

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

“Herramienta para el aprendizaje de
las técnicas de control climático
de un invernadero basada en
Easy Java Simulations”

Curso 2019/2020

Alumno/a:

Luis Javier Cortés Martínez

Director/es:

José Luis Guzmán Sánchez
Francisco de Asís Rodríguez Díaz



Trabajo Fin De Grado

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en Easy Java Simulations

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA



Autor:

Luis Javier Cortés Martínez

Tutores:

José Luis Guzmán Sánchez

Francisco de Asís Rodríguez Díaz

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi absoluta gratitud a José Luis Guzmán Sánchez y Francisco de Asís Rodríguez Díaz, directores de este trabajo fin de grado. En el ámbito académico, por la manera de transmitirme sus conocimientos y experiencias, su confianza y su apoyo constante. En lo personal, por esa humildad y cercanía, que hacen más fácil los momentos difíciles.

También, quiero mostrar mis agradecimientos a todos mis compañeros de universidad y amigos, que a lo largo de estos años hemos compartido tantas experiencias, y que al terminar esta etapa seguiremos compartiendo.

Por último, toda persona necesita un refugio emocional al margen de su trabajo, gracias a esas personas que han estado en el día a día, por su paciencia y confianza. Mis padres Luis y Marinela, mi hermana Marinela, mi cuñado Antonio y mi novia Patricia.

Índice general

Agradecimientos	I
Acrónimos	V
Nomenclatura	VII
Índice de figuras	IX
Resumen	XI
Abstract	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Contexto	2
1.4 Resumen de resultados	2
1.5 Fases de desarrollo y planificación temporal	3
1.6 Competencias utilizadas en el TFG	5
1.7 Estructura de la memoria.....	5
2 MATERIALES Y MÉTODOS	7
2.1 Laboratorios virtuales en la enseñanza.....	7
2.2 Herramientas de desarrollo utilizadas	8
2.2.1 Easy Java Simulations	8
2.2.2 Matlab/Simulink.....	10
2.3 Modelo del clima de un invernadero	11
2.3.1 Modelo simplificado de temperatura de aire	12
2.3.2 Modelo simplificado de humedad de aire	15
2.4 Diseño de estrategias de control	16
2.4.1 Introducción.....	16
2.4.2 Controladores básicos y técnicas complementarias	17
2.4.3 Problema del clima en invernadero	20
2.4.4 Control de temperatura con la ventilación natural	21
2.4.5 Control de temperatura con calefacción	25
2.4.6 Control de radiación con malla de sombreo	28
2.4.7 Control de la humedad con ventilación	29
3 DISEÑO Y DESARROLLO DEL LABORATORIO VIRTUAL	31
3.1 Panel modelo	32
3.2 Panel vista.....	43
3.3 Descripción de la simulación.....	44
4 RESULTADOS	51
4.1 Ensayos en bucle abierto	51
4.2 Ensayo de control de temperatura con ventilación natural.....	56
4.3 Ensayo de control de temperatura con calefacción	59
4.4 Ensayo de control de temperatura considerando la humedad	61

4.5 Ensayo de control de radiación con malla de sombreado	64
5 CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS	69
5.1 Conclusiones.....	69
5.2 Futuros trabajos	70
 Bibliografía	 73

ACRÓNIMOS

Abreviatura	Significado
BA	Bucle abierto
BC	Bucle cerrado
EDO	Ecuación diferencial ordinaria
EJS	Easy Java Simulations
HTML	Lenguaje de marcas de hipertexto
NTICs	Nuevas Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
PD	Proporcional Derivativo
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
TFG	Trabajo Fin de Grado

NOMENCLATURA

Notación	Significado	Unidades
τ	Constante de tiempo del proceso genérico	[s]
τ_{ven}	Constante de tiempo del proceso de ventilación	[s]
τ_{cal}	Constante de tiempo del proceso de calefacción	[s]
$C_{aoc,a}$	Coefficiente de absorción de radiación de onda corta del aire interior	[-]
$C_{area,ss}$	Área de la superficie del suelo	[m ²]
$C_{cesp,a}$	Calor específico del aire	[J/K kg]
$C_{cnd_cvd,a-e}$	Coefficiente de pérdidas por conducción y convección entre aire interior y exterior	[W/m ² K]
$C_{cnv,cal-a}$	Coefficiente de convección entre las tuberías de calefacción y el aire interior	[W/m ² K]
$C_{cnv,ss-a}$	Coefficiente de convección entre la superficie del suelo y el aire interior	[W/m ² K]
$C_{den,a}$	Densidad del aire	[kg/m ³]
C_{psico}	Constante psicométrica termodinámica	[HPa/K]
$C_{p,atm}$	Presión atmosférica de referencia	[HPa]
$C_{toc,malla}$	Coefficiente de transmisión de radiación de onda corta	[-]
$C_{ven,cd}$	Coefficiente de descarga en ventilación	[-]
$C_{ven,cv}$	Coefficiente debido al viento en ventilación	[-]
$C_{vol,a}$	Volumen de aire que ocupa el invernadero	[m ³]
$e(t)$	Error que presenta el controlador genérico	[-]
k	Ganancia estática del proceso genérico	[-]
k_{ven}	Ganancia estática del proceso de ventilación	[°C/%]
k_{cal}	Ganancia estática del proceso de calefacción	[°C/°C]
K_p	Ganancia del controlador genérico	[-]
$K_{p,ven}$	Ganancia del controlador de ventilación	[%/°C]
$K_{p,cal}$	Ganancia del controlador de calefacción	[°C/°C]
K_{pmin}	Ganancia mínima del controlador de ventilación	[%/°C]
K_{pmax}	Ganancia máxima del controlador de ventilación	[%/°C]
$M_{perd,a-e}$	Masa de vapor de agua en el intercambio de aire con el exterior debido a infiltración por pérdidas	[kg/m ² s]
$M_{tra,cu}$	Flujo de vapor de agua en la transpiración del cultivo	[kg/m ² s]
$M_{ven,a-e}$	Masa de vapor de agua en el intercambio de aire con el exterior debido a ventilación	[kg/m ² s]
$P_{ha,e}$	Humedad absoluta del aire exterior	[kg _{agua} /kg _{aire}]
P_{LAI}	Índice de área foliar	[-]
$P_{rs,e}$	Radiación solar en el exterior	[W/m ²]
$P_{t,e}$	Temperatura del aire exterior	[K]
$P_{vv,e}$	Velocidad del viento exterior	[m/s]
$Q_{cnd_cnv,a-e}$	Transferencia de calor por convección y conducción	[W/m ²]
$Q_{cnv,cal-a}$	Transferencia de calor por convección de calefacción	[W/m ²]
$Q_{cnv,ss-a}$	Transferencia de calor por convección de superficie del suelo	[W/m ²]
$Q_{perd,a-e}$	Intercambio de calor con el aire exterior por infiltración	[W/m ²]
$Q_{sol,a}$	Radiación solar absorbida por el aire interior	[W/m ²]

$Q_{tra, cu}$	Calor latente producido por transpiración de cultivo	[W/m ²]
$Q_{ven, a-e}$	Intercambio de calor con el aire exterior debido a ventilación natural	[W/m ²]
T_d	Tiempo derivativo del controlador genérico	[s]
t_e	Tiempo en el que se aplica un escalón	[s]
$T_{extmin}(vmin)$	Temperatura exterior mínima cuando velocidad viento mínima	[K]
$T_{extmin}(vmax)$	Temperatura exterior mínima cuando velocidad viento máxima	[K]
$T_{extmax}(vmin)$	Temperatura exterior máxima cuando velocidad viento mínima	[K]
$T_{extmax}(vmax)$	Temperatura exterior máxima cuando velocidad viento máxima	[K]
T_i	Tiempo integral del controlador genérico	[s]
$T_{i, ven}$	Tiempo integral del controlador de ventilación	[s]
$T_{i, cal}$	Tiempo integral del controlador de calefacción	[s]
tr	Tiempo de retardo del proceso genérico	[s]
T_t	Constante de tiempo de tracking	[s]
$u(t)$	Señal de control del controlador genérico	[-]
U_{malla}	Variable de control. Posición de la malla de sombreo	[%]
$U_{t, cal}$	Variable de control. Temperatura agua de tuberías	[K]
$U_{ventana}$	Variable de control. Posición de las ventanas	[%]
$V_{aoc, cu}$	Coefficiente de absorción de radiación de onda corta de cultivo	[-]
$V_{hsat, a}$	Humedad de saturación del aire	[kg _{agua} /kg _{aire}]
$V_{lt, vap}$	Calor latente de vaporización	[J/kg]
V_{min}	Velocidad de viento mínima	[m/s]
V_{max}	Velocidad de viento máxima	[m/s]
$V_{psat, a}$	Presión de saturación	[HPa]
$V_{pcsat, a}$	Pendiente de la curva de presión de saturación del aire	[HPa/s]
$V_{r, cl}$	Resistencia de la capa límite	[s/m]
$V_{r, cu}$	Resistencia del cultivo	[s/m]
$V_{r, tra}$	Resistencia a la transpiración del cultivo	[s/m]
$V_{rn, cu}$	Radiación neta que absorbe el cultivo	[W/m ²]
$V_{rs, cu}$	Radiación solar global que absorbe el cultivo	[W/m ²]
$V_{toc, cu}$	Coefficiente de transmisión de onda corta	[-]
$V_{ven, flujo}$	Flujo de ventilación	[m ³ /s]
$X_{ha, a}$	Humedad absoluta del aire	[kg _{agua} /kg _{aire}]
$X_{t, a}$	Temperatura del aire del invernadero	[K]
$X_{t, ss}$	Temperatura de la superficie del suelo	[K]

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Interfaz del programa en EJS	2
1.2	Planificación temporal. Diagrama de Gantt	4
2.1	Pantalla principal de EJS.....	9
2.2	Panel modelo en EJS	9
2.3	Panel vista en EJS.....	10
2.4	Bloques pertenecientes al modelo de clima de invernadero y sus algoritmos de control.....	11
2.5	Ejemplo de gráficas en MATLAB	11
2.6	Esquema de entradas/salidas del modelo climático simplificado.....	12
2.7	Flujos de energía y vapor de agua en el aire del invernadero.....	13
2.8	Flujos de vapor de agua en el invernadero	16
2.9	Arquitectura de sistema de control en bucle abierto	16
2.10	Arquitectura de sistema de control en bucle cerrado.....	17
2.11	Esquema del algoritmo de control PID no interactivo o ideal.....	19
2.12	Esquema <i>anti-windup</i>	19
2.13	Esquema de las variables que intervienen en el problema de control climático	20
2.14	Respuesta del sistema ante un escalón sobre la ventilación	21
2.15	Escalón sobre la entrada de ventilación.....	22
2.16	Respuesta a un escalón de un sistema de primer orden.....	22
2.17	Respuesta del sistema de ventilación real y del modelo ante un escalón de amplitud 100%.....	23
2.18	Esquema de control con ajuste por tabla	24
2.19	Parámetros característicos de la función que calcula el término Kp del controlador.....	25
2.20	Respuesta del sistema ante un escalón sobre la calefacción.....	26
2.21	Escalón sobre la entrada de calefacción	26
2.22	Respuesta del sistema de calefacción real y del modelo ante un escalón de amplitud 40°C.....	27
2.23	Corrección en función de la temperatura.....	28
2.24	Esquema de control de la temperatura en función de la humedad	29
2.25	Variación de consigna en función de la humedad	30
3.1	Sinóptico del invernadero de la versión anterior del laboratorio virtual	31
3.2	Página Variables Temperatura	32
3.3	Página Variables Humedad	33
3.4	Página Coeficientes Temperatura.....	33
3.5	Página Vista dibujo Invernadero	34
3.6	Página Auxiliares Vista	35
3.7	Página Panel Control.....	35
3.8	Página Leer Datos	36
3.9	Página Inicialización variables y registro datos	37
3.10	Página Colores y puntos dibujo.....	37
3.11	Página Controladores y otros. Ajuste por tabla de Kp	38
3.12	Página Submodelos	39
3.13	Página Modelos	39
3.14	Página Contador	40
2.15	Página Registro datos	40
3.16	Página Conversión variables	41
3.17	Página Radiación.....	41
3.18	Página Generar Archivo	42

3.19	Página Método Propio	42
3.20	Pestaña Elementos	43
3.21	Panel Vista.....	43
3.22	Panel Vista. Panel con separadores	44
3.23	Funcionamiento ventanas y malla de sombreo.....	44
3.24	Funcionamiento calefacción y PLAI.....	45
3.25	Panel de gráficas.....	46
3.26	Panel Controles simulación	46
3.27	Panel Otros parámetros	47
3.28	Panel Ventilación	47
3.29	Panel Malla de sombreo	48
3.30	Panel Calefacción.....	49
3.31	Panel Humedad.....	49
4.1	Ensayo de ventilación natural.....	51
4.2	Temperatura con diferentes % de apertura de ventilación	52
4.3	Ensayo calefacción	53
4.4	Resultados ensayo calefacción	53
4.5	Ensayo malla de sombreo y blanqueo	54
4.6	Resultados radiación PAR interior	54
4.7	Perturbaciones en el laboratorio	55
4.8a	Perturbación de radiación PAR	55
4.8b	Perturbación de velocidad de viento.....	55
4.8c	Cambio de PLAI de 1 a 5 en el instante 600	56
4.9	Parámetros controlador ventilación.....	56
4.10	Control de la ventilación para una consigna de 37°C.....	57
4.11	Control de la ventilación para una consigna de 35°C.....	57
4.12	Comparativa temperatura interior en diferentes ensayos	57
4.13	Comparativa señal de control de ventilación y detalle de variación de Kp para 37°C	58
4.14	Control de la ventilación para una consigna de 35°C con mayor velocidad de viento.....	59
4.15	Parámetros controlador calefacción	59
4.16	Ensayo con consigna a 15°C.....	60
4.17	Ensayo con consigna a 13°C.....	60
4.18	Comparativa diferentes ensayos de calefacción	61
4.19	Parámetros controlador humedad.	61
4.20	Ensayo variación máxima consigna 5°C.	62
4.21	Ensayo variación máxima consigna 2°C	62
4.22	Ensayo variación máxima consigna 0°C	63
4.23	Comparación resultados control humedad	64
4.24	Comparación consigna generada control humedad	64
4.25	Parámetros malla de sombreo.....	65
4.26	Diferentes estados de la malla de sombreo.....	65
4.27	Ensayo malla de sombreo entre 37°C y 42°C	66
4.28	Ensayo malla de sombreo entre 38°C y 40°C	66
4.29	Comparación radiación PAR interior y temperatura	67
4.30	Ensayo perturbaciones de radiación	67

RESUMEN

En la provincia de Almería, la agricultura es un pilar fundamental para la economía desde el año 1963 cuando se construyó el primer invernadero. Esta evolución de la agricultura se debe a las condiciones natural favorables, la ayuda del Ministerio de Agricultura y, principalmente, al factor humano de todas las personas que intervienen en este mercado. En estos años, la tecnología se ha ido abriendo camino dentro del sector agrícola para mejorar la productividad y calidad, para así aumentar la rentabilidad. La fase de producción en el invernadero es la más importante, ya que se ve influenciada por las variables climáticas del entorno en el que se encuentra y por la cantidad de agua y fertilizantes que se le aplican mediante el riego; de manera que con el registro de estas variables se podrá controlar el crecimiento del cultivo.

La aparición de los laboratorios virtuales y remotos se debe a que la realización de experimentos con plantas reales suele ser costosa en términos de tiempo, coste económico y energía. Además, es frecuente que una vez que estas infraestructuras son puestas a punto, permanecen infrautilizadas debido a la limitación en el tiempo que pueden ser utilizadas por los alumnos. Estas Nuevas Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (NTICs) como los laboratorios virtuales, han permitido revolucionar y renovar las técnicas de aprendizaje, ya que facilita la comprensión del alumnado.

En este proyecto, el laboratorio virtual será de un invernadero convencional de Almería, el cuál va a permitir al usuario realizar las mismas operaciones que en un laboratorio tradicional, pero de manera virtual, pudiendo realizar experimentos las 24 horas del día con un menor coste económico. Estará enfocado al uso docente, permitiendo al área de Automática, Robótica y Mecatrónica de la Universidad de Almería el dar la oportunidad al alumnado de experimentar con este tema de una forma más eficiente.

Este trabajo se basa en el estudio, modelado y control de las variables que afectan al crecimiento del cultivo bajo invernadero, estos modelos y controles son sistemas no lineales multivariables en el que actúan las variables explicadas más adelante. Las salidas del sistema o variables controladas serán la temperatura y la humedad del aire, que se verán afectadas por las condiciones de contorno y serán controladas por tres variables de control: la posición de la ventilación, las características y posición de la malla de sombreado y la temperatura del agua que circula por las tuberías del sistema de calefacción.

Palabras clave: Laboratorio virtual, modelado de variables climáticas, técnicas de control industrial.

ABSTRACT

In the province of Almería, agriculture has been a fundamental pillar for the economy since 1963 when the first greenhouse was built. This evolution of agriculture is due to favorable natural conditions, the support of the Ministry of Agriculture and, mainly, the human factor of all the people involved in this market. In these years, technology has been making its way into the agricultural sector to improve productivity and quality, thus increasing profitability. The production phase in the greenhouse is the most important, since it is influenced by the climatic variables of the environment in which it is located and by the amount of water and fertilizers that are applied through irrigation; so that with the registration of these variables the growth of the crop can be controlled.

The appearance of virtual and remote laboratories is due to the fact that the realization of experiments with real plants is usually costly in terms of time, money and energy, and it is also frequent that once these infrastructures are tuned, they remain underutilized due to the time limitation that can be used by students. These New Information and Communication Technologies (NTICs), such as virtual laboratories, have allowed revolutionizing and renewing learning techniques, because it facilitates the understanding of students.

In this project, the virtual laboratory will be of a conventional greenhouse in Almería, which will allow the user to perform the same operations as in a traditional laboratory, but in a virtual way, being able to perform experiments 24 hours a day with a lower cost. It will be focused on teaching use, allowing the area of Automation, Robotics and Mechatronics of the University of Almeria to give students the opportunity to experiment with this topic in a more efficient way.

This work is based on the study, modeling and control of the variables that affect the growth of the greenhouse crop, these models and controls are multivariable nonlinear systems in which the variables explained below act. The outputs of the system or controlled variables will be the temperature and humidity of the air, which will be affected by the boundary conditions and will be controlled by three control variables: the position of the ventilation, the characteristics and position of the shade mesh and the temperature of the water that circulates through the pipes of the heating system.

Keywords: Virtual laboratory, modeling of climatic variables, industrial control techniques.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En 2018, según datos de la Conserjería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, hay un total de 31.614 hectáreas de cultivo bajo invernadero en la provincia de Almería [14]. Esto convierte a la agricultura en uno de los principales motores económicos en la provincia y obliga a estar en continuo estudio de mejoras. Esta evolución de la agricultura se debe a las condiciones naturales favorables, la ayuda del Ministerio de Agricultura y, principalmente, al factor humano de todas las personas que intervienen en este mercado. En estos años, la tecnología se ha ido abriendo camino dentro del sector agrícola para mejorar la productividad y calidad, para así aumentar la rentabilidad. La fase de producción en el invernadero es la más importante, ya que se ve influenciado por las variables climáticas del entorno en el que se encuentra y por la cantidad de agua y fertilizantes que se le aplican mediante el riego; de manera que con el registro de estas variables se podrá controlar el crecimiento del cultivo [13].

Una forma de competir en el mercado es la mejora de producción, por lo que mediante el uso de Nuevas Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (NTICs) podemos aumentar la rentabilidad y proporcionar una formación de mayor calidad a las personas dedicadas a este sector. En relación con este tema se basa el presente TFG, porque es de vital importancia que en la formación de un ingeniero técnico agrícola o industrial, se adquieran conocimientos relacionados con el modelado y control del crecimiento bajo cultivo.

Dentro de este marco de formación podemos destacar los laboratorios virtuales y remotos, que son un sistema de software que permite al usuario o usuarios experimentar sobre un recurso simulado. La aparición de estos laboratorios virtuales y remotos [8] se debe a que la realización de experimentos con plantas reales suele ser costosa en términos de tiempo, dinero y energía, además es frecuente que una vez que estas infraestructuras son puestas a punto, permanecen infrautilizadas debido a la limitación en el tiempo que pueden ser utilizadas por los alumnos. Estas Nuevas Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (NTICs) como los laboratorios virtuales, han permitido revolucionar y renovar las técnicas de aprendizaje, ya que facilita la comprensión del alumnado[3].

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es conseguir desarrollar un laboratorio virtual del clima de un invernadero con EJS, para poder controlar el crecimiento del cultivo de tomate mediante técnicas de control, como por ejemplo el control todo/nada con zona muerta, que nos permitan obtener los objetivos de consignas del sistema en BC. De esta forma se conseguirá repercutir en la temperatura y humedad interior del invernadero, de tal forma que las podamos mantener dentro de unos límites establecidos para el crecimiento óptimo del cultivo.

Un objetivo secundario, pero sin el cuál es imposible conseguir el objetivo principal, es saber identificar y tratar todas las variables climáticas que afectan al proceso, descritas en la tesis doctoral titulada *Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero*, realizada por D. Francisco Rodríguez Díaz [13].

Por último, el objetivo por el cual se desarrolla el laboratorio virtual descrito es, en la mayor parte, de carácter docente, lo cuál va a permitir al alumno poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos en clase desde cualquier lugar con conexión a internet durante las 24 horas del día.

1.3 Contexto

En el presente TFG se va a desarrollar un laboratorio virtual de un invernadero que permite controlar la temperatura y la humedad interior, frente a cambios que producen variables climáticas como pueden ser la radiación exterior, temperatura exterior o la velocidad y dirección del viento. Para el control de estas variables se usan sistemas de actuación como la ventilación, la calefacción o la malla de sombreo. Por tanto, el desarrollo de este estudio abre un amplio abanico de objetivos a nivel docente.

Por último, cabe destacar que los modelos de las variables climáticas del invernadero fueron desarrollados en la tesis doctoral titulada *Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero*, realizada por D. Francisco Rodríguez Díaz [13]. El siguiente antecesor a este trabajo es el trabajo fin de grado titulado *desarrollo de un laboratorio virtual de un invernadero con Easy Java Simulations*, desarrollado por Pedro Antonio Fernández Gómez [7], el cual se tomará como base para este trabajo, donde la programación del laboratorio virtual es íntegramente en Easy Java Simulations [5] y se pretende completar el modelo de temperatura de aire implementado y añadir el modelo de humedad de aire, así como el control de ambos modelos.

1.4 Resumen de resultados

A modo de resumen de este TFG, se presenta en la figura 1.1 la interfaz del programa desarrollado y las gráficas que se obtienen de la simulación en tiempo real. Estos resultados son presentados sin ningún control, es decir, son los resultados obtenidos de la simulación del propio modelo matemático de temperatura y de humedad, sin que esté actuando la calefacción, la malla de sombreo o la ventilación.

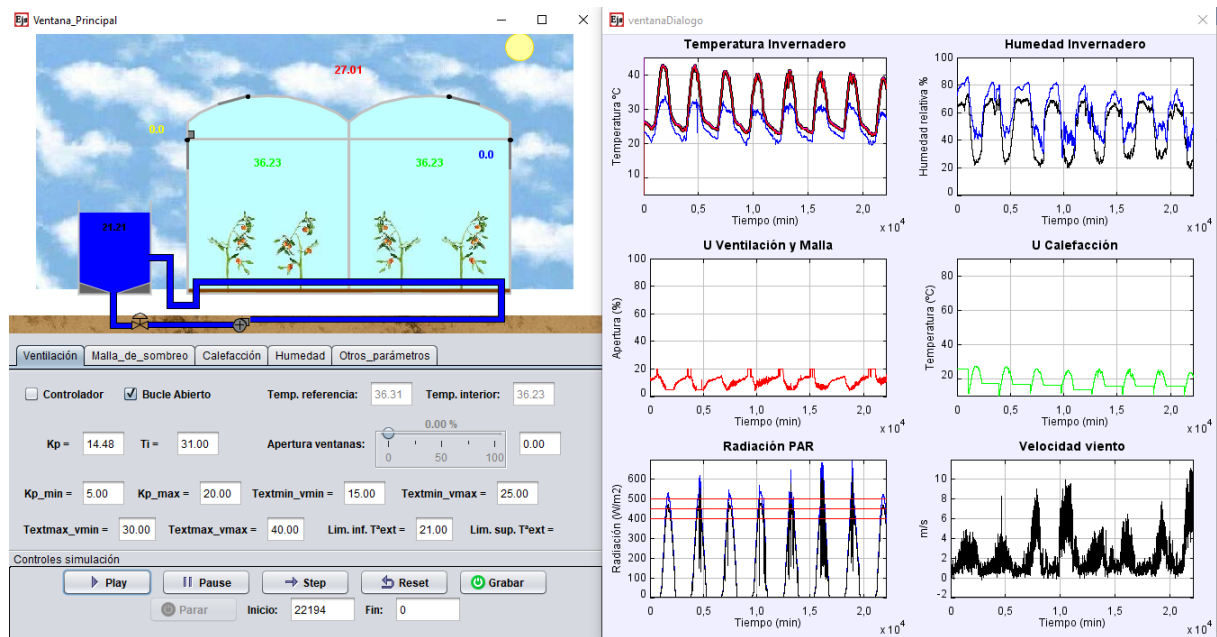


Figura 1.1. Interfaz del programa en EJS.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

Las partes que componen la herramienta son tres principalmente: la parte de la derecha son las gráficas de los resultados de las variables de simulación, por ejemplo, la temperatura interior o la radiación PAR; la parte de la izquierda es el sinóptico del invernadero, donde se puede ver los valores de algunas variables o comprobar visualmente si está encendida la calefacción o la malla de sombreado, entre otras; la parte de abajo del sinóptico es el panel de control, en general, lo que el usuario puede modificar, se presenta en paneles separados dependiendo de su función, por ejemplo, para la ventilación y sus parámetros se representa en un solo panel, como se puede observar en la figura 1.1.

En el capítulo 3 de esta memoria se explicarán los elementos que componen la interfaz, que representa cada gráfica de resultados y se presentará un manual de instrucciones del panel de control para explicar la función de cada parámetro y su influencia.

Para concluir con el resumen, se destaca que con esta herramienta se puede realizar una serie de controles muy interesantes relacionados con el control del clima de un invernadero, entre los que destacan:

- Control en bucle abierto
- Control de la temperatura con ventilación natural
- Control de la temperatura con calefacción
- Control de la humedad con ventilación natural
- Control de la radiación PAR con malla de sombreado

1.5 Fases de desarrollo y planificación temporal

Las fases de desarrollo para la elaboración del presente trabajo fueron:

- **Estudio del sistema.** Recopilación de información procedentes de tesis, libros, artículos, congresos o revistas, relacionados con el modelado y control de las variables climáticas que afectan al cultivo bajo invernadero, los laboratorios virtuales u otros temas relacionados con este trabajo. En esta fase también se encuentra el proceso de familiarización con el programa Easy Java Simulations.
- **Desarrollo del modelo e interfaz en EJS.** Desarrollo del modelo de temperatura y de humedad adaptado al entorno de programación de EJS, así como el diseño de una interfaz adecuada al proceso.
- **Validación del modelo.** Comprobación de los modelos mediante la comparativa de resultados de ensayos realizados con anterioridad.
- **Diseño de estrategias de control y elaboración de ensayos.** Diseño de controladores para las entradas de control del sistema, basados en técnicas de control industrial, por ejemplo, controlador PI con antiwindup. Implementación de esos controladores en EJS y toma de ensayos para conseguir su funcionamiento óptimo en el seguimiento de consignas.
- **Obtención de resultados y mejoras.** Comprobación de objetivos y búsqueda de mejoras del proceso, tanto de sintonía de controladores, de interfaz de usuario o de variables auxiliares que interfieren en el proceso.
- **Elaboración de la memoria.** Fase en la que se elabora el documento donde se expresa de manera ordenada y clara todo lo que involucra este TFG.

En la figura 1.2 se muestra la planificación temporal en un diagrama de Gantt expresada en días y una tabla adjunta en la imagen en la que se especifican las horas de duración de cada fase. Se observa que son un total de 345 horas, por lo que se ajusta en tiempo a las 300 horas que estipula la memoria de verificación de grado.

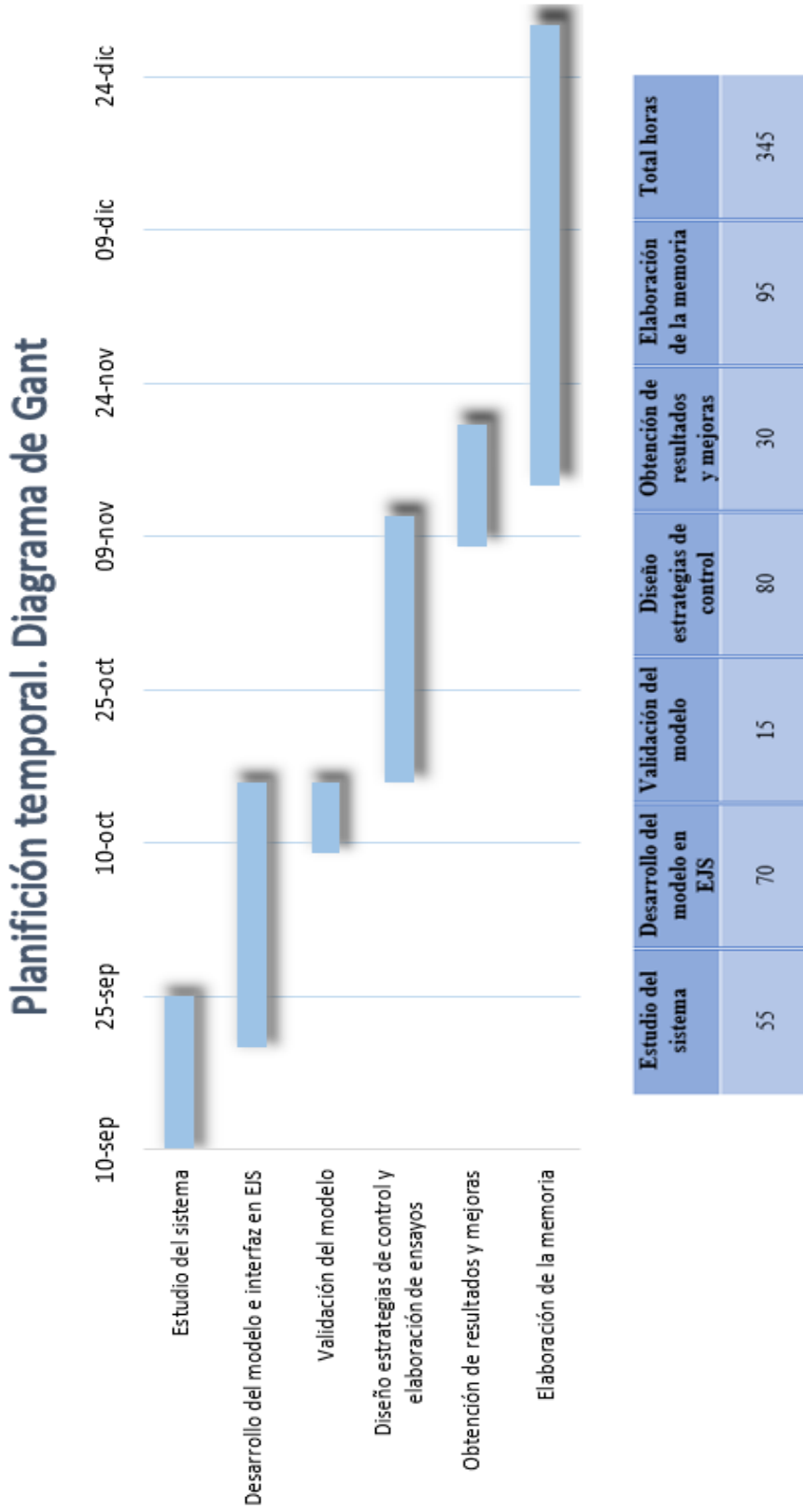


Figura 1.2. Planificación temporal. Diagrama de Gant

1.6 Competencias utilizadas en el TFG

Durante el desarrollo de este trabajo ha sido necesario trabajar una serie de competencias transversales sin las cuales no hubiera sido posible alcanzar los resultados obtenidos y que completan un perfil profesional en el área de la ingeniería. Algunas de estas competencias son:

- UAL 1 - Conocimientos básicos de la profesión
- UAL 2 - Habilidad en el uso de las TIC
- UAL 3 - Capacidad para resolver problemas
- UAL 4 - Comunicación oral y escrita en la propia lengua
- UAL 5 - Capacidad de crítica y autocrítica
- UAL 9 - Capacidad para aprender a trabajar de forma autónoma

También ha sido necesario trabajar todas las competencias relacionadas con la automatización industrial, señalando como principales competencias específicas las siguientes:

- E-CB3 - Conocimientos básicos sobre el uso y programación de los ordenadores, sistemas operativos, bases de datos y programas informáticos con aplicación en ingeniería.
- E-CTEE7 - Conocimiento y capacidad para el modelado y simulación de sistemas.
- E-CTEE8 - Conocimientos de regulación automática y técnicas de control y su aplicación a la automatización industrial.
- E-CTEE11 - Capacidad para diseñar sistemas de control y automatización industrial.

Por último, también es necesario trabajar la competencia para la realización del TFG, que es la siguiente:

- E-TFG - Ejercicio original a realizar individualmente y presentar y defender ante un tribunal universitario, consistente en un proyecto en el ámbito de las tecnologías específicas de la Ingeniería Industrial de naturaleza profesional en el que se sintetizan e integran las competencias adquiridas en las enseñanzas

1.7 Estructura de la memoria

La memoria de este TFG se encuentra dividida en cinco capítulos distribuidos de tal forma que en cada capítulo se trata un objetivo específico, cuya suma de estos objetivos completan el objetivo principal.

Capítulo 1. Introducción. Este capítulo contiene información sobre la motivación que ha llevado al desarrollo de este TFG, un contexto para encauzar la línea de trabajo, una explicación del tiempo invertido en cada parte de este trabajo, una exposición de los objetivos marcados y un breve resumen de los resultados obtenidos con el fin de hacer una idea de que el contenido de este TFG.

Capítulo 2. Materiales y métodos. Esta parte es la más teórica de todas, contiene una exposición de la importancia de los laboratorios virtuales en la actualidad, una breve introducción de los programas usados para el desarrollo del presente trabajo, la explicación del modelo matemático del invernadero que se ha utilizado y, por último, las estrategias de control utilizadas y diseñadas para el sistema planteado.

Capítulo 3. Diseño y desarrollo del laboratorio virtual. El capítulo de diseño y desarrollo del laboratorio virtual es íntegramente dedicado a explicar el panel modelo y el panel vista en el programa *Easy Java Simulations*, así como toda la programación y variables que aparecen en estos paneles. También se presenta un manual de uso para el usuario.

Capítulo 4. Resultados. Este capítulo muestra todos los ensayos que son posibles realizar con el laboratorio virtual, profundizando en la manera de realizar cada uno de ellos, considerando este capítulo como una guía de los posibles ensayos a realizar por el usuario.

Capítulo 5. Conclusiones y futuros trabajos El contenido de este capítulo es la justificación y descripción de los resultados obtenidos a lo largo de este proyecto, y como final para esta memoria, se exponen una serie de ideas para trabajos futuros relacionados con este tema.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Laboratorios virtuales en la enseñanza

Existe un gran número de estudios de psicología cognitiva que demuestran que las personas adquieren mejor los conocimientos realizando acciones y reflexionando sobre las consecuencias de las mismas, que siendo meros espectadores de alguien que les cuenta lo que deben aprender. Además, entre otras ventajas, la experimentación obliga a los alumnos a implicarse en el aprendizaje convirtiéndose en una parte esencial del aprendizaje de la mayoría de las ramas científicas y técnicas [3].

Sin embargo, la realización de experimentos con plantas reales suele ser costosa en términos de tiempo, dinero y energía, ya que requiere la puesta a punto de unas infraestructuras docentes normalmente caras que son difíciles de mantener en buenas condiciones. Además, es frecuente que una vez que estas infraestructuras sean puestas a punto permanezcan infrautilizadas debido fundamentalmente a la limitación en el tiempo que pueden ser utilizadas por parte de los alumnos y a que se suele tratar de infraestructuras sensibles a usos indebidos por parte de éstos, dificultándose la realización de las necesarias prácticas con equipos reales. Aquí es donde las TICs pueden aportar algunas soluciones para ampliar el acceso a la experimentación en forma de laboratorios remotos y virtuales.

Una de las soluciones son los llamados laboratorios virtuales, que es básicamente un software informático genérico o específico que recrea el comportamiento de plantas de experimentación que sólo existen en ordenadores usados para la simulación. Una forma interesante de utilizar los laboratorios virtuales es junto a los laboratorios reales (presenciales o remotos), de forma que los alumnos realizarían primero las prácticas en laboratorios virtuales, para pasar posteriormente, cuando el instructor lo considerase oportuno, al laboratorio real. Así se consiguen varios objetivos importantes como son:

- *Familiarizarse con el experimento.* Se evita que los estudiantes puedan acudir al aula sin haber realizado trabajo previo.
- *Optimizar el uso de los recursos.* Los estudiantes requieren menos tiempo para realizar las tareas. Haciéndose un mejor uso de los laboratorios reales.
- *Disminución del uso incorrecto del equipamiento.* Frecuentemente los dispositivos utilizados en laboratorios reales son delicados y un uso excesivo puede dañarlos.
- *Comportamiento de modelos matemáticos frente a dispositivos reales.* Los modelos matemáticos imitan el comportamiento real de un sistema, lo que puede producir comportamientos sensiblemente diferentes y los alumnos pueden compararlos para extraer conclusiones acerca de la importancia del modelado realizado.
- *Formar en metodologías de trabajo.* En el mundo real, se simula primero con modelos matemáticos de los sistemas como paso previo a construir prototipos, mucho más caros, con los que experimentar.
- *Manejo de herramientas informáticas actuales.* Aporta al alumno conocimientos trasversales que le servirán en el futuro.
- *Repetitividad de los experimentos.* Los alumnos pueden reproducir los experimentos ante el docente con la seguridad de que el resultado será el mismo que ellos vieron en su momento.

- *Multiplicidad de experimentos simultáneos.* Se eliminan las esperas de los laboratorios reales. Cada alumno realiza su experimento sin interferir con sus compañeros, favoreciéndose los procesos colaborativos.

2.2 Herramientas de desarrollo utilizadas

2.2.1 Easy Java Simulations

Easy Java Simulations (EJS) es una herramienta de software diseñada para la creación de simulaciones por ordenador [5]. Ha sido diseñado para permitir a sus usuarios trabajar a un alto nivel conceptual, usando un conjunto de herramientas simplificadas y concentrando la mayoría de su tiempo en los aspectos científicos de la simulación, pidiendo al ordenador que realice automáticamente todas las otras tareas necesarias, pero fácilmente automatizables.

EJS crea aplicaciones Java que son independientes y multiplataforma, o applets que se pueden visualizar usando cualquier navegador Web (y por tanto ser distribuidos a través de Internet), que pueden leer datos a través de la red y ser controlados usando scripts (conjuntos de instrucciones) incluidos en las páginas HTML [6].

Por estas razones, EJS es el programa con el que se ha desarrollado íntegramente el laboratorio virtual de este TFG, ya que se pueden crear aplicaciones muy interesantes para la enseñanza.

EJS proporciona tres paneles de trabajo (véase figura 2.1) para construir la simulación:

- **Descripción.** Páginas HTML que incluyen los contenidos educativos relacionados con el laboratorio virtual.
- **Modelo.** Está dedicado al proceso de modelado. Este panel se usa para crear variables que describen el modelo de nuestra simulación, para inicializar estas variables, y para escribir algoritmos que describen cómo varían estas variables con el tiempo.
- **Vista.** Está dedicado a la tarea de construir la interfaz gráfica de usuario de la simulación, que permitirá a los usuarios finales controlar la simulación y mostrar sus salidas.

Panel modelo

El panel Modelo se divide en seis pestañas (véase figura 2.2) que se explican a continuación:

- **Variables.** Donde se definen todas aquellas magnitudes que intervienen en nuestro modelo, tanto si se modifican a lo largo del tiempo de ejecución como si permanecen constantes.
- **Inicialización.** Establece correctamente las condiciones iniciales del modelo para que empiece en una situación deseada y posible. Este panel es para inicializar las variables que necesiten una expresión matemática para ser inicializada.
- **Evolución.** Nos permite escribir código Java que determina como el sistema se desarrolla en el tiempo.
- **Relaciones fijas.** Donde se anotan las ecuaciones o relaciones matemáticas entre variables, que se mantendrán sin cambio durante todo el tiempo que dure la simulación.
- **Propio.** Puede usarse para declarar funciones que podrían ser utilizadas a lo largo del modelo.
- **Elementos.** Donde se facilita el acceso a archivos, librerías o datos del disco duro o de la web.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

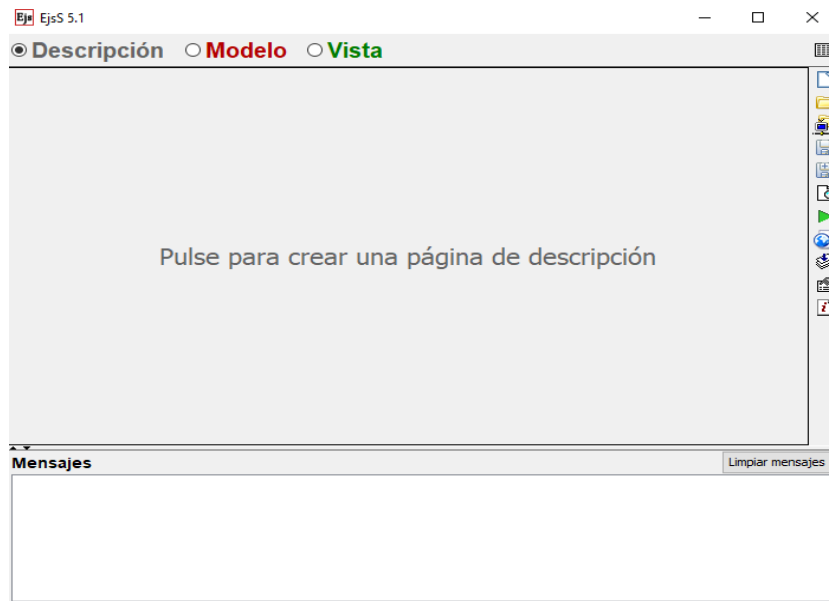


Figura 2.1. Pantalla principal de EJS

Panel vista

El panel de trabajo para la vista (véase figura 2.3) está compuesto por dos columnas o espacios verticales de edición, uno a la izquierda y otro a la derecha de la ventana:

- El espacio de la izquierda se llama *Árbol de elementos*, y es donde se tiene el control de todas las partes gráficas que componen la visualización de la simulación, y es la parte editable de la vista.
- El espacio vertical derecho se llama *Elementos para la vista*, y consta de todas las partes visuales o bloques de construcción de que dispone EJS para ir armando los elementos gráficos de la vista. Esta parte no es editable.



Figura 2.2. Panel modelo en EJS

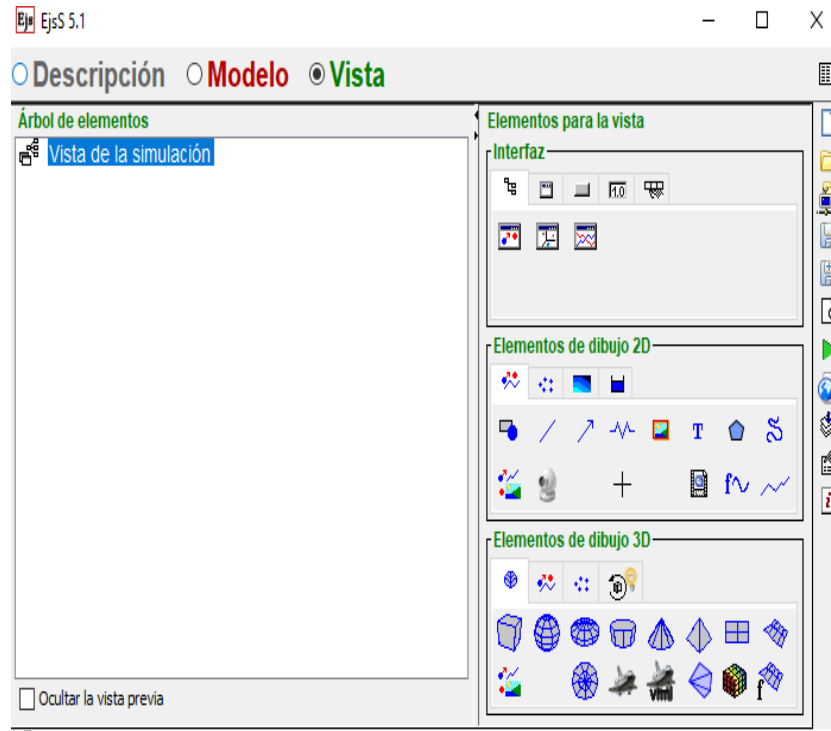


Figura 2.3. Panel vista en EJS

2.2.2 Matlab/Simulink

Millones de ingenieros y científicos en todo el planeta utilizan MATLAB para analizar y diseñar los sistemas y productos que transforman nuestro mundo [12]. El lenguaje de MATLAB, basado en matrices, es la forma más natural del mundo para expresar las matemáticas computacionales. Las gráficas integradas facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos. El entorno de escritorio invita a experimentar, explorar y descubrir.

MATLAB le ayuda a llevar sus ideas más allá del escritorio. Puede ejecutar sus análisis en conjuntos de datos de mayor tamaño y expandirse a clústeres y nubes. El código de MATLAB se puede integrar con otros lenguajes, lo que le permite implementar algoritmos y aplicaciones en sistemas web, empresariales o de producción [12].

Simulink es una herramienta gráfica, incluida en MATLAB, para el modelado, análisis y simulación de una amplia variedad de sistemas físicos y matemáticos, inclusive aquellos con elementos no lineales y aquellos que hacen uso de tiempos continuos y discretos [11].

En este proyecto se ha hecho uso de Simulink para acceder al modelo del clima del invernadero en el que está basado este laboratorio virtual, desarrollado en la tesis doctoral del Dr. Francisco Rodríguez Díaz titulada *Modelado y Control jerárquico de Crecimiento de Cultivos en Invernadero* [13], mostrado en la figura 2.4.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

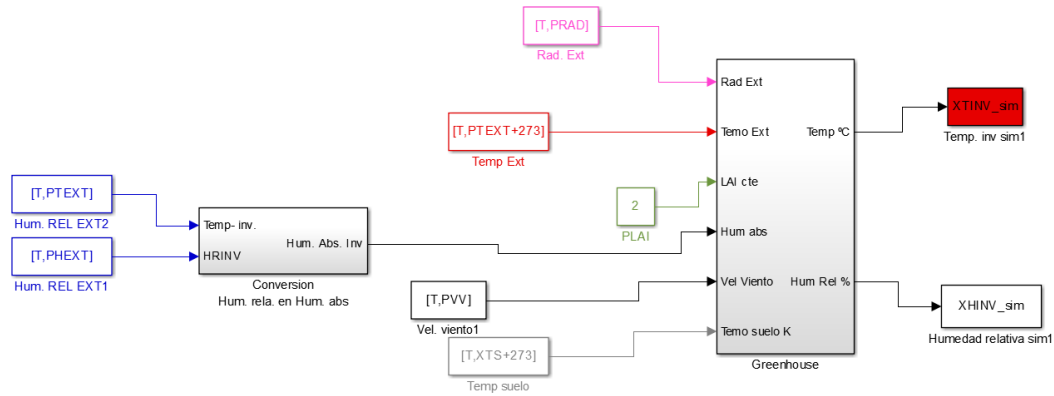


Figura 2.4. Bloques pertenecientes al modelo de clima de invernadero y sus algoritmos de control.

También se hace uso de las funciones gráficas de MATLAB para elaborar las gráficas de resultados con los datos obtenidos en nuestro laboratorio virtual, es decir, importamos los datos del archivo de extensión “.m” generado por Easy Java Simulations y tratamos esos datos en el entorno de desarrollo de MATLAB. En la figura 2.5 se puede ver un ejemplo de las gráficas obtenidas.

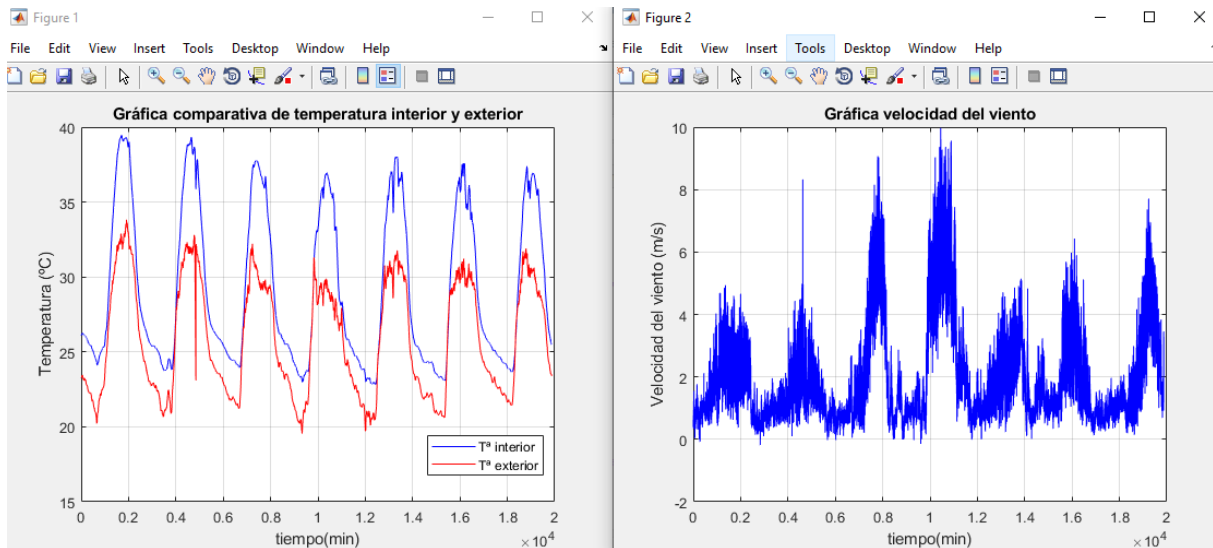


Figura 2.5. Ejemplo de gráficas en MATLAB

2.3 Modelo del clima de un invernadero

El modelo del clima de un invernadero está desarrollado en la tesis doctoral desarrollada por Dr. Francisco Rodríguez Díaz titulada *Modelado y Control jerárquico de Crecimiento de Cultivos en Invernadero* [13], la cual presenta un mayor desarrollo sobre este tema.

En este capítulo se va a describir el modelo simplificado del clima interior de un invernadero, que se compone de dos ecuaciones diferenciales, las entradas y salidas descritas en la figura 2.6 y hay que asumir unas hipótesis de partida:

- Sólo se considera el aire como elemento del invernadero.
- Las variables de estado del sistema son la temperatura del aire, $X_{t,a}$ y la humedad del aire (absoluta, $X_{ha,a}$ y relativa $X_{hr,a}$). La concentración de CO_2 no se modela.
- Las variables exógenas y perturbaciones que afectan al sistema y que se consideran condiciones de contorno, son la temperatura del aire exterior, $P_{t,e}$, la humedad absoluta del aire exterior, $P_{ha,e}$, la velocidad del viento, $P_{vv,e}$, la dirección del viento, $P_{dv,e}$, la radiación global en el exterior, $P_{rs,e}$, la temperatura de la superficie del suelo, $P_{t,ss}$, y el índice de área foliar como medida del estado del cultivo, P_{LAI} .
- Las entradas de control del sistema son la posición de las ventilaciones, U_{ven} , la posición de la malla de sombreo, U_{malla} y la temperatura del agua que circula por las tuberías del sistema de calefacción, $U_{t,cal}$.

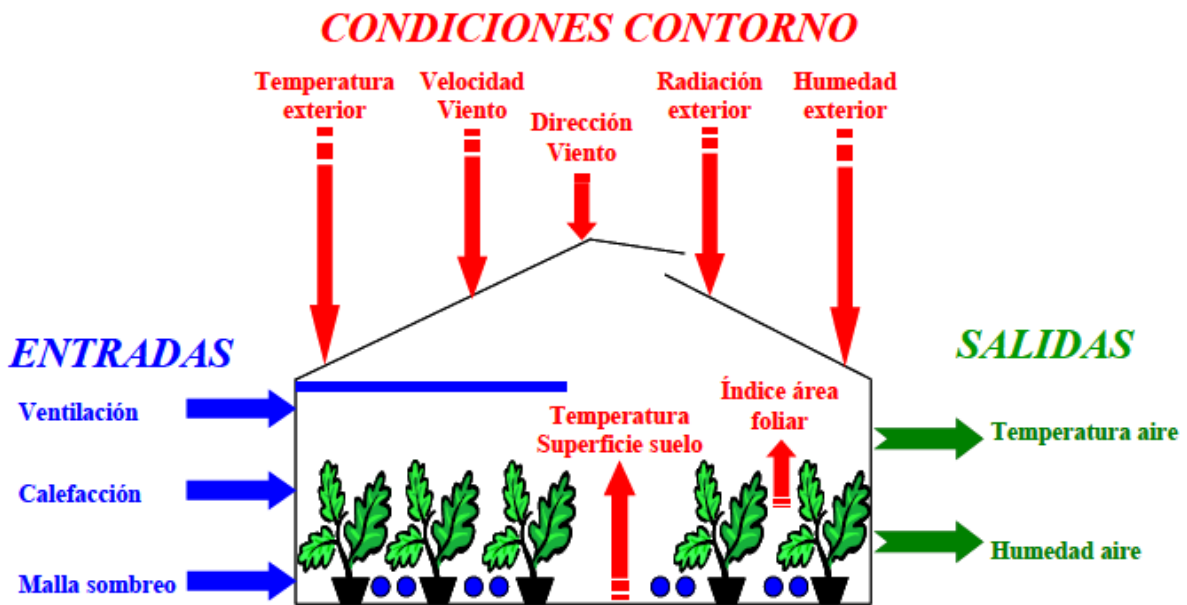


Figura 2.6. Esquema de entradas/salidas del modelo climático simplificado [13].

2.3.1 Modelo simplificado de temperatura de aire

La figura 2.7 muestra los flujos que se han considerado en el diseño del modelo simplificado de la temperatura del aire. Basándose en todos los procesos que se indican, el calor acumulado en el aire del invernadero viene dado por la siguiente ecuación de balance:

$$Q_{ac,a} = Q_{sol,a} + Q_{cnv,ss-a} + Q_{cnv,cal-a} - Q_{cnd_{cnv,a-e}} - Q_{ven,a-e} - Q_{perd,a-e} - Q_{tra,cu} \quad (2.1)$$

donde $Q_{sol,a}$ es la radiación solar que absorbe el aire del invernadero, $Q_{cnd_{cnv,a-e}}$ es la transferencia de calor por convección y conducción entre el aire interior y exterior del invernadero, $Q_{cnv,ss-a}$ es la transferencia de calor por convección con la superficie del suelo, $Q_{cnv,cal-a}$ es la transferencia de calor por convección con las tuberías del sistema de calefacción, $Q_{ven,a-e}$ es el intercambio de calor con el aire exterior debido a la ventilación natural, $Q_{perd,a-e}$ es el intercambio de calor con el aire exterior por infiltración por la no estanqueidad de la estructura y las roturas en la cubierta y $Q_{tra,cu}$ es el calor latente producido por el proceso de transpiración del cultivo. Si se expresa el calor acumulado como la variación de la temperatura del aire del invernadero, $X_{t,a}$, en función del tiempo, τ , resulta:

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

$$Q_{sol,a} + Q_{cnv,ss-a} + Q_{cnv,cal-a} - Q_{cnd_{cnv},a-e} - Q_{ven,a-e} - Q_{perd,a-e} - Q_{tra,cu} = \quad (2.2)$$

$$= c_{cesp,a} c_{den,a} \frac{c_{vol,a}}{c_{area,ss}} \frac{dX_{t,a}}{d\tau}$$

donde $c_{cesp,a}$ es el calor específico del aire, $c_{den,a}$ es la densidad del aire, $c_{vol,a}$ es el volumen de aire que ocupa el invernadero y $c_{area,ss}$ es el área de la superficie del suelo. Cada uno de estos flujos de energía se modela de la siguiente manera:

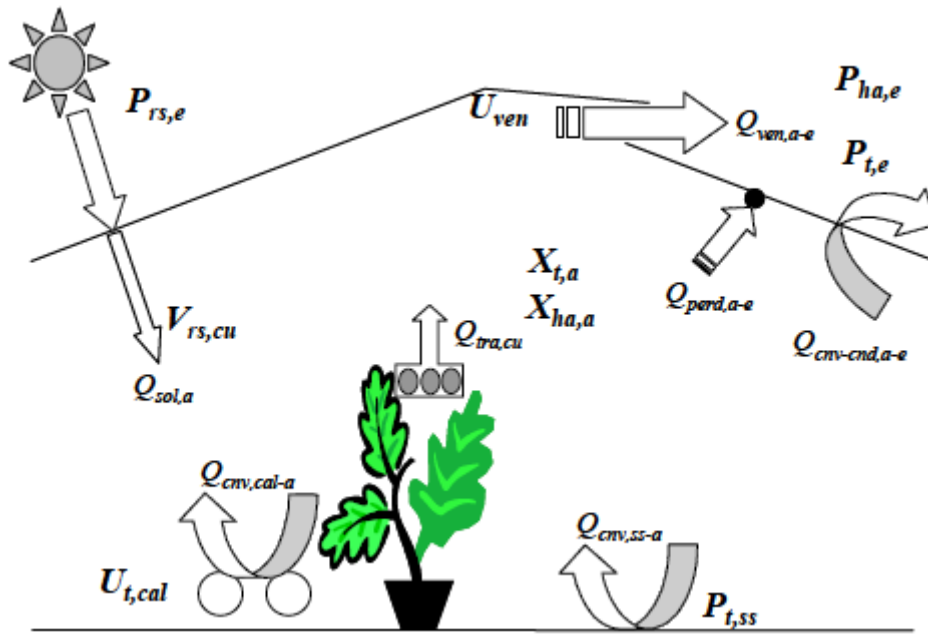


Figura 2.7. Flujos de energía y vapor de agua en el aire del invernadero [13].

- Radiación solar absorbida por el aire interior del invernadero. La radiación solar que atraviesa la cubierta y alcanza el cultivo, $V_{rs,cu}$, que es la que, en parte, absorbe el aire viene determinada por:

$$V_{rs,cu} = V_{toc,cu} P_{rs,e} \quad (2.3)$$

donde $P_{rs,e}$ es la radiación solar en el exterior y $V_{toc,cu}$ es el coeficiente de transmisión de onda corta función del coeficiente de transmisión de la cubierta, del estado del blanqueado de la misma y del estado de la malla de sombreo. Por tanto, la radiación solar que absorbe el aire, $Q_{sol,a}$ viene expresada por:

$$Q_{sol,a} = c_{aoc,a} V_{rs,cu} \quad (2.4)$$

donde, $c_{aoc,a}$ es el coeficiente de absorción de radiación de onda corta del aire del invernadero, aunque, como realmente el aire es inerte a la radiación solar, se trata de un parámetro de eficiencia térmica de la energía solar. Este coeficiente hay que estimarlo en el proceso de calibración del modelo.

- Transferencia de calor por convección entre la superficie del suelo y el aire interior. El modelado de este proceso, $Q_{cnv,ss-a}$, es función de la diferencia entre la temperatura de la superficie del suelo, $X_{t,ss}$, y la temperatura del aire interior, $X_{t,a}$:

$$Q_{cnv,ss-a} = c_{cnv,ss-a}(X_{t,ss} - X_{t,a}) \quad (2.5)$$

donde $c_{cnv,ss-a}$ es el coeficiente de convección que se considera constante y que hay que estimar.

- Transferencia de calor por convección entre las tuberías de calefacción y el aire interior. En el modelado de este proceso, $Q_{cnv,cal-a}$, se considera que la temperatura de la superficie exterior de las tuberías es igual a la del agua que circula por ellas, $U_{t,cal}$, que es una entrada de control del sistema. Este proceso se modela como una función de su diferencia con la temperatura del aire interior, $X_{t,a}$, mediante la siguiente expresión:

$$Q_{cnv,cal-a} = c_{cnv,cal-a}(U_{t,cal} - X_{t,a}) \quad (2.6)$$

donde $c_{cnv,cal-a}$ es el coeficiente de convección de la calefacción que se considera constante y que hay que estimar.

- Transferencia de calor por convección y conducción en la cubierta entre el aire exterior y el aire interior. El modelado de este proceso, $Q_{cnd_{cnv,a-e}}$ es una función lineal proporcional a la diferencia entre la temperatura del aire exterior, $P_{t,e}$, y la temperatura del aire interior, $X_{t,a}$, es decir:

$$Q_{cnd_{cnv,a-e}} = c_{cnd_{cnv,a-e}}(X_{t,a} - P_{t,e}) \quad (2.7)$$

donde $c_{cnd_{cnd,a-e}}$ es el coeficiente de pérdidas que se considera constante y se estima empíricamente.

- Transferencia de calor con el aire exterior debido a ventilación y pérdidas por infiltración. Los dos flujos se modelan simultáneamente ya que el proceso de las pérdidas por infiltración entre el exterior y el interior se incluye como un efecto constante en el flujo de ventilación, $V_{ven,flujo}$. Por tanto, se utiliza el siguiente modelo para describir estos procesos:

$$Q_{ven,a-e} + Q_{perd,a-e} = \frac{c_{esp,a}c_{den,a}}{c_{area,ss}} V_{ven,flujo}(X_{t,a} - P_{t,e}) \quad (2.8)$$

El flujo de ventilación se encuentra modelado por la función de la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior, y de la velocidad del viento. Este modelo se caracteriza por el coeficiente de descarga, $c_{ven,cd}$ y el coeficiente debido al viento, $c_{ven,cv}$, que es necesario estimar.

- Transferencia de calor latente por transpiración del cultivo. El efecto de la transpiración del cultivo sobre la temperatura del aire del interior del invernadero se ha modelado como un proceso de calor latente descrito por la siguiente ecuación:

$$Q_{tra,cu} = V_{lt,vap}M_{tra,cu} \quad (2.9)$$

donde $V_{lt,vap}$ es el calor latente de vaporización función de la temperatura del aire, $X_{t,a}$, [°C] y se calcula de la siguiente manera:

$$V_{lt,vap} = 4185.5 (597 - 0.56X_{t,a}) \quad (2.10)$$

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

El flujo de vapor de agua producido por la transpiración del cultivo, $M_{tra,cu}$, se modela utilizando los trabajos de Stanghellini basados en la ecuación de Penman-Monteith y centrados en el cultivo del tomate tal y como se ha descrito en el capítulo anterior, y que se resumen en la siguiente ecuación:

$$M_{tra,cu} = \frac{1}{V_{r,tra}} \left(c_{den,a} V_{hsat,a} + \frac{V_{pcsat,a}}{c_{psico}} \frac{V_{r,cu}}{2P_{LAI}} \frac{V_{rn,cu}}{V_{lt,vap}} - c_{den,a} X_{ha,a} \right) \quad (2.11)$$

donde c_{psico} es la constante psicométrica termodinámica. La humedad de saturación del aire, $V_{hsat,a}$, la pendiente de la curva de presión de saturación del aire, $V_{pcsat,a}$, la resistencia a la transpiración del cultivo, $V_{r,tra}$, y la resistencia del cultivo, $V_{r,cu}$.

Algunas simplificaciones importantes que considerar son:

- La radiación neta que absorbe el cultivo, $V_{rn,cu}$, vital para el proceso de transpiración, se considera igual a la radiación solar despreciando el efecto de la radiación térmica o de onda larga, de forma que:

$$V_{rn,cu} = Q_{sol,cu} = V_{aoc,cu} V_{rs,cu} \quad (2.12)$$

donde $V_{aoc,cu}$ es el coeficiente de absorción de radiación de onda corta, función del índice de área foliar para considerar el estado del cultivo.

- La resistencia de la capa límite, $V_{r,cl}$, se considera constante e igual a 200 s/m.

2.3.2 Modelo simplificado de humedad de aire

El modelo de concentración de vapor de agua en el aire del invernadero se basa en una ecuación de balance de masa de vapor de agua. Como se indica en la figura 2.8, la principal fuente de vapor de agua es la transpiración del cultivo, $M_{tra,cu}$, descrita en la ecuación 2.11, mientras que la principal fuente de pérdida de vapor de agua se produce por el intercambio de aire con el exterior a través de la ventilación, $M_{ven,a-e}$, y la infiltración por pérdidas, $M_{perd,a-e}$. Por tanto, la ecuación de balance de masas utilizada para modelar la humedad absoluta del aire, $X_{ha,a}$, medida en $\text{Kg}_{\text{agua}}/\text{Kg}_{\text{aire}}$, viene dada por la siguiente ecuación:

$$c_{den,a} \frac{c_{vol,a}}{c_{area,ss}} \frac{dX_{ha,a}}{d\tau} = M_{tra,cu} - M_{ven,a-e} - M_{perd,a-e} \quad (2.13)$$

El flujo de vapor de agua debido a ventilación e infiltración se modela conjuntamente, igual que se ha realizado con el flujo de energía, con la única diferencia de que se produce un intercambio de vapor de agua. Para modelar este proceso se utiliza la misma ecuación que se utilizó para el modelo de simulación, es decir:

$$M_{ven,a-e} + M_{perd,a-e} = \frac{c_{den,a}}{c_{area,ss}} V_{ven,flujo} (X_{ha,a} - P_{ha,e}) \quad (2.14)$$

donde $P_{ha,e}$ es la humedad absoluta del aire en el exterior del invernadero y $V_{ven,flujo}$ es el flujo de ventilación. En este último término es donde se modela el efecto de pérdidas por infiltración, considerándolo como un término función de la velocidad del viento.

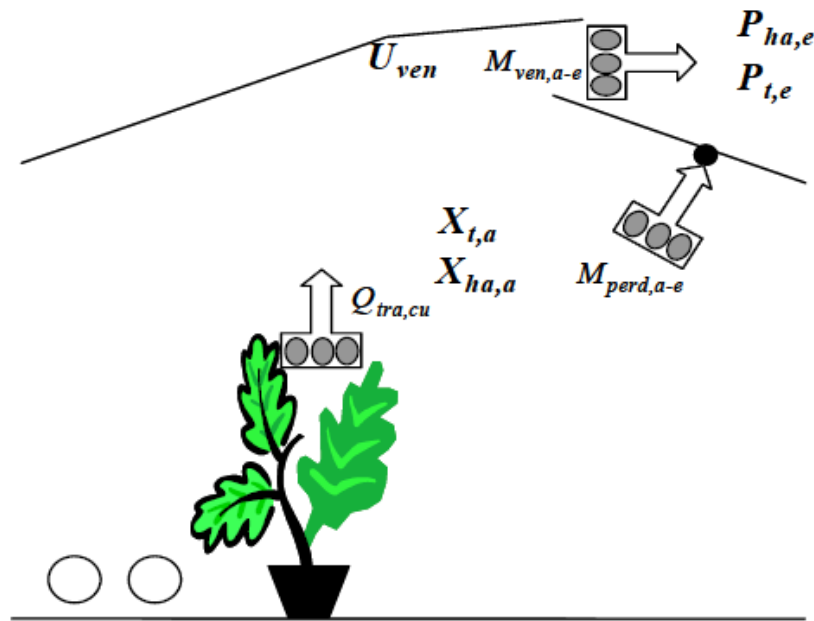


Figura 2.8. Flujos de vapor de agua en el invernadero [13].

2.4 Diseño de estrategias de control

2.4.1 Introducción

La definición de control es la de regulación, de forma manual o automática, sobre un sistema, entendiendo sistema como un conjunto de elementos que interactúan entre sí para alcanzar un determinado objetivo. El conjunto de estas definiciones recibe el nombre de sistema de control. Dentro de estos sistemas se encuentra el actuador, el controlador y el proceso como se describe en la figura 2.9, la cual presenta la arquitectura de un sistema de control en bucle abierto. Si a estos elementos se añade lo que se conoce como realimentación, el sistema de control será en bucle cerrado. La diferencia entre estos dos sistemas se centra en la realimentación, que consiste en medir la salida del sistema y compararla con la consigna o valor deseado, de esta forma se comprueba si existe o no error y se manda la orden al controlador para que indique las acciones oportunas a los actuadores y así subsanar ese error. La arquitectura de un sistema de control en bucle cerrado se puede ver en la figura 2.10.

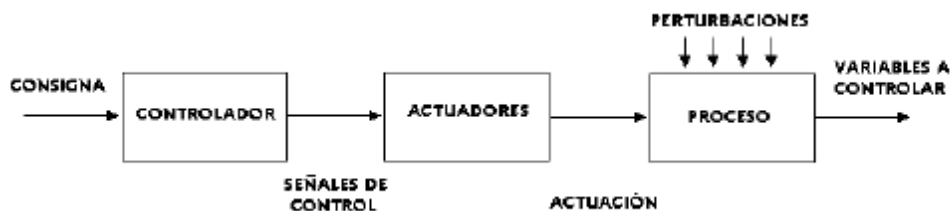


Figura 2.9. Arquitectura de sistema de control en bucle abierto.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

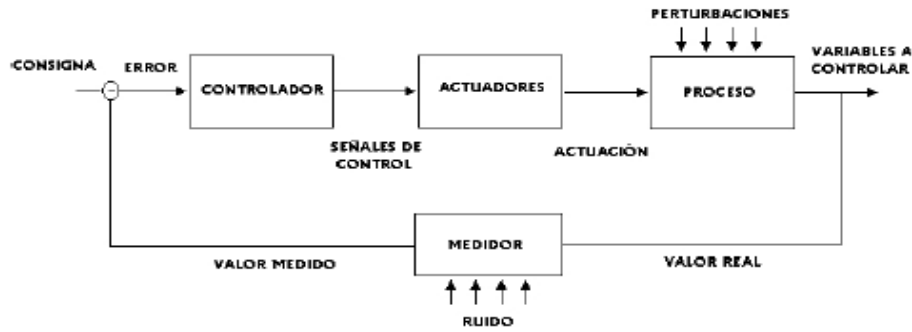


Figura 2.10. Arquitectura de sistema de control en bucle cerrado.

Los principales términos que caracterizan un sistema en bucle cerrado como el mostrado en la figura 2.10 son:

- Un *Proceso* se describe como una caja negra a la que le entran un conjunto de entradas y devuelve un conjunto de salidas.
- *Controlador* es el elemento encargado de examinar la medida realizada, compara con la variable de referencia y determinar la señal de control a enviar al actuador.
- *Actuador* es el elemento que recibe una señal de control para realizar una determinada operación y poder alcanzar el objetivo deseado. En el caso de este TFG, los actuadores son la ventilación, la malla de sombreado y la calefacción.
- La *variable controlada* es la que posee la información del proceso que se desea mantener en un determinado rango o se tiene como objetivo modificar su comportamiento. En este caso son variables controladas la temperatura interior del invernadero y la humedad.
- La *variable manipulable o de control* es la que permite actuar sobre el proceso modificando así el comportamiento del sistema.
- La *consigna o referencia* es el valor deseado al que se pretende llevar la variable controlada.
- El *error* es la diferencia existente entre la consigna y la variable controlada. En base al error producido, el sistema de control actuará de forma oportuna.
- *Perturbaciones* se puede llamar a las variables externas que afectan, en general negativamente, al comportamiento del proceso a controlar.

2.4.2 Controladores básicos y técnicas complementarias

Control todo/nada

En este tipo de controlador, el autómata sólo proporciona dos niveles de control, todo o nada. El actuador tiene dos posiciones fijas, que en la mayoría de los casos son, simplemente, conectado y desconectado.

Si el error que presenta el controlador es $e(t)$, y la señal de control que proporciona es $u(t)$, el controlador todo o nada se representa por:

$$u(t) = \begin{cases} u_{min} & \text{para } e(t) > 0 \\ u_{max} & \text{para } e(t) < 0 \end{cases}$$

El uso práctico de este controlador suele exigir que el error tenga un cierto rango antes de la conmutación, para impedir que oscile con una frecuencia demasiado alta. Se define una zona neutra o banda diferencial, en la que el elemento final de control permanece en su última posición para valores de la variable comprendidos dentro de esa zona. Este control funciona correctamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta, y posee un tiempo de retardo mínimo.

Controlador PID

El controlador PID basa su principio de funcionamiento en la acción que sus tres componentes puedan realizar en cada instante sobre la señal de error. A continuación, se define el tipo de actuación que presenta cada una de ellas por separado [2]:

- **Control Proporcional (P).** Una señal de control $u(t)$ proporcional al error existente $e(t)$. Este tipo de control se caracteriza por presentar respuestas con error en estado estacionario o error de offset. K_p representa la magnitud de la ganancia aplicada.

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

- **Control integral (I).** Aplica la integral del error existente. Es una medida de la velocidad con la que cambia la señal de control en función del error. Tiende a eliminar el error en estado estacionario debido al integrador que aporta sobre la cadena directa del sistema. Se controla mediante el parámetro T_i , definido como el tiempo integral.

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt$$

- **Control Derivativo (D).** Aplica la derivada del error existente. Evalúa cambios del error en función del tiempo. Trata de anticiparse a las modificaciones que se producen en el error facilitando una respuesta más rápida a esas variaciones. Se controla mediante el parámetro T_d , definido como el tiempo derivativo.

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt}$$

La combinación de las tres acciones de control da lugar a la acción global del controlador según el algoritmo no interactivo o ideal, tal que:

$$u(t) = K_p \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.15)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la expresión anterior, se determina la función genérica del controlador PID ideal:

$$C(s) = \frac{U(s)}{Y(s)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.16)$$

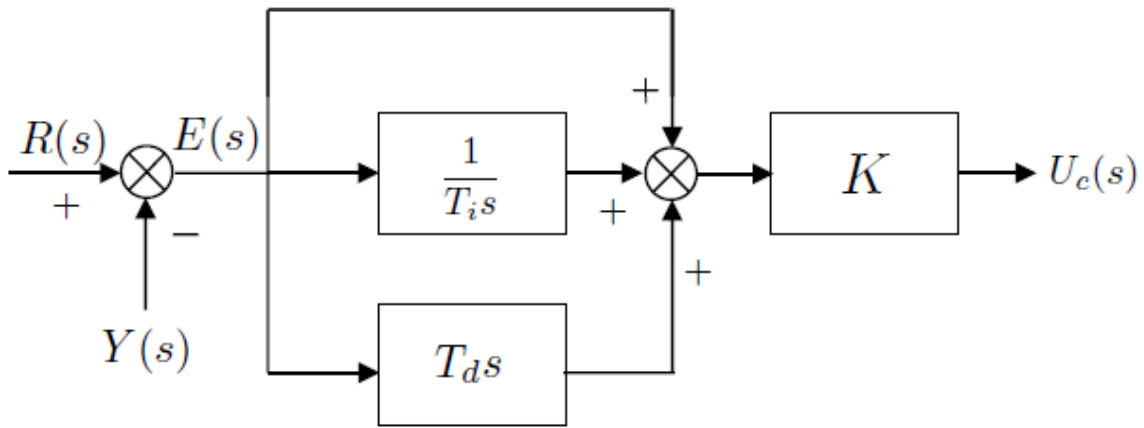


Figura 2.11. Esquema del algoritmo de control PID no interactivo o ideal [2].

Mecanismo *anti-windup*

Para un sistema de control con un amplio rango de condiciones operativas, puede suceder que la variable de control alcance los límites del actuador. Cuando esto sucede, el lazo de realimentación se rompe y el sistema opera como un sistema en lazo abierto. Además, si se utiliza un controlador con acción integral, el error puede continuar integrándose, por lo que el término integral puede hacerse muy grande. Se requiere entonces que el error tenga signo contrario durante un tiempo para que el sistema vuelva a su normalidad [1].

Para evitar esto, se utiliza el llamado mecanismo *anti-windup* (figura 2.12), que consiste en recalcular el término integral en el controlador para que la salida de este se mueva hacia un valor en el que la entrada del integrador se haga cero, es decir, que indique que el sistema no está saturado. Se introduce un nuevo parámetro, T_t , que es conocido como constante de tiempo de tracking, el cual determina el ratio con el que se pretende que el término integral sea reseteado.

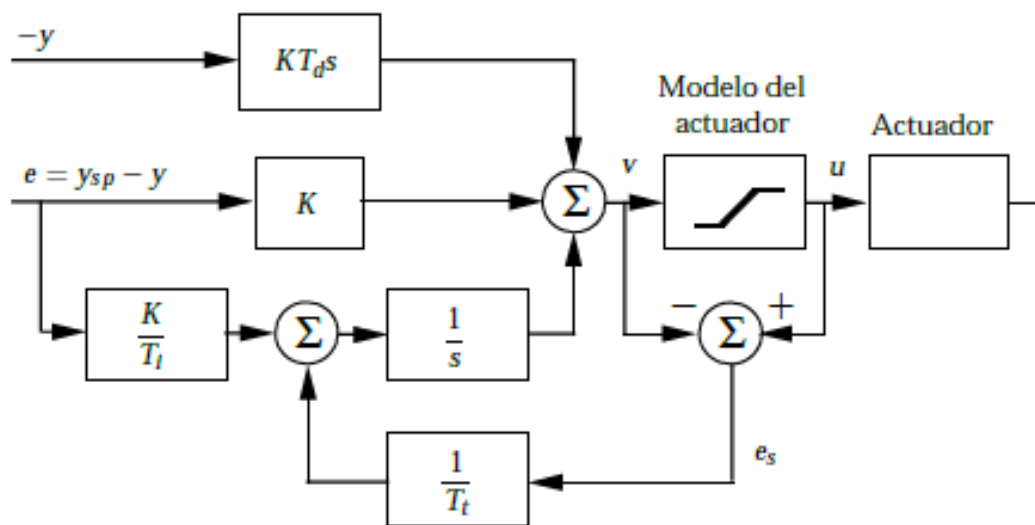


Figura 2.12. Esquema *anti-windup* [2].

2.4.3 Problema del clima en invernadero

Las variables que afectan al clima en el interior del invernadero deben mantenerse dentro de un rango de valores determinados para la producción de cultivo bajo invernadero. Existen varios tipos de variables, las que se van a controlar (temperatura, humedad y radiación PAR), las que controlan (ventilación, malla de sombreo y calefacción), y también existen perturbaciones, que son generalmente factores externos como la temperatura exterior o la velocidad del viento. La figura 2.13 muestra un esquema de todas estas variables citadas.

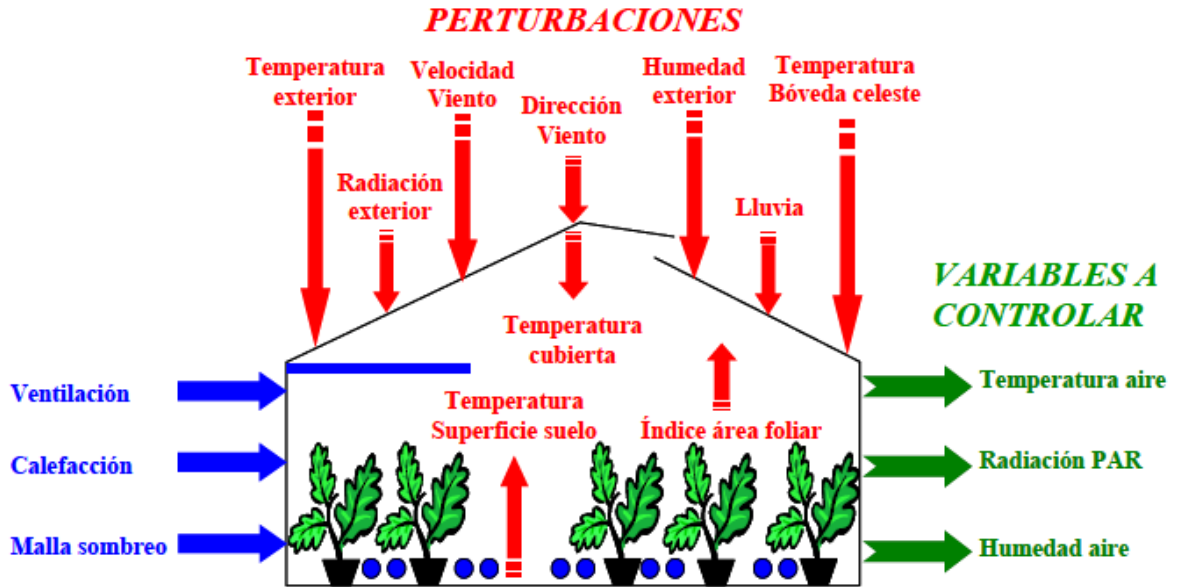


Figura 2.13. Esquema de las variables que intervienen en el problema de control climático [13]

Los problemas más importantes a tener en cuenta en el problema climático son los siguientes:

- La temperatura, la humedad y la radiación PAR interactúan entre sí, por ejemplo, si baja la radiación, baja la temperatura y la humedad aumenta al ser inversa a la temperatura.
- Es un sistema variante en el tiempo y sometido a perturbaciones medibles y no medibles, que imponen limitaciones en el comportamiento de los sistemas a controlar, por lo que el mismo estado de los actuadores puede producir salidas diferentes.
- La temperatura y la humedad se controlan con los mismos sistemas de actuación, por lo que el control de una de ellas puede provocar comportamientos no deseados en la otra, incluso pudiendo estar fuera de los límites establecidos como idóneos.
- Los actuadores presentan limitaciones físicas y de velocidad:

- La posición de la ventilación puede estar entre un valor mínimo (0% = 0°) y un valor máximo (100% = 38°):

$$0\% \leq U_{ventana} \leq 100\%$$

- La temperatura del agua de las tuberías de calefacción puede estar entre un valor mínimo que se ha considerado la temperatura interna del invernadero ($X_{t,a}$), y un valor máximo de 80°C:

$$X_{t,a} \leq U_{t,cal} \leq 80^{\circ}\text{C}$$

- La posición de la malla de sombreo puede estar entre un valor mínimo (0% = cerrada) y un valor máximo (100% = abierta):

$$0\% \leq U_{malla} \leq 100\%$$

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

- La dinámica del crecimiento de cultivo tiene una escala de tiempo diferente de la dinámica del clima del invernadero, por lo que las variables a controlar tienen determinadas restricciones que varían en el tiempo.
- El modelo del clima del invernadero no es exacto, ya que existen dinámicas desconocidas o no modeladas.

2.4.4 Control de la temperatura con la ventilación natural

La ventilación natural proporciona un intercambio de aire entre el interior y el exterior del invernadero. Generalmente, el aire exterior es más frío que el interior, por lo que al abrir las ventanas la temperatura interior desciende. El controlador se encarga de controlar la apertura de las ventanas para alcanzar la consigna deseada.

Para obtener el modelo se realiza una entrada en escalón, con el sistema en BA, sobre el actuador de ventilación de amplitud 100%, obteniendo la respuesta del sistema mostrada en la figura 2.14.

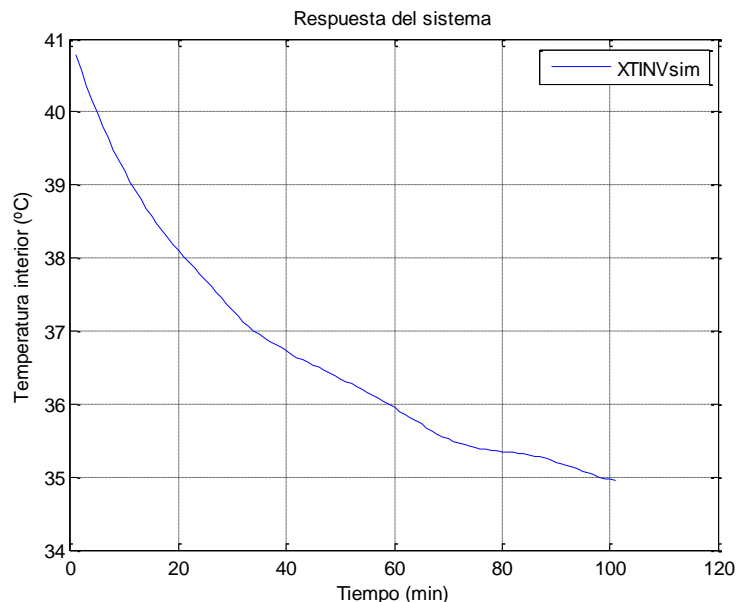


Figura 2.14. Respuesta del sistema ante un escalón sobre la ventilación.

Como se puede observar en este caso, el comportamiento de la respuesta obtenida en el sistema de ventilación se puede aproximar a un sistema de primer orden. Este tipo de sistema se comporta siguiendo la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k \cdot e^{st_r}}{\tau s + 1} \quad (2.17)$$

Estos parámetros, donde k es la ganancia estática del proceso, τ la constante de tiempo, y t_r el tiempo de retardo, se calculan mediante el método de la curva de reacción. Este método se basa en la reacción que tiene un sistema de primer orden ante un escalón de amplitud U en la señal de control del proceso (figura 2.16) para poder calcular el valor de los parámetros del modelo.

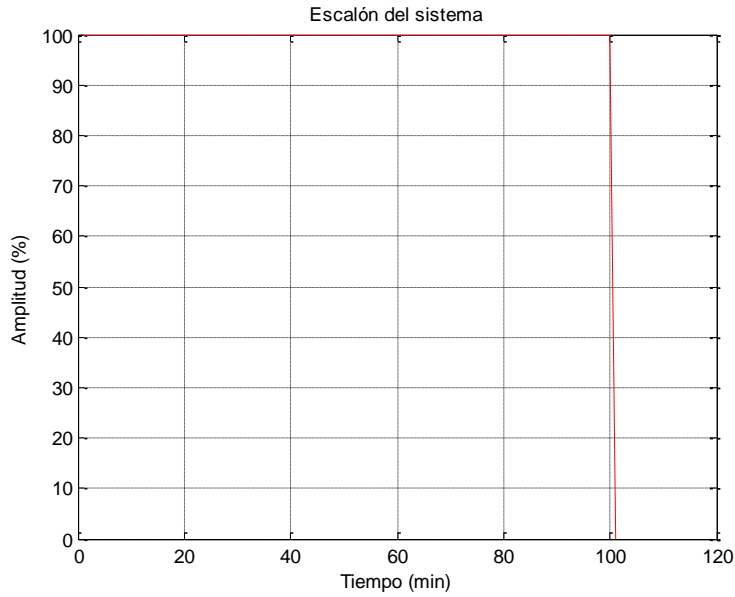


Figura 2.15. Escalón sobre la entrada de ventilación.

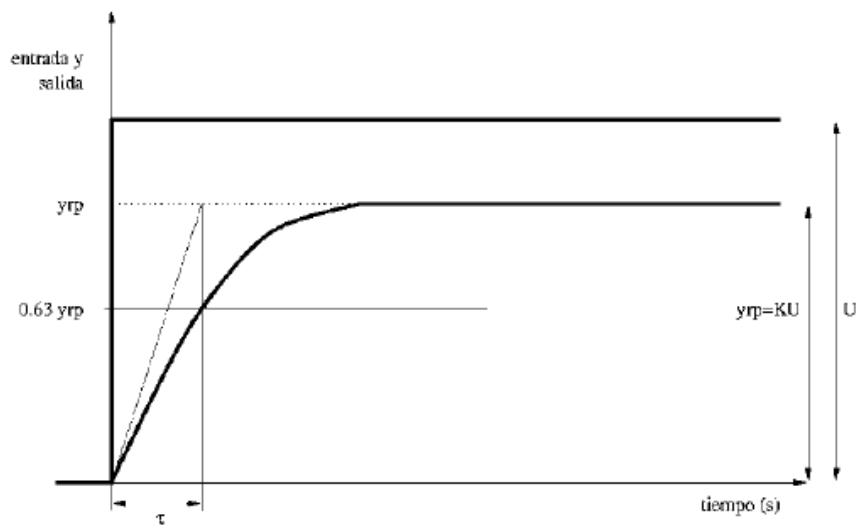


Figura 2.16. Respuesta a un escalón de un sistema de primer orden.

Aprovechando el escalón mostrado en la figura 2.15, se va a obtener los parámetros del modelo:

- Ganancia estática (k_{ven}):

$$k_{ven} = \frac{TempFinal - TempInicial}{U} = \frac{34.93 - 40.79}{100} = -0.0583 [^{\circ}C/\%]$$

- Constante de tiempo (τ_{ven}):

$$\tau_{ven} = t(0.632 \cdot \Delta Y + Y_0) - t_r = t(0.632 \cdot (34.93 - 40.79) + 40.79) - 0$$

$$\tau_{ven} = 31 [s]$$

Como se puede observar en la figura 2.14, el sistema de ventilación no tiene tiempo de retardo.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

Con los parámetros calculados la función de transferencia que modela este sistema queda definida como:

$$G(s) = \frac{-0.0583}{31s + 1}$$

En la figura 2.17 se puede ver la respuesta del sistema real de ventilación y la respuesta del modelo calculado ante un escalón de amplitud 100%. Como se puede apreciar, el modelo se ajusta adecuadamente a los datos reales.

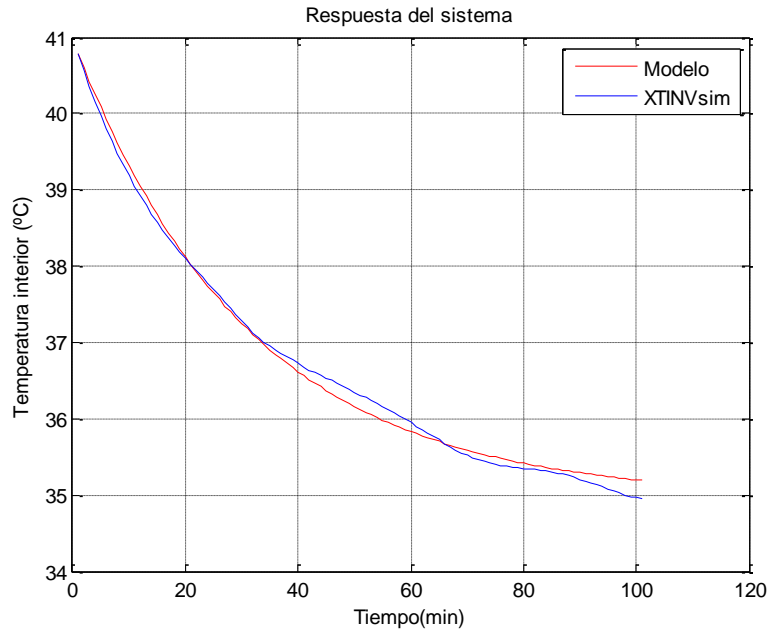


Figura 2.17. Respuesta del sistema de ventilación real y del modelo ante un escalón de amplitud 100%.

Diseño del controlador de temperatura frente a ventilación natural

El controlador que se va a desarrollar para la ventilación va a ser un controlador tipo PI. La función de transferencia de este controlador es:

$$C_{PI}(s) = K_{p,ven} \cdot \left(\frac{T_{i,ven} s + 1}{T_{i,ven} s} \right) \quad (2.18)$$

Este controlador está definido por la constante proporcional $K_{p,ven}$ y la constante integral $T_{i,ven}$, que deben ser calculadas. Para el cálculo de estos parámetros se ha hecho uso del método de cancelación polo-cero.

La función de transferencia general de un sistema en bucle cerrado viene determinada por:

$$G_{BC}(s) = \frac{K_{p,ven} \cdot \left(\frac{T_{i,ven} s + 1}{T_{i,ven} s} \right) \cdot \frac{k}{\tau s + 1}}{1 + K_{p,ven} \cdot \left(\frac{T_{i,ven} s + 1}{T_{i,ven} s} \right) \cdot \frac{k}{\tau s + 1}} = \frac{k \cdot K_{p,ven}}{T_{i,ven} s + k \cdot K_{p,ven}} = \frac{1}{\frac{T_{i,ven}}{k \cdot K_{p,ven}} s + 1} \quad (2.19)$$

Considerando la hipótesis de este método donde $T_{i,ven} = \tau_{ven}$, se puede observar cómo se anulan el cero del numerado con el polo del denominador en el producto de la función de transferencia del controlador con la de la planta, obteniéndose el valor de $\tau_{BC} = \frac{T_{i,ven}}{k \cdot K_{p,ven}}$.

Respecto a la constante de tiempo deseada para el sistema en bucle cerrado, por ejemplo, se puede considerar que la constante de tiempo en bucle cerrado (τ_{BC}) debe de ser el doble de rápido que la constante de tiempo en bucle abierto, por lo que la ganancia del controlador será $K_{p,ven} = \frac{2}{k_{ven}}$, así el controlador siempre podrá asegurar el seguimiento de referencias, ya que el sistema en BC sería más rápido que en BA.

Haciendo los cálculos, la función de transferencia del controlador PI del sistema de ventilación queda de la siguiente manera:

$$C_{PI}(s) = 34.3 \cdot \left(\frac{31 s + 1}{31 s} \right)$$

Control por ajuste por tabla

Como el sistema de actuación permite una variación continua de la posición de la ventilación entre el 0% y el 100% de apertura, se utiliza un controlador PI con *anti-windup*, con realimentación de la temperatura interior. El problema es que un controlador con coeficientes constantes no es capaz de controlar todas las variaciones del sistema, por eso se utiliza un control adaptativo con ajuste por tabla (*gain scheduling*), [10] donde la ganancia del controlador se ajusta mediante una compensación por adelanto que depende de la temperatura exterior y la velocidad del viento. Estructura del controlador mostrada en la figura 2.18.

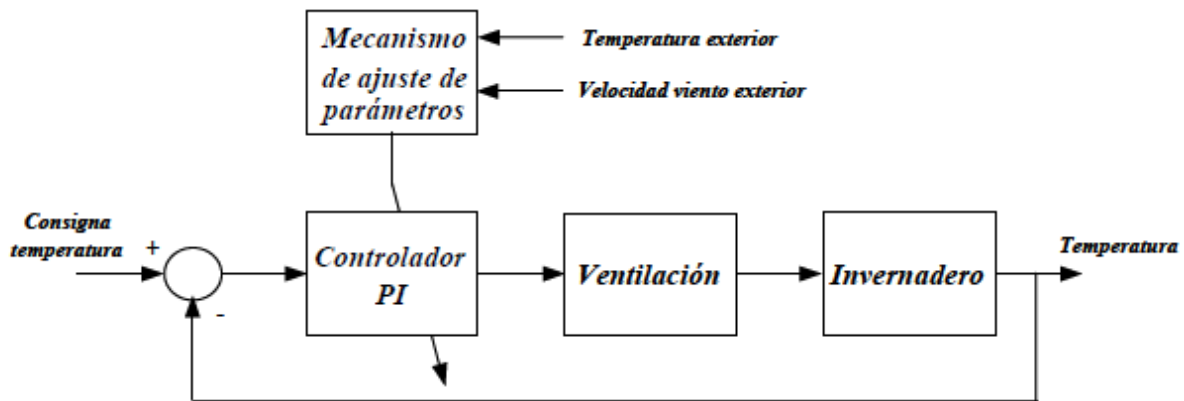


Figura 2.18. Esquema de control con ajuste por tabla [13].

El funcionamiento de este algoritmo se resume en que a medida que aumenta la velocidad del viento, disminuye el término proporcional del controlador, es decir, se abren menos las ventanas. En la figura 2.19 se muestra la relación entre el parámetro K_p y la temperatura exterior, dependiendo de la velocidad del viento.

La obtención del parámetro K_p se hace utilizando la ecuación de la recta ($y = a \cdot x + b$) quedando el término independiente y la pendiente de la recta, para cualquier velocidad de viento, de la siguiente manera:

$$a = \frac{k_{pmax} - k_{pmin}}{T_{extmin}(vmin) - T_{extmax}(vmin)} \quad (2.20)$$

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

$$b = k_{pmin} - \frac{k_{pmax} - k_{pmin}}{T_{extmin}(vmin) - T_{extmax}(vmin)} \cdot (T_{extmax}(vmin) + P_{vv,e} \frac{T_{extmin}(vmax) - T_{extmin}(vmin)}{V_{max}})$$

Por lo que el término proporcional del controlador se calcula de la siguiente manera:

$$K_p = \frac{k_{pmax} - k_{pmin}}{T_{extmin}(vmin) - T_{extmax}(vmin)} \cdot P_{t,e} + k_{pmin} - \frac{k_{pmax} - k_{pmin}}{T_{extmin}(vmin) - T_{extmax}(vmin)} \cdot \left(T_{extmax}(vmin) + P_{vv,e} \frac{T_{extmin}(vmax) - T_{extmin}(vmin)}{V_{max}} \right) \quad (2.21)$$

Donde k_{pmin} es el valor proporcional mínimo del controlador, k_{pmax} es el valor proporcional máximo del controlador, $T_{extmin}(vmin)$ es la temperatura exterior mínima con velocidad de viento mínima, $T_{extmin}(vmax)$ es la temperatura exterior mínima con velocidad de viento máxima, $T_{extmax}(vmin)$ es la temperatura exterior máxima con velocidad de viento mínima, V_{max} es la velocidad de viento máxima y $P_{vv,e}$ es la velocidad del viento exterior.

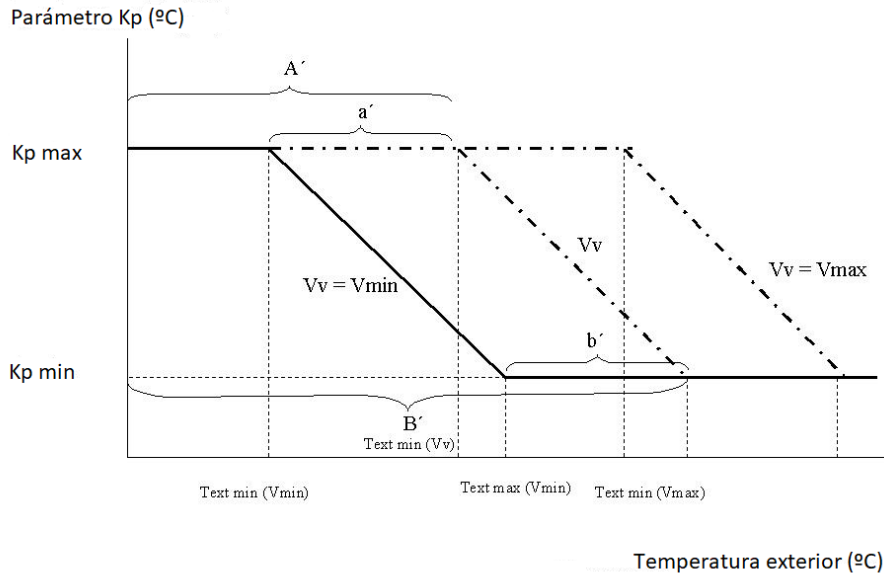


Figura 2.19. Parámetros característicos de la función que calcula el término K_p del controlador.

2.4.5 Control de la temperatura con calefacción

El funcionamiento de la calefacción consiste en hacer circular agua caliente por tuberías, así por convección se elevará la temperatura interior del invernadero. Se trata de un sistema en cascada, pero en este caso se considera la temperatura de las tuberías como un parámetro conocido, por lo que se simplifica mucho el sistema y para controlarlo bastaría con un controlador PI con *anti-windup*, que se encargará de ir aumentando la temperatura del agua de las tuberías hasta que se alcance la consigna deseada en la temperatura interior del invernadero.

Para obtener el modelo se realiza una entrada en escalón, con el sistema en BA, sobre el actuador de calefacción con una amplitud de 40°C en el instante 97[min], obteniendo la respuesta del sistema mostrada en la figura 2.20.

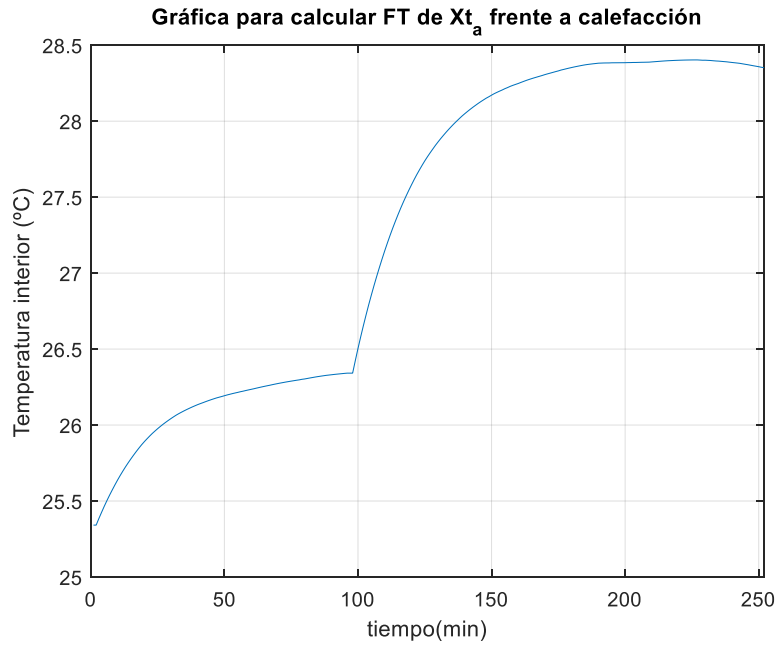


Figura 2.20. Respuesta del sistema ante un escalón sobre la calefacción.

Como se puede observar en este caso, el comportamiento de la respuesta obtenida en el sistema de calefacción se puede aproximar a un sistema de primer orden. Este tipo de sistema se comporta siguiendo la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k_{cal} \cdot e^{st_r}}{\tau_{cal} s + 1} \quad (2.22)$$

Estos parámetros, donde k_{cal} es la ganancia estática del proceso, τ_{cal} la constante de tiempo, y t_r el tiempo de retardo, se calculan mediante el método de la curva de reacción. Este método se basa en la reacción que tiene un sistema de primer orden ante un escalón de amplitud U en la señal de control del proceso (figura 2.16) para poder calcular el valor de los parámetros del modelo.

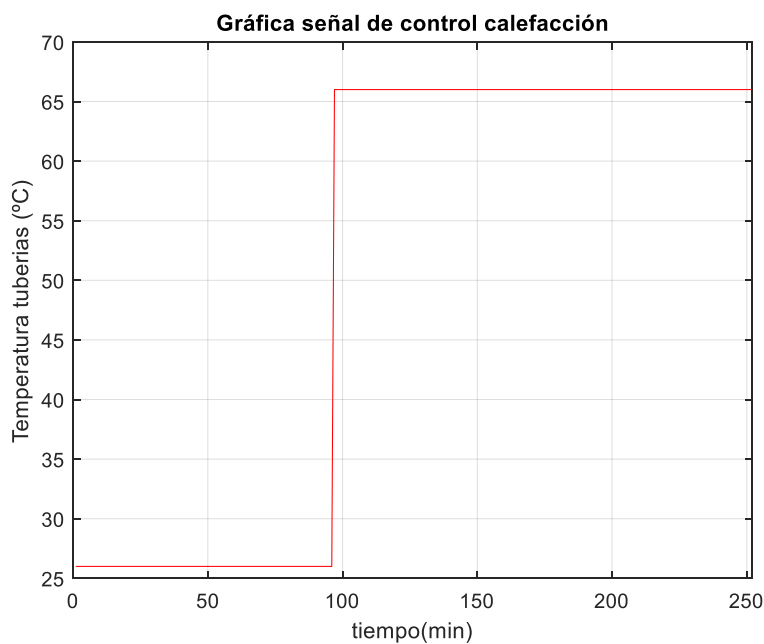


Figura 2.21. Escalón sobre la entrada de calefacción.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

Aprovechando el escalón mostrado en la figura 2.21, se va a obtener los parámetros del modelo:

- *Ganancia estática* (k_{cal}):

$$k_{cal} = \frac{TempFinal - TempInicial}{U} = \frac{28.4 - 26.3}{40} = 0.054 \text{ [}^\circ\text{C}/^\circ\text{C]}$$

- *Constante de tiempo* (τ_{cal}):

$$\tau_{cal} = t(0.632 \cdot \Delta Y + Y_0) - t_r - t_e = t(0.632 \cdot (28.4 - 26.3) + 26.3) - 0 - 97$$
$$\tau_{cal} = 21 \text{ [s]}$$

Como se puede observar en la figura 2.20, despreciamos el tiempo de retardo del sistema de calefacción.

Con los parámetros calculados la función de transferencia que modela este sistema queda definida como:

$$G_{cal}(s) = \frac{0.054}{21 s + 1}$$

En la figura 2.22 se puede ver la respuesta del sistema real de calefacción y la respuesta del modelo calculado ante un escalón de amplitud 40°C. Se puede apreciar que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos reales.

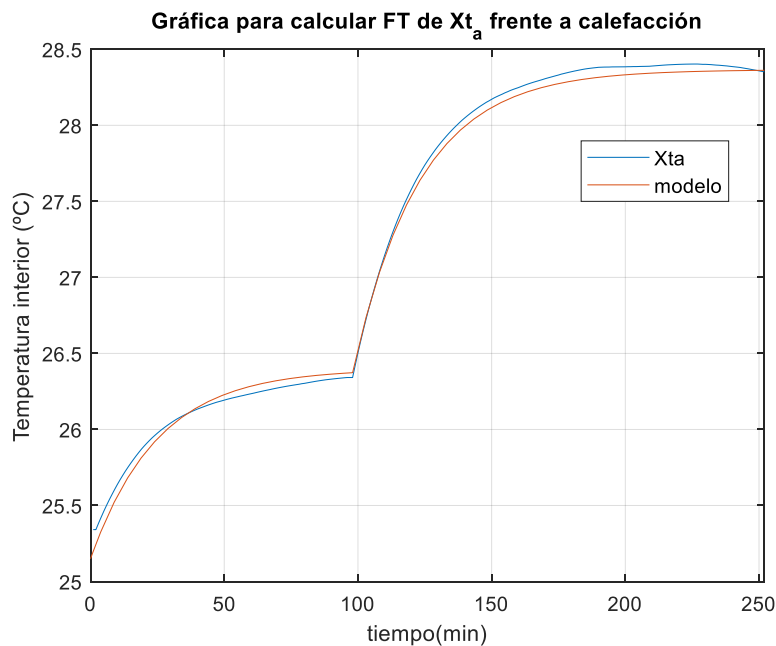


Figura 2.22. Respuesta del sistema de calefacción real y del modelo ante un escalón de amplitud 40°C

Diseño del controlador de temperatura frente a calefacción

El controlador que se va a desarrollar para la ventilación va a ser un controlador PI con *anti-windup*. La función de transferencia de este controlador es:

$$C_{PI_cal}(s) = K_{p,cal} \cdot \left(\frac{T_{i,cal} s + 1}{T_{i,cal} s} \right) \quad (2.23)$$

Este controlador está definido por la constante proporcional $K_{p,cal}$ y la constante integral $T_{i,cal}$, que deben ser calculadas. Para el cálculo de estos parámetros se ha hecho uso del método de cancelación polo-cero.

La función de transferencia de un sistema en bucle cerrado viene determinada por la ecuación 2.19, quedando igual que para el controlador de temperatura con ventilación $\tau_{BC} = \frac{T_{i,cal}}{kcal \cdot K_{p,cal}}$.

Respecto a la constante de tiempo deseada para el sistema en bucle cerrado, por ejemplo, se puede considerar que la constante de tiempo en bucle cerrado (τ_{BC}) debe de ser 0,9 veces más rápida que la constante de tiempo en bucle abierto, por lo que la ganancia del controlador será $K_{p,cal} = \frac{1}{kcal \cdot 0,9}$, así el controlador siempre podrá asegurar el seguimiento de referencias, ya que el sistema en BC sería más rápido que en BA.

Haciendo los cálculos, la función de transferencia del controlador PI del sistema de ventilación queda de la siguiente manera:

$$C_{PI_cal}(s) = 10.6 \cdot \left(\frac{21 s + 1}{21 s} \right)$$

2.4.6 Control de la radiación con malla de sombreo

El principal método que se utiliza para controlar la radiación es la malla de sombreo, que reduce la transmisión de radiación PAR hacia el cultivo y el suelo, en consecuencia, también desciende la temperatura.

La malla de sombreo es un sistema de actuación discontinuo, ya que se encuentra recogida o extendida, por lo que se controla con un controlador todo/nada con una corrección de zona muerta respecto a la consigna de radiación, para evitar que esté abriéndose o cerrándose en intervalos cortos de tiempo.

Por otra parte, el hecho de cerrar completamente la malla produce una serie de efectos no deseables en algunas condiciones, por lo que hay que hacer una corrección en función de la temperatura mostrada en la figura 2.23.

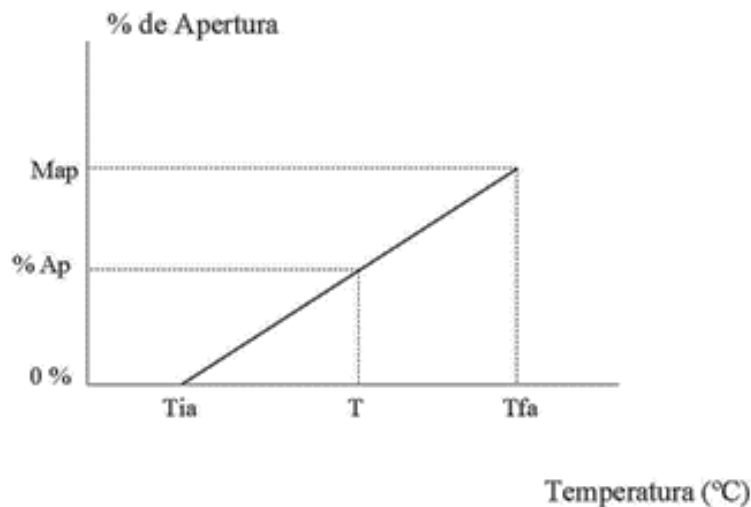


Figura 2.23. Corrección en función de la temperatura

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

De esta corrección se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{Tfa - Tia}{Xt, a - Tia} = \frac{Map - 0\%}{\%Ap - 0\%} \rightarrow \%Ap = \frac{Xt, a - Tia}{Tfa - Tia} \cdot Map \quad (2.24)$$

Donde Map es la máxima apertura permitida, en este caso de 20%, $\%Ap$ es el porcentaje de apertura que se abre entre el 80% y el 100%, Tia es la temperatura máxima para que cuando la malla esté al 100% empiece a abrir, Tfa es la temperatura máxima a la que la malla sigue abriéndose, cuando se alcance ese valor la malla estará extendida al 80% y no seguirá cerrándose.

2.4.7 Control de la humedad con ventilación

El control de la humedad relativa del invernadero tiene los inconvenientes de que la humedad y la temperatura se relacionan de forma inversa y los actuadores que se utilizan para controlar la humedad son los mismos que para controlar la temperatura. Realmente, no se controla la humedad del aire interior, en el sentido de seguir una consigna, sino que se intenta mantener dentro de unos límites modificando la consigna de temperatura en función de la humedad como se muestra en la figura 2.24 [9].

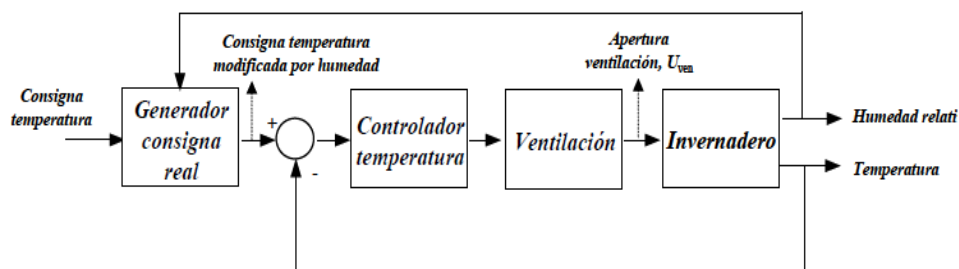


Figura 2.24. Esquema de control de la temperatura en función de la humedad [13].

En el generador de consigna se define una humedad relativa de referencia, si la real es mayor que la referencia, se disminuye el valor de la consigna de temperatura, en caso contrario, si la humedad relativa es menor que la humedad de referencia, se eleva la consigna de temperatura. La relación que sigue la variación de la consigna de temperatura es lineal y hay que definir tres parámetros para el generador: la influencia máxima de la humedad sobre la consigna de temperatura, la humedad relativa de influencia en la consigna de temperatura y la máxima desviación de humedad relativa. Se muestra en la figura 2.25.

Estos parámetros mostrados en la gráfica se conocen a partir de la consigna de temperatura, la consigna de humedad, de la influencia máxima de la humedad sobre la consigna de temperatura y de la máxima desviación de humedad relativa.

$$\text{consigna máxima} = \text{consigna temperatura} + \text{influencia}$$

$$\text{consigna mínima} = \text{consigna temperatura} - \text{influencia}$$

$$Hr \text{ max} = \text{consigna humedad} + \text{desviación}$$

$$Hr \text{ min} = \text{consigna humedad} - \text{desviación}$$

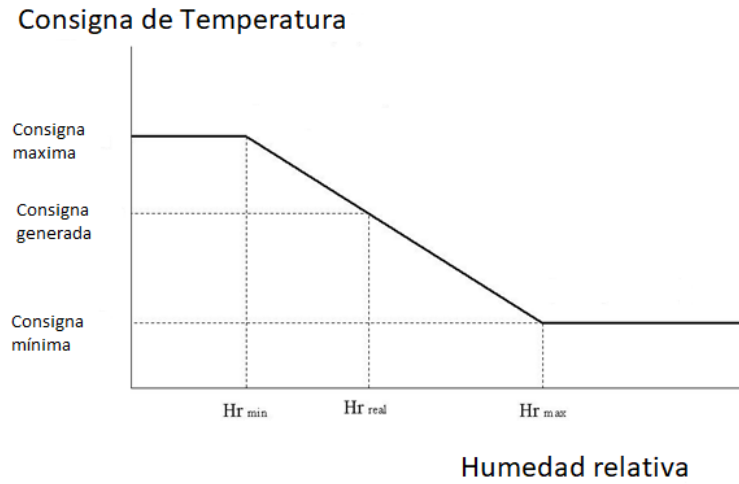


Figura 2.25. Variación de consigna en función de la humedad

Para cualquier humedad relativa del interior del invernadero, se va generando dentro de un rango establecido un valor de consigna de temperatura, que está definido por la siguiente ecuación:

$$\text{consigna generada} = \text{consigna temp.} + \frac{\text{influencia}}{\text{desviación}} \cdot [\text{consigna hum.} - \text{Hr real}] \quad (2.25)$$

Esta consigna generada es la que se introduce en los controladores de ventilación para que se mantenga la humedad dentro de un rango establecido.

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y DESARROLLO DEL LABORATORIO VIRTUAL

En el capítulo 2.2.1 se ha explicado la arquitectura general del programa EJS, y en este capítulo se va a profundizar en que compone cada una de las partes de esa arquitectura del laboratorio virtual diseñado. Se va a dividir en los dos paneles principales que tiene el programa, y se va a describir cómo se relacionan las variables, ecuaciones y elementos de cada panel.

Se puede decir que este capítulo es una descripción, desde el punto de vista software, del laboratorio virtual diseñado, y también en el panel vista se va a profundizar en describir el panel de control de la interfaz de usuario, a modo de manual de instrucciones para su uso.

Antes de empezar a explicar el desarrollo, se va a exponer cual ha sido el punto de partida para esta versión del laboratorio virtual. En el TFG titulado “desarrollo de un laboratorio virtual de un invernadero con *Easy Java Simulations*” desarrollado por Pedro Antonio Fernández Gómez [7], se diseñó el sinóptico del invernadero mostrada en la figura 3.1, la cual ha sido utilizada en este laboratorio, haciéndole algunas modificaciones. La parte de modelado se ha completado, ya que en esta versión antigua solo estaba el modelo de temperatura sin considerar la calefacción ni la transpiración de cultivo, así como tampoco estaba implementado el modelo de humedad del aire.

El panel de control y las gráficas que muestran los resultados de este laboratorio se ha diseñado íntegramente, ya que al añadir nuevos modelos y controles se ha necesitado una gama mucho más amplia de parámetros que el usuario puede modificar cuando se está usando el laboratorio, por ejemplo, el control de la malla de sombreo o de sus coeficientes. También se ha necesitado diseñar nuevas gráficas para mostrar los resultados de la evolución de los modelos y sus controladores. Todo esto se va a explicar en este capítulo con más detalle.

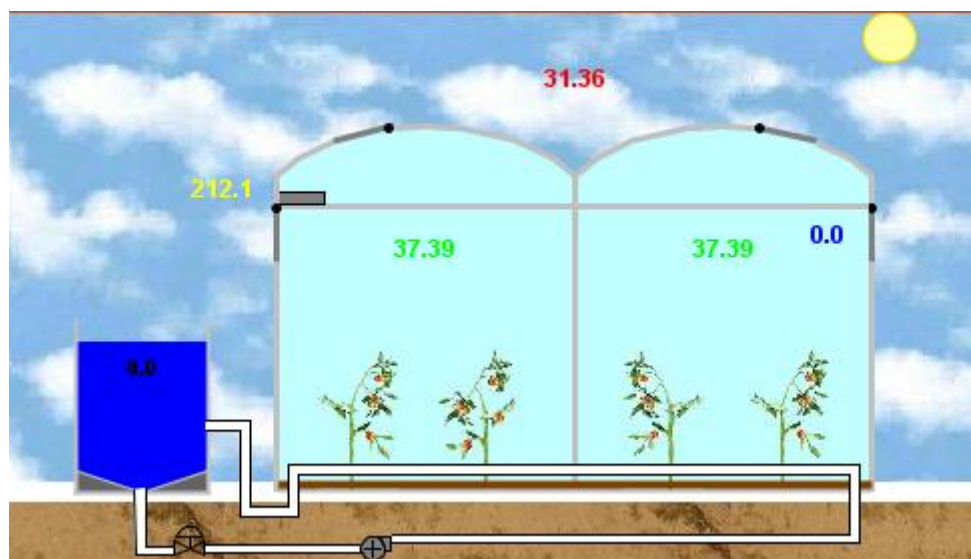


Figura 3.1. Sinóptico del invernadero de la versión anterior del laboratorio virtual

3.1 Panel modelo

Pestaña Variables

La primera de las pestañas, etiquetada como *Variables*, está destinada a especificar todas las variables (ya sean parámetros, coeficientes, variables de estado, de entrada y salida) presentes en el modelo. Se divide en seis páginas que se van a describir a continuación:

- *Variables Temperatura.* En esta página se declaran los flujos que se han considerado en el diseño del modelo simplificado de temperatura de aire, los coeficientes necesarios para calcular estos flujos, en general, son las variables descritas en el capítulo 2.3.1 de esta memoria. Todas estas variables son números reales, de tipo *double*. Se pueden ver algunas en la figura 3.2.

Nombre	Valor inicial	Tipo	Dimensión
Qac_a		double	
Qsol_a		double	
Qcnd_cnv_a_e		double	
Qcnv_ss_a		double	
Qcnv_cal_a		double	
Qven_a_e		double	
Qperd_a_e		double	
Qtra_cu		double	
Xt_a		double	
Ccesp_a	1005	double	
Cden_a	1.1970	double	
Cvol_a	3.4485400000000000e+03	double	
Carea_ss	876.96	double	
Vtoc_cu		double	
Prs_e		double	
Caoc_a	0.2500	double	
Xt_ss		double	
Ccnv_ss_a	6.6000	double	
Ccnv_cal_a	0.8	double	
Ut_cal	26	double	
Ccnd_cnv_a_e	6.7	double	
Pt_e		double	
Vven_flujo		double	

Comentario Calor acumulado en el aire del invernadero[W/m2]

Comentario Página

Figura 3.2. Página Variables Temperatura.

- *Variables Humedad.* En la segunda página se declaran las masas de vapor de agua que se han considerado en el diseño del modelo simplificado de humedad de aire descritas en el capítulo 2.3.2 y las variables que componen el controlador de humedad descrito en el capítulo 2.4.4. Todas estas variables son números reales, de tipo *double*, excepto la variable *control_humedad* que es de tipo *boolean*, que es la que se usa para activar o desactivar el controlador de humedad. Se pueden ver en la figura 3.3.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

Nombre	Valor inicial	Tipo	Dimensión
XHA_a		double	
XHR_a		double	
PHA_e		double	
PHR_e		double	
Mperd_t		double	
control_humedad	false	boolean	
maximo		double	
minimo		double	
maximo_hum		double	
minimo_hum		double	
ref_temp	30	double	
ref_hum	70	double	
influencia	5	double	
desviacion	15	double	
temp_modificada		double	

Comentario: Humedad absoluta interior

Comentario Página:

Figura 3.3. Página Variables Humedad.

- *Coficientes Temperatura*. Aquí todas las variables son números reales, de tipo *double*. Son coeficientes que influyen directa o indirectamente en el modelo del sistema, por ejemplo, los coeficientes de la radiación de onda corta de la cubierta, malla y de blanqueo. También hay algunas variables de los controladores relacionados con la temperatura, se destacan las variables *malla*, *Ventana* y *u_calefaccion*, las cuales son las entradas de control del sistema y el resto son consignas que se pueden modificar desde teclado cuando se inicia la simulación. Se pueden ver algunas en la figura 3.4.

Nombre	Valor inicial	Tipo	Dimensión
malla		double	
blanqueo	0	double	
Ctransac	0.5	double	
Ctranscb	0.89	double	
Cmalla	0.8	double	
Cpotencia	250000	double	
Crendimiento	1	double	
Caporte	0.2	double	
Vr_cl	200	double	
radiacion_max	450	double	
rad_zona_muerta_1	50	double	
rad_zona_muerta_2	50	double	
Ventana		double	
ventana_aux		double	
Ventana_max	100.0	double	
u_calefaccion	26	double	
calefaccion_aux		double	
Ventana_central		double	
Ventana_lateral		double	
Angulo_ventana		double	
Ccoangvent	38	double	
Canchovent_cen	0.73	double	
Clonvent_cen	8.3600	double	
Acentral_ventana		double	

Comentario: Entrada de control del sistema. Malla de sombreado del invernadero

Comentario Página:

Figura 3.4. Página Coeficientes Temperatura.

- *Vista dibujo Invernadero*. En esta página se declaran las variables que se necesitan para pintar el sinóptico del invernadero. Las de tipo *double* son coordenadas en el dibujo, las de tipo *int* son las que definen la dimensión de los vectores de coordenadas, las de tipo *object* son variables que ofrece la programación orientada a objetos de Java y se utilizan para los colores del dibujo, por último, las variables de tipo *string* son las que se utilizan para mostrar caracteres en el dibujo como puede ser la posición de las ventanas. Se pueden ver algunas en la figura 3.5.

Nombre	Valor inicial	Tipo	Dimensión
BaseInvX		double	[n2]
BaseInvY		double	[n2]
n3	2	int	
VentIzqX		double	[n3]
VentIzqY		double	[n3]
VentDerX		double	[n3]
VentDerY		double	[n3]
VentIzqXCenital		double	[n3]
VentIzqYCenital		double	[n3]
VentDerXCenital		double	[n3]
VentDerYCenital		double	[n3]
MallaX	0.05	double	
TamPlantaX		double	
TamPlantaY		double	
colorT1		Object	
colorT2		Object	
colorT3		Object	
colorVal		Object	
colorBom		Object	
colorSol		Object	
colorTan		Object	
colorHora		Object	
ValorTempTubos		String	
ValorMalla		String	

Comentario: Color tubería 1

Comentario Página:

Figura 3.5. Página Vista dibujo Invernadero.

- *Auxiliares Vista*. Es una ampliación de la página anterior, pero en esta página se agrupan las que influyen en el estado del programa de noche o día, declarando algunas variables de tipo *boolean* que son las que se usan para activar o desactivar el bucle día o noche dependiendo del momento. Se pueden ver algunas en la figura 3.6.
- *Panel Control*. En esta última página se declaran varios grupos de variables que se necesitan para el control de la simulación. El primer grupo son las variables principales de los controladores que son de tipo *double*. El segundo grupo son las de tipo boolean que se encargan de activar o desactivar diferentes estados, por ejemplo, la opción de grabar o no. El tercer grupo son variables de tipo *object* para almacenar los registros de datos. Por último, el cuarto grupo son las variables correspondientes al archivo de datos que se está leyendo, son vectores de datos de tipo *double* con una dimensión definida por la variable *tam* que es el tamaño definido por el archivo de datos leído. Se pueden ver algunas en la figura 3.7.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

○ Descripción ● **Modelo** ○ Vista

● **Variables** ○ Inicialización ○ Evolución ○ Relaciones fijas ○ Propio ○ Elementos

Variables Temperatura Variables Humedad Coef. Temperatura Vista dibujo Invernadero Auxiliares Vista Panel control

Nombre	Valor inicial	Tipo	Dimensión
inicio		double	
fin	0	int	
temperaturaC		double	
temperaturaTube...		double	
temperaturasTub...		double	
Rad_par_ext		double	
ColorAux		double	
temperatura_extC		double	
sp_dia_C	21.0	double	
sp_dia_C_H	21	double	
sp_noche_C	17.02296	double	
AnchoTextVmin	5.1665399999999995	double	
Cal_no_sat_C		double	
noche_dia	true	boolean	
sol		boolean	
noche		boolean	
dia		boolean	
IntensidadSol		double	
ventilacionPintar		double	
ventilacionPintar2		double	
angulolateral		double	
ventilacionInt		double	
aux		double	
aux2		double	

Comentario Variable que activa el bucle noche

Comentario Página

Figura 3.6. Página Auxiliares Vista.

○ Descripción ● **Modelo** ○ Vista

● **Variables** ○ Inicialización ○ Evolución ○ Relaciones fijas ○ Propio ○ Elementos

Variables Temperatura Variables Humedad Coef. Temperatura Vista dibujo Invernadero Auxiliares Vista Panel control

Nombre	Valor inicial	Tipo	Dimensión
registroQperd_t	null	Object	
registroPVV	null	Object	
registroKp	null	Object	
registroti	null	Object	
registroKp_cal	null	Object	
registroti_cal	null	Object	
registroXHA_a	null	Object	
registroXHR_a	null	Object	
registrocalefac...	null	Object	
PuntosAPintar	40	int	
PuntosASaltar	5	int	
indice	0	int	
tam	37440	int	
PTEXT		double	[tam]
PRAD		double	[tam]
PVV_fil		double	[tam]
PVV		double	[tam]
XTS		double	[tam]
XTINV_sim		double	[tam]
PHEXT_abs		double	[tam]
PHEXT		double	[tam]
XHINV_abs		double	[tam]
XHINV		double	[tam]
time		double	

Comentario Temperatura exterior del invernadero Archivo de datos (K)

Comentario Página

Figura 3.7. Página Panel Control.

Pestaña Inicialización

La segunda de las pestañas, etiquetada como *Inicialización*, está destinada a dar un valor inicial a todas las variables que no se les puede dar un valor inicial porque necesitan una forma más compleja, por ejemplo, que se necesiten hacer cálculos preliminares antes de dar un valor a esa variable. Se divide en tres páginas que se van a describir a continuación:

- *Leer Datos*. Como se puede ver en la figura 3.8, en esta página se cargan los datos desde un archivo de datos externo, se utiliza la función `dataReader.readData()` para los datos de verano y `dataReader2.readData()` para los datos de invierno. Este archivo que leemos tiene los datos organizados en nueve columnas, ordenadas de la primera a la última de la siguiente manera: radiación solar exterior, temperatura exterior, velocidad del viento, temperatura del suelo del invernadero, temperatura interior del aire, humedad absoluta exterior, humedad relativa exterior, humedad absoluta del aire interior y humedad relativa del aire interior.
- *Inicialización variables y registro datos*. Aquí se inicializan los registros de los datos que se van a almacenar en el archivo y el punto de operación en el que comienzan los controladores. Véase figura 3.9.
- *Colores y punto de dibujo*. En esta última página se inicializan las variables relacionadas con el dibujo del invernadero, como pueden ser las coordenadas de las ventanas o los colores de las tuberías. Se puede ver en la figura 3.10.

```

//Lectura de datos de verano

if(selector_verano==true){

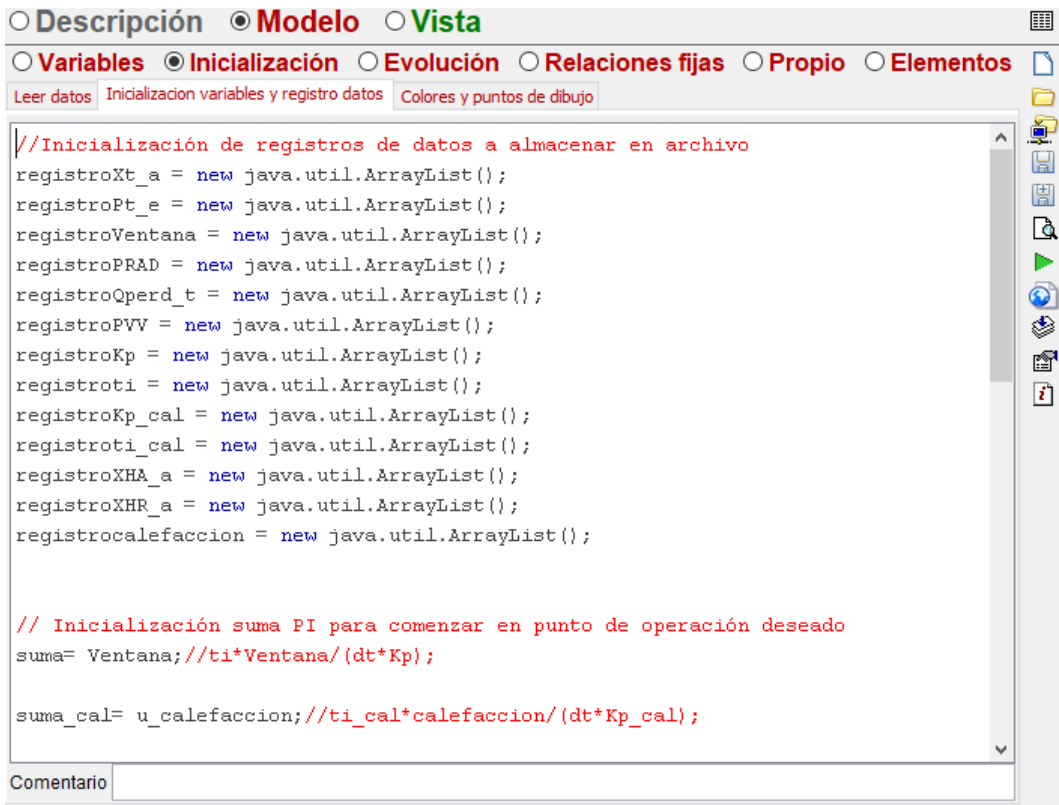
double[][] dataArray = dataReader.readData();
if (dataArray==null) {
    _println("Could not read data from "+dataReader.getFilename());
    return;
}

int col = dataArray[0].length;

for (int i=0; i<col; i++)
{
    PRAD[i]=dataArray[1][i];
    PTEXT[i]=dataArray[2][i];
    PVV[i]=dataArray[3][i];
    XTS[i]=dataArray[4][i];
    XTINV_sim[i]=dataArray[5][i];
    PHEXT_abs[i]=dataArray[6][i];
    PHEXT[i]=dataArray[7][i];
    XHINV_abs[i]=dataArray[8][i];
    XHINV[i]=dataArray[9][i];
    PVV_fil[i]=0;
}
    
```

Figura 3.8. Página Leer Datos.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

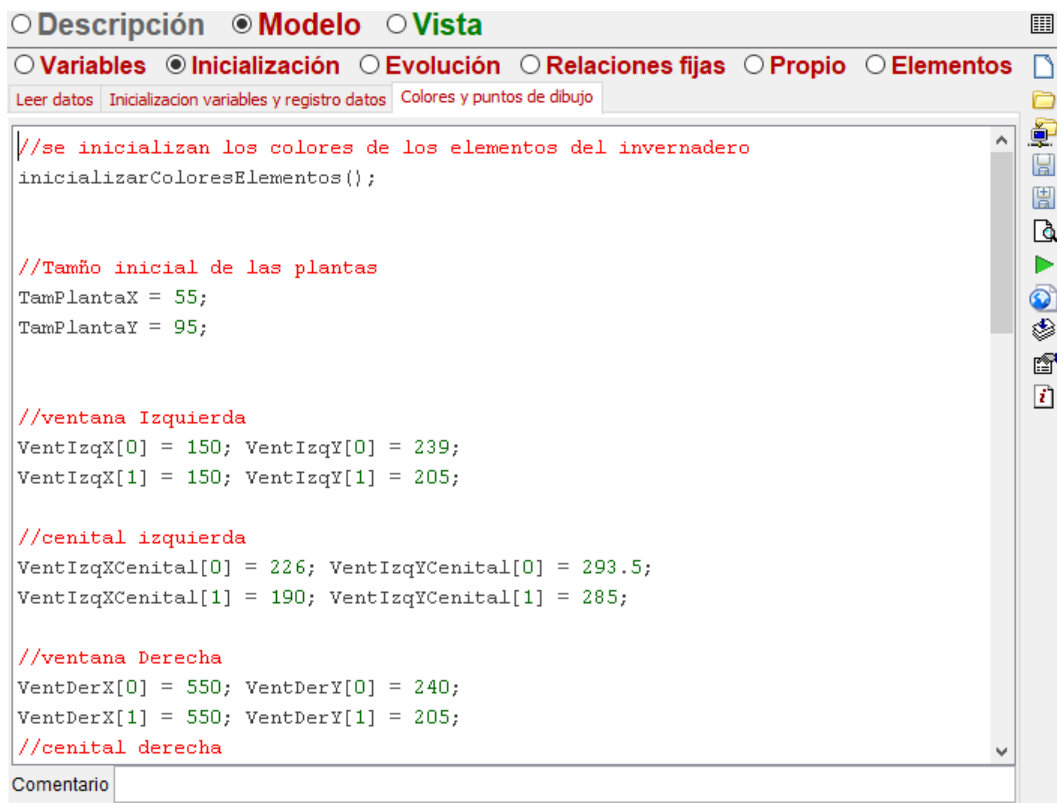


```
//Iniciación de registros de datos a almacenar en archivo
registroXt_a = new java.util.ArrayList();
registroPt_e = new java.util.ArrayList();
registroVentana = new java.util.ArrayList();
registroPRAD = new java.util.ArrayList();
registroQperd_t = new java.util.ArrayList();
registroPVV = new java.util.ArrayList();
registroKp = new java.util.ArrayList();
registroti = new java.util.ArrayList();
registroKp_cal = new java.util.ArrayList();
registroti_cal = new java.util.ArrayList();
registroXHA_a = new java.util.ArrayList();
registroXHR_a = new java.util.ArrayList();
registrocalefaccion = new java.util.ArrayList();

// Inicialización suma PI para comenzar en punto de operación deseado
suma= Ventana;//ti*Ventana/(dt*Kp);

suma_cal= u calefaccion;//ti_cal*calefaccion/(dt*Kp_cal);
```

Figura 3.9. Página Inicialización variables y registro datos.



```
//se inicializan los colores de los elementos del invernadero
inicializarColoresElementos();

//Tamaño inicial de las plantas
TamPlantaX = 55;
TamPlantaY = 95;

//ventana Izquierda
VentIzqX[0] = 150; VentIzqY[0] = 239;
VentIzqX[1] = 150; VentIzqY[1] = 205;

//cenital izquierda
VentIzqXCenital[0] = 226; VentIzqYCenital[0] = 293.5;
VentIzqXCenital[1] = 190; VentIzqYCenital[1] = 285;

//ventana Derecha
VentDerX[0] = 550; VentDerY[0] = 240;
VentDerX[1] = 550; VentDerY[1] = 205;

//cenital derecha
```

Figura 3.10. Página Colores y puntos de dibujo.

Pestaña Evolución

En esta pestaña se especifica lo que la aplicación hace cada vez que se ejecuta un paso de simulación, es decir, aquí es donde se implementa el modelo del clima del invernadero y su control. Existen dos tipos de páginas, las que se escriben en código Java para implementar un algoritmo y las que el modelo es descrito usando sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO). Se divide en cuatro páginas que se describen a continuación:

- *Controladores y otros.* Es una página de código Java, contiene la programación de los controladores explicados en el capítulo 2.4 y de algunos coeficientes necesarios para el cálculo de los submodelos que se implementan en la página siguiente. Lo primero que aparece en esta página es el algoritmo del control adaptativo con ajuste por tabla (*gain scheduling*), donde la ganancia del controlador de ventilación se ajusta mediante una compensación por adelanto que depende de la temperatura exterior y la velocidad del viento (figura 3.11). Seguido a esto se implementa el controlador PI con *anti-windup* para el control de la temperatura con la ventilación, en el cual se calcula la variable de control *Ventana*. Siguiendo el código se tiene el controlador de la humedad con la ventilación que genera una consigna de temperatura que se introduce en el controlador de la ventilación. El siguiente controlador es el todo/nada con zona muerta para la malla de sombreado y el controlador PI con *anti-windup* para la calefacción, que calculan las dos variables de control restantes del sistema.

En esta página también se implementa el algoritmo para calcular el coeficiente absorción de radiación de onda corta de la malla de sombreado ($V_{aoc,cu}$), la función de transferencia del filtro de la velocidad del viento y el cálculo de las variables del flujo de vapor de agua descritas en la ecuación 2.11.

```

//*****
//AJUSTE POR TABLA DEL VALOR PROPORCIONAL DEL CONTROLADOR DE VENTILACIÓN
a_prima= ((Textmin_vmax-Textmin_vmin)/vmax)*PVV[indice];

a_ven= (kp_max-kp_min)/(Textmin_vmin-Textmax_vmin);
b_ven= kp_min - a_ven*(Textmax_vmin+a_prima);
/*
kp_max=a_ven*(Textmin_vmin+a_prima)+b_ven;
kp_min=a_ven*(Textmax_vmin+a_prima)+b_ven;
*/
//Calculamos la nueva Kp del controlador de ventilación
if( (Pt_e-273) < lim_inferior_PTEXT) {
    Kp=kp_max;
} else if( (lim_inferior_PTEXT<(Pt_e-273) ) && ((Pt_e-273)<lim_superior_PTEXT) ) {
    Kp=a_ven*(Pt_e-273) + b_ven;
} else if( (Pt_e-273) > lim_superior_PTEXT) {
    Kp=kp_min;
}
//*****
    
```

Figura 3.11. Página Controladores y otros. Ajuste por tabla de Kp.

- *Submodelos.* Se muestra en la figura 3.12, es una página de código Java igual que la anterior, pero en esta se implementan todos los submodelos que forman el modelo del clima del invernadero descritos en los capítulos 2.3.1 y 2.3.2.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

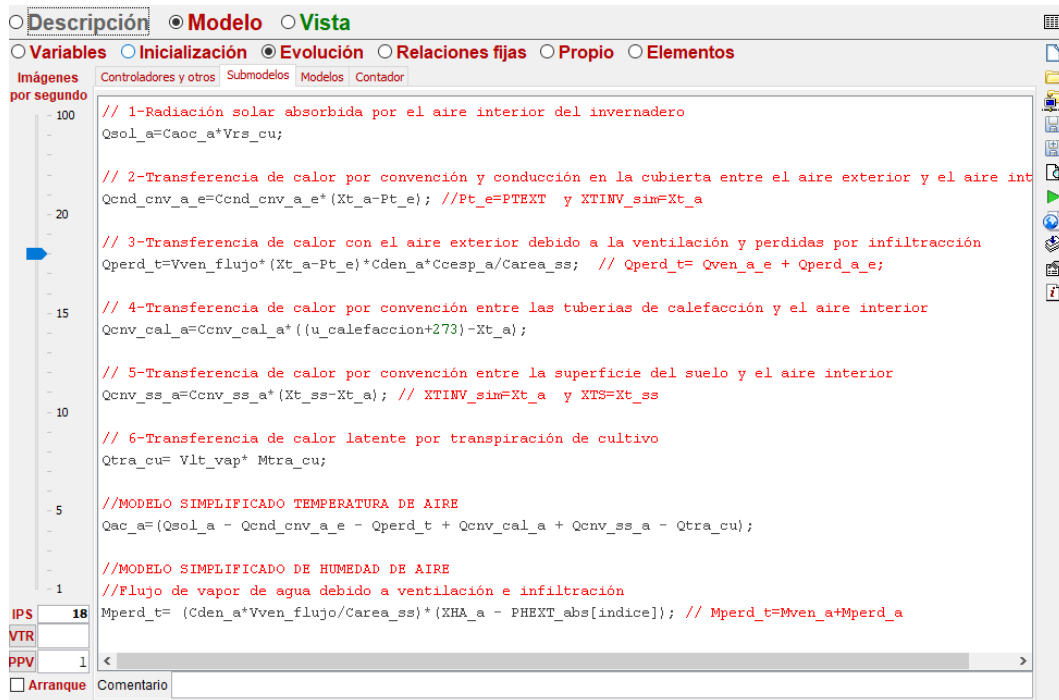


Figura 3.12. Página Submodelos.

- **Modelos.** Esta tercera página contiene las EDO del modelo simplificado de temperatura del aire y del modelo simplificado de humedad del aire. Se puede ver en la figura 3.13.

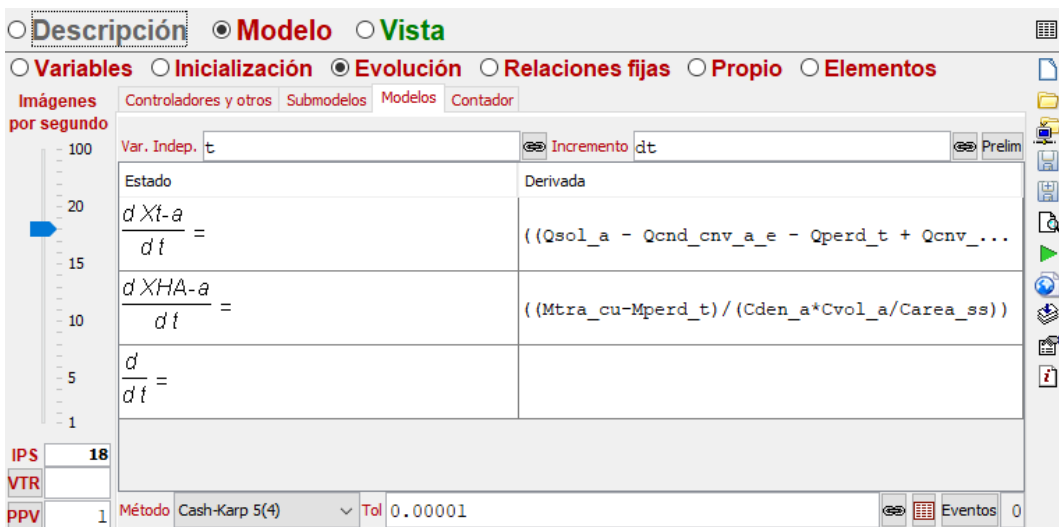


Figura 3.13. Página Modelos.

- **Contador.** Como el orden de simulación en EJS es de izquierda a derecha, esta última página es el contador de la variable que determina el número de dato que estamos leyendo en ese instante, así con este contador se sabe cuándo se inicia o se finaliza la simulación. El contador se puede ver en la imagen 3.14.

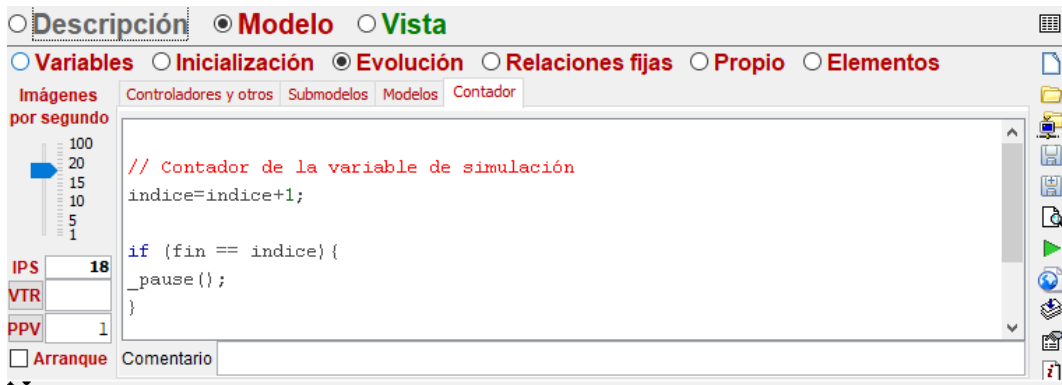


Figura 3.14. Página Contador.

Pestaña Relaciones fijas

El código escrito en las páginas de esta pestaña se mantiene sin cambios durante toda la simulación, es decir, se establecen ciertas relaciones o asignaciones entre variables que deben cumplirse siempre. Se divide en cinco páginas que se describen a continuación:

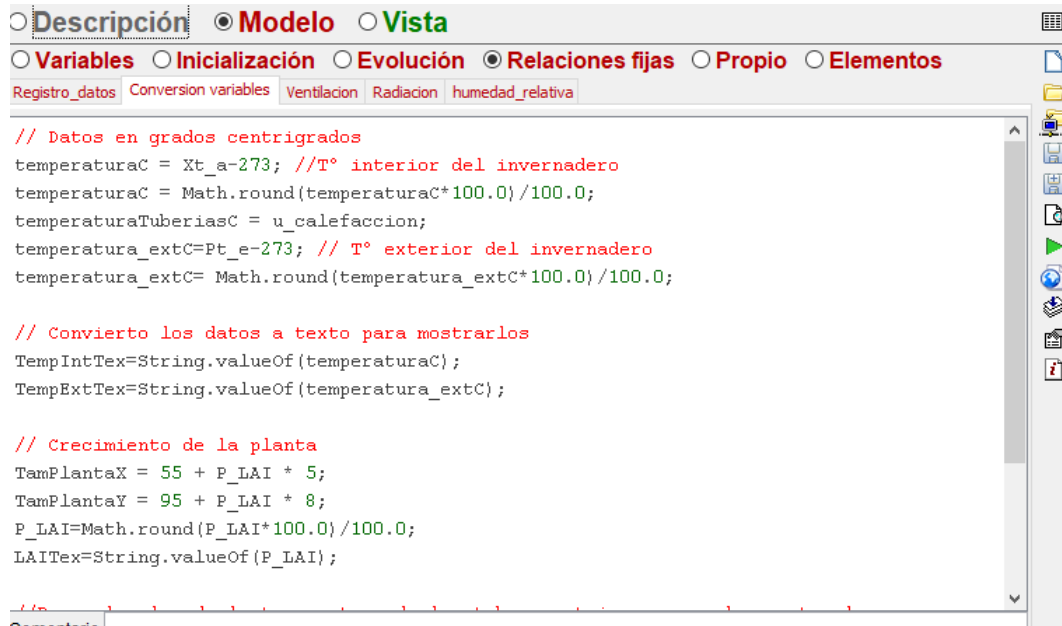
- *Registro_datos*. Página en la que se guardan los datos que se quieren extraer de EJS si ejecutamos la opción de grabar. Se muestra el código en la figura 3.15.



Figura 3.15. Página Registro_datos.

- *Conversión variables*. En esta página están los códigos para pasar la temperatura a grados centígrados o convertir datos a texto para mostrarlo. Se pueden ver algunos ejemplos en la figura 3.16.
- *Ventilación*. Es parecida a la anterior, pero se implementa el código para pasar de radianes a grados para así poder dibujar la apertura de las ventanas y todas las variables relacionadas con la ventilación.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*



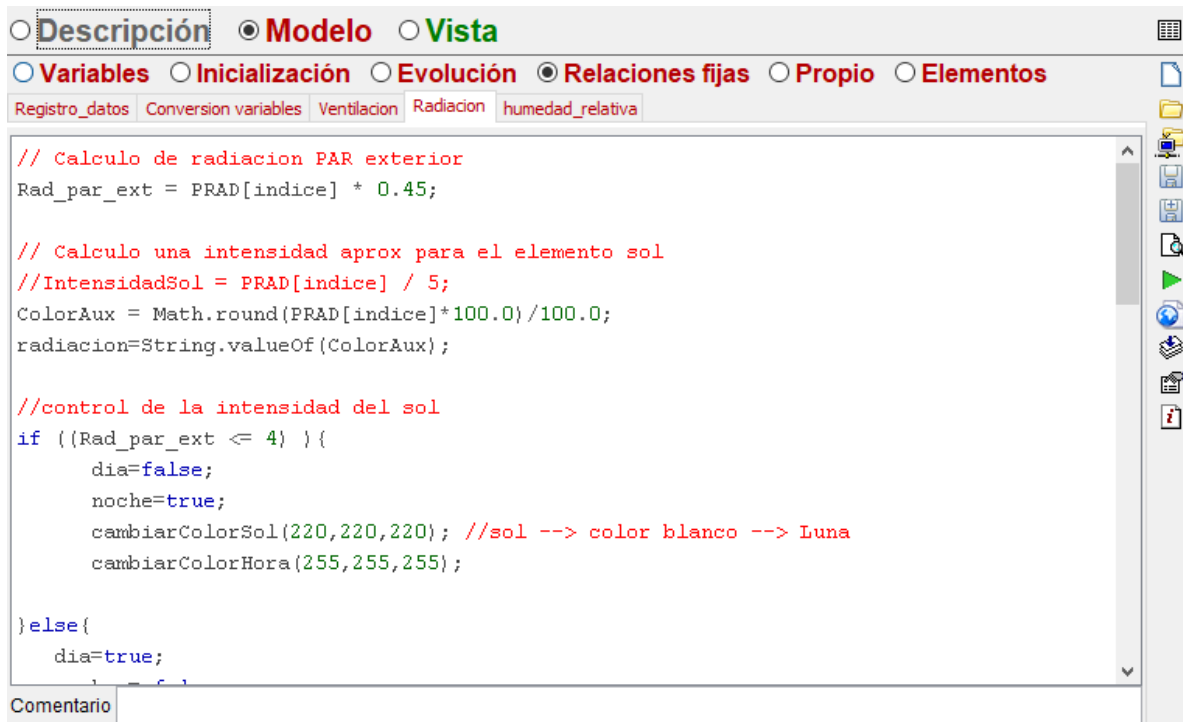
```
// Datos en grados centigrados
temperaturaC = Xt_a-273; //T° interior del invernadero
temperaturaC = Math.round(temperaturaC*100.0)/100.0;
temperaturaTuberiasC = u_calefaccion;
temperatura_extC=Pt_e-273; // T° exterior del invernadero
temperatura_extC= Math.round(temperatura_extC*100.0)/100.0;

// Convierto los datos a texto para mostrarlos
TempIntTex=String.valueOf(temperaturaC);
TempExtTex=String.valueOf(temperatura_extC);

// Crecimiento de la planta
TamPlantaX = 55 + P_LAI * 5;
TamPlantaY = 95 + P_LAI * 8;
P_LAI=Math.round(P_LAI*100.0)/100.0;
LAIITex=String.valueOf(P_LAI);
```

Figura 3.16. Página Conversión variables.

- **Radiación.** Se trata el dato de la radiación solar exterior y el control de intensidad del sol, teniendo en cuenta si es de día o de noche para la representación de la vista del invernadero. Se muestra en la figura 3.17.
- **Humedad relativa.** Página que contiene el código para pasar de humedad absoluta a humedad relativa.



```
// Calculo de radiacion PAR exterior
Rad_par_ext = PRAD[indice] * 0.45;

// Calculo una intensidad aprox para el elemento sol
//IntensidadSol = PRAD[indice] / 5;
ColorAux = Math.round(PRAD[indice]*100.0)/100.0;
radiacion=String.valueOf(ColorAux);

//control de la intensidad del sol
if ((Rad_par_ext <= 4) ){
    dia=false;
    noche=true;
    cambiarColorSol(220,220,220); //sol --> color blanco --> Luna
    cambiarColorHora(255,255,255);
}
else{
    dia=true;
```

Figura 3.17. Página Radiación.

Pestaña Relaciones fijas

En esta pestaña se crean los propios métodos Java, que pueden ser invocados desde cualquier parte de la simulación. Son dos páginas descritas a continuación:

- *Generar Archivo*. Página que contiene la función que se encarga de guardar los datos en el archivo cuando es invocada desde la simulación. Se observa el código en la figura 3.18.

```

// Función que genera un archivo con formato Matlab de la variable Xt_a
public String generaMfile () {

    StringBuffer sb = new StringBuffer();

    sb.append("Xt_a="+registroXt_a.toString()+"\n");
    sb.append("Pt_e="+registroPt_e.toString()+"\n");
    sb.append("Ventana="+registroVentana.toString()+"\n");
    sb.append("PRAD="+registroPRAD.toString()+"\n");
    sb.append("Qperd_t="+registroQperd_t.toString()+"\n");
    sb.append("PVV="+registroPVV.toString()+"\n");
    sb.append("Kp="+registroKp.toString()+"\n");
    sb.append("ti="+registroti.toString()+"\n");
    sb.append("Kp_cal="+registroKp_cal.toString()+"\n");
    sb.append("ti_cal="+registroti_cal.toString()+"\n");
    sb.append("XHA_a="+registroXHA_a.toString()+"\n");
    sb.append("XHR_a="+registroXHR_a.toString()+"\n");
    sb.append("Ut_cal="+registrocalefaccion.toString()+"\n");

    return sb.toString();
}
    
```

Figura 3.18. Página Generar Archivo.

- *Método Propio*. Contiene las funciones que se invocan para inicializar los colores o cambiarlos. Se observa el código en la figura 3.19.

```

//FUNCIONES UTILIZADAS EN EL LABORATORIO VIRTUAL
//*****
public void inicializarColoresElementos ()
{
    //Inicializamos las tuberias a color blanco (apagado)
    colorT1 = new java.awt.Color(255,255,255);
    colorT2 = new java.awt.Color(255,255,255);
    colorT3 = new java.awt.Color(255,255,255);

    //inicializamos el tanque, la valvula y la bomba a color Gris (apagado)
    colorTan = new java.awt.Color(0,0,255); //tanque azul
    colorVal = new java.awt.Color(128,128,128);
    colorBom = new java.awt.Color(128,128,128);
}

//*****
public void cambiarColorElementos (int r,int v, int a) {
    //los colores pueden ser azul naranja o rojo dependiendo de la temperatura
    
```

Figura 3.19. Página Método Propio.

Pestaña Elementos

En esta pestaña se encuentran los diferentes elementos que se pueden usar en EJS (figura 3.20), aunque solo se ha hecho uso de la entrada de datos para leer un archivo de texto.



Figura 3.20. Pestaña Elementos.

3.2 Panel vista

En este panel es donde se construye la interfaz de la simulación, que consta de dos columnas, la de la derecha contiene los elementos gráficos que la vista dispone para su construcción y la de la izquierda contiene el programa construido con estructura en forma de árbol jerarquizado. Este árbol se divide en dos grupos principales, la ventana principal que es con la que se interactúa en la simulación y la ventana diálogo que contiene todas las gráficas que muestran la evolución de las variables de interés. (Véase figura 3.21)

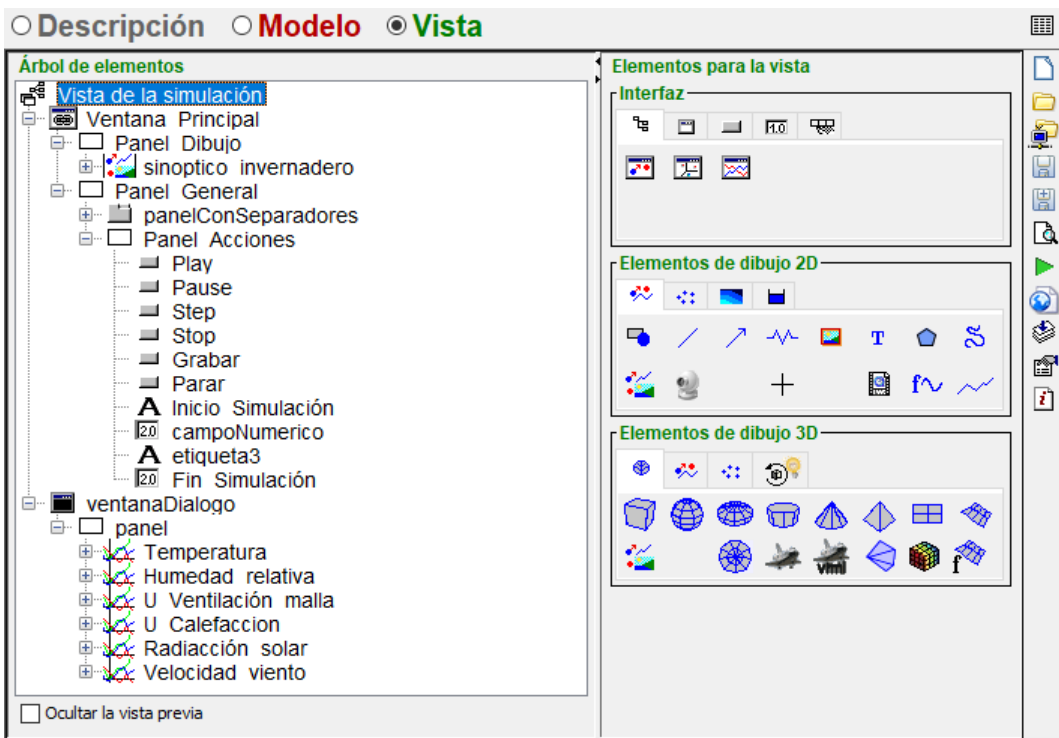


Figura 3.21. Panel Vista.

En la ventana principal hay dos paneles diferentes, un panel llamado panel dibujo que es donde están todos los elementos de dibujo 2D que se han utilizado para crear el dibujo del invernadero y otro panel llamado panel general.

Este último panel contiene el panel acciones (figura 3.21) y el panel con separadores (figura 3.22), ambos se explican en el siguiente apartado mediante la interfaz de simulación, ya que lo que se ve en las figuras es ilustrativo de cómo se ha construido y que elementos se han necesitado, el funcionamiento de cada panel se explica mejor mediante el uso en la simulación.

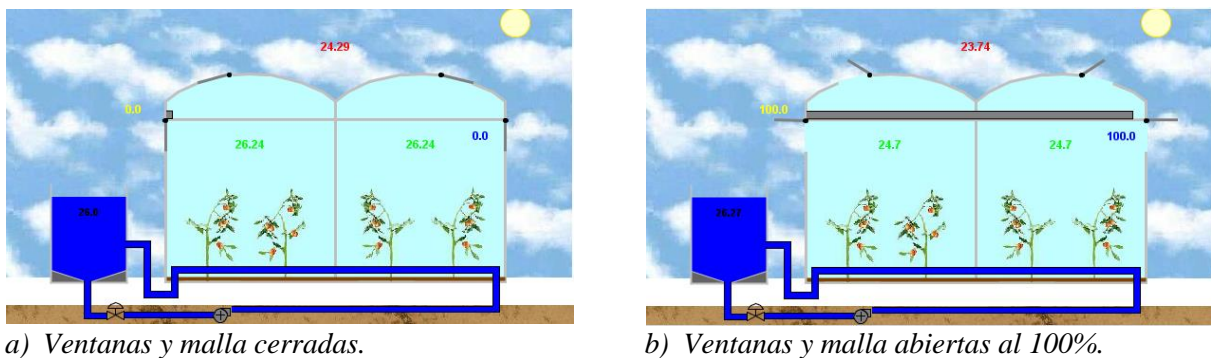


Figura 3.22. Panel Vista. Panel con separadores.

3.3 Descripción de la simulación

La herramienta completa se puede ver en la figura 1.1, donde la visualización del laboratorio virtual se ha estructurado en tres secciones: un sinóptico del invernadero, un panel de gráficas donde se visualiza la evolución de las distintas variables y una serie de paneles compuestos por botones, sliders y campos numéricos para poder modificar los parámetros de control.

En el sinóptico del invernadero se visualiza de forma gráfica el resultado de aplicar las señales de control a los principales actuadores del sistema: ventilación, malla de sombreado y calefacción. Para describir estos actuadores, en primer lugar, hablamos de la ventilación, donde junto a la ventana lateral derecha se muestra el valor actual del porcentaje de apertura de las ventanas, un ejemplo de su funcionamiento se muestra en la figura 3.23. La malla de sombreado es otro de los actuadores del sistema, se representa de color gris y está situada entre el techo del invernadero y el habitáculo donde están representadas las plantas. Su valor de apertura se representa en tanto por ciento a la izquierda de esta en color amarillo, este valor también se representa en la gráfica destinada a mostrar la señal de control de la malla y la ventilación y puede ser un valor entre 0% y 100%. Se muestra un ejemplo en la figura 3.23.



a) Ventanas y malla cerradas.

b) Ventanas y malla abiertas al 100%.

Figura 3.23. Funcionamiento ventanas y malla de sombreado.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

El último actuador es el sistema de calefacción, está representado por una caldera, una válvula, una bomba y un conjunto de tuberías que circulan por el invernadero. Cuando el sistema está apagado, todo el conjunto se representa en color azul, y cuando se enciende el conjunto pasa a ser de color rojo. El valor de la temperatura a la que va a estar el agua que circula por las tuberías, es decir nuestra señal de control, se representa dentro de la caldera en color negro. Un ejemplo de lo descrito se muestra en la figura 3.24. Otro factor que no se ha comentado es el tamaño de las plantas, que se considera una perturbación, y puede modificarse en el panel de otros parámetros en el deslizador de PLAI. Se muestra en la figura 3.24 dos tamaños diferentes.

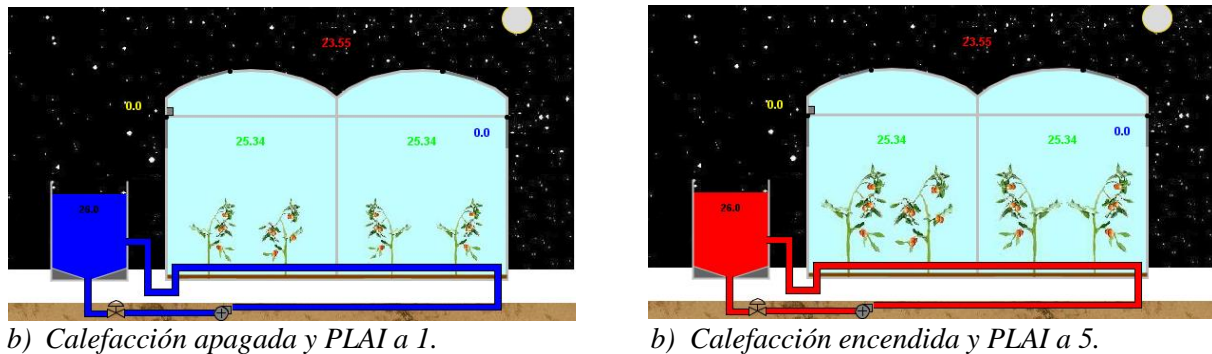


Figura 3.24. Funcionamiento calefacción y PLAI.

En la figura 3.25 se muestra el panel de gráficas para la visualización de la evolución de las variables. Cada gráfica representa un conjunto de variables distinto, por lo que se va a describir cada una de ellas en orden de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. La primera representa de color negro la temperatura interior del invernadero, solapándose con esta línea están las consignas de ventilación (color rosa) y calefacción (color rojo), que no se pueden apreciar en la imagen porque está realizada en bucle abierto. Por último, en color azul se muestra la temperatura exterior. La siguiente gráfica representa de color azul la humedad relativa exterior y de color negro la humedad relativa interior del invernadero. La tercera gráfica siguiendo el orden descrito, es la de la señal de control de la ventilación (color negro), la de la malla (color azul) y la línea de color rojo es la que muestra la variación del parámetro K_p del controlador de ventilación, calculada mediante el control por ajuste por tabla descrito en el capítulo 2.4.4. La cuarta gráfica muestra la señal de control de la calefacción en color verde. La quinta muestra todo lo relacionado con la radiación, siendo la línea de color azul la radiación PAR exterior, la de color negro la radiación PAR interior y las líneas rojas muestran la consigna de radiación máxima para que abra la malla de sombreado, junto con su franja de zona muerta. Por último, la sexta gráfica muestra en color negro la velocidad del viento.

Si nos fijamos en la figura 1.1, debajo del sinóptico del invernadero está el panel de control que es en el que se pueden modificar los parámetros de control y, en general, controlar la simulación. Se divide en varios paneles, agrupados según su funcionalidad, así que se va a explicar la utilidad de cada botón por paneles:

- **Panel Controles simulación.** Está dedicado al control de la simulación en general, mostrado en la figura 3.26.
 - **Play.** Empieza a ejecutar la simulación.
 - **Pause.** Pausa la simulación.
 - **Step.** Ejecuta un paso de la simulación.
 - **Reset.** Pone todos los valores a su valor por defecto.

- **Grabar.** Empieza a grabar los valores en el archivo de datos llamado “*datos.m*”, que se guarda en la carpeta donde se ubique el programa.
- **Parar.** Para la opción de grabar datos.
- **Inicio.** Muestra el momento en el que se está ejecutando la simulación. Se puede poner cualquier instante en el que se quiera que empiece a simular.
- **Fin.** Momento de la simulación en que queremos parar. Si se deja en cero la simulación no para automáticamente.

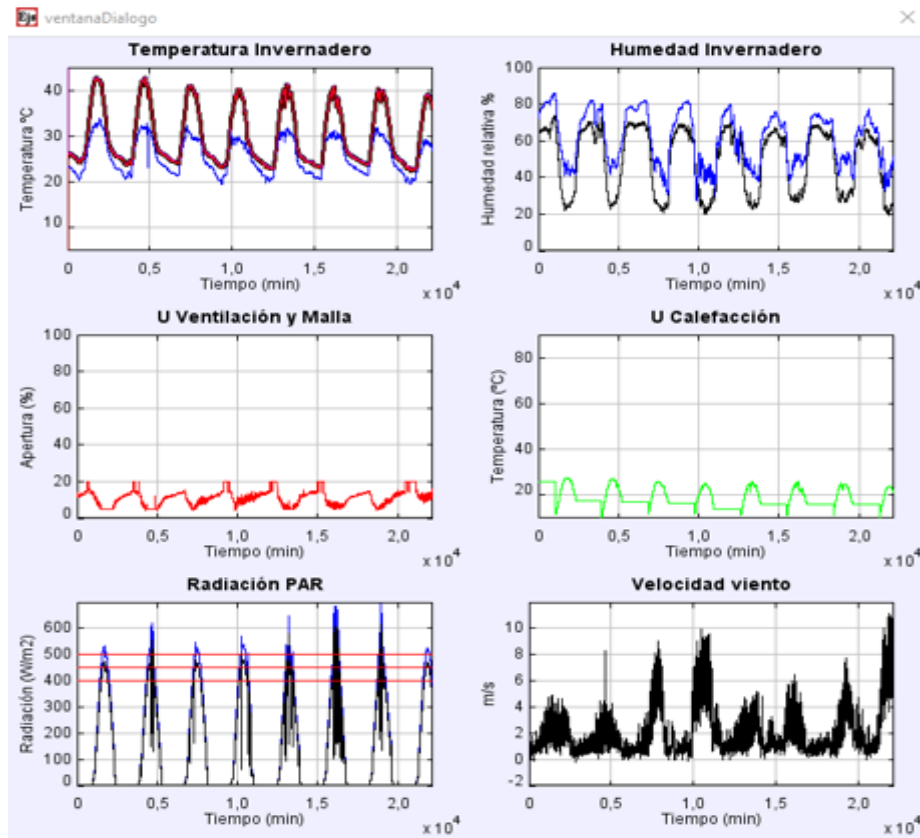


Figura 3.25. Panel de gráficas.

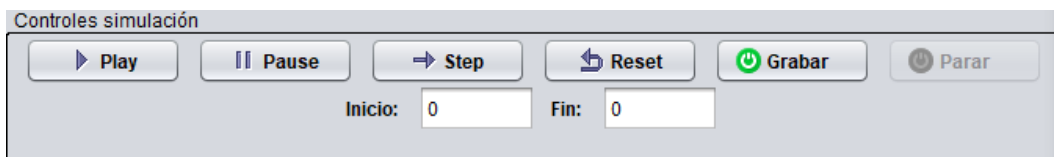


Figura 3.26. Panel Controles simulación.

- **Panel Otros parámetros.** Contiene parámetros independientes de los controladores, mostrado en la figura 3.27.
 - **Verano.** Opción de leer los datos de verano. Se usa cuando la simulación está parada.
 - **Invierno.** Opción de leer los datos de invierno. Se usa cuando la simulación está parada.
 - **Radiación perturbación.** Cuando se activa, somete al sistema a una perturbación en la radiación PAR exterior, cuyo valor se introduce por teclado.
 - **Velocidad viento perturbación.** Cuando se activa, somete al sistema a una perturbación en la velocidad del viento, cuyo valor se introduce por teclado.
 - **Tamaño plantas.** Valor de PLAI.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

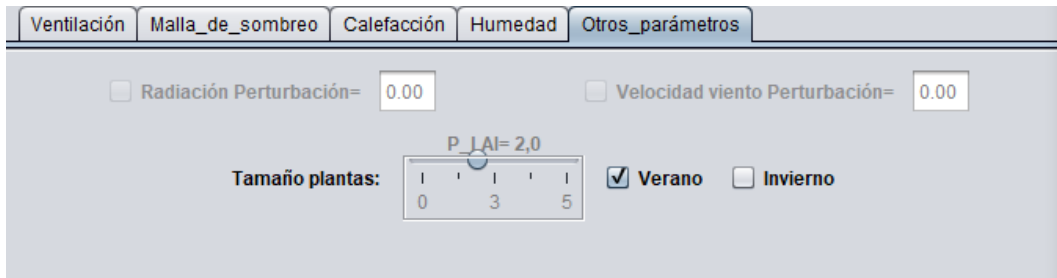


Figura 3.27. Panel Otros parámetros.

- **Panel Ventilación.** Contiene parámetros relacionados con el control de la ventilación, mostrado en la figura 3.28.
 - **Controlador.** Opción de activar el controlador de la ventilación. En esta opción la apertura de las ventanas es la señal de control del sistema, calculándose automáticamente.
 - **Bucle Abierto.** Opción de desactivar el controlador de la ventilación y simular en bucle abierto. En esta opción hay que usar manualmente el deslizador de la apertura de las ventanas.
 - **Temp. referencia.** Consigna de temperatura que se quiere alcanzar. Activa si no se trabaja en bucle abierto.
 - **Temp. interior.** Muestra el valor de la temperatura interior del invernadero.
 - **Apertura ventanas.** Valor de la señal de control de la ventilación. Activo cuando se trabaja en bucle abierto, en bucle cerrado se calcula automáticamente.
 - **Kp.** Valor proporcional del controlador de ventilación. Calculado con control adaptativo.
 - **Ti.** Valor integral del controlador de ventilación.

Parámetros referentes al control adaptativo con ajuste por tabla de la variable K_p :

- **Kp_min.** Valor proporcional mínimo del controlador de ventilación.
- **Kp_max.** Valor proporcional máximo del controlador de ventilación.
- **Textmin_vmin.** Temperatura exterior mínima con velocidad de viento mínima.
- **Textmin_vmax.** Temperatura exterior mínima con velocidad de viento máxima.
- **Textmax_vmin.** Temperatura exterior máxima con velocidad de viento mínima.
- **Textmax_vmax.** Temperatura exterior máxima con velocidad de viento máxima.
- **Lim. Inf. T^{ext}.** Límite inferior de la temperatura exterior para que K_p sea máxima.
- **Lim. sup. T^{ext}.** Límite superior de la temperatura exterior para que K_p sea mínima.

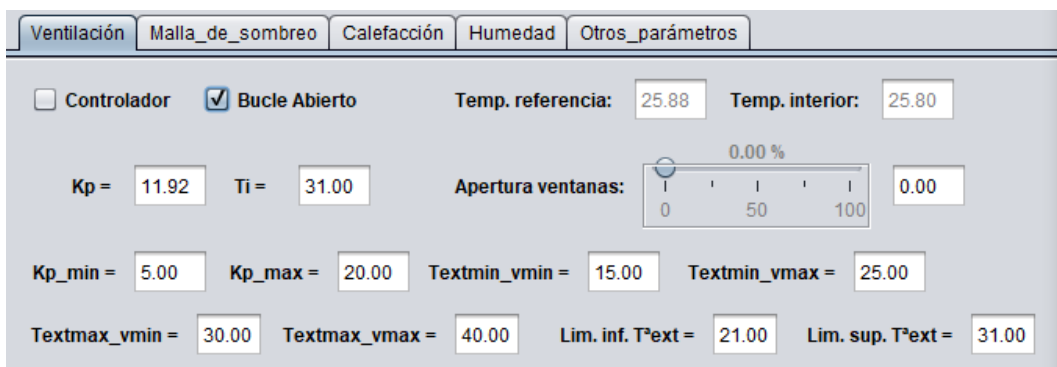


Figura 3.28. Panel Ventilación.

- *Panel malla de sombreo.* Contiene parámetros relacionados con el control de la malla de sombreo, mostrado en la figura 3.29.
 - **Malla de sombreo.** Opción de activar/desactivar la malla de sombreo. Deslizador para poner el valor del coeficiente de transmisión de onda corta de la malla de sombreo.
 - **Blanqueo.** Opción de activar/desactivar el blanqueo. Deslizador para poner el valor del coeficiente de transmisión de onda corta del blanqueo.
 - **Coef. Onda corta cubierta.** Deslizador para poner el valor del coeficiente de transmisión de onda corta de la cubierta.
 - **Radiación máxima.** Valor máximo de radiación para que empiece a extenderse la malla.
 - **Zona muerta radiación subida.** Valor del rango de zona muerta cuando la radiación está subiendo.
 - **Zona muerta radiación bajada.** Valor del rango de zona muerta cuando la radiación está bajando.
 - **Tempe. Mínima para 100%.** Valor mínimo de temperatura interior a partir del cual la malla de sombreo permanece extendida al 100%.
 - **Tempe. Máxima para 80%.** Valor máximo de temperatura interior a partir del cual la malla de sombreo permanece extendida al 80%.

Figura 3.29. Panel Malla de sombreo.

- *Panel Calefacción.* Contiene parámetros relacionados con el control de la calefacción, mostrado en la figura 3.30.
 - **Controlador.** Opción de activar el controlador de la calefacción. En esta opción la temperatura del agua de las tuberías es la señal de control del sistema, calculándose automáticamente.
 - **Bucle Abierto.** Opción de desactivar el controlador de la ventilación y simular en bucle abierto. En esta opción hay que poner manualmente la temperatura del agua de las tuberías.
 - **Temp. referencia.** Consigna de temperatura que se quiere alcanzar. Activa si no se trabaja en bucle abierto.
 - **Temp. interior.** Muestra el valor de la temperatura interior del invernadero.
 - **Temperatura tuberías.** Valor de la señal de control de la calefacción, es decir, la temperatura del agua de las tuberías. Activo cuando se trabaja en bucle abierto, en bucle cerrado se calcula automáticamente. Valor entre 0°C y 80°C.
 - **Kp.** Valor proporcional del controlador de calefacción.
 - **Ti.** Valor integral del controlador de calefacción.
 - **Coefficiente convección tuberías.** Deslizador para poner el valor del coeficiente de convección de las tuberías.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

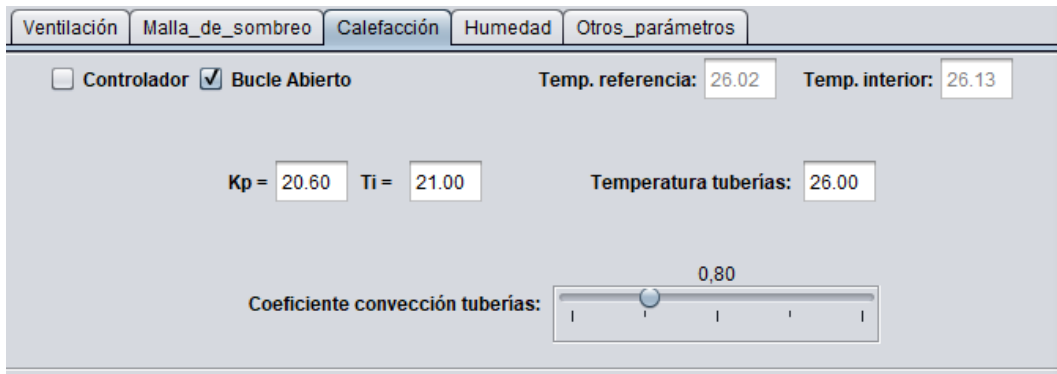


Figura 3.30. Panel Calefacción.

- **Panel Humedad.** Contiene parámetros relacionados con el control de la calefacción, mostrado en la figura 3.31.
 - **Control humedad.** Opción de activar el controlador de la humedad. Al activar se genera una consigna de temperatura para mantener la humedad dentro de unos límites que se establecen por teclado.
 - **Consigna generada.** Muestra la consigna de temperatura que se genera y se introduce en el controlador de ventilación.
 - **Hum. referencia.** Humedad relativa que influye en la temperatura de ventilación.
 - **Temp. referencia.** Temperatura de ventilación.
 - **Hum. desviación.** Máxima desviación con respecto a la humedad que influye.
 - **Temp. influencia.** Influencia máxima de la humedad en la temperatura de ventilación.

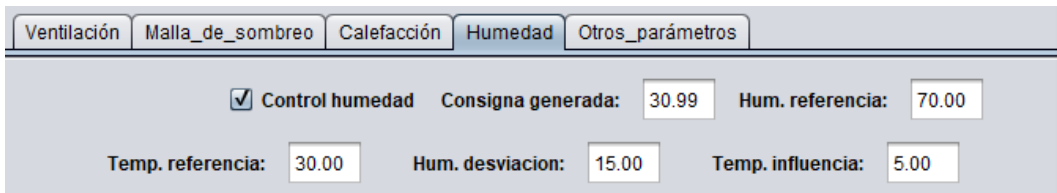


Figura 3.31. Panel Humedad.

Capítulo 3. Diseño y desarrollo del laboratorio virtual

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

El uso de la herramienta se ha descrito en el capítulo 3, ahora se va a describir cómo realizar una serie de ensayos de diferentes características y utilizando todas las opciones que proporciona la herramienta. En cada ensayo se va a presentar la gráfica de resultados que se obtiene directamente de la EJS, y en algunos casos se usará MATLAB para representar una comparación o un detalle en un valor determinado de la gráfica, ya que en EJS no es posible hacer zoom en una gráfica o solapar varias variables que no estén ya predeterminadas en la misma gráfica. Por eso, cuando se utiliza la opción de grabar, se guarda un archivo en la carpeta donde se encuentra el programa y que se puede tratar posteriormente en MATLAB.

4.1 Ensayos en bucle abierto

Se va a hacer uso de los actuadores del sistema de forma manual, es decir, sin que actúe ningún controlador de forma automática. También se van a hacer ensayos introduciendo una perturbación en el sistema, siendo posible introducir tres tipos de perturbaciones: de radiación, de velocidad del viento y variación del índice de área foliar.

Ensayo de ventilación natural

- **Cómo se hace.** En primer lugar, se introduce en la casilla inicio el valor de 1000, esto hace que el sistema arranque en ese instante introducido que coincide con el comienzo del día, dejamos correr la simulación para que se vayan estabilizando los valores y no se produzca un falso resultado. En torno al instante 1450, que es el medio día solar, se pausa la simulación como se ve en la figura 4.1, en el campo numérico destinada al valor de la apertura de las ventanas se introduce el porcentaje de apertura que se desee y se pulsa la tecla *enter* del teclado. Por último, se vuelve a pulsar el *play* y se observan los resultados.

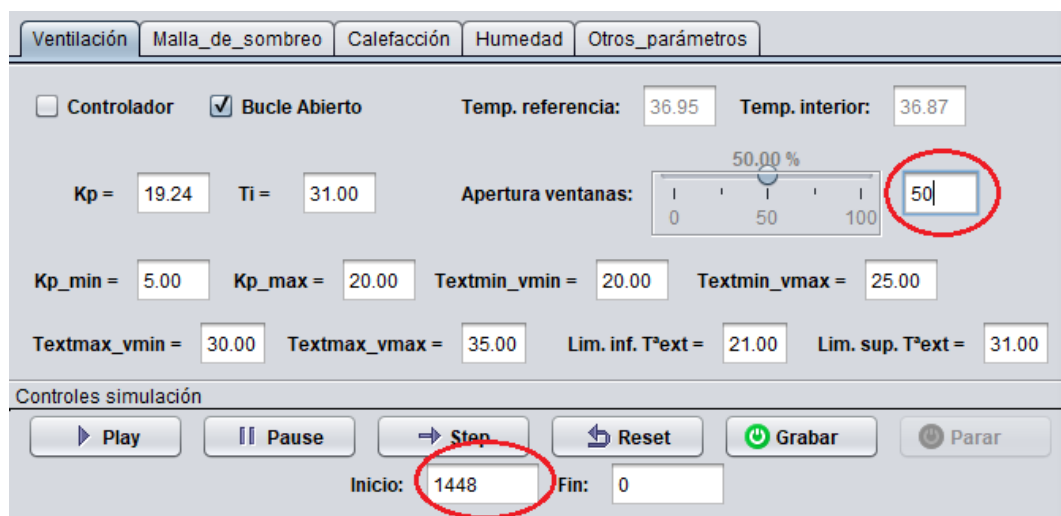
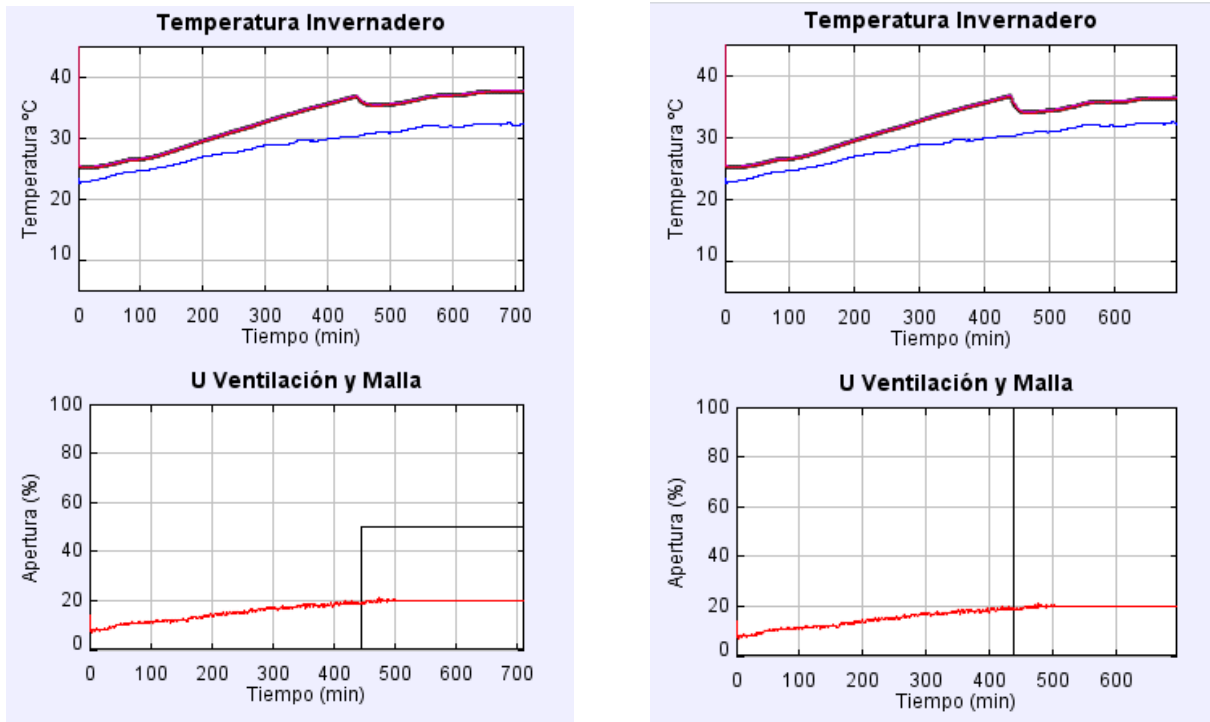


Figura 4.1. Ensayo ventilación natural.

- Resultados y conclusiones.** Cuando se abre la ventilación se produce un intercambio entre el aire exterior y el interior del invernadero, esto hace que la temperatura interior descienda como se muestra en la figura 4.2. Dependiendo del porcentaje de apertura, se obtienen diferentes resultados en el mismo instante de tiempo. Como vemos en la figura 4.2a, cuando la ventilación está abierta al 50% la temperatura interior desciende poco más de 1°C, mientras que cuando está abierta al 100% como vemos en la figura 4.2b, la temperatura desciende 2.5°C y la velocidad a la que sube la temperatura interior es menor, debido a ese intercambio con el aire exterior.



a) Apertura ventanas de 50%

b) Apertura ventanas de 100%

Figura 4.2. Temperatura con diferentes % de apertura de ventilación

Ensayo de calefacción

- Cómo se hace.** En primer lugar, se selecciona la opción de “invierno” en panel de otros parámetros. Por defecto la simulación comienza de noche, por lo que para hacer el ensayo de calefacción es suficiente con pulsar *play* en el laboratorio, dejamos correr la simulación para que se vayan estabilizando los valores y no se produzca un falso resultado. En torno al instante 100, se introduce un escalón hasta los 70°C en la temperatura de las tuberías y se pulsa la tecla *enter* del teclado. Se puede ver en la figura 4.3 marcado en rojo la casilla donde se introduce la temperatura de las tuberías.
- Resultados y conclusiones.** Cuando se enciende la calefacción se produce un intercambio por convección entre la temperatura que tienen las tuberías por las que circula el agua de la calefacción y la temperatura interior del invernadero, esto hace que la temperatura interior aumente como se muestra en la figura 4.4. Se puede observar que aumentando la temperatura del agua de las tuberías unos 45°C, la temperatura interior aumenta en unos 2°C. Esto solo tiene sentido durante la noche o en días muy fríos, como en este caso que se trata de una noche de un mes de invierno en el que la temperatura interior es de unos 12°C.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*



Figura 4.3. Ensayo calefacción.

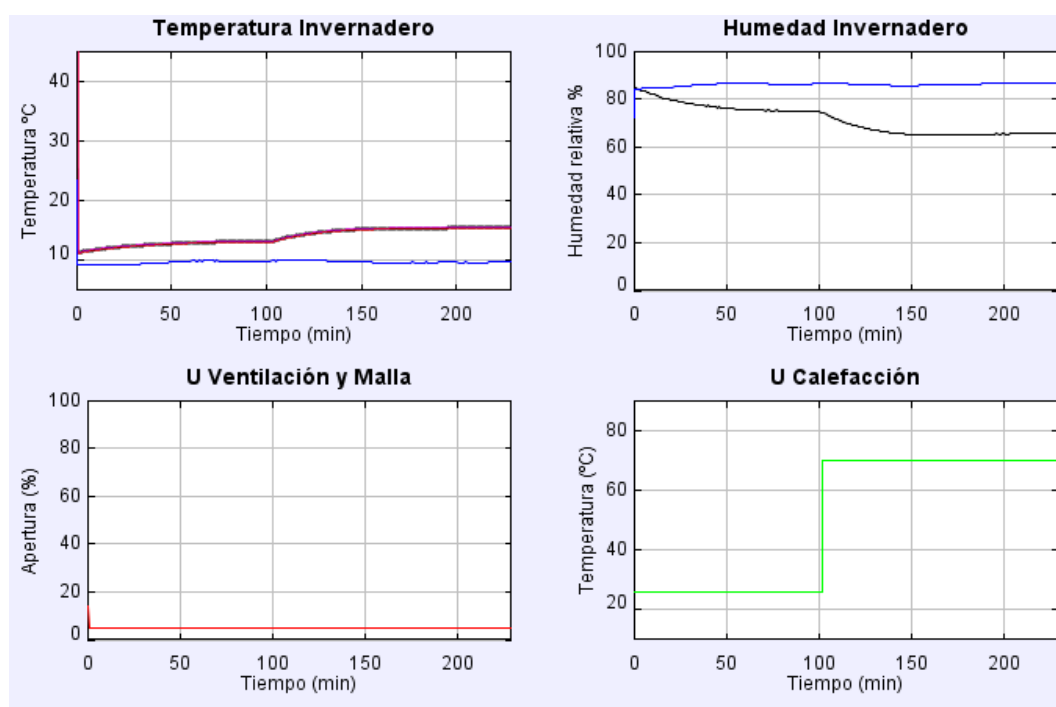


Figura 4.4. Resultados ensayo calefacción.

Ensayo de radiación con malla y blanqueo de cubierta

- **Cómo se hace.** En primer lugar, se selecciona la opción de “día” en el panel de otros parámetros. En el panel de la malla de sombreado mostrado en la figura 4.5, se tienen las opciones de activar/desactivar la malla de sombreado y el blanqueo de la cubierta, así como deslizadores para poder cambiar sus respectivos coeficientes de transmisión de radiación de onda corta. En este ensayo se dejan los valores por defecto.

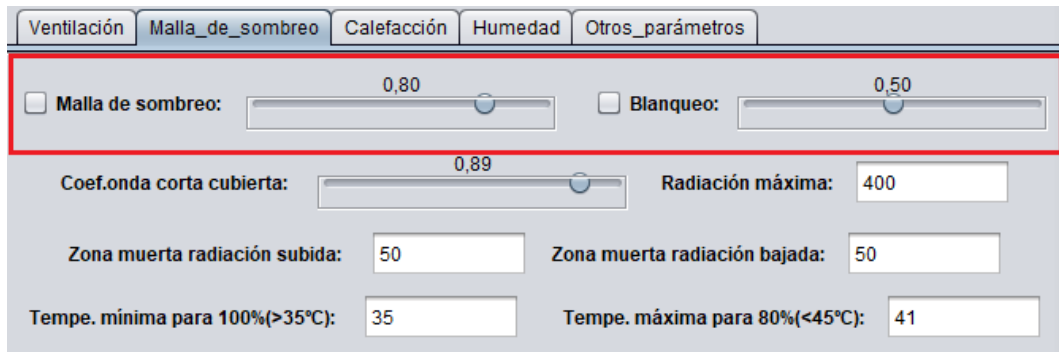
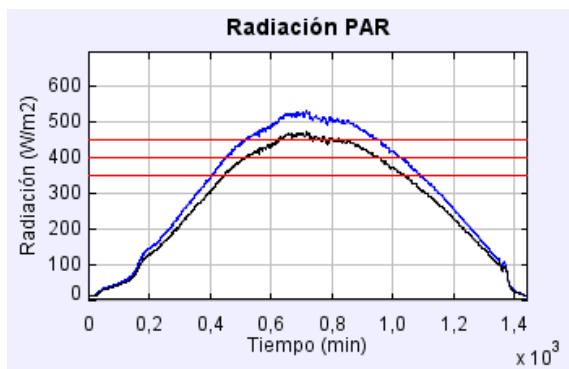
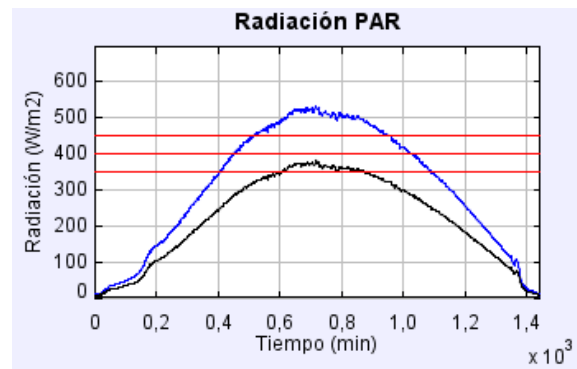


Figura 4.5. Ensayo malla de sombreado y blanqueo.

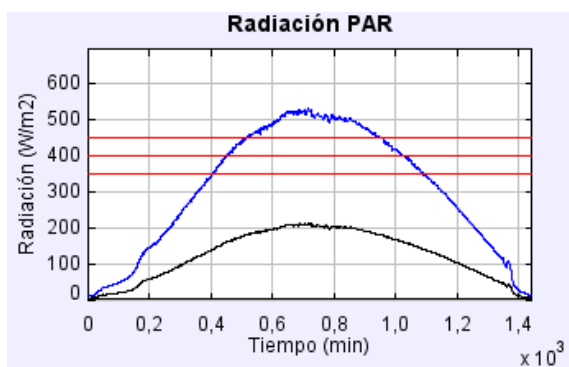
- Resultados y conclusiones.** En la figura 4.6 se muestran las variaciones de la radiación PAR interna si se utiliza malla de sombreado, blanqueo en la cubierta o ambas cosas juntas. Cuanto más cercano sea a 1 el coeficiente de la malla o el blanqueo, más radiación pasará. Como se puede observar en la figura 4.6d, al estar activado el blanqueo y la malla, la radiación PAR interna es de 200 [W/m²] en su punto más alto, cuando la exterior es de 500 [W/m²], la reduce a más de la mitad en el interior, mientras que al actuar solo la malla se reduce poco más de 100 [W/m²] como se observa en la figura 4.6c.



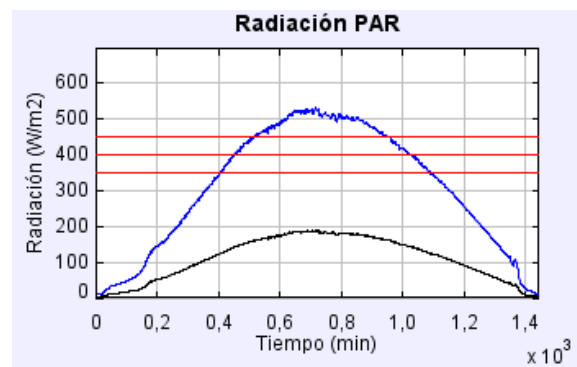
a) Radiación PAR sin malla ni blanqueo



c) Radiación PAR con malla al 100%



b) Radiación PAR con blanqueo



d) Radiación PAR con malla y blanqueo

Figura 4.6. Resultados radiación PAR interior.

Ensayo frente a perturbaciones

- **Cómo se hace.** En el panel de otros parámetros mostrado en la figura 4.7, aparecen las distintas perturbaciones que se pueden meter al sistema. Para cambiar el valor de PLAI solo hay que mover el deslizador en cualquier momento de la simulación, para las perturbaciones de radiación y velocidad del viento hay que activar la casilla a la izquierda de cada una de ellas. Una vez activada se introduce el valor que se desee de perturbación y este se mantiene hasta que se vuelva a introducir el mismo valor, pero de signo contrario. Todos los ensayos se han hecho entre el instante 975 y el 2420, es decir, durante el día.

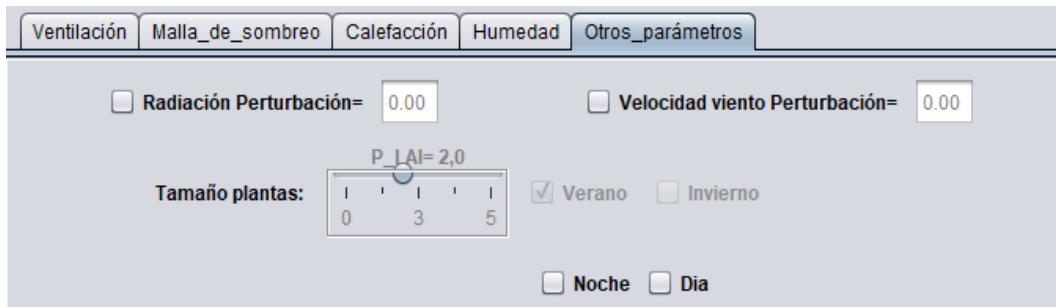


Figura 4.7. Perturbaciones en el laboratorio.

- **Resultados y conclusiones.** En la figura 4.8a se muestra la respuesta de la temperatura frente a una perturbación de radiación de $-400 \text{ [W/m}^2\text{]}$ simulando que una nube, en la figura 4.8b se muestra la respuesta de la temperatura frente a una perturbación de la velocidad del viento de 20 [m/s] , en este ensayo hay que tener abierta la ventilación al 100% para ver el efecto. La figura 4.8c muestra como varía la temperatura y la humedad cuando se cambia el valor de PLAI de 1 a 5.

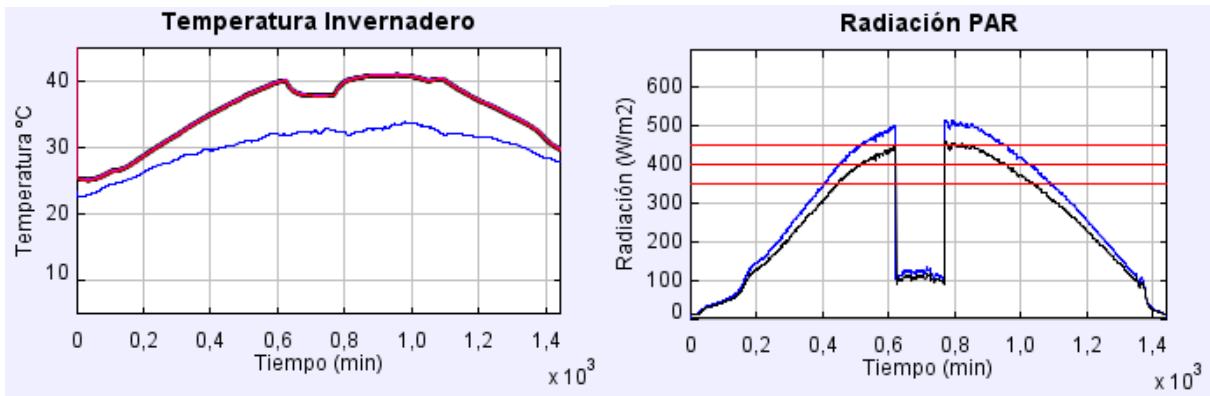


Figura 4.8a. Perturbación de radiación PAR.

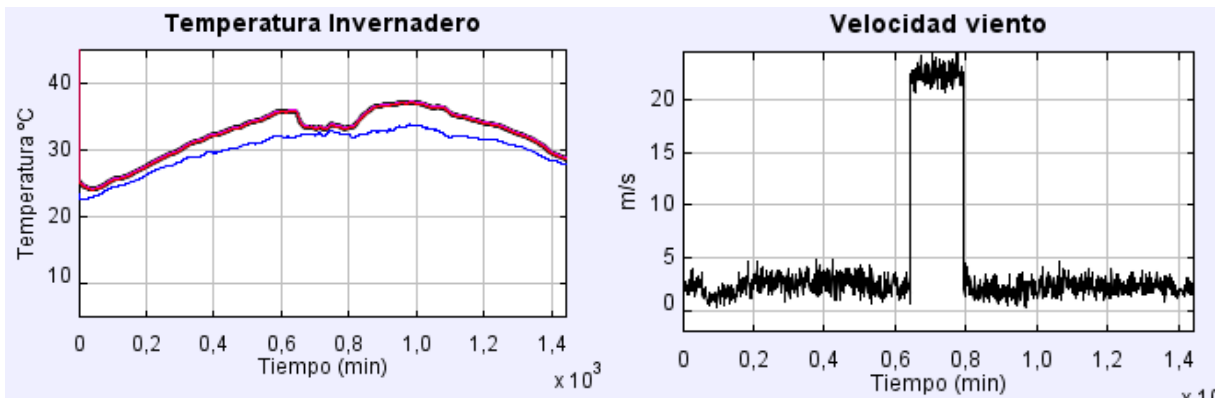


Figura 4.8b. Perturbación de velocidad de viento.

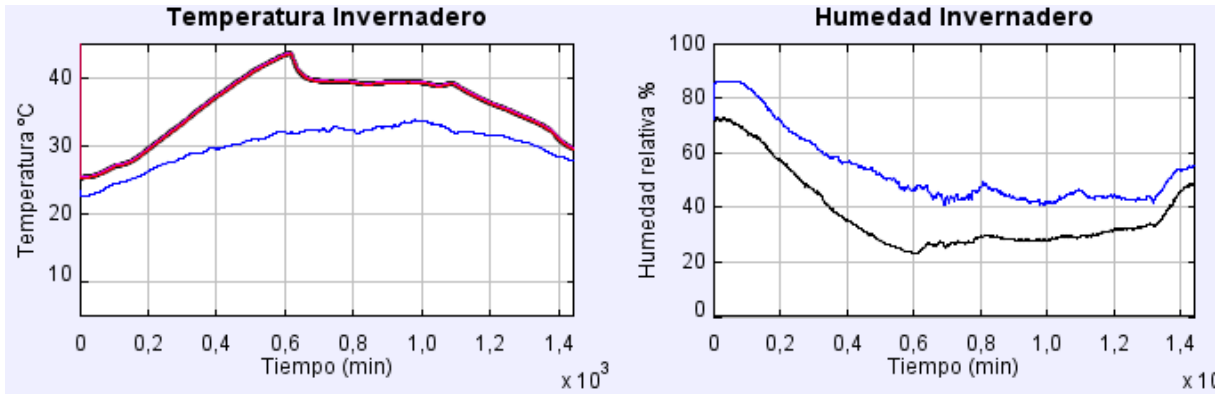


Figura 4.8c. Cambio de PLAI de 1 a 5 en el instante 600.

4.2 Ensayo de control de temperatura con ventilación natural

En el capítulo 2.4.4 se explica todo lo relacionado con el control de la temperatura con la ventilación natural, en este caso, se expone como realizar un ensayo con el controlador de la ventilación activado, es decir, un ensayo en bucle cerrado. Lo primero que se debe saber es la temperatura que se quiere alcanzar. Este valor se llama consigna de temperatura y se muestra en la figura 4.9 marcada en rojo. El usuario tiene que activar el controlador y escribir el valor deseado. El valor de K_p lo calcula el ajuste por tabla descrito anteriormente, por lo que no se podrá modificar, en la figura 4.13 se muestra la variación de K_p para la consigna de 37°C.

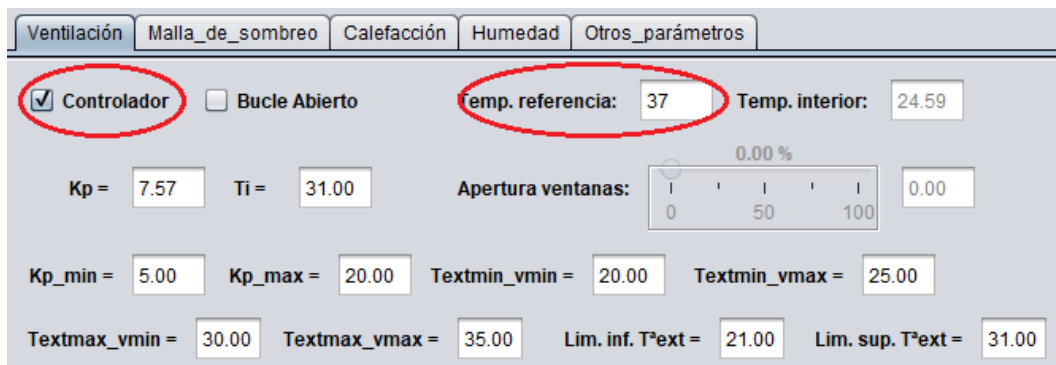


Figura 4.9. Parámetros controlador ventilación.

Se van a presentar ensayos para el seguimiento de varias consignas y así poder comparar el resultado. En primer lugar, la figura 4.10 muestra la temperatura interior con una consigna de 37°C y la señal de control de la ventilación. La figura 4.11 muestra las mismas gráficas, pero para un seguimiento de una consigna de 35°C y la figura 4.12 muestra la comparación entre estas dos anteriores y un ensayo en bucle abierto sin que actúe nada en el sistema.

En todas las señales de control se puede deducir que cuando la temperatura interior es mayor que la consigna que introducimos, la ventilación empieza a abrirse, siendo mayor la apertura cuanto mayor sea la diferencia entre consigna y temperatura interior, hasta tal punto que las ventanas se abran totalmente y la señal se sature. Un ejemplo de esta saturación se ve en la figura 4.13, en la consigna es de 35°C, el sistema se abre rápidamente al 100% cuando la temperatura interior sigue subiendo por encima de la consigna.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

Esto se debe a que la temperatura exterior es de unos 32°C y la ventilación natural es incapaz de bajar tanto la temperatura interior. Se necesitaría también ventilación forzada, aunque en este laboratorio no está implementada. No ocurre lo mismo para la consigna de 37°C, donde la señal de control nunca llega a saturar.

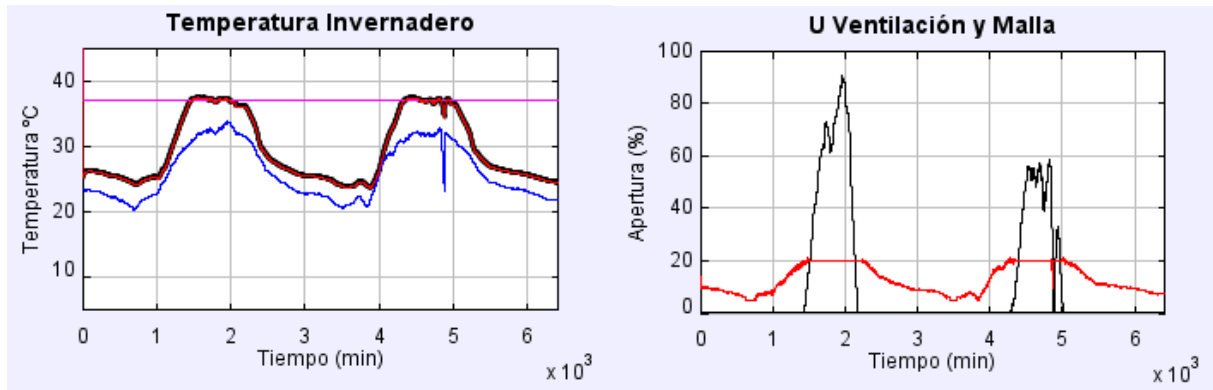


Figura 4.10. Control de la ventilación para una consigna de 37°C

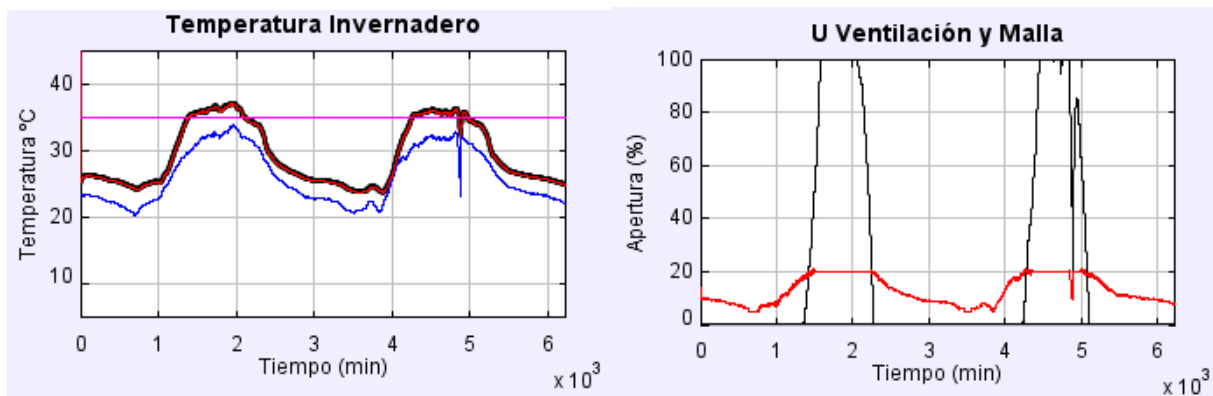


Figura 4.11. Control de la ventilación para una consigna de 35°C

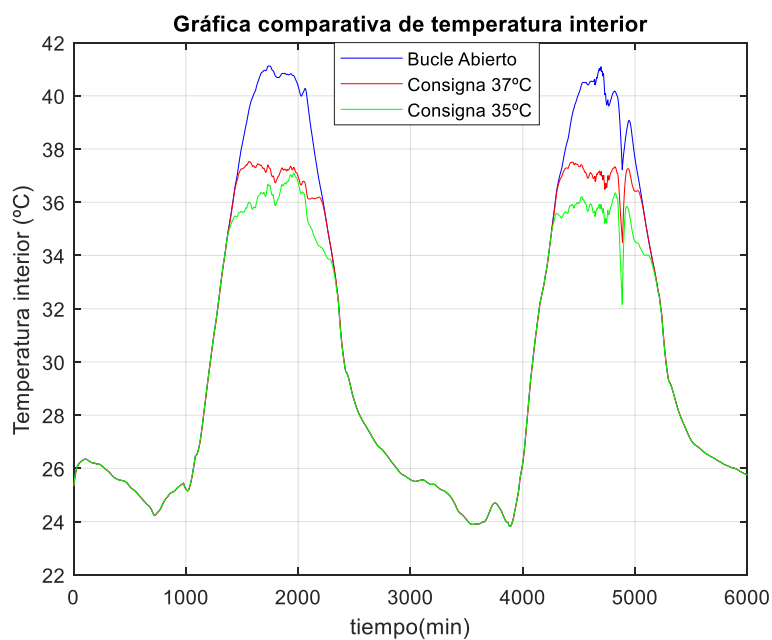


Figura 4.12. Comparativa temperatura interior en diferentes ensayos.

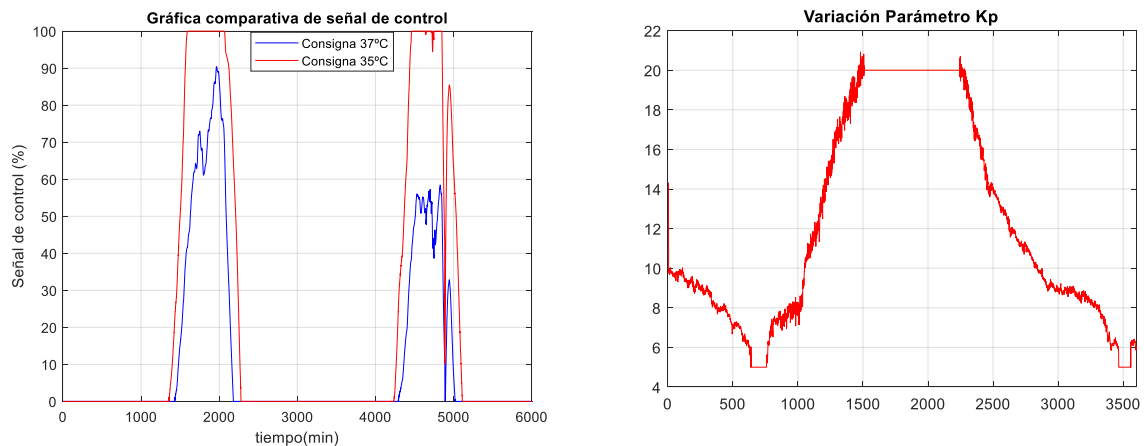


Figura 4.13. Comparativa señal de control de ventilación y detalle de variación de K_p para 37°C.

Como conclusión de este ensayo, se aprecian las limitaciones físicas de la ventilación natural para el control de temperatura, sobre todo cuando llevamos el sistema al límite, como es el caso del ensayo para la consigna de 35°C, que el sistema consigue corregir la temperatura hasta los 36°C, pero con una señal de control saturada. En el segundo día, hay un pico en el que desciende la temperatura drásticamente, este hecho es debido a un fallo en los datos recogidos, donde la temperatura exterior en ese instante ha sido errónea.

Otro hecho que se comprueba es la sensible variación del parámetro K_p , debido a la naturaleza de la velocidad del viento que es muy cambiante, pero se observa en la figura 4.12, en la consigna de 37°C, cómo se consigue perfectamente el control de la temperatura con esta K_p calculada mediante ajuste por tabla.

Control de temperatura con ventilación frente a una velocidad de viento mayor

Para comprobar la importancia que tiene la velocidad del viento en el control de la temperatura con la ventilación natural, se hace un ensayo para un seguimiento de consigna de 35°C, como el mostrado en la figura 4.11, en el que la ventilación es incapaz de alcanzar esa temperatura con los datos de velocidad de viento que se tienen, pero si esa velocidad de viento se sube 20[m/s] en el instante 1400, es decir, justo en el instante en que la ventilación va a comenzar a abrirse, el controlador de ventilación sigue perfectamente la consigna de 35°C introducida, como se puede ver en la figura 4.14.

Este resultado era de esperar, cuanto mayor sea la velocidad del viento, al abrir la ventana se produce un mayor intercambio de aire entre el aire exterior y el interior del invernadero, debido a eso la señal de control de la ventilación nunca llega a saturarse, es decir, las ventanas no necesitan abrirse completamente para mantener la consigna que se desea. Por esta razón es por lo que se necesita un control adaptativo considerando la velocidad de viento, porque para días en los que la velocidad aumente, las ventanas necesitarán abrirse menos, incluso se deben establecer limitaciones para días de mucho viento para que estas no sufran ningún tipo de daño en su estructura.

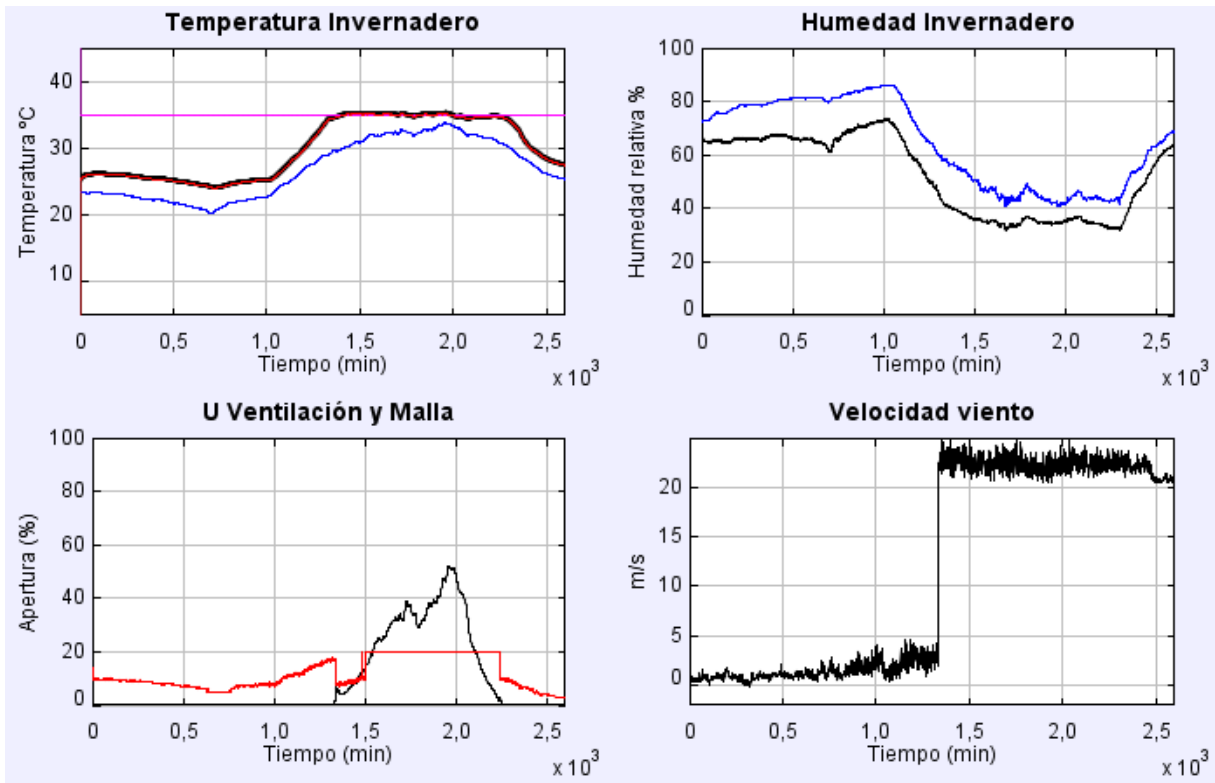


Figura 4.14. Control de la ventilación para una consigna de 35°C con mayor velocidad de viento

4.3 Ensayo de control de temperatura con calefacción

En el capítulo 2.4.5 se explica todo lo relacionado con el control de la temperatura con la calefacción. En este caso, se expone como realizar un ensayo con el controlador de la calefacción activado, es decir, un ensayo en bucle cerrado. Lo primero que se debe saber es que el controlador de la calefacción solo tiene sentido en periodos nocturnos o muy fríos, en este caso se usan los datos de invierno y se va a hacer ensayos con diferentes consignas. El usuario tiene que activar el controlador y escribir el valor de la consigna que desee en el campo marcado en rojo en la figura 4.15.

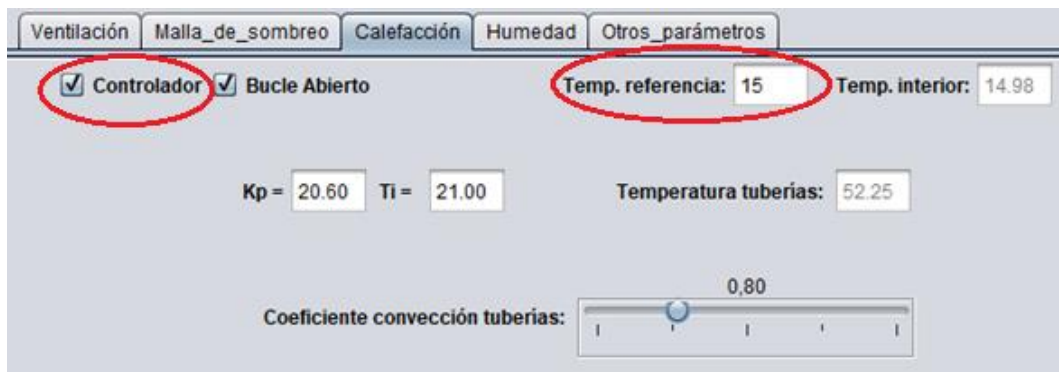


Figura 4.15. Parámetros controlador calefacción.

Una aclaración importante, el controlador de la calefacción está programado para que solo funcione en períodos nocturnos, por lo que cuando se supera una cierta radiación, el controlador se desactiva, y si se quiere controlar la temperatura varios días consecutivos hay que volver a activar el controlador y meter la consigna que queremos cada vez que empiece la noche, esto es algo muy sencillo, solo se tiene que detener la simulación y reanudarla cuando se hayan hecho los cambios.

En la figura 4.16 se muestra un ensayo con una consigna de temperatura de 15°C, para realizarlo se activa el controlador y se introduce la consigna, cuando la radiación supere 50[W/m²] el controlador se va a desactivar, esto ocurre en el instante 1400, cuando la temperatura interior vuelva a ser de unos 15°C se activa de nuevo el controlador y así sucesivamente para más días.

En cuanto a la temperatura del agua de las tuberías, que es la señal de control, se observa que al arrancar se satura a 80°C porque tiene que subir la temperatura interior unos 4°C, cuando lo alcanza va bajando esa temperatura de las tuberías hasta que el controlador deja de funcionar, y cuando se vuelve a activar empieza de nuevo el mismo proceso.

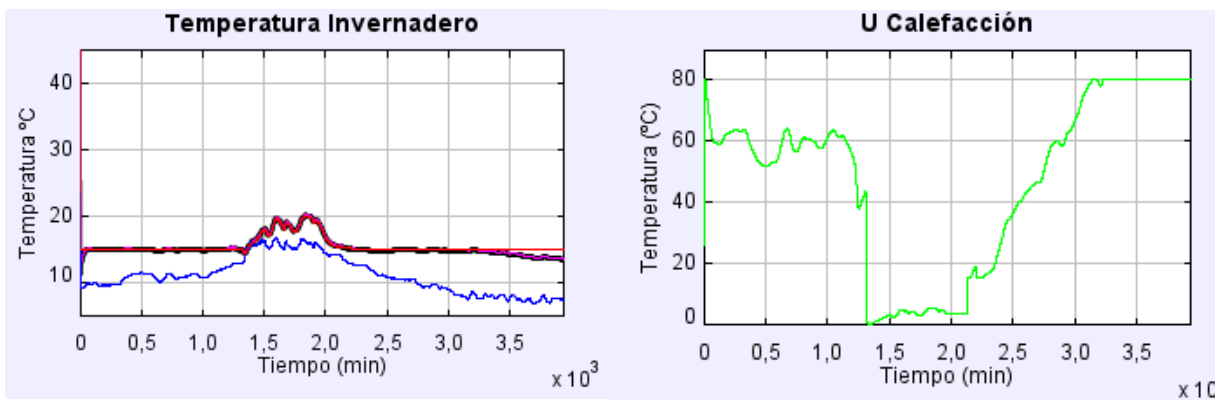


Figura 4.16. Ensayo con consigna a 15°C.

En la figura 4.17 se muestra un ensayo con una consigna de temperatura de 13°C, en este caso la señal de control se observa que es menos agresiva y nunca llega a saturar, porque tiene que subir menos grados la temperatura, aunque hay zonas en la que desciende la temperatura exterior y la calefacción tiene que forzar para que no descienda demasiado la temperatura interior en el invernadero.

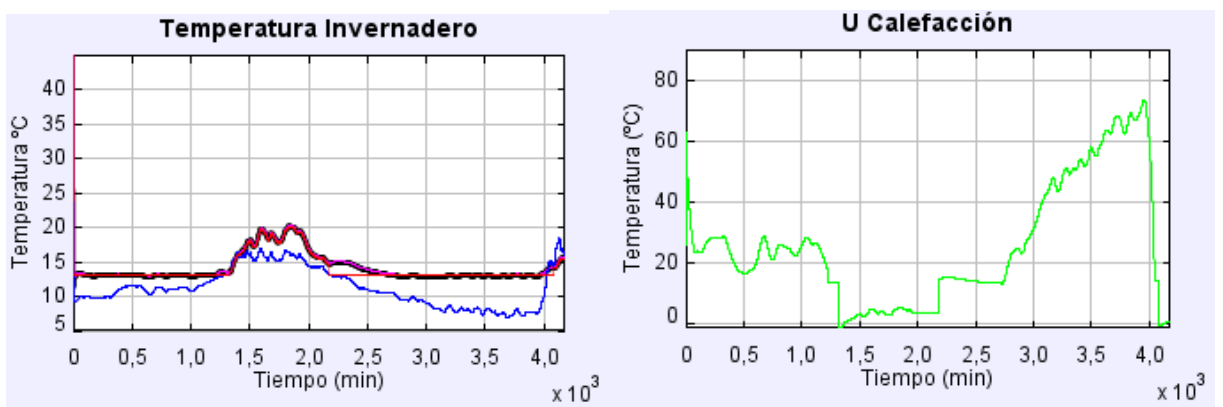


Figura 4.17. Ensayo con consigna a 13°C.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

Se muestra en la figura 4.18 una comparativa de los diferentes ensayos realizados junto con un ensayo sin control, que como se puede apreciar la temperatura sin la calefacción desciende hasta unos 8°C sobre el instante 4000, por esta razón en la señal de control se ven esas subidas de temperatura del agua de las tuberías, porque necesitan corregir demasiados grados de diferencia y llega un punto en el que saturan. Cabe añadir que esto es posible porque se trata de una simulación, en un sistema real esto sería imposible porque calentar el agua de las tuberías lleva un retardo, por ejemplo, en el comienzo de la simulación se sube a 80°C la señal de control se manera instantánea, esto en un sistema real es imposible.

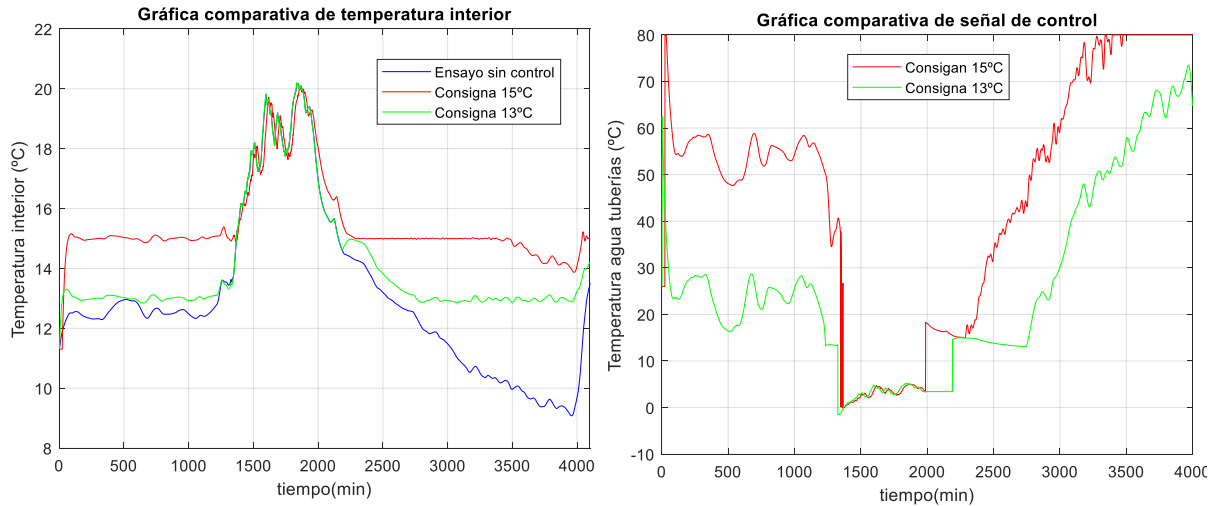


Figura 4.18. Comparativa diferentes ensayos de calefacción.

4.4 Ensayo de control de temperatura considerando humedad

En el capítulo 2.4.7 se explica todo lo relacionado con el control de la humedad con la ventilación, en este caso, se expone como realizar un ensayo con el controlador de humedad activado, es decir, un ensayo en bucle cerrado. Lo primero que se debe saber es que el controlador de humedad no sigue una consigna como tal, sino que genera una consigna de temperatura adecuada para el controlador de la ventilación, en función de un rango de humedad que se puede modificar desde teclado en el panel humedad mostrado en la figura 4.19. El usuario tiene que activar el controlador y escribir el valor de los parámetros para generar una consigna de temperatura de ventilación adecuada. Antes de modificar nada se debe de seleccionar en el panel *otros parámetros* la opción de datos de invierno y también se tiene que considerar ajustar el controlador adaptativo del termino proporcional del control de la ventilación.

El panel de parámetros del controlador de humedad muestra una interfaz de usuario con varios campos de entrada y un botón de selección. En la parte superior, hay una barra de pestañas con las opciones: 'Ventilación', 'Malla_de_sombreo', 'Calefacción', 'Humedad' (seleccionada) y 'Otros_parámetros'. Debajo de las pestañas, hay un botón con un símbolo de verificación y el texto 'Control humedad'. A la derecha de este botón, hay dos campos de entrada: 'Consigna generada:' con el valor '17.00' y 'Hum. referencia:' con el valor '70.00'. En la parte inferior, hay tres campos de entrada: 'Temp. referencia:' con el valor '17.00', 'Hum. desviacion:' con el valor '15.00' y 'Temp. influencia:' con el valor '5.00'.

Figura 4.19. Parámetros controlador humedad.

Se presentan varios ensayos variando la temperatura de influencia de la humedad. En el primer ensayo, mostrado en la figura 4.20, la temperatura de influencia es de 5°C, esto significa que la humedad tiene mucha prioridad y la consigna de temperatura que se genera varía bastante en función de esa humedad que se desea.

Como se puede observar la consigna generada (línea rosa) se va ajustando perfectamente a la temperatura interior del invernadero, por lo que se demuestra que se está controlando en función de la humedad. El segundo ensayo, mostrado en la figura 4.21, tiene una temperatura de influencia es de 2°C. En este caso la humedad tiene menos prioridad y la consigna de temperatura que se genera varía poco en función de esa humedad que se desea, por lo que, como se puede observar la consigna generada (línea rosa) se va ajustando a la temperatura interior del invernadero porque todavía sigue influyendo la humedad, aunque en menor medida. En el último ensayo, mostrado en la figura 4.22, no hay una temperatura de influencia, en este caso la humedad tiene prioridad nula y la consigna de temperatura (línea rosa) no varía.

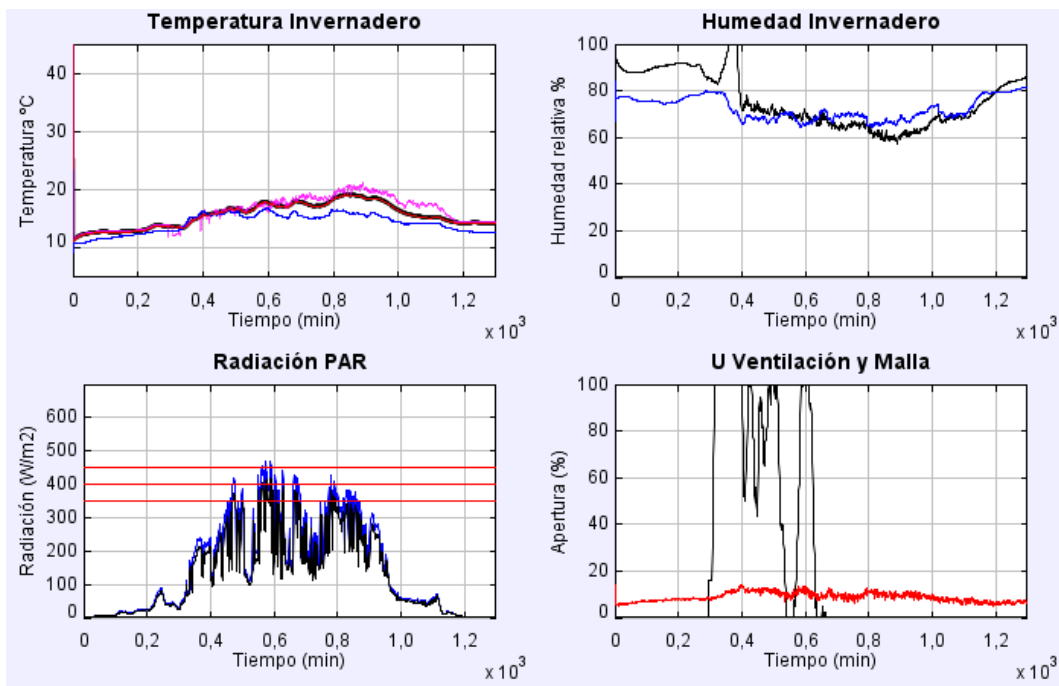


Figura 4.20. Ensayo variación máxima consigna 5°C.

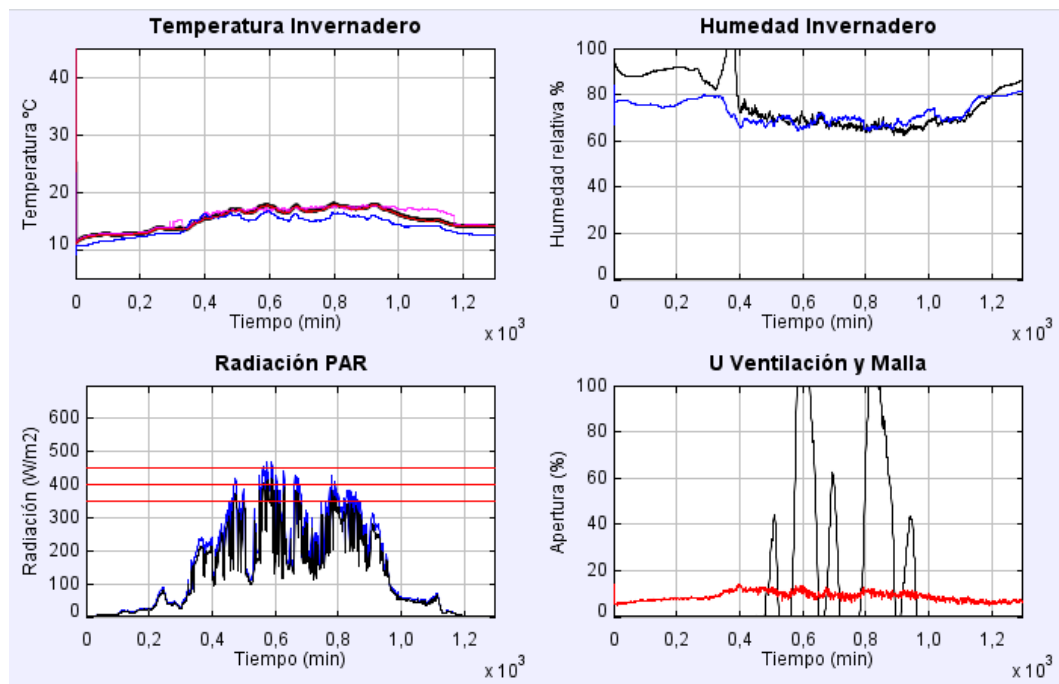


Figura 4.21. Ensayo variación máxima consigna 2°C.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

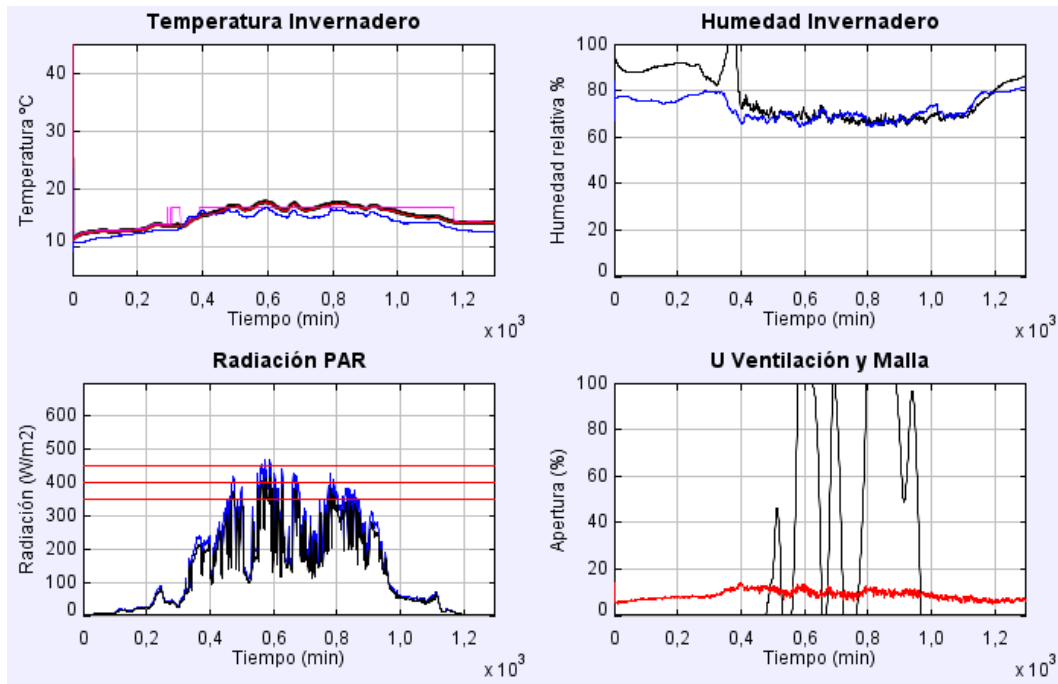


Figura 4.22. Ensayo variación máxima consigna 0°C.

Se trata de datos de invierno como se ha comentado anteriormente, en los que la temperatura es baja y la humedad bastante alta. Con este control se pretende controlar la humedad, de modo que, si la humedad relativa es demasiado alta, se adelanta la apertura de las ventanas bajándose la consigna de ventilación, es lo que ocurre en el caso de una variación de 5°C donde se le da prioridad a la humedad. Cuando se le da una prioridad nula a la humedad, es el caso de 0°C, la ventilación se abre en cuanto se alcanza la referencia y el vapor de agua escapa del invernadero en el caso de que la humedad relativa exterior sea inferior que la interior, que es lo normal, por eso la humedad en este caso es menor porque las ventanas permanecen más tiempo abiertas para seguir esa referencia de 17°C, pero sin considerar la humedad en ningún momento. En la figura 4.23 se muestran las gráficas donde se comparan los resultados de los ensayos descritos arriba con los resultados de un ensayo sin el control de humedad. Se puede apreciar en la temperatura interior para cada uno de los casos, que para una variación de la consigna de 5°C, se le da mucha más prioridad a la humedad y la temperatura apenas varía. Este hecho no es muy común, ya que, generalmente, solo se permite una pequeña variación de la consigna. Es el caso de la línea azul, donde la variación máxima es de 2°C y la temperatura sigue bien la consigna generada por el control de temperatura. En el último caso, donde no hay variación de consigna (línea verde), se aprecia que la temperatura intenta seguir la consigna de 17°C, pero sin importar lo que le esté ocurriendo a la humedad, que en este caso sube debido a que la ventana permanece más tiempo abierta para seguir esa referencia de temperatura.

En la figura 4.24 se muestran las consignas generadas en los tres ensayos a partir del instante en que se considera que empieza a amanecer hasta que anochece, entre los instantes $t=1000$ y $t=2300$. Para el caso de variación de 5°C, se aprecia cómo se va elevando la consigna para que se genera. Se debe a que la humedad relativa de referencia es de 70%, como es menor, el controlador eleva la consigna de temperatura para así retrasar la apertura de las ventanas, incluso a llegar a permanecer cerradas para no seguir perdiendo vapor de agua. En el caso de variación de 2°C, la consigna generada también se eleva para intentar mantener el vapor de agua, pero menos que en el caso anterior, y para el caso de una influencia de la humedad nula, las ventanas se abren y cierran en función de la temperatura que hay, pero sin importar si se está perdiendo el vapor de agua del invernadero.

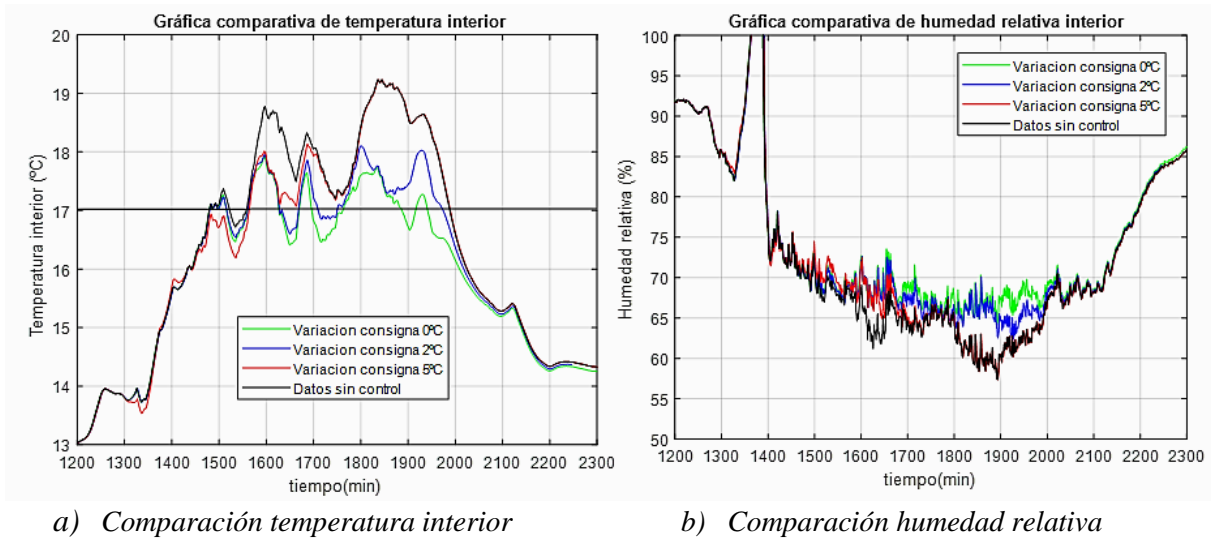
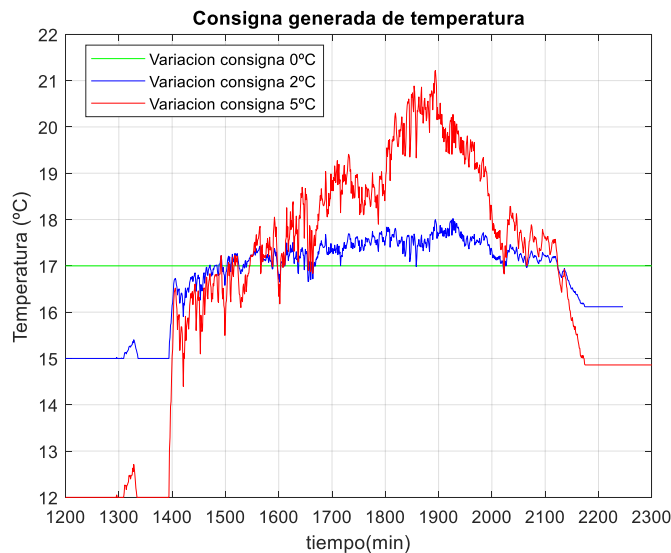


Figura 4.23. Comparación resultados control humedad.



4.5 Ensayo de control de radiación con malla de sombreado

En el capítulo 2.4.6 se explica todo lo relacionado con el control de la radiación con la malla de sombreado, en este caso, se expone como realizar un ensayo con el controlador de la malla de sombreado activado, es decir, un ensayo en bucle cerrado. Lo primero que se debe saber es que el controlador de la malla de sombreado no sigue una consigna como tal, sino que va generando un porcentaje de apertura, en función de la radiación PAR exterior. Cuando la temperatura interior sea más baja que el límite inferior establecido, la malla estará extendida al 100%, al contrario, cuando se supere el límite superior establecido, la malla estará extendida al 80%, y mientras se esté dentro de ese rango la malla estará extendida entre el 80% y el 100%. Se muestran en rojo estos límites en la figura 4.25. El usuario tiene que activar el controlador y escribir el valor de los parámetros.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

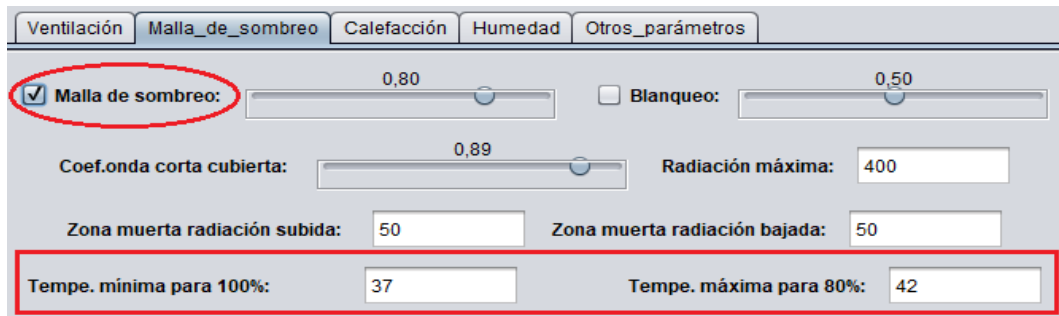


Figura 4.25. Parámetros malla de sombreo.

Por defecto, los límites inferior y superior son de 37°C y 42°C respectivamente. Dentro de este rango la malla siempre está entre el 80% y el 100% extendida ya que es un rango de 5°C. En la figura 4.26 se pueden ver las diferentes posiciones de la malla de sombreo en el sinóptico del invernadero del laboratorio virtual, ya que una imagen visual aclara mejor lo explicado.

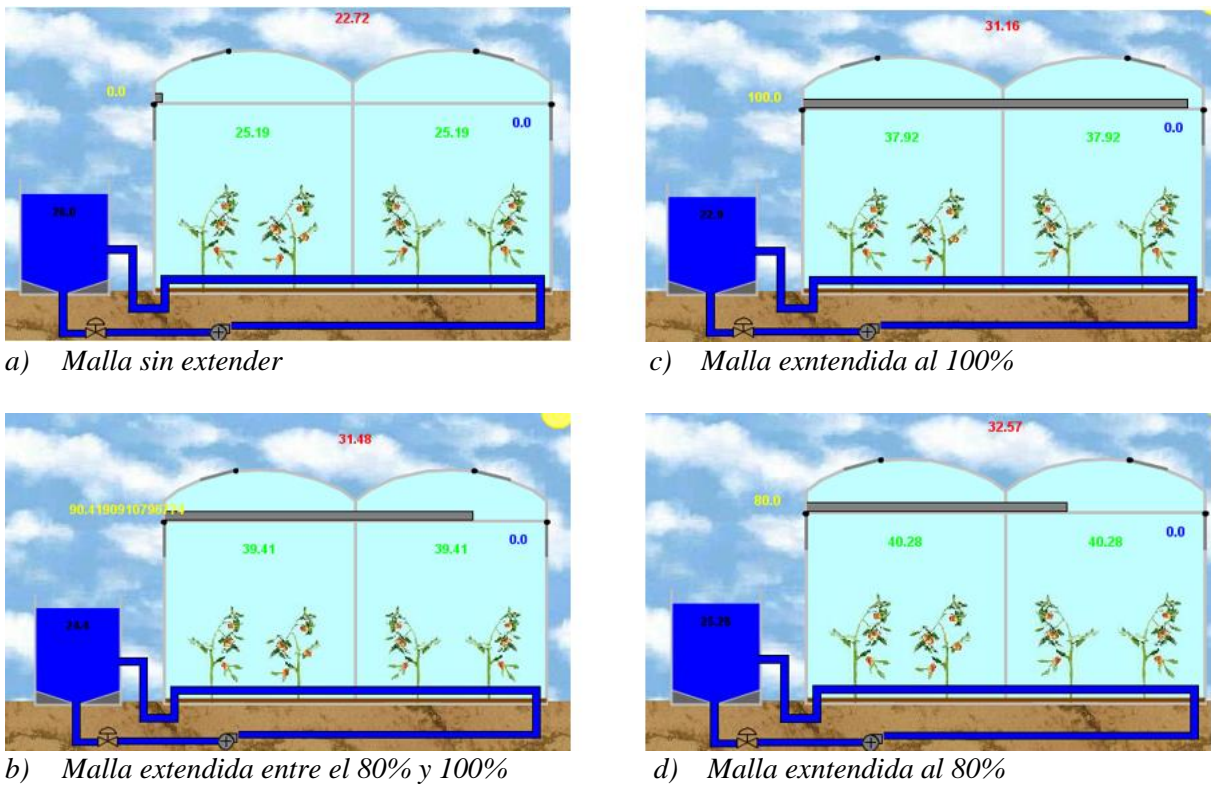


Figura 4.26. Diferentes estados de la malla de sombreo.

Para ver como influye la malla de sombreo en la radiación y la temperatura se van a exponer dos ensayos, uno entre los rangos de temperatura descritos anteriormente y otro entre un rango de temperatura más pequeño de 38°C a 40°C, así se puede ver la señal de control de la malla saturada en la figura 4.28.

El primer ensayo se muestra en la figura 4.27, en la gráfica de la radiación PAR se puede observar cuando la radiación PAR exterior es mayor que la radiación máxima establecida, la malla se abre hasta el 90% más o menos, y se produce un descenso notable de la radiación interior. Cuando la radiación PAR exterior baja por debajo de la radiación máxima permitida se vuelve a recoger completamente la malla. La temperatura interior también varía en función de la malla de sombreo, cuando se extiende, la temperatura tiende a bajar, aunque pasado un cierto tiempo el invernadero empieza a acumular calor y tiene que abrirse un poco la malla para que ese calor pueda escaparse. Es por esta razón por lo que la señal de control va acercándose al 80% conforme va subiendo la temperatura.

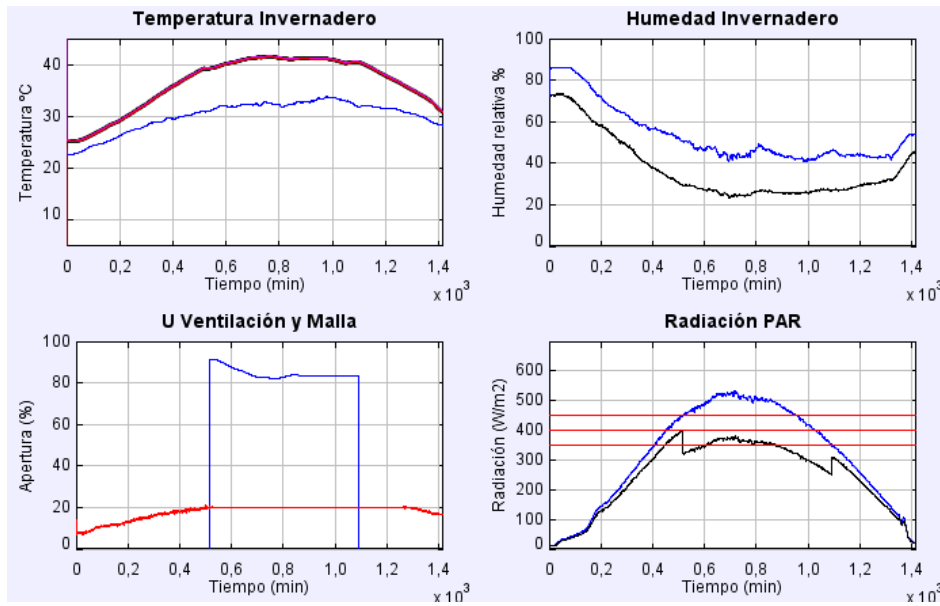


Figura 4.27. Ensayo malla de sombreo entre 37°C y 42°C

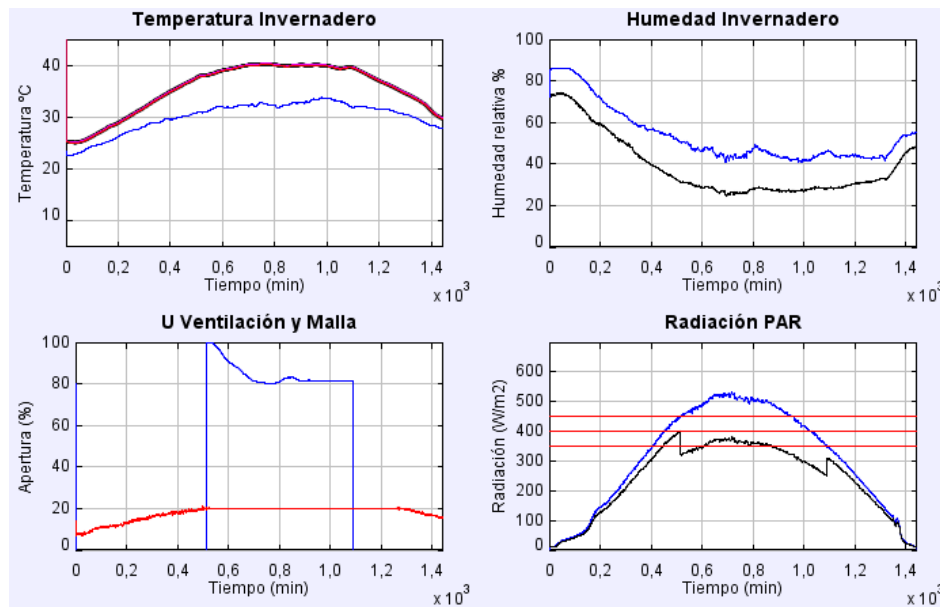


Figura 4.28. Ensayo malla de sombreo entre 38°C y 40°C

La radiación PAR que deja pasar la malla depende del coeficiente de transmisión de radiación de onda corta, $C_{toc,malla}$, en el laboratorio por defecto es de 0,8, es decir, deja pasar un 80% de la radiación. En la figura 4.29 se muestra una comparación de ensayos con diferentes coeficientes, en la que se puede apreciar que cuanto menor es el coeficiente de transmisión, menor es la radiación y la temperatura. Por ejemplo, para el caso de un coeficiente de 0,2, la radiación la absorbe la malla de sombreo casi por completo, descendiendo la radiación PAR interior hasta los 100[W/m²] y, por tanto, la temperatura dentro del invernadero desciende más que en los demás casos, como se puede apreciar baja unos 4°C con respecto a la temperatura interior sin malla de sombreo. Esto se ha hecho solo en la simulación, en la práctica real no tiene sentido porque se necesita un mínimo de radiación. Lo normal es un coeficiente de transmisión de onda corta de 0.8, que absorbe unos 100[W/m²] de radiación PAR y la temperatura desciende apenas 1°C con respecto a la temperatura sin la malla de sombreo.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

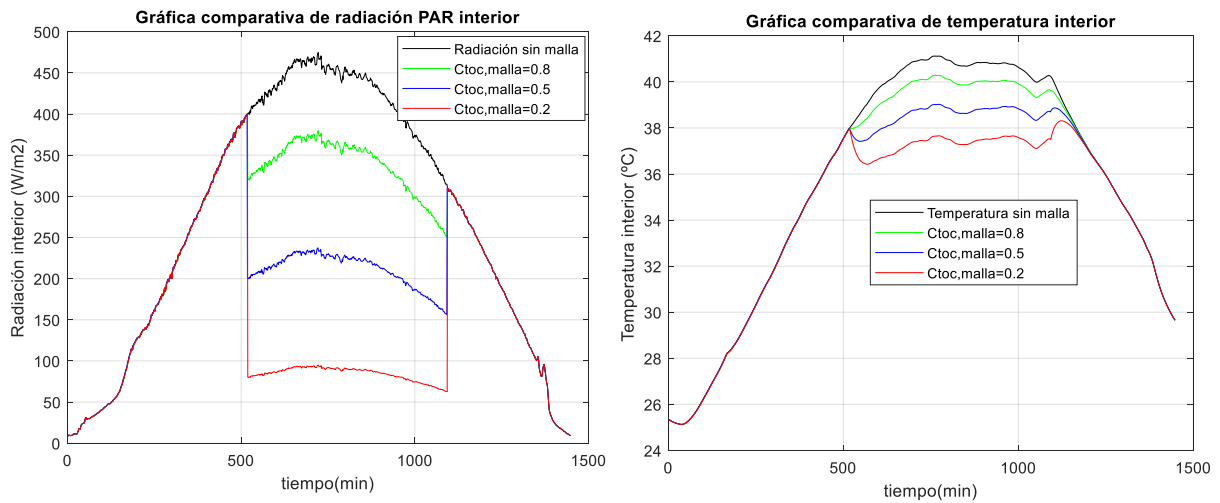


Figura 4.29. Comparación radiación PAR interior y temperatura.

Control de radiación con malla de sombreo frente a perturbaciones

Para intentar simular como actúa la malla ante un día nublado, se introducen dos perturbaciones para bajar la radiación 200 [W/m²], simulando el paso de un nube. Cuando se tiene un día nublado, la radiación baja, y el control de la malla tiene que actuar en consecuencia. Si la radiación baja por debajo de la máxima establecida la malla de sombreo debe de recogerse al completo, como se puede apreciar en la figura 4.30 la malla actúa en consecuencia y se recoge, cuando la radiación vuelve a estar por encima de la establecida se vuelve a extender hasta un porcentaje de apertura que establece el controlador según la temperatura y la radiación que haya en ese momento.

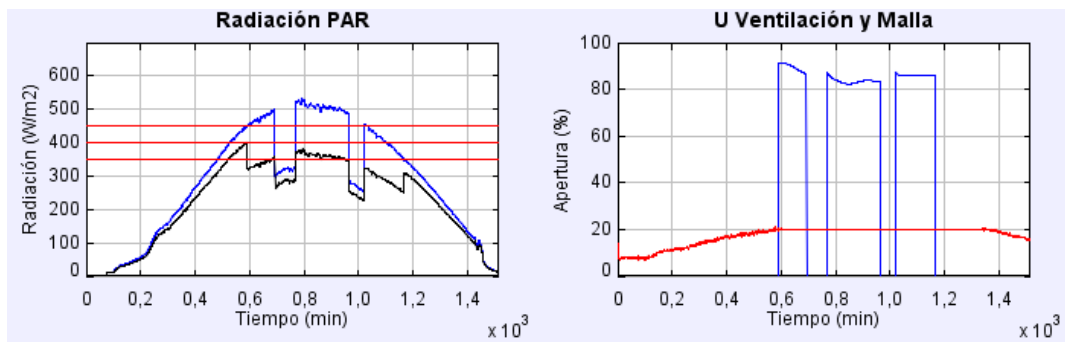


Figura 4.30. Ensayo perturbaciones de radiación

CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

5.1 Conclusiones

Como se ha comentado al principio de esta memoria, el objetivo final es desarrollar un laboratorio virtual del clima de un invernadero con EJS, para poder controlar el crecimiento del cultivo de tomate mediante técnicas de control que nos permitan obtener los objetivos de consignas del sistema en BC y en BA. Este trabajo proporciona esa nueva herramienta, enfocada a la docencia, para el control del clima de un invernadero.

Para el logro de este objetivo, se ha tenido que estudiar todo lo relacionado con este tema, como puede ser estudiar otro tipo de laboratorios virtuales, o estudiar los sistemas de actuación en un invernadero. Cabe destacar la importancia del control de invernaderos en la provincia de Almería, donde los algoritmos de control presentes en este TFG son sólo una parte de lo que es posible implantar en este ámbito.

Durante el desarrollo de este proyecto se han podido apreciar varias conclusiones relacionadas con el control del clima de un invernadero. Lo más importante que se aprecia es la dificultad de realizar un control exacto de la temperatura y la humedad dentro del invernadero. Son variables que dependen de muchos factores tanto externos como internos, que hacen que el modelo tenga una gran cantidad de submodelos relacionados entre sí, convirtiéndose así en un sistema bastante sensible a variaciones del clima en el exterior ya que muchas perturbaciones son imposibles de predecir; por consiguiente, imposibles de considerar en un modelo matemático, como puede ser un día de mucho viento. Por tanto, el uso del laboratorio virtual requiere de un conocimiento sobre el control del clima en un invernadero porque el sistema presenta limitaciones y hay circunstancias imposibles de controlar, por ejemplo, que se quiera bajar la temperatura en el interior del invernadero a 15°C en un día de agosto de Almería en el que se puede alcanzar unos 40°C en el exterior, lo cual es imposible.

En relación con la programación del modelo, lo más relevante es la dificultad que tiene programar en un entorno nuevo un modelo con tantos submodelos relacionados entre sí, en el que afectan perturbaciones y donde las variables de control son compartidas, como se ha comentado ya. Este hecho hace que la programación requiera de un cuidado especial, sobre todo en el uso de los actuadores, en los que hay que prestar mucha atención de que no se esté programando acciones contradictorias; por ejemplo, en el caso de el control de la humedad se utiliza el controlador de ventilación. Si se activa el de la humedad que genera una determinada consigna de temperatura, no se debe de poder activar el controlador de ventilación e introducir otra consigna, sino que debe activarlo el propio controlador de humedad. Otro hecho que dificulta la programación es que se trata de un modelo matemático, es decir, no es exacto totalmente, algunos parámetros que se tienen que calcular previamente necesitan que se estimen coeficientes, pero la estimación se tiene que hacer para cada momento de la simulación. Por tanto, hay que establecer algunos límites para que no se generen datos que hagan que el programa se inestabilice o esté simulando con resultados erróneos.

Con la herramienta de desarrollo EJS, el entorno de programación es íntegramente en Java, por lo que, las aplicaciones desarrolladas serán en dicho lenguaje, lo que quiere decir que son aplicaciones independientes y multiplataforma, esta es una gran ventaja, además de las que se van a describir a continuación y algunos inconvenientes que pueden tenerse en cuenta:

- **Ventajas.** La gran ventaja que presenta EJS es que es de uso libre (puede descargarse en <http://fem.um.es/Ejs/>) y que no requiere un conocimiento muy avanzado de programación para poder desarrollar aplicaciones bastante interesantes, sobre todo enfocadas al ámbito docente. Otra ventaja que tiene es que se puede combinar con MATLAB, tanto en escritura como en lectura de las variables del modelo en Simulink, aunque no se haya usado en este TFG. Por último, cabe mencionar que la mayoría de los elementos de la visualización que vienen de serie se pueden aplicar al campo de control, lo cual facilita mucho el trabajo porque es muy sencillo crear una vista de una simulación sin necesidad de usar programación.
- **Inconvenientes.** Más que inconvenientes se pueden llamar limitaciones, y están presentes la mayoría en el panel vista. La principal limitación que se ha encontrado es que el usuario no puede interactuar directamente con las gráficas de resultados, esto sería muy cómodo a la hora de introducir perturbaciones o seguir referencias sin necesidad de utilizar el panel de control. Otra limitación relacionada con las gráficas es que no se pueden poner dos ejes a diferente escala, lo cual limita a que en una misma gráfica solo se puedan mostrar variables con resultados del mismo rango. Por último, a la hora de diseñar la interfaz, tienes que estar introduciendo por teclado las coordenadas en el dibujo en las que se va a situar el elemento que se quiere implementar, esto es algo muy tedioso en algunas ocasiones, y se podría mejorar si se pudiera mover libremente con el ratón y colocarlo donde más convenga.

Como conclusión, se puede decir que el resultado ha sido satisfactorio y aceptado por cada una de las personas que han participado en este proyecto, tanto de forma directa como indirecta. Gracias a este resultado, es decir, a la herramienta desarrollada, los alumnos pueden realizar tareas de forma no presencial, capacitándolos así de competencias transversales como el uso de las TICs o la colaboración entre ellos de manera virtual. No hay que olvidar que, mediante este método de enseñanza, el equipo necesario para realizar una práctica o ensayo es únicamente un ordenador conectado a internet, así el alumno no está condicionado por la necesidad de un equipo específico que sea difícil conseguir.

5.2 Futuros trabajos

A lo largo del desarrollo de este trabajo han ido surgiendo diferentes ideas que permitirían realizar algunas mejoras o completar algunos contenidos de la herramienta diseñada. Se presentan a continuación algunas ideas que se pueden tener presentes pensando en posibles mejoras futuras:

- En este laboratorio hay disponibles dos tipos de datos de entrada, de verano o de invierno, la posibilidad de incluir datos de meses en los que las condiciones sean diferentes abriría una amplia posibilidad de comparar resultados ante otras situaciones que ahora no están contempladas. Por ejemplo, incluir un archivo de datos de un mes donde las condiciones climatológicas sean más moderadas que en los datos disponibles en el laboratorio virtual.
- Tener en cuenta situaciones extremas en el control de la temperatura, por ejemplo, se puede incorporar la opción de un día de lluvia en el que no haya apenas radiación.
- Implementar un modelo de concentración de CO₂, así como diseñar una estrategia de control para el mismo.
- Incorporar nuevos actuadores para poder mejorar el control de la temperatura y la humedad del invernadero, como puede ser el caso, de incorporar humidificadores.

Herramienta para el aprendizaje de las técnicas de control climático de un invernadero basada en *Easy Java Simulations*

- Considerar otras perturbaciones que afecten al sistema, por ejemplo, considerar la dirección del viento, la cual no está contemplada en este laboratorio.
- Implementar un control en cascada para la calefacción en el que se pueda controlar la posición de la válvula por la que pasa el agua de la caldera, que el sistema implantado se ha considerado siempre abierta.
- Desarrollar este laboratorio virtual, pero con EJS script, para poder utilizarlo desde internet, sin necesidad de tener instalado EJS.

Capítulo 5. Conclusiones y futuros trabajos

BIBLIOGRAFÍA

- [1] K.J. Aström, T. Häggglund. Control PID avanzado. Pearson, Madrid, 2009.
- [2] M. Berenguel, J.L. Guzmán, Tema 1. Control PID. Apuntes de técnicas de control industrial.
- [3] I. Calvo, E. Zulueta, U. Gangoiti, J.M. López. “Laboratorios remotos y virtuales en enseñanzas técnicas y científicas,” Ikastorratza, revista electronica de Didáctica, Tercer número. http://ehu.es/ikastorratza/castellano/index_cast
- [4] S. Dormido, J. Sánchez, F. Morilla. Laboratorios virtuales y remotos para la práctica a distancia de la automática, XXI Jornadas de Automática, Conferencia plenaria, Sevilla, 2000.
- [5] Easy Java/Javascript Simulations. <http://www.um.es/fem/EjsWiki/> (ultima visita 25/11/2019).
- [6] F. Esquembre, C. Wolfgang. Easy Java Simulations Manual. Noviembre; 2015.
- [7] P.A. Fernández. Desarrollo de un laboratorio virtual de un invernadero con Easy Java Simulations. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Almería, Escuela Politécnica Superior, 2016; 74p.
- [8] J.L. Guzmán. Laboratorios Virtuales y Remotos. Dpto. de Informática. Escuela Politécnica Superior y Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Almeria, 2015.
- [9] J.L. Guzmán, M. Berenguel, F. Rodríguez, S. Dormido. Laboratorio virtual para la enseñanza del control climático de invernaderos. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. Septiembre; Vol. 2; Núm. 2, Abril 2005, pp. 82-92.
- [10] P.G.H. Kamp, G.J. Timmerman. Computerized enviromental control in greenhouses. Ed. IPC Plant, Ede, The Netherlands, 1996.
- [11] Mathworks Simulink Matlab, [consulta 22-11-2019]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>
- [12] Matlab. El lenguaje del cálculo técnico. (ultima visita 02/12/2019). <http://es.mathworks.com/products/matlab/>
- [13] F. Rodríguez. Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero. Universidad de Almeria, Tesis Doctoral, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Lenguajes y Computación, 2002.
- [14] Superficie de invernaderos de Andalucía oriental. [consulta 12-11-2019]. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/presidencia/portavoz/tierraymar/138208/invernaderos/plastico/agricultura/Andalucia/cultivo>

La aparición de los laboratorios virtuales y remotos se debe a que la realización de experimentos con plantas reales suele ser costosa en términos de tiempo, dinero y energía, además es frecuente que una vez que estas infraestructuras son puestas a punto, permanecen infrautilizadas. Estas Nuevas Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (NTICs) como los laboratorios virtuales, han permitido revolucionar y renovar las técnicas de aprendizaje, ya que facilita la comprensión del alumnado. Este laboratorio virtual de un invernadero convencional de Almería, se basa en el estudio, modelado y control de las variables que afectan al crecimiento del cultivo bajo invernadero, y va a permitir al usuario realizar las mismas operaciones que en un laboratorio tradicional, pero de manera virtual y de una forma mucho más eficiente.

Palabras clave: Laboratorio virtual, modelado de variables climáticas, técnicas de control industrial.

The appearance of virtual and remote laboratories is due to the fact that conducting experiments with real plants is usually expensive in terms of time, money and energy, it's also frequent that once these infrastructures are put in place, they remain underutilized. These New Information and Communication Technologies (NTICs), such as virtual laboratories, have allowed revolutionizing and renewing learning techniques, since it facilitates the understanding of students. This virtual laboratory of a conventional greenhouse in Almería, is based on the study, modeling and control of the variables that affect the growth of the greenhouse crop, and it will allow the user to perform the same operations as in a traditional laboratory, but in a virtual way and in a much more efficient way.

Keywords: Virtual laboratory, climate variable modeling, industrial control techniques.

