis amigos, quienes han formado parte de este largo trayecto, gracias por hacer de la carrera universitaria una experiencia inolvidable.

A mi tutor de tesis, PhD. Óscar Camacho, gracias por la motivación y orientación para la realización de este trabajo.

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.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 SISTEMA DE CONTROL	3
1.4.2 PROCESOS NO LINEALES.....	3
1.4.3 APROXIMACIÓN FOPDT	4
1.4.4 CONTROLADOR PID.....	4
1.4.4.1 Sintonización controlador PID y PI.....	5
1.4.5 CONTROLADOR FUZZY	5
1.4.5.1 Sintonización controlador FUZZY-PI.....	7
1.4.6 IMPLEMENTACION DE CONTROLADORES EN UN SISTEMA EMBEBIDO.....	8
1.4.7 HARDWARE IN THE LOOP.....	9
1.4.7.1 Simulink de MatLab	9
1.4.7.2 Arduino	9
2 METODOLOGÍA.....	11
2.1 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE UN INVERNADERO	11
2.2 SINTONIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES.....	14
2.2.1 PID – Temperatura.....	15
2.2.1.1 Enfriamiento.....	15
2.2.1.2 Calefacción.....	17
2.2.2 FUZZY PI – Temperatura.....	18
2.2.2.1 Enfriamiento.....	18

2.2.2.2	Calefacción	20
2.2.3	PI – Humedad	21
2.2.3.1	Enfriamiento.....	21
2.2.3.2	Calefacción	23
2.2.4	FUZZY PI – HUMEDAD	24
2.2.4.1	Enfriamiento.....	24
2.2.4.2	Calefacción	26
2.3	DISCRETIZACIÓN DE CONTROLADORES.....	27
2.3.1	DISCRETIZACIÓN ESQUEMA PID	27
2.3.2	DISCRETIZACIÓN ESQUEMA PI.....	27
2.4	COMUNICACIÓN SIMULINK - ARDUINO.....	28
2.4.1	Recepción de datos en Arduino	28
2.4.2	Envío de datos hacia Simulink	28
2.4.3	Recepción de datos en Simulink de MatLab	28
2.4.4	Envío de datos hacia Arduino.....	30
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	32
3.1	Resultados implementación “Hardware in the Loop”	32
3.1.1	Resultados ante perturbaciones.....	32
3.1.1.1	Respuesta de temperatura y acción de control del esquema PID.	33
3.1.1.2	Respuesta de temperatura y acción de control del esquema PI- FUZZY.	38
3.1.1.3	Índices de desempeño para control de temperatura.....	42
3.1.1.4	Respuesta de humedad y acción de control del esquema PI. ...	43
3.1.1.5	Respuesta de humedad y acción de control del esquema PI- FUZZY.	47
3.1.1.6	Índices de desempeño para control de humedad relativa.....	52
3.2	Conclusiones	53
3.3	Recomendaciones	53
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
5	ANEXOS	56
	ANEXO I. HMI.....	57
	ANEXO II. Implementación del modelo matemático del invernadero en Simulink de MatLab	58

RESUMEN

El presente trabajo muestra el diseño e implementación de dos controladores, PID y PI-FUZZY los cuales están en la tarjeta embebida Arduino Mega 2560 para conectarse mediante comunicación serial con Simulink de MatLab, software en el que se encuentra el modelo matemático de un invernadero, funcionando así bajo el concepto de Hardware in the Loop para el análisis de desempeño de cada controlador.

El documento contiene información sobre las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del invernadero, la sintonización y discretización de cada controlador, además se realizan pruebas frente a perturbaciones (temperatura externa, humedad externa y radiación solar) para medir los índices de desempeños ISCO e ISE y decidir el controlador más robusto y fiable.

PALABRAS CLAVE: PI, PI-FUZZY, discretización, Hardware in the loop, ISCO, ISE.

ABSTRACT

This paper shows the design and implementation of two controllers, PID and PI-FUZZY which are in the Arduino Mega 2560 embedded card to connect through serial communication with Simulink of MatLab, software in which is the mathematical model of a greenhouse, thus operating under the concept of Hardware in the Loop for the performance analysis of each controller.

The document contains information about the differential equations that describe the behavior of the greenhouse, the tuning and discretization of each controller, as well as tests against disturbances (external temperature, external humidity and solar radiation) to measure the ISCO and ISE performance indexes and decide the most robust and reliable controller.

KEYWORDS: PI, PI-FUZZY, discretization, Hardware in the loop, ISCO, ISE.

1 INTRODUCCIÓN

La mayoría de los métodos de sintonización dependen principalmente del enfoque experimental de la respuesta de escalón unitario en lazo abierto. Los parámetros del controlador son fáciles de encontrar si la respuesta del sistema se puede aproximar a un sistema de primer orden con tiempo muerto (FOPDT por sus siglas en inglés). El rendimiento de la mayoría de ellos se ve afectado a medida que cambia la relación entre el retardo t_o y la constante de tiempo τ . Los valores de los parámetros del controlador PID se pueden ajustar con los valores característicos de la aproximación a un sistema de primer orden más tiempo muerto.

Por otro lado, el controlador FUZZY no se ajusta mediante los mismos procedimientos de ajuste convencionales. Está construido como un conjunto de reglas de control y la señal de control se deduce directamente de la base de conocimiento del experto y la inferencia difusa.

Las pruebas de los algoritmos de control en la planta real toman mucho tiempo, representan costos elevados y es potencialmente insegura, frente a este problema aparece el concepto de Hardware in the Loop que consiste en verificar el diseño del controlador sin necesidad de que esté conectado a la planta real, la planta debe estar implementada mediante ecuaciones matemáticas que describan el comportamiento del proceso real en un software de simulación en tiempo real actuando como gemelo digital de toda la planta y así evaluar el desempeño del controlador.

En el presente trabajo se presentan dos controladores, PID y PI-FUZZY aplicados a un invernadero para el control de temperatura y humedad. Para la sintonización del controlador PID se propone el método de Dahlin [3] mientras que para la sintonización del PI-FUZZY se han tomado ciertas consideraciones propuestas por Camacho, O., Iglesias, E., Herrera, M., & Aboukheir, H. [5].

Una vez realizado la sintonización de cada controlador estos pasan por un proceso de discretización en la tarjeta embebida Arduino Mega 2560 [11], para posteriormente realizar pruebas bajo el concepto de Hardware in the Loop y evaluar el desempeño de cada controlador, las ecuaciones que describen al modelo matemático del invernadero están implementadas en el software computacional Simulink de MatLab y están interconectados mediante comunicación serial con la tarjeta embebida.

1.1 Objetivo general

Diseñar e implementar controladores PID y DIFUSO en un modelo de un invernadero mediante el concepto de hardware in the loop.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica acerca del modelo matemático que describa al invernadero.
2. Realizar una revisión bibliográfica acerca del diseño y sintonización de controladores PID y Difuso.
3. Realizar una revisión bibliográfica acerca de la implementación de controladores en un sistema embebido.
4. Implementar en Matlab Simulink el modelo matemático de un invernadero.
5. Diseñar e implementar dos controladores: PID y Difuso en un sistema embebido.
6. Obtener los índices de desempeño ISE e ISCO de los controladores implementados para compararlos.

1.3 Alcance

Se realizará una revisión bibliográfica de modelos matemáticos de procesos no lineales con parámetros variables, enfocados en el control de temperatura y humedad como es el caso del invernadero.

Se realizará una revisión bibliográfica sobre el diseño de controladores PID y Difuso.

Se diseñará e implementará los dos controladores en un sistema embebido y se verificará su desempeño para un invernadero simulado en MatLab Simulink bajo el concepto de "Hardware in the loop".

Se verificará la robustez de los controladores diseñados ante la presencia de perturbaciones en el sistema.

1.4 Marco teórico

1.4.1 SISTEMA DE CONTROL

Un sistema de control es un sistema que proporciona la respuesta deseada controlando la salida. En los sistemas de control de bucle cerrado, la salida se retroalimenta a la entrada. Por lo tanto, la acción de control depende de la salida deseada.

La figura 1.1 muestra el diagrama de bloques del sistema de control de circuito cerrado de retroalimentación negativa.

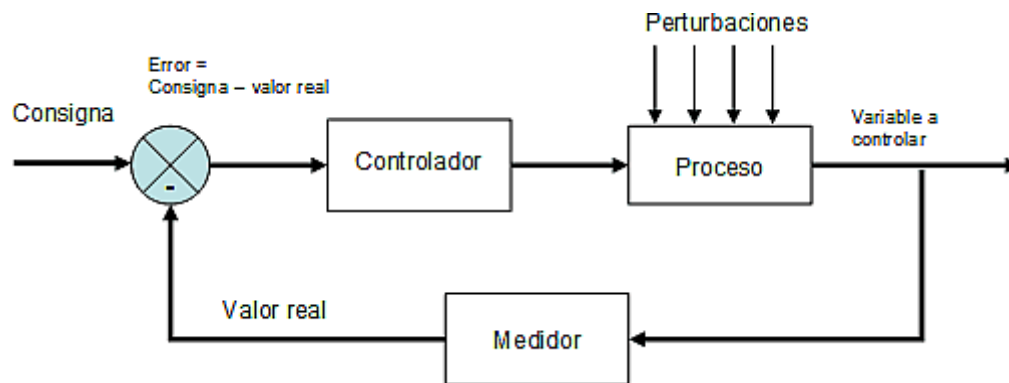


Figura 1.1 Diagrama de bloques de un sistema de control. [1]

Los sistemas de control se pueden clasificar como sistemas de control SISO y sistemas de control MIMO en función del número de entradas y salidas.

Los sistemas de control SISO (Single Input and Single Output) tienen una entrada y una salida. Mientras que los sistemas de control MIMO (Multiple Inputs and Multiple Outputs) tienen más de una entrada y más de una salida.

1.4.2 PROCESOS NO LINEALES

Muchos problemas comunes de control de procesos presentan un comportamiento no lineal, en el sentido de que la relación entre las variables controladas y manipuladas dependen de las condiciones de operación. Por ejemplo, si el comportamiento dinámico de un proceso no lineal se aproxima mediante un modelo lineal como una función de transferencia de primer orden, los parámetros del modelo (ganancia de estado estacionario, constante de tiempo, tiempo de retardo) dependen de la condición operativa nominal. Si el proceso es levemente no lineal o permanece en la cercanía de un estado estacionario nominal, entonces los efectos de las no linealidades pueden ser tolerables.

1.4.3 APROXIMACIÓN FOPDT

Los sistemas de primer orden son aquellos cuya relación entrada-salida es una ecuación diferencial de primer orden.

Muchas técnicas de control se basan en el modelo ideal de primer orden más tiempo muerto (FOPDT) del proceso. Convencionalmente, los valores se obtienen de los coeficientes del modelo mediante pruebas escalón a lazo abierto del proceso.[2]

$$G(s) = \frac{K * e^{-t_o s}}{\tau s + 1} \quad (1.1)$$

K : ganancia de estado estacionario

t_o : tiempo de retardo

τ : constante de tiempo

Un método para obtener los parámetros es el de los dos puntos con la curva reacción presentado por Smith, el punto uno es el tiempo que tarda el proceso en alcanzar el 28.3% del valor estable en la salida y el punto dos es el tiempo que tarda el proceso en alcanzar el 63.2% del valor estable en la salida. [3]

1.4.4 CONTROLADOR PID

El control PID es el algoritmo de control más común utilizado en la industria y ha sido universalmente aceptado en el control industrial. La popularidad de los controladores PID se atribuye en parte a su sólido rendimiento en una amplia gama de condiciones de funcionamiento y a su simplicidad funcional.

El algoritmo del controlador PID involucra tres parámetros:

- a) Proporcional: el término proporcional produce un valor de salida que es proporcional al valor de error actual, a mayor error mayor será el valor de salida, por lo tanto, más se logrará el punto de referencia.
- b) Derivativa: predice el comportamiento del sistema y, por lo tanto, mejora el tiempo de establecimiento y la estabilidad del sistema
- c) Integral: el término integral acelera el movimiento del proceso hacia el punto de ajuste y elimina el error de estado estacionario.

Las tres acciones se pueden combinar para lograr un control tipo P, PD, PI y PID. Los dos últimos se utilizan para desarrollar el trabajo de titulación.

Controlador PI:

$$u_{PI}(t) = k_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \quad (1.2)$$

Controlador PID:

$$u_{PID}(t) = k_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{d(t)} \quad (1.3)$$

1.4.4.1 Sintonización controlador PID y PI

La propuesta para la sintonización del controlador PID es el método de Dahlin, las ecuaciones para el cálculo de los parámetros se presentan a continuación:

$$k_p = \frac{1}{2k} \left(\frac{t_o}{\tau} \right)^{-1} \quad (1.4)$$

$$\tau_i = \tau \quad (1.5)$$

$$\tau_d = \frac{t_o}{2} \quad (1.6)$$

Las ecuaciones 1.4, 1.5, y 1.6 son válidas cuando existe tiempo muerto, caso contrario se presenta otra alternativa para poder ajustar el controlador PI.

$$t_o < \tau_c < \tau \quad (1.7)$$

$$k_p = \frac{\tau}{k * \tau_c} \quad (1.8)$$

$$\tau_i = \tau \quad (1.9)$$

Parámetro proporcional:

$$k_p \quad (1.10)$$

Parámetro integral:

$$k_i = \frac{1}{\tau_i} \quad (1.11)$$

Parámetro derivativo:

$$k_d = \tau_d \quad (1.12)$$

1.4.5 CONTROLADOR FUZZY

La idea de un controlador difuso es decidir lógicamente a partir del conocimiento del operador humano qué se debe hacer para lograr el objetivo del controlador de la mejor manera posible.

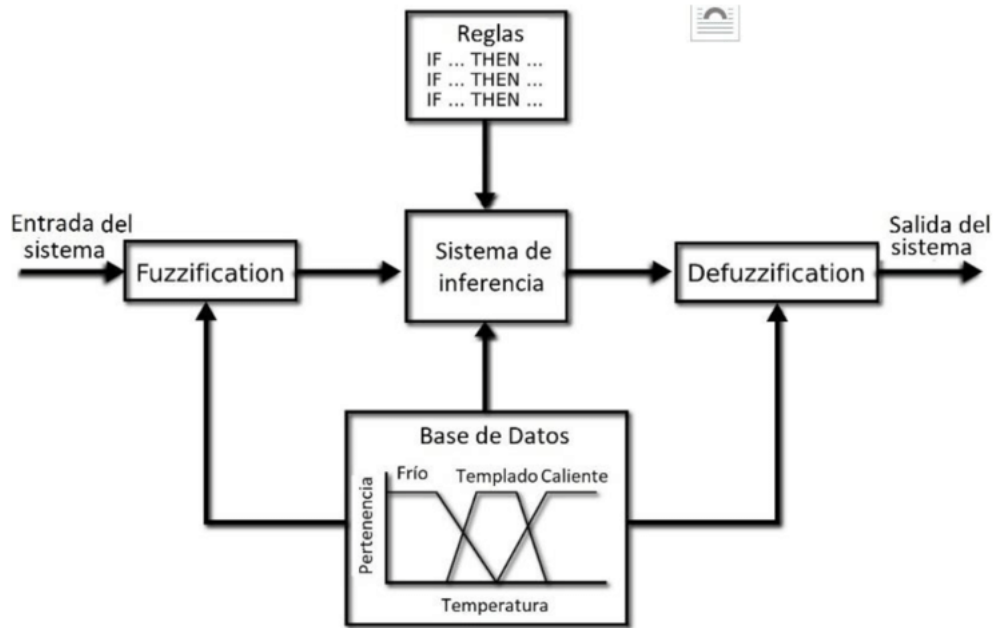


Figura 1.2 Esquema de un sistema de control FUZZY. [4]

El control fuzzy consta de varias etapas:

- Etapa de fusificación: esta fase implica el proceso de transformar lingüísticamente los valores de entrada en valores que el controlador pueda interpretar.
- Universo de discurso: teniendo en cuenta el conocimiento de la planta se obtiene los rangos de los parámetros de error, también se puede agregar entradas como la integral del error y derivada del error.
- Funciones de membresía: se trata de una curva que define el orden entre 0 y 1 en el que una variable pertenece a un conjunto difuso el cual es definido por el experto. Estas funciones de membresía pueden ser de tipo triangular, trapezoidal, gausianna o campana de gauss como se muestra en la figura 1.3.

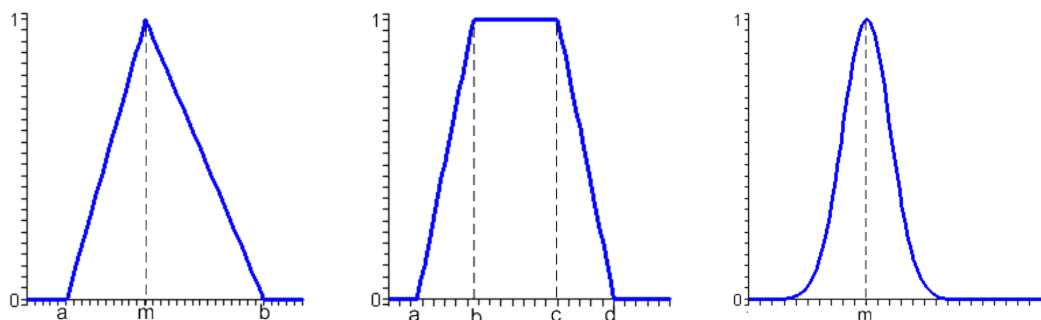


Figura 1.3 Funciones de membresía: triangular, trapezoidal y gausianna. [16]

- Reglas de inferencia: la base de reglas almacena el conocimiento lingüístico para resolver los problemas para los que están diseñados los sistemas difusos, en resumen, el objetivo del sistema de inferencia es obtener el nivel de pertenencia y con la ayuda de la base de reglas, originar la salida en un sistema difuso.
- Etapa de defusificación: el resultado de los valores obtenidos por los grados de pertenencia de las variables de entrada se expresa con un valor numérico. Las reglas de salida se evalúan y se obtiene la respuesta del controlador para cada conjunto de salida.[6]

1.4.5.1 Sintonización controlador FUZZY-PI

Para la sintonización del controlador Fuzzy PI se presenta la siguiente estructura:

- Sintonizar el controlador PI con cualquier método.
- Reemplazar con un controlador difuso equivalente, las entradas del control difuso son k_p y k_i .

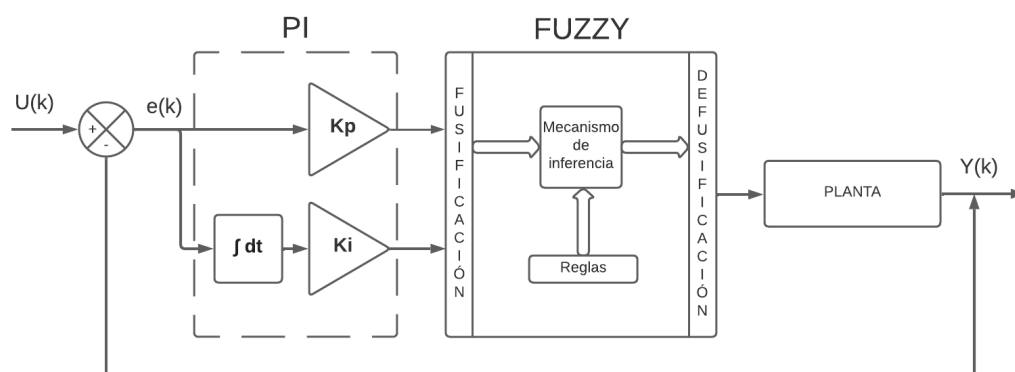


Figura 1.4 Diagrama de bloques del controlador FUZZY-PI

Como se mencionó el primer paso es sintonizar el controlador PI para obtener los parámetros k_p y k_i .

Como segundo paso es sustituir el controlador PI para lo cual es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Universo de discurso: el universo de discurso tanto para entrada (señales de error) como salida (señal de control) deben estar dentro de los límites.
- Funciones de pertenencia: se recomienda utilizar funciones de pertenencia triangulares que atraviesen por $\mu = 0.5$.

- Número de reglas: el número de términos en cada universo determina el número de reglas.

$$\# \text{ reglas} = (\# \text{ funciones de membresía})^{\# \text{ entradas}} \quad (1.13)$$

- Método de defusificación: se recomienda usar el método del centroide. [5]

1.4.6 IMPLEMENTACION DE CONTROLADORES EN UN SISTEMA EMBEBIDO

Los sistemas embebidos son cada vez más populares en una amplia gama de aplicaciones como sistemas de control industrial, aviación, medicina, medio ambiente, seguridad, mecánica, etc.

La mayoría de estos procesos usan señales análogas mientras que los sistemas embebidos necesitan señales digitales para procesar y almacenar información, debido a esto se da la necesidad de convertir señales análogas en señales discretas.

La señal discreta es función de una variable de tiempo que tiene un conjunto contable o finito de números en su secuencia, la discretización de la señal analógica se realiza muestreando la señal en intervalos de tiempo iguales.

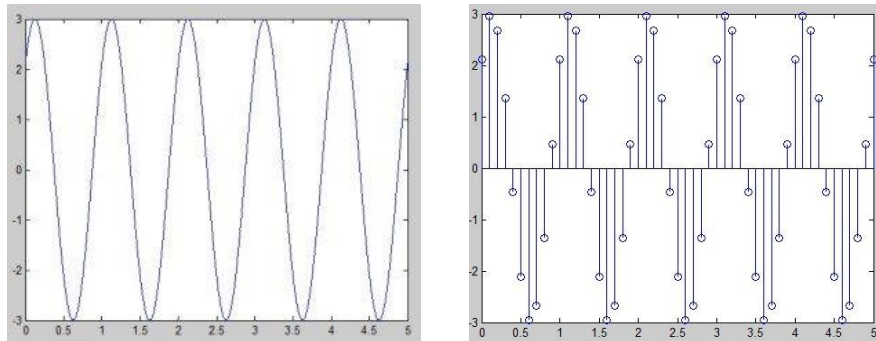


Figura 1.5 Señal análoga y señal discreta.[7]

Para procesos que tienden a respuestas de primer orden se considerar tomar de 10 a 30 muestras del tiempo de establecimiento para la discretización de los diferentes controladores, lo mencionado se presenta en la ecuación 1.14.

$$T = \frac{t_s}{\# \text{ de muestras}} \quad (1.14)$$

T : tiempo de muestreo

t_s : tiempo de establecimiento

1.4.7 HARDWARE IN THE LOOP

La prueba de los algoritmos de control puede llevar mucho tiempo, ser muy costosa y potencialmente insegura si se decide probarlos en la planta real es por eso por lo que los ingenieros de pruebas han reemplazado los métodos de prueba tradicionales con pruebas de Hardware in the Loop.[8]

Las pruebas de Hardware in the Loop permiten verificar el diseño del controlador sin el hardware del sistema completo siempre y cuando se tenga un simulador de planta en tiempo real que actúa como un gemelo digital de toda la planta y de esta manera reducir los costos.

Con lo ya mencionado, Hardware in the Loop consta de dos partes:

- a) Software de simulación: encargado de simular el proceso mediante modelos matemáticos, para el trabajo de titulación se hace uso de Simulink de MatLab.
- b) Sistema embebido: se encarga de procesar las señales convirtiéndolas de análogas a digitales, para el trabajo de titulación se hace uso de la tarjeta embebida Arduino.

1.4.7.1 Simulink de MatLab

Simulink es un entorno que permite la implementación de diagrama de bloques para la simulación y el diseño de modelos. Es compatible con la generación de código automatizado, modelado de sistemas y la prueba y validación continuas de los sistemas. Ideal para pruebas bajo el concepto Hardware in the Loop.[9]

1.4.7.2 Arduino

Es una plataforma de creación de prototipos electrónicos de código abierto diseñado para hacer que la electrónica sea más accesible.

Una placa Arduino incluye un microcontrolador, que se programa utilizando el lenguaje de programación Arduino y el entorno de desarrollo Arduino. En esencia, esta plataforma proporciona una forma de construir y programar componentes electrónicos. El lenguaje de programación Arduino es una versión simplificada del lenguaje de programación C/C++ basado en lo que Arduino llama "bocetos", que utilizan funciones, variables y estructuras de programación básicas. [10]

Existe una gran cantidad de tarjetas con diferentes características, para la implementación de los controladores PI Y PI-FUZZY se hace uso de la tarjeta Arduino Mega 2560.



Figura 1.6 Arduino Mega 2560. [11]

Entre las principales características están:

- 54 I/O digitales, de las cuales 15 se pueden configurar como PWM.
- 16 entradas analógicas.
- 4 puertos para comunicación serial.
- Oscilador de 16Mhz.

2 METODOLOGÍA

2.1 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE UN INVERNADERO

Para la implementación del modelo matemático del invernadero se ha tomado como referencia el trabajo de Efrén Fitz-Rodríguez, Chieri Kubota, Gene A. Giacomelli, Milton E. Tignor, Sandra B. Wilson, Margaret McMahon (Computers and Electronics in Agriculture, 2010). [12]

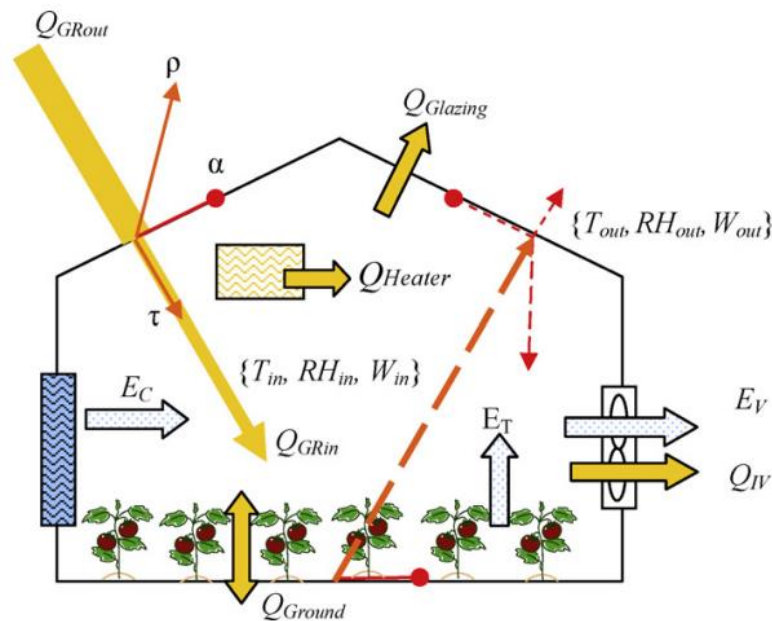


Figura 2.1 Flujos de energía que definen las ecuaciones del modelo matemático del invernadero. [12]

Las ecuaciones que describen la dinámica del invernadero se presentan a continuación:

a) Temperatura ambiental interna del invernadero:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{C_p \cdot \rho \cdot H} (Q_{GRin} + Q_{GHeater} - L \cdot E - (T_{in} - T_{out}) \cdot (q_v \cdot C_p \cdot \rho + w \cdot k)) \quad (2.1)$$

Tabla 2.1. Valores de variables y constantes correspondientes a la ecuación 2.1

NOMBRE	SÍMBOLO	VALOR
Calor específico del aire	$C_p \left[\frac{J}{Kg \cdot K} \right]$	1010
Altura media del invernadero	$H [m]$	5.38
Masa específica del aire	$\rho \left[\frac{kg \text{ dry air}}{m^3} \right]$	1.2

Calor latente de vaporización del agua	$L \left[\frac{J}{kg} \right]$	$2.5 * (10)^6$
Relación entre el área de la cubierta con la del suelo	w	Invernadero tipo cuadrado $w = 2.2$
Coefficiente de transmisión de calor del acristalamiento	$k \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$	Acristalamiento del invernadero: vidrio $K = 6.2$
Velocidad de ventilación	$q_v \left[\frac{m}{s} \right]$	Variable de control 2 a 120
Temperatura externa del invernadero	$T_{out} [^\circ C]$	Variable de perturbación
Temperatura interna del invernadero.	$T_{in} [^\circ C]$	Variable de salida $T_{in_{inicial}} = 20$

b) Radiación al interior del invernadero:

$$Q_{GRin} = Q_{GRout} \cdot \tau_c \cdot (1 - \rho_g) \quad (2.2)$$

Tabla 2.2. Valores de variables y constantes correspondientes a la ecuación 2.2

NOMBRE	SÍMBOLO	VALOR
Transmitancia de la cobertura	τ_c	0.87 p. u.
Reflectancia de la radiación solar en el terreno	ρ_g	0.4 p. u.
Radiación solar externa	$Q_{GRout} \left[\frac{W}{m^2} \right]$	Variable de perturbación

c) Energía térmica que aporta el sistema de calefacción:

$$Q_{Heater} = \frac{H_{cap}}{A_{fl}} N_H \quad (2.3)$$

Tabla 2.3. Valores de variables y constantes correspondientes a la ecuación 2.3

NOMBRE	SÍMBOLO	VALOR
Número de calentadores	N_H	2
Capacidad de los calentadores	$H_{cap} [kW]$	Variable de control 0 a 150 kW
Área de la superficie del suelo del invernadero	$A_{fl} [m^2]$	Invernadero tipo cuadrado $A_{fl} = 162 m^2$

d) Evapotranspiración:

$$E = E_C + E_T \quad (2.4)$$

Tabla 2.4. Valores de variables y constantes correspondientes a la ecuación 2.4

NOMBRE	SÍMBOLO	VALOR
Sistema de enfriamiento	$E_c \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]$	Variable de control 0 a 14.8
Transpiración del cultivo	$E_T \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]$	Mucho cultivo $E_T = 0.003 \cdot \tau_c \cdot Q_{GRout} + 0.0021$

e) Humedad interna del invernadero:

$$\frac{d W_{in}}{dt} = \frac{1}{\rho \cdot H} (E - (W_{in} - W_{out}) \cdot q_v \cdot \rho) \quad (2.5)$$

Tabla 2.5. Valores de variables y constantes correspondientes a la ecuación 2.5

NOMBRE	SÍMBOLO	VALOR
Humedad absoluta dentro del invernadero	$W_{in} \left[\frac{g_{water}}{kg_{dry\ air}} \right]$	Variable de salida $W_{in\ inicial} = 0.0124614720$
Humedad absoluta fuera del invernadero	$W_{out} \left[\frac{g_{water}}{kg_{dry\ air}} \right]$	Variable de perturbación

Para un mejor entendimiento del comportamiento del invernadero se transforma la humedad absoluta a humedad relativa.

En el trabajo que se ha tomado como referencia presenta tres formas de controlar temperatura y humedad, las cuales son ventilación, calefacción y enfriamiento. Para el trabajo de titulación se usa la calefacción para aumentar la temperatura y a su vez disminuir la humedad relativa internas del invernadero, y enfriamiento para disminuir la temperatura y a su vez aumentar la humedad relativa internas del invernadero.

En la tabla 2.6 se presenta un resumen de las variables de entrada, salidas y control del invernadero.

Tabla 2.6. Resumen de variables de entrada, salida y control

TIPO DE VARIABLE	VARIABLE	DESCRIPCIÓN
ENTRADA	$T_{out} [^{\circ}C]$	Temperatura externa del invernadero (perturbación)
	$W_{out} [\%]$	Humedad relativa fuera del invernadero (perturbación)
	$Q_{GRout} \left[\frac{W}{m^2} \right]$	Radiación solar externa (perturbación)
SALIDA	$T_{in} [^{\circ}C]$	Temperatura interna del invernadero
	$W_{in} [\%]$	Humedad relativa interna del invernadero

CONTROL	$E_c \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]$	Sistema de enfriamiento
	$H_{cap} [kW]$	Capacidad de los calentadores

Nota: las variables de control han sido normalizadas en porcentaje (0 a 100%) para una mejor interpretación de las acciones de control.

2.2 SINTONIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES

En la tabla 2.7 se presenta los valores de las variables para el punto de equilibrio tanto de temperatura como humedad.

Tabla 2.7. Valores de variables para punto de equilibrio de temperatura y humedad

TIPO DE VARIABLE	VARIABLE	Valor
ENTRADA	$T_{out} [^{\circ}C]$	16.701
	$HR_{out} [\%]$	73.219
	$Q_{GRout} \left[\frac{W}{m^2} \right]$	115.238
CONTROL	$E_c [\%]$	0
	$H_{cap} [\%]$	0
SALIDA	$T_{in} [^{\circ}C]$	20
	$HR_{in} [\%]$	60

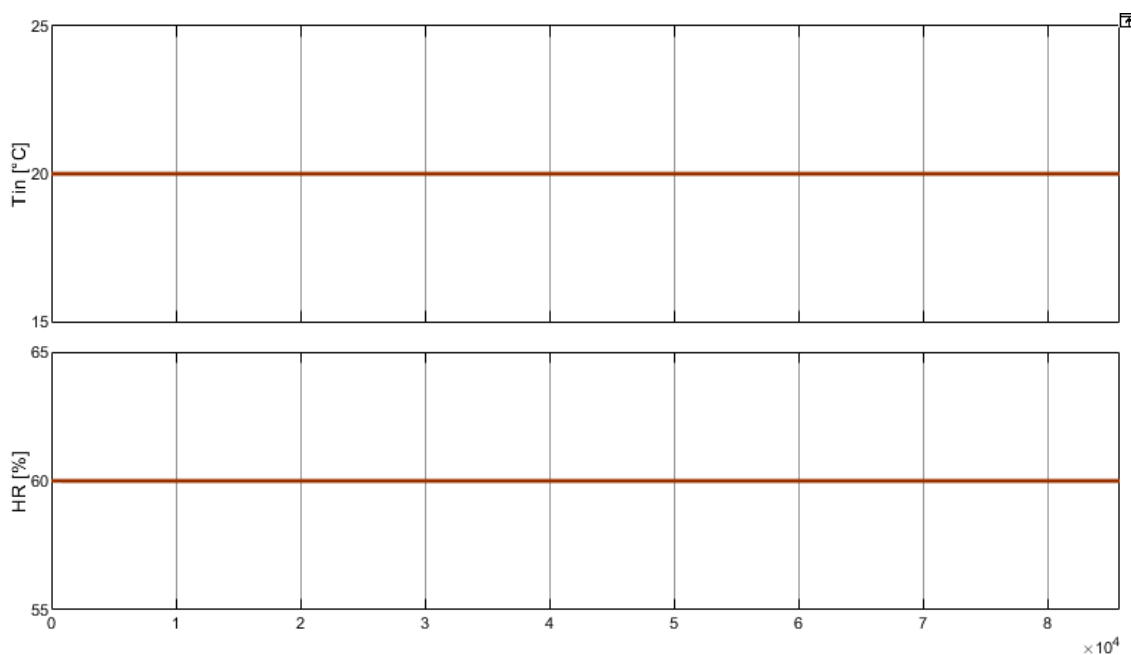


Figura 2.2 Punto de equilibrio para temperatura y humedad interna del invernadero.

Para sintonizar los esquemas de control se realiza un cambio escalón del 10% en la variable de control de calefacción y enfriamiento tanto para temperatura y humedad.

2.2.1 PID – Temperatura

2.2.1.1 Enfriamiento

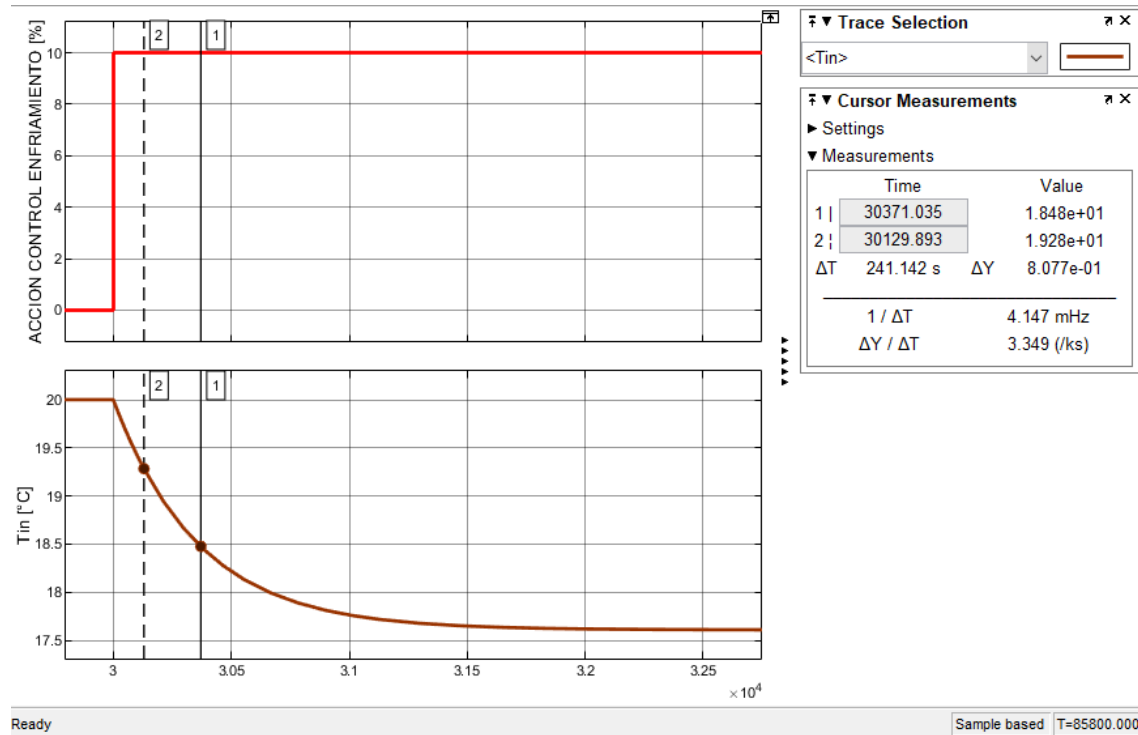


Figura 2.3 Respuesta de temperatura frente a entrada paso del 10%, sistema de enfriamiento.

Con la respuesta de la figura 2.3 se puede obtener los parámetros del modelo FOPDT con el método de Smith.

Tabla 2.8. Parámetros del modelo FOPDT para control de temperatura (sistema de enfriamiento)

Parámetro	Valor
K	-0.2393
t_o	361.713 s
τ	9.322 s

$$G(s) = -\frac{0.2393 * e^{-9.322 s}}{361.713s + 1} \quad (2.6)$$

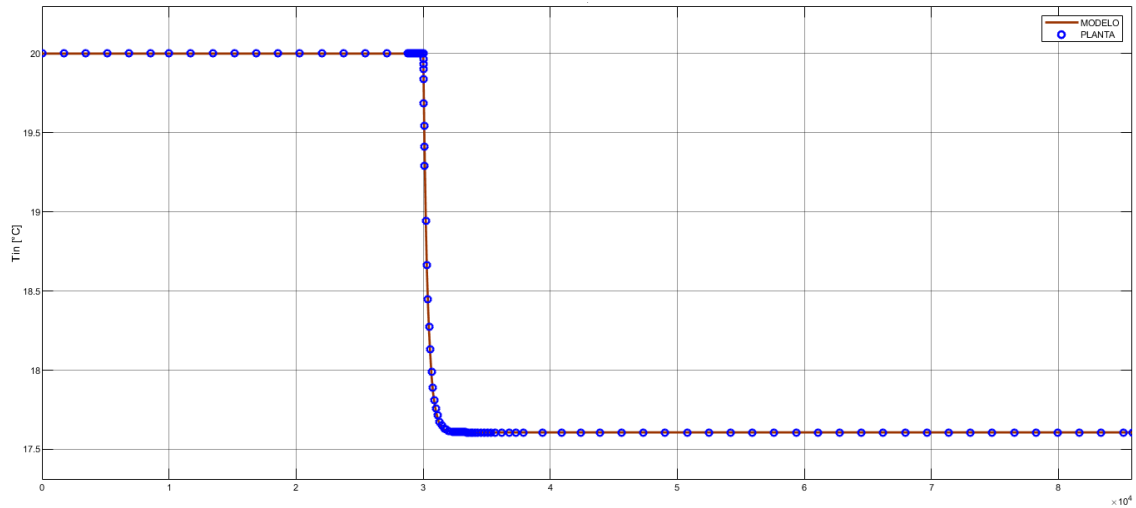


Figura 2.4 Validación del modelo FOPDT con la planta real, sistema de enfriamiento para temperatura.

Haciendo uso de las ecuaciones 1.4, 1.5 y 1.6 se obtienen los parámetros del controlador PID.

Tabla 2.9. Valores de los parámetros del controlador PID para control de temperatura (sistema de enfriamiento)

Parámetro	Valor
k_c	-81.074
τ_i	361.713
τ_d	4.661

2.2.1.2 Calefacción

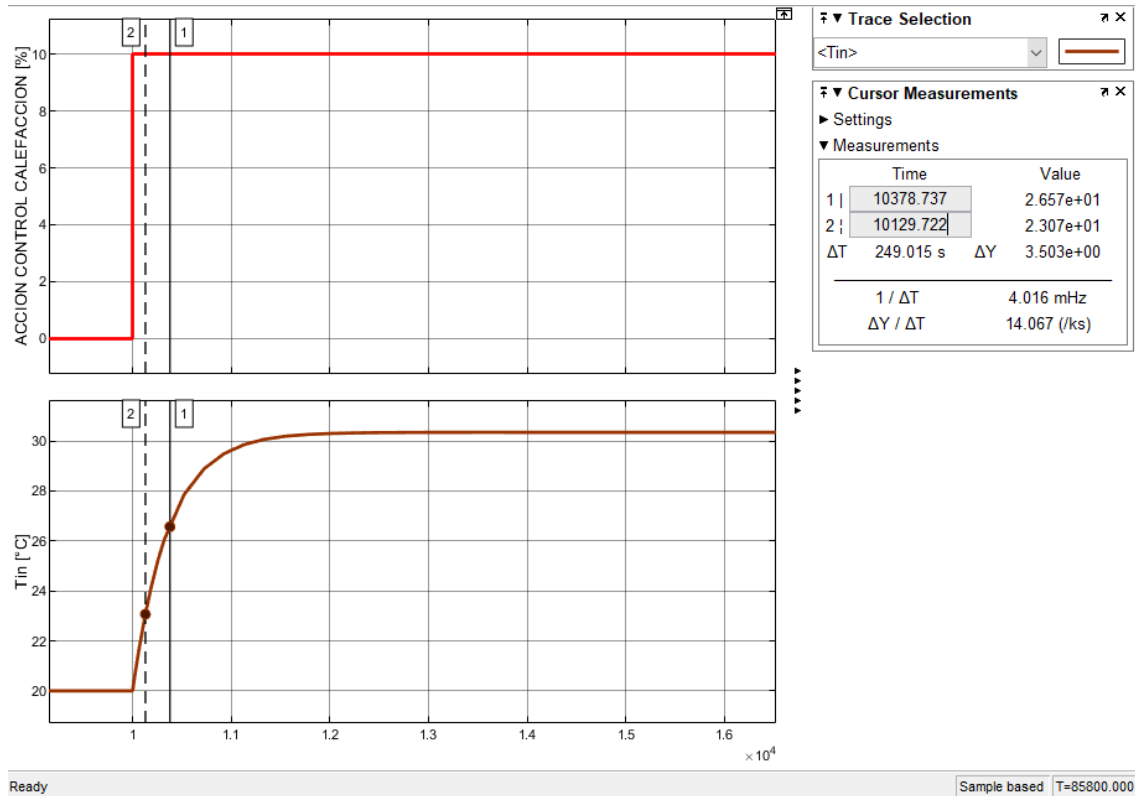


Figura 2.5 Respuesta de temperatura frente a entrada paso del 10%, sistema de calefacción.

Con la respuesta de la figura 2.5 se puede obtener los parámetros del modelo FOPDT para la posterior sintonización del controlador PID.

Tabla 2.10. Parámetros del modelo FOPDT para control de temperatura (sistema de calefacción)

Parámetro	Valor
K	1.035
t_o	5.215 s
τ	373.5225 s

$$G(s) = \frac{1.035 * e^{-5.215s}}{373.5225s + 1} \quad (2.7)$$

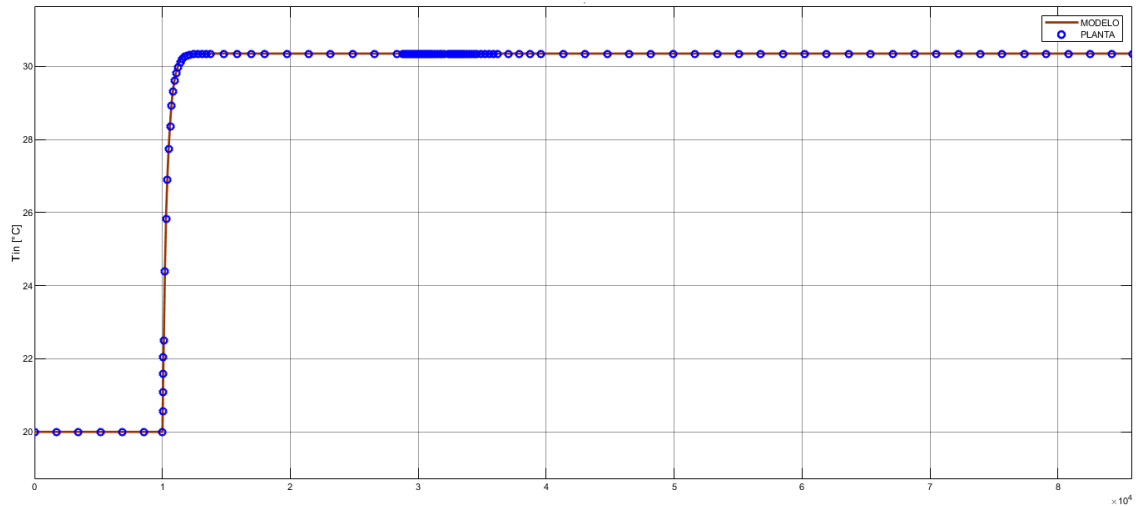


Figura 2.6 Validación del modelo FOPDT con la planta real, sistema de calefacción para temperatura.

Tabla 2.11. Valores de los parámetros del controlador PID para control de temperatura (sistema de calefacción)

Parámetro	Valor
k_c	34.601
τ_i	373.5225
τ_d	2.6075

2.2.2 FUZZY PI – Temperatura

2.2.2.1 Enfriamiento

Teniendo en cuenta los pasos para la sintonización del controlador FUZZY-PI presentados en el apartado 1.4.5.1, se realiza como primer paso la sintonización del controlador PI con los parámetros de la aproximación FOPDT, tabla 2.8.

A continuación, se presenta los parámetros del controlador PI usando las ecuaciones 1.7, 1.8 y 1.9.

Tabla 2.12. Valores de los parámetros del controlador PI para control de temperatura (sistema de calefacción)

Parámetro	Valor
τ_c	373.5225
k_c	0.9661
τ_i	373.5225

Una vez obtenido el controlador PI es reemplazado por el FUZZY.

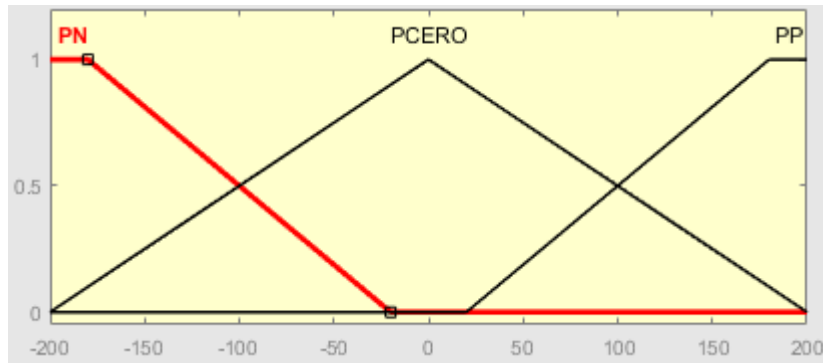


Figura 2.7 Entrada universo de discurso para k_p , temperatura (enfriamiento).

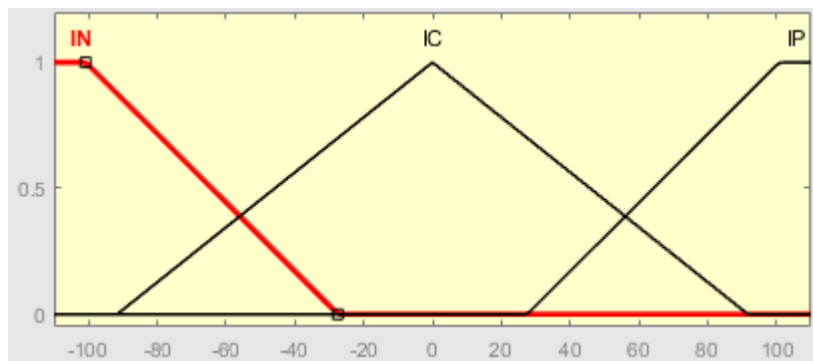


Figura 2.8 Entrada universo de discurso para k_i , temperatura (enfriamiento).

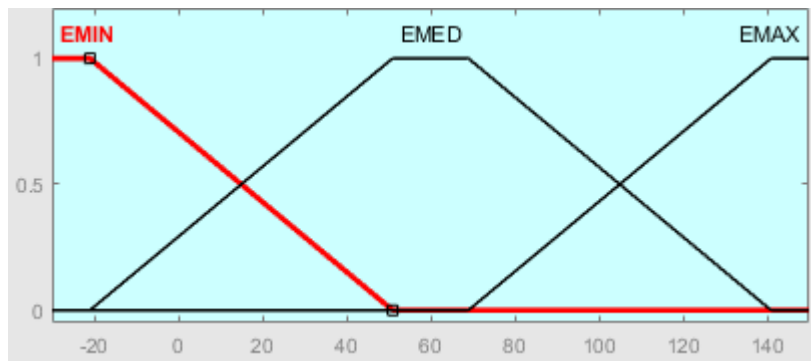


Figura 2.9 Salida universo de discurso para sistema de enfriamiento (temperatura).

Tabla 2.13. Reglas de inferencia para FUZZY-PI de temperatura (sistema de enfriamiento)

k_p	Conector	k_i	Conector	$u(t)$
Negativo	And	Negativo	Then	Mínimo
Negativo	And	Cero	Then	Mínimo
Negativo	And	Positivo	Then	Medio
Cero	And	Negativo	Then	Mínimo
Cero	And	Cero	Then	Mínimo
Cero	And	Positivo	Then	Máximo
Positivo	And	Negativo	Then	Medio
Positivo	And	Cero	Then	Medio

Positivo	And	Positivo	Then	Máximo
----------	-----	----------	------	--------

2.2.2.2 Calefacción

Realizando el mismo procedimiento del apartado 2.1.2.1 y con las respectivas constantes de la tabla 2.10 se calculan los valores de los parámetros del controlador PI.

Tabla 2.14. Valores de los parámetros del controlador PI para control de temperatura (sistema de enfriamiento)

Parámetro	Valor
τ_c	361.73
k_c	-4.1788
τ_i	361.73

Posteriormente se reemplaza el controlador PI por el FUZZY-PI.

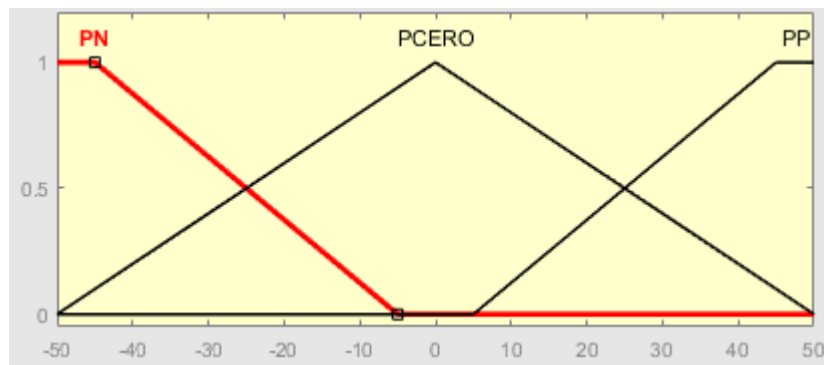


Figura 2.10 Entrada universo de discurso para k_p , temperatura (calefacción).

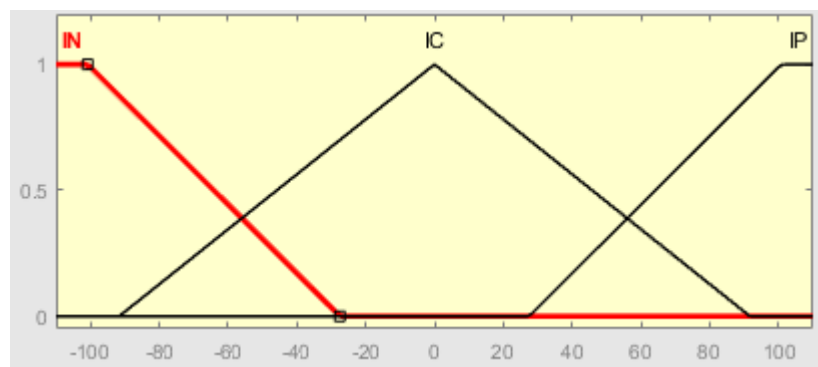


Figura 2.11 Entrada universo de discurso para k_i , temperatura (calefacción).

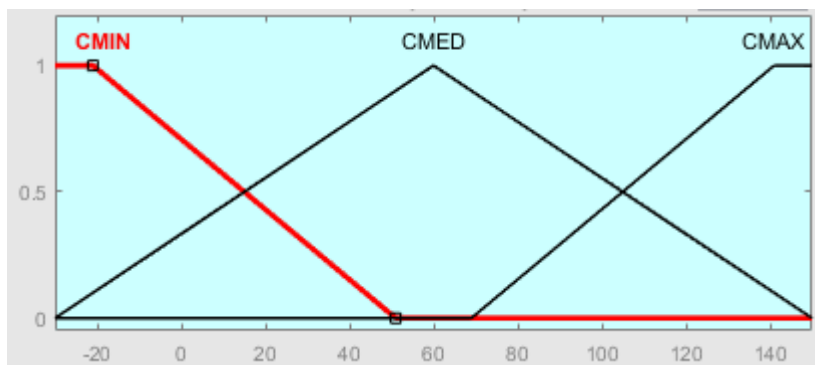


Figura 2.12 Salida universo de discurso para sistema de calefacción (temperatura).

Tabla 2.15. Reglas de inferencia para FUZZY-PI de temperatura (sistema de calefacción)

k_p	Conector	k_i	Conector	$u(t)$
Negativo	And	Negativo	Then	Mínimo
Negativo	And	Cero	Then	Mínimo
Negativo	And	Positivo	Then	Medio
Cero	And	Negativo	Then	Mínimo
Cero	And	Cero	Then	Mínimo
Cero	And	Positivo	Then	Máximo
Positivo	And	Negativo	Then	Medio
Positivo	And	Cero	Then	Medio
Positivo	And	Positivo	Then	Máximo

2.2.3 PI – Humedad

2.2.3.1 Enfriamiento

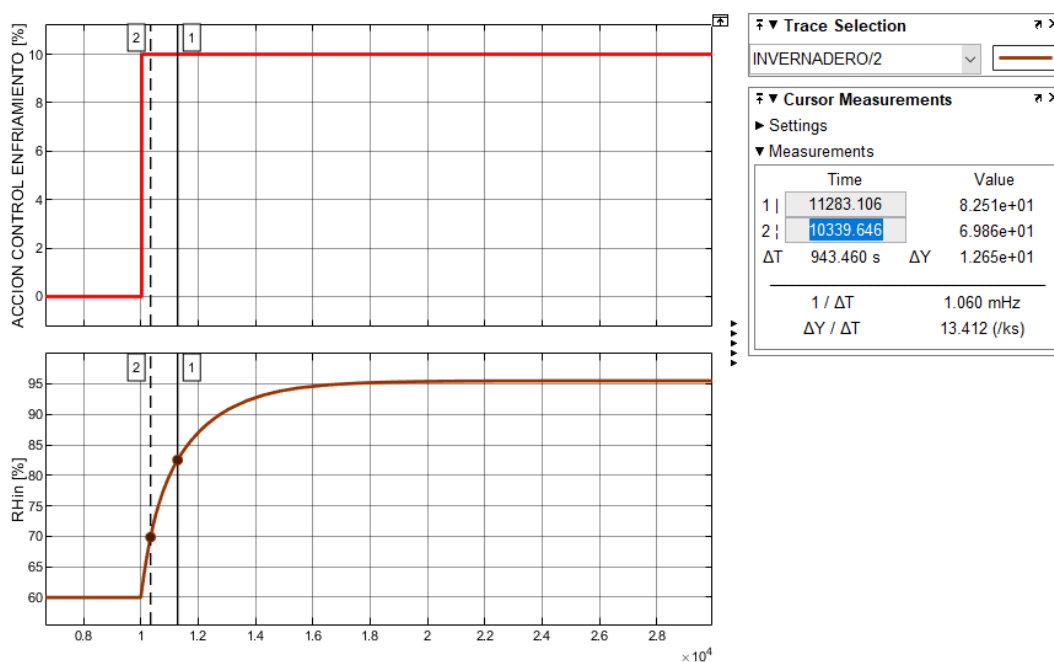


Figura 2.13 Respuesta de humedad relativa frente a entrada paso del 10%, sistema de enfriamiento.

Tabla 2.16 Valores del modelo FOPDT para control de humedad (sistema de enfriamiento)

Parámetro	Valor
K	3.554
t_0	-
τ	1415.19 s

$$G(s) = \frac{3.554}{1415.19s + 1} \quad (2.8)$$

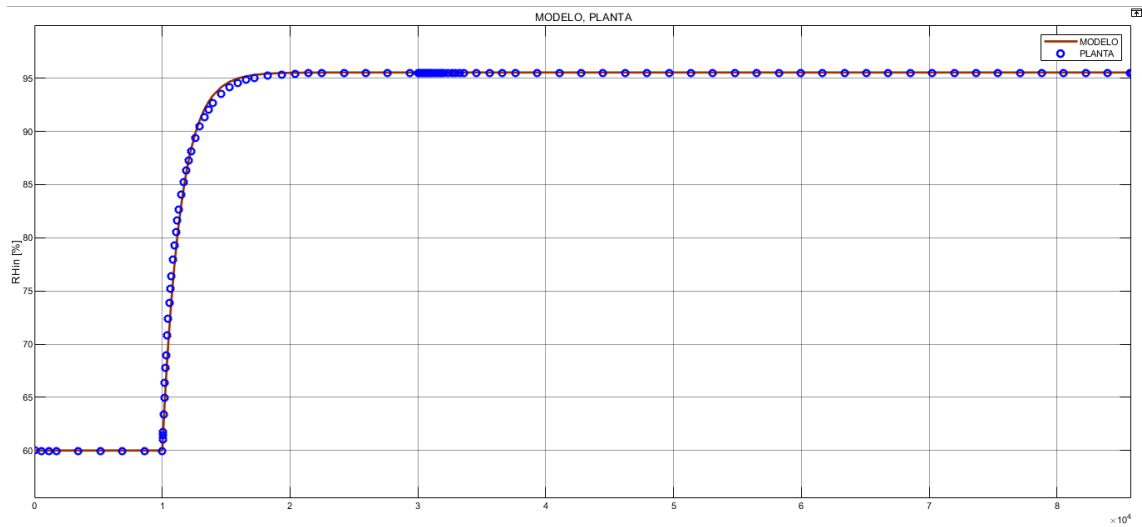


Figura 2.14 Validación del modelo FOPDT con la planta real, sistema de enfriamiento para humedad.

Se procede a calcular los parámetros del controlador PI con las ecuaciones 1.7, 1.8 y 1.9.

Tabla 2.17 Valores de los parámetros del controlador PI para control de humedad (sistema de enfriamiento)

Parámetro	Valor
τ_c	1415.19
k_c	39.8196
τ_i	1415.19

2.2.3.2 Calefacción

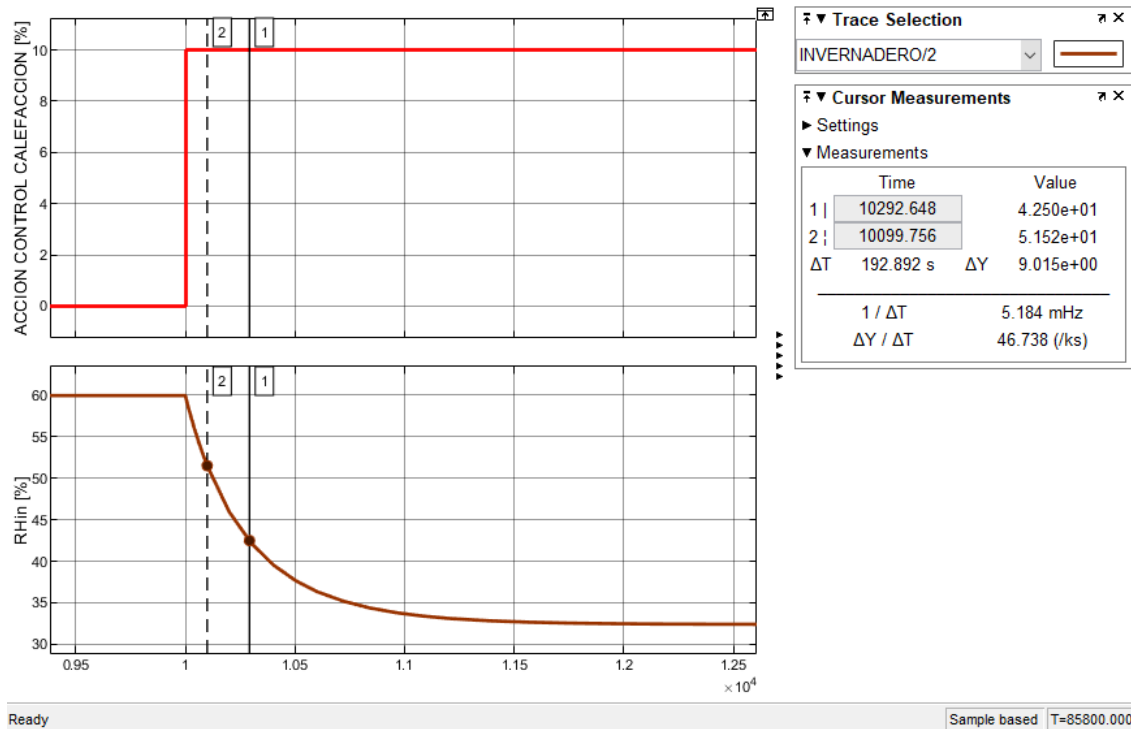


Figura 2.15 Respuesta de humedad relativa frente a entrada paso del 10%, sistema de calefacción.

Tabla 2.18 Valores del modelo FOPDT para control de humedad (sistema de calefacción)

Parámetro	Valor
K	-2.755
t_o	-
τ	289.338 s

$$G(s) = -\frac{2.755}{289.338s + 1} \quad (2.9)$$

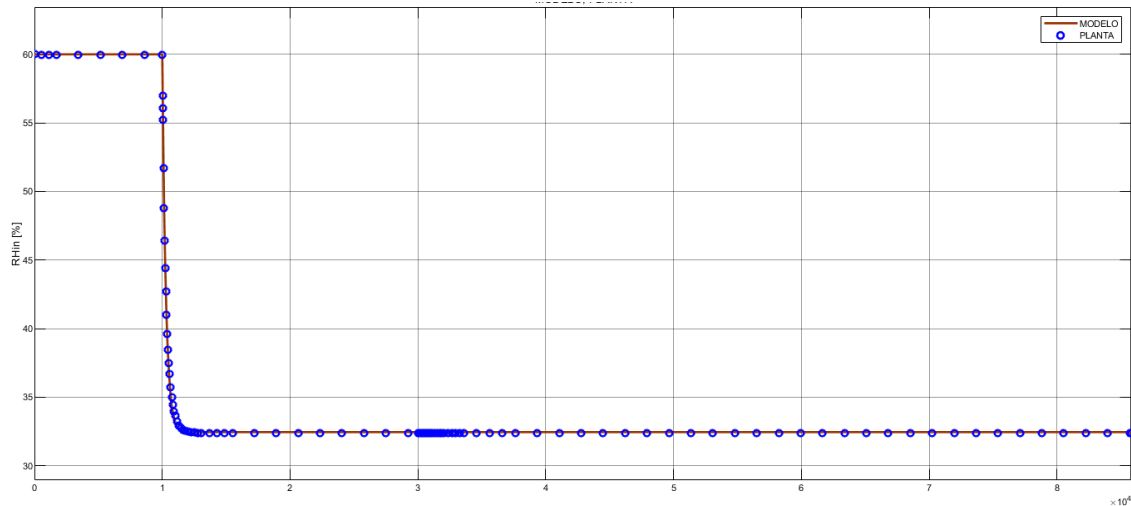


Figura 2.16 Validación del modelo FOPDT con la planta real, sistema de calefacción para humedad.

Se procede a calcular los parámetros del controlador PI con las ecuaciones 1.7, 1.8 y 1.9, cabe mencionar que en estas ecuaciones no hay tiempo muerto.

Tabla 2.19 Valores de los parámetros del controlador PI para control de humedad (sistema de calefacción)

Parámetro	Valor
τ_c	289.338
k_c	-10.5023
τ_i	289.338

2.2.4 FUZZY PI – HUMEDAD

Para la sintonización del controlador FUZZY-PI se usan los mismos valores de sintonización para el controlador PI los cuales se encuentran en las tablas 2.17 y 2.19.

2.2.4.1 Enfriamiento

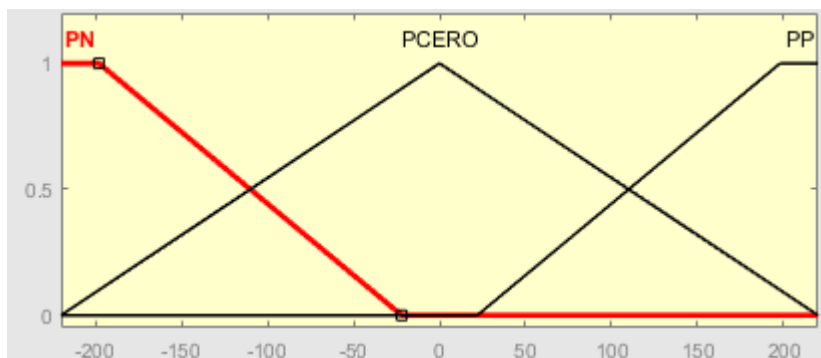


Figura 2.17 Entrada universo de discurso para k_p , humedad (enfriamiento).

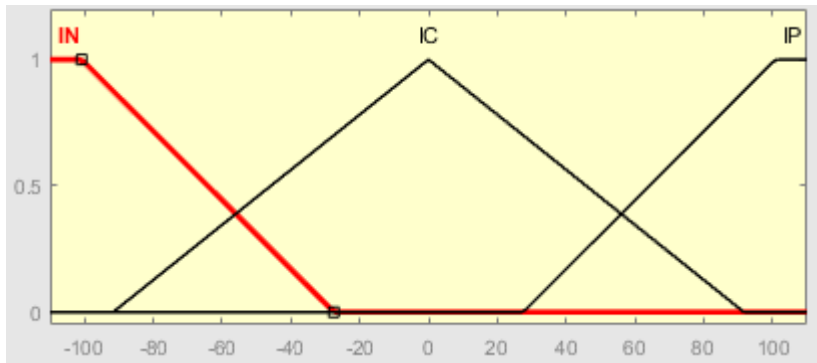


Figura 2.18 Entrada universo de discurso para k_i , humedad (enfriamiento).

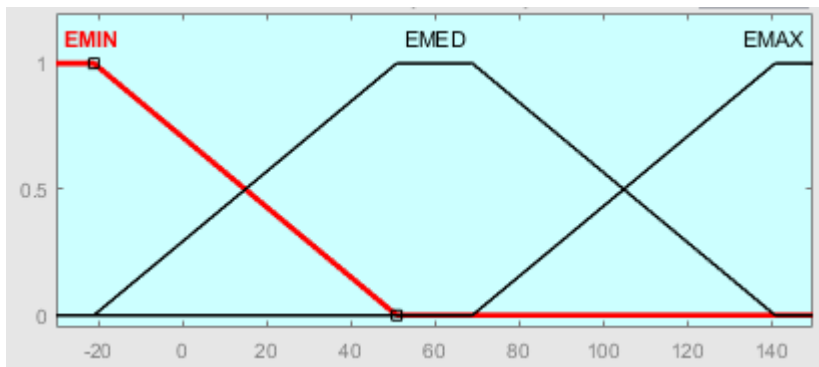


Figura 2.19 Salida universo de discurso para sistema de enfriamiento (humedad).

Tabla 2.20 Reglas de inferencia para FUZZY-PI de humedad (sistema de enfriamiento)

k_p	Conector	k_i	Conector	$u(t)$
Negativo	And	Negativo	Then	Mínimo
Negativo	And	Cero	Then	Mínimo
Negativo	And	Positivo	Then	Medio
Cero	And	Negativo	Then	Mínimo
Cero	And	Cero	Then	Mínimo
Cero	And	Positivo	Then	Máximo
Positivo	And	Negativo	Then	Mínimo
Positivo	And	Cero	Then	Medio
Positivo	And	Positivo	Then	Máximo

2.2.4.2 Calefacción

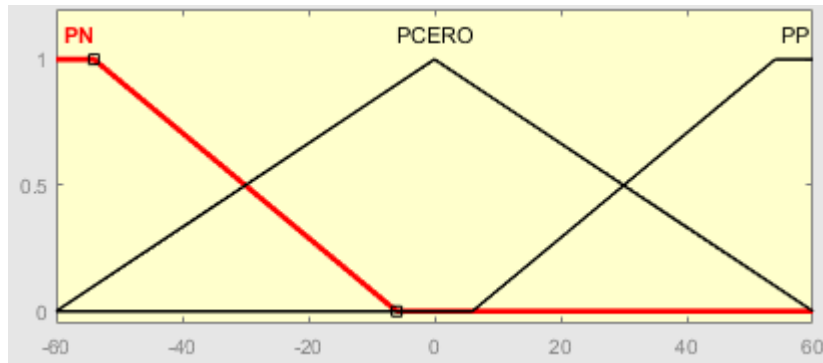


Figura 2.20 Entrada universo de discurso para k_p , humedad (calefacción).

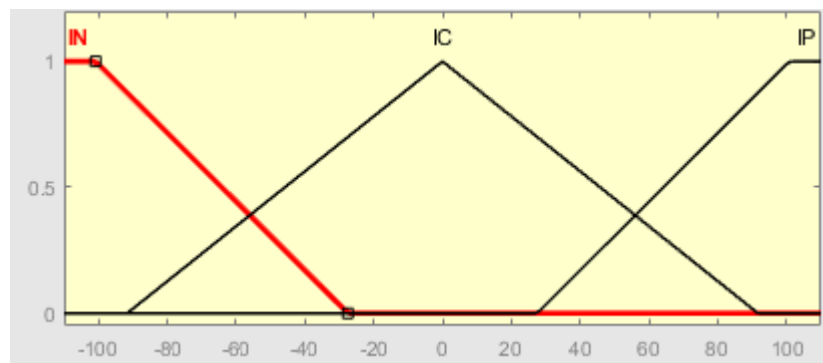


Figura 2.21 Entrada universo de discurso para k_i , humedad (calefacción).

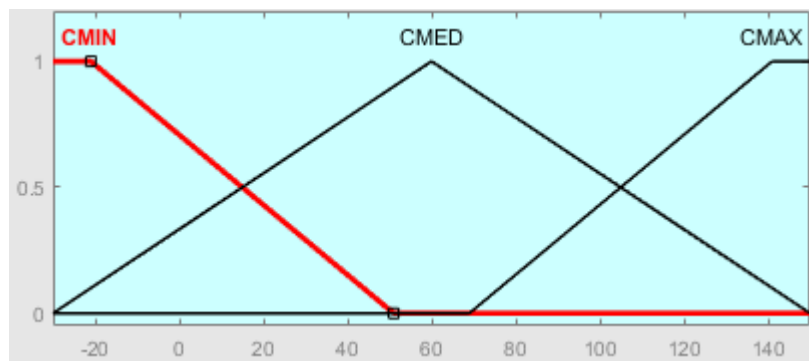


Figura 2.22 Salida universo de discurso para sistema de calefacción (humedad).

Tabla 2.21 Reglas de inferencia para FUZZY-PI de humedad (sistema de calefacción)

k_p	Conector	k_i	Conector	$u(t)$
Negativo	And	Negativo	Then	Mínimo
Negativo	And	Cero	Then	Mínimo
Negativo	And	Positivo	Then	Medio
Cero	And	Negativo	Then	Mínimo
Cero	And	Cero	Then	Mínimo
Cero	And	Positivo	Then	Máximo
Positivo	And	Negativo	Then	Mínimo
Positivo	And	Cero	Then	Medio

Positivo	And	Positivo	Then	Máximo
----------	-----	----------	------	--------

2.3 DISCRETIZACIÓN DE CONTROLADORES

En el siguiente apartado se presenta la discretización de los controladores PI y PI-FUZZY.

2.3.1 DISCRETIZACIÓN ESQUEMA PID

Para la discretización del esquema PID (ecuación 1.3) se usa el integrador discreto tipo trapezoidal para obtener la acción de control discreta:

$$s = \left[\frac{z-1}{z+1} \right] \frac{2}{T} \quad (2.10)$$

$$C(z^{-1}) = \frac{U(z^{-1})}{E(z^{-1})} = k_p + \frac{T \cdot (1+z^{-1})}{\tau_i \cdot (1-z^{-1})} + \frac{2 \cdot \tau_d}{T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) \quad (2.11)$$

Despejando la acción de control $U(z^{-1})$ de la ecuación 2.11 y transformándola a discreta $U(k)$ se obtiene la siguiente expresión:

$$U(k) = q_0 \cdot e(k) + q_1 \cdot e(k-1) + q_2 \cdot e(k-2) + u(k-1) \quad (2.12)$$

Donde:

$$q_0 = \frac{2 * T * k_p + \frac{T^2}{\tau_i} + 2 * \tau_d}{2 * T} \quad (2.13)$$

$$q_1 = \frac{-2 * T * k_p + \frac{T^2}{\tau_i} - 4 * \tau_d}{2 * T} \quad (2.14)$$

$$q_2 = \frac{\tau_d}{T} \quad (2.15)$$

2.3.2 DISCRETIZACIÓN ESQUEMA PI

Para la discretización del esquema PI se realiza por separado, es decir por un lado la parte proporcional y por otro lado la parte integral, esto debido a que los dos parámetros del controlador PI son entradas para el control FUZZY.

$$UP(k) = k_p * e(k) \quad (2.13)$$

$$UI(k) = \frac{T}{\tau_i} * e(k - 1) + u(k - 1) \quad (2.13)$$

2.4 COMUNICACIÓN SIMULINK - ARDUINO

En este apartado se presenta la configuración para establecer la comunicación serial entre la tarjeta embebida Arduino Mega 2560 y Simulink de MatLab.

2.4.1 Recepción de datos en Arduino

La función para la recepción de datos en Arduino es “Serial.parseFloat”, esta función permite la lectura de datos de tipo flotante. La figura 2.23 muestra la configuración para la recepción del valor de referencia de temperatura y temperatura dentro del invernadero provenientes de Simulink.

```
T_in=Serial.parseFloat();
Ref=Serial.parseFloat();
```

Figura 2.23 Función “Serial.parseFloat” para recepción de datos en Arduino.

2.4.2 Envío de datos hacia Simulink

Para el envío de datos desde Arduino hacia Simulink se hace uso de la función “Serial.print” y “Serial.println”.

En la figura 2.24 se puede observar que se envía la acción de control de enfriamiento (ue), posteriormente se separa el dato para enviar la acción de control de calefacción(uc), se separa el dato para enviar el error (et) y pasar a una siguiente línea.

```
Serial.print(ue);
Serial.print(',');
Serial.print(uc);
Serial.print(',');
Serial.println(et);
```

Figura 2.24 Función “Serial.print” y “Serial.println” para recepción de datos en Arduino.

2.4.3 Recepción de datos en Simulink de MatLab

Para la recepción de datos desde Simulink a Arduino es necesario instalar la librería “Instrument Control Box” la cual ofrece bloques para establecer comunicación con distintos dispositivos.

Para la recepción de datos en Simulink es necesario el bloque “Query instrument” [13], adicional es necesario el bloque “Transpose” ya que los datos que vienen desde la tarjeta embebida necesitan ser transpuestos, el bloque “Demux” para separar los datos y el bloque “Zero-Older Holder” que retiene el último valor recibido por cierto tiempo.

<https://la.mathworks.com/help/instrument/toinstrument.html#:~:text=The%20To%20Instrument%20block%20configures,block%20has%20no%20output%20ports.>

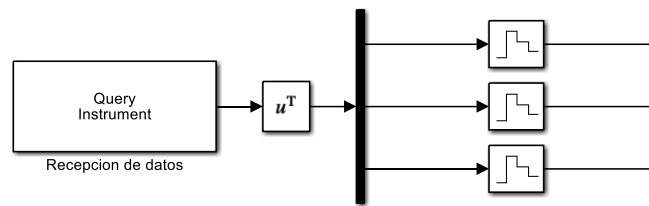


Figura 2.25 Estructura para recepción de datos en Simulink.

Adicional a la estructura para la recepción de datos es importante configurar ciertos parámetros dentro del bloque “Query instrument”.

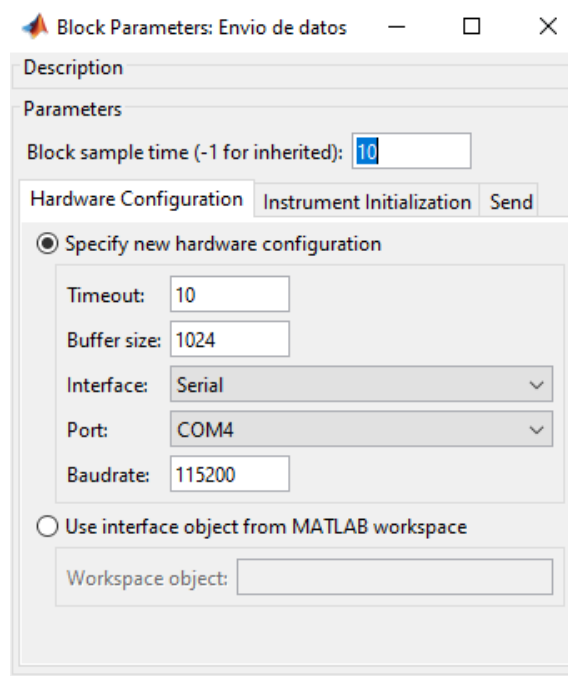


Figura 2.26 Parámetros del bloque “Query instrument”, pestaña “Hardware Configuration”.

- a) Block sample time: tiempo de muestreo.
- b) Timeout: tiempo de espera para completar la operación.
- c) Buffer size: número total de bytes que se pueden almacenar en el búfer.
- d) Interface: tipo de interfaz.
- e) Port: puerto para la interfaz serial.
- f) Baudrate: velocidad a la que se transmiten los bits para la interfaz.

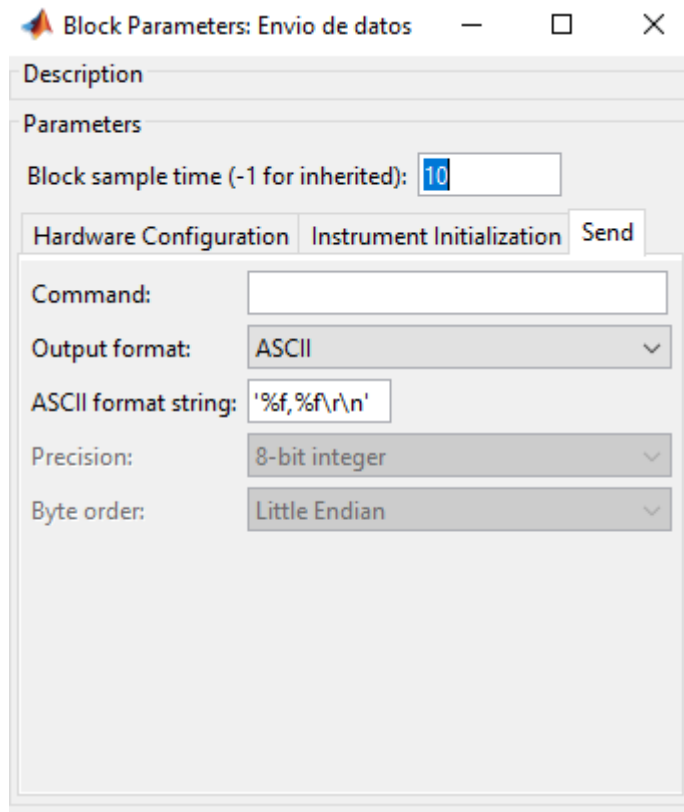


Figura 2.27 Parámetros del bloque “Query instrument”, pestaña “Send”.

En los parámetros que se muestran en la figura 2.27 se muestra la configuración del tipo de formato del dato que se va a enviar que en este caso es ASCII y el tipo de estructura.

2.4.4 Envío de datos hacia Arduino

Para el envío de datos es necesario el bloque “To Instrument” el cual se encuentra en la librería “Instrument Control Box”, si observamos la figura 2.28 se presencia un “Mux” el cual es necesario cuando se quiere enviar dos o más datos.

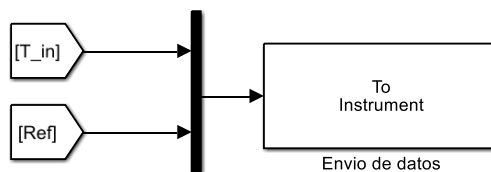


Figura 2.28 Estructura para el envío de datos desde Simulink hacia la tarjeta embebida.

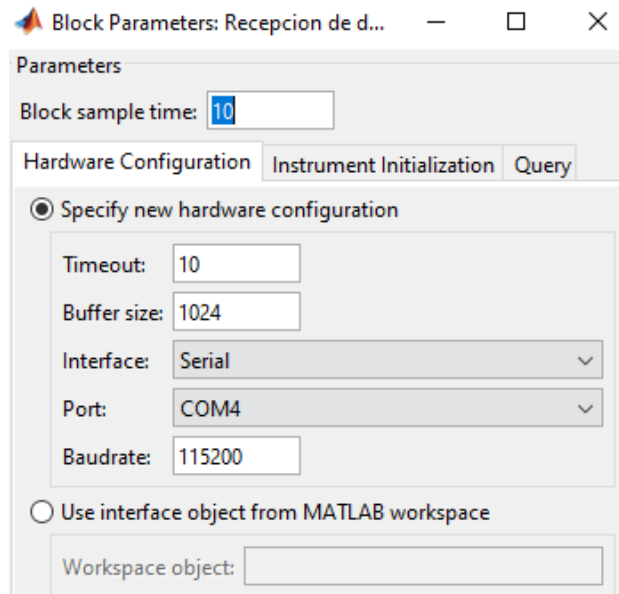


Figura 2.29 Parámetros del bloque “To instrument”, pestaña “Hardware Configuration”.

La pestaña “Hardware Configuration” del bloque “To instrument” cuenta con los mismo parámetros de la figura 2.27, es importante que los dos bloques tengan las mismas configuraciones.

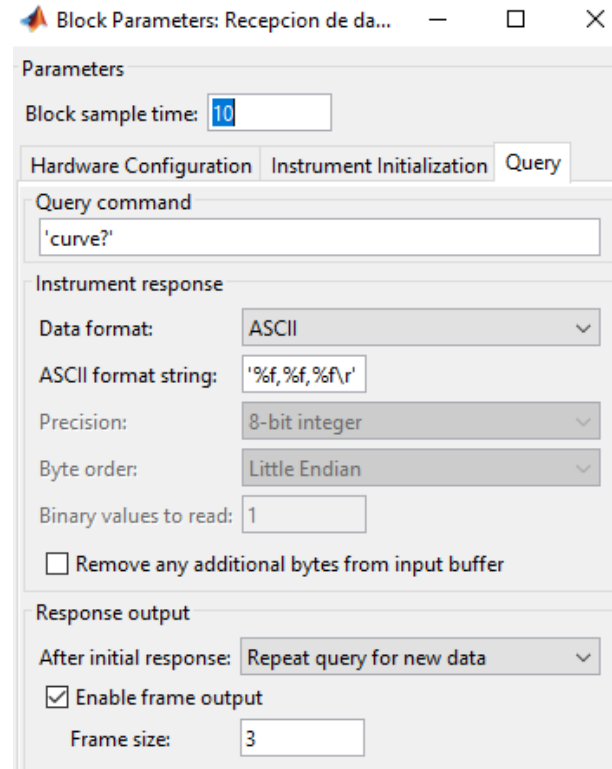


Figura 2.29 Parámetros del bloque “To instrument”, pestaña “Query”.

En los parámetros que se muestran en la figura 2.29 es importante configurar el tipo de formato del dato que se va a recibir que en este caso es ASCII, el tipo de estructura y el tamaño del vector.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se expone la implementación de los dos controladores en la tarjeta embebida, se muestra las respuestas de temperatura y humedad del invernadero y las acciones de control de cada controlador.

Además, se presenta los valores de los índices de desempeño ISCO e ISE, para la implementación bajo el concepto “Hardware in the Loop”, se hace uso de la tarjeta embebida Arduino Mega 2560.

3.1 Resultados implementación “Hardware in the Loop”

3.1.1 Resultados ante perturbaciones.

Para las perturbaciones se han hecho uso de los datos facilitados por Ph. D. Ramon E. Jaimez del cual se han tomado 3 días que corresponden a un día normal como se observa Figura 3.1, un día con menor temperatura externa como se observa en la Figura 3.2 y un día con mayor radiación externa como se observa en la Figura 3.3. Las perturbaciones son temperatura, radiación solar y humedad externas las cuales empiezan a las 5:00 am del día correspondiente y termina a las 5:00 am del siguiente día.

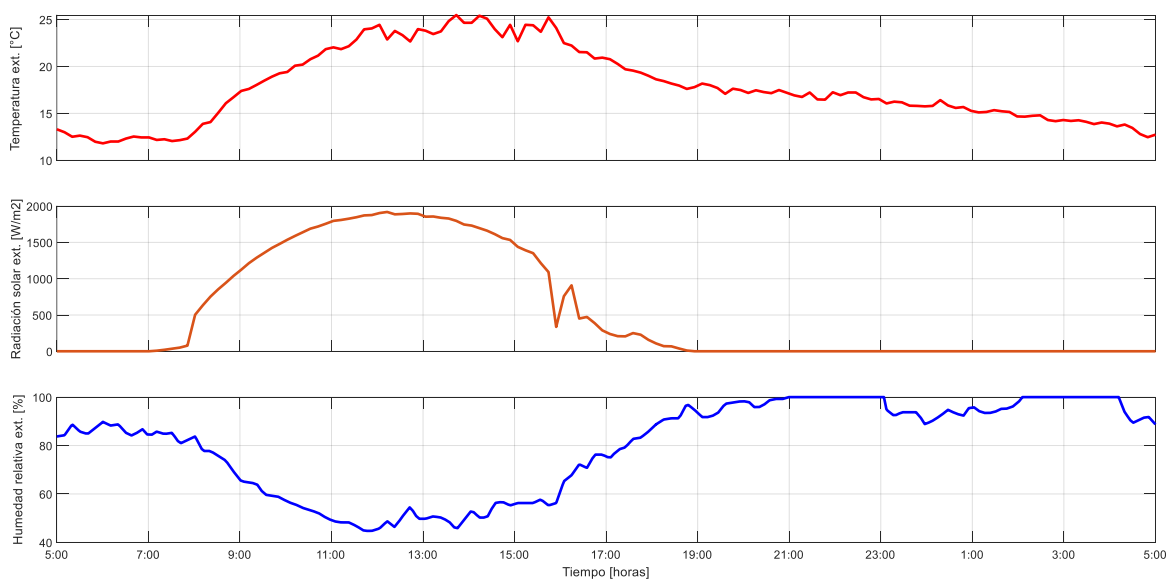


Figura 3.1 Perturbaciones correspondientes a un día normal.

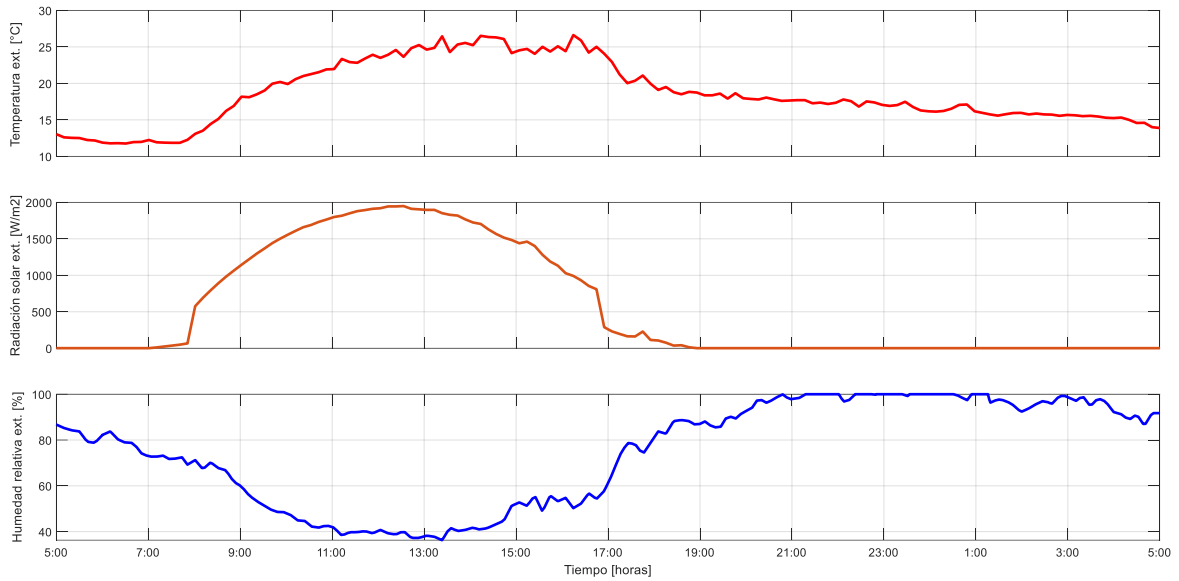


Figura 3.2 Perturbaciones correspondientes a un día de menor temperatura externa.

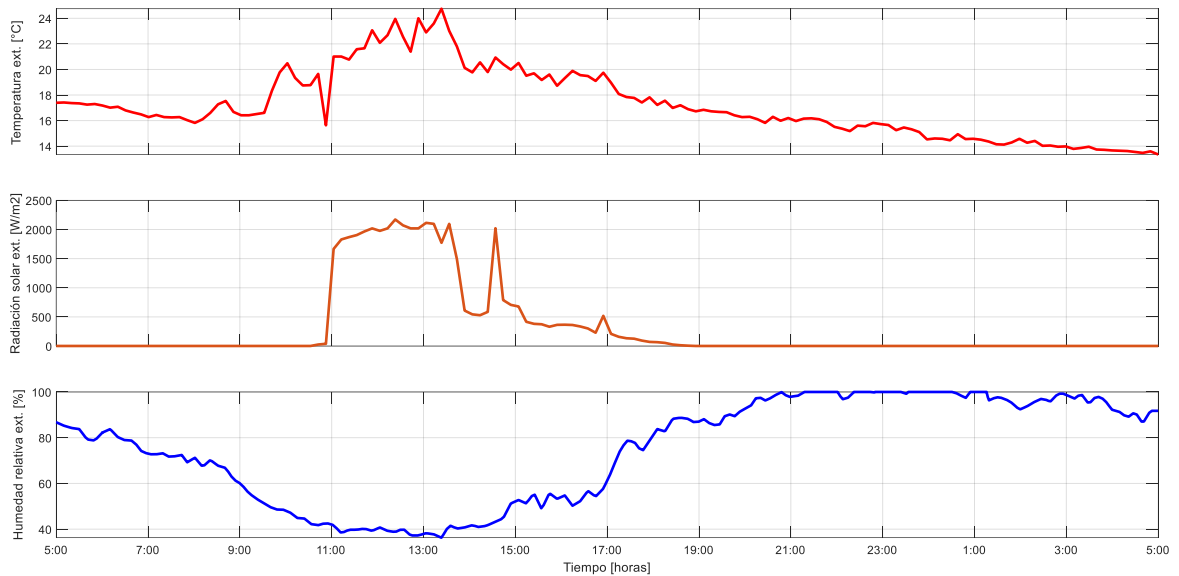


Figura 3.3 Perturbaciones correspondientes a un día con mayor radiación externa.

3.1.1.1 Respuesta de temperatura y acción de control del esquema PID.

Se ha tomado como referencia una plantación de limón pèrsico la cual establece que la temperatura óptima para su crecimiento va de 22 grados centígrados a 28 grados centígrados con límite mínimo de 17.6 grados centígrados y límite máximo de 38.6 grados centígrados. [11]

Es por esto que los valores de referencia se establecen de 22 grados centígrados por la mañana (6:00 a 18:00 horas) mientras que por la noche (18:00 a 6:00 horas) se establece 28 grados centígrados.

Una vez definidas las perturbaciones y referencia se puede apreciar la respuesta de temperatura del controlador PID en la Figura 3.4 para la perturbación de un día normal, el controlador alcanza el valor de referencia y presenta buen desempeño frente a las perturbaciones.

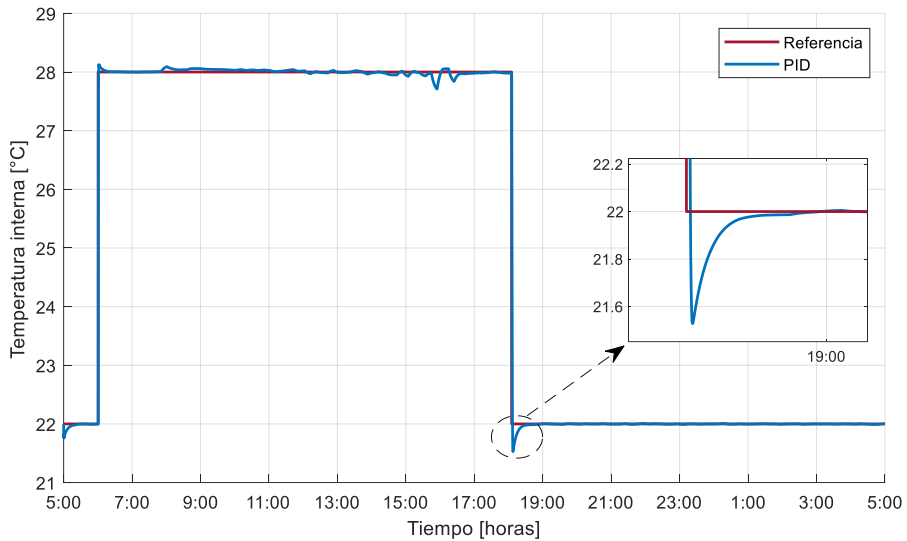
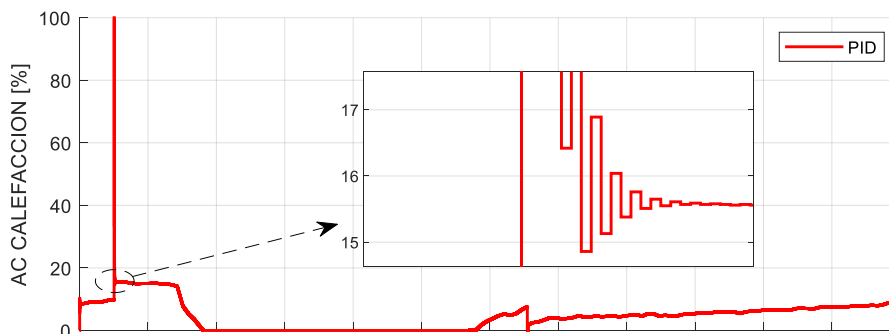


Figura 3.4 Respuesta del controlador PID frente a la perturbación de un día normal

Analizando a detenimiento la Figura 3.4 se observa que presenta sobre picos de temperatura siendo el más representativo del 2.146 % con un tiempo de establecimiento de 24.92 minutos.



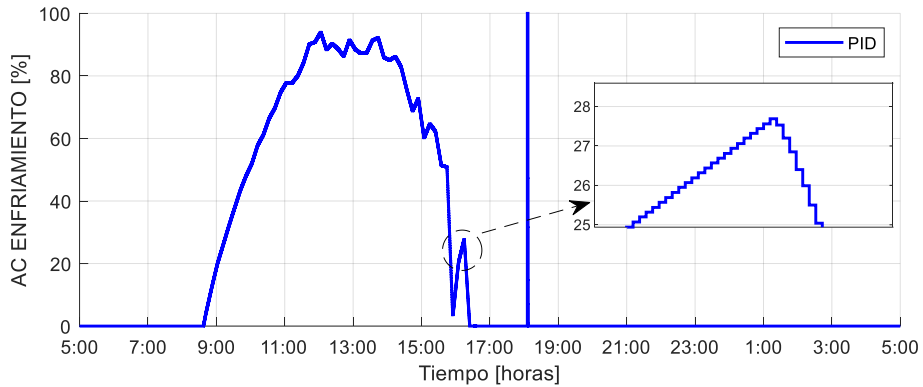


Figura 3.5 Acción de control de calefacción y enfriamiento del esquema PID para la perturbación de un día normal

Analizando la Figura 3.5 se percibe cambios bruscos en las acciones de control, en el caso de la acción de control de calefacción el cambio es de 15.5% a 100% a las 6:00 horas es el momento en que cambia el nivel de referencia a 28 grados centígrados, por otro lado, en el caso de la acción de control de enfriamiento el cambio es de 0% a 100% a las 18:00 horas es el momento en que cambia el nivel de referencia a 22 grados centígrados. Estos cambios bruscos afectan negativamente al elemento final de control.

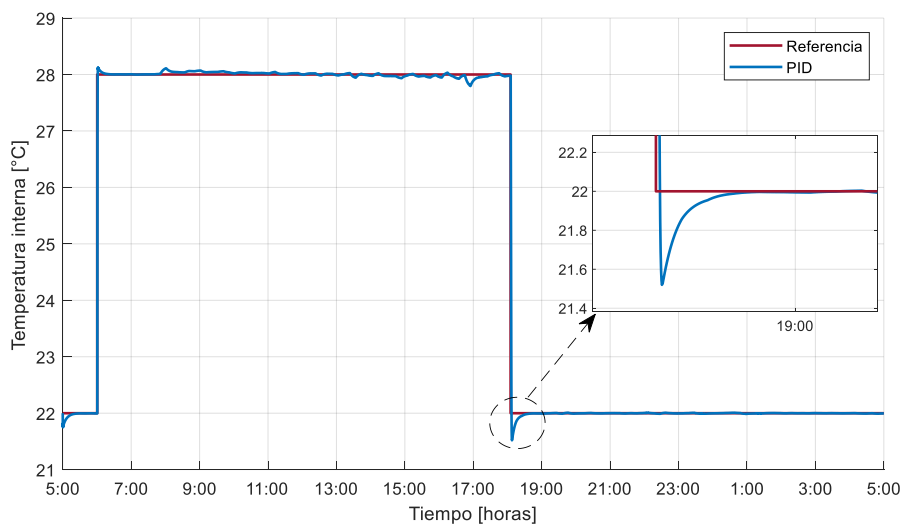


Figura 3.6 Respuesta del controlador PID frente a la perturbación de un día con menor temperatura externa

En la figura 3.6 se observa la respuesta de temperatura del controlador PID para la perturbación de un día con menor temperatura externa, el controlador es robusto frente a las perturbaciones y alcanza los dos niveles de referencia. El sobre pico más representativo es del 0.5% y presenta un tiempo de establecimiento de 24.418 minutos.

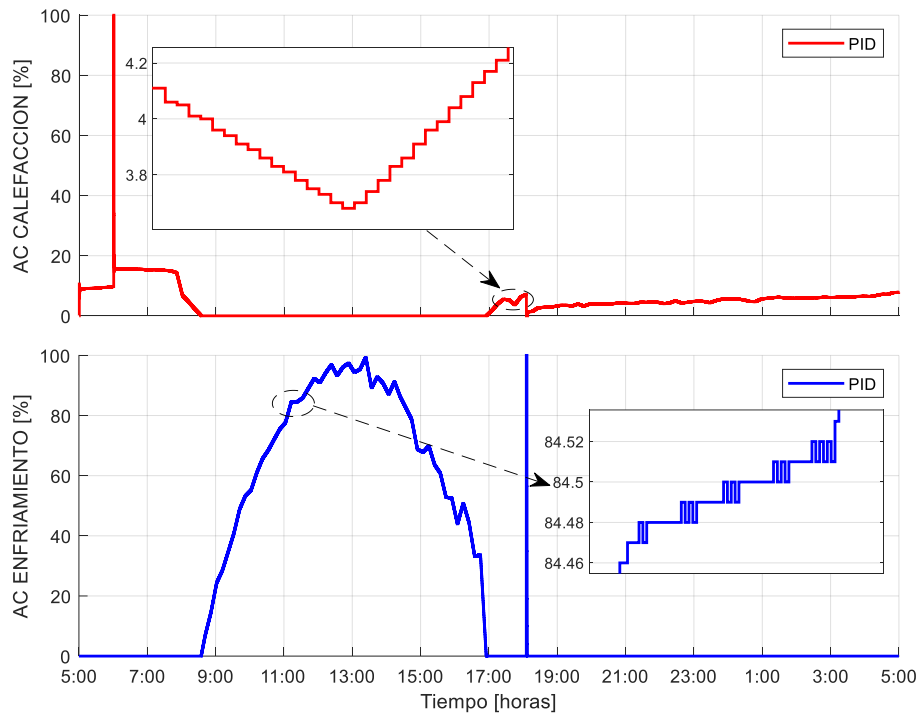


Figura 3.7 Acción de control de calefacción y enfriamiento del esquema PID para la perturbación de un día con menor temperatura externa

En la Figura 3.7 se aprecia las acciones de control del esquema PID tanto de calefacción como enfriamiento para la perturbación de un día con menor temperatura externa, el comportamiento es similar al de la Figura 3.5 dónde los cambios bruscos ocurren en los cambios de referencia.

En el caso de la perturbación del día con mayor radiación solar externa los sobre picos son más representativos como se observa en la Figura 3.8 a comparación con las respuestas de las diferentes perturbaciones.

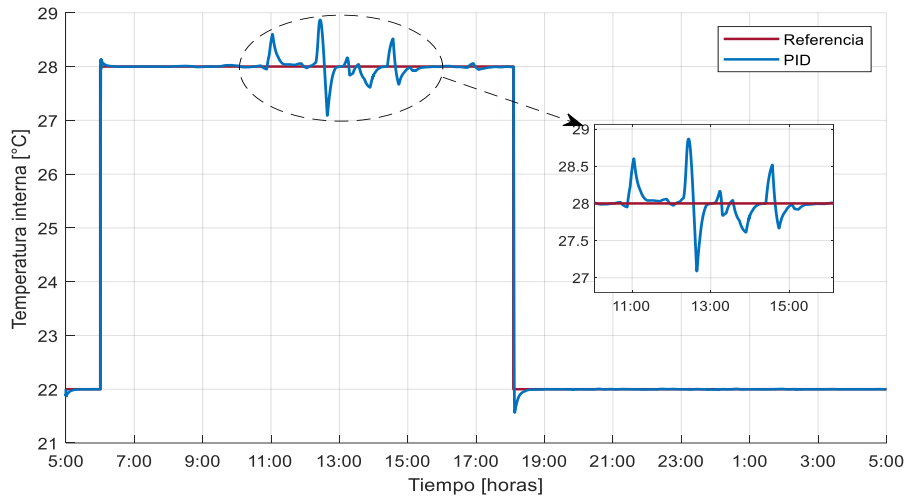
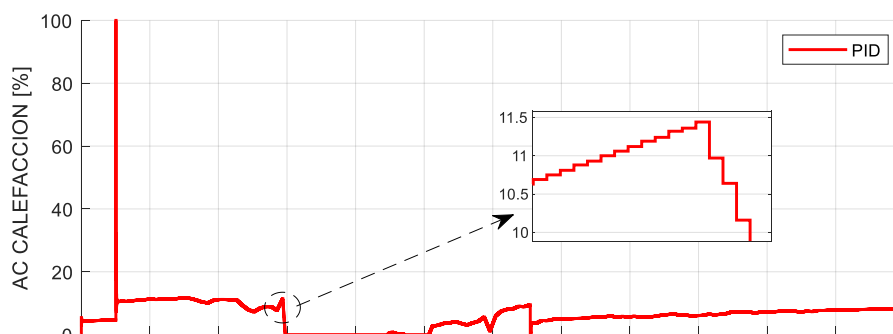


Figura 3.8 Respuesta del controlador PID frente a la perturbación de un día con mayor radiación solar externa.

En la Figura 3.8 se observa una serie de sobre picos la cual empieza un poco antes de las 11:00 horas, es importante mencionar que la radiación solar en las dos anteriores perturbaciones no superaba los 2000 [W/m²] mientras que en este caso se alcanza hasta los 2200 [W/m²], el sobre pico mas representativo en la respuesta de la Figura 3.8 es de 3.255% con un tiempo de establecimiento de 57.56 [min].



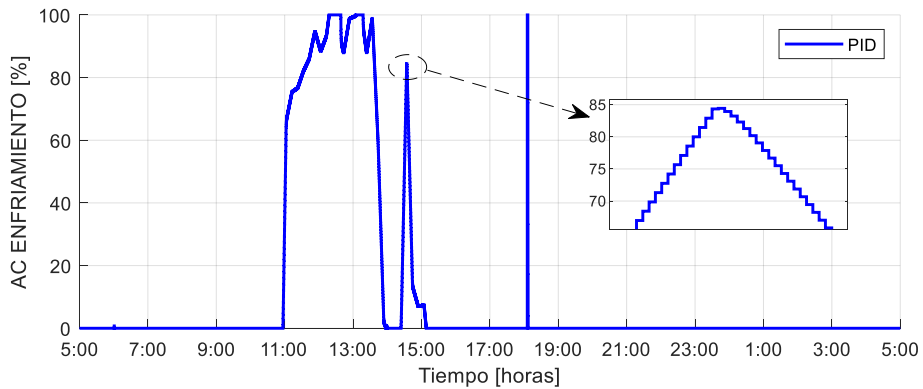


Figura 3.9 Acción de control de calefacción y enfriamiento del esquema PID para la perturbación de un día con mayor radiación solar externa

En cuanto a las acciones de control de la Figura 3.9 se observa los mismos cambios bruscos de las Figuras 3.5 y 3.7, si bien es cierto los sobre picos son más representativos esta no supera el 4%.

3.1.1.2 Respuesta de temperatura y acción de control del esquema PI-FUZZY.

La Figura 3.10 presenta la respuesta de temperatura del esquema de control PI-FUZZY frente a la perturbación de un día normal.

Esta respuesta presenta oscilaciones y más cantidad de sobre picos comparándolo con el esquema PID, el sobre pico más representativo es del 15.82% con un tiempo de establecimiento de 65.433 minutos.

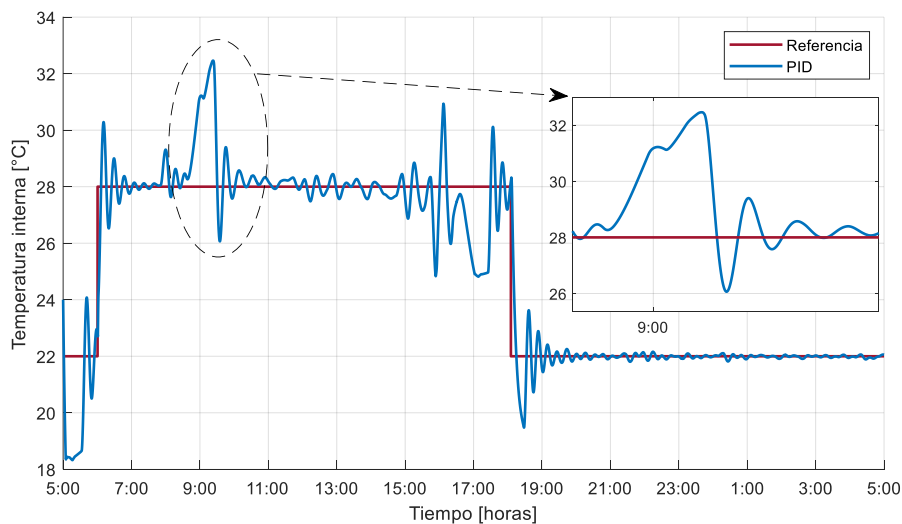


Figura 3.10 Respuesta del controlador PI-FUZZY frente a la perturbación de un día normal

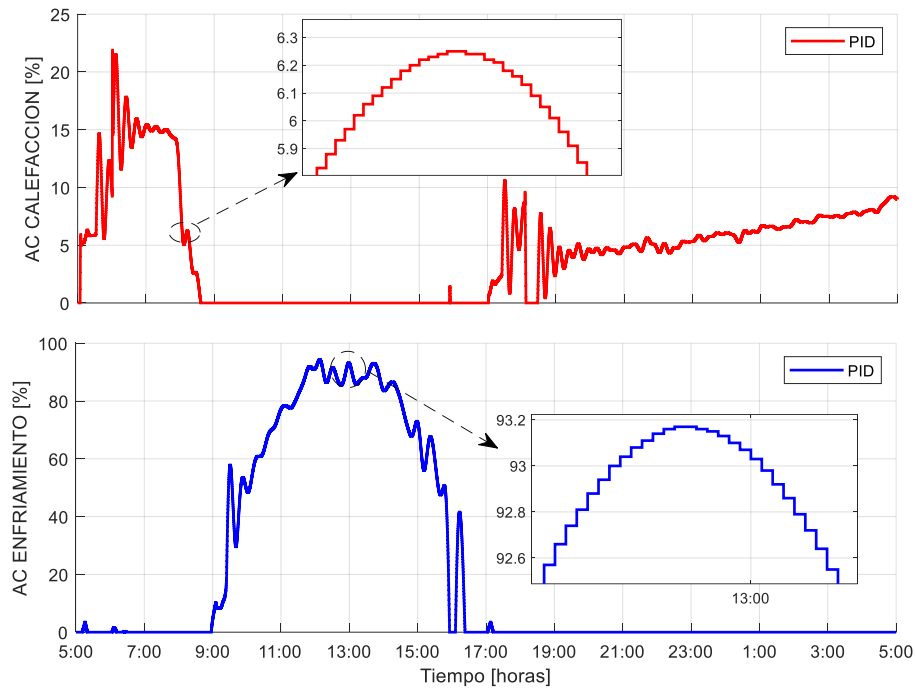


Figura 3.11 Acción de control de calefacción y enfriamiento del esquema PI-FUZZY para la perturbación de un día normal

Si analizamos las acciones de control de la Figura 3.11 las cuales corresponden a la respuesta de un día normal, éstas ya no presentan los cambios bruscos de las acciones de control presentes en las Figuras 3.5, 3.7 y 3.9 lo cual es favorable para el elemento final de control ya que alarga su vida útil, sin embargo, se sacrifica la pronta respuesta del controlador.

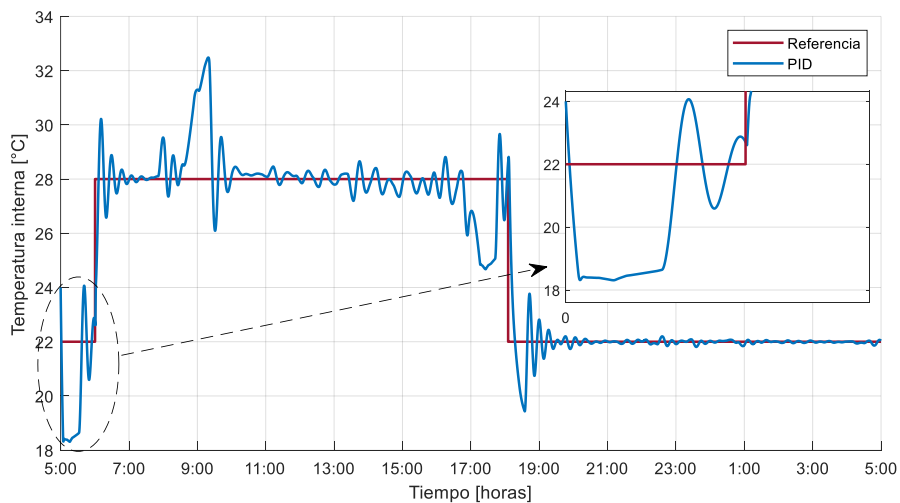


Figura 3.12 Respuesta del controlador PI-FUZZY frente a la perturbación de un día con menor temperatura externa

La Figura 3.12 presenta la respuesta de temperatura del esquema de control PI-FUZZY frente a la perturbación de un día con menor temperatura externa, el comportamiento es similar a la respuesta con perturbación de un día normal, el máximo sobre pico que presenta es 16.72% con un tiempo de establecimiento de 69.83 minutos.

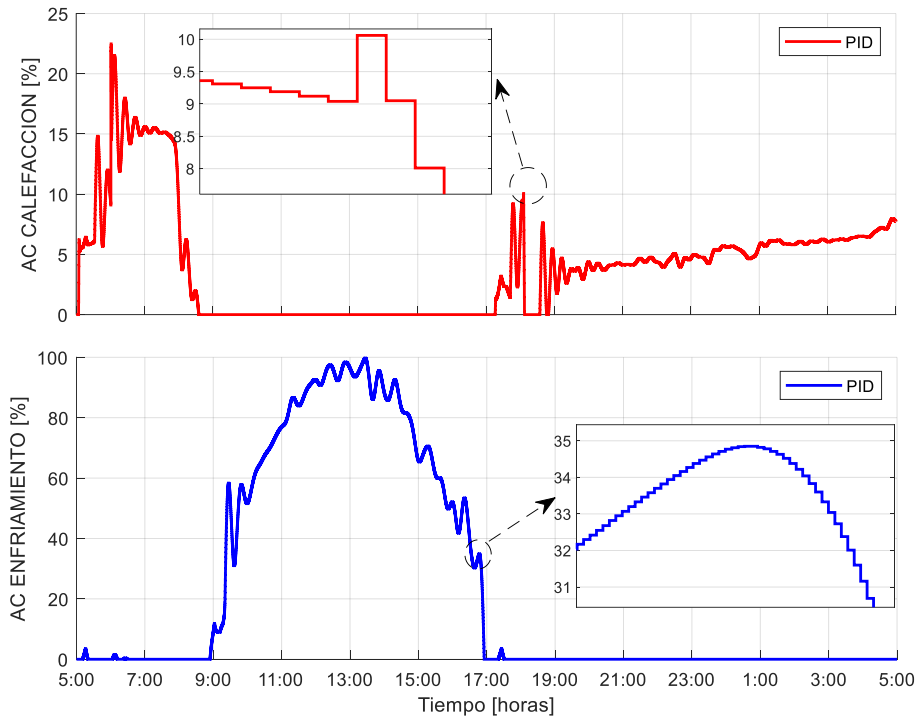


Figura 3.13 Acción de control de calefacción y enfriamiento del esquema PI-FUZZY para la perturbación de un día con menor temperatura externa

Las acciones de control de la Figura 3.13 son similares al de la Figura 3.11 recalcando una vez mas que se sacrifica el tiempo de respuesta del controlador a cambio de acciones de control más suaves sin cambios bruscos.

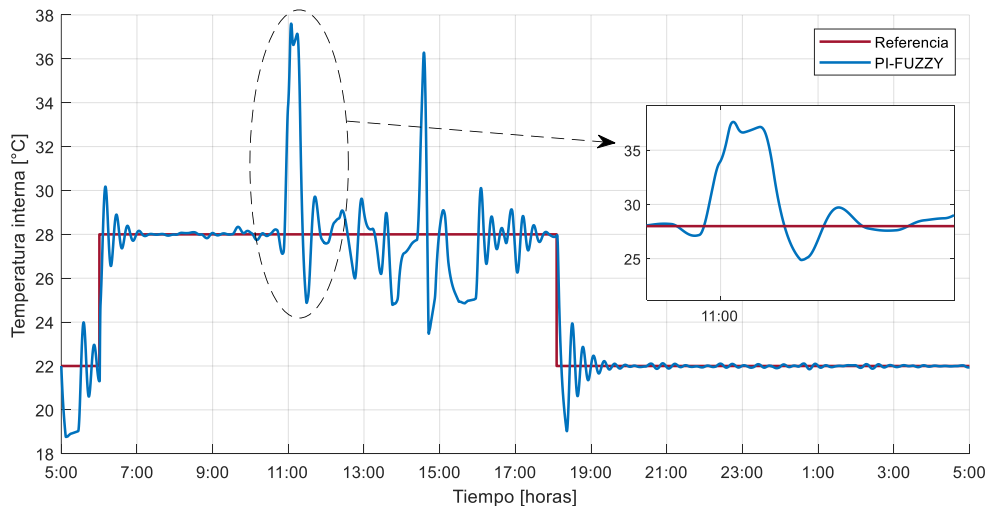


Figura 3.14 Respuesta del controlador PI-FUZZY frente a la perturbación de un día con mayor radiación solar externa.

Observando en detenimiento la Figura 3.14 se observa que la respuesta presenta sobre picos más agresivos siendo el más representativo (34.304%) un poco antes de las 11:00 horas dado que la radiación solar externa supera los 2000 W/m² las cuales no sucede en las demás respuestas, el tiempo de establecimiento es de 57.56 minutos.

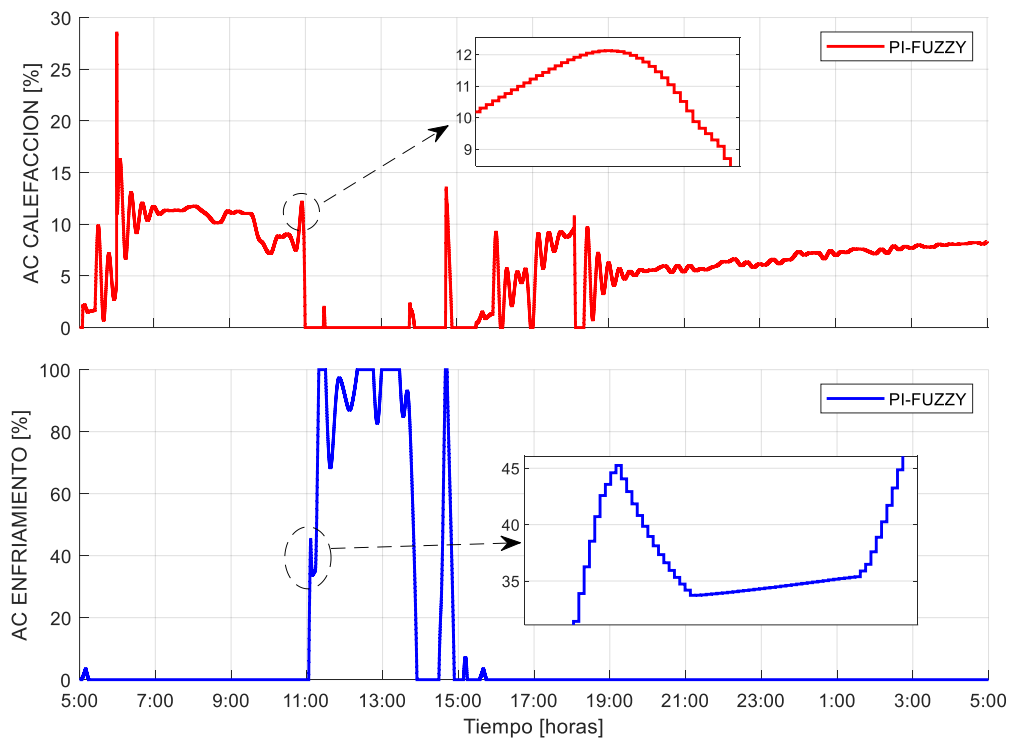


Figura 3.15 Acción de control de calefacción y enfriamiento del esquema PI-FUZZY para la perturbación de un día con mayor radiación solar externa

Analizando la Figura 3.15 se puede observar que hay un cambio inmediato del 10% en la acción de control de calefacción a las 6:00 horas el cuál no se clasificaría como “brusco” si se compara con las acciones de control de temperatura del esquema PID que son del 85% en el caso de calefacción y del 100% en el caso de enfriamiento.

A continuación, se muestra la Tabla 3.1 con los valores de máximo sobre pico (Mp) y tiempo de establecimiento (Tm) para los dos esquemas de control de temperatura frente a las tres perturbaciones.

Tabla 3.1. Máximo sobre pico (Mp) y tiempo de establecimiento (ts) para control de temperatura

Perturbación	Esquema	Mp [%]	Ts [min]
Normal	PID	2.146	24.92
	PI-FUZZY	15.82	65.433
Menor temperatura externa	PID	2.183	24.418
	PI-FUZZY	16.72	69.83
Mayor radiación externa	PID	3.255	27.33
	PI-FUZZY	34.304	57.56

Si bien es cierto el controlador PI-FUZZY presenta elevados sobre picos es importante mencionar que se encuentra dentro de los límites máximo y mínimo de temperatura para el cultivo de limón pérsico.

Independientemente de cuál sea la perturbación el controlador que mejor se desempeña es el esquema PID ya que no presenta oscilaciones sin embargo presenta cambios bruscos en las acciones de control lo cual es perjudicial para el elemento final de control, frente a esto el esquema PI-FUZZY se desempeña de mejor manera al suprimir los cambios bruscos, aunque se sacrifique el tiempo de respuesta.

Con lo antes mencionado no es suficiente para decidirse por un controlador por lo que se propone un análisis de los índices de desempeño ISCO e ISE.

3.1.1.3 Índices de desempeño para control de temperatura

La Tabla 3.2 presenta los índices de desempeño del control de temperatura para el controlador PID y PI-FUZZY frente a las tres perturbaciones.

Tabla 3.2 Índices de desempeño para control de temperatura

Perturbación	Esquema	ISCO ENFRIAMIENTO	ISCO CALEFACCIÓN	ISE
Normal	PID	1.702e08	2.886e07	1685
	PI-FUZZY	1.349e08	3.443e06	94660
	PID	1.89e08	3.208e07	1694

Menor temperatura externa	PI-FUZZY	1.554e08	3.807e06	93730
Mayor radiación externa	PID	1.511e08	2.568e07	2543
	PI-FUZZY	1.437e08	4.124e06	187200

Si observamos los valores de los índices de desempeño ISCO el controlador PI-FUZZY es menor a comparación con el PID siendo el que mejor se desempeña teniendo en cuenta solo éste índice, por otro lado, si analizamos los índices ISE el controlador PI-FUZZY presenta una estabilidad débil ya que hay una gran diferencia de este índice a comparación del controlador PID.

Es importante mencionar que los sobre picos de temperatura de ambos controladores están dentro de los límites máximos y mínimos para el cultivo exitoso del limón persa.

Con respecto a los índices ISCO e ISE el controlador que más ventajas presenta para el control de temperatura es el PI-FUZZY teniendo en cuenta los límites de temperatura para el adecuado cultivo y con el fin de preservar el elemento final de control.

3.1.1.4 Respuesta de humedad y acción de control del esquema PI.

La humedad relativa es de suma importancia en el cultivo de limón pérsico ya que esta determina la calidad de la fruta en las que interviene la jugosidad, una cáscara suave y delgada. Por lo que el rango adecuado está entre 40% y 70%. [12]

Con el fin de observar el desempeño de los esquemas de control se establece dos niveles de referencia, de 13:00 a 16:00 horas una referencia del 55% mientras que de 16:00 a 13:00 horas del siguiente día una referencia del 60%.

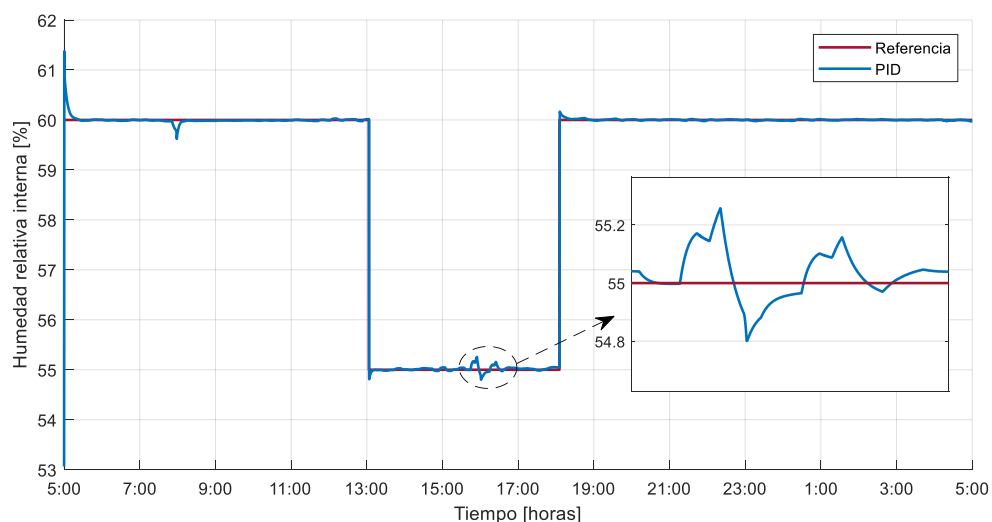


Figura 3.16 Respuesta del controlador PI frente a la perturbación de un día normal

La Figura 3.16 presenta la respuesta de humedad relativa del esquema de control PI frente a la perturbación de un día normal, la respuesta es bastante aceptable con un máximo sobre pico de 0.632% y un tiempo de establecimiento de 14.97 minutos.

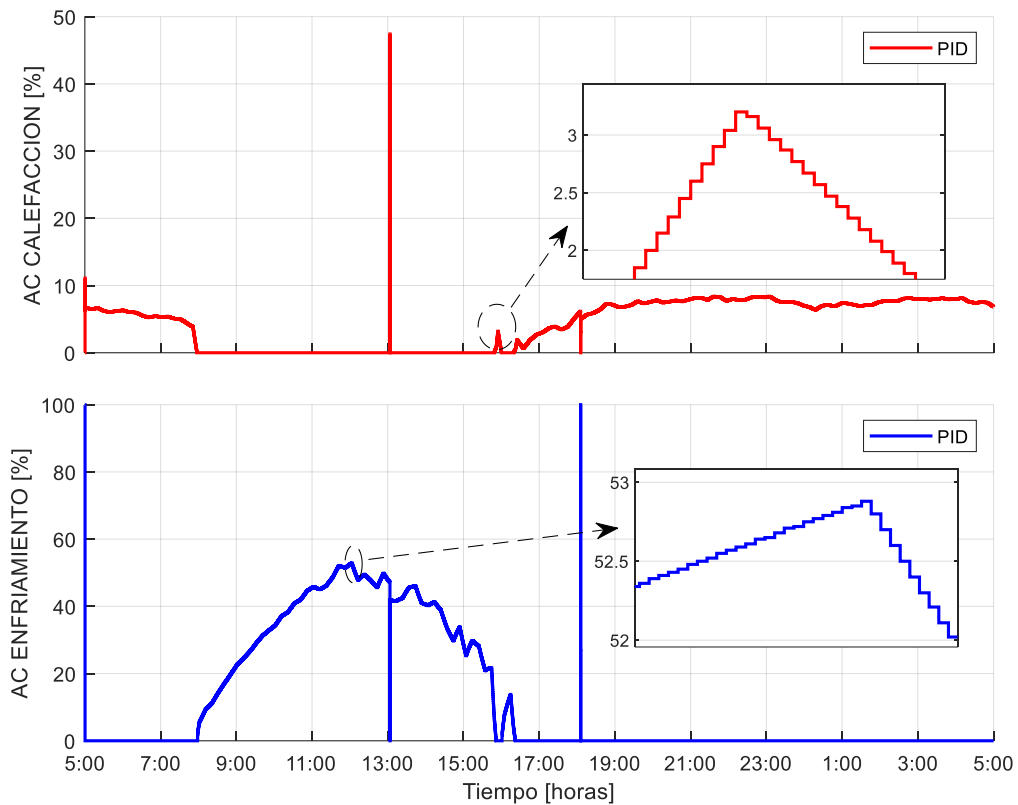


Figura 3.17 Acción de control de calefacción y enfriamiento del esquema PI para la perturbación de un día normal

Analizando la Figura 3.17 se puede observar que hay cambios bruscos en las acciones de control, en el caso de la acción de control de calefacción se produce a las 13:00 horas en el momento del cambio de referencia, tal cual sucede en la acción de control de enfriamiento en el inicio de simulación y a las 16:00 horas en el cambio de referencia.

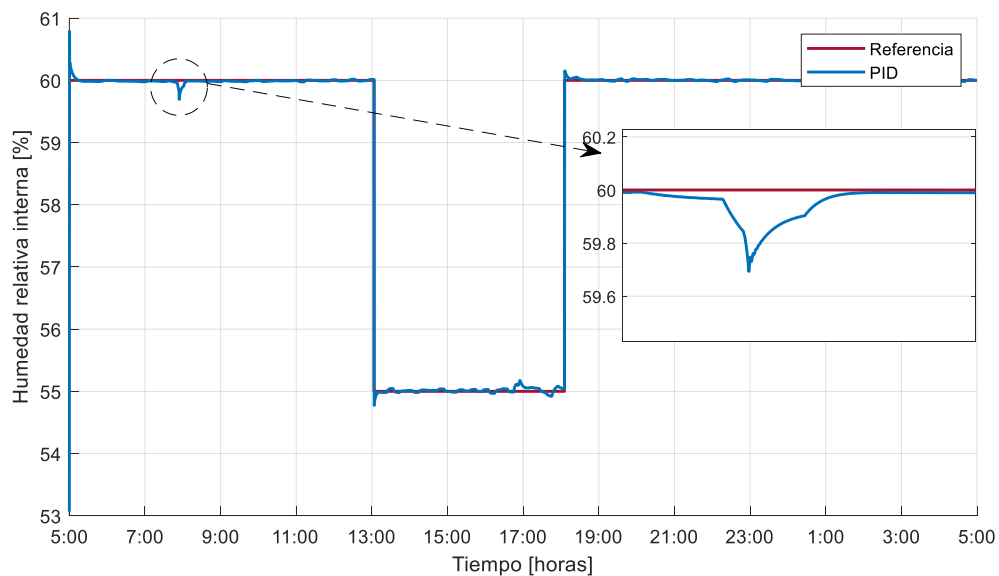


Figura 3.18 Respuesta del controlador PI frente a la perturbación de un día con menor temperatura externa

La respuesta de la Figura 3.18 es similar al de la figura 3.17 dado que las perturbaciones correspondientes a los días normal y menor temperatura externa no difieren representativamente, el máximo sobre pico que presenta es de 0.5% y el tiempo de establecimiento de 9.65 minutos.

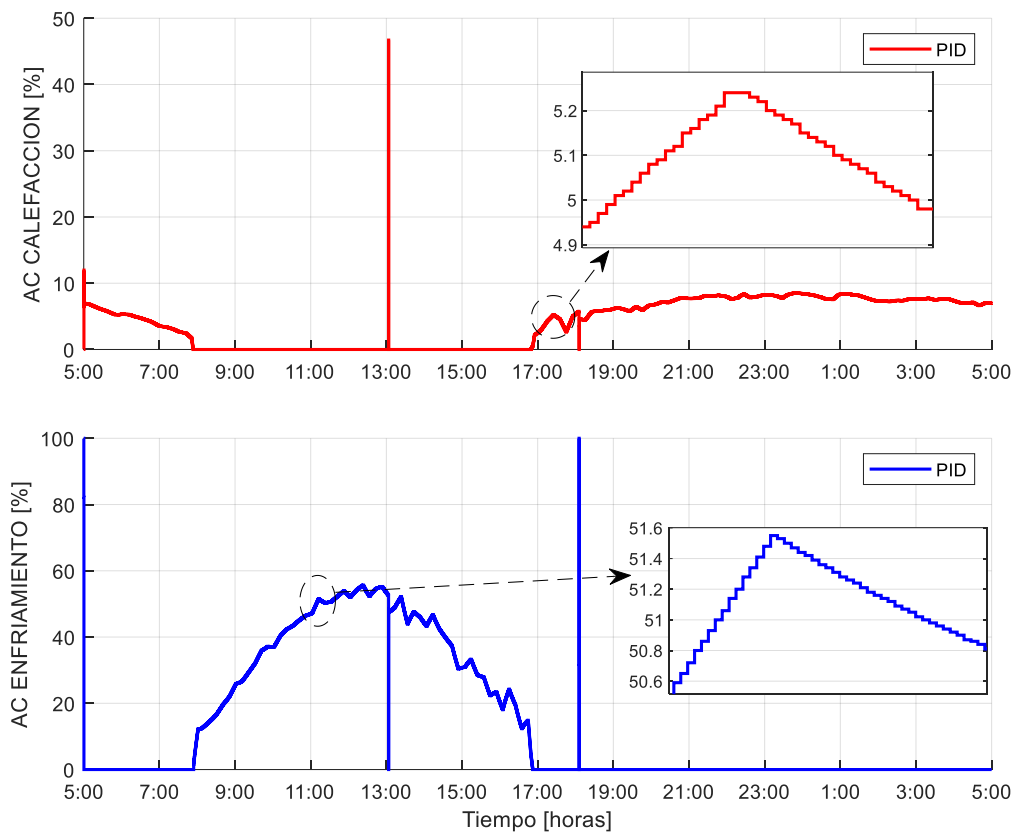


Figura 3.19 Acción de control de calefacción y enfriamiento del esquema PI para la perturbación de un día con menor temperatura externa

Como se mencionó en el análisis de la figura 3.18 las perturbaciones no difieren representativamente por lo que las acciones de control de la Figura 3.19 y Figura 3.17 son similares destacando los cambios bruscos en los cambios de referencia.

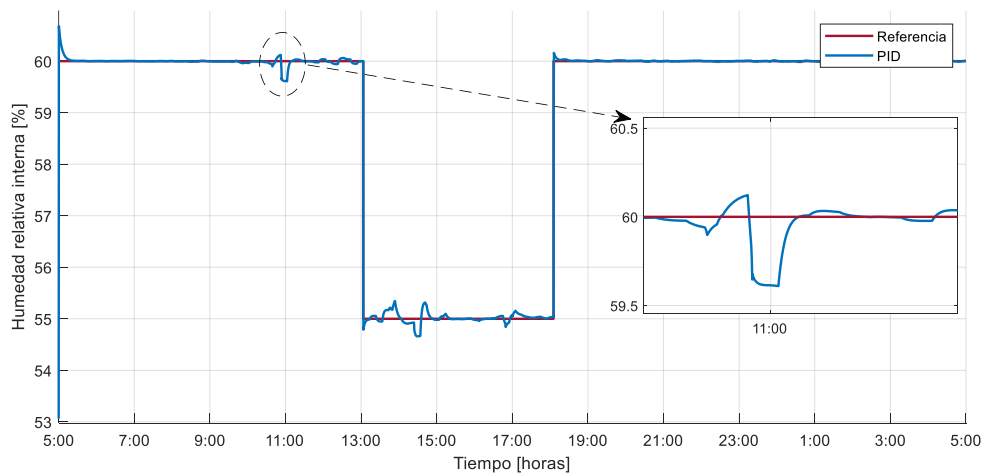


Figura 3.20 Respuesta del controlador PI frente a la perturbación de un día con mayor radiación solar externa

En la Figura 3.20 se puede apreciar la respuesta de humedad relativa del esquema de control PI frente a la perturbación de un día con mayor radiación externa, la respuesta presenta más sobre picos a comparación de las respuestas con las otras dos perturbaciones, el máximo sobre pico es de 0.651% y el tiempo de establecimiento de 9.957 minutos.

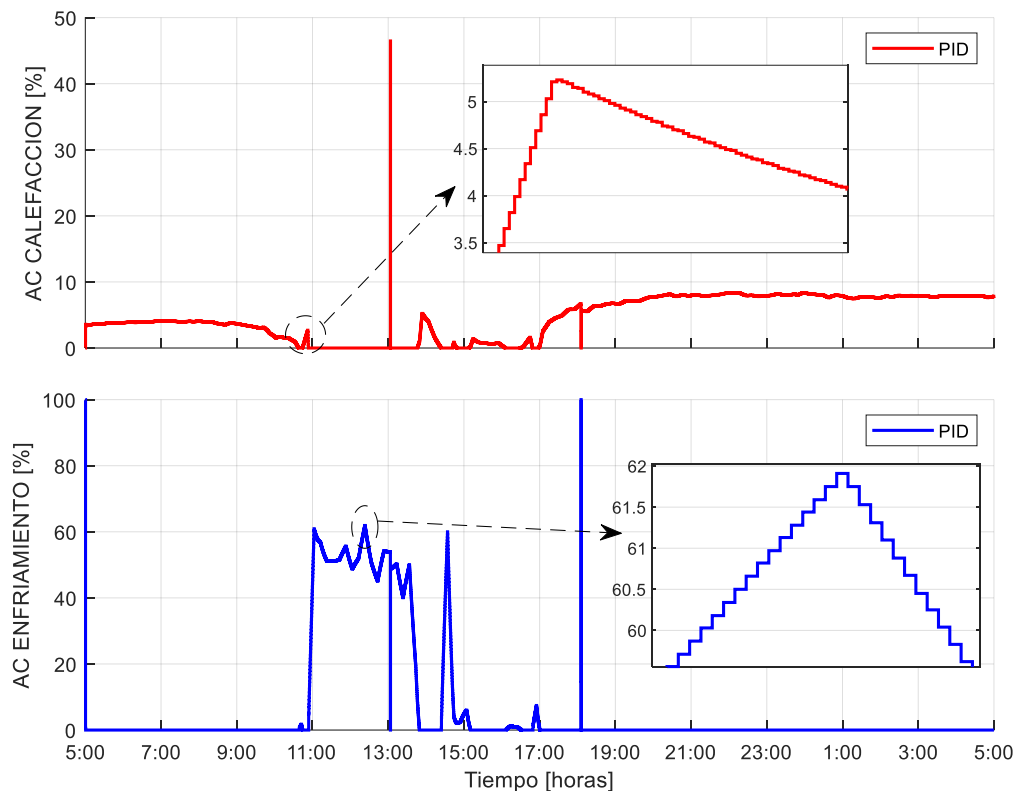


Figura 3.21 Acción de control de calefacción y enfriamiento del esquema PID para la perturbación de un día con mayor radiación solar externa

Las acciones de control de la Figura 3.21 presentan cambios bruscos en los cambios de referencia, esto es perjudicial para el elemento final de control ya que exige un rápido encendido y apagado con una variación del 100% de la acción de control.

3.1.1.5 Respuesta de humedad y acción de control del esquema PI-FUZZY.

La Figura 3.22 presenta la respuesta de humedad relativa del esquema de control PI-FUZZY frente a la perturbación de un día normal.

Esta respuesta presenta oscilaciones y mayor cantidad de sobre picos comparándolo con el esquema PID, el sobre pico más representativo es del 22.65% con un tiempo de establecimiento de 21.33 minutos.

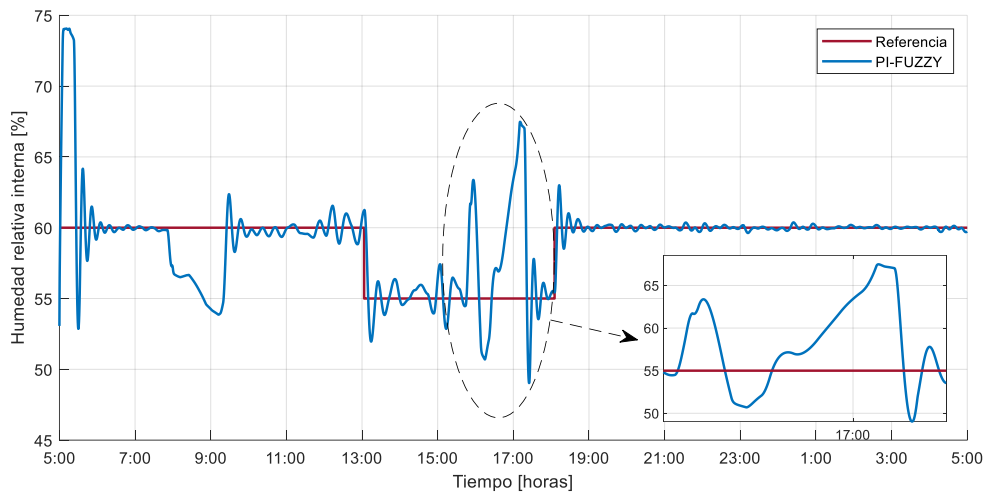


Figura 3.22 Respuesta del controlador PI-FUZZY frente a la perturbación de un día normal

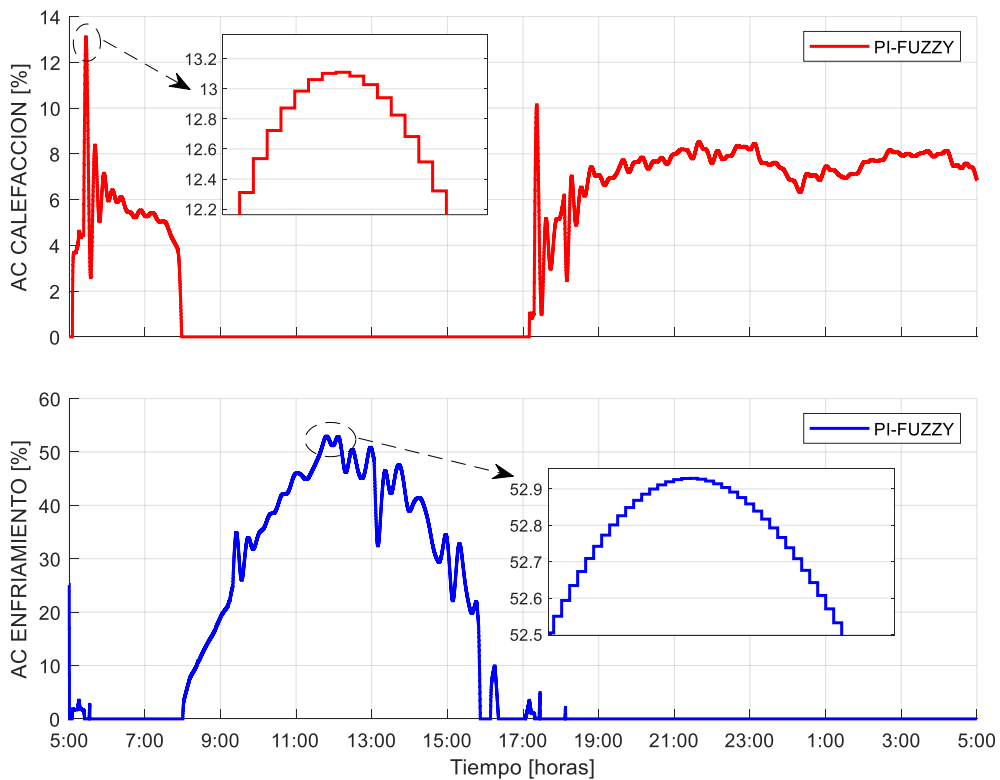


Figura 3.23 Acción de control de calefacción y enfriamiento del esquema PI-FUZZY para la perturbación de un día normal

Si analizamos las acciones de control de la Figura 3.23 las cuales corresponden a la respuesta de un día normal, éstas ya no presentan los cambios bruscos de las acciones de control presentes en las Figuras 3.15, 3.17 y 3.19 lo cual es favorable para el elemento

final de control con el fin de preservarlo, sin embargo, la respuesta es mas lenta a comparación con el esquema PI.

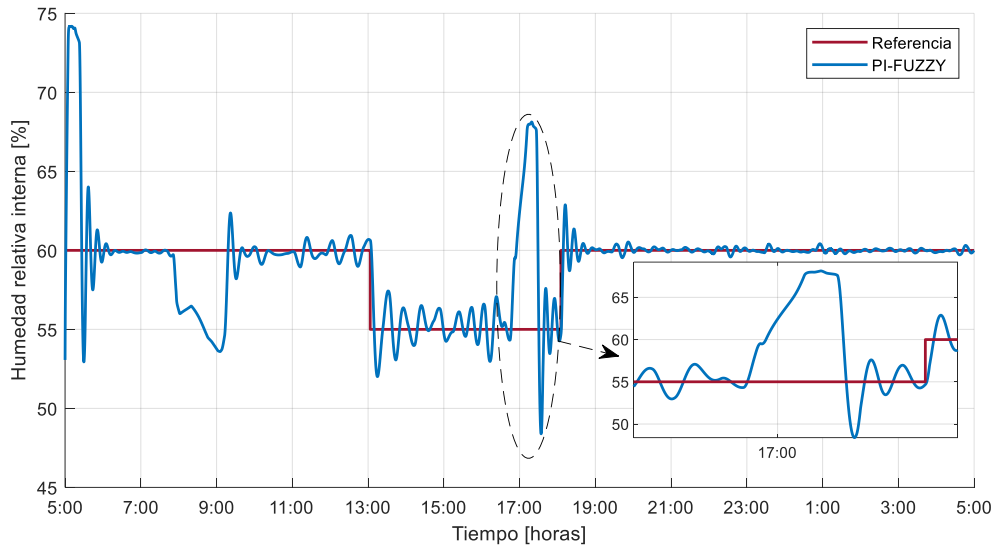


Figura 3.24 Respuesta del controlador PI-FUZZY frente a la perturbación de un día con menor temperatura externa

La Figura 3.24 presenta varios sobre picos, el más representativo es de 23.836% y el tiempo de establecimiento de 26.13 minutos, una vez mas el comportamiento es similar a la respuesta con perturbación de un día normal.

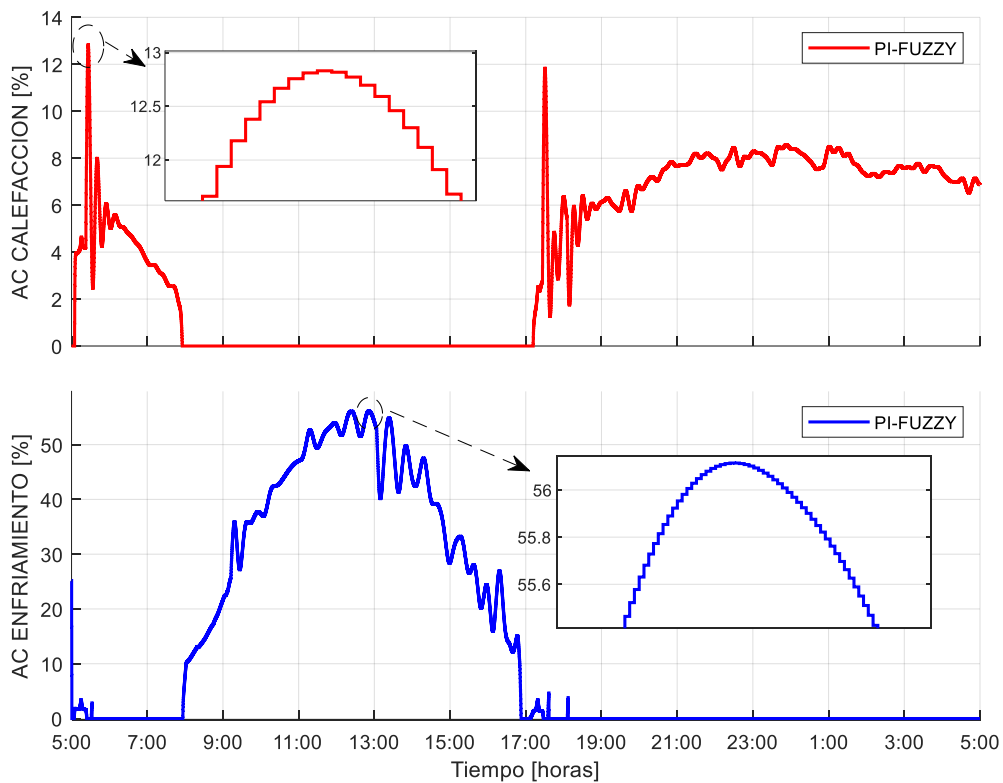


Figura 3.25 Acción de control de calefacción y enfriamiento del esquema PI-FUZZY para la perturbación de un día con menor temperatura externa

Las acciones de control de la Figura 3.25 ya no presenta las oscilaciones presentes en el esquema de control PI, aunque presenta oscilaciones no tan representativas a la larga puede terminar afectando al elemento final de control.

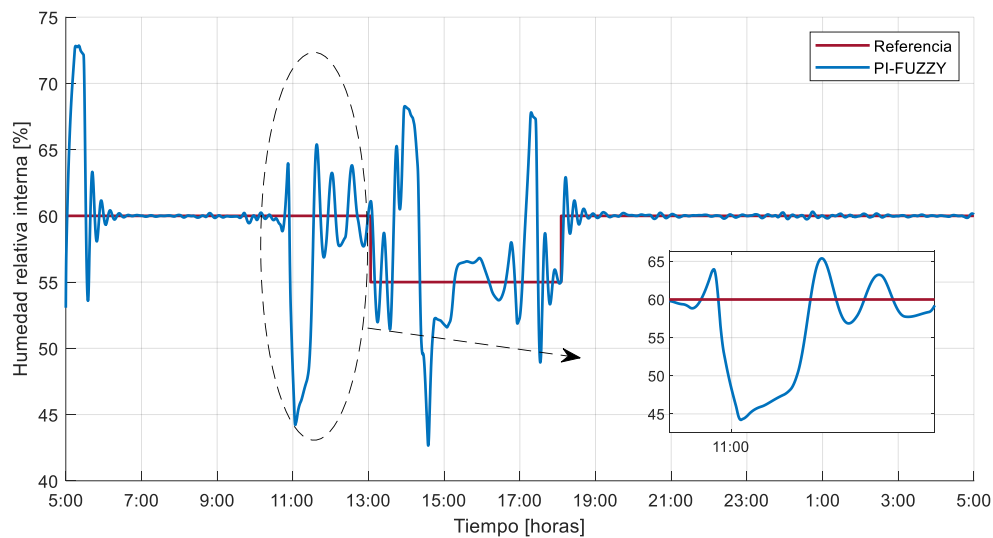


Figura 3.26 Respuesta del controlador PI-FUZZY frente a la perturbación de un día con mayor radiación solar externa.

Como se observa en la Figura 3.26 es la respuesta que más sobre picos presenta debido a que la planta se expone a cantidades altas de radiación solar externa, el sobre pico más representativo es de 26.07 y el tiempo de establecimiento de 73.633 minutos.

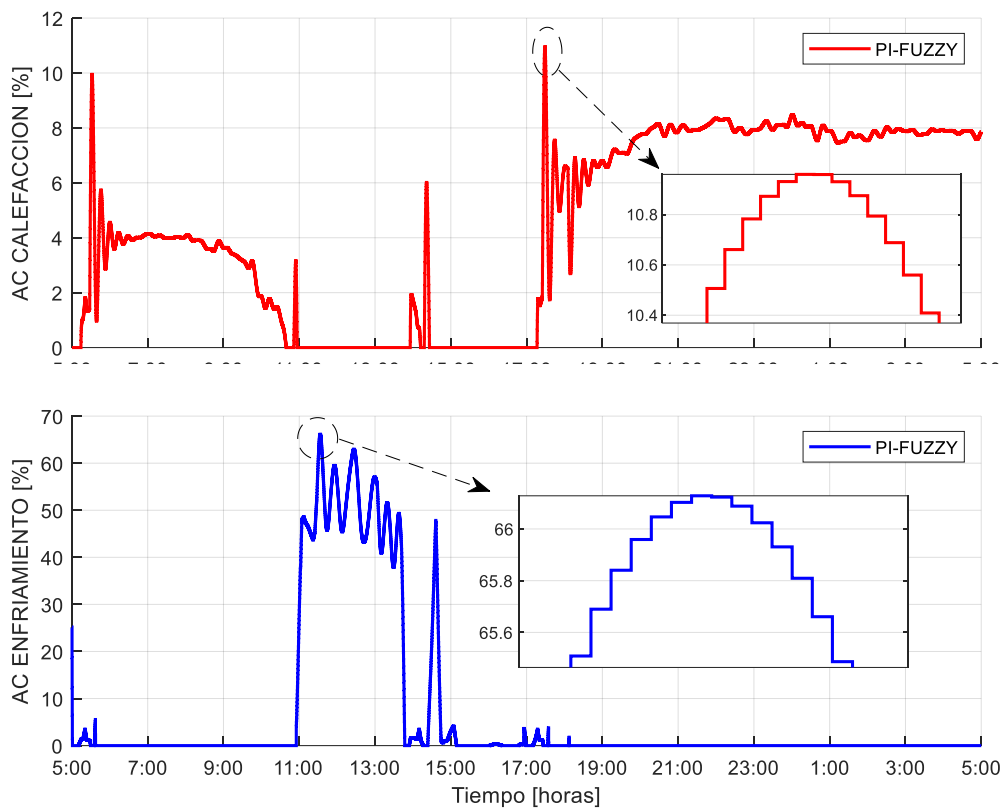


Figura 3.27 Acción de control de calefacción y enfriamiento del esquema PI-FUZZY para la perturbación de un día con mayor radiación solar externa

Analizando las acciones de control de la Figura 3.27 una vez más se evidencia que no hay cambios bruscos los cuales están presentes en las acciones de control del esquema PI.

A continuación, se muestra la Tabla 3.3 con los valores de máximo sobre pico (M_p) y tiempo de establecimiento (T_m) para los dos esquemas de control de humedad relativa frente a las tres perturbaciones.

Tabla 3.3. Máximo sobre pico (M_p) y tiempo de establecimiento (t_s) para control de humedad relativa

Perturbación	Esquema	M_p [%]	T_s [min]
Normal	PID	0.632	14.97
	PI-FUZZY	22.65	21.33
Menor temperatura externa	PID	0.5	9.65
	PI-FUZZY	23.836	26.13
Mayor radiación externa	PID	0.651	9.957
	PI-FUZZY	26.07	73.633

Independientemente del tipo de perturbación es evidente que el controlador PI presenta mejor desempeño debido a los tiempos de establecimiento y máximos sobre picos, sin

embargo y como sucede en el caso del control de temperatura PID, las acciones de control presentan cambios bruscos que son perjudiciales para el elemento final de control.

Es importante mencionar que pese a los sobre picos (sobre todo en el esquema de control PI-FUZZY) de humedad relativa estos se encuentran dentro del rango (40% a 70%) de humedad relativa para obtener un fruto de calidad, a excepción del inicio de simulación que el sobre pico llega a un 73% de humedad relativa.

Con el fin de un análisis más exhaustivo para la elección del controlador con mejor desempeño se han obtenido los índices de desempeño ISCO e ISE para el control de humedad relativa.

3.1.1.6 Índices de desempeño para control de humedad relativa

La Tabla 3.2 presenta los índices de desempeño del control de humedad relativa para el controlador PI y PI-FUZZY frente a las tres perturbaciones.

Tabla 3.2 Índices de desempeño para control de humedad relativa

Perturbación	Esquema	ISCO ENFRIAMIENTO	ISCO CALEFACCIÓN	ISE
Normal	PID	1.976e08	3.405e06	1309
	PI-FUZZY	3.012e08	3.076e08	2.852e06
Menor temperatura externa	PID	1.974e08	3.381e06	1152
	PI-FUZZY	3.015e08	3.048e08	3.359e06
Mayor radiación externa	PID	1.894e08	3.271e06	1401
	PI-FUZZY	2.948e08	4.863e08	2.202e06

Como se mencionó en las acciones de control para el esquema PI-FUZZY, las oscilaciones no convencían un buen desempeño y se evidencian en los índices ISCO tanto de enfriamiento como de calefacción.

Por otro lado, si analizamos los índices ISE el controlador PI-FUZZY presenta una estabilidad muy débil a comparación del controlador PID.

Con respecto a los índices ISCO e ISE el controlador que más ventajas presenta para el control de humedad relativa es el PI teniendo en cuenta los límites de humedad relativa para un fruto de calidad y aunque este esquema presenta cambios bruscos en las acciones de control presenta un menor ISCO a comparación del PI-FUZZY el cual aumenta debido a las oscilaciones, a la final los dos esquemas disminuyen la vida útil del elemento final de control pero las oscilaciones son más perjudiciales que los cambios bruscos.

3.2 Conclusiones

- Bajo el concepto de Hardware in the Loop se obtiene el índice de desempeño para el control de temperatura concluyendo que el esquema que mejor desempeño presenta es el PI-FUZZY a comparación del esquema PID.
- Bajo el concepto de Hardware in the Loop se obtiene el índice de desempeño para el control de humedad concluyendo que el esquema que mejor desempeño presenta es el PID a comparación del esquema PI-FUZZY.
- Para una mejor respuesta del controlador PI-FUZZY se debería aumentar las funciones de membresía lo que conlleva a un mayor número de reglas, esto implica una mayor capacidad de procesamiento de la tarjeta embebida.
- El concepto Hardware in the Loop es una excelente alternativa para la prueba de controladores ya que no está conectado directamente con la planta real lo que significaría un riesgo potencial en caso de sintonizaciones incorrectas, además de elevado costo como por ejemplo en paros repentinos en líneas de producción.
- La acción de control que proporciona la tarjeta embebida refleja el comportamiento del elemento final de control por lo que es importante elegir un correcto tiempo de muestreo ya que caso contrario pueden presentarse cambios bruscos y problemas en el seguimiento del valor de referencia.

3.3 Recomendaciones

- Es recomendable saturar las acciones de control a valores mínimos y máximos permitidos con el fin de salvaguardar el elemento final de control.
- Es recomendable utilizar el método de Smith para la obtención de los parámetros de la aproximación al modelo de primer orden más tiempo muerto ya que da una aproximación más precisa que todos los demás métodos.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Fundamentos de los sistemas de control del riego y la fertilización.” https://infoagro.com/riegos/control_riego_y_fertilizacion.htm (accedido Sep. 06, 2022).
- [2] C. I. Muresan and C. M. Ionescu, “Generalization of the FOPDT Model for Identification and Control Purposes,” *Process. 2020, Vol. 8, Page 682*, vol. 8, no. 6, p. 682, Jun. 2020, doi: 10.3390/PR8060682.
- [3] O. Camacho, A. Rosales, F. Rivas, *Control de Procesos*, EPN Editorial, 2020.
- [4] “Esquema básico de un sistema de control difuso. | Download Scientific Diagram.” https://www.researchgate.net/figure/Esquema-basico-de-un-sistema-de-control-difuso_fig1_339203965 (accedido Sep. 06, 2022).
- [5] Camacho, O., Iglesias, E., Herrera, M., & Aboukheir, H. (2021). Fuzzy logic-based control: From fundamentals to applications. *Novasinerгия. 4(2). 06-37.* <https://doi.org/10.37135/ns.01.08.01>
- [6] “Fuzzy Logic - Control System.” https://www.tutorialspoint.com/fuzzy_logic/fuzzy_logic_control_system.htm (accedido Sep. 06, 2022).
- [7] “Señales continuas, analógicas, discretas y digitales - Panama Hitek.” <http://panamahitek.com/senales-continuas-analogicas-discretas-y-digitales/> (accedido Sep. 06, 2022).
- [8] “What is Hardware-in-the-Loop Simulation? | Speedgoat.” <https://www.speedgoat.com/solutions/testing-workflows/hardware-in-the-loop> (accedido Sep. 06, 2022).
- [9] “Simulink Documentation - MathWorks América Latina.” <https://la.mathworks.com/help/simulink/> (accedido Sep. 06, 2022).
- [10] “What is Arduino? | Arduino.” <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction> (accedido Sep. 06, 2022).
- [11] “Arduino Mega 2560 | Arduino.cl - Compra tu Arduino en Línea.” <https://arduino.cl/arduino-mega-2560/> (accedido Sep. 06, 2022).
- [12] Fitz-Rodríguez, C. Kubota, G. A. Giacomelli, M. E. Tignor, S. B. Wilson, M. McMahon, *Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under*

several scenarios: A web-based application, Computers and electronics in agriculture 70 (1) (2010) 105–116.

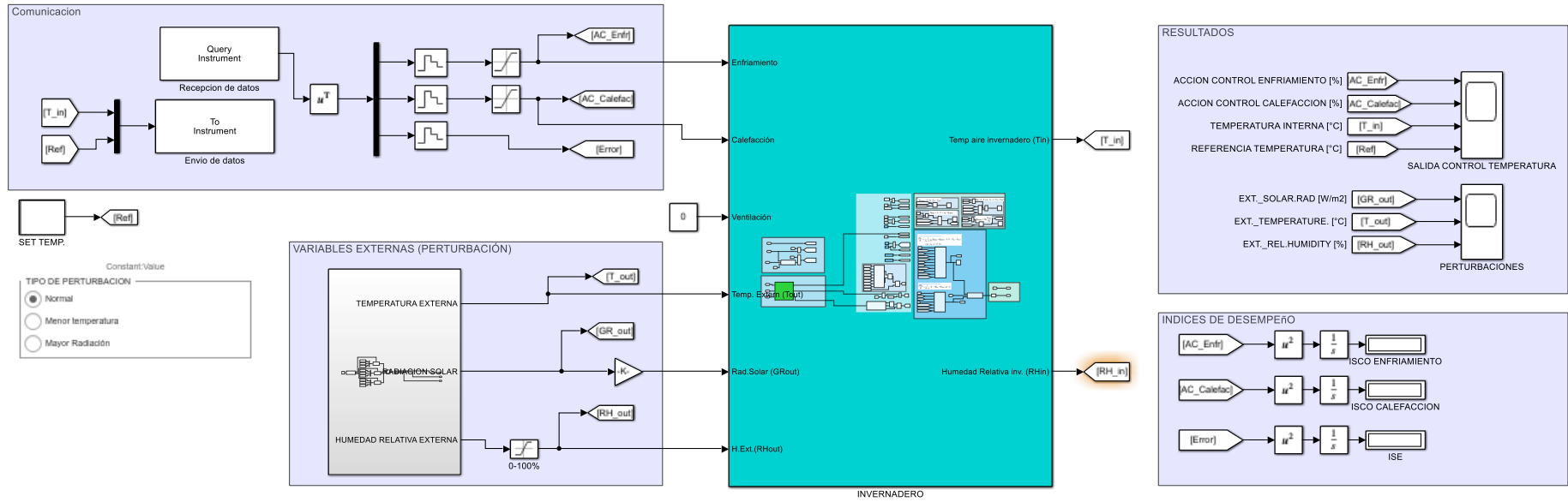
- [13] “Query or read instrument data - Simulink - MathWorks América Latina.” <https://la.mathworks.com/help/instrument/queryinstrument.html> (accedido Sep. 06, 2022).
- [14] M. Vanegas, Guía técnica cultivo del limón pérsico, 1ra edición, Nueva San Salvador, 2002.
- [15] E. Brambila, Riego por goteo en limón persa, México, 2021.
- [16] “T. I. Lógica Borrosa:Cont-Funciones.” http://www.dma.fi.upm.es/recursos/aplicaciones/logica_borrosa/web/tutorial_fuzzy/contenido3.html (accedido Sep. 06, 2022).

5 ANEXOS

ANEXO I. HMI

ANEXO II. Implementación del modelo matemático del invernadero en Simulink de Matlab

5.1 ANEXO I. HMI



5.2 ANEXO II. Implementación del modelo matemático del invernadero en Simulink de MatLab

