



HORTÍCOLES

Avances en el control de los factores del clima para el cultivo en invernadero

*P. F. Martínez¹, D. Roca¹,
R. Suay¹, M. Martínez²,
X. Blasco², J.M. Herrero²
y C. Ramos²*

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA.
INSTITUTO VALENCIANO DE INVESTIGACIONES AGRARIAS.

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA.
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA



La horticultura bajo invernadero es, quizás, la actividad agrícola en la que se va implantando con mayor rapidez la informática y el control automático. En la búsqueda continua de aumentar la rentabilidad, bien sea a través de un mayor rendimiento de los cultivos o bien buscando un aprovechamiento más eficiente de la energía empleada o, finalmente, por una mejora del rendimiento del trabajo aplicado en todo el proceso de la producción, los dos primeros aspectos son los que dependen de un mejor control del clima del invernadero.

INTRODUCCIÓN

La horticultura bajo invernadero es, quizás, la actividad agrícola en la que se va implantando con mayor rapidez la informática y el control automático. En la búsqueda continua de aumentar la rentabilidad, bien sea a través de un mayor rendimiento de los cultivos o bien buscando un aprovechamiento más eficiente de la energía empleada o, finalmente, por una mejora del rendimiento del trabajo aplicado en todo el proceso de la producción, los dos primeros aspectos son los que dependen de un mejor control del clima del invernadero.

En muchos invernaderos de las regiones hortícolas españolas, la idea del control del clima se limita a tratar de amortiguar, ineficazmente, las condiciones extremas de temperatura baja o alta, humedad saturante con condensación y goteo y sequedad extrema con síntomas de déficit hídrico. Con el paso de los años se ha ido afianzando la convicción de que esta situación debía cambiar. Numerosos horticultores han incluido en sus objetivos de inversión construir mejores invernaderos en los que equipos e instalaciones hagan posible la regulación más afinada del clima y el control automático —de otros factores (riego y fertilización), de modo que permitan que el cultivo produzca en condiciones más favorables, para

obtener alto rendimiento y mayor calidad. El control climático del invernadero es un arma de enorme eficacia para la prevención de enfermedades y plagas de los cultivos, y que facilita y aumenta de manera clara, las posibilidades de aplicar programas de lucha integrada. Los avances en la tecnología de los sensores, actuadores, autómatas programables y de los ordenadores, cada vez más precisos y baratos favorecen, sin lugar a duda, esta evolución de los agricultores.

En la producción hortícola intervienen muchas variables que participan en procesos físicos y biológicos y por lo tanto el número de factores que es necesario regular en un invernadero es grande, temperaturas del aire y sustrato, humedad, CO², luz, pH, CE, etc. Existen además interacciones entre muchas de estas variables y regular su combinación óptima no es posible sino con la ayuda de sistemas más capaces y complejos, con posibilidad de llevar algoritmos de control que integran o relacionan varias variables climáticas y de usar modelos que faciliten la predicción del comportamiento del sistema ante las diversas condiciones posibles, con lo cual la regulación del clima se puede hacer con mayor precisión y estabilidad, que hasta hace poco no se habían generalizado en este sector. De las necesidades de control cuando lo único que se manejaba automática-

mente era la apertura y cierre de las ventanas, a la necesidad actual de manejar de modo combinado la ventilación, calefacción del aire, del sustrato, la pantalla térmica, o bien la ventilación juntamente con la nebulización ultrafina (“fog”) y posiblemente una malla de sombreado, a lo que hay que añadir el riego y el control de la solución fertilizante, hay un salto tecnológico notable que va a continuar. El objetivo es conseguir los niveles convenientes de temperatura, de humedad, luz, CO² no limitante, para lo que frecuentemente se necesita la actuación combinada de los equipos del invernadero, como es el caso de la apertura controlada de las ventanas y el funcionamiento simultáneo de la calefacción, cuando se produce un exceso de humedad ambiente, que es conveniente eliminar. La introducción de la informática ha permitido proponer sistemas de control que son capaces de manejar algoritmos con niveles de consignas de varias variables climáticas importantes para el cultivo, así como de instrucciones para la actuación de los equipos de climatización de modo combinado y jerarquizado.

El reto actual es conseguir optimizar estas herramientas de decisión y manejo con la mayor simplicidad posible, para que el productor disponga de la información que necesita de modo sintético, sin sentirse desbordado. Asimismo los sistemas de control deberían complementarse con medios y datos de tipo biológico y, particularmente, fisiológico, que sirvan para obtener informaciones prácticas sobre el estado del cultivo, que ayuden a su manejo.

PARÁMETROS CLIMÁTICOS

Bajo el punto de vista de la producción de cultivos, el ambiente ecológico, el hábitat, es el resultado de una combinación de efectos de los subsis-

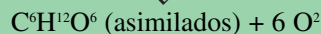
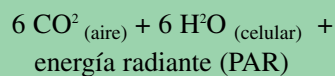
temas clima, suelo y factores bióticos. En lo que al subsistema clima se refiere, los elementos que lo conforman son radiación (irradiancia, radiación incidente), temperatura (efectos de medias y extremas, ciclos diurnos y estacionales, fluctuaciones térmicas), agua (humedad del aire), viento (velocidad media, velocidad extrema, dirección), concentración de CO² y contaminación del aire.

Para un crecimiento y desarrollo óptimos, los factores ambientales que intervienen en los procesos que dan lugar a los mismos (fotosíntesis, transpiración, respiración, absorción de agua y elementos minerales, y su transporte), deben ajustarse a unos niveles considerados como óptimos ya que de la interrelación que haya entre ellos dependerá la tasa o velocidad del proceso fotosintético y, por ende, de crecimiento.

El objetivo del control climático será, por tanto, ajustar, en la medida de lo posible, los factores que intervienen teniendo en cuenta las interacciones que hay entre ellos. Y es entonces aquí dónde el cultivo protegido tiene una gran ventaja frente al cultivo al aire libre utilizando técnicas de manejo tales como calefacción, nebulización, ventilación, enriquecimiento de CO², etc.

La FOTOSÍNTESIS es la reacción metabólica fundamental, ocurre en unas células específicas situadas en la superficie foliar según la ecuación :

Tanto la ocurrencia como la veloci-



dad de esta reacción dependen de la temperatura, habiendo un rango de esta última óptimo específico para cada planta. Hasta aquí vemos la intervención de la **radiación PAR** interceptada por unos orgánulos espe-



cíficos de las células clorofílicas; del CO² del aire que ha accedido a la planta a través del poro estomático, cuya apertura o cierre depende del movimiento de los estomas, unas células específicas situadas en la superficie foliar, de la **temperatura**. Pero es necesario un contenido determinado de agua en las células clorofílicas para que la reacción ocurra. La planta contiene agua porque durante su proceso de crecimiento la ha ido absorbiendo a través de las raíces. La fuerza o presión de succión depende, además de la evidente existencia de agua en el entorno radicular, del flujo de transpiración. La **TRANSPIRACIÓN** consiste en la salida de vapor de agua de la planta al exterior a través del poro estomático (el mismo por el que accede el CO²) y su acceso, por tanto, depende del régimen de apertura de los estomas, el cual está condicionado por el contenido de vapor de agua en el aire, (**humedad del aire**). Cuando se produce esta salida de vapor de agua al exterior, al ambiente inmediato que rodea a la planta, se produce una presión hídrica

transmitida de inmediato a las raíces las cuales absorberán agua para volver al equilibrio inicial (ABSORCIÓN HÍDRICA). Vemos entonces la estrecha relación que hay entre los 3 procesos fundamentales que ocurren en la planta para su crecimiento y mantenimiento y, los requerimientos ambientales básicos para que ocurran.

* Radiación solar

Se encuentra entre 300 y 2500 nm del espectro, la que utiliza la planta para el proceso fotosintético se encuentra entre 400 y 700 nm y es conocida como radiación fotosintéticamente activa (PAR), constituye alrededor del 50% de la radiación solar global que llega al nivel de la tierra, pero sólo una pequeña proporción de la misma es absorbida por las plantas para el proceso fotosintético mientras que el resto es convertido en calor. El cultivo bajo invernadero difiere del cultivo al aire libre en que las radiaciones son más bajas en invierno y que puede haber pérdidas de alrededor de 30-50% por reflexión

y absorción del material de cubierta, así como de los elementos de construcción del invernadero. Éstas pueden deducirse por las leyes ópticas de reflexión, absorción y transmisión tanto del material de cubierta como del material opaco que estructura el invernadero.

* Temperatura

La temperatura no es un factor de crecimiento en el sentido de que no aporta energía o constituyentes, pero sí que controla las tasas de reacciones metabólicas que dan lugar al crecimiento y desarrollo de la planta. Estos procesos hacen de la temperatura el principal factor de crecimiento.

De hecho, cada especie vegetal tiene su crecimiento determinado por unos niveles de temperatura que son específicos incluso para cada estadio fisiológico y fenológico. Éstos son el cero de vegetación, óptima de crecimiento, mínima y máxima biológicas (Cuadro 1). Se manejan valores como la integral térmica de un ciclo de cultivo que es una medida del calor reci-

bido por la planta a lo largo de todo su ciclo de cultivo. Las fluctuaciones térmicas día-noche son importantes y vienen dadas por la termoperiodicidad. Hay especies cuya respuesta en crecimiento está más condicionada por la temperatura media de 24 horas (pepino, tomate, pimiento); otras, en cambio dependen más para aumentar la tasa de crecimiento del salto térmico día-noche que de la temperatura media de 24 horas (lechuga), o que necesitan un periodo de temperaturas bajas ($T < 8^{\circ}\text{C}$) previa a la floración, (vernalización) como las crucíferas y liliáceas.

* Anhidrido carbónico (CO_2)

El carbono, C, es el principal componente de la biomasa de la planta, constituyendo el 40-45% de su materia seca total. Es absorbido como CO_2 de la atmósfera a través de la fotosíntesis.

La concentración óptima de CO_2 en el ambiente (definida como aquella con la que las plantas alcanza un 98% de la tasa máxima de creci-

Cuadro 1 Niveles climáticos importantes para algunas especies de plantas cultivadas en invernadero (basado en Tesi, 1972).

Especie	T (°C) mínima letal	T (°C) mínima biológica	T (°C) optima NOCHE	T (°C) óptima DÍA	T (°C) máxima biológica	T (°C) óptima radicular	CO_2 (ppm)	HR óptima (%)
Tomate	0 a 2	8 a 10	13 a 16	22 a 26	26 a 30	15 a 20	1000-2000	55-60
Pepino	0 a 4	10 a 13	18 a 20	24 a 28	28 a 32	20 a 21	1000-3000	70-90
Pimiento	0 a 4	10 a 12	16 a 18	22 a 28	28 a 32	15 a 20	-	65-70
Berenjena	0 a 2	9 a 10	15 a 18	22 a 26	30 a 32	15 a 20	-	65-70
Judía	0 a 2	10 a 14	16 a 18	21 a 28	28 a 35	15 a 20	-	-
Melón	0 a 2	12 a 14	18 a 21	24 a 30	30 a 34	20 a 22	-	60-80
Calabacín	0 a 4	10 a 12	15 a 18	24 a 30	30 a 34	15 a 20	-	-
Lechuga	0 a 2	4 a 6	0 a 15	15 a 20	25 a 30	10 a 12	1000-2000	60-80
Fresa	-2 a 0	6	10 a 13	18 a 22	-	12 a 15	-	60-70
Rosa	-6 a 0	8 a 12	14 a 16	20 a 25	30 a 32	15 a 18	1000-2000	70-75
Gerbera	0 a 2	8 a 10	13 a 15	20 a 24	-	18 a 20	-	60-70
Clavel	-4 a 0	4 a 6	10 a 12	8 a 21	26 a 32	15 a 18	500- 1000	70-80
Gladiolo	0 a 2	5	10 a 12	16 a 20	-	18 a 21	-	-
Poinsettia	0 a 4	8 a 10	16 a 20	20 a 25	-	18 a 20	-	-

miento), oscila entre 600 y 1000 vpm. La concentración normal en el aire ambiente es de 300 a 400 vpm. De ahí el interés que tiene enriquecer la concentración de CO_2 del aire de los invernaderos.

* Humedad del aire

El contenido de vapor de agua en el aire afecta directamente al proceso de transpiración, el cual es muy importante para el mantenimiento de la turgencia, el transporte de asimilados y elementos minerales y el descenso de temperatura de la planta en periodos de elevada intensidad de radiación solar. La transpiración consiste en una salida de vapor de agua de la planta a través de las células estomáticas situadas en la superficie foliar. La apertura y cierre estomáticos están regulados principalmente por la diferencia de presión de vapor de agua que hay entre la cavidad subestomática y el aire. Bajo condiciones óptimas de hidratación de la planta, hay mayor cantidad de agua contenida en dicha cavidad que en el exterior, es entonces cuando se puede producir la apertura estomática, la consiguiente salida de vapor de agua hasta el equilibrio y, a su vez, la entrada de CO_2 a la cavidad subestomática indispensable en el proceso fotosintético. Este proceso de apertura de estomas da lugar a una presión de succión transmitida a las raíces, donde se absorben el agua y los elementos minerales disueltos, y su transporte, a la vez que este movimiento actúa como regulador de la temperatura de la planta.

Desde el punto de vista de control climático el valor que se maneja normalmente es la humedad relativa, la cual indica el contenido de vapor de agua en el aire a una temperatura del aire determinada como porcentaje de la capacidad máxima en la saturación. Desde el punto de vista agronómico es más útil trabajar en términos de déficit de saturación, que es la dife-

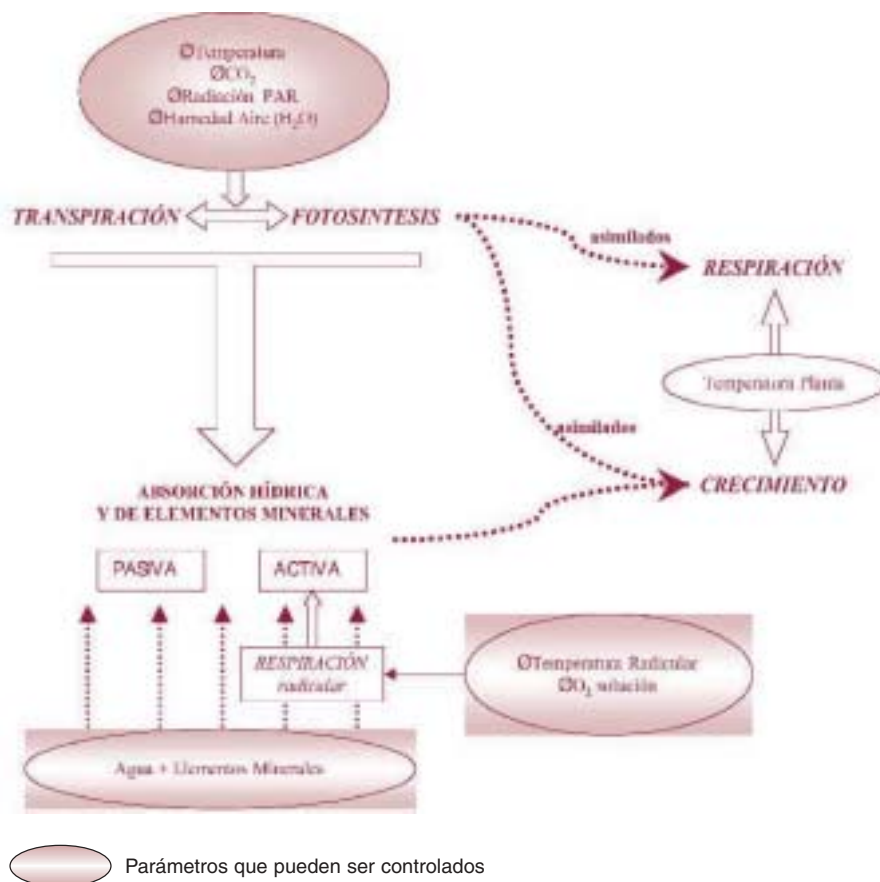


Figura 1. Procesos fisiológicos básicos para el crecimiento de la planta e influencia de factores ambientales que pueden ser controlados para su optimización

rencia entre la capacidad de humedad máxima y el contenido real. Cada vez se emplea más este parámetro a los efectos de control climático, sustituyendo a la humedad relativa.

* Fotosíntesis y luz

En principio un aumento de energía luminosa (PAR) dará lugar a un incremento de la tasa fotosintética. Si partimos de una situación de baja intensidad luminosa (15 -100 W/m^2), un aumento de la misma (> 100 W/m^2) se corresponderá con un aumento de la tasa fotosintética. En condiciones mediterráneas la intensidad luminosa no es un problema desde el punto de vista de PAR, sí lo es, en cambio, en cuanto a la radiación calorífica que da lugar a un incremento excesivo de la temperatura del aire en los invernaderos.

* Fotosíntesis y CO_2

La planta absorbe CO_2 bajo la influencia de la luz que, en combinación con el agua celular, es transformado a azúcares. La concentración de $[\text{CO}_2]$ en el aire oscila entre 300-400 vpm, si disminuye, la tasa fotosintética se reduce rápidamente. Los límites de $[\text{CO}_2]$ en el aire, mínimos y máximos varían entre especies y entre estados de desarrollo así como dependen de las intensidades de los otros factores ambientales interrelacionados.

* Fotosíntesis y temperatura del aire

Influye en la velocidad de la reacción fotosintética para producción de azúcares, y en la posterior rotura de los mismos durante el proceso respiratorio. Por ello, el control de la temperatura debe enfocarse a buscar el

nivel óptimo en el cual haya un equilibrio entre la tasa fotosintética y la respiratoria. En la mayoría de las plantas a -5°C la fotosíntesis se detiene, se considera que el intervalo óptimo se encuentra entre 18 y 20°C , temperaturas superiores no implican un incremento de tasa fotosintética, es más, por encima de 35°C , la tasa fotosintética se reduce drásticamente.

El proceso respiratorio está fuertemente ligado a la temperatura, éste se inicia a 5°C , y, entre 5 y 30°C la tasa respiratoria se incrementa fuertemente. Con temperaturas superiores a 40°C la reducción es drástica y puede dañar fuertemente a la planta.

Por tanto, la temperatura condiciona tanto la producción de azúcares en el proceso fotosintético como su reparto hacia el proceso respiratorio o a la división celular.

* Transpiración

El proceso transpiratorio ocurre en los estomas situados en la superficie foliar. La apertura y cierre estomático están influidos por la luz, la concentración de $[\text{CO}_2]$ y el contenido de agua en sus células. La humedad relativa en la cavidad subestomática es del 100% , cuando la humedad relativa en el aire del invernadero es inferior, el vapor de agua “sale” del estoma, está transpirando.

Cuando la transpiración cesa, se detiene la absorción hídrica (absorción pasiva, sin coste energético para la planta) y con ella la de elementos minerales. Esto puede tener un efecto negativo en la calidad de las células producidas y, es por ello, que es necesario mantener el proceso transpiratorio a un nivel mínimo que asegure la absorción.

Desde el punto de vista del control externo de este proceso se puede actuar de dos formas

1) Bajo condiciones de escasa luminosidad y baja temperatura en las que se ve minimizada la actividad fisioló-

gica, interesa aumentar la temperatura del aire ligeramente y ventilar para disminuir la humedad relativa en el entorno de la planta para provocar una aceleración del proceso transpiratorio.

2) Ante situaciones de elevada intensidad luminosa, que daría lugar a una intensificación excesiva de la transpiración, que podría provocar deshidratación, interesa sombrear para limitarla.

En definitiva se trata de evitar el acercamiento a las temperaturas críticas que limiten el crecimiento de la planta.

Pero durante los periodos de mínima transpiración (por la noche) puede haber absorción con coste energético para la planta (absorción activa) obtenida del proceso de respiración en las raíces. Ésta puede provocarse aumentando la temperatura radicular y el aporte de oxígeno

EQUIPOS DE REGULACIÓN DEL CLIMA

* Calefacción

Se distinguen dos sistemas de distribución del calor en los invernaderos:

- por aire forzado o convección
- por agua caliente o radiación.

Los sistemas por aire forzado tienen instalaciones más simples, requieren inversiones menores, pero la calidad del clima que se obtiene es peor que la de los sistemas de agua por tuberías radiantes. Estos sistemas de aire forzado tienen la ventaja importante de conseguir, obtener el nivel de temperatura deseada con mayor rapidez, es decir, el tiempo de respuesta es corto, debido a la turbulencia del aire caliente forzado y al intercambio térmico por convección, pero, por el contrario, cuando la calefacción no funciona, el calor se pierde con rapidez y la temperatura descende, por lo que el nivel de temperatura tiende a oscilar alrededor de la consigna. Asimismo el nivel de pérdidas térmicas por conducción-convección y fugas aumenta debido a la turbulencia del aire.

El aire es calentado en un generador que puede tener cámara de combustión directa o bien intercambiadores de calor, y es impulsado al ambiente del invernadero por un ventilador. Se recomienda emplear generadores con





intercambiadores de calor, pues, en ellos, los gases de la combustión son expulsados al exterior por la chimenea y no se mezclan con el aire que sale caliente y limpio al interior del invernadero. Los gases de la combustión pueden llevar restos de etileno, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, anhídrido sulfuroso y otros residuos que pueden producir efectos negativos en las plantas (quemaduras, caída de pétalos, defoliación). Cuando el combustible empleado es gas propano y se desea aprovechar el CO_2 residual para enriquecer la atmósfera del invernadero, es aconsejable tener una garantía de pureza del gas y un buen reglaje del quemador y de la combustión para evitar problemas en las plantas. Este aprovechamiento del CO_2 , subproducto de la combustión del gas, no tiene interés en los lugares en que la necesidad de calefacción es sólo nocturna, pues durante las horas de oscuridad no hay consumo de CO_2 por las plantas, al no tener lugar la fotosíntesis. La acumulación de CO_2 durante la noche, puede llegar a ser un inconveniente que ponga en dificultad la respiración de las plantas,

que por otro lado, resulta estimulada por la calefacción. El desconocimiento de los efectos de estas técnicas puede dar lugar a un mal uso y producir problemas graves al productor. Un inconveniente importante de estos sistemas es la distribución deficiente del aire caliente, que tiende a quedarse cerca del generador y en la zona alta del invernadero, produciendo diferencias grandes de temperatura que afectan al crecimiento del cultivo, a la calidad, precocidad y sanidad del producto.

La distribución del aire caliente en los sistemas de convección mejora considerablemente, conduciéndolo por mangas de polietileno transparente con perforaciones laterales para la salida del aire. Conviene situar estas mangas lo más bajo posible, cerca del suelo, tratando de que no sean un estorbo, por ejemplo entre dos líneas pareadas de plantas, de modo que el calor salga cerca de las partes vegetativas del cultivo y el aire cálido ascienda entre las plantas, por la turbulencia y por su menor densidad, (Martínez y González, 1981). El uso de estas mangas distribuidoras da

como resultado una mayor calidad de clima y un ahorro de combustible que puede llegar al 25%.

Cuando se emplea calefacción, debe prestarse atención al consumo de agua y comprobar la necesidad de riegos nocturnos. El consumo de agua por transpiración del cultivo, cuando es calentado por sistemas de convección es mayor que cuando se usan tuberías radiantes.

Una variante son los aerotermos, en los que el aire forzado por un ventilador se calienta al pasar por un intercambiador de calor de gran superficie, con tubos provistos de aletas, por el que circula agua a 50-60°C procedente de una caldera. Es un sistema muy extendido, que se combina a menudo con los sistemas de radiación.

El otro grupo de equipos de calefacción es el de los sistemas radiantes. En ellos el vehículo del calor es agua calentada en una caldera y distribuida por tuberías metálicas o de plástico. Estos sistemas transmiten el calor por dos vías, por convección calientan el aire en contacto con los tubos, que, con turbulencia suave, va elevando poco a poco su temperatura, y por radiación, calientan directamente las superficies de las plantas y de la cubierta del invernadero, reduciendo los riesgos de condensaciones de agua en las mismas. La distribución del calor es mejor con estos sistemas, su regulación es más precisa, pero las inversiones necesarias en las instalaciones son mayores que en el caso de los sistemas convectivos. El agua se recomienda que se mantenga por encima de 60° en el circuito primario de la caldera, y en el circuito del invernadero (secundario) se regula a la temperatura necesaria según la aplicación que convenga. Entre 50 y 80° son las temperaturas más normales, las más altas en el caso de tuberías metálicas al aire y las más bajas en el de tubos de plástico (polietileno o

polipropileno) y tubos aplicados al sustrato.

Los sistemas radiantes tienen el inconveniente de la lentitud de calentamiento, pero esto se puede resolver derivando una parte del agua caliente a un circuito de aerotermos que elevarán rápidamente el nivel de la temperatura a un primer escalón, que garantice la seguridad del cultivo.

* Calefacción de las raíces

La aplicación de calor al medio en el que viven las raíces, suelo o sustrato, se hace normalmente por conducción, mediante tubos de plástico enterrados o situados bajo las mesas o los contenedores de cultivo. Se puede calentar el suelo de un invernadero enterrando tubos de polietileno o de polipropileno de 25 mm de diámetro, bajo las líneas de plantas, entre 20 y 30 cm de profundidad, y haciendo circular por ellos agua a una temperatura máxima de 40°C, resultante de la mezcla de agua a mayor temperatura del circuito primario de la caldera, con agua de retorno del circuito secundario, por medio de una válvula de tres vías, regulada por un termostato en la tubería de salida al circuito del suelo. Se pueden alcanzar temperaturas radiculares óptimas con la instalación de dos metros lineales de tubo de polietileno de 25 mm de diámetro, enterrado por m² de suelo. Con una manga de polietileno de 250 micras, situada sobre el suelo, al pie de las plantas, se consigue simultáneamente temperaturas óptimas en el suelo y mínimas de 9 a 13°C en el aire durante el invierno en las comarcas costeras del Mediterráneo (Martínez et al. 1983, 1985). Pero lo que se está extendiendo más es el calentamiento del sustrato en los casos del cultivo sin suelo.

En estos casos la eficacia es muy alta debido a la facilidad de regular la temperatura óptima en un volumen muy reducido de sustrato, gracias a lo cual se puede garantizar el funciona-

miento de la fisiología y las funciones de las raíces, en las mejores condiciones posibles para el suministro del agua y los nutrientes a la planta.

En los cultivos hidropónicos, en sustrato inerte, dentro de sacos de plástico, que es muy frecuente en explotaciones comerciales, se colocan uno o dos tubos de plástico de 25 mm de diámetro bajo cada línea de sacos y sobre placas de poliestireno, que aíslan del suelo los tubos de calefacción. En el caso de situar los tubos dentro del sustrato, en el fondo del contenedor, se debe limitar la temperatura del agua a un máximo de 30° para evitar dañar las raíces. Hay horticultores que colocan los tubos de calefacción sobre el suelo, junto a los sacos lateralmente; de este modo no se consigue un calentamiento tan bueno del sustrato, pero se reparte una cantidad de la energía al aire próximo al cultivo. La regulación y homogeneidad climática en este caso es deficiente, pero los costes de instalación son bajos y el sistema es útil como apoyo térmico. En este caso es recomendable usar tubos anillados en lugar de los tubos lisos, más adecuados cuando van enterrados.

En el caso de mesas con plantas en tiestos y contenedores o bandejas con sustrato para enraizamiento de esquejes y semilleros, se sitúan los tubos calefactores bajo el fondo de la mesa, que puede ser de fibrocemento y sobre él se sitúan los tiestos o las bandejas de plástico, que se rellenan con el sustrato, en el que se colocan los esquejes a enraizar o las semillas.

La decisión de calentar las raíces implica que la temperatura del ambiente aéreo va a ser asimismo regulada, ya que lo contrario produciría un desequilibrio que perjudicaría las posibilidades productivas de las plantas al encontrarse la raíz a su temperatura óptima para desarrollarse y trabajar, pero estar los órganos aéreos parados por sufrir condiciones térmicas limitantes.

* Aireación

La ventilación natural o estática es el modo más simple de controlar el exceso de temperatura de los invernaderos, así como de eliminar el exceso de humedad y evitar que el nivel de concentración de CO² del aire, descienda por debajo del normal. A



mediodía en invernaderos que contienen cultivos desarrollados y en días claros, se han comprobado descensos de la concentración de CO² por debajo del nivel normal (Lorenzo et al. 1990) y esto limita el potencial de rendimiento del cultivo.

En las condiciones del clima mediterráneo, no es suficiente la ventilación estática para evitar excesos de temperatura en las horas de alta radiación solar, particularmente en primavera, verano y parte del otoño, pero hay un conjunto de conocimientos y recomendaciones que son producto de la investigación y que es conveniente tener en cuenta al diseñar, construir y manejar un invernadero. Entre estos es importante citar detalles constructivos, como que la superficie mínima de ventanas debe ser del 15 al 25% de la del suelo, por encima de estos valores el número de renovaciones no aumenta de modo notable, que las ventanas son más eficaces cuando se sitúan en posición perpendicular a la dirección del viento dominante, pero que en el caso de varios bloques de invernaderos paralelos, es más conveniente

construirlos con los pasillos separadores de invernaderos paralelos a la dirección del viento; que una altura mayor del invernadero aumenta el volumen y con ello amortigua las oscilaciones térmicas e higrométricas, al tiempo que hace posible ventanas de mayor superficie de apertura. Se recomienda una altura mínima de 3 metros en los lados.

La eficacia de la ventilación aumenta notablemente cuando el invernadero se dota de ventanas en los lados y en el techo, ya que se producen diferencias de presión que dan lugar a mayor flujo de aire hacia el exterior (Kittas et al., 1997). Ambos, el viento y la temperatura, provocan la diferencia de presión que determina los intercambios de aire, que ocurren en la ventilación del invernadero, aún cuando el factor determinante es la velocidad del viento (Boulard et al., 1996, 1997). Cuando es superior a 2 m/s, la tasa de renovación, que es el número de veces que el volumen de aire del invernadero se renueva cada hora, aumenta mucho con el grado de abertura de las ventanas, pero si en días soleados del invierno son suficientes 20 renovaciones para evacuar el aire recalentado, en verano la ventilación natural es insuficiente, a pesar de que la masa vegetal de un cultivo bien

desarrollado, es capaz de eliminar la mayor parte del mismo a través de consumir del 60 al 70% del exceso térmico en su transpiración, pero el resto no puede ser regulado sólo mediante la ventilación.

La mejor eficacia en condiciones de calma o poco viento, la proporciona la combinación de ventanas laterales con cenitales, con una proporción de superficie de abertura de 2 a 1, con lo cual se obtienen de 50 a 80 renovaciones por hora. Cuando hay viento superior a 4m/s es suficiente disponer de ventanas cenitales.

El riesgo de enfermedades aumenta con humedad ambiente más alta, ventilar es una solución. En experimentos de ventilación nocturna se han comprobado reducciones drásticas de daños por Botrytis en tomate, a costa de reducciones insignificantes del rendimiento total y de cierto retraso en la primera producción (Abreu et al., 1994).

Es más eficaz abrir las ventanas del lado del viento, los intercambios de aire aumentan, por lo que es recomendable tener ventanas en ambos lados del invernadero, con posibilidad de apertura independiente según sea la dirección del viento, o bien disponerlas en el lado del viento dominante.

Cuando, debido al riesgo de infecciones de virus a través de insectos vectores, se hace necesaria la colocación de mallas de protección contra pulgones y mosca blanca o trips en las ventanas, se produce un efecto notable de reducción del número de renovaciones de aire, de la ventilación. Por ejemplo, entre usar una malla antipulgón, de 0,40 x 0,40 mm de cuadro, o una antitrips de 0,17 x 0,17 mm, se ha obtenido una disminución del 43% en la ventana cenital orientada al viento y del 38% en la del lado opuesto, con viento de 3m/s.



* Humidificación y enfriamiento por evaporación

La primera regla a seguir cuando nos enfrentamos a excesos de temperaturas es tratar de mantener una alta tasa de transpiración en las plantas. La superficie foliar de un cultivo desarrollado es un eficiente y potente equipo de climatización. La capacidad de refrigeración de la masa vegetal que llena un invernadero, a través de su transpiración, es un eficaz climatizador en condiciones de alta temperatura, siempre que el cultivo esté bien regado y la ventilación se maneja con acierto (Baille et al., 1995).

Para enfriar los invernaderos en épocas de calor, hay que recurrir a equipos que aprovechan el poder de enfriamiento del aire seco al saturarse de agua, que para evaporarse ha consumido calor del ambiente.

Uno de los sistemas artificiales más eficaces es el panel húmedo por el que se hace pasar aire forzado desde el exterior, que entra seco y al saturarse de humedad mientras atraviesa el panel, baja su temperatura y el aire caliente es expulsado del invernadero por extractores de bajo número de revoluciones. Estos sistemas, que son caros, tanto de instalación, como de uso, por el consumo eléctrico, sólo son eficaces en lugares en que el aire exterior es seco y tiene, por consiguiente, capacidad para saturarse de humedad.

El panel húmedo de los sistemas de "cooling" se puede hacer de celulosa, paja, viruta y otras fibras artificiales, y se humedece por una tubería de microaspersores que rocían el agua saturándolo. Los ventiladores situados en el extremo opuesto del invernadero, impulsan aire interno al exterior, produciendo una depresión que hace entrar aire externo a través del panel húmedo. El cierre del invernadero debe ser totalmente hermético para que este sistema sea eficaz, ya que todo el aire debe entrar únicamente a través del panel.

Otro sistema distinto, pero basado en el mismo principio es la nebulización fina. Por medio de diversos métodos, según el tipo de sistema empleado, se proyecta agua al interior del invernadero, en forma de finas gotas, de 2 a 100 micras de diámetro, según la instalación, que son emitidas por boquillas repartidas por el invernadero, generalmente en la parte alta, sobre las plantas; estas gotas tan pequeñas se evaporan de inmediato, sin llegar a caer y como resultado de este cambio de fase producen un enfriamiento del aire, al mismo tiempo que se reduce el déficit de saturación de vapor de agua. Hay en el mercado distintos tipos de instalaciones de nebulización, que difieren en el modo de fraccionar la gota de agua, trabajando a alta o baja presión, con tipos de boquillas distintos, incorporando o no aire comprimido, etc. Según los sistemas, la limpieza y pureza del agua adquiere más importancia o menos, pero en todos los casos se requiere un buen filtrado de 100 a 50 micras y un filtrado fino posterior de 5 a 0,5 micras, así como ausencia de sales que puedan formar depósitos sobre las plantas. Algunas aguas requerirán tratamiento para eliminar estas sustancias (bajar el pH si contiene bicarbonatos o desminerali-

zación) y a pesar de todas estas precauciones, es necesario hacer una limpieza general de boquillas después de cada temporada de uso, sumergiéndolas en medio ligeramente ácido o bien en un limpiador por ultrasonidos. Las boquillas más difundidas proyectan el chorro de agua a presión de unos 70 kg/cm², a través de un orificio hecho con rayo láser, sobre una aguja centrada a la salida, sobre la que se estrella el agua y se fracciona en gotas muy pequeñas.

Cuando se usa nebulización debe optimizarse su efecto refrigerante, combinándola con la ventilación. Es decir, a partir de un exceso de temperatura y un déficit de saturación o grado de sequedad del aire, que el poder transpirante del cultivo y la ventilación natural no pueden resolver, el sistema de control climático debe accionar la nebulización y cerrar las ventanas, pero no totalmente, sino que debe quedar un grado de abertura, mayor o menor, según la velocidad del viento, que haga posible la entrada de aire exterior con renovada capacidad de saturación de vapor de agua. Hay varios modelos que tratan de optimizar estas operaciones.

* Sombreo

El uso de mallas de sombreado fijas, está relativamente difundido en los

Cuadro 2 Temperaturas máximas (°C) en tres días de julio con diversos tipos y colocaciones de mallas de sombreado en invernadero cubierto con lámina de polietileno. (Martínez y Bimbo, 1992).

TIPO DE CUBIERTA	VENTANAS		
	ABIERTAS	ABIERTAS	CERRADAS
mallla negra exterior	38,7	40,0	52,3
mallla negra interior	47,2	47,7	65,1
mallla blanca exterior	42,2	42,8	56,3
mallla blanca interior	48,0	47,0	64,2
encalado	42,0	42,2	57,6
invernadero sin malla	44,5	43,1	58,5
aire libre	32,6	32,4	29,3

invernaderos, durante la época de máxima radiación solar del año. Lo más frecuente es verlas colocadas en el interior del invernadero, sombreando el suelo y el cultivo. Las más empleadas son las negras y las blancas, de diversas densidades de tejido y distintos materiales, polietileno, polipropileno, poliéster, metacrilato, materiales aluminizados, etc., aún cuando el más frecuente es el polietileno combinado con el polipropileno.

La eficacia de estas mallas internas como amortiguadores de las temperaturas y los déficits de saturación excesivos, es escasa. En primer lugar, al colocar la malla dentro del invernadero, no se corta la entrada de energía solar en el mismo, con lo cual el único efecto claro que se consigue es reducir la tasa de fotosíntesis, por disminución de la luz, lo que lleva consigo, consecuentemente, una reducción pareja de productividad del cultivo. Además esta malla al interceptar la radiación del sol, absorbe una parte de ella, calentándose, especialmente si es de color negro, y se convierte en un nuevo radiador de calor al ambiente, lo que agrava la situación de exceso térmico (Cuadro 2). A esto se añade la resistencia que la malla opone a la renovación de aire por las ventanas, ya que es un obstáculo para el flujo libre del aire que sale y que entra en el invernadero.

El rendimiento de las mallas de sombreo mejora mucho si, en lugar de colocarlas en el interior, se colocan en el exterior del invernadero, sobre la cubierta, pues así impiden realmente la entrada de una parte de la radiación solar (Cuadro 2). El resultado aún mejora más si forman parte de su composición materiales reflectantes, como son las láminas aluminizadas, que intercaladas entre bandas translúcidas, en proporciones diversas, según las aplicaciones y lugares, reflejan una parte de la radiación incidente y se calientan menos. Lo ideal es añadir a

todo esto la posibilidad de plegar y desplegar la malla automáticamente, en función del nivel de luz que llega a las plantas, con lo que se puede optimizar su uso, pero esto es considerablemente más caro y en algunos tipos de invernaderos es difícil de instalar. Cuando se piensa hacer uso de mallas a colocar en el exterior, es conveniente completar la estructura del invernadero con perfiles en U o en omega en

vista del control de los equipos, la calidad del producto, la seguridad y la gestión integral del invernadero. La aplicación de las tecnologías actuales (Buses de Campo, Internet, etc.) junto con las adecuadas estrategias de control permite llevar a cabo la automatización con éxito, solventando los problemas típicos que presenta, tales como:

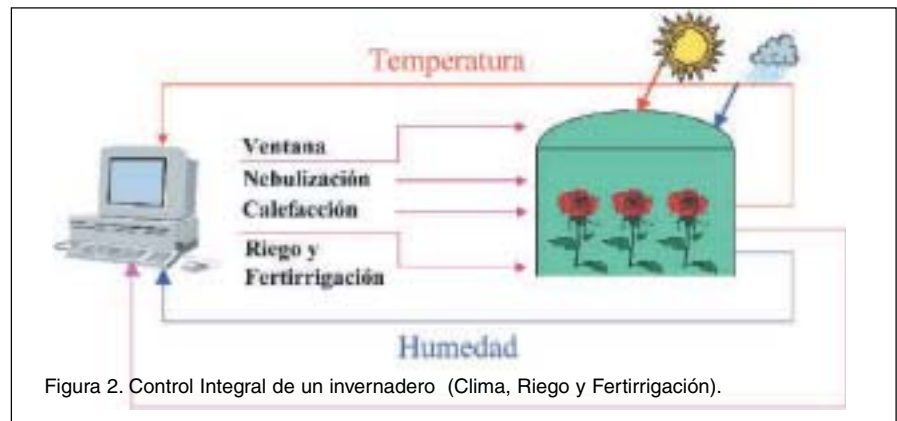


Figura 2. Control Integral de un invernadero (Clima, Riego y Fertirrigación).

las líneas de cumbre y laterales en alto y en bajo, en los cuales se puede colocar y tensar fácilmente la malla, sujetándola con un perfil de plástico flexible que la aprisione en la estructura. Una mejora notable es elevar la malla sobre la cubierta del invernadero, con una estructura suplementaria, dejando un hueco por el que circula el aire, pero esto tiene dos inconvenientes, es caro y hace la estructura y la malla más frágiles a las acciones mecánicas del viento

SISTEMAS INTEGRADOS DE CONTROL

* Soluciones a la automatización de un invernadero.

La competitividad de la horticultura española depende de su capacidad de aprovechar los adelantos científicos y tecnológicos. Así pues, la automatización de un invernadero se presenta como una alternativa que ofrece numerosas ventajas desde el punto de

1) Bucles de control independientes.

Tradicionalmente, se han utilizado equipos de control específicos (calefacción, ventilación, nebulización, etc.) para controlar cada variable física del invernadero (temperatura, humedad, etc.). Pero es destacable que cada equipo por separado no afecta sólo al comportamiento de una variable, sino también a las demás. Por ejemplo, la nebulización afecta tanto a la temperatura como a la humedad en el interior del invernadero. Partiendo de este hecho, parece lógico que las decisiones que se tomen para activar cada uno de los equipos no estén basadas en el estado de una única variable, sino que se tenga en cuenta el comportamiento global del invernadero, permitiendo un control integral del mismo, donde, en función de todas las variables climáticas se decide la mejor acción de control sobre cada equipo para llegar al compromiso de controlar cada una de ellas. La figura 2 muestra el esquema de un sistema de control integral.

2) Excesivo cableado. Largas distancias.

La automatización de un invernadero conlleva la conexión de los sensores y actuadores del mismo a un sistema de control (figura 3), lo cual requiere un cableado excesivo debido a la gran cantidad de sensores y actuadores que se suelen utilizar (sondas de temperatura y de humedad, radiómetros, anemómetro, contadores de caudal, manómetros, medidores de conductividad de la solución ferti-

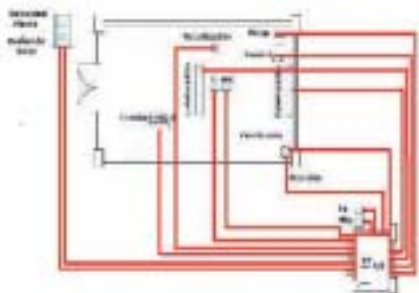


Figura 3. Cableado tradicional, de sensores y actuadores

zante, humidificadores, calefacción, automatismos del riego, etc.). Si además el sistema de control se encuentra alejado de la ubicación del sistema de control o el invernadero es grande, las distancias aumentan agravando problemas como el incremento de la sensibilidad a interferencias electromagnéticas, degradación de las señales eléctricas, mayor coste de mantenimiento de las líneas, etc.

Este problema se puede solucionar mediante el uso de la tecnología de buses de campo (Bus de Campo, 2000), que consiste en el uso de una única línea de transmisión de datos que se encarga de conectar todos los sensores y actuadores con el sistema de control (figura 4), reduciendo así el cableado y permitiendo, de manera sencilla, la inclusión de nuevos sensores y actuadores en el sistema, cuando fuera necesario, sin necesidad de implantar nuevo cableado. Se ha optado en esta aplicación por el bus de campo Profibus (Profibus, 1999),

(Profibus, 2000) por tratarse de un bus estándar industrial y de uso muy extendido en el ámbito europeo. No obstante, se podría haber optado por otros estándares, igualmente accesibles pero menos extendidos en el ámbito antes mencionado.

3) Carencia de Interfaz Gráfico para el Usuario.

En el control de invernaderos no ha sido muy habitual ofrecer un interfaz gráfico para el usuario, en este caso el horticultor, que permita la fácil comunicación con el mismo. Esta carencia se puede solventar actualmente gracias a la tecnología informática que permite, además de controlar el invernadero, proporcionar al horticultor información en formato gráfico sobre las condiciones de sus invernaderos: temperaturas del aire y sustrato, humedad, radiación solar, velocidad del viento, etc., e incluso gestionar las alarmas.

4) Carencia de Conexión Exterior.

Un invernadero ha sido tradicionalmente una instalación aislada, donde cualquier cambio en los parámetros de los sistemas o equipamientos asociados para el control de los mismos, necesariamente pasaba por acudir a pie de invernadero para realizar dichas modificaciones. El avance en las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC), en particular con la introducción de *Internet* a todos los niveles, puede ser aprovechado en este ámbito agronómico para ofrecer al horticultor la posibilidad de visualizar las variables, modificar los parámetros de control y en definitiva interactuar con el invernadero a todos los niveles, sin necesidad de una actividad presencial, y por tanto resolviendo los problemas desde cualquier ordenador conectado a la red *Internet*, por lejano que este se

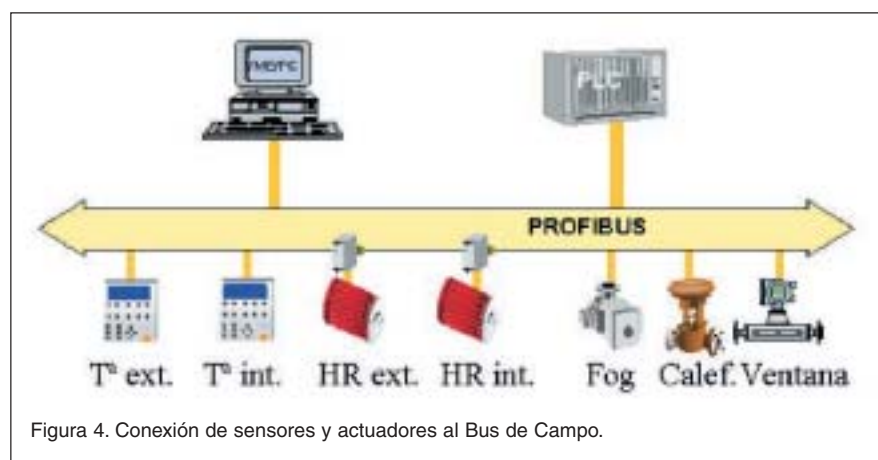


Figura 4. Conexión de sensores y actuadores al Bus de Campo.



Figura 5. Estructura del sistema de control basado en buses de campo y conexión remota desde Internet.

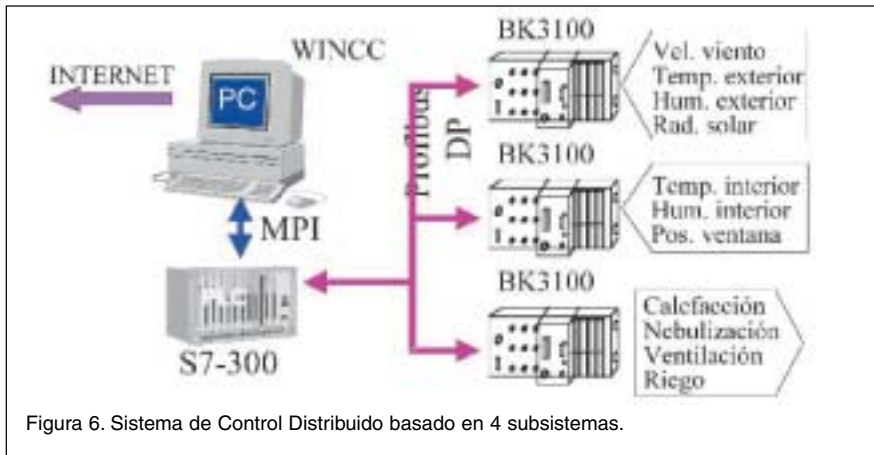


Figura 6. Sistema de Control Distribuido basado en 4 subsistemas.

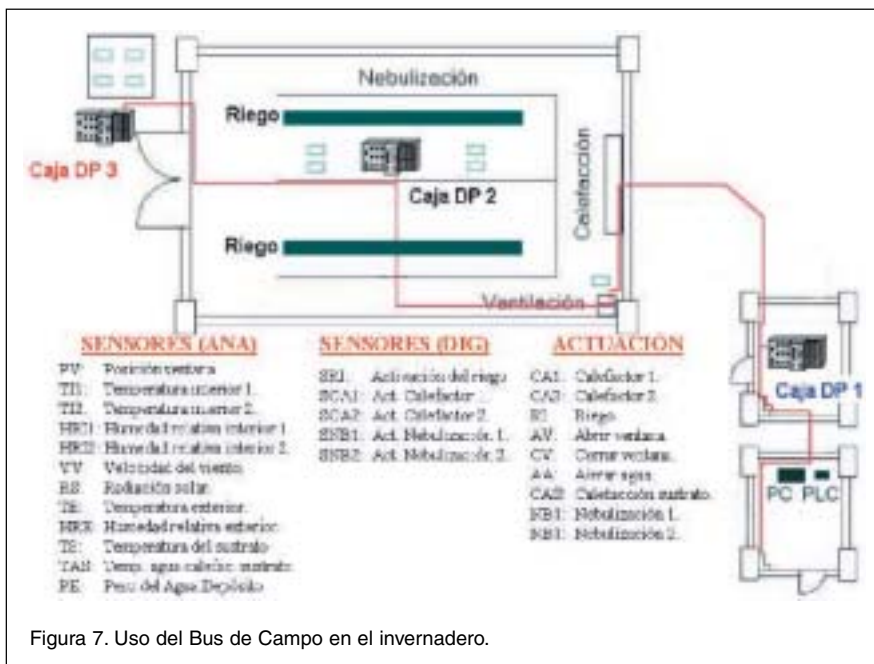


Figura 7. Uso del Bus de Campo en el invernadero.

encuentre. Son indudables las ventajas que este tipo de tecnología puede aportar en el ámbito agronómico.

✱ Aplicación en un invernadero real.

Se ha llevado a cabo con éxito la automatización y control integral de un invernadero ubicado en el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), adoptándose la solución tecnológica mostrada en la figura 5. Por una parte se dispone del sistema a controlar, un invernadero hidropónico, cuyos sensores y actuadores son conectados mediante el Bus de Campo PROFIBUS al sistema de control, que

en este caso se trata de un Automata Programable (PLC). El PLC se encarga de activar los equipos de actuación de modo que se consigan las especificaciones requeridas por el horticultor. La conexión del PLC con un ordenador personal (PC) brinda la potencia gráfica para desarrollar un interfaz gráfico de usuario, que permita conocer el estado del invernadero, mostrando gráficas acerca de la evolución de las variables a lo largo del tiempo, almacenar la información en bases de datos para su posterior tratamiento, gestionar las alarmas provocadas ante situaciones no deseadas, etc.

La conexión sencilla del ordenador a Internet permite explotar este medio de comunicación para ofrecer al horticultor información del invernadero, donde y cuando quiera, a través de cualquier ordenador, lo cual implica mayor flexibilidad y menos costes, ya que el horticultor podría supervisar el estado del invernadero, por ejemplo desde su casa un fin de semana, sin necesidad de trasladarse al invernadero, proporcionando además mayor seguridad al recibir posibles avisos de las alarmas que puedan ocurrir. Así, la explotación de Internet gestionaría las alarmas de un modo más eficiente al permitir, por ejemplo, enviar mensajes de texto a teléfonos móviles, correos electrónicos, etc., ante cualquier anomalía que se pudiera producir.

1) Estructura de Control Distribuido.

El sistema de control distribuido implantado en el invernadero está constituido por 4 subsistemas (figura 6):

- ✱ El bus de campo (PROFIBUS), es la plataforma física de comunicación entre el autómata programable (PLC) y la periferia descentralizada (DP).

- ✱ La periferia descentralizada, se encarga de tomar la información de los sensores (de temperatura, humedad relativa, etc.), digitalizarla y mandarla por la red PROFIBUS al PLC. Por otra parte recoge las órdenes de éste y las ejecuta sobre los sistema de actuación (ventana, nebulización, calefacción, etc.).

- ✱ El PLC actúa como unidad de control. A partir de la información de todos los sensores y de la lógica de control, determina las actuaciones a realizar.

- ✱ El ordenador personal (PC) utiliza el interfaz gráfico de usuario (HMI), trasladando la información del PLC al usuario y viceversa, además de realizar las funciones de servidor de Internet.

Como se ha explicado anteriormente, el uso de los Buses de Campo per-



Figura 8. Interfaz de Usuario.

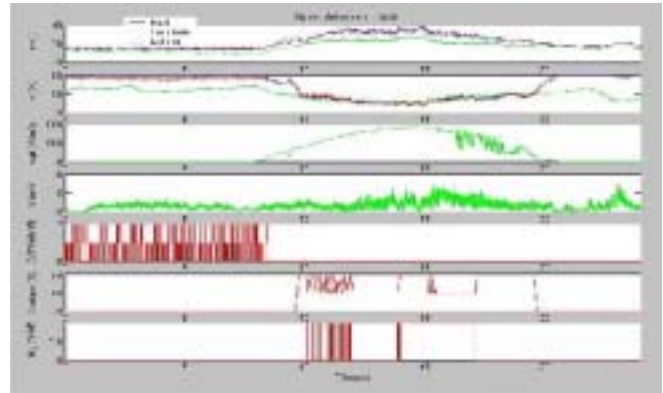


Figura 9. Modelos climáticos.

mite reducir el cableado considerablemente, y con ello sus problemas asociados. La implantación del Bus de Campo en el invernadero se muestra en la figura 7, donde se observa el uso de un único cable a pesar de la gran cantidad de sensores y actuadores de que se dispone.

2) Aplicación de Control del invernadero desarrollada.

El PC ejecuta las tareas del interfaz de usuario (supervisión, establecimiento de consignas, alarmas, configuración, etc.), además del registro de la evolución de las variables en una base de datos accesible a través de *Open DataBase Connectivity* (ODBC). En la figura 8 se muestra el aspecto del interfaz de usuario que se ofrece al operador:

En él se distinguen varias partes relacionadas con los diferentes lazos o bucles de control establecidos. Para todos ellos es posible actuar sobre cualquiera de los subsistemas en modo manual y automático, entendiendo como manual aquél en el que el operario activa los actuadores sin necesidad de que la aplicación de control *software* desarrollada intervenga, y como automático, cuando es dicha aplicación de forma automática la que gestiona el control del subsistema.

Los lazos de control más importantes son:

- ❖ **Humedad:** En este lazo se utilizan higrómetros como sensores y se actúa

mediante un sistema de nebulización ultrafina y ventiladores para mantener la humedad en los valores deseados.

- ❖ **Temperatura:** El lazo difiere entre estaciones del año y entre día y noche. En las estaciones frías o por la noche, para mantener la temperatura en el valor deseado, se hace uso de un sistema de calefacción, y en las estaciones cálidas o durante el día se hace uso del sistema de ventilación, combinado con la nebulización.

- ❖ **Otros lazos no menos importantes** son: riego, regulación de la temperatura del sustrato del cultivo, aireación del agua de riego, etc.

Para llevar a cabo estrategias de control complejas se requiere disponer de modelos climáticos del invernadero. En ese sentido se dispone de modelos ajustados y validados con información

real del invernadero. La figura 9 compara la evolución de la temperatura y la humedad del invernadero con la del modelo, para un intervalo de tiempo correspondiente a un día, observándose la bondad del ajuste.

Por otra parte, la aplicación almacena toda la información de las variables, permitiendo la generación de ficheros históricos que se han organizado por ventanas temáticas de datos, tal y como muestra la figura 10.

Visualización de los datos históricos en 2 ventanas de datos temáticos.

Además se han instalado dos cámaras Web en el invernadero, una en su interior y otra en el exterior, de modo que el horticultor puede ver el estado del invernadero en tiempo real, a través de las mismas.



Figura 10. Interfaz de usuario.



Figura 11. Interfaz de usuario mostrada a través de Internet.

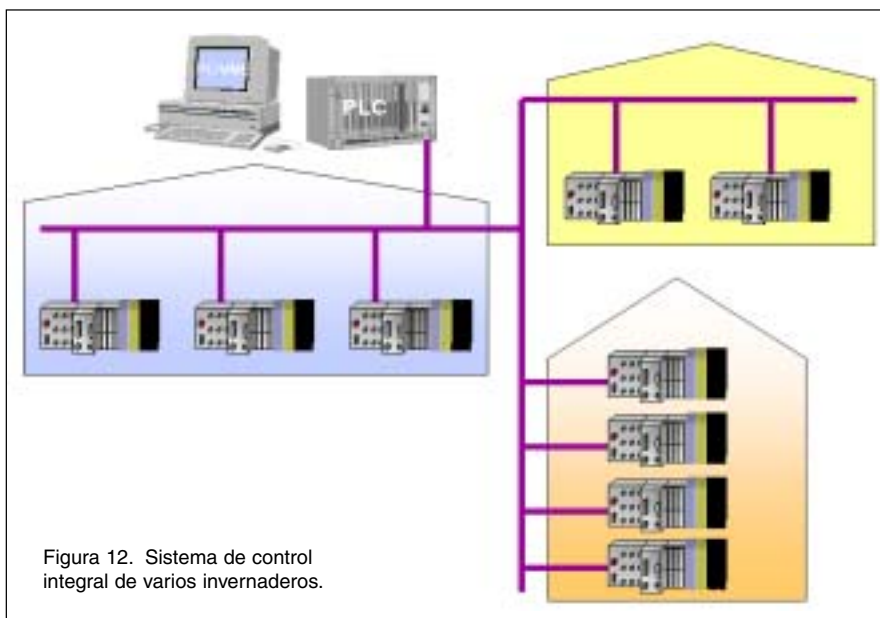


Figura 12. Sistema de control integral de varios invernaderos.

La seguridad es otro aspecto importante a tener en cuenta. Para ello la utilización de un bus de campo industrial estándar y un PLC, dan robustez al sistema haciéndolo poco sensible a los fallos. Además se supervisa el buen funcionamiento del PC (reiniciándolo si falla) por parte del PLC, manteniendo los controles básicos en ausencia del PC. Por otra parte, un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) protege el PC de posibles fallos del suministro eléctrico.

3) Conexión a Internet.

La conexión a Internet se lleva a

cabo mediante un software (llamado VNC) compuesto de dos aplicaciones (una servidora y otra cliente). Instalando la aplicación servidora en el PC a pie de invernadero que incorpora el interfaz gráfico de usuario, se permite que cualquier usuario desde cualquier lugar del mundo pueda acceder a la aplicación de control y supervisar y teleoperar el invernadero de forma remota, simplemente con instalar la aplicación de usuario en su PC y suministrando la clave de acceso adecuada.

Una vez establecida la conexión a través de Internet, se tiene acceso al mismo interfaz de usuario que el

mostrado anteriormente (aplicación de control, gráficas, cámaras). Así pues si se desea observar el estado real del invernadero en tiempo real a través de las cámaras desde un ordenador ubicado en cualquier lugar del mundo, el aspecto del interfaz sería el mostrado en la figura 11:

*Reconfiguración y crecimiento de la instalación.

Una de las ventajas relacionadas con el uso de Buses de Campo y la consideración de un sistema descentralizado de control, radica en la sencillez con la que se pueden reconfigurar y añadir nuevos dispositivos (sensores y actuadores) al sistema, sin necesidad de cableado adicional. Esta filosofía se puede extrapolar al caso de ampliación a nuevos invernaderos o de otros procesos. La inversión por invernadero o proceso, resulta más pequeña a medida que aumenta el número de ellos. La figura 12 muestra un esquema representativo de la conexión de tres sistemas.

También se podrían utilizar redes inalámbricas para Ethernet (comunicación vía radio, Ethernet sin cables) utilizando antenas, lo cual flexibiliza todavía más la aplicación al permitir conectar múltiples invernaderos o procesos, distanciados entre sí, sin necesidad de utilizar cableado. Internet vía "radio enlace" cumple con las normas IEEE 802.11b y la norma industrial Wireless Fidelity (WiFi) garantizando una total interoperabilidad entre distintos fabricantes. Se trata de una red de gran velocidad (11Mbps) que utiliza canales en la banda de 2.4 GHz (regulado sin licencia). Con el uso de antenas direccionales se pueden establecer enlaces punto-a-punto a grandes distancias, permitiendo, por ejemplo, el control integral de diferentes invernaderos dentro del mismo sistema.

GLOSARIO

Actuador: Dispositivo que adapta la señal del controlador para poder aplicarla al proceso.

Algoritmo: Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución a un problema.

Autómata programable: Dispositivo o conjunto de reglas que realizan un encadenamiento automático y continuo de operaciones.

Bus de campo: Red de comunicación específica para la conexión de sensores y actuadores en el ámbito industrial.

Control distribuido: Estrategia de control que hace uso de dos o más unidades de control independientes conectadas entre sí, para poder alcanzar un objetivo común. Estrategia contraria al control centralizado donde una única unidad de control intenta cumplir dicho objetivo.

Digitalización: Expresión de una información en dígitos, para su tratamiento informático.

Ethernet: Es la red de área local más extendida en la actualidad. Fue diseñado originalmente por Digital, Intel y Xerox por lo cual, la especificación original se conoce como Ethernet DIX. Posteriormente en 1.983, fue formalizada por el IEEE como el estándar Ethernet 802.3

Interfaz de usuario: Representación gráfica que permite mostrar al operador el estado actual de una planta o sistema e interactuar sobre ella.

Modelo: Conjunto de ecuaciones matemáticas que caracteriza el comportamiento de un sistema.

Normas IEEE: Conjunto de normas del Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos.

Norma Wireless Fidelity (WiFi): Norma IEEE 802.11 específica para redes de comunicación inalámbricas.

Open data base connectivity: Protocolo (abierto) de comunicación específico para base de datos.

Sensor: Dispositivo formado por células sensibles que detecta variaciones en una magnitud física y las convierte en señales útiles para un sistema de medida o control.

Sistema de alimentación ininterrumpida: Dispositivo electrónico que se encarga de suministrar corriente eléctrica a otro dispositivo, en ausencia de suministro eléctrico.

Software: Término genérico que se aplica a los componentes no físicos de un sistema informático, como p. ej. los programas, sistemas operativos, etc., que permiten a este ejecutar sus tareas.

BIBLIOGRAFÍA

Abreu P.E., Meneses J.F., Monteiro A.A. 1994. Response of non heated plastic covered greenhouse tomatoes during the cold season under two different ventilation methods. *Acta Hort.* 366: 195-200.

Baille M., Baille A., Delmond D. 1995. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agr. For. Met.*, 71:83-97.

Boulard T., Meneses J.F., Mermier M., Papadakis G. 1996. The mechanism involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agr. For. Met.*, 79:61-77.

Boulard T. Feuilloley P., Kittas C. 1997. Natural ventilation performance of six greenhouse and tunnel types. *J. Agr. Eng. Res.* 67:249-266

Bus de Campo 2000. Informe sobre buses de campo. <http://fieldbus.isa.org>.

Grange R.I., Hand D.W. 1987. A review of the effects of atmospheric humidity on the growth of horticultural crops. *J. Hort. Sci.* 62(2): 125-134.

Kamp P.G.H., Timmerman G.J. 1996. Computerized environmental

control in greenhouses 271 pp. IPC-Plant, Ede, The Netherlands

Kittas C., Boulard T., Papadakis G., Mermier M. 1997. Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings. Sensitivity to temperature and wind effects. *Trans. ASAE*, 40:415-425.

Krug H. 1997. Environmental influences on development, growth and yield, en "The physiology of vegetable crops" pp 101-180 Ed. H.C. Wien. CAB International, UK

Lorenzo P., Maroto C., Castilla N. 1990. CO₂ in plastic greenhouse in Almería. *Acta Hort.* 268: 165-169.

Martínez P.F. 1994. The influence of environmental conditions of mild winter climate on the physiological behaviour of protected crops. *Acta Hort.*, 357:

Martínez P.F. y González A. 1981. Improvement of the thermal environment of the propagation house and its effect on the tomato fruit-set. *Acta Hort.*, 115 (1): 301-308.

Martínez P.F., Arenas M., González A. y Aragón R. 1983. Calefacción

de invernaderos a baja temperatura por energía geotérmica. *Actas de Horticultura*, Volumen 2: 863-873.

Martínez P.F., Arenas M., González A., Aragón R., y García U. 1985. Technical application of geothermal energy for heating plastic greenhouses in Spain. FAO. Roma. FAO/CNRE Bulletin n. 6. 25-30.

Martínez, P.F., Bimbo, B. 1992. Materiales plásticos para cubierta de invernadero. Datos para la selección y efectos sobre los cultivos. *Horticultura* 79: 13-31.

PROFIBUS 1999. PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. Profibus Technical Description.

PROFIBUS 2000. Informe sobre estándar PROFIBUS. <http://www.profibus.org>.

Stanghellini C., van Meurs W. Th. M. 1992. Environmental control of greenhouse crop transpiration. *J. Agric. Engng. Res.* 51: 297-311.

Tesi R. 1972. Moderne tecniche di protezione in horticultura floricultura e frutticoltura.

Edagricole, Italia.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto FEDER IFD97-0974-C02-01