

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Métodos Avanzados de Control para un Invernadero Mediante
Simulación Hardware in the Loop**

David Alejandro Molina Redroban

Bryan Andrey Fierro Ocampo

Ingeniería en Electrónica y Automatización

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero en Electrónica

Quito, 02 de junio de 2023

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Métodos Avanzados de Control para un Invernadero Mediante Simulación
Hardware in the Loop**

David Alejandro Molina Redroban

Bryan Andrey Fierro Ocampo

Nombre del profesor, Título académico

Oscar Camacho, PhD.

Quito, 02 de junio de 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: David Alejandro Molina Redroban

Código: 00204426

Cédula de identidad: 1719102863

Lugar y fecha: Quito, 02 de junio de 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Bryan Andrey Fierro Ocampo

Código: 00204555

Cédula de identidad: 0202472809

Lugar y fecha: Quito, 02 de junio de 2023

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

En el presente trabajo se lleva a cabo el diseño y comparativa de dos técnicas de control avanzadas, las cuales son aplicadas a un invernadero el cual es simulado aplicando la técnica hardware in the loop, que consiste en el uso de un sistema embebido (Arduino uno) para representar la dinámica de un invernadero a partir de un modelo matemático que consta de dos variables fundamentales a considerar en un microclima como lo son la temperatura y humedad representadas por dos ecuaciones diferenciales. Dentro de las técnicas de modelado aprendidas en control automático se aplicó el método de curva de reacción en lazo abierto para obtener las funciones de transferencia que representan la dinámica de cada una de las variables a controlar ante cambios en las variables manipuladas.

Entrando un poco en detalle, las técnicas de control avanzado que se utilizaron fueron, el predictor de Smith (SP) y el control por modelo interno (IMC) que se caracterizan por ser utilizadas en sistemas con una relación de controlabilidad mayor que 1 como es el caso.

Posteriormente, considerando que contamos con un sistema multivariable, fue fundamental medir su interacción, ya que el diseño de los controladores depende de cuánto estos funcionan sin afectarse mutuamente. Una vez demostrado que la interacción entre las variables fue considerablemente alta, se diseñaron sus respectivos desacopladores, que mejoran la respuesta del sistema implementado. Por otra parte, en este trabajo se realiza la comparación de resultados obtenidos con un esquema de control clásico de una publicación científica en donde el controlador utilizado fue uno de tipo PID.

Por último, se realizó la digitalización de los controladores y se los implementó en Arduino.

Palabras clave: Control Avanzado, SP, IMC, Hardware in the loop, Temperatura, Humedad, Multivariable, Simulink, Arduino.

ABSTRACT

The present work involves the design and comparison of two advanced control techniques, which are applied to a greenhouse simulated using the hardware-in-the-loop technique. This technique utilizes an embedded system (Arduino Uno) to represent the dynamics of a greenhouse based on a mathematical model that consists of two fundamental variables to consider in a microclimate: temperature and humidity, represented by two differential equations. Within the learned modeling techniques in automatic control, the open-loop reaction curve method was applied to obtain transfer functions that represent the dynamics of each controlled variable in response to changes in manipulated variables.

Going into detail, the advanced control techniques used were the Smith predictor (SP) and internal model control (IMC), which are known for their use in systems with a controllability ratio greater than one, as is the case here. Subsequently, considering that we have a multivariable system, it was crucial to measure its interaction, as the design of the controllers depends on how well they operate without mutually affecting each other. Once it was demonstrated that the interaction between the variables was high, respective decouplers were designed to improve the response of the implemented system. Furthermore, this work compares the results obtained with a classical control scheme from a scientific publication, where a PID controller was used.

Lastly, the controllers were digitized and implemented in Arduino.

Keywords: Advanced control, SP, IMC, Hardware-in-the-loop, Temperature, Humidity, Multivariable, Simulink, Arduino.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	15
Hardware in the Loop	16
Control Automático	17
Predictor de Smith.....	18
Método de curva de reacción	20
Control por Modelo Interno	21
Sistema multivariable 2 x 2.....	22
Planteamiento de la Matriz de Bristol.....	23
Modelo matemático del Invernadero	24
Arduino UNO.....	27
DESARROLLO DEL TEMA	29
Caracterización y validación del modelo matemático en Simulink.....	29
Retardo Considerado.....	31
Curva de reacción de la humedad ante un cambio en la ventilación	32
Curva de reacción de la temperatura ante un cambio en la ventilación.....	34
Curva de reacción de la temperatura ante un cambio de nebulización	36

Curva de reacción de la humedad ante un cambio en la nebulización.....	38
Método de la matriz de ganancias relativas (Bristol).....	39
Diseño de desacopladores	40
Diseño de los controladores para cada uno de los métodos de control avanzados aplicados	41
Diseño de controladores para método de control por predictor de Smith.....	42
Diseño de los controladores para método de control por Modelo Interno.....	43
Esquemas de control para cada uno de los métodos de control e implementación en Simulink.....	45
Esquema de control SP.	45
Esquema de control por modelo interno.	47
Resultados en Simulación de ambos modelos de control en Simulink.....	49
Implementación HIL.....	56
Esquemas de comunicación entre Simulink y Arduino.	56
Bloque de comunicación entre Arduino y Matlab.	57
Consideraciones en el proceso de digitalización e implementación en Arduino.....	58
Ajuste del factor de tiempo para las funciones de transferencia de los controladores SP e IMC, modelos aproximados del invernadero y retardo.	60
Discretización de las funciones de transferencia con ajuste de tiempo de los controladores SP e IMC, modelos aproximados del invernadero y retardo.	61

Ecuaciones en diferencias de las funciones de transferencia en Z de los controladores SP e IMC, modelos aproximados del invernadero y retardo.....	63
Resultados en implementación HIL para los controladores SP e IMC.....	66
CONCLUSIONES.....	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables que caracterizan al invernadero.....	26
Tabla 2: Resultados de las pruebas de simulación con los tiempos obtenidos en el Arduino UNO.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de Bloques del Predictor de Smith [3].....	18
Figura 2: Estructura de control basaba en control interno [3].	21
Figura 3: Representación de un sistema 2x2 [14].....	23
Figura 4. Representación del invernadero y sus variables.	24
Figura 5: Constantes, perturbaciones externas, y variables manipuladas en Simulink.	30
Figura 6: Modelo matemático que corresponde a la temperatura en Simulink.	30
Figura 7: modelo matemático que corresponde a la Humedad en Simulink.	31
Figura 8: Curva de reacción de la humedad ante un cambio en la ventilación.....	32
Figura 9: Esquema usado para validación del modelo para humedad ante cambios de ventilación.....	33
Figura 10: Validación de la humedad con cambio en ventilación con respecto al modelo matemático.....	33
Figura 11: Curva de reacción de la temperatura ante un cambio en la ventilación.	34
Figura 12: Esquema usado para validación del modelo para temperatura ante cambios de ventilación.....	35
Figura 13: Validación de la temperatura con cambio en ventilación con respecto al modelo matemático.....	35
Figura 14: curva de reacción de la temperatura ante un cambio de nebulización.	36
Figura 15: Esquema usado para validación del modelo obtenido matemáticamente para cada uno de los cambios realizados.....	37

Figura 16: Validación de la temperatura con cambio en la nebulización respecto al modelo matemático.....	37
Figura 18: Esquema usado para validación del modelo obtenido matemáticamente para cada uno de los cambios realizados.....	39
Figura 19: Validación de la humedad con cambio en la nebulización respecto al modelo matemático.....	39
Figura 20: Imagen recortada de la tabla 4.5 mostrando el literal A [3].....	41
Figura 21: Esquema de control del predictor de Smith.....	46
Figura 22: Esquema de control por SP implementado en Simulink.....	46
Figura 23: Esquema de control dentro del bloque del predictor de Smith para la temperatura.	47
Figura 24: Esquema de control dentro del bloque del predictor de Smith para la humedad..	47
Figura 25: Esquema de control por modelo interno.....	48
Figura 26: Esquema de control por modelo interno para invernadero implementado en Simulink.....	48
Figura 27: Esquema de control dentro del bloque del modelo interno para la temperatura...	49
Figura 28: Esquema de control dentro del bloque del modelo interno para la humedad.	49
Figura 29: Perturbaciones utilizadas en resultados de simulación para el controlador de modelo SP.	50
Figura 30: Resultados en simulación con el controlador de Predictor de Smith.	51
Figura 31: Acción de control del SP en simulación.....	51

Figura 32: Perturbaciones utilizadas en resultados de simulación para el controlador de modelo IMC.....	52
Figura 33: Resultados en simulación con el controlador IMC.	52
Figura 34: Acción de control del IMC en simulación.....	53
Figura 35: Resultados en simulación de ISE en temperatura para SP, IMC y PI.	53
Figura 36: Resultados en simulación de ISE para la humedad para SP, IMC y PI.	54
Figura 37: Resultados en simulación de ISCO para la temperatura para SP, IMC y PI.....	54
Figura 38: Resultados en simulación de ISCO para la humedad para SP, IMC y PI.	55
Figura 39: Esquema general de comunicación.	56
Figura 40: Bloque de comunicación Arduino Matlab.....	57
Figura 41: Perturbaciones implementadas en ambos modelos de control SP e IMC.	66
Figura 42: Resultados en HIL con el controlador de Predictor de Smith.	67
Figura 43: Acción de control del controlador SP.....	67
Figura 44: Resultados en HIL con el controlador IMC.	68
Figura 45: Acción de control del controlador IMC.	68
Figura 46: Resultados en HIL de ISE para la temperatura para SP, IMC y PI.	69
Figura 47: Resultados en HIL de ISE para la humedad para SP, IMC y PI.	69
Figura 48: Resultados en HIL de ISCO para la temperatura para SP, IMC y PI.....	70
Figura 49: Resultados en HIL de ISCO para la humedad para SP, IMC y PI.	70

INTRODUCCIÓN

A través de la historia se ha ratificado la importancia de la agricultura para el desarrollo de la humanidad, los recursos que nos brinda la madre tierra corresponden a un legado de varios miles de millones de años, desde una perspectiva biológica como humanidad dependemos de estos recursos, cada célula de nuestro cuerpo proviene de una planta o animal ingerido cuyo origen se debe a la agricultura, ganadería o pesca. [12]

Partiendo de estos puntos se demuestra la estrecha relación que existe entre el desarrollo de la agricultura con el desarrollo de la humanidad. Futuros sucesos como el crecimiento poblacional y el cambio climático proponen grandes desafíos para este sector: ¿habrá suficiente alimento para todos? Por otro lado, también es importante mencionar que en la actualidad el aumento desmedido de las emisiones de gases ha subido la temperatura de del planeta, provocando una serie de eventos meteorológicos extremos y modificaciones en las estaciones climáticas. [11]

Mencionados estos hechos la producción de invernaderos toma mucha importancia debido al uso eficiente de recursos, la posibilidad de producir cultivos en zonas con condiciones no favorables para su desarrollo, generación de un mayor rendimiento en cuestión de calidad y ecológicamente amigable.

Los invernaderos son estructuras físicas recubiertas de materiales translúcidos que sirven para crear un microclima específico y para proteger los cultivos de los cambios estresantes producidos por la excesiva: radiación que conduce a altas temperaturas, así como a temperaturas muy bajas, frío e incidencia de plagas y animales para que se obtienen condiciones óptimas en las diferentes etapas de crecimiento del cultivo [2]. Además, permite la producción de cultivos fuera de temporada. La temperatura del aire en el interior del

invernadero afecta considerablemente a los procesos fisiológicos de las plantas y, por tanto, es importante regularla en un rango adecuado en función de la variedad de cultivo y la ubicación del invernadero. El objetivo es producir la máxima cantidad de un producto con la máxima calidad y el mínimo coste. Además de ser una importante alternativa para enfrentar la alteración climática, los invernaderos ayudan a reducir la dependencia externa de los combustibles fósiles, ya que gran parte de su energía proviene de fuentes renovables [11].

El comportamiento dinámico del microclima dentro de un invernadero es una combinación de procesos físicos que involucran transferencia de energía (radiación y calor) y balance de masa (vapor de agua y flujos de dióxido de carbono) [5]. Las principales perturbaciones que influyen en la temperatura interior del invernadero cuando este se controla mediante la ventilación natural son la radiación solar, la temperatura y la velocidad del viento exteriores, así como la temperatura del suelo. Estos procesos dependen de las condiciones externas ambientales, estructura del invernadero, tipo y estado del cultivo, y del efecto de los actuadores [15].

Por lo que es necesario utilizar técnicas de control automático para poder controlar estas variables en base a las necesidades requeridas del productor agrícola. Es importante antes que nada presentar conceptos rápidos de lo que es el control automático y las técnicas de sintonización utilizadas, así como el tipo de simulación que se utilizó para obtener los datos y resultados en el sistema que se implementó.

Hardware in the Loop

El hardware in the loop (HIL) es una técnica de prueba que simula el comportamiento de las entradas y salidas de un sistema físico que se conecta a una unidad de control normalmente embebida, se diferencia de otros tipos de simulación en que el sistema de control es real y genera señales que dependen de la respuesta del sistema físico de prueba [16]. En

otras palabras, HIL es un dispositivo que engaña al sistema embebido de control haciéndole pensar que está operando con entradas y salidas del mundo real, en tiempo real. [3]

Un sistema físico que sea frágil, costoso o difícil de conseguir puede ser probado en interacción con un controlador usando la simulación HIL. En un sistema de control convencional el control recibe las señales de sensores que miden alguna variable de salida de la planta y entrega las señales de control a los actuadores que alimentan la planta, un simulador HIL debe ser capaz de generar y adquirir las señales que podría entregar el sistema físico con las mismas características de amplitud y velocidad de cambio, esto es, debería poder simular los sensores, el acople a los actuadores y de ser necesario las impedancias de acople al sistema de control. [10].

Control Automático

El control automático es la automatización de procesos complejos y se la viene realizando desde el siglo XX en donde toman relevancia elementos de control ya sean estos mecánicos o electromecánicos, hoy en día se cuenta con la tecnología más avanzada en control siendo esta de tal relevancia que se la adapto a aplicaciones fuera de la industria [1]. Esta se basa en la manipulación de sistemas complejos con la finalidad que su estabilidad en el tiempo sea prolongada a pesar de perturbaciones externas mediante estrategias de control estudiadas y desarrolladas a lo largo de la historia en donde los sistemas retroalimentados toman relevancia por el hecho de que nos proporciona un error que se da entre la referencia del sistema con la respuesta del sistema por lo que en la gran mayoría de esquemas de control este concepto es utilizado [13].

Hoy en día existen varias técnicas de control, siendo estas muy variadas dependiendo del sistema que se tenga para este caso en particular abordaremos dos técnicas de control

utilizadas normalmente en la industria para sistemas que cuentan con retardo o tiempo muerto que son el predictor de Smith (SP) y control por modelo interno (IMC).

Predictor de Smith

El primer método de control para compensar los retardos de un sistema fue diseñado por O.J Smith en 1957 con el potencial de mejorar la respuesta de control en lazos con elevado tiempo muerto o retardo. Su diagrama de bloque se muestra en el siguiente esquema teórico [3].

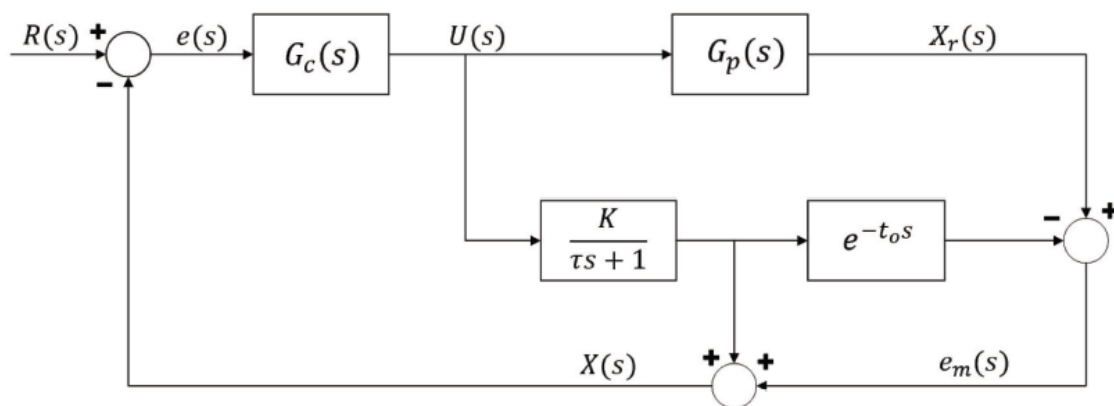


Figura 1: Diagrama de Bloques del Predictor de Smith [3].

Donde:

- $R(s)$ es la referencia deseada.
- $e(s)$ es la señal de error.
- $X(s)$ es la señal de respuesta del sistema.
- $U(s)$ es la señal del controlador.
- $X_r(s)$ es la señal de respuesta de la planta.
- $e_m(s)$ es la señal de retroalimentación.
- $G_c(s)$ es un controlador de tipo PI.
- $G_p(s)$ es el modelo matemático de la planta.

- $\frac{K}{\tau s + 1}$ es el modelo aproximado de la planta sin tiempo muerto.
- $e^{-t_0 s}$ es el retardo de la planta.

Como es posible apreciar dentro del esquema de predictor de Smith (SP) tenemos un controlador de tipo PI el cual toma la señal de error y genera una señal correctiva para compensar la señal de control, lo que produce que las variables controladas tengan el valor más cercano a la referencia. Los parámetros de ajuste de este controlador son ganancias de ajuste de tipo proporcional e integrador y existe algunas maneras de determinar el valor de estas ganancias. A esto se le conoce como sintonización, en el cual tenemos métodos comunes desarrollados por Ziegler & Nichols y Dhalin [3].

En este caso en particular no se puede realizar la sintonización del controlador PI en el esquema de SP por los métodos convencionales debido a que sus ecuaciones consideran el retardo del modelo y lo que esto produciría es que el modelo se vuelva inestable generando errores [9].

Por ende, el método utilizado para sintonizar este controlador fue mediante la tabla 4.5 literal A de [3], denominada “Ecuaciones de sintonización para diferentes modelos” la cual considera un modelo de primer orden como es el caso del invernadero en el que no considera el retardo del modelo dentro de su ecuación de sintonización.

En el presente trabajo se utilizó esta estructura de control dos veces para las variables a controlar en el sistema multivariable (invernadero) propuesto. Por otra parte, las características que modelan las variables de temperatura y humedad que se usaron para la sintonización se obtuvieron a partir del método de la curva de reacción.

Método de curva de reacción

Para realizar el método de curva de reacción se puede elegir entre un proceso a lazo abierto donde el controlador puede o no estar instalado y en el caso de que este instalado esté deberá operar en modo manual durante la prueba. Por otro lado, en los métodos de lazo cerrado el controlador se encuentra funcionando en automático [13].

En este caso se trabajará con el procedimiento a lazo abierto siguiendo las indicaciones descritas en [3]. Por lo tanto, se creó un sistema que consiste en la prueba de escalón unitario, considerando una curva de reacción como respuesta. Por lo que los parámetros a tomar en consideración son K , τ y t_0 los que se utilizan para un sistema de primer orden sumado a un valor de tiempo muerto.

Las indicaciones para utilizar correctamente este método son las siguientes:

1. Ajustar el controlador en modo manual hasta que el proceso se estabilice.
2. Generar el escalón unitario en la señal de salida del controlador entre un valor del 10% al 15 %.
3. Recopilar los datos de la curva de reacción del proceso.

La función de transferencia de primer orden se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

Para obtener los correspondientes valores de τ y t_0 se empleó el método estudiado en [3] mediante los métodos obtenidos en la curva de reacción del proceso. En primer lugar, se debe determinar el tiempo en el que el proceso alcanza el 28.3% del cambio total en la salida este valor se conocerá como t_1 mientras que el valor cuando el proceso alcance el 63.2% se denominará t_2 . K se conoce como la ganancia del proceso, t_0 es el tiempo muerto y τ se refiere a la constante de tiempo. Estos valores se determinan por las siguientes ecuaciones:

$$K = \frac{\Delta S}{\Delta E} \quad (2)$$

$$\tau = 1,5(t_2 - t_1) \quad (3)$$

$$t_0 = t_2 - t \quad (4)$$

Control por Modelo Interno

El control por modelo interno (IMC) es un tipo de control avanzado más efectivo que los controladores clásicos, ya que utiliza la información del modelo para predecir las necesidades futuras del invernadero y ajustar las condiciones ambientales en consecuencia. Este tipo de control fue propuesto inicialmente por los investigadores Morari y Zafiriou en los años 80 [6], está conformada por un controlador y un modelo del proceso real. [3]

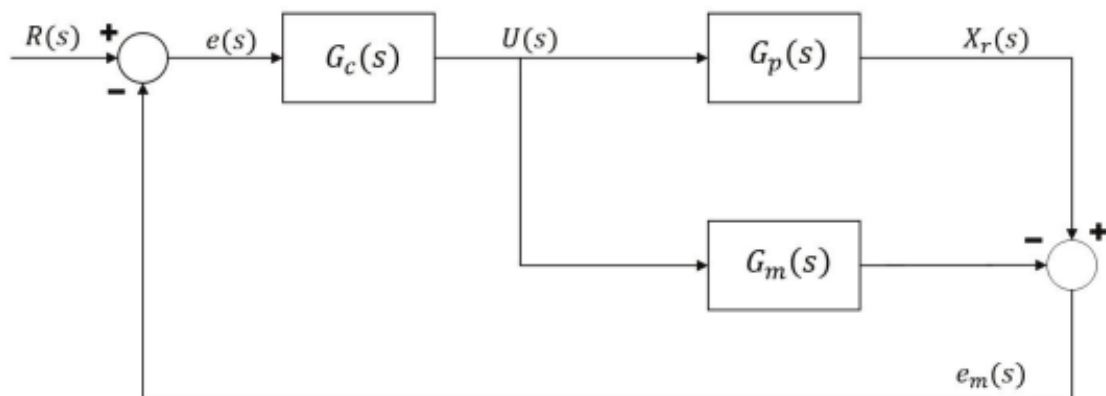


Figura 2: Estructura de control basaba en control interno [3].

En este método de control es necesario mencionar que el proceso puede contener términos no causales, no invertibles (tiempos muertos). Es por esta razón que $Gm(s)$ se descompone en dos partes una invertible y la otra no invertible:

$$Gm(s) = Gm(s)^- Gm(s)^+ \quad (5)$$

Para realizar el controlador $Gc(s)$ se eliminan los elementos del modelo de proceso $Gm(s)$ que producen problemas de inestabilidad, resultando solo la parte invertible del modelo $Gm(s)^-$.

Las funciones de transferencia involucradas en el esquema anterior pueden ser definidas mediante las siguientes expresiones en términos de Laplace:

$$Gm(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1} \quad Gm(s) = Gm(s)^- Gm(s)^+ \quad (6)$$

$$Gc(s) = Gf(s) (Gm(s)^-)^{-1} = \left[\frac{1}{\tau f + 1} \right]^n (Gm(s)^-)^{-1} \quad (7)$$

Donde K , τ y t_0 son los parámetros que determinan las características del proceso, n garantiza que el polinomio del denominador sea al menos tan alto como el polinomio del numerador y así tener una función de transferencia realizable.

τf es un parámetro de sintonización del filtro que se usa para conseguir un mejor desempeño y cumplir con las especificaciones [3].

Sistema multivariable 2 x 2

Son sistemas con varias entradas y salidas, en los que una entrada puede afectar a varias salidas y recíprocamente una salida puede afectar a varias entradas. En este trabajo se utilizará

un sistema multivariable 2x2 para controlar tanto la temperatura (9) como la humedad (10) los cuales se explicarán más adelante [14].

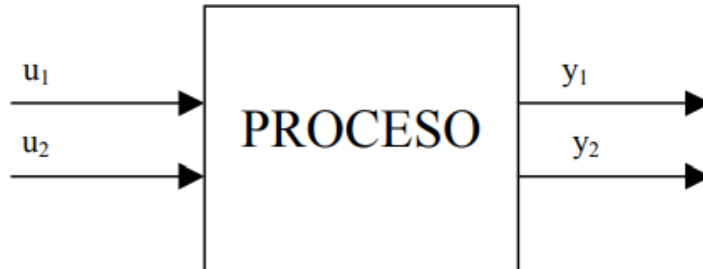


Figura 3: Representación de un sistema 2x2 [14].

Planteamiento de la Matriz de Bristol

En este caso, al tener un sistema con múltiples entradas y múltiples salidas (figura 3) es necesario calcular la interacción que existe entre las variables, ya que es una de las características que más afecta al diseño y sintonización del sistema. Una interacción se refiere a que tanto una variable manipulada afecta a una variable controlada que no pertenece al mismo lazo de control. La solución en este tipo de casos es elegir una pareja en la que no haya interacción o que sea lo menor posible entre las variables. [4]

La matriz de ganancias relativas es una técnica ampliamente utilizada para medir las interacciones entre distintas variables del proceso y seleccionar la mejor estructura del sistema de control multilazos y su desarrollo a detalle se puede apreciar en [14], teniendo como estructura principal el siguiente esquema:

$$P_{n(s)} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$A = \begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix} \left[\begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix}^{-1} \right]^T \quad (9)$$

$$A = \begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix} \quad (10)$$

En donde las ganancias de cada función de transferencia se utilizarán para generar una matriz de ganancias la cual multiplicará a la misma, pero siendo esta la transpuesta de su inversa con una multiplicación a la que se le conoce como producto Schur [3].

Cuando un sistema presenta un alto nivel de interacción es necesario emplear técnicas de desacoplamiento de variables para lograr que el comportamiento de cada lazo de control sea independiente de los otros lazos. [14]

Modelo matemático del Invernadero

Para realizar este trabajo se utilizó el modelo matemático de un invernadero hecho en el artículo de [5], en dicho trabajo se desarrollan las ecuaciones diferenciales que determinan la dinámica interna del microclima del invernadero en la cual intervienen técnicas sobre balance de masas y energía para finalmente obtener dos ecuaciones diferenciales, una de temperatura (9) y la otra de humedad (10).

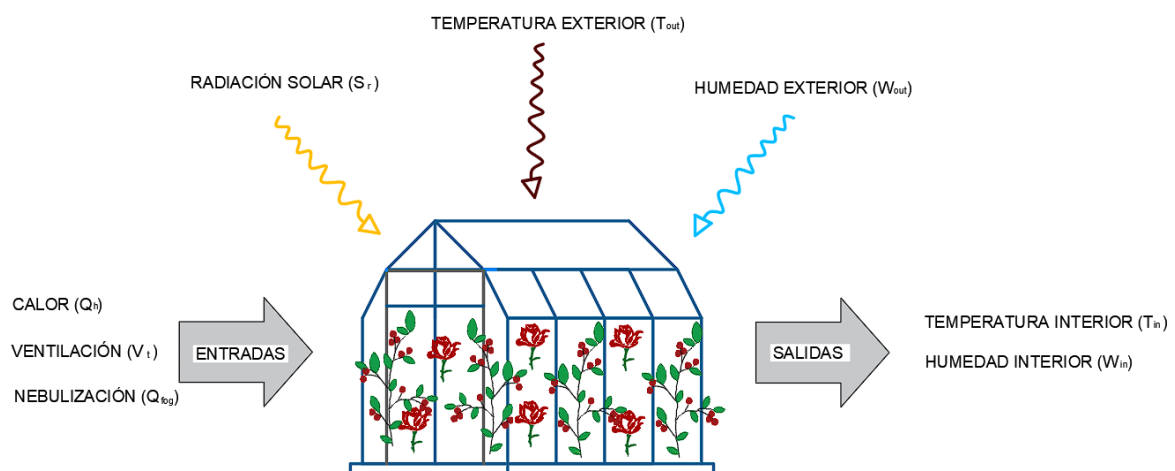


Figura 4. Representación del invernadero y sus variables.

Modelo matemático que describe el comportamiento de la temperatura, en [° C]

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{\rho \cdot C_p \cdot V} [Q_h - S_i - \gamma \cdot Q_{fog}] - (T_{in} - T_{out}) \left[\frac{V_t}{V} + \frac{U \cdot A}{\rho \cdot C_p \cdot V} \right] \quad (11)$$

Nomenclatura:

- T_{in} es la temperatura en el interior [°C].
- T_{out} es la temperatura en el exterior [°C].
- ρ es la densidad del aire [kg/m^3].
- C_p es calor específico del aire [$J/(Kg \cdot K)$].
- V es el volumen del invernadero [m^3].
- Q_h es el calor suministrado por el calentador del invernadero [W].

Modelo matemático que describe el comportamiento de la Humedad, en [g_{agua}/Kg^{-1} aire seco]:

$$\frac{dW_{in}}{dt} = \frac{1}{\rho \cdot V} [Q_{fog} - E - V_t(W_{in} - W_{out})] \quad (12)$$

Nomenclatura:

- γ es calor latente de vaporización [J/g].
- Q_{fog} es la capacidad de agua del sistema de nebulización (masa de vapor de agua por segundo [g/s]).
- V_t es la tasa de ventilación [m^3/s].
- U es el coeficiente promedio de transferencia de calor [$W/(m^2 \cdot K)$].
- A es la superficie del invernadero [m^2].
- W_{in} es la relación de humedad interior [W/m^3].
- W_{out} es la relación de humedad exterior [W/m^3].

Hay que tener en cuenta que el ratio de evapotranspiración de las plantas (E) se puede representar como:

$$E = \alpha \frac{S_i}{\gamma} - \beta_T \cdot W_{in} \quad (13)$$

Por otra parte, la radiación solar que es interceptada se da por la incidencia de la radiación solar externa en el área del techo del invernadero por lo que su expresión matemática es:

$$S_i = S_r \cdot A \quad (14)$$

Nomenclatura:

- E es la tasa de evapotranspiración de las plantas [g/s].
- α es el coeficiente que tener en cuenta para la sombra y las hojas [$\alpha = 0.125$].
- β_T es el coeficiente para tener en cuenta en las constantes termodinámicas y otros factores que afectan a la evapotranspiración.
- S_i es la energía solar radiante interceptada [W/m^2].
- S_r Es la radiación solar externa del invernadero [W/m^2].

Tabla 1: Variables que caracterizan al invernadero.

Variable	Valor	Unidad	Descripción
V	4000	[m^3]	Volumen del Invernadero
U	25	[$W/(m^2 \cdot K)$]	Coficiente global de transferencia de calor
A	1000	[m^2]	Área de superficie del Invernadero
ρ	1.2	[Kg/m^3]	Densidad del aire
C_p	1006	[$J/Kg \cdot K$]	Calor específico del aire
γ	2257	[J/g]	Calor latente de vaporización

$\overline{S_r}$	300	$[W/m^2]$	Radiación solar externa del Invernadero
$\overline{T_{out}}$	25	$[°C]$	Temperatura del aire exterior
$\overline{W_{out}}$	4	$[g/m^3]$	Relación de humedad exterior
$\overline{V_t}$	10	$[m^3/s]$	Tasa de Ventilación
$\overline{Q_{fog}}$	18	$[g/s]$	Capacidad de agua del sistema de nebulización (masa de vapor de agua por segundo)

Los puntos de operación se calcularon en base a las condiciones iniciales del modelo en las siguientes ecuaciones.

$$T_{in_0} = \frac{1}{\rho \cdot C_p \cdot \overline{V_t} + U \cdot A} (A \cdot \overline{S_r} - \gamma \cdot \overline{Q_{fog}}) + T_{out} \quad (15)$$

$$T_{in_0} = 31.99 \quad (16)$$

$$W_{in_0} = \frac{1}{\overline{V_t} + \beta_T} \left(\overline{Q_{fog}} \cdot \alpha \cdot \frac{A \cdot \overline{S_r}}{\gamma} + \overline{V_t} \cdot \overline{W_{out}} \right) \quad (17)$$

$$W_{in_0} = 7.4 \quad (18)$$

Arduino UNO

El hardware utilizado en el presente proyecto es el Arduino UNO el cual es una plataforma de código abierto. utilizado por desarrolladores debido a su flexibilidad y facilidad de usar, consiste en una placa basada en un microcontrolador, los cuales son circuitos integrados donde se pueden grabar instrucciones para poder interactuar con los circuitos de la placa. Esta placa está equipada por un microcontrolador Atmega328p que contiene un CPU, memoria flash, memoria RAM, puertos de entrada /salida y otros componentes necesarios para

su funcionamiento. Además, permite la interacción de diversos sensores, actuadores y otros dispositivos electrónicos.[6]

Considerando todos los conceptos previamente definidos se realizará el control de un invernadero con su modelo matemático simulado en Simulink-Matlab al cual se le aplicarán dos métodos de control tal como SP e IMC en los cuales se podrán contrastar los resultados con métricas de rendimiento como lo son el ISE e ISCO tanto en simulación como en implementación usando HIL.

DESARROLLO DEL TEMA

El presente trabajo se desarrolla sobre el modelo matemático del comportamiento de la dinámica interna dentro de un invernadero en el cual se toma como principales variables a controlar la temperatura y la humedad mediante las variables manipuladas como es la ventilación y la nebulización. El modelo tiene la característica de ser un sistema multivariable 2x2, es decir dos entradas y dos salidas.

El desarrollo del trabajo empieza con la validación del modelo a través de las características del modelo matemático, para lo cual en todo lo que es simulación e implementación utilizaremos el software Matlab Simulink.

Caracterización y validación del modelo matemático en Simulink

Es importante describir el comportamiento del invernadero ante un cambio de referencia en cada una de sus variables para poder obtener los parámetros del modelo y de esta manera medir el nivel de interacción entre las dos variables. Para la caracterización de cada variable como una función de transferencia de primer orden más tiempo muerto o más conocida como una FOPDT se utilizó el método de curva de reacción, uno de los más utilizados y sencillos que definen el comportamiento del invernadero y nos será de mucha ayuda más adelante en el cálculo de la matriz de Bristol que nos ayuda a determinar la interacción del modelo y demás cálculos como sintonización del controlador PI en el esquema de SP.

Lo primero a realizar será la implementación del modelo matemático en Simulink, tanto sus constantes como las ecuaciones de temperatura y humedad fueron implementadas en Simulink como se lo puede observar en las siguientes figuras:

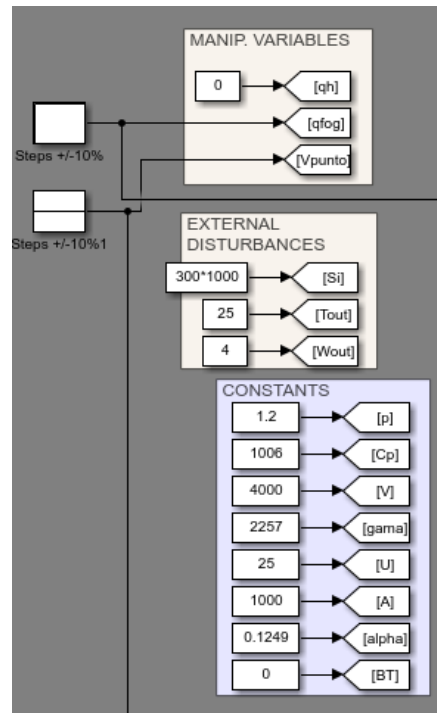


Figura 5: Constantes, perturbaciones externas, y variables manipuladas en Simulink.

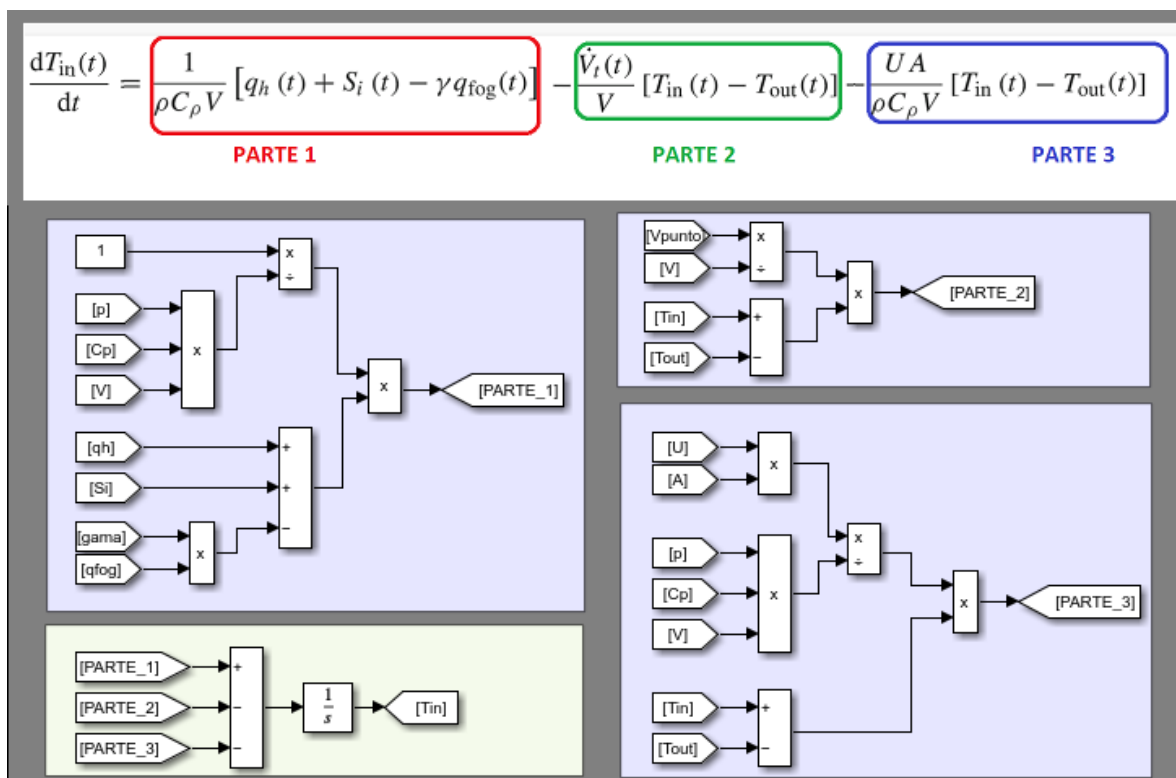


Figura 6: Modelo matemático que corresponde a la temperatura en Simulink.

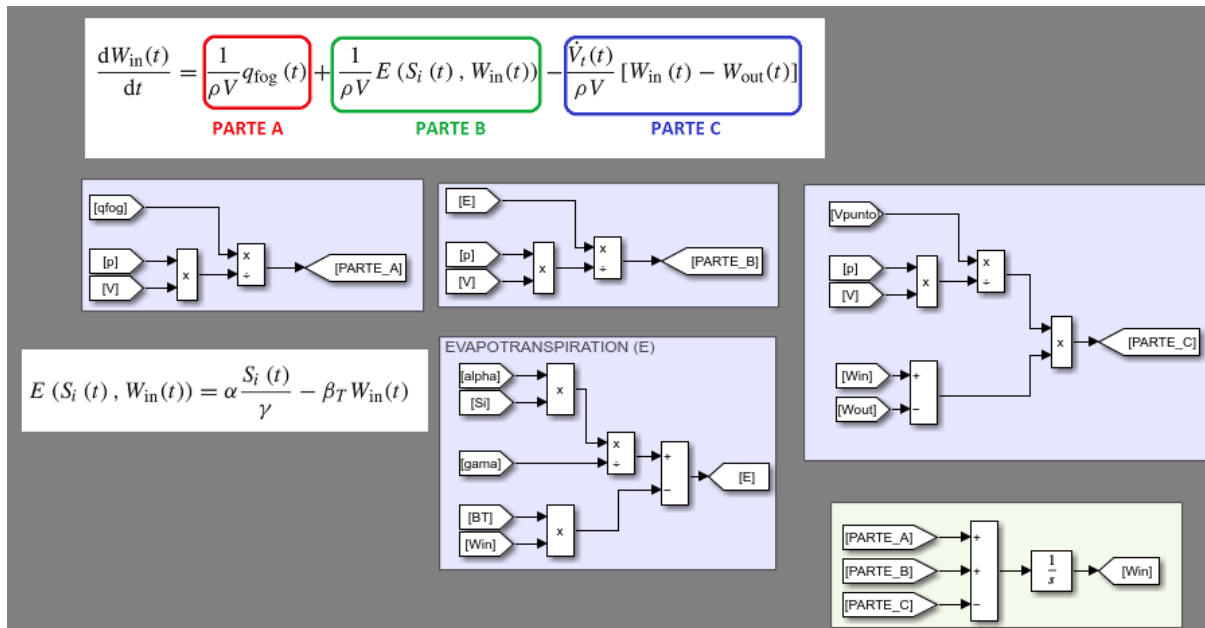


Figura 7: modelo matemático que corresponde a la Humedad en Simulink.

Retardo Considerado

En este apartado hay que tener en cuenta que se utilizó el retardo de la referencia de [5] en donde se describe un sistema en que los dos sensores tanto el de temperatura como de humedad se sitúan juntos para pruebas de retardo, en el cual se obtuvo que su promedio calculado fue un tiempo de:

$$t_0 = 147.625[s] \quad (19)$$

El cual es utilizado dentro del modelado de las funciones de transferencia que caracterizan al invernadero implementado.

Curva de reacción de la humedad ante un cambio en la ventilación

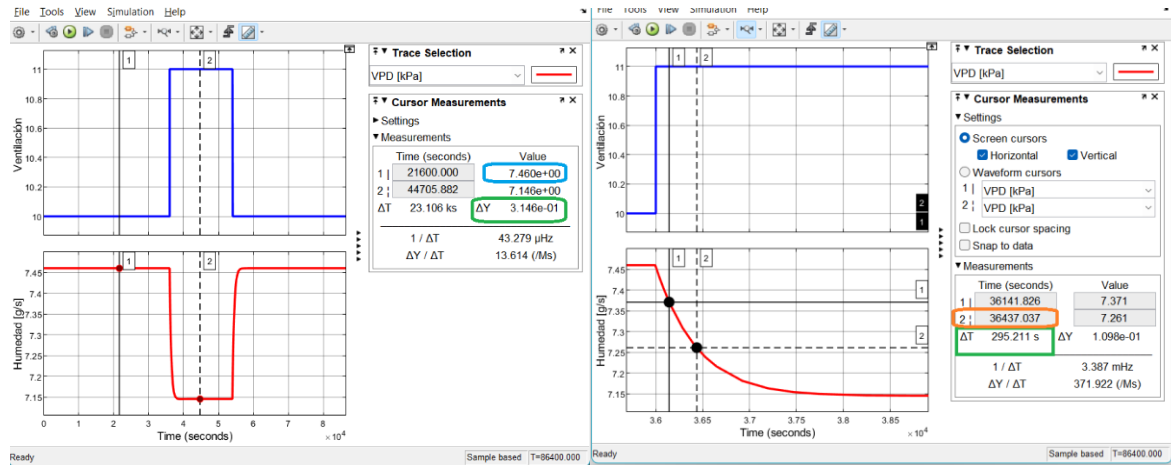


Figura 8: Curva de reacción de la humedad ante un cambio en la ventilación.

Al realizar la curva de reacción, el resultado que nos arroja es el cambio de salida con respecto a su entrada nos da como resultado la ganancia como sabemos de la ecuación (2) K en este caso es:

$$K = -0.3146 \quad (20)$$

A partir de eso se procede a calcular los tiempos $t_{1\Delta}$ y $t_{2\Delta}$ que nos indican el tiempo que tarda la salida en alcanzar el 28.3% y 63.2 % respecto del cambio en la entrada, hasta que la salida se establezca de nuevo con lo que es posible calcular su τ que no es más que el tiempo del sistema en el cual este se estabiliza como sabemos de la ecuación (3) tenemos que τ es:

$$\tau = 442.8165 [s] \quad (21)$$

Por otra parte, el tiempo muerto establecido es de :

$$t_0 = 147.625[s] \quad (22)$$

Por lo que en base a la ecuación (1) la función de transferencia obtenida es:

$$G_{21}(s) = \frac{-0.3146 \cdot e^{-147.625s}}{(442.8165)s + 1} \quad (23)$$

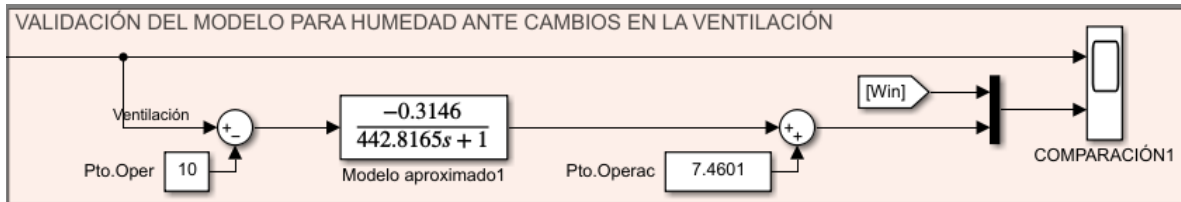


Figura 9: Esquema usado para validación del modelo para humedad ante cambios de ventilación.

Se puede ver en la figura 10 que una vez obtenida la función de transferencia de la curva de reacción y comparándola con el modelo matemático, los resultados del comportamiento de esta con respecto del modelo son prácticamente iguales con pequeños errores de modelado.

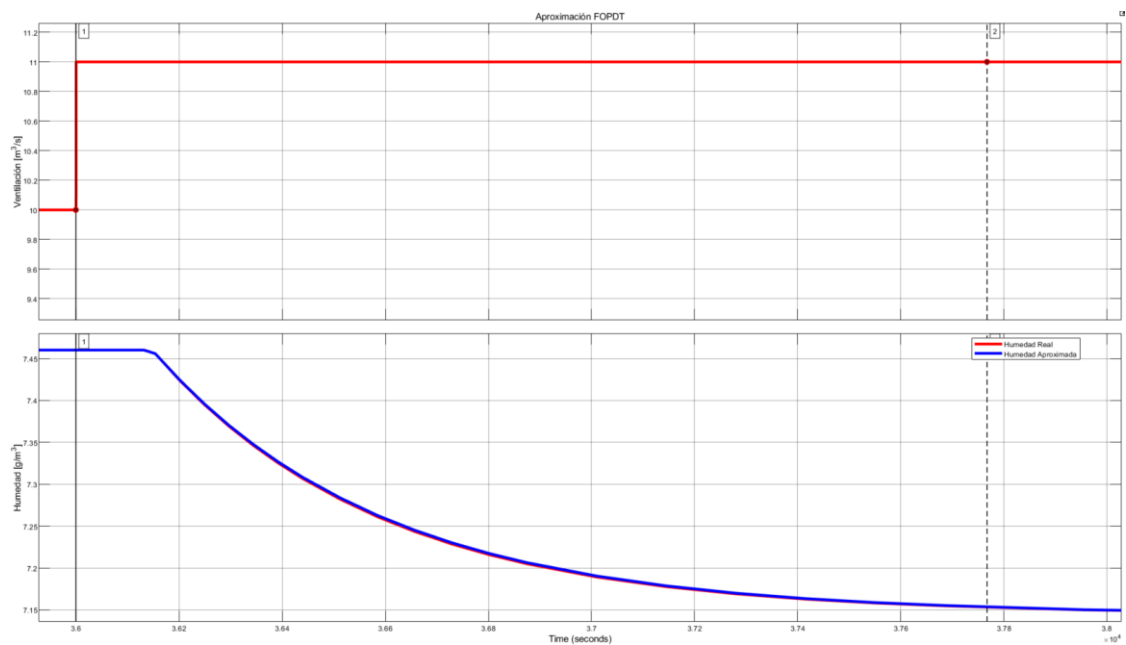


Figura 10: Validación de la humedad con cambio en ventilación con respecto al modelo matemático.

Esta técnica se repite para cada uno de los casos tanto para humedad como para temperatura. Como se muestra en las siguientes curvas de reacción.

Curva de reacción de la temperatura ante un cambio en la ventilación

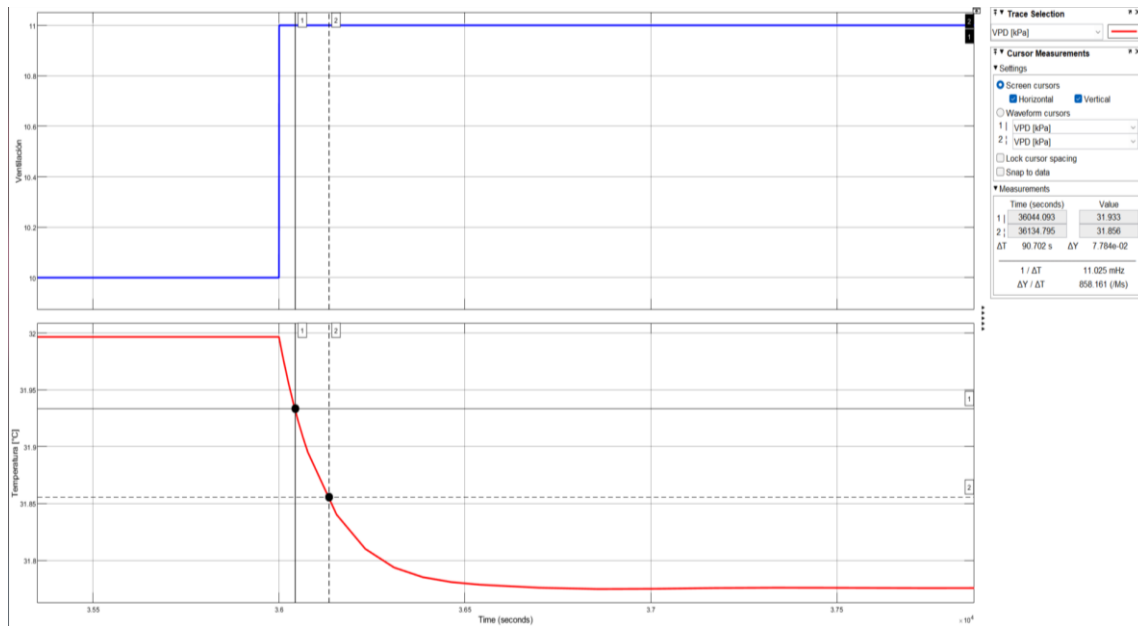


Figura 11: Curva de reacción de la temperatura ante un cambio en la ventilación.

Los parámetros obtenidos de la figura 11 y en base a las ecuaciones (1), (2) y (3) fueron los siguientes:

$$K = -0.22 \quad (24)$$

$$\tau = 136.045 \text{ [s]} \quad (25)$$

$$t_0 = 147.625 \text{ [s]} \quad (26)$$

$$G_{11}(s) = \frac{-0.22 \cdot e^{-147.625s}}{136.045s + 1} \quad (27)$$

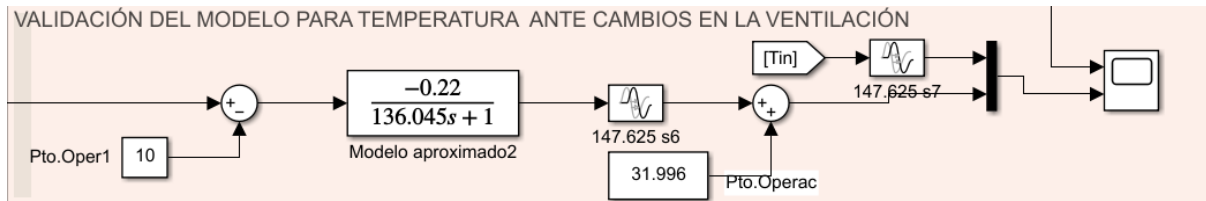


Figura 12: Esquema usado para validación del modelo para temperatura ante cambios de ventilación.

En esta validación se puede observar en la figura 13 que la función de transferencia obtenida en contraste con el modelo matemático de igual manera nos arroja un resultado casi perfecto.

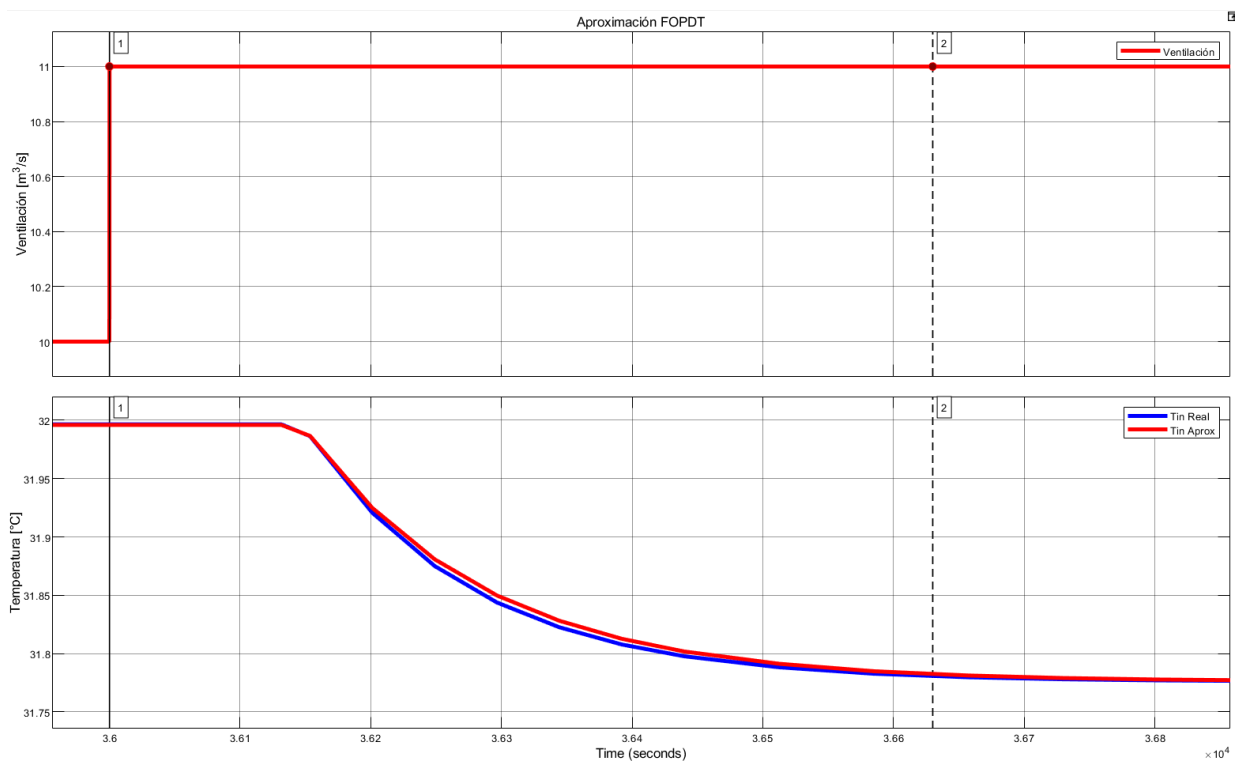


Figura 13: Validación de la temperatura con cambio en ventilación con respecto al modelo matemático.

Curva de reacción de la temperatura ante un cambio de nebulización

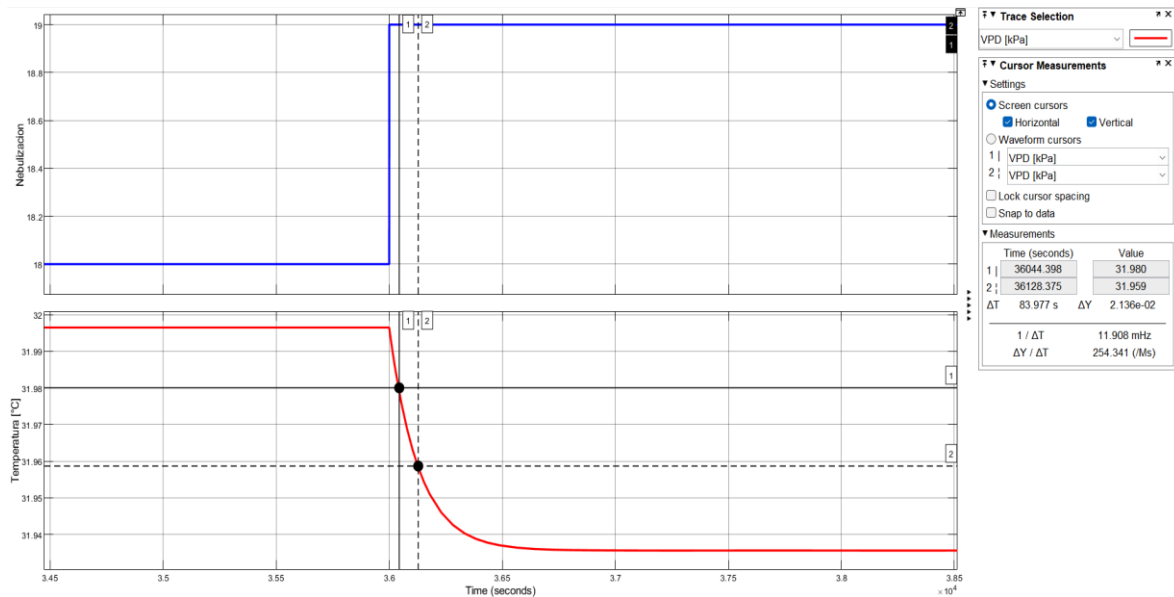


Figura 14: curva de reacción de la temperatura ante un cambio de nebulización.

Los parámetros obtenidos de la figura 14 y en base a las ecuaciones (1), (2) y (3) fueron los siguientes:

$$K = -0.06 \quad (28)$$

$$\tau = 125.965 [s] \quad (29)$$

$$t_0 = 147.625[s] \quad (30)$$

$$G_{12}(s) = \frac{-0.06 \cdot e^{-147.625s}}{(125.965)s + 1} \quad (31)$$

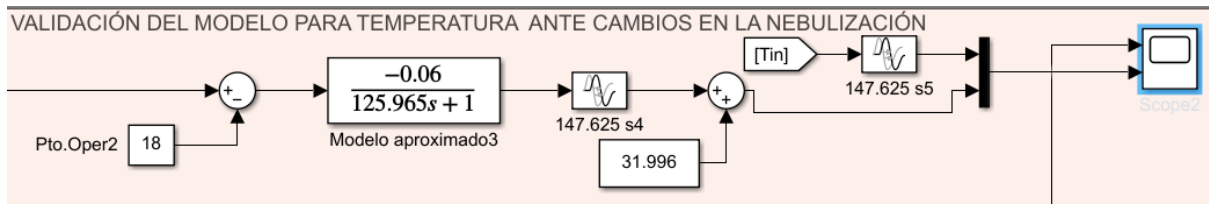


Figura 15: Esquema usado para validación del modelo obtenido matemáticamente para cada uno de los cambios realizados.

En esta validación se puede observar en la figura 16 que la función de transferencia obtenida en contraste con el modelo matemático de igual manera nos arroja un resultado casi idéntico en el comportamiento real.

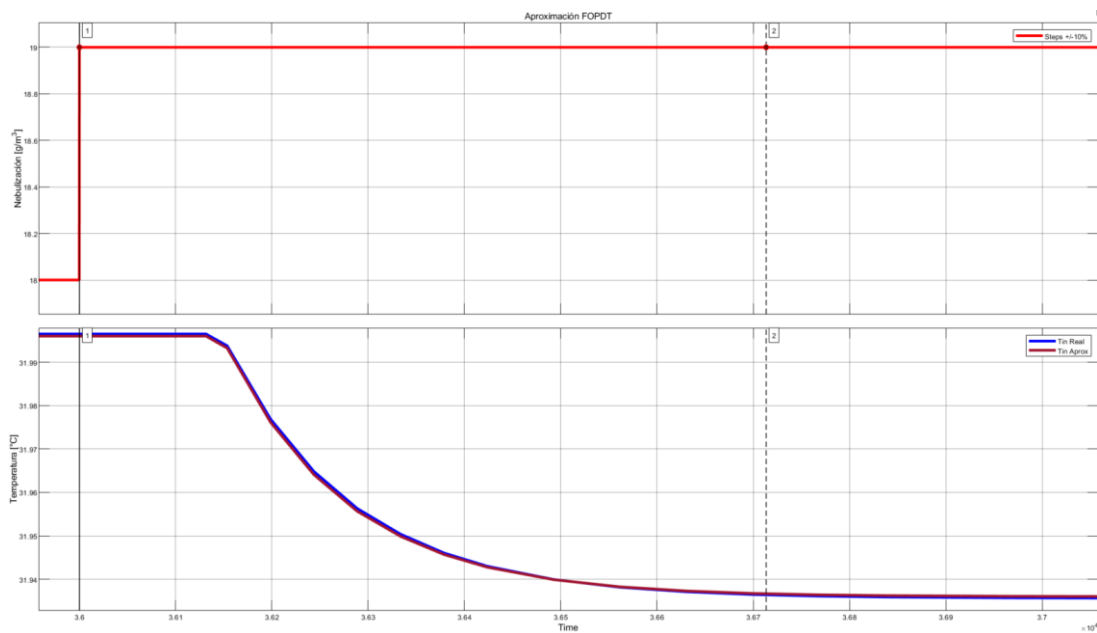


Figura 16: Validación de la temperatura con cambio en la nebulización respecto al modelo matemático.

Curva de reacción de la humedad ante un cambio en la nebulización

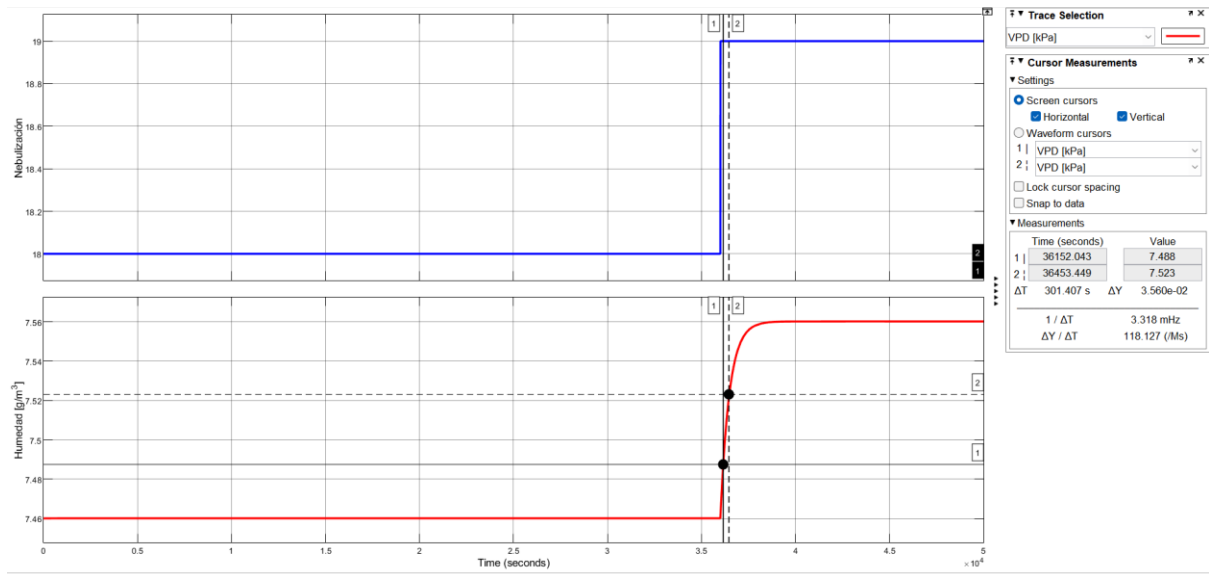


Figura 17: Curva de reacción a la nebulización para medir humedad

Los parámetros obtenidos de la figura 17 y en base a las ecuaciones (1), (2) y (3) fueron los siguientes:

$$K = 0.1 \quad (32)$$

$$\tau = 452.109 [s] \quad (33)$$

$$t_0 = 147.625[s] \quad (34)$$

$$G_{22}(s) = \frac{0.1 \cdot e^{-147.625s}}{(452.109)s + 1} \quad (35)$$

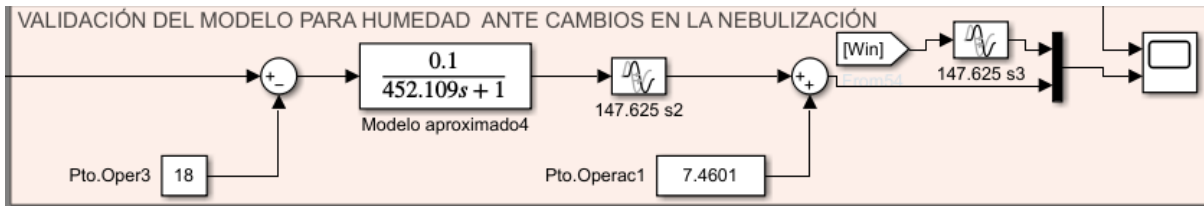


Figura 18: Esquema usado para validación del modelo obtenido matemáticamente para cada uno de los cambios realizados.

En esta validación se puede observar en la figura 19 que la función de transferencia obtenida en contraste con el modelo matemático de igual manera nos arroja un resultado ideal que sigue muy de cerca al modelo real.

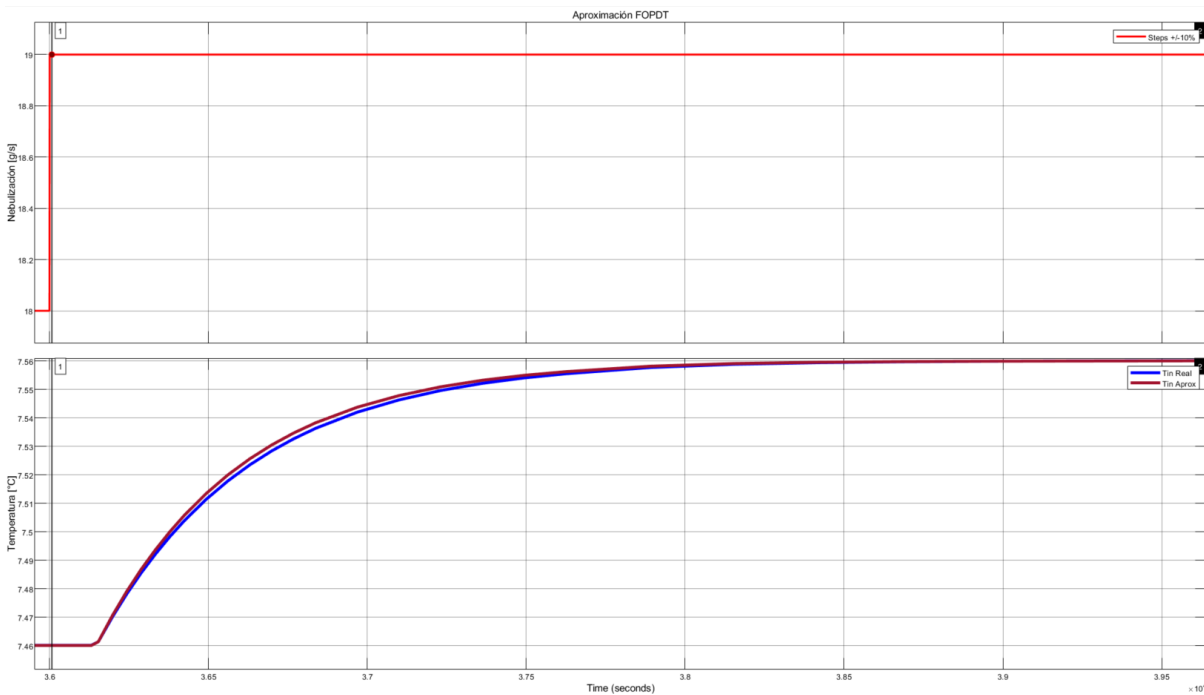


Figura 19: Validación de la humedad con cambio en la nebulización respecto al modelo matemático.

Método de la matriz de ganancias relativas (Bristol)

Una vez modelado todo el invernadero se plantea la matriz de funciones de transferencia del comportamiento del modelo previamente obtenido de las curvas de reacción, de la ecuación (8) tenemos que:

$$P_{n(s)} = \begin{pmatrix} \frac{-0.22 \cdot e^{-147.625s}}{136.045s + 1} & \frac{-0.06 \cdot e^{-147.625s}}{125.965s + 1} \\ \frac{-0.3146 \cdot e^{-147.625s}}{442.8165s + 1} & \frac{0.1 \cdot e^{-147.625s}}{452.109s + 1} \end{pmatrix} \quad (36)$$

Las ganancias de cada una de las funciones de transferencia serán utilizadas para calcular la matriz de Bristol por lo que quedaría de la siguiente manera:

$$A = \begin{pmatrix} -0.22 & -0.06 \\ -0.3146 & 0.100 \end{pmatrix} \left[\begin{pmatrix} -0.22 & -0.06 \\ -0.3146 & 0.100 \end{pmatrix}^{-1} \right]^T \quad (37)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0.538 & 0.461 \\ 0.461 & 0.538 \end{pmatrix} \quad (38)$$

Con lo que se tomaron los valores de las variables que más influencia tienen en el modelo que en este caso serían G_{11} y G_{22} . Debido al alto grado de interacción entre las dos variables, es necesario realizar el diseño de desacopladores.

Diseño de desacopladores

El desacoplador no es más que una ganancia en el caso de que este sea estático como es el caso, en el que debido a ese valor el sistema se desacopla. El diseño de desacopladores de acuerdo con [3] se obtienen a partir de la siguiente ecuación:

Primer desacoplador

$$D_{12(s)} = -\frac{G_{12(s)}}{G_{11(s)}} \quad (39)$$

$$D_{12(s)} = -0.2727 \quad (40)$$

Segundo desacoplador

$$D_{21(s)} = -\frac{G_{21(s)}}{G_{22(s)}} \quad (41)$$

$$D_{12(s)} = -0.2727 \quad (42)$$

Cabe mencionar que tanto el retardo como los polos se cancelan debido a que el primer caso es igual en todas las funciones de transferencia y en el segundo debido a que en el dominio de Laplace son muy cercanos, por lo que se les puede aproximar con el fin de ser cancelados.

Diseño de los controladores para cada uno de los métodos de control avanzados aplicados

Para el diseño de los controladores es importante recordar que la sintonización del controlador que va al interior del predictor de Smith no se puede realizar por métodos tradicionales como es Z-N y Dhalin, no es posible de aplicar debido a que esos tipos de sintonización consideran el retardo que es lo contrario que hacen los métodos de control avanzados los cuales buscan engañar al modelo al realizar los cálculos sin retardo por lo que se considera para la sintonización la tabla 4.5 de [3] para sintonizar, al ser un modelo de primer orden el literal A nos sirve perfectamente.

	Modelo	$K_c K$	τ_i	τ_d
A	$\frac{K}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{\tau_c}$	τ	-

Figura 20: Imagen recortada de la tabla 4.5 mostrando el literal A [3].

Claro que hay que tener en cuenta las siguientes recomendaciones al momento de considerar el factor de ajuste τ_c , la primera es tener una buena velocidad de respuesta y la segunda tener un buen rechazo a perturbaciones. Además, de una buena robustez y estabilidad.

Se considera que τ_c es un valor menor que τ y mayor que τ_0 con $\tau_0 = \tau_c$ [3].

Diseño de controladores para método de control por predictor de Smith.

Para el controlador $G_{C(s)}$ que va dentro del esquema de predictor de Smith como se aprecia en la figura 1 se utilizó un controlador de tipo PI debido a que es el que mejor respuesta nos otorga para la estabilidad del modelo al ser más rápido y seguir la referencia de manera más eficaz.

Controlador de SP temperatura.

Es necesario el diseño de dos controladores de tipo PI, ya que son dos variables las que vamos a controlar para el primer controlador de temperatura se tiene que:

$$G_{C_{11}(s)} = Kp \left(\frac{\tau_{i1}s + 1}{\tau_{i1}s} \right) \quad (43)$$

$$G_{C_{11}(s)} = Kp \left(\frac{136.045 s + 1}{136.045 s} \right) \quad (44)$$

Para cálculo de Kp tenemos que:

$$Kp = \left(\frac{\tau_1}{(2 \cdot \tau_c) \cdot K} \right) \quad (45)$$

$$Kp = \left(\frac{1}{2 \cdot (-0.22)} \right) \quad (46)$$

$$Kp = -2.2727 \quad (47)$$

Teniendo que la forma final del controlador sintonizado es:

$$G_{C_{11}(s)} = -2.2727 \left(\frac{136.045 s + 1}{136.045 s} \right) \quad (48)$$

Controlador de SP Humedad.

Hay que tener en cuenta que el factor de ajuste con el que mejor resultados nos dieron las simulaciones una vez implementadas, fue con $\tau_c = 2$ en ambos casos por lo que el segundo controlador de humedad queda de la siguiente manera realizando los mismos pasos que en el primer controlador, tenemos que:

$$G_{c22(s)} = Kp \left(\frac{452.109 s + 1}{452.109 s} \right) \quad (49)$$

Para el cálculo de Kp tenemos que:

$$Kp = \left(\frac{1}{2 \cdot (0.1)} \right) \quad (50)$$

$$Kp = 5 \quad (51)$$

Y su forma final es:

$$G_{c22(s)} = 5 \left(\frac{452.109 s + 1}{452.109 s} \right) \quad (52)$$

De esta forma tendríamos los valores de sintonización para los dos controladores PI.

Diseño de los controladores para método de control por Modelo Interno.

Controlador de IMC temperatura.

Para el caso de la temperatura tenemos que definir el modelo de la planta de la siguiente manera:

$$G_{m1(s)} = \frac{ke^{-t_0s}}{\tau s + 1} \quad (53)$$

$$G_{m1(s)} = \frac{-0.22 \cdot e^{-147.625s}}{136.045s + 1} \quad (54)$$

Considerando: $Gm1(s) = Gm1(s)^- Gm1(s)^+$

La parte invertible sería:

$$Gm1(s)^+ = \frac{-0.22}{136.045s + 1} \quad (55)$$

Y la parte no invertible es:

$$Gm1(s)^- = e^{-147.625s} \quad (56)$$

Por lo tanto, la sintonización del controlador quedaría:

$$Gc1(s) = \left[\frac{1}{\tau f + 1} \right]^n (Gm1(s)^-)^{-1} \quad (57)$$

Siendo τf un factor de ajuste:

$$\tau f = \begin{bmatrix} \tau f & = 2\tau \\ \tau f & = 0.5\tau \end{bmatrix} \quad (58)$$

Se utilizó: $\tau f = 2\tau$

$$Gc1(s) = \left[\frac{1}{2 * 136.045s + 1} \right]^1 \left(\frac{136.045s + 1}{-0.22} \right) \quad (59)$$

$$Gc1(s) = -\frac{1}{0.22} \cdot \frac{136.045s + 1}{272.090s + 1} \quad (60)$$

Controlador de IMC humedad.

Para el caso de la humedad tenemos que definir el modelo de la planta de la siguiente manera:

$$Gm2(s) = \frac{ke^{-t0s}}{\tau s + 1} \quad (61)$$

$$Gm2(s) = \frac{0.1 \cdot e^{-147.625s}}{452.109s + 1} \quad (62)$$

Considerando: $Gm2(s) = Gm2(s)^- Gm2(s)^+$

La parte invertible sería:

$$Gm2(s)^+ = \frac{0.1}{452.109s + 1} \quad (63)$$

Y la parte no invertible es:

$$Gm2(s)^- = e^{-147.625s} \quad (64)$$

Por lo tanto, la sintonización del controlador quedaría que:

$$Gc2(s) = \left[\frac{1}{\tau f + 1} \right]^n (Gm2(s)^-)^{-1} \quad (65)$$

Siendo τf un factor de ajuste:

$$\tau f = \begin{bmatrix} \tau f & = 2\tau \\ \tau f & = 0.5\tau \end{bmatrix} \quad (66)$$

Se utilizó: $\tau f = 2\tau$

$$Gc2(s) = \left[\frac{1}{2 * 452.109s + 1} \right]^1 \left(\frac{452.109s + 1}{0.1} \right) \quad (67)$$

$$Gc2(s) = \frac{1}{0.1} \cdot \frac{452.109s + 1}{904.218s + 1} \quad (68)$$

El parámetro de ajuste (τf) fue de 2τ , en ambos casos este factor evidencio un mejor desempeño en simulación.

Esquemas de control para cada uno de los métodos de control e implementación en

Simulink

Esquema de control SP.

Como se puede ver en la figura 21, el esquema desarrollado para el control del invernadero consta de dos controladores de tipo predictor de Smith a continuación de dos desacopladores y el invernadero. Por otra parte, en la figura 22 se muestra el esquema de

Simulink utilizado para los resultados de simulación, además, tanto en la figura 23 y 24 se muestran a detalle los bloques de SP para cada variable a controlar.

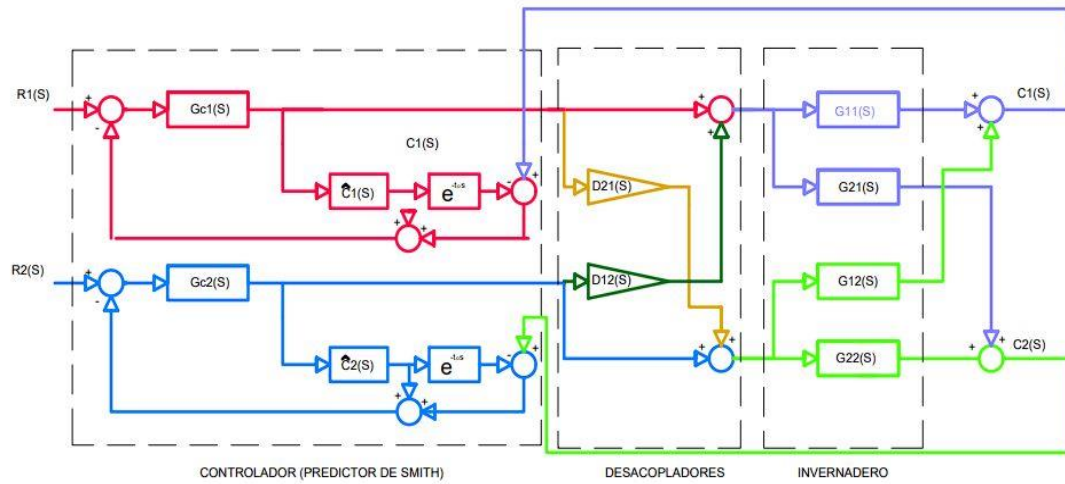


Figura 21: Esquema de control del predictor de Smith.

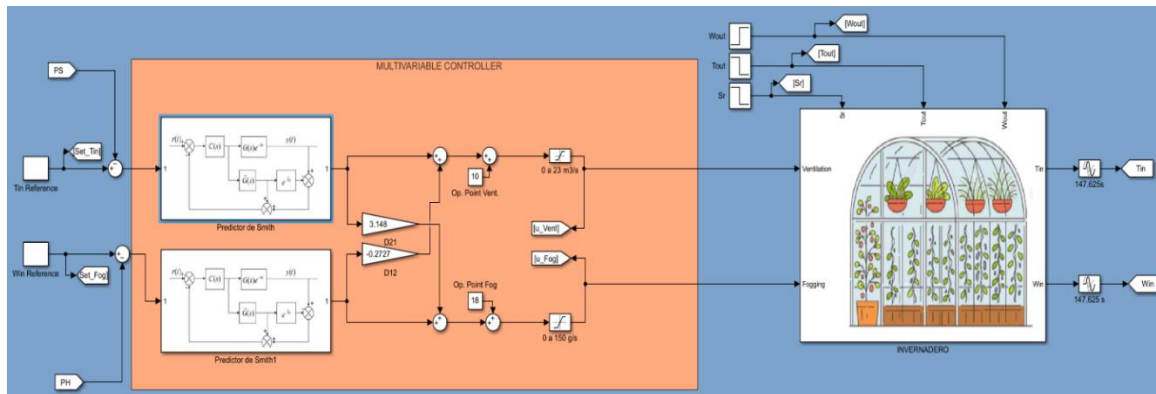


Figura 22: Esquema de control por SP implementado en Simulink.

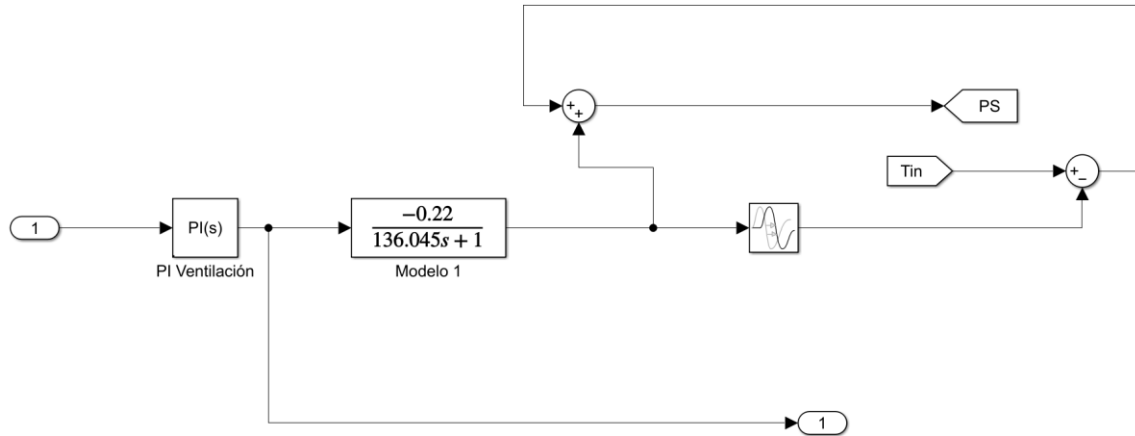


Figura 23: Esquema de control dentro del bloque del predictor de Smith para la temperatura.

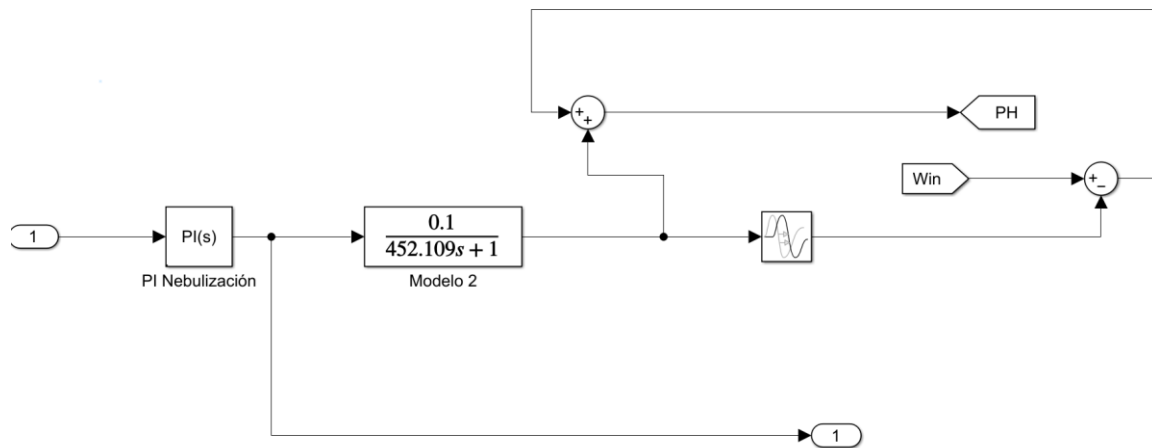


Figura 24: Esquema de control dentro del bloque del predictor de Smith para la humedad.

Se puede observar que se utilizaron etiquetas para definir las entradas de las señales provenientes del invernadero definidas como Tin y Win. En el caso de las salidas del predictor de Smith y que deben ser retroalimentadas se le dio el nombre de PS y PH para temperatura y humedad respectivamente.

Esquema de control por modelo interno.

Como se puede ver en la figura 25 el esquema desarrollado para el control del invernadero consta de dos controladores de tipo IMC a continuación de dos desacopladores y

el invernadero. Por otra parte, en la figura 26 se muestra el esquema de Simulink utilizado para los resultados de simulación, además, tanto en la figura 27 y 28 se muestran a detalle los bloques de IMC para cada variable a controlar.

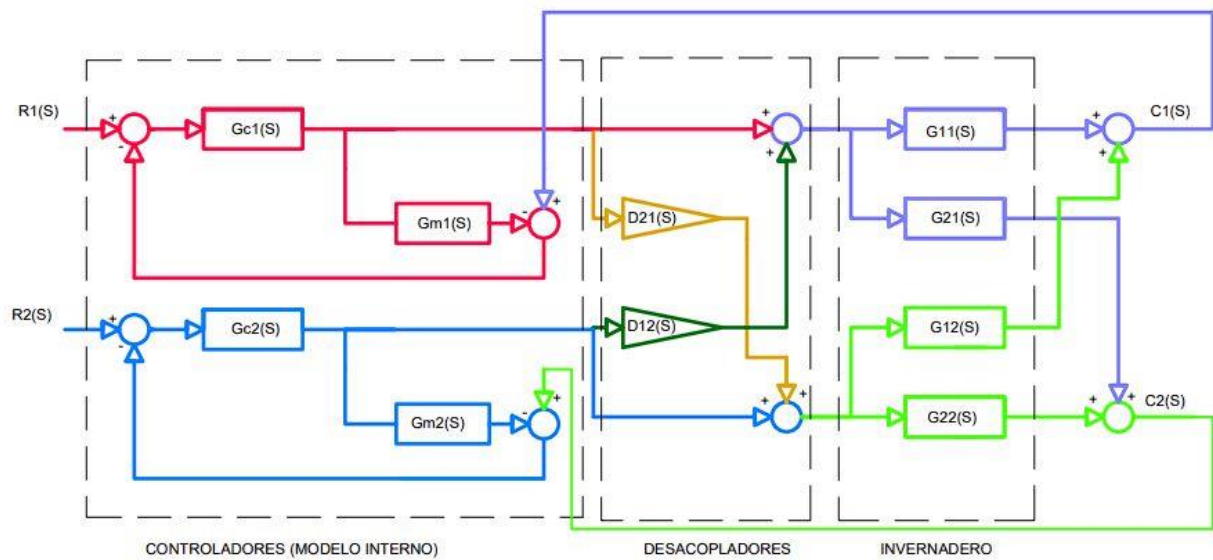


Figura 25: Esquema de control por modelo interno.

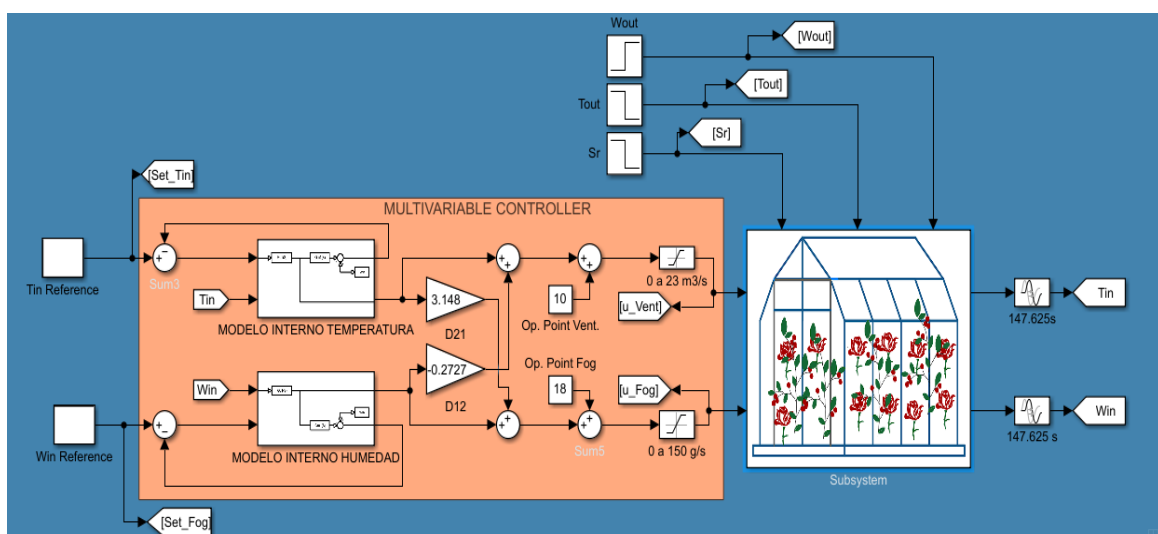


Figura 26: Esquema de control por modelo interno para invernadero implementado en Simulink.

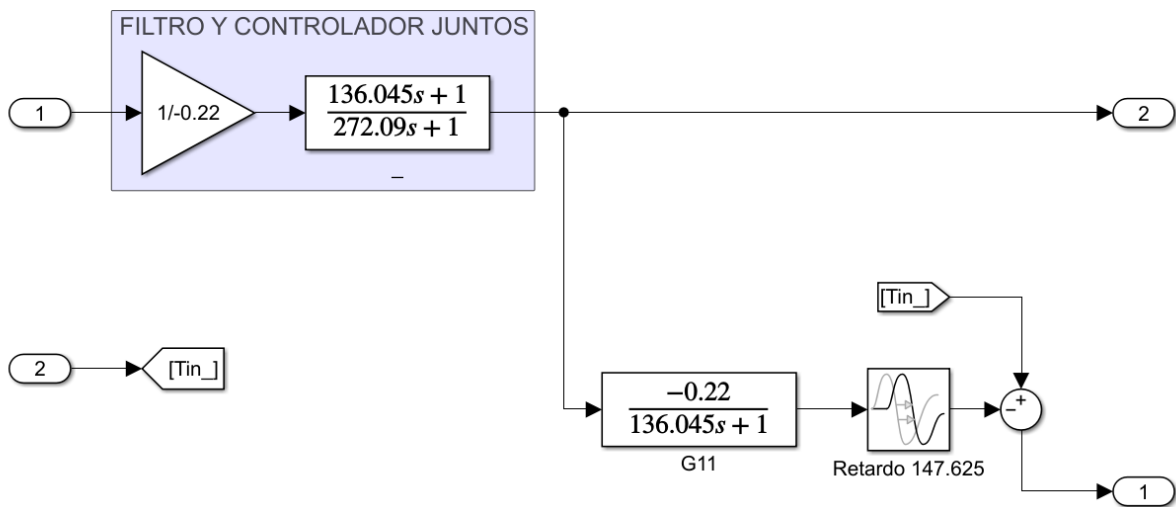


Figura 27: Esquema de control dentro del bloque del modelo interno para la temperatura.

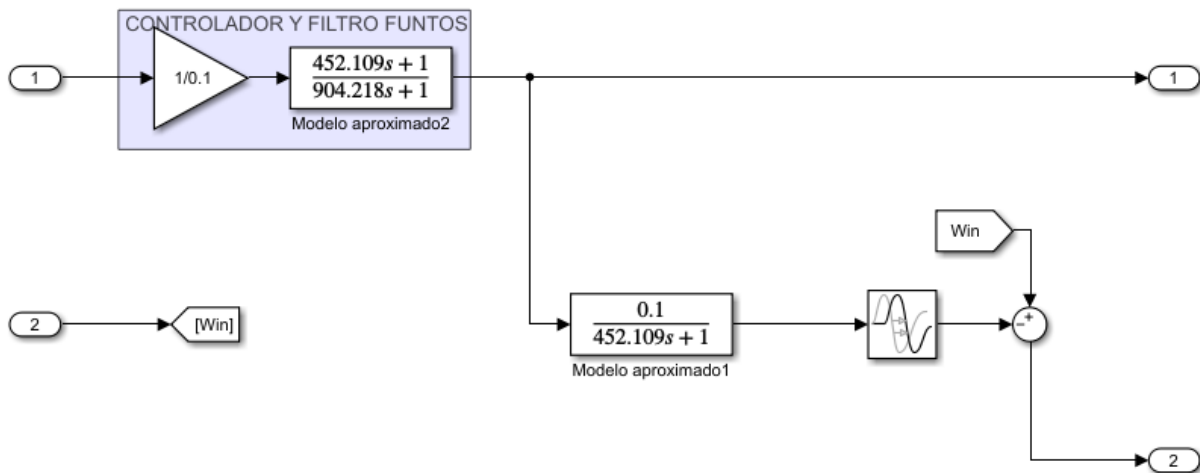


Figura 28: Esquema de control dentro del bloque del modelo interno para la humedad.

Resultados en Simulación de ambos modelos de control en Simulink

Los siguientes resultados se obtuvieron realizando una simulación de 12 horas que en formato de segundos son 43200 [s] y cambios de referencia tanto en temperatura como en humedad. Además, cabe señalar que se realizaron perturbaciones con cambios en la radiación

solar, temperatura y humedad exteriores. Esta configuración de simulación se la aplica por igual a los dos tipos de controladores implementados, los resultados que se obtuvieron son las respuestas de cada esquema de control tanto SP como IMC que se pueden observar desde la figura 29 a la figura 34 siendo estos resultados solo en simulación, así como su respectiva acción de control para cada controlador respecto de cada variable controlada.

Por otra parte, para determinar el desempeño de nuestros controladores utilizamos los índices de desempeño como la integral del cuadrado del error (ISE) por sus siglas en inglés, que tiene como principal objetivo reducir el error inicial y el ISCO el cual se encarga de medir el esfuerzo de la señal de control en el elemento final de control [3].

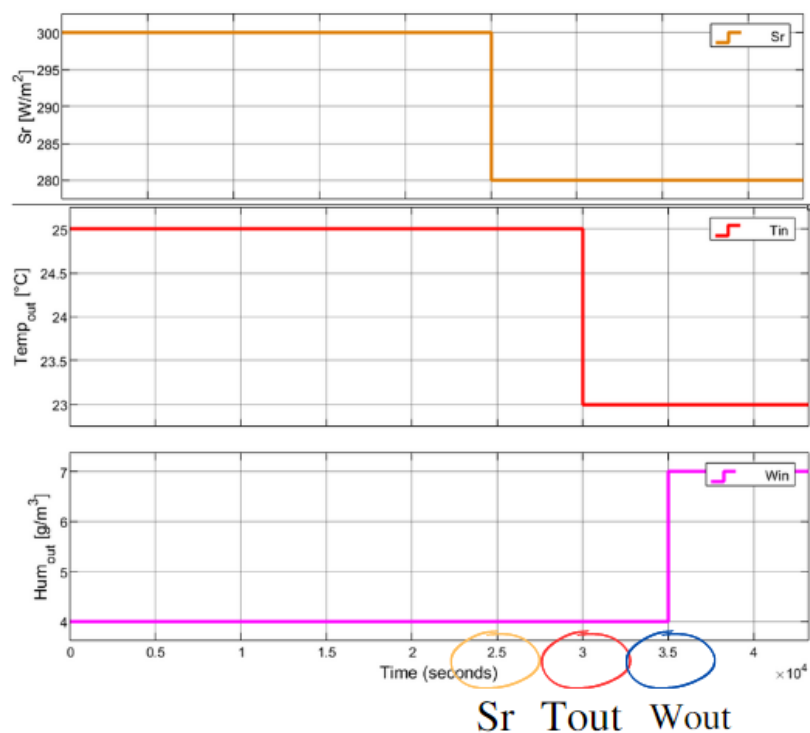


Figura 29: Perturbaciones utilizadas en resultados de simulación para el controlador de modelo SP.

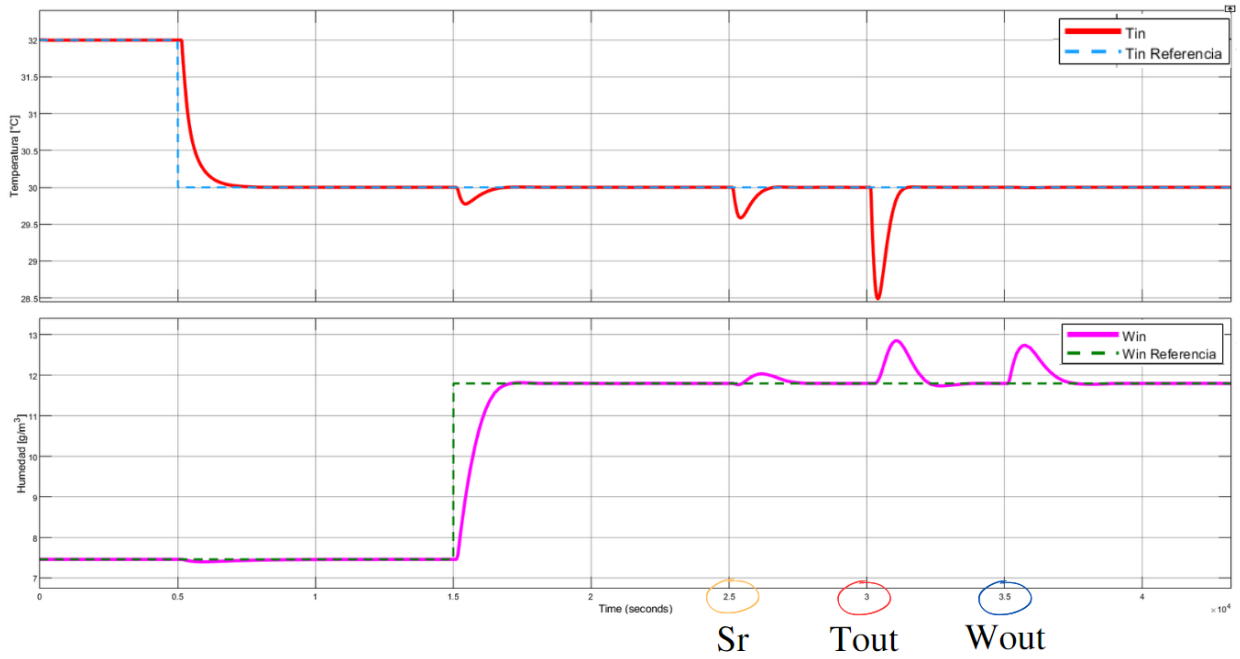


Figura 30: Resultados en simulación con el controlador de Predictor de Smith.

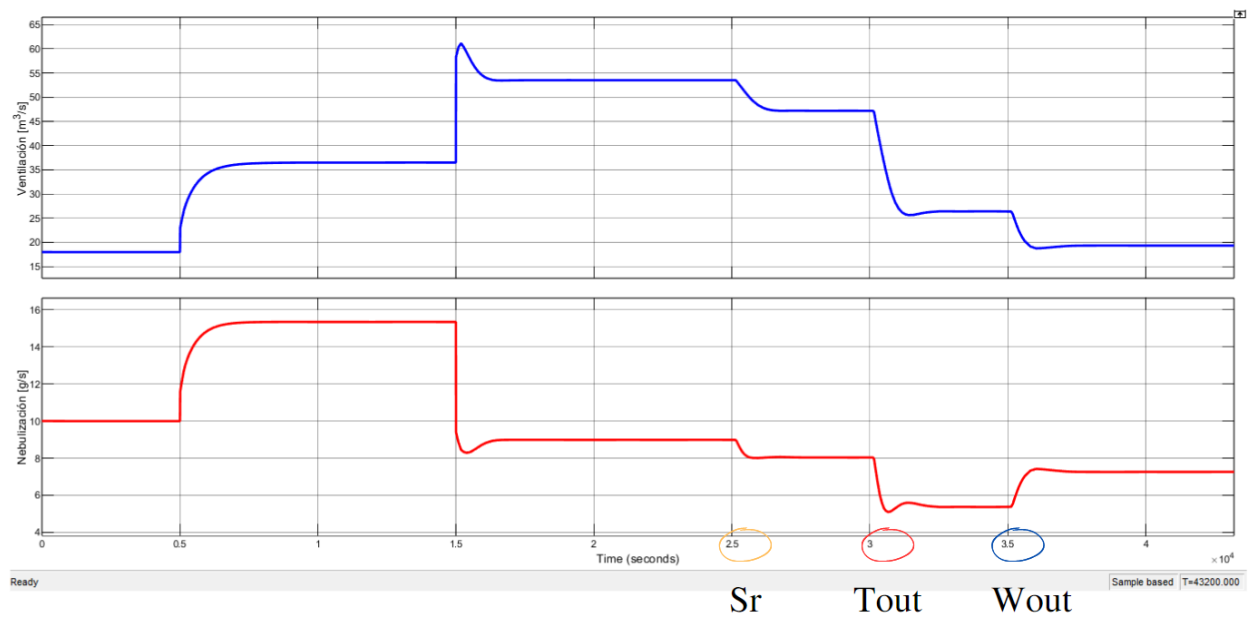


Figura 31: Acción de control del SP en simulación.

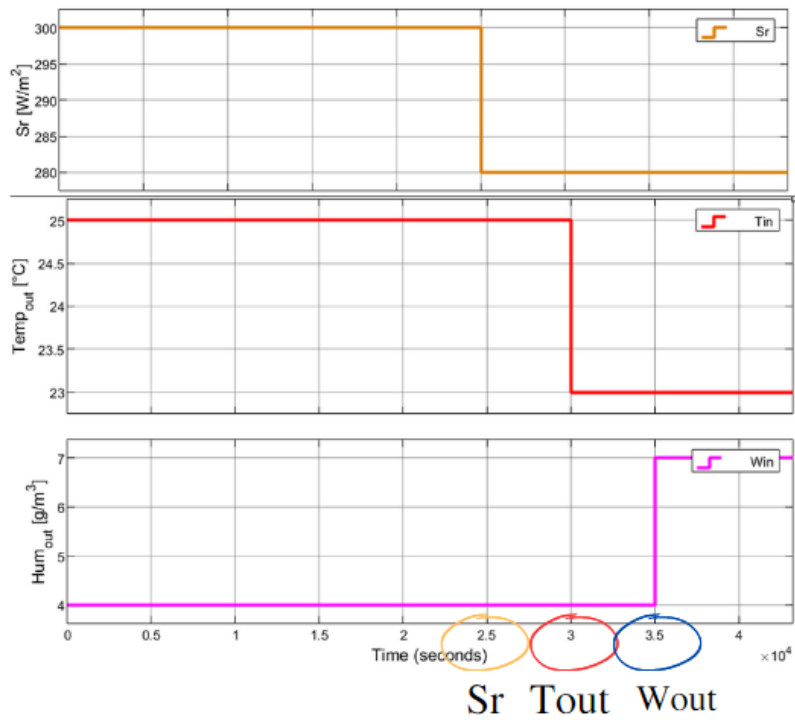


Figura 32: Perturbaciones utilizadas en resultados de simulación para el controlador de modelo IMC.

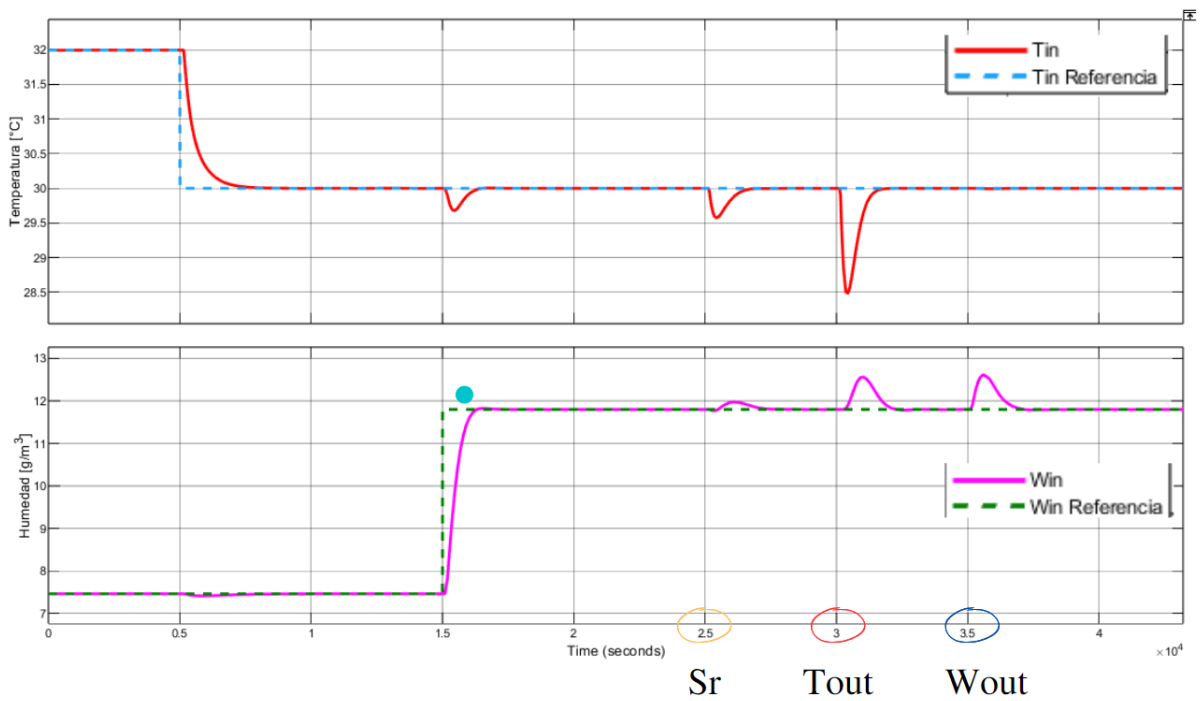


Figura 33: Resultados en simulación con el controlador IMC.

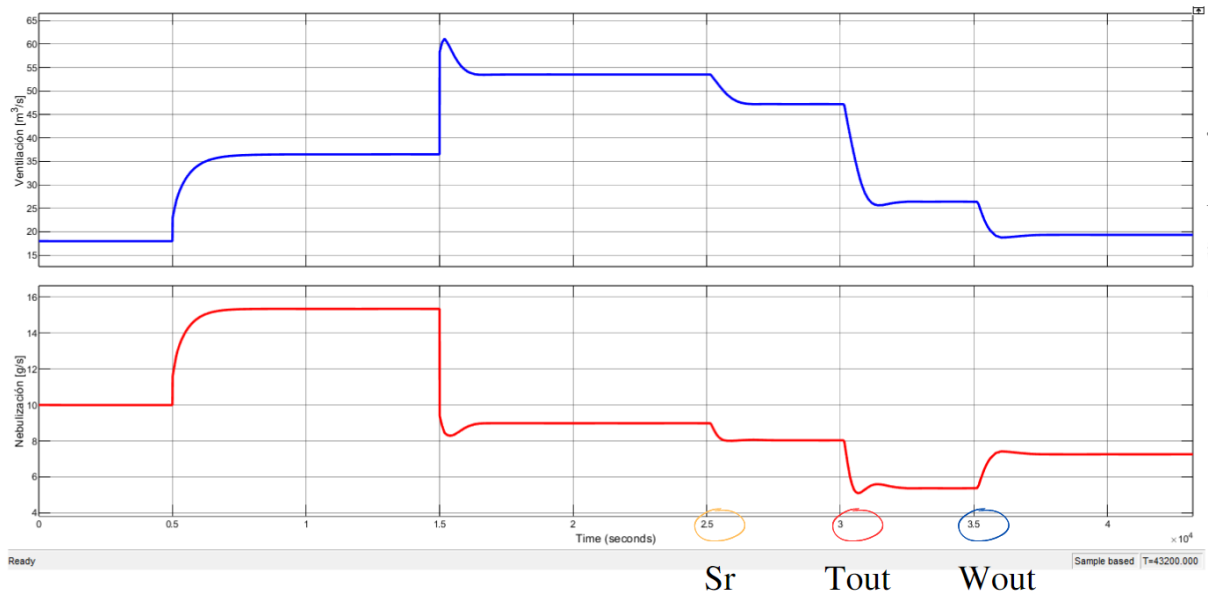


Figura 34: Acción de control del IMC en simulación.

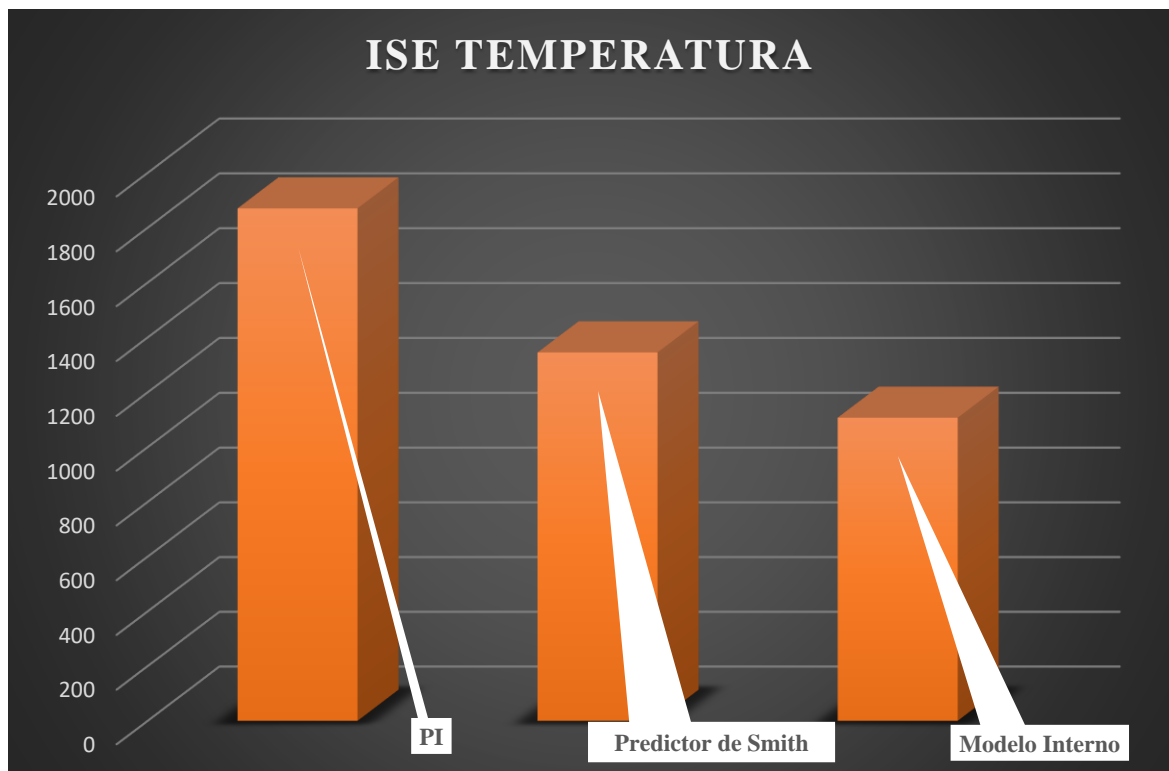


Figura 35: Resultados en simulación de ISE en temperatura para SP, IMC y PI.

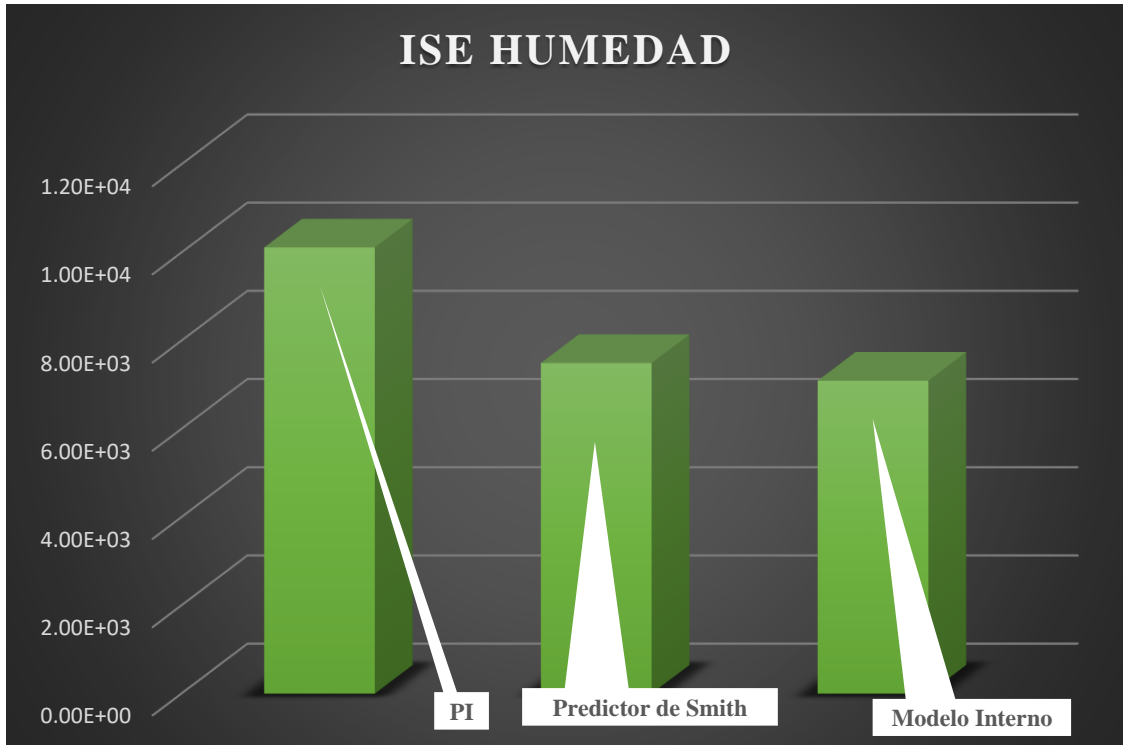


Figura 36: Resultados en simulación de ISE para la humedad para SP, IMC y PI.

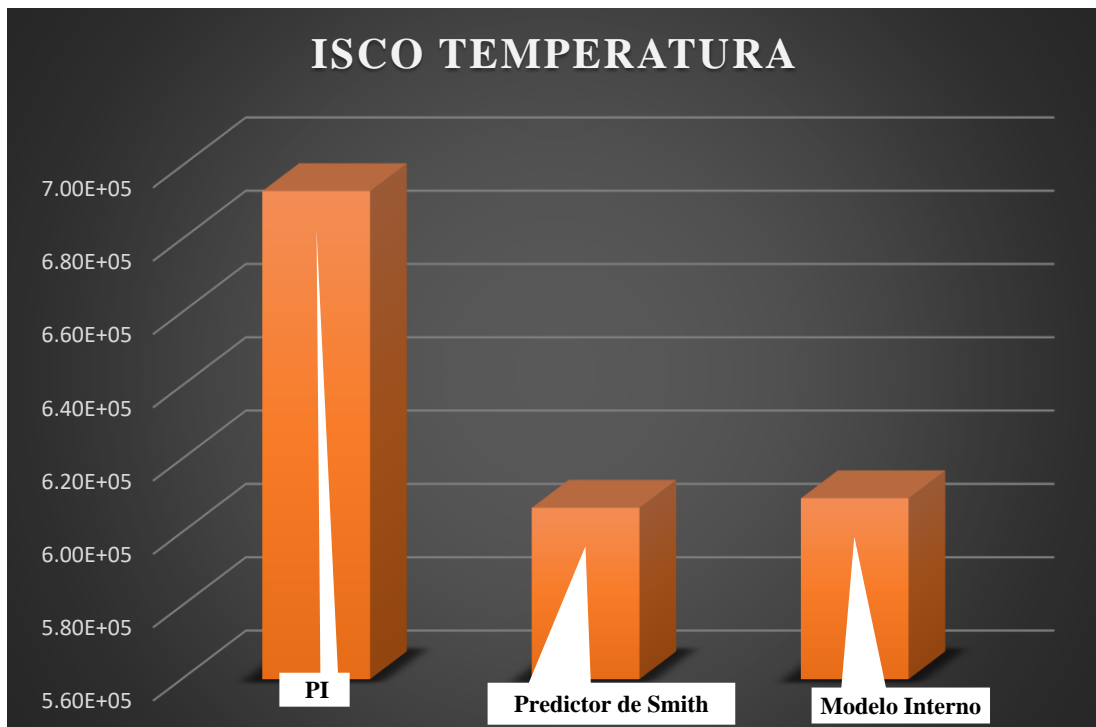


Figura 37: Resultados en simulación de ISCO para la temperatura para SP, IMC y PI.

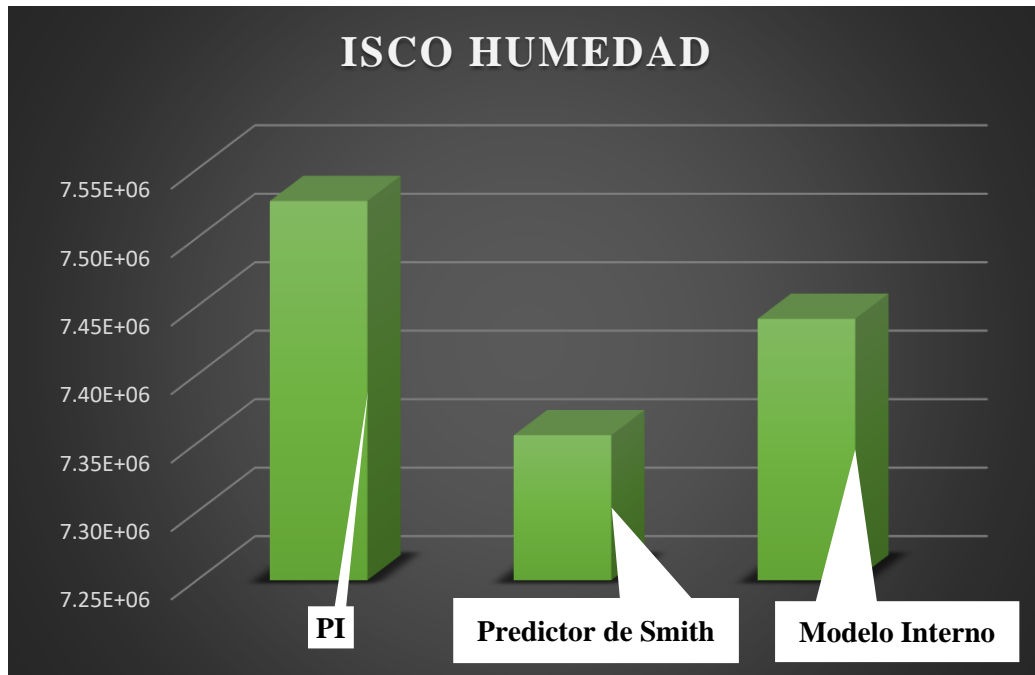


Figura 38: Resultados en simulación de ISCO para la humedad para SP, IMC y PI.

Los resultados obtenidos en base a los índices de desempeño se los puede analizar de una forma más sencilla gráficamente. En las figuras 29 y 32 se puede observar que se obtuvieron aparentemente los mismos resultados con señales de control adecuadas ante las perturbaciones y una estabilización y seguimiento de referencia adecuado, pero teniendo en cuenta que el tiempo de simulación es largo no se logran apreciar bien las diferencias que por el contrario son muy notorias cuando analizamos las figuras de los índices de desempeño para cada una de las variables en las que podemos apreciar que en la figura 35 la cual nos muestra el ISE obtenido para temperatura, la respuesta que nos arrojó es que el IMC es mejor, con un valor de error mucho menor que el SP y un PI que decidimos implementar de [4] para notar la gran diferencia que existe al usar estos métodos avanzados de control en donde se nota que tanto SP como IMC se desempeñan de mucho mejor manera. Por otro lado, la figura 36 que nos muestra el ISE de humedad, es notorio que el IMC es un poco mejor que el SP y que los dos métodos tanto SP e IMC superan por mucho el desempeño de un PI el cual tiene un error mucho mayor.

En cuanto a los resultados obtenidos con el índice de desempeño ISCO tanto para temperatura como para humedad de las figuras 37 y 38 respectivamente, nos muestra que el SP consigue un mejor desempeño si se lo compara con un IMC y sobre todo con un PI, más aún cuando se trata de la variable de humedad, por lo cual se determina que en cuanto a las señales de control producidas por un esquema SP, esta implementación será de mucha ayuda si el objetivo es que el elemento final de control tenga una vida útil más larga.

Implementación HIL

A continuación, se procederá a explicar cómo se realizó la implementación HIL teniendo en cuenta que los controladores deben ser programados en Arduino, por lo que será necesario discretizar cada parte del controlador tanto en SP e IMC, así como su retardo.

Por otra parte, dentro de las ecuaciones de los controladores se tomó en cuenta una consideración de tiempo en el que Arduino respecto del computador tarda en procesar la información por lo que será un factor de ajuste en cada ecuación como veremos más adelante.

Esquemas de comunicación entre Simulink y Arduino.

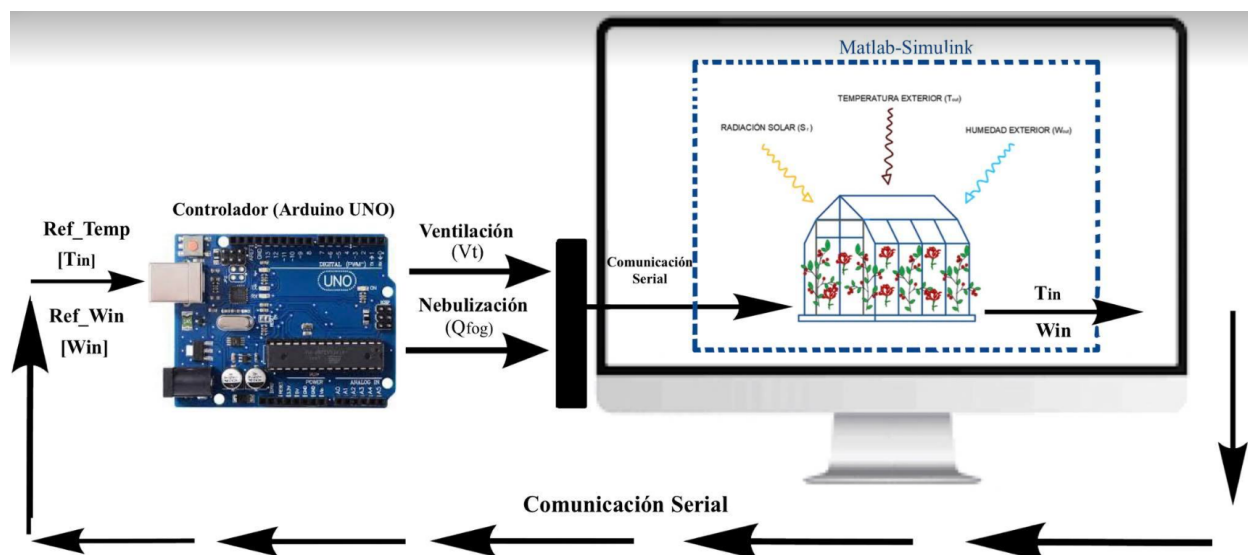


Figura 39: Esquema general de comunicación.

En general el esquema de comunicación se lo puede apreciar en la figura 39 en donde los controladores de tipo SP e IMC que se discretizaron fueron implementados en Arduino y el modelo matemático del invernadero en el programa de Simulink.

Bloque de comunicación entre Arduino y Matlab.

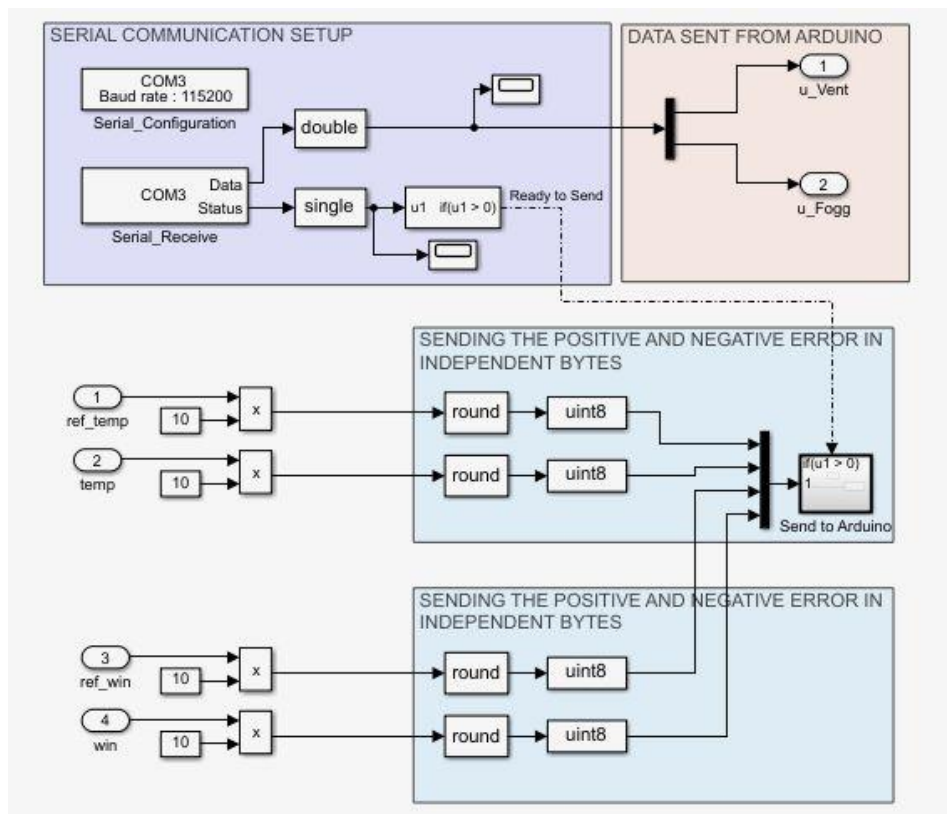


Figura 40: Bloque de comunicación Arduino Matlab.

Dentro del bloque de comunicación que se puede apreciar en la figura 41, se usaron bloques de tipo headers y terminators los cuales dentro de sus respectivos bloques manejan una comunicación de tipo ASCII que viene de su nombre en inglés de American Standard Code for Information Interchange los cuales también se definen en el código de Arduino.

En este caso la comunicación y el intercambio de datos empiezan cuando el Arduino recibe un dato válido y se transmiten a este como un entero de 8 bits.

Consideraciones en el proceso de digitalización e implementación en Arduino.

En este apartado se resolvieron los problemas que conlleva el implementar un sistema HIL y se consideran factores que podrían afectar el desempeño del sistema, como el tiempo en la comunicación serial que al tratarse de un modelo que se simula en tiempo real dentro de un software en este caso Simulink, este manda esas señales al controlador el cual las resuelve a una diferente velocidad y devuelve las respuestas de control un tiempo después por lo que existe un desfase en la comunicación a tener en cuenta de las señales producidas por las variables manipuladas. Por otra parte, al trabajar con comunicación serial es importante determinar un valor de sampleo para esta señal el cual fue calculado por el teorema de Shannon [7] que es el que determina cada cuanto se realiza el intercambio de información entre el controlador y el modelo.

Volviendo al tema del retardo que existe en la comunicación es importante tomar en cuenta el hardware del computador en el cual se trabaja, ya que es el procesador del computador el que determina la velocidad de simulación.

Por lo que el hardware utilizado por el computador fue:

- Procesador: 12th Gen Intel ® Core™ i5-12400F 2.50 GHz
- Ram: 16 GB
- Sistema: Sistema operativo de 64 bits, procesador x64
- Edición: Windows 11 Pro
- Versión: 22H2

La velocidad de muestreo que vamos a implementar en el Arduino es de suma importancia, ya que de esto depende que podamos hacer un control de la variable controlada

correcto, y para determinar el tiempo de muestreo aplicamos el teorema de Shannon [7]. Con lo que determinamos que el tiempo de muestreo óptimo es de:

$$T_m = 0.1[s] \quad (69)$$

Por otra parte, se realizaron pruebas de rendimiento en el intercambio de datos para obtener el tiempo de simulación que va a ser utilizado como factor de corrección en la discretización de las funciones de transferencia [4], para nuestro caso en específico realizamos tres pruebas en el que el computador solo ejecutaba Simulink, ya que el realizar o tener otras ventanas de aplicaciones abiertas afectan significativamente al proceso y los tiempos calculados. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 2: Resultados de las pruebas de simulación con los tiempos obtenidos en el Arduino UNO.

Prueba 1	109 [s]
Prueba 2	108 [s]
Prueba 3	107 [s]

En base a esto realizamos un promedio y obtuvimos que el valor del tiempo de simulación real a usar será 108 [s]. Este tiempo debe ser ajustado en base a una relación simple en el tiempo real y el simulado, el cual queda de la siguiente forma:

$$T_f = \frac{T_{real}}{T_{simulado}} \quad (70)$$

$$T_f = \frac{108}{43200} \quad (71)$$

$$T_f = 0.0025[s] \quad (72)$$

Ajuste del factor de tiempo para las funciones de transferencia de los controladores SP e IMC, modelos aproximados del invernadero y retardo.

Este factor se aplica a cada una de las funciones de transferencia en donde la constante de tiempo está presente, que en el caso del predictor de Smith e IMC incluye los controladores para cada variable, el modelo aproximado del invernadero para temperatura y humedad y al final el retardo siendo este igual para los dos modelos aproximados. En el caso de los dos controladores de tipo SP para temperatura y humedad quedan de la siguiente forma respectivamente:

$$G_{c11(s)} = -2.27 \left(\frac{136.045 (T_f) s + 1}{136.045 (T_f) s} \right) \quad (73)$$

$$G_{c22(s)} = 5 \left(\frac{452.109 (T_f) s + 1}{452.109 (T_f) s} \right) \quad (74)$$

Por otra parte, los modelos aproximados del invernadero para temperatura y humedad con factor de tiempo corregido respectivamente quedan así:

$$\hat{C}p_1 = \frac{-0.22}{136.045 (T_f) s + 1} \quad (75)$$

$$\hat{C}p_2 = \frac{0.1}{452.109 (T_f) s + 1} \quad (76)$$

Para el controlador IMC tanto para temperatura como humedad con el factor de corrección de tiempo en simulación tenemos que quedaría de la siguiente forma respectivamente:

$$Gc1(s) = \left(-\frac{1}{0.22}\right) \left(\frac{136.045s (T_f) + 1}{272.090s (T_f) + 1}\right) \quad (77)$$

$$Gc2(s) = \left(\frac{1}{0.1}\right) \left(\frac{452.109s (T_f) + 1}{904.218s (T_f) + 1}\right) \quad (78)$$

En el caso del retardo, para su discretización es preciso representarlo como una función de transferencia, esto se realizó a través de la aproximación de PADE [3] y de igual manera se aplicaría el factor de corrección de tiempo con lo que se obtuvo lo siguiente:

$$e^{-147.625s} = \frac{1 - \left(\frac{147.625}{2}\right)s}{1 + \left(\frac{147.625}{2}\right)s} \quad (79)$$

$$e^{-147.625s} = \frac{1 - 73.8125 s}{1 + 73.8125 s} \quad (80)$$

$$e^{-147.625s} = \frac{1 - 73.8125 (T_f) s}{1 + 73.8125 (T_f) s} \quad (81)$$

Discretización de las funciones de transferencia con ajuste de tiempo de los controladores SP e IMC, modelos aproximados del invernadero y retardo.

Los controladores SP e IMC, modelos aproximados y retardo, son funciones de transferencia con su respectivo factor de ajuste en las constantes de tiempo, estas se representan en dominio de Laplace, ya que son sistemas continuos los cuales se pueden transformar o aproximar a un sistema en dominio discreto mediante varios métodos, el que decidimos utilizar

fue el modelo de Tustin [8]. Para realizar estas aproximaciones tenemos que la aproximación de una función S a dominio Z tiene una equivalencia de:

$$s = \frac{2}{T_m} \cdot \left(\frac{z-1}{z+1} \right) \quad (82)$$

Cabe mencionar que para este proceso se utilizó Matlab, ya que cuenta con la función de transformación de Tustin que nos permite calcular de manera directa y precisa la discretización con lo que obtuvimos los siguientes resultados.

En cuanto a los controladores de SP de temperatura y humedad discretizados se obtuvieron las siguientes discretizaciones respectivamente:

$$\frac{U_1(z)}{e_1(z)} = -2.6037 \left[\frac{z-0.7437}{z-1} \right] \quad (83)$$

$$\frac{U_2(z)}{e_2(z)} = 5.2212 \left[\frac{z-0.9153}{z-1} \right] \quad (84)$$

Por otra parte, en cuanto a los controladores de IMC de temperatura y humedad discretizados se obtuvieron las siguientes discretizaciones respectivamente:

$$\frac{U_1(z)}{e_1(z)} = \left[\frac{-2.4283(z-0.7457)}{z-0.8631} \right] \quad (85)$$

$$\frac{U_2(z)}{e_2(z)} = \left[\frac{5.1082(z-0.9153)}{z-0.9567} \right] \quad (86)$$

En cuanto a los modelos aproximados del invernadero tanto en temperatura como humedad su discretización quedó de la siguiente forma respectivamente:

$$\frac{U_1(z)}{e_1(z)} = \left[\frac{-0.028197(z+1)}{z-0.7437} \right] \quad (87)$$

$$\frac{U_2(z)}{e_2(z)} = \left[\frac{0.0042363(z + 1)}{(z - 0.9153)} \right] \quad (88)$$

Por último la discretización del retardo quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{U(z)}{e(z)} = \left[\frac{-0.57362(z - 1.743)}{(z - 0.5736)} \right] \quad (89)$$

Ecuaciones en diferencias de las funciones de transferencia en Z de los controladores SP e IMC, modelos aproximados del invernadero y retardo.

Para obtener una ecuación en diferencia se necesita realizar la transformada inversa de Z y despejar la variable $U(k)$, esto se logra pasando nuestra función de transferencia en Z a términos de exponentes negativos a partir de la división del numerador y denominador por Z las veces que sean necesarias [8]. Estas ecuaciones obtenidas serán las que se implementarán en el código de arduino y respresentaran todo nuestro trabajo realizado como los controladores SP e IMC para cada variable, los modelos aproximados del invernadero de igual forma para cada variable y por último el retardo.

El proceso desarrollado para la obtención de las ecuaciones en diferencias se desarrollará por completo para el SP y a partir de ahí se mostrarán los resultados obtenidos para IMC, modelos aproximados del invernadero y retardo.

Por lo que tenemos que el desarrollo para los controladores de SP es de la siguiente forma.

Primero tenemos nuestro controlador de SP para temperatura con su función de transferencia de Z de la siguiente forma:

$$\frac{U_1(z)}{e_1(z)} = -2.6037 \left[\frac{z - 0.7437}{(z - 1)} \right] \quad (88)$$

Se procede pasar a Z a un orden de exponente negativo

$$\frac{U_1(z)}{e_1(z)} = -2.6037 \left[\frac{z - 0.7437}{(z - 1)} \right] \left[\frac{z^{-1}}{z^{-1}} \right] \quad (90)$$

$$\frac{U_1(z)}{e_1(z)} = -2.6037 \left[\frac{(1 - 0.7437z^{-1})}{(1 - z^{-1})} \right] \quad (91)$$

Se despeja $U_1(k)$

$$U_1(z) - U_1(z)(z^{-1}) = e_1(z)(-2.6037) + e_1(0.7437)(2.6037 z^{-1}) \quad (92)$$

$$U_1(k) - U_1(k - 1) = e_1(k)(-2.6037) + e_1(k - 1)(0.7437)(2.6037) \quad (93)$$

Por lo que tenemos que:

$$U_1(k) = U_1(k - 1) - e_1(k)(2.6037) + e_1(k - 1)(0.7437)(2.6037) \quad (94)$$

Para el caso de nuestro controlador de SP para humedad tenemos su función de transferencia de Z de la siguiente forma:

$$\frac{U_2(z)}{e_2(z)} = 5.2212 \left[\frac{(z - 0.9153)}{(z - 1)} \right] \quad (95)$$

Se procede pasar a Z a un orden de exponente negativo

$$\frac{U_2(z)}{e_2(z)} = 5.2212 \left[\frac{(z - 0.9153)}{(z - 1)} \right] \left[\frac{z^{-1}}{z^{-1}} \right] \quad (96)$$

$$\frac{U_2(z)}{e_2(z)} = 5.2212 \left[\frac{[(1 - 0.9153z^{-1})]}{(1 - z^{-1})} \right] \quad (97)$$

Se despeja $U_2(k)$

$$U_2(z) - U_2(z)(z^{-1}) = e_2(z)(5.2212) - e_2(z)(5.2212)(0.9153 z^{-1}) \quad (98)$$

$$U_2(k) - U_2(k-1) = e_2(k)(5.2212) - e_2(k-1)(5.2212)(0.9153) \quad (99)$$

Por lo que tenemos que:

$$U_2(k) = U_2(k-1) + e_2(k)(5.2212) - e_2(k-1)(5.2212)(0.9153) \quad (100)$$

Tanto (94) como (100) representan las ecuaciones de diferencias que se implementaron en el código de arduino.

A continuación mostramos los resultados de la ecuación en diferencias obtenidas para el controlador IMC tanto en temperatura como humedad respectivamente.

$$U_1(k) = U_1(k-1)(0.8631) - e_1(k)(2.4283) + e_1(k-1)(1.8059) \quad (101)$$

$$U_2(k) = U_2(k-1)(0.9567) - e_2(k)(5.1082) + e_2(k-1)(4.6755) \quad (102)$$

Por otra parte, estos serían los resultados obtenidos para las aproximaciones del modelo de invernadero tanto para temperatura como para humedad respectivamente.

$$U_1(k) = U_1(k-1)(0.7437) - e_1(k)(-0.028197) - e_1(k-1)(0.028197) \quad (103)$$

$$U_2(k) = U_2(k-1)(0.9153) + e_2(k)(0.0042363) + e_2(k-1)(0.0042363) \quad (104)$$

En cuanto a la ecuación en diferencia para el retardo quedaría de la siguiente forma:

$$U(k) = U_2(k-1)(0.5736) - e(k)(0.57362) + e(k-1)(0.99981966) \quad (105)$$

Una vez obtenidos las ecuaciones en diferencia, se desarrolló el código en Arduino. Con esto se puede pasar finalmente a los resultados obtenidos en implementación HIL y compararlos entre sí con los índices de desempeño ISE e ISCO y a la vez con los resultados obtenidos en simulación.

Resultados en implementación HIL para los controladores SP e IMC.

Una vez implementadas las ecuaciones en diferencias de (94), (100), (101), (102), (103), (104) y (105) en código de Arduino se obtuvieron los siguientes resultados:

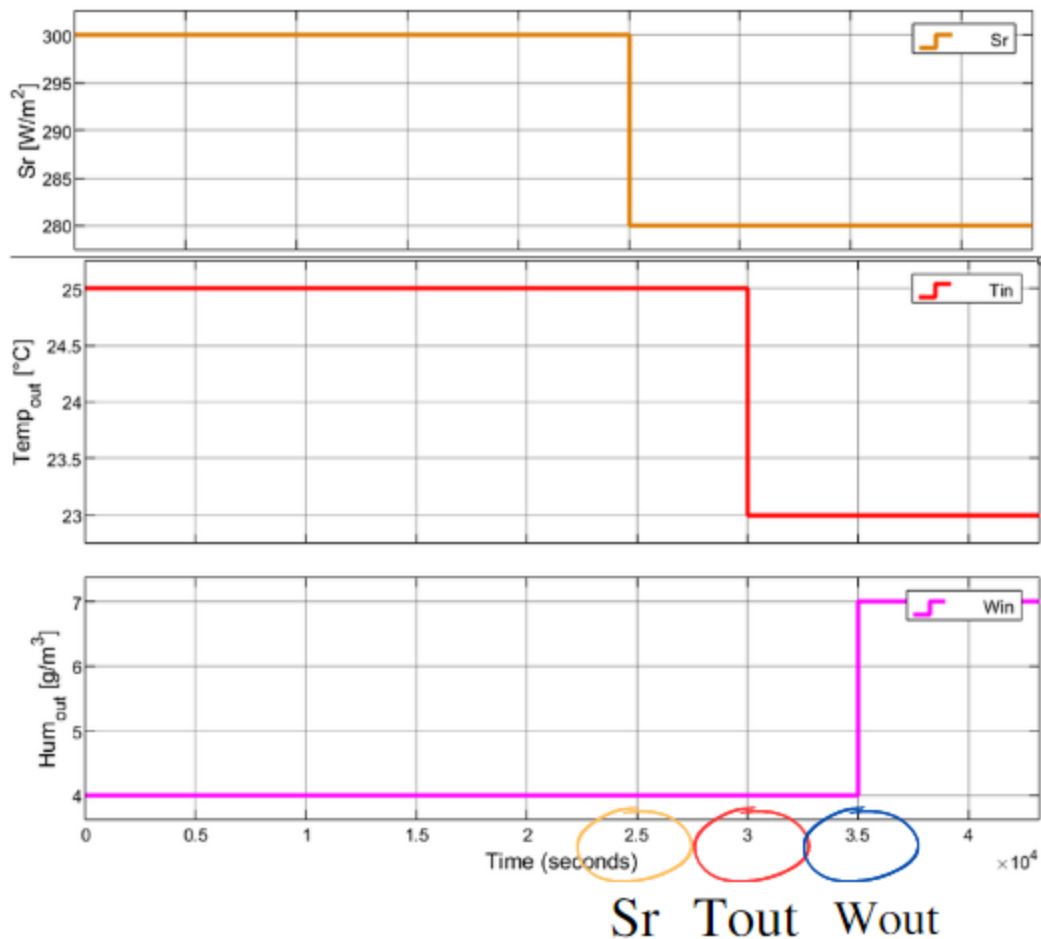


Figura 41: Perturbaciones implementadas en ambos modelos de control SP e IMC.

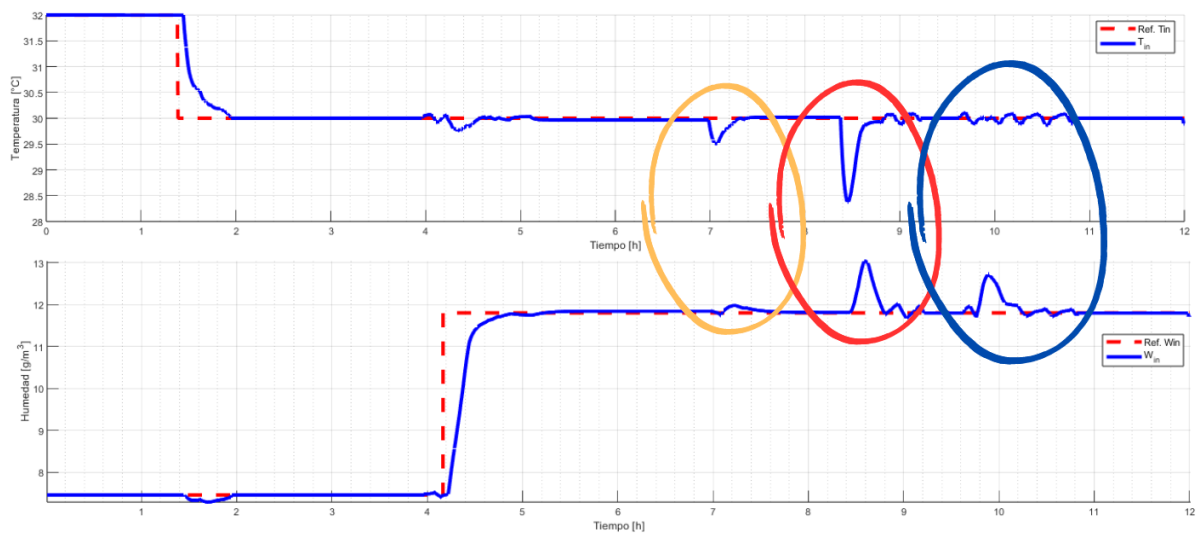


Figura 42: Resultados en HIL con el controlador de Predictor de Smith.

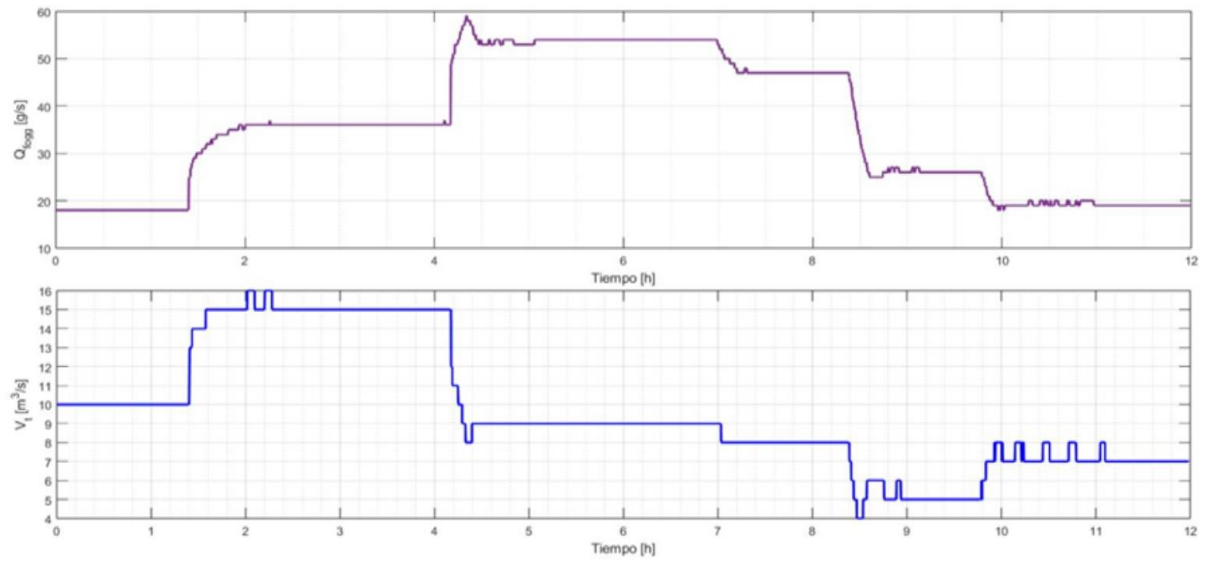


Figura 43: Acción de control del controlador SP.

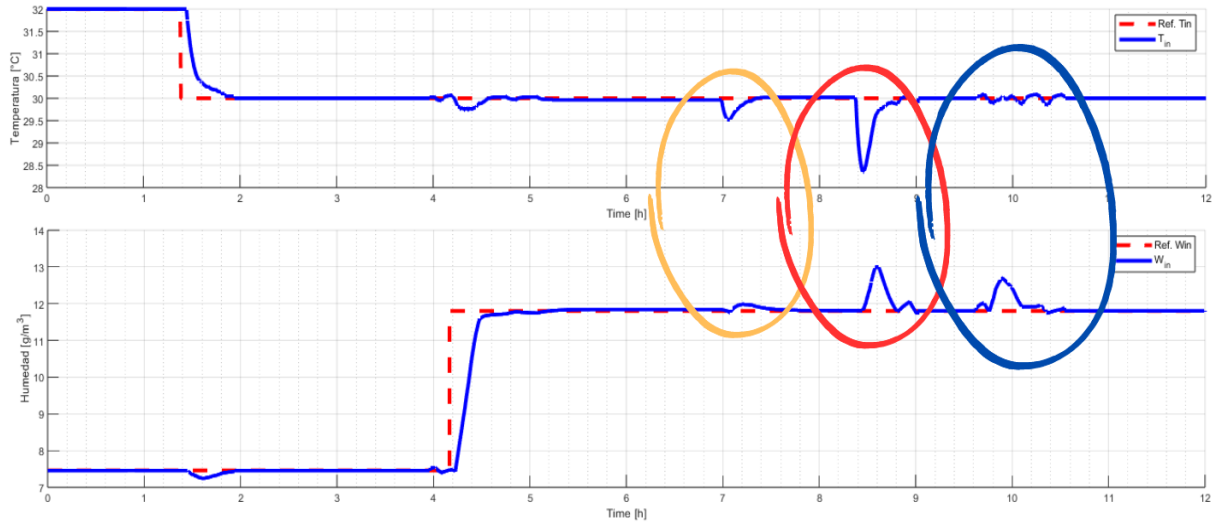


Figura 44: Resultados en HIL con el controlador IMC.

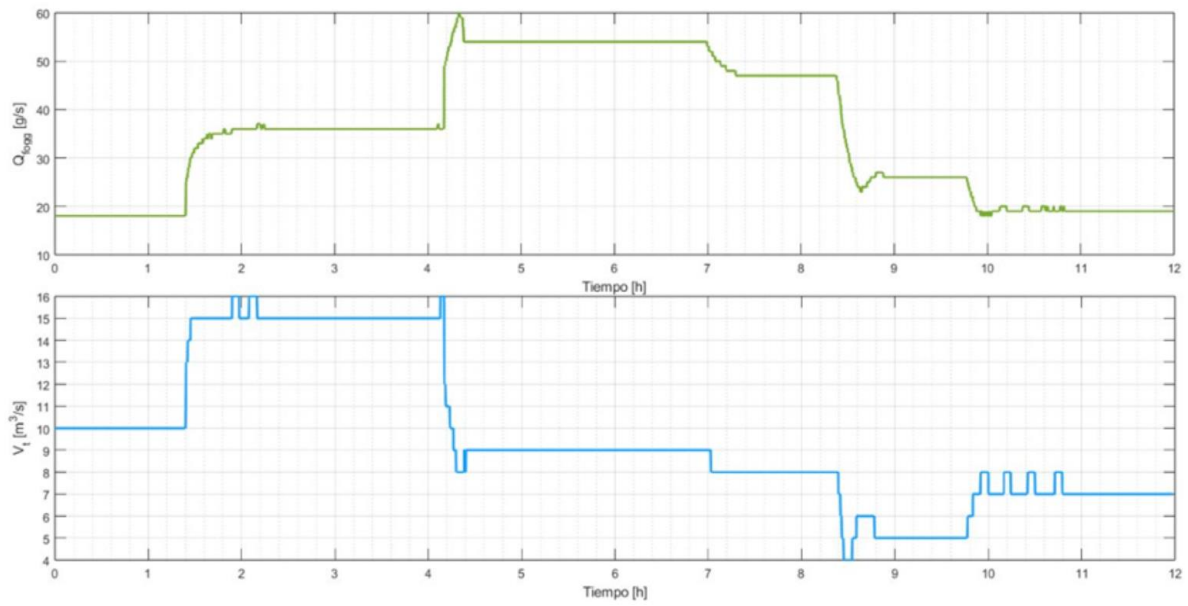


Figura 45: Acción de control del controlador IMC.

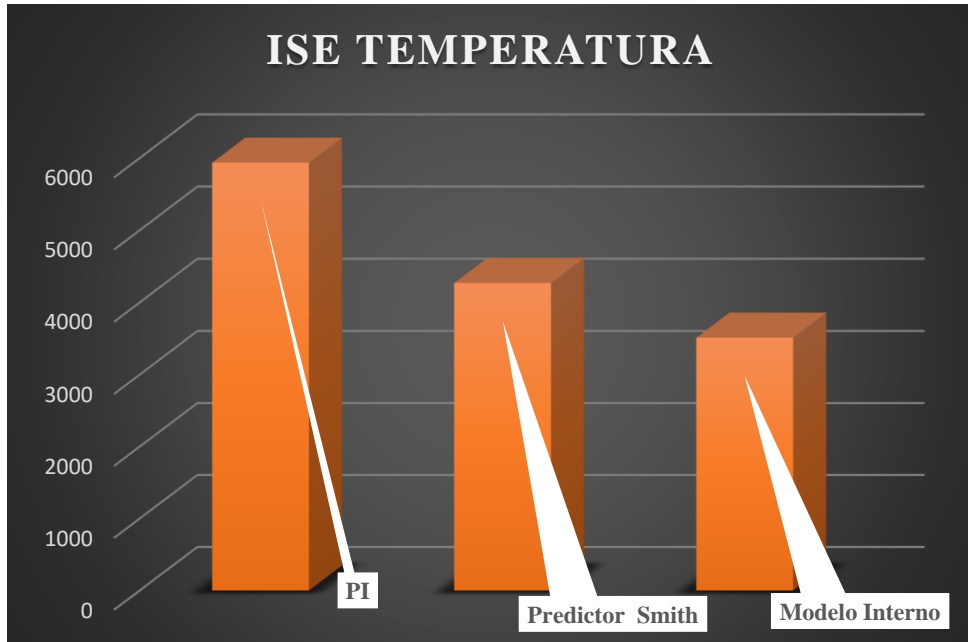


Figura 46: Resultados en HIL de ISE para la temperatura para SP, IMC y PI.

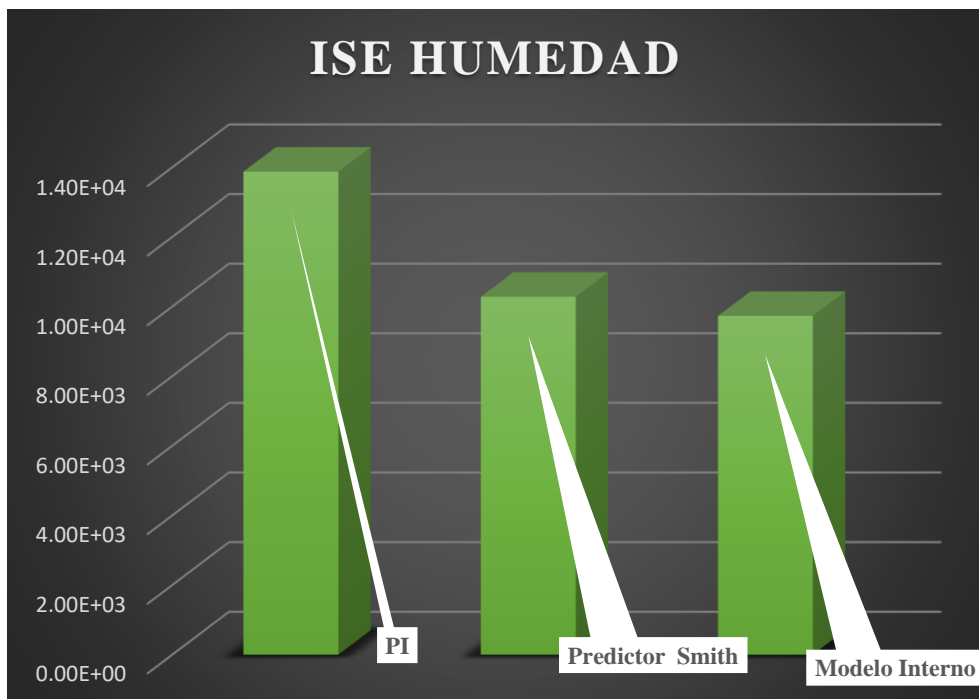


Figura 47: Resultados en HIL de ISE para la humedad para SP, IMC y PI.

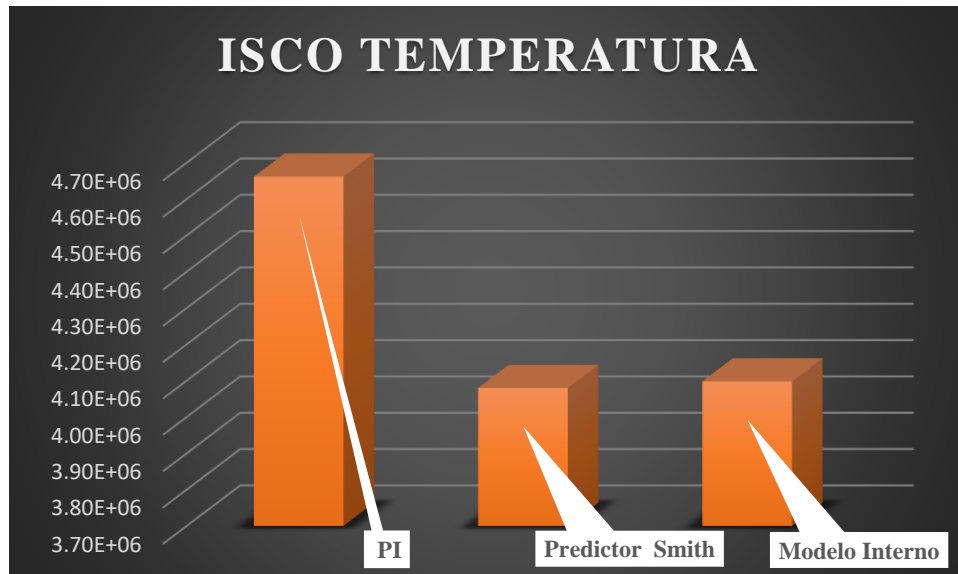


Figura 48: Resultados en HIL de ISCO para la temperatura para SP, IMC y PI.

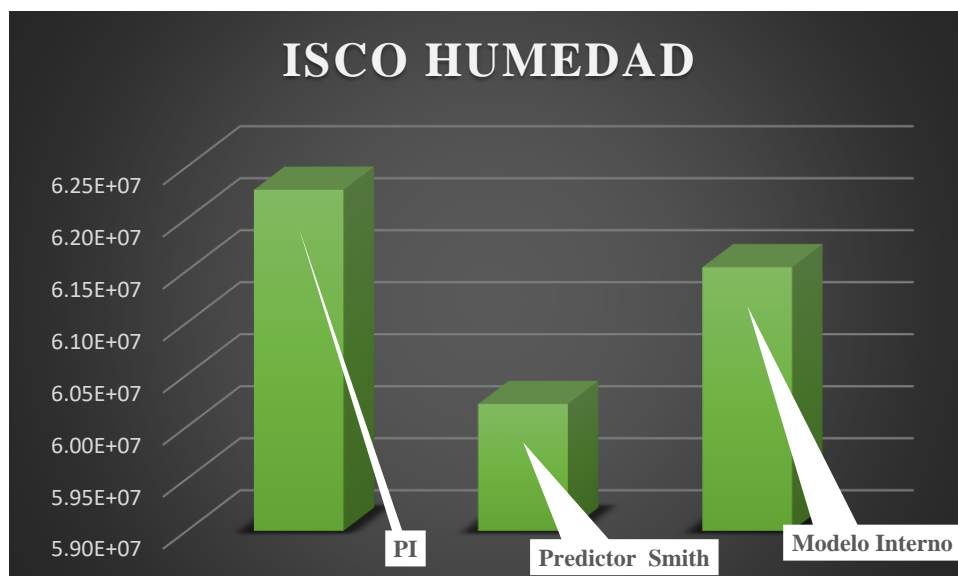


Figura 49: Resultados en HIL de ISCO para la humedad para SP, IMC y PI.

Las perturbaciones implementadas tanto en las pruebas de simulación como en pruebas en implementación física fueron las mismas en los mismos tiempos como se lo puede ver en la figura 41. A partir de ahí cada esquema de control nos arroja resultados que se asemejan a los resultados implementados en simulación como se puede ver en las figuras 42 y 44 las cuales resaltan los momentos en los que ocurre la perturbación y cómo los controladores actúan

para rechazarla. Además, en las figuras 43 y 45 se muestran las acciones de control que se muestran similares a las de simulación lo cual era lo esperado, pero siendo este un modelo implementado y que asemeja al comportamiento de un sistema en la realidad no se obtienen unas gráficas con respuestas suaves como los resultados mostrados en simulación.

Dentro de lo que se puede observar en las figuras 42 y 44 es apenas notorio que el desempeño de un esquema IMC se comporta mejor que un SP, aun así, el IMC muestra una velocidad de respuesta mejor ante un cambio de referencia y un mejor rechazo a las perturbaciones debido en gran medida al diseño de los desacopladores en (41) y (42), ya que sin estos las respuestas obtenidas en ambos esquemas de control fueron malas.

En cuanto a las acciones de control, se repite un poco de lo mismo se muestra que el IMC obtiene un mejor desempeño como se puede apreciar en la figura 45 la cual nos muestra que las señales generadas por este esquema son mejores, mostrando un menor esfuerzo y menos sobre picos en comparación con el SP, lo que significa que el sistema requiere de menos energía o esfuerzo siendo los elementos final de control los beneficiados alargando la vida útil de estos.

En el apartado de los índices de desempeño utilizados se puede ver en las figuras 46 y 47 que el esquema IMC es relativamente mejor en cuanto que el SP con un porcentaje de error menor. Por otra parte, si comparamos los dos controladores SP e IMC con el controlador de tipo PID desarrollado e implementado en [4] pero también por nosotros, es notoria la diferencia obtenida entre un esquema de control clásico respecto a un esquema de control avanzado, más aún cuando vemos los resultado obtenidos con el índice de desempeño ISCO en el que hay que recordar que nos muestra el esfuerzo de la señal de control. Para temperatura el ISCO de ambos controladores avanzados es significativamente mejor respecto al controlador clásico, mientras que si los analizamos en ISCO para la humedad el SP es una mejor opción y obtiene mejores resultados frente al PID e IMC esto se puede apreciar en las figuras 48 y 49 respectivamente.

CONCLUSIONES

El presente trabajo se centró en el uso de un nuevo método de simulación conocido como hardware in the loop, el cual es de mucha utilidad en términos de tiempo e incluso costos, ya que mediante el modelo matemático de un invernadero estudiado y validado en el que los procesos en tiempo real ocurren de manera lenta, es de mucha utilidad el poder establecer si la implementación de un método de control en un proceso vale la pena, por la inversión que esto representa. Por lo que este método es una alternativa ideal por ser barata de implementar y que a su vez realiza simulaciones de procesos lentos de una manera mucho más rápida como se demostró. Además, que el uso de un sistema embebido como lo es Arduino para simulación nos demostró las consideraciones que debemos tener en cuenta al momento de realizar comunicación serial, ya que se pueden presentar errores inesperados.

Los resultados y el aprendizaje obtenidos de este proyecto de titulación fueron buenos debido a que las mejoras observadas en los indicadores de desempeño nos muestran que cuantitativamente los esquemas de control avanzado propuestos en comparación con el esquema de control clásico son muy superiores en términos de error y esfuerzo al elemento final de control.

Cabe recalcar que los resultados de temperatura y humedad presentaron las respuestas esperadas logrando seguir la referencia y rechazar perturbaciones, consiguiendo un equilibrio ideal entre robustez y rapidez en ambos casos, aunque de mejor manera en el esquema IMC.

Finalmente, se concluye el trabajo realizado considerando que hablamos de un sistema multivariable y no podemos dejar de considerar que el SP en el caso de la humedad puede ser mejor opción, ya que en términos de error no hay mucha diferencia, pero en cuanto al esfuerzo de la señal de control este esquema es mejor que el IMC por lo que esta sería la mejor opción, dejando el esquema IMC para la variable de temperatura, obteniendo así la mejor combinación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agudelo, N., Tano, G., & Vargas, C. A. (2020). Historia de la Automatización. *Bogotá*.
Accessed: Nov, 1.
- [2] Berenguel, M., Álvarez, J. D., Cruz, A., Sánchez-Molina, J. A., Guzmán, J. L., & García-Mañas, F. (2022). Control climático de invernaderos con compensación de perturbaciones medibles. In *XLIII Jornadas de Automática* (pp. 325-332). Universidad de da Coruña. Servicio de Publicacións.
- [3] Camacho, O., Rosales, A., & Rivas, F. (2020). Control de Procesos. Quito. Escuela Politécnica Nacional
- [4] Cevallos, G., Pinzón, J. & Camacho, O. (03/2022). A Microclimate Greenhouse Multivariable Control: A Guide to use Hardware in the Loop Simulation. *IEEE International Conference on Automation/XXV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), Curicó, Chile, 2022, pp. 1-6.*
- [5] Fitz-Rodríguez, E.; Kubota, C.; Giacomelli, G.A.; Tignor, M.E.; Wilson, S.B.; McMahon, M. Dynamic modeling, and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application. *Computers and electronics in agriculture* 2010, 70, 105–116.
- [6] García, Y., & Lobo, I. (2008). Controlador PID integrado por la estructura de control de modelo interno (IMC) y lógica difusa. *Ciencia e Ingeniería*, 30(1), 29-40.
- [7] García, L. (2010). *CONTROL DIGITAL Teoría y Práctica*. Medellín: Politécnico Colombiano JIC.

- [8] Juan, J., Nobajas, G., Ángel, R., & Rubio, A. (2010). *FUNDAMENTOS DE CONTROL AUTOMÁTICO DE SISTEMAS CONTINUOS Y MUESTREADOS*. San Sebastián: Unicopia, C.B.
- [9] Martínez, J., & Camacho, O. (2005). Smith Predictor: tuning considerations for performance and robustness enhancements.
- [10] Martínez Quintero, J. C., & Andrade Ramírez, J. E. (2013). Implementación de controladores en sistemas retroalimentados usando electrónica embebida y simulación Hardware in the Loop. *Rev.Téc.Univ.Zulia, N°2*, p. 145.
- [11] Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., ... & Lee, D. (2009). Cambio climático. *El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. Política Alimentaria. International Food Policy Research Institute. Washington, DC, USA*.
- [12] Santos, L. K. C. (2018). El uso de la tecnología en la agricultura. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación, 2(14)*, 25-32.
- [13] Siddique, N. (2014). *Intelligent Control: A Hybrid Approach Based on Fuzzy Logic, Neural Networks and Genetic Algorithms*. Springer.
- [14] Orellana Prato, R., Coronel Méndez, M., & Rojas Sulbaran, R. (2017). Efecto de las técnicas de desacoplamiento en sistemas multivariables. *Ingeniería y Desarrollo, 35(2)*, 471-490.
- [15] Parra Martí, P., & Martí, P. P. Automatización de un invernadero de jitomates basada en lógica difusa.
- [16] Pinto Alejo, B. S. (2015). Análisis de la técnica hardware-in-the-loop basado en FPGA para el modelamiento de una micro red.