

MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS. UNA VISIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA APLICADA A INVERNADEROS¹

M. Martínez, X. Blasco, J. M. Herrero, C. Ramos, J. Sanchis

*Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera 14, 46022 - Valencia, España
e-mail: mmiranzo@isa.upv.es*

Resumen: La mejora de la producción en un invernadero está demandando, cada vez más, el empleo de la monitorización y control de los procesos que lo componen. En este artículo se pretende clarificar, inicialmente, la problemática que presentan este tipo de procesos. A continuación, se discuten las soluciones tecnológicas que la empresa adopta y de forma complementaria se describen soluciones en el ámbito de la investigación científica. Tras ello, se presentará la aplicación de un 'caso particular', correspondiente a la propuesta que el grupo de investigación, al que pertenecen los autores de este artículo, lleva desarrollando durante los últimos años. *Copyright © 2005 CEA-IFAC.*

Keywords: Control de Invernaderos, Monitorización, Modelado, Optimización, Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Control Predictivo Basado en Modelos, Algoritmos Genéticos.

1. INTRODUCCIÓN

El progreso en el campo del cultivo bajo invernadero se ha venido desarrollando en los últimos tiempos en dos ámbitos bien diferenciados:

- En el ámbito tecnológico, han sido las empresas las que con sus nuevos productos de integración de todos los dispositivos presentes en la planta (sensores, actuadores, microcontroladores, PLCs, etc.) en redes informáticas han conseguido reducir el cableado, mejorar la fiabilidad del sistema y facilitar su reconfiguración. También se han abierto nuevas posibilidades a través de Internet para poder realizar a distancia, desde cualquier lugar del

mundo, lo que hasta hace poco tiempo sólo era posible a pie de invernadero.

- En el ámbito científico, las nuevas metodologías de modelado abren, en el campo concreto de la agricultura bajo invernadero y dentro de ésta la del cultivo hidropónico o sin suelo, nuevas perspectivas que permitirán predecir los consumos hídricos y de fertilizantes de las plantas y de esa forma será posible planificar adecuada y coordinadamente las estrategias de control climático, de riego y fertirrigación que se prevean.

Si, tal y como se ha comentado, en el campo tecnológico han sido las empresas de instalación de invernaderos las que han asumido como imprescindible la incorporación de paquetes informáticos que resuelven el problema de la monitorización y el control básico de invernaderos, con otras mejoras sustanciales que aportan las tecnologías de la información y las comunicaciones, las univer-

¹ Financiado parcialmente por los proyectos de investigación del MEC del Gobierno Español FEDER AGL2002-04108-C02-01 y FEDER DPI2004-8383-C03-02.

sidades e institutos de investigación, con visiones normalmente multidisciplinarias, son las que trabajan en las propuestas científicas basadas en el modelado de los procesos bajo invernadero y en la elaboración de algoritmos avanzados de control que resuelvan los problemas inherentes a un proceso dificultoso, dada la naturaleza multivariable y su alta no linealidad. Sin embargo, ambos mundos, como en otros casos, siguen todavía muy alejados.

Así pues, la sección 2 de este artículo se centra en la discusión sobre la problemática presente en este tipo de procesos, desde un punto de vista agronómico y de control. En la sección 3 se presenta el enfoque que adoptan las empresas para la resolución del problema en cuestión y se realiza una selección de los productos tecnológicos del mercado que abordan el control de invernaderos, además se hace una descripción de los aspectos tecnológicos más destacados con el fin de establecer un catálogo de sugerencias que debería incorporar un producto comercial 'tipo'. En la sección 4 se presentan algunas de las líneas de investigación que sobre control de invernaderos se han venido siguiendo en los últimos tiempos tratando de poner el énfasis en conceptos más de control que agronómicos. En las secciones 5 y 6 se presenta lo que se ha denominado 'caso práctico', que da una visión teórico-práctica particular de la solución del problema de monitorización y control de invernaderos llevada a cabo por el grupo de investigación al que pertenecen los autores de este artículo. Por último, la sección 7 se dedica a establecer las conclusiones y dar una visión sobre las líneas abiertas de investigación en este ámbito.

2. PROBLEMÁTICA DE LA MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE INVERNADEROS

Tradicionalmente, el cultivo bajo invernadero se llevaba a cabo por personal que, a pie de invernadero, manejaba sistemas manuales de actuación o como mucho semiautomáticos. En invernaderos de mayor grado de tecnificación se usaban sistemas de control del tipo ON/OFF, PI y/o PID en bucles independientes. Generalmente, el sintonizado era manual mediante procedimientos de prueba y error y sin hacer uso de modelos matemáticos, lo que evidentemente no conducía a unas prestaciones óptimas. En los últimos tiempos empiezan a desarrollarse y aplicarse sistemas con estrategias de control más sofisticadas gracias al empleo de técnicas de modelado e identificación, todo ello apoyado en las nuevas tecnologías de la producción, de la información y las comunicaciones (Young *et al.*, 1993; Nielsen y Madsen, 1996).

La problemática del control de invernaderos es fuertemente dependiente de las áreas geográficas,

las soluciones que son válidas en unas regiones deben adaptarse o cambiar para adecuarse a otras. En particular, en los países Mediterráneos, los altos índices de radiación y la elevada temperatura y humedad en la época estival constituyen un factor diferenciador respecto a otras regiones del Norte de Europa. Hasta ahora, una gran parte de los controladores diseñados para invernaderos se asocian a una única variable de control, la temperatura, dando lugar a controladores monovariables. Bajo las citadas condiciones estivales en regiones mediterráneas, ese control resulta del todo insuficiente y debe ser complementado con el control de la humedad (Baille *et al.*, 1994), exigiendo que los controladores sean multivariables. Si se identifica de forma conjunta al control de estos aspectos (humedad y temperatura) como 'control climático' y desde el punto de vista del ingeniero de control, este bucle multivariable se puede controlar a través de actuadores como ventanas, nebulizadores, mallas de sombreado, etc., sin olvidar el sistemas de calefacción.

No obstante, el control de un invernadero va más allá del control climático y pueden incorporarse nuevas variables al bucle multivariable a controlar que influyen directamente sobre el crecimiento del cultivo, en particular la radiación fotosintéticamente activa (PAR), que es la radiación que llega directamente a la planta o la riqueza de CO_2 . Nuevas variables a controlar implican actuadores adicionales, en particular sistemas productores de CO_2 . Aunque estos últimos sistemas se extienden cada vez más, están limitados por su precio (Rodríguez y Berenguel, 2004).

En un invernadero, el control climático se complementa con el control del riego y la fertilización. No obstante, de nuevo se puede dar un enfoque multivariable y hablar de control de la fertirrigación. Respecto al control del riego, la variable que se debe controlar es la evapotranspiración compensando, a través de la variable manipulada del riego, la pérdida de humedad que se produce. Evidentemente esta pérdida de humedad está íntimamente relacionada con los factores climáticos de humedad y temperatura. Respecto al control de la fertirrigación, lo más habitual es asociarlo al control de variables como el pH y la conductividad eléctrica a nivel de las raíces del cultivo, que deben tener unos valores prefijados para asegurar una buena asimilación de los fertilizantes (Martínez *et al.*, 2002).

Siguiendo con aspectos de modelado, el proceso multivariable así definido es además de naturaleza no lineal e influyen en él procesos biológicos que complican de una manera notable el desarrollo de un modelo matemático. Ante un problema de esta envergadura surgen varias alternativas. Una de ellas es tratar el proceso como una caja negra sin

utilizar información *a priori* y ajustar un modelo tipo red neuronal (Seginer *et al.*, 1994; Linker *et al.*, 1998) o conjunto borroso (Ehrlich *et al.*, 1996). Un importante inconveniente, si se utiliza este tipo de técnicas, es precisamente la falta de relación física entre los parámetros del modelo y las magnitudes fundamentales del cultivo que los convierte en modelos poco entendibles. Otra alternativa consiste en modelar los fenómenos físicos y fisiológicos bien conocidos que se producen en un invernadero a partir de la formulación de ecuaciones de primeros principios basados en balances de masa y energía (Boulard y Baille, 1993; Boulard *et al.*, 1996). En este caso los parámetros del modelo sí tienen un significado físico, pero el problema aparece cuando se intentan ajustar muchos de esos parámetros, lo cual resulta enormemente dificultoso y provoca una importante discrepancia entre el modelo y el proceso.

La obtención de modelos fiables implica, por una parte, disponer de ecuaciones basadas en primeros principios lo suficientemente representativas de los procesos que se llevan a cabo bajo invernaderos y por otra disponer de alguna técnica que permita ajustar los parámetros para reducir al máximo las discrepancias entre los datos reales procedentes de los procesos bajo invernadero y los que se obtendrían de los modelos propuestos. El empleo de un optimizador a través de la minimización de un índice multivariable que minimice las discrepancias antes mencionadas es una forma adecuada de resolver el problema. Los optimizadores heurísticos como los Algoritmos Genéticos (AGs) presentan indudables ventajas para este cometido debido a las propiedades que tienen para resolver problemas de optimización global (Goldberg, 1989).

Con un adecuado modelo es posible disponer de información muy relevante de cara al control del proceso, en particular usando estrategias basadas en modelos de predicción. No obstante, estas estrategias requieren la formulación de un índice que, en ocasiones, puede ser bastante complejo, tal y como sucede en este caso, donde el problema planteado viene determinado por la presencia de un modelo no lineal y por la necesidad de estar sujeto a restricciones, debido fundamentalmente a las saturaciones de los actuadores y a las exigencias en las variables controladas. Los AGs pueden, de nuevo, ser la base para la optimización de estos índices (Martínez *et al.*, 1998).

Para abordar el problema del ajuste de un modelo, así como para la posterior incorporación de los algoritmos de control que se diseñen basados en dichos modelos, es necesario disponer de tecnología suficiente que permita desarrollar una adecuada plataforma informática y de comunicaciones que opere con un alto grado de fiabilidad. Siempre es recomendable que dicha plataforma tenga una

estructura abierta y por tanto adaptable a otras configuraciones de invernaderos. También es muy deseable disponer de un entorno informático amigable y que pueda ser manipulado de forma remota, permitiendo no sólo la posibilidad de monitorizar y teleoperar el proceso a distancia, sino también, y esto es aún más importante, la posibilidad de desarrollar la propia aplicación a distancia (Serodio *et al.*, 2000; Morais y Boaventura, 2000).

3. PRODUCTOS TECNOLÓGICOS DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE INVERNADEROS

En el ámbito tecnológico de los productos comerciales para monitorización y control de invernaderos se puede encontrar una variada y en ocasiones heterogénea muestra. No siempre es fácil distinguir las características que poseen los productos, con un lenguaje en ocasiones poco cercano a lo que los ingenieros de control necesitan conocer. Como consecuencia, resulta bastante difícil la comparación entre los mismos. Las especificaciones que cada producto aporta, así como el vocabulario que se emplea en los documentos, en ocasiones, hace difícil la catalogación, por lo que se ha tenido que interpretar y agregar la información.

No obstante, tratando de dar una respuesta a esta cuestión, se han analizado productos de gama alta de un número importante de empresas conocidas por los expertos en agronomía y otras han sido seleccionadas a través de una búsqueda en Internet. De todas ellas se ha realizado una selección por origen geográfico y procurando, además, que presenten el mayor abanico de características técnicas genéricas, descartando aquellas empresas con mucha similitud con otras.

En este sentido, el catálogo de especificaciones propuestas a evaluar es el siguiente:

1. Nodos y Bus de campo.
2. Monitorización.
3. Conexión exterior y gestión remota.
4. Tecnología inalámbrica.
5. Tratamiento de alarmas.
6. Uso de modelos.
7. Control del clima.
8. Control de la fertirrigación.

En el caso de Nodos y Bus de campo se trata de determinar si la instalación dispone de una tecnología más actual basada en redes de tipo industrial. Respecto a la Monitorización se trata de analizar si el producto suministrado puede o no calificarse como un SCADA². Respecto a la conexión remota se trata de analizar si el producto

² Acrónimo de Supervisión, Control y Adquisición de Datos.

realmente permite una adecuada conexión con el mundo exterior y si el nivel de comunicación es flexible. En algunos casos puede empezar a ser relevante el empleo de la tecnología inalámbrica y de ahí su inclusión en este catálogo. Respecto al tratamiento de alarmas y muy conectado con la comunicación exterior, se trata de analizar si el producto dispone de módulos propios para la detección de fallos y tratamiento de alarmas que permitan una rápida actuación. Respecto a los controladores, se trata de conocer cuál es el tipo de control y, si es posible, su nivel de sofisticación y si hay algún detalle que lo identifique con algún algoritmo concreto de control avanzado.

En la tabla 1 se presenta, de una manera resumida, la relación concreta entre productos y especificaciones. Cuando se califica la presencia de la característica con un '–', se debe a que es bastante probable que no disponga de la característica, pero no existe información suficiente para juzgar. Se quiere hacer constar que la tabla 1 no pretende inferir qué producto se considera mejor, dado que se evalúa la documentación analizada y no el funcionamiento del producto.

Con el fin de dar una visión más completa, se detallan en profundidad las características de cada uno de los productos presentados en la tabla 1.

1. **Priva Nutricontrol Ibérica (España)**. Casa matriz Priva (Canadá). El producto más sofisticado que comercializa es un control climático y de la fertirrigación a través de sensores de temperatura, humedad, radiación, pH y conductividad eléctrica, etc. y los actuadores habituales de ventilación, calefacción, pantallas térmicas, etc. No emplea tecnología de buses de campo, sólo conexión vía RS232 y RS485 punto a punto. Tiene módulos de alarmas y un software SCADA específico. También resuelve la conexión por Internet a través de HTML. No hay referencia al uso de tecnología GPRS de mensajes SMS, ni de tecnología inalámbrica.

Web: www.privanutricontrol.com

2. **Box Telematics (Gran Bretaña)**. Disponen de un producto que sí responde a la filosofía de conexión a través de buses y nodos de interconexión, incluso inalámbricos. Monitoriza las variables clásicas de un invernadero, incluido el CO_2 . Incorpora la posibilidad de utilizar conexión exterior a través de radiofrecuencia y un módulo de alarmas a través de SMS.

Web: www.boxtelematics.com

3. **WTC (EEUU)**. Incorpora la sensorización de las variables clásicas en un invernadero. Incorpora bus de campo y nodos. La monitorización puede llevarse a cabo de forma remota vía módem. Envía alarmas con

mensajes a impresoras o buscapersonas, pero no a teléfonos móviles. Incorpora algoritmos complejos de riego basados en déficit de saturación, pero no es posible identificar qué tipo de metodología de control emplea.

Web: www.wtceng.com

4. **Amplia Wireless Communications Software (España)**. Solución que hace uso de las comunicaciones entre máquinas y dispositivos a través de una red inalámbrica. Monitoriza las variables clásicas de un invernadero y controla, a través de lo que denomina agroautomatas, el clima del invernadero. Gestiona alarmas a través de GPRS. No hay información suficiente respecto a modelos y controladores empleados.

Web: www.amplia-soluciones.com

5. **Eldar Shany Agricultural Control (Israel)**. Producto de control climático y fertirrigación con recirculación mediante el control a través de pH y conductividad. Emplea una red de controladores conectados a través de bus con un PC. Se usan extensivamente las tecnologías de radio, teléfono, módem y móvil. Puede intuirse el empleo de modelos y algún tipo de estrategia de control avanzada.

Web: www.eldarshany.com

6. **ACM (España)**. Realizan control climático de invernaderos. No hay demasiada información al respecto de este producto, pero se ha incorporado a la tabla 1 al nombrar específicamente el uso de controladores PID para ventilación y el empleo de modelos.

Web: www.acm-spain.com

7. **Hortimax (Países Bajos)**. Ofrece productos para el control de clima, riego, dosificación de nutrientes y consumo de energía en invernaderos, entre otros. Permite operar de forma remota y recibir notificaciones de alarmas en PDA, usando GSM o WiFi. No hay referencia al uso de buses de campo. Realiza predicciones de las condiciones atmosféricas a 5 días vista, con el fin de estimar los requerimientos energéticos y responder rápidamente a dichas condiciones.

Web: www.hortimax.com

8. **Brinkman (Países Bajos)**. Ofrece una amplísima gama de productos no sólo informáticos y de control. Utiliza una serie de nodos llamados satélite que configuran una red ampliable. Dichos nodos miden y controlan, destacando su preciso sistema de medida de 4 hilos. Permite operar de forma remota mediante PC, sin especificar el sistema. Incorpora control de clima, riego y sustrato.

Web: www.brinkman.com

9. **Volmatic (Dinamarca)**. Ha formado recientemente parte de Senmatic A/S. Su producto ofrece control de clima y fertirrigación. En su arquitectura usa módulos fácilmente

Tabla 1. Estudio comparativo de empresas y productos de acuerdo con el catálogo de especificaciones a evaluar.

Compañía	1. Nodos	2. Monit.	3. C.Ext.	4. C.Inal.	5. Alarmas	6. Modelos	7. C.Clima	8. C.Fert.
Priva	NO	SÍ	SÍ	–	–	SÍ	SÍ	SÍ
Box	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	NO	SÍ	–
WTC	SÍ	SÍ	SÍ	–	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
Amplia	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	–	SÍ	–
Eldar	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
ACM	–	–	–	–	–	SÍ	SÍ	SÍ
Hortimax	–	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
Brinkman	SÍ	SÍ	SÍ	–	–	–	SÍ	SÍ
Volmatic	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	–	SÍ	SÍ

ampliables que se pueden conectar al PC y permite el control remoto mediante teléfono móvil o PC. Genera listados de alarmas y el software presenta un interfaz abierto que permite comunicarse con otros programas.

Web: www.senmatic.com/volmatic

Un dato importante, que no se dispone, es el grado de implantación de estos productos y, en su caso, del uso real de los mismos. Esta información no está accesible en los documentos consultados. No obstante, al menos en el ámbito español, el uso de este tipo de tecnologías está muy limitado a grandes explotaciones y en muchas ocasiones se ha podido constatar su infrautilización al no ponerse en marcha todas las especificaciones del producto. Hay diferentes razones que podrían justificar este hecho, desde las razones culturales y de limitada formación de los técnicos de las explotaciones que deben hacerse cargo de estos sistemas, pasando por las dificultades de sintonía de estos productos cuando pretenden exportar experiencias de otras latitudes y variantes climáticas muy diferentes a las de recepción. En ocasiones dicho ajuste, con personal técnico nativo del país de origen, lo hace inviable por su coste.

Tampoco se dispone del dato sobre el coste económico de una instalación 'tipo' para cada producto, que podría resultar muy interesante de cara a la adquisición por parte del usuario final. No obstante, dada la heterogeneidad de los productos presentados, resulta difícil hacer un estudio comparativo respecto a este aspecto, además de no ser un objetivo de este trabajo comparar dichos costes con los del sistema desarrollado por los autores de este artículo, dado que este sistema sólo es evaluable económicamente en fase de prototipo.

Es por ello, que más allá de las características o especificaciones técnicas que un producto proporciona, debería tenerse en cuenta que su adaptación y mantenimiento pueda llevarse a cabo por personal propio de la instalación receptora o empresa del país de destino del producto, concededor de las

particularidades climáticas de la región donde se implante un nuevo sistema.

Otra fuente de conocimiento de los sistemas desarrollados para la monitorización y el control de invernaderos podría buscarse en las patentes. No obstante, de la documentación examinada de una decena de patentes, teóricamente cercanas al control de invernaderos y suministradas por la oficina de patentes y marcas, se concluye que sólo una de ellas podría considerarse verdaderamente asociada a la temática y la misma no incorpora en su documentación una información técnica contrastable para verificar si alcanza o no las características técnicas que se proponen.

4. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EN CONTROL DE INVERNADEROS

La investigación específica en control de procesos agronómicos tiene hoy un espacio propio, lo que se demuestra por los congresos del ámbito de la automática que incorporan paneles específicos en agricultura³ y las revistas de agricultura que incorporan, cada vez más, artículos con una componente de modelado y control de procesos bajo invernadero.

Si en su origen el ámbito del control de procesos agronómicos y en particular de invernaderos estaba liderado por departamentos de ingeniería agrícola y que tenían como objetivo un adecuado modelado de estos procesos, cada vez más los investigadores especialistas en el campo del control de procesos han encontrado en este tipo de sistemas una fuente de prueba de sus algoritmos. En ocasiones ambas visiones convergen en la formación de equipos multidisciplinares.

Dentro del primer caso, hay importantes grupos de investigación radicados en países donde la producción bajo invernadero está muy extendida y

³ Por ejemplo, un Comité Técnico de la Federación Internacional de Control Automático (IFAC) es el de Modelado y Control de Procesos Agrícolas.

que poseen una gran infraestructura para poder llevar a cabo sus investigaciones. Citar, por ejemplo, los grupos de investigación de la Universidad Technion en Haifa (Israel), el instituto INRA de Avignon (Francia) o el Instituto de ingeniería agrícola DLO de Wageningen (Holanda) o la Universidad de Cornell de NY (EEUU).

Se pasa a continuación a referenciar la bibliografía y temática que trata de centrar, con la mayor claridad posible, dónde está el interés de los anteriores investigadores, de manera que el lector pueda acudir, a partir de aquí, a conocer más específicamente los avances concretos.

Un trabajo pionero en la descripción del modelo de humedad de un invernadero es debido a (Stanghellini y de Jong, 1995), basado en la obtención de un modelo no lineal de primeros principios de la humedad a través de la definición del balance de flujos de condensación, ventilación y transpiración. En este último caso se emplea la ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1973) que incorpora las medidas del déficit de saturación y radiación para su evaluación⁴, este modelo sigue estando de actualidad para el diseño de la ventilación en invernaderos (Seginer, 2002). El modelo de humedad se complementa con los modelos de balance energético a diferentes niveles. De nuevo se construye una ecuación de primeros principios del balance de flujos térmicos asociados a la ventilación, convección, conducción y de calor latente debidos a la transpiración de la planta (Baille *et al.*, 1994; Jolliet y Bailey, 1992)⁵ que definen la evolución de la temperatura. En función de los diferentes volúmenes del invernadero y el suelo es posible definir ecuaciones de evolución de la temperatura para cada uno de ellos y que se intercambian calor. Una mayor o menor complejidad del modelo es posible en función del número de volúmenes seleccionados que dan lugar a un mayor o menor número de ecuaciones diferenciales (Blasco, 1998; Rodríguez, 2002).

El modelo climático de humedad y temperatura anterior puede ser complementado incluyendo nuevos factores determinantes en el crecimiento del cultivo, entre otros, la dinámica del CO_2 (Ioslovich *et al.*, 1995), la concentración de Nitratos (Seginer *et al.*, 1998; Seginer, 2003), etc.

Los modelos de primeros principios son difíciles de ajustar habiéndose realizado importantes esfuerzos en el desarrollo de modelos de caja negra dentro del campo de la inteligencia artificial basados en el ajuste mediante redes neuronales,

que posteriormente se emplean para ajustar un controlador basado en la optimización de un índice. Los resultados demuestran la robustez de estos diseños que filtran adecuadamente las incertidumbres producidas por algunos elementos del sistema, como por ejemplo, el tamaño de las hojas (Seginer *et al.*, 1994; Linker *et al.*, 1998; Linker y Seginer, 2002). Con esas mismas pretensiones, se ajustan modelos basados en conjuntos borrosos que posteriormente se emplean para establecer las acciones de control correspondientes basadas en un sistema experto (Ehrlich *et al.*, 1996).

También, desde este enfoque más agronómico, existen grupos españoles muy activos, como el Departamento de Tecnología Hortícola del IRTA de Cataluña que se dedica al desarrollo de tecnología de invernaderos, biosensores, diagnóstico de estrés en plantas, etc., el grupo de Energía y Agricultura del Departamento de Ingeniería Rural de la Universidad Politécnica de Madrid que se dedica a la climatización de invernaderos, control automático, modelización climática, control de la condensación en invernaderos, etc., el Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola de la Universidad Politécnica de Cartagena que se dedica al diseño, automatización, control de riegos en invernaderos, etc. y por último, el departamento de Ingeniería Rural de la Universidad de Almería que desarrolla temáticas similares.

Dentro del segundo caso, desde un enfoque más orientado al control automático, es posible encontrar trabajos que toman en consideración gran parte de las metodologías de control existentes. La colaboración de investigadores especialistas en control automático con los agrónomos ha permitido dar soluciones de control avanzado a los problemas de control complejos que surgen en un invernadero.

Los trabajos son de muy diverso tipo, por ejemplo, es interesante destacar aportaciones donde el control climático se aborda mediante algoritmos de programación lineal (Gutman *et al.*, 1993), o directamente mediante técnicas de control robusto y aplicadas a un invernadero real (Linker *et al.*, 1999). También se han dedicado esfuerzos importante en el campo del modelado para detección de fallos en invernaderos (Linker *et al.*, 2000). Incluso en el ámbito concreto de la identificación de parámetros (Ioslovich *et al.*, 2003).

Uno de los grupos probablemente más activos a nivel internacional en la aplicación de técnicas de control óptimo en la producción de invernadero es el de Gerrit van Straten (Wageningen), con experiencia en control robusto, control óptimo, identificación de sistemas e inteligencia artificial. Una de sus principales aplicaciones consiste en el control climático óptimo de invernaderos basado

⁴ Este modelo es la base del desarrollo posterior de los modelos climáticos implementados por los autores de este artículo, por lo que será presentado con detalle posteriormente.

⁵ Deben hacerse las mismas consideraciones que para la nota a pie de página anterior.

en el controlador óptimo de horizonte deslizante (RHOC) con una función de coste basada en aspectos económicos (van Ooteghem *et al.*, 2004).

En los últimos tiempos, también se han empezado a publicar artículos donde la metodología de control seleccionada es la de Control Predictivo Basado en Modelos (MPC). Las ventajas de esta metodología son bien conocidas y se resumen en la posibilidad de mejorar el control de un proceso gracias al conocimiento de la predicción de las salidas del modelo de un proceso en un horizonte amplio (Camacho y Bordons, 2004). Sobre las bondades de este control se volverá a insistir más adelante en este artículo. El enfoque dado en la aplicación al invernadero también es muy variado, según los grupos de investigación que trabajan en este campo. Desde una visión más matemática (Piñón *et al.*, 2001), donde el problema se resuelve asumiendo un problema de optimización con restricciones y usando LMIs para asegurar robustez, pasando por una visión matemática, pero simplificada, acudiendo a modelos lineales y control adaptativo (Boaventura *et al.*, 2000), o a través de una visión más pragmática con la inclusión de herramientas basadas en optimización heurística (derivada de la optimización de Montecarlo) como los Algoritmos Genéticos (AG) (Blasco *et al.*, 2001a; Blasco *et al.*, 2001b; Rodríguez, 2002) o el Templado Simulado (*Simulated annealing (SA)*) (Chuine *et al.*, 1998; Senent *et al.*, 1998) para resolver los costosos problemas de optimización con restricciones que pueden presentarse para calcular las acciones de control adecuadas.

Como se puede observar, el control de un invernadero tiene, hoy en día, un importante interés para la comunidad científica, la razón quizá haya que buscarla en las inherentes características no lineales y multivariadas del proceso, la presencia de perturbaciones e incertidumbres acusadas, así como la necesidad de plantear soluciones a las limitaciones impuestas por las saturaciones en sus variables y por supuesto por ser un proceso que cada vez es más abundante en el ámbito agronómico, lo que augura un gran desarrollo científico-técnico en esta materia.

5. CASO PARTICULAR. VISIÓN TECNOLÓGICA

En esta sección se va a presentar un 'caso particular' de implementación tecnológica de un sistema de monitorización y control desarrollado para controlar el invernadero de cultivo hidropónico de rosas que el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) posee en Valencia, España, (figura 1).

Tal y como se presentó en la sección dedicada a los productos tecnológicos del mercado, se definieron

una serie de especificaciones técnicas que están presentes en dichos productos. Teniendo en cuenta el cumplimiento de estas especificaciones se pretendía inicialmente que la instalación cumpliera los siguientes objetivos básicos:

- Debía presentar un funcionamiento fiable, pues era imprescindible reducir al máximo los tiempos de parada y bloqueos de la instalación.
- Debía ser muy flexible, puesto que el invernadero iba a ser utilizado para investigación agronómica era muy importante que fuese sencillo añadir o eliminar sensores y actuadores de todo tipo y modificar el software asociado.

Una vez asegurados los requisitos anteriores, se planteaba la posibilidad de ir incorporando paulatinamente nuevas funcionalidades:

- Desarrollo de un interfaz amigable (HMI) compatible con los deseos del usuario y con información relevante tanto en tiempo-real como histórica.
- Posibilidad de monitorización, comando, control y mantenimiento remotos a través de Internet, con niveles de seguridad de acceso adecuados.
- Disponibilidad de un módulo de detección de alarmas de forma remota mediante envíos de correos electrónicos y mensajes a móviles.
- Desarrollo de facilidades de comunicación por radiofrecuencia, inalámbricas, telefonía, etc., con el fin de dar solución a problemas de acceso remoto.
- Flexibilidad para añadir módulos avanzados de identificación y control de procesos.



Figura 1. Vista interior del invernadero de cultivo hidropónico de rosas del IVIA.

Con estos objetivos, se ha concebido un sistema que, para darle la flexibilidad y fiabilidad necesarias, se compone de un bus de campo industrial Profibus (www.profibus.org) que a través de una serie de nodos, conecta todos los sensores y actuadores presentes en el invernadero a un Automata Programable (PLC). Este dispositivo es el que se encarga de gestionar los equipos de actuación de

modo que se consigan las especificaciones requeridas del proceso. Adicionalmente, la conexión del PLC con un ordenador personal (PC) ha permitido, por una parte, desarrollar un interface gráfico de usuario en un paquete SCADA, con lo que se da respuesta a la construcción del interfaz amigable, y la posibilidad de incorporar módulos avanzados de programación. En este caso, la aplicación está preparada para la inclusión de rutinas programadas en lenguaje C, lo que permite tener un grado de flexibilidad muy importante de cara a desarrollar y probar módulos de identificación y control avanzado. La conexión a Internet se realiza a través de VNC (*Virtual Network Computing*), desarrollado en software libre y que se puede ejecutar en múltiples plataformas y con acceso de múltiples clientes. El requerimiento de desarrollo de un módulo de gestión de alarmas de forma remota, se ha resuelto mediante la implementación en software libre de una aplicación no propietaria multiplataforma para comunicación mediante OPC⁶. Este módulo tiene capacidad de enviar mensajes SMS a móviles.

La espina dorsal de la instalación la constituye el bus de campo. El uso del bus Profibus como medio físico de comunicación, permite que gran parte del cableado (generalmente con distancias grandes) que aparece en los invernaderos debido al elevado número de sensores y actuadores se vea enormemente reducido, lo que facilita su instalación y sobre todo su mantenimiento. No obstante, a pesar de la ventaja que supone la tecnología Profibus por las razones antes apuntadas, tiene la enorme desventaja de su dependencia de las casas comerciales que suministran productos para ella, lo que encarece la instalación. Una alternativa es la de sustituir dicho bus por otro más abierto y económico y soportado por gran número de microcontroladores que admitan software libre para su desarrollo. OpenCan cumple estas especificaciones y se ha comenzado a trabajar con el mismo. Por otra parte, la tecnología inalámbrica está desarrollándose de forma muy rápida. Es factible, hoy en día, el desarrollo de redes inalámbricas donde los dispositivos pueden ser utilizados como sensores, actuadores o controladores, comunicarse entre ellos, con un mantenimiento barato, de fácil sustitución y que cada vez tienen más garantías de poder sustituir al bus de campo sin perder fiabilidad.

Acaba aquí esta sección, donde se han puesto de manifiesto, de la forma más sucinta posible, las características técnicas del sistema desarrollado, creyendo que el mismo cumple de una manera bas-

tante adecuada con las especificaciones generales planteadas en la sección 3. Una descripción mucho más detallada puede encontrarse en (Martínez *et al.*, 2002).

6. CASO PARTICULAR. VISIÓN CIENTÍFICA

En esta sección se describen las aportaciones científicas correspondientes a los trabajos desarrollados por los autores de este artículo. Están enmarcadas dentro de las líneas de investigación que en el ámbito general de control de invernadero se desarrollan actualmente, tal y como se presentó en la sección 4. Se van a aportar resultados en los siguientes ámbitos:

- Modelado de invernaderos mediante el uso de primeros principios.
- Ajuste de parámetros de modelos de primeros principios.
- Control predictivo de invernaderos basados en modelos de primeros principios.
- Optimización Multiobjetivo para el modelado de invernaderos.

Para ayudar al lector se incluye a continuación un apartado dedicado a notación básica, donde se enumeran alfabéticamente las variables y parámetros presentes en las ecuaciones del modelo que se propone, con su significado, unidades y, en su caso, valor correspondiente.

6.1 Notación.

- A_i : Superficie del invernadero, 240 m^2 .
- C_m : Capacidad calorífica de la masa térmica⁷, $[10^5, 5 \cdot 10^5] \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-2}$.
- C_p : Calor especí. del aire, $1003 \text{ J Kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$.
- C_{sat} : Coeficiente de saturación del aire, adimensional.
- E : Evapotranspiración del cultivo, $\text{Kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ s}^{-1}$.
- f_{og} : Nebulización, $\text{Kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ s}^{-1}$.
- F_v : Flujo de renovación del vapor de agua en el aire, $\text{Kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ s}^{-1}$.
- HR_i : Humedad relativa interior, %.
- MV_{fog} : Nebulización, %.
- MV_W : Calefacción, %.
- MV_α : Apertura de la ventana, %.
- Q_{cc} : Pérdidas de energía por conducción y convección, W .
- Q_e : Pérdidas de energía debidas a la evapotranspiración del cultivo, W .
- Q_f : Pérdidas hacia el fondo del suelo, W .
- Q_m : Intercambio de energía con la masa térmica, W .
- Q_n : Pérdidas de energía por nebulización, W .

⁶ Es un acrónimo de *OLE for Process Control*, estándar de comunicación para el que la mayoría de fabricantes de sistemas de comunicación y control han desarrollado software, permitiendo el intercambio de datos entre los mismos.

⁷ Al ser un parámetro incierto se dan los valores límite de variación.

- Q_s : Energía solar suministrada al aire, W .
- Q_{sm} : Energía almacenada por la masa térmica durante el día, W .
- Q_v : Intercambio de energía debido a la ventilación, W .
- S_o : Radiación solar, $W m^{-2}$.
- T_i : Temperatura interior, $^{\circ}C$.
- T_m : Temperatura masa térmica, $^{\circ}C$.
- T_o : Temperatura exterior, $^{\circ}C$.
- v_i : Volumen del invernadero, $850 m^3$.
- V : Velocidad del viento, $m s^{-1}$.
- x_i : Humedad absoluta int., $Kg_{H_2O} Kg_{aire}^{-1}$.
- x_o : Humedad absoluta ext., $Kg_{H_2O} Kg_{aire}^{-1}$.
- ρ : Densidad del aire, $1.25 Kg_{aire} m^{-3}$.

6.2 Modelado de primeros principios.

Uno de los primeros pasos en el desarrollo de cualquier tecnología suele estar basado en la obtención de un modelo, normalmente matemático, del sistema tecnológico con el que se va a trabajar u operar. Si se trabaja en los modelos funcionales (Johansson, 1993), es posible dividir los modelos en dos grandes grupos (Pronzalo y Walter, 1997):

1. Los que contemplan los fenómenos físicos, químicos, biológicos, sociológicos, etc. a través de una serie de ecuaciones en espacio de estados. En estos modelos, los parámetros tienen un significado, entre otros, de masa, inercia, resistencia, distancia, conductividad, capacidad térmica, etc.
2. Los que intentan aproximar el comportamiento del proceso sin utilizar información *a priori*, por ejemplo, mediante un ajuste de polinomios, redes neuronales, conjuntos borrosos, etc.

A la hora de obtener un modelo del proceso suele ser difícil, *a priori*, decidir entre una de estas alternativas. Las exigencias de los ingenieros de planta, de cara a cómo se quieran enfrentar a la explotación cotidiana del proceso a controlar determinarán, en mayor o menor medida, que los ingenieros de control se decanten por una u otra opción (Pronzalo y Walter, 1997; Blasco *et al.*, 2001a).

Los ingenieros agrónomos llevan mucho tiempo perfeccionando modelos de procesos físicos y fisiológicos de invernaderos y, aunque también han sido empleadas técnicas de caja negra, en cierta medida, muchos de ellos prefieren los modelos físicos y fisiológicos por la sencillez de interpretación de los fenómenos que allí ocurren y que les dan un contacto más directo con la realidad (Baille *et al.*, 1994; Baille *et al.*, 1996), lo que permite una mejor explicación del comportamiento del sistema y una mejor exploración de las soluciones de control. Por ello, en este trabajo, se utilizará esta alternativa.

En esta sección se presenta un modelo climático en espacio de estados no lineal de primeros principios y en el que puede considerarse para su definición como un volumen limitado por las paredes, el dosel y el suelo. El modelo se obtiene mediante balances de energía y masa, incluidos los que aporta la biología de la planta. Se pueden establecer dos subsistemas, el volumen del aire y el suelo, este último actúa como masa térmica (Albright *et al.*, 1985). Las variables que describen el comportamiento climático son la temperatura interior T_i y la humedad relativa HR_i (o absoluta x_i) en el volumen de aire y la temperatura de la masa térmica T_m en el volumen del suelo, que dan lugar a las siguientes ecuaciones de estado:

$$\rho v_i \frac{dx_i}{dt} = F_v + C_{sat}(E + fog) \quad (1)$$

$$v_i \rho C_p \frac{dT_i}{dt} = Q_s - Q_{cc} + Q_m - Q_v - C_{sat}(Q_e + Q_n) \quad (2)$$

$$A_i C_m \frac{dT_m}{dt} = Q_{sm} - Q_m - Q_f \quad (3)$$

Un diagrama del modelo, desde un punto de vista E/S, se muestra en la figura 2, donde se representan las variables a controlar (T_i , HR_i), las variables manipuladas (MV_{α} , MV_W , MV_{fog}) y las perturbaciones medidas (S_o , V , T_o , x_o):

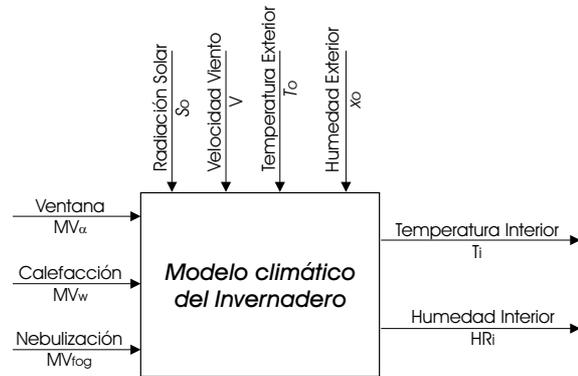


Figura 2. Modelo climático del invernadero.

El apéndice A muestra los detalles del modelo con las ecuaciones y parámetros adicionales que lo componen, poniendo de manifiesto su no linealidad.

6.3 Ajuste de modelos de primeros principios.

En el apéndice A se observa el número importante de parámetros del modelo, en algunos casos de difícil ajuste, realizando una aproximación por intervalos. Todo ello conduce a disponer de modelos que, aunque con mucho sentido físico, son

difíciles de calibrar. Aunque existen un conjunto de técnicas de identificación cuando el proceso se ajusta suficientemente a un modelo lineal (Johansson, 1993; Pronzalo y Walter, 1997), éstas no son de aplicación cuando el proceso es claramente no lineal (como es el caso del modelo del invernadero). Una alternativa muy aceptable para la determinación de los parámetros del mismo está asociada a la minimización de una función de coste que incorpora alguna norma del vector de errores⁸. La complejidad del modelo, caracterizado fundamentalmente por su no linealidad, de los sensores y actuadores con características también no lineales (saturaciones, zonas muertas, histéresis, etc.), así como de la complejidad de la propia función de coste, ocasionan que la misma pueda acabar teniendo características de función no convexa, haciendo ineficiente el empleo de optimizadores numéricos del tipo Gauss-Newton⁹ que pueden quedar atrapados en mínimos locales, siendo necesario, en estos casos, el uso de optimizadores globales. Es aquí donde los Algoritmos Genéticos (AGs) pueden presentar especiales ventajas (Goldberg, 1989; Holland, 1975; Blasco *et al.*, 1998; Blasco, 1998). Evidentemente el coste computacional de los AGs no es despreciable, sin embargo, utilizados fuera de línea resultan muy adecuados para la determinación de un buen modelo matemático del proceso, que facilitaría la determinación de los controladores más adecuados.

Un modelo genérico de un proceso se puede representar mediante un conjunto de ecuaciones en variables de estado y de salida de la siguiente forma:

$$\dot{z}(t) = f(z(t), u(t), \zeta) \quad (4)$$

$$\hat{y}(t) = g(z(t), u(t), \zeta) \quad (5)$$

donde:

- $f(\cdot)$ y $g(\cdot)$: funciones (lineales o no lineales) que determinan la estructura del modelo.
- ζ : parámetros del modelo a identificar.
- $u(t)$: vector de entradas al modelo (orden m).
- $\hat{y}(t)$ vector de salidas del modelo (orden l).
- $z(t)$: vector de las variables de estados del modelo (orden n).

En general, los parámetros candidatos a ser identificados mediante optimización con AGs son aquellos cuya determinación resulta muy dificultosa o costosa. Se trata de minimizar alguna norma

del vector de errores de modelado o una función de ésta. El error de modelado se calcula como diferencia entre el vector de salidas del proceso y y el vector de salidas del modelo \hat{y} . La función de coste general a minimizar en estos casos podría representarse como:

$$J(\zeta) = f(\|y - \hat{y}\|_{qK}) = f(\|e\|_{qK}) \quad (6)$$

Donde $\|\cdot\|_q$, representa la norma de un vector y K representa una matriz (en general diagonal) o vector de coeficientes que pondera cada uno de los elementos de dicho vector¹⁰.

La selección de la función de coste repercutirá en la obtención de los parámetros del modelo, no existiendo una función de coste ideal. Cualquiera de las que se use tendrá sus ventajas e inconvenientes (Blasco, 1998), por tanto, queda en manos del usuario decidir qué función se ajusta mejor a sus necesidades. En los problemas clásicos de optimización el índice de coste más habitual es el índice cuadrático (corresponde al cuadrado de la norma 2). El motivo de esta elección sirve para facilitar la optimización analítica. Sin embargo esta función de coste deforma los errores sobre-reduciéndolos cuando están cercanos al origen (Aström y Witthenmark, 1995). Resulta mucho más intuitivo utilizar como índice de coste la norma 1, dado que trata de forma equitativa todos los errores de modelado¹¹. Si aplicamos norma 1 a los errores obtenidos a lo largo de un experimento, el índice de coste resultaría:

$$J(\zeta) = \|y - \hat{y}\|_{1K} = \sum_{j=1}^{te} \sum_{i=1}^l k_{ij} |y_i(j) - \hat{y}_i(j)| \quad (7)$$

donde:

- te : muestras del experimento.
- l : número de salidas.
- k_{ij} : coeficiente de ponderación de la salida i , para la muestra j .
- $y_i(j)$: muestra j de la salida i del proceso real.
- $\hat{y}_i(j)$: Simulación de la salida i del modelo para el instante de tiempo correspondiente a la muestra j .

El uso de factores de ponderación k_{ij} se justifica en este tipo de problemas para poder hacer comparables o normalizar las magnitudes de las

⁸ En general el vector de errores está construido por las diferencias entre las salidas del proceso y del modelo en un horizonte temporal dado.

⁹ Los algoritmos de Gauss-Newton suelen aproximar la función no-lineal a una aproximación cuadrática local e ir aproximando la solución de forma iterativa $x_{j+1} = x_j - H_j^{-1} * g_j$ con H_j y g_j Hessiano y Gradiente respectivamente de la función a optimizar en el punto j , teniéndose en cuenta las restricciones lineales o no.

¹⁰ La definición de norma q de un vector de orden n viene dada por la expresión $\|x\|_q = (|x_1|^q + \dots + |x_n|^q)^{1/q}$, siendo las más empleadas las normas 1 y 2. Existe otra definición también muy utilizada $\|x\|_\infty = \max |x_i|$, conocida como norma infinito y que se emplea habitualmente en control robusto.

¹¹ Este hecho se ponía de manifiesto al usar la regla del MIT en la sintonía de Controladores Adaptativos por Modelo de Referencia (MRAS).

variables de salida de un modelo multivariable. (Herrero *et al.*, 2002)¹².

Para llevar a cabo el proceso de identificación con AGs es necesario establecer algunas consideraciones que permitan particularizar el proceso de identificación y aumenten las posibilidades de éxito en dicho proceso. Estas consideraciones hacen referencia a los siguientes puntos:

- Adaptar el modelo y seleccionar los parámetros a identificar.
- Seleccionar el índice a optimizar.
- Planificar los experimentos.

Relacionado con la adaptación del modelo, en el caso concreto del modelo climático del invernadero (figura 2) las ecuaciones de estado (1), (2) y (3) se adaptan de forma directa a las ecuaciones (4) y (5). En cuanto a la selección de parámetros ζ unos están asociados al cultivo específico del rosal, y otros a parámetros asociados a distintas constantes de transmisión de calor, y temperaturas de referencia del invernadero¹³. La adaptación del problema genérico en variables de estado al modelo del invernadero resulta:

$$\zeta = [gws_{max} \ gws_{min} \ L \ k \ gwb \ \tau \ a \ G_o \ Ac \ C_m \ h_m \ T_{ref} \ \alpha_m \ k_a \ fog_{max}]^T \quad (8)$$

$$u(t) = [MV_\alpha \ MV_{fog} \ S_o \ T_o \ HR_o \ V]^T \quad (9)$$

$$\hat{y}(t) = [T_i \ HR_i]^T \quad (10)$$

$$z(t) = [x_i \ T_i \ T_m]^T \quad (11)$$

Una parte vital en el proceso de identificación es la planificación de los experimentos, entre algunos de los aspectos más importantes están:

1. Selección de las señales de entrada.
2. Condiciones de funcionamiento del proceso.
3. Duración de los experimentos y frecuencia de muestreo de las señales.

Los aspectos 1 y 2 son especialmente importantes cuando se habla de procesos como el invernadero cuyo comportamiento es claramente no lineal, en particular variante con el tiempo. La formulación de modelos de estos procesos complejos presenta un alto grado de incertidumbre, tanto mayor cuanto más general se pretenda que sea el modelo. Por otra parte, las condiciones de funcionamiento vienen potencialmente impuestas por el efecto de las perturbaciones como la radiación solar, la temperatura exterior, etc., que presentan una cierta periodicidad, pero que también pueden variar

durante el día y el año. Todo ello condiciona, en este caso, la elección del valor de los parámetros del modelo propuesto en la sección anterior y en este sentido se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se ha formulado un modelo en donde los parámetros ζ se han seleccionado teniendo en cuenta que representan aquellas magnitudes físicas desconocidas y con mayor grado de incertidumbre.
- Se ha ajustado un modelo único para cubrir la dinámica correspondiente al periodo estival sin distinguir entre periodos nocturnos y diurnos pues hubiera conducido a la obtención de varios modelos aumentando la complejidad en el diseño de controladores. El número elevado de grados de libertad (15 parámetros) para el ajuste de este modelo se considera suficiente para conseguir un resultado representativo del día completo. De una forma similar se ha actuado en otros periodos del año, como se pone de manifiesto en la sección siguiente.
- Los ensayos durarán un periodo múltiplo de 24 horas. Cuanto más días se utilicen más representativo será el modelo. Sin embargo, un número de días grande hace que las simulaciones sean costosas y el tiempo de ajuste del modelo con los AGs se incremente considerablemente. El periodo de muestro utilizado ha sido de 15 segundos, suficiente para capturar la dinámica de los procesos bajo invernadero.

Teniendo en cuenta las premisas anteriores propuestas se identifican los parámetros ζ , tomando como datos los correspondientes a dos días no consecutivos del mes de junio.

La optimización se ha llevado a cabo con una población de 10.000 individuos y durante 50 iteraciones del AG, con el siguiente resultado:

$$\zeta^* = [0.0110 \ 0.00435 \ 0.796 \ 0.520 \ 0.0368 \ 0.418 \ 0.00170 \ 0.0005 \ 17.907 \ 126594 \ 8.400 \ 18.8329 \ 0.04629 \ 7.8685 \ 0.00435]^T$$

En la figura 3 se muestra la comparación entre las temperaturas y humedades relativas reales y las simuladas con el modelo climático en la fase de identificación o calibración (utilizando el conjunto de parámetros óptimo ζ^*). Los datos estadísticos obtenidos son los siguientes:

Error	medio	máximo	desv. estándar
$T_i(^{\circ}C)$	0.67	2.71	0.56
$HR_i(\%)$	2.69	15.70	2.82

La figura 4 muestra los resultados de validación comparando la temperatura y la humedad relativa real y del modelo para el día 20 de junio donde

¹²Una idea similar aparece en otros contextos como el control de procesos (Grosdidier *et al.*, 1988).

¹³En el Apéndice A se puede consultar el significado de cada parámetro objeto de identificación así como su rango de ajuste, los estudios analíticos previos han permitido aventurar estos rangos aproximados, lo que reduce la zona de búsqueda de una forma drástica.

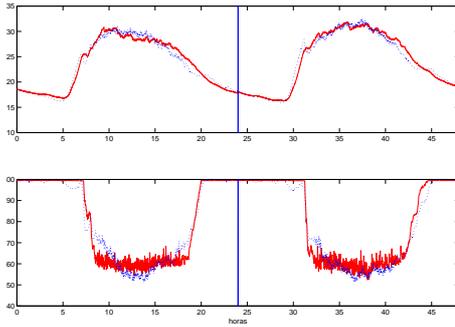


Figura 3. T_i y HR_i real (trazo continuo) y del modelo (trazo discontinuo), para los 2 días no consecutivos del mes de junio.

mejor se ajusta el modelo y el día 28 de julio donde peor se ajusta con unos resultados que se consideran aceptables. Para más información se recomienda acudir a la referencia (Herrero *et al.*, 2003).

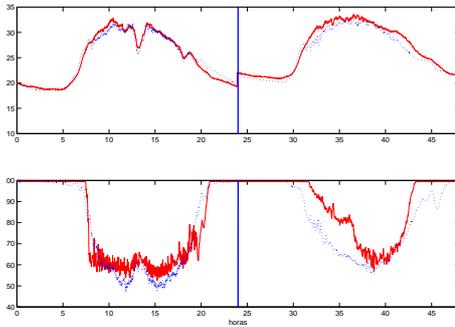


Figura 4. T_i y HR_i real (trazo continuo) y del modelo (trazo discontinuo), para los días 20 de junio (izquierda) y 27 de julio (a la derecha).

6.4 Control Predictivo de Invernaderos Basado en Modelos de Primeros Principios.

Para aplicar control predictivo al proceso multivariable definido en el invernadero se puede utilizar la estructura de modelo MIMO descrita en la figura 5. Donde:

- $Y_u(t) = [y_{u1}(t), y_{u2}(t), \dots, y_{ur}(t)]^T$, vector de salidas del modelo del proceso.
- $N(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_r(t)]^T$, vector de salidas del modelo de perturbación.
- $Y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_r(t)]^T$, vector de salidas total.
- $\xi(t) = [\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_r(t)]^T$, vector de entradas del modelos de perturbación (ruidos blancos).
- $U(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_e(t)]^T$, vector de entradas del modelo del proceso, incluye las de perturbación medidas.

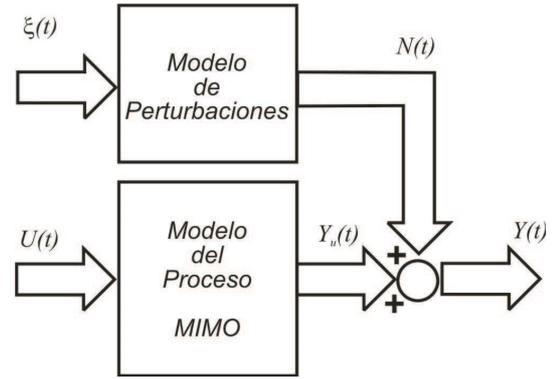


Figura 5. Estructura del modelo MIMO.

El modelo del proceso puede ser de cualquier tipo: funciones de transferencia, espacio de estados, etc. basta con que sea capaz de predecir el valor de las variables de salida a partir de la información actual y pasada del proceso¹⁴. Las predicciones en el instante 't+j' con la información disponible en 't', se obtienen de:

$$Y(t+j|t) = Y_u(t+j|t) + N(t+j|t) \quad (12)$$

Donde $Y_u(t+j|t)$ se obtiene del modelo del proceso y las acciones de control futuras, y $N(t+j|t)$ se obtiene de los modelos de perturbaciones.

Una alternativa para formar un modelo de perturbaciones es mantener una estructura similar a la que tiene un controlador predictivo del tipo GPC (Camacho y Bordons, 2004), es decir, incorporar el factor Δ en el denominador para obtener un buen comportamiento en régimen permanente y un polinomio de diseño $T_i(z^{-1})$ en el numerador para conseguir buenas cualidades de robustez. Además, si se dispone de más información se puede incluir, de la misma forma que en el GPC, añadiéndola como un polinomio al denominador. En resumen, el modelo de perturbaciones puede formularse como:

$$n_i(t) = \frac{T_i(z^{-1})}{\Delta A_i(z^{-1})} \xi_i(t) \quad (13)$$

Con este modelo de perturbaciones, la predicción para el instante 't+j' de una de las perturbaciones $n_i(t+j|t)$ se obtiene de la misma manera que para un sistema SISO:

$$n_i^f(t) = \frac{n_i(t)}{T_i(z^{-1})} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} n_i^f(t+j|t) &= (\Delta A_i(z^{-1}))' n_i^f(t+j|t) \\ &= -\hat{a}_{i1} n_i^f(t+j-1|t) - \\ &\quad -\hat{a}_{i2} n_i^f(t+j-2|t) - \dots \\ &\quad -\hat{a}_{i,j-1} n_i^f(t+1|t) - \hat{a}_{ij} n_i^f(t) - \end{aligned}$$

¹⁴ En este trabajo se utiliza únicamente información entrada/salida del proceso.

$$\begin{aligned} & -\hat{a}_{i,j+1}n_i^f(t-1) - \dots \\ & -\hat{a}_{i,n_a+1}n_i^f(t+j-n_a-1) \end{aligned} \quad (15)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \Delta A_i(z^{-1}) &= 1 + \hat{a}_{i1}z^{-1} + \hat{a}_{i2}z^{-2} + \\ & \dots + \hat{a}_{i,n_a+1}z^{-(n_a+1)} \\ (\Delta A_i(z^{-1}))' &= -\hat{a}_{i1}z^{-1} - \hat{a}_{i2}z^{-2} - \\ & \dots - \hat{a}_{i,n_a+1}z^{-(n_a+1)} \end{aligned}$$

A partir de $n_i^f(t+j|t)$ se obtiene la mejor predicción de la salida del modelo de perturbaciones $n_i(t+j|t)$:

$$n_i(t+j|t) = T_i(z^{-1})n_i^f(t+j|t) \quad (16)$$

En cuanto al índice de coste que se propone, es similar al de un controlador predictivo GPC MIMO, con la definición de los horizontes de predicción y control correspondientes y sin ponderación de la acción de control, pero formulado como norma 1:

$$J(\hat{u}) = \sum_{i=1}^r \left[\sum_{j=N_{i1}}^{N_{i2}} \alpha_{ij} |y_i(t+j|t) - w_i(t+j)| \right] \quad (17)$$

Donde:

$$\hat{u} = [u_1(t), \dots, u_1(t+N_{1u}-1), \dots, u_r(t), \dots, u_r(t+N_{ru}-1)]^T$$

De nuevo el problema se plantea en cómo proceder al ajuste de las ponderaciones del índice. Se opta por operar con el valor absoluto del error predicho por tratarse de un magnitud menos distorsionada que la que corresponde a los índices cuadráticos. El problema de la selección de los factores de ponderación (α_{ij}) se resuelve, normalizando respecto de los puntos de funcionamiento de cada variable, si bien, como en el caso de la identificación resulta una solución empírica. En un punto posterior, se analizará cómo es posible resolver este problema de elección a través de conceptos de optimización multiobjetivo (Martínez *et al.*, 2005).

El modelo utilizado para realizar las predicciones incluye un modelo discretizado no lineal con un modelo de perturbaciones¹⁵. En este proceso aparecen perturbaciones medibles como son:

1. Radiación solar: S_o .
2. Velocidad del viento en el exterior del invernadero: V .

3. Temperatura en el exterior del invernadero: T_o .
4. Humedad en el exterior del invernadero, esta variable se mide en humedad relativa HR_o , y para ser utilizada en las ecuaciones diferenciales se transforma a humedad absoluta x_o .

La relación con las variables de salida es no lineal y ya se tiene en cuenta en las ecuaciones del modelo. Queda por resolver la predicción que se realice de dichas variables a lo largo del horizonte de predicción.

A cada una de las variables de salida se le suma un término del tipo:

$$n_i(t) = \frac{T_i(z^{-1})}{\Delta} \xi_i(t) \quad (18)$$

No se define el modelo del ruido anterior con el polinomio $A_i(z^{-1})$ dado que se tiene un modelo no lineal y no es posible conocer dicho polinomio. Las variables $\xi_i(t)$ se consideran ruidos blancos. El factor $1/\Delta$ permite ajustar el régimen permanente y el polinomio $T_i(z^{-1})$ mejora la robustez.

La función de coste utilizada se formula para minimizar las discrepancias entre las variables de salida D_i (déficit de saturación interior en KPa ¹⁶) y T_i (temperatura interior en $^{\circ}\text{C}$) y sus respectivas referencias wD_i y wT_i . En cuanto a las variables de control se han usado MV_{α} (apertura de la ventana en %) y W (potencia de la calefacción en W). Los parámetros del horizonte de predicción y de control se ajustan a $N_1 = 1$, $N_2 = 5$ y $N_u = 1$ respectivamente. Se supone que las referencias futuras no son conocidas, por lo que se consideran constantes en todo el horizonte de predicción, igual al del instante 't':

$$\begin{aligned} J(MV_{\alpha}(t), W(t)) &= \sum_{j=1}^5 \alpha_{1j} |D_i(t+j|t) - wD_i(t)| \\ &+ \sum_{j=1}^5 \alpha_{2j} |T_i(t+j|t) - wT_i(t)| \end{aligned} \quad (19)$$

Donde:

$$\alpha_{1j} = \frac{1}{|wD_i(t)|}; \quad \alpha_{2j} = \frac{1}{|wT_i(t)|} \quad (20)$$

El ajuste de $N_2 = 5$ puede parecer bajo, si se siguen las recomendaciones clásicas para el ajuste de controladores predictivos, pues en general es

¹⁵El modelo discretizado responde a la estructura presentada en la sección anterior pero con ajuste de los parámetros para la época de otoño/invierno, por lo que la variable de control que intervendrá será la calefacción.

¹⁶El Déficit de Saturación D_i está relacionado con la humedad relativa HR_i (ver fórmula (A.12) del Apéndice) y es esta última magnitud la que se presentará gráficamente como resultado.

muy conveniente que el horizonte de predicción recoja las dinámicas más significativas del proceso. El caso del control climático de un invernadero presenta la peculiaridad de tener perturbaciones medibles que se incorporan al modelo, pero de difícil predicción. Por tanto, el establecer una estimación en horizontes de predicción elevados introduciría errores de predicción significativos que podrían reducir las prestaciones. El ajuste propuesto es un compromiso que permite considerar todas las perturbaciones constantes a lo largo del horizonte de predicción sin cometer demasiado error. Con $N_2 = 5$ el horizonte de predicción es de 10 minutos suficiente para recoger buena parte del transitorio de las variables de salida sin que se modifiquen demasiado las perturbaciones.

También se puede tomar un horizonte de control mayor, por ejemplo, $N_u = 2$, en teoría se consigue con ello un control más agresivo y se debería poder conseguir que las variables de salida alcancen las referencias más rápidamente que con $N_u = 1$. En la práctica se observa que los accionadores están trabajando cerca de sus límites de saturación, por tanto, no es de esperar una mejora espectacular en el control si se aumenta el horizonte de control, provocando en cambio un control más agresivo con los accionadores y un aumento de la complejidad del problema de optimización. Por tanto se opta por $N_u = 1$ que ya representa un problema suficientemente complejo en este caso.

El optimizador que se utiliza es un AG con codificación real, con probabilidad de cruce $P_c = 0.7$, con probabilidad de mutación $P_m = 0.1$, número de individuos = 25 y número máximo de generaciones = 15.

Se muestra una prueba con las variables de perturbación dadas en la figura 6. Los resultados se muestran en la figura 7 donde se compara con un control PID multivariable con desacoplo. Como se ve, el control predictivo consigue una mayor calidad, las variables de salida siguen mejor las referencias y las acciones de control no son tan bruscas. No obstante, a la vista de los resultados, se puede observar que ambos controladores (PID y predictivo) proponen acciones de control en las que la ventana se abre al mismo tiempo que aumenta la calefacción, comportamiento cuestionable desde un punto de vista económico. La razón es consecuencia de no haber considerado ninguna restricción de tipo económico, teniendo en cuenta exclusivamente, que el seguimiento de las referencias sea óptimo. En cualquier caso, en control predictivo podría replantearse el problema, bien introduciendo un término de coste económico en la función a optimizar, bien como inclusión de restricciones en el problema de optimización. Para más detalles se recomienda acudir a (Blasco *et al.*, 2001b).

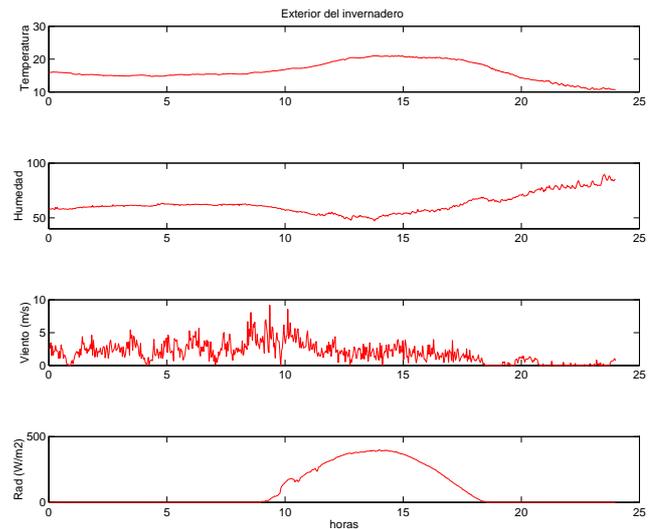


Figura 6. Valores exteriores medidos para en un día de otoño/invierno. Temperatura ($^{\circ}C$), humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s) y radiación solar (W/m^2).

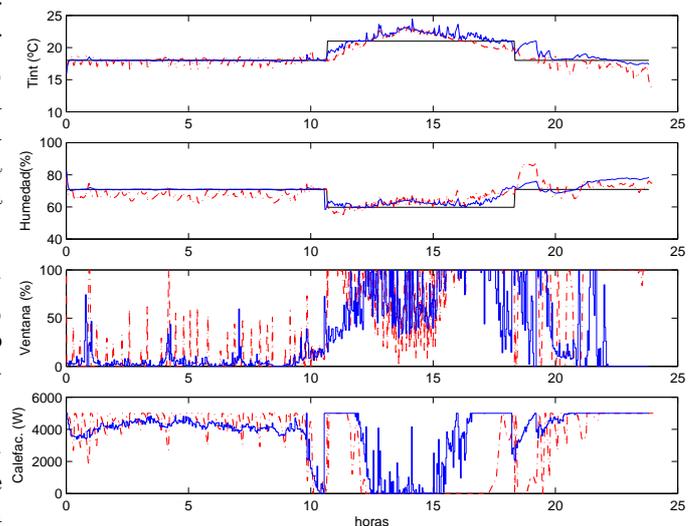


Figura 7. Control de temperatura y humedad relativa mediante control predictivo con AG (trazo continuo). Control con PIs (trazo discontinuo).

6.5 Optimización Multiobjetivo para el modelado de invernaderos.

En el modelado de un proceso, en particular de un invernadero, sobre todo cuando es multivariable, aparece la necesidad de optimizar varios objetivos a la vez. Una solución pasa por fusionar de forma ponderada los diferentes objetivos en un único índice a optimizar (como en la ecuación (7)). Sin embargo, esta solución no siempre es la más adecuada, dado que (Coello *et al.*, 2002):

- Los objetivos pueden entrar en conflicto.
- La selección de los coeficientes de ponderación condicionará la solución óptima por

completo. Además su determinación resulta, por lo general, difícil de establecer¹⁷.

- Hay soluciones óptimas que no podrían ser alcanzadas, independientemente de los coeficientes de ponderación que se escojan, en ciertos casos.

Una alternativa más genérica pasa por plantear un problema de optimización multiobjetivo o de búsqueda del conjunto de óptimos de Pareto (Pareto, 1964; Pareto, 1971):

$$\min_{\zeta \in D} J(\zeta) \quad (21)$$

$$J(\zeta) = \{J_1(\zeta), J_2(\zeta), \dots, J_s(\zeta)\}$$

cuya solución, es el conjunto de puntos del espacio de búsqueda (D) *no dominados*, llamado conjunto de óptimos de Pareto Θ_P . Un punto del espacio de búsqueda es *no dominado*¹⁸ (óptimo de Pareto) si no existe otro punto en dicho espacio que optimice todos los objetivos $J_i(\zeta)$ a la vez respecto del primero:

$$\Theta_P = \{\tilde{\zeta} \in D | \forall \zeta \in D; \zeta \neq \tilde{\zeta} : \mathbf{J}(\tilde{\zeta}) \prec \mathbf{J}(\zeta)\} \quad (22)$$

La figura 8 muestra un ejemplo de un problema de minimización con dos funciones a optimizar $J(\zeta) = \{J_1(\zeta), J_2(\zeta)\}$ en un espacio de búsqueda bidimensional $\zeta = \{\zeta_1, \zeta_2\}$. Se puede observar el conjunto de óptimos de Pareto, dentro del espacio de búsqueda y el Frente de Pareto generado por éstos, dentro del espacio de objetivos.

Los AGs también pueden enfocarse como una herramienta de optimización multiobjetivo genéricamente denominada MOGA. El motivo principal es que los MOGAs al igual que los AGs clásicos, encuentran de forma paralela múltiples soluciones (óptimos de Pareto). Algunas de las características principales de los MOGAs que le permiten manejar problemas complejos son:

- Optimización de funciones discontinuas y multimodales.
- Manejo de espacios de búsqueda inconexos.
- Determinación de Frentes de Pareto no convexos incluso discontinuos (ver figura 9).

Los frentes de Pareto descritos con anterioridad tienen verdaderas dificultades para ser construidos por algoritmos numéricos del tipo Gauss-Newton que suelen caer en mínimos locales, tal y como ya se comentó, de manera que sus resultados no respetan la condición de dominancia en todos los puntos del frente.

¹⁷La incertidumbre (dinámica no modelada y ruido de medida) en los modelos justifica que sea posible asignar cierta variabilidad a los parámetros desconocidos.

¹⁸ $\mathbf{J}(\tilde{\zeta}) \prec \mathbf{J}(\zeta)$ indica que $\tilde{\zeta}$ no es dominado por ζ .

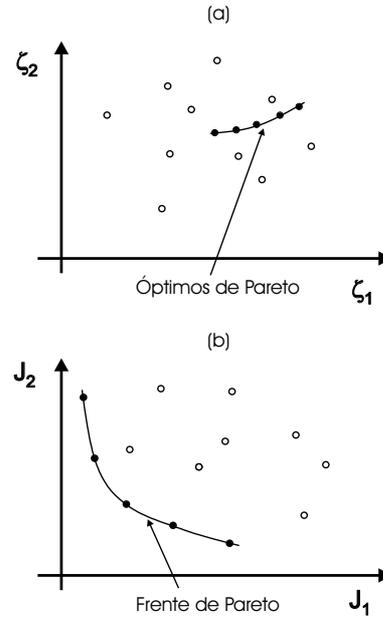


Figura 8. Optimización multiobjetivo. (a) Espacio de búsqueda. (b) Espacio de objetivos.

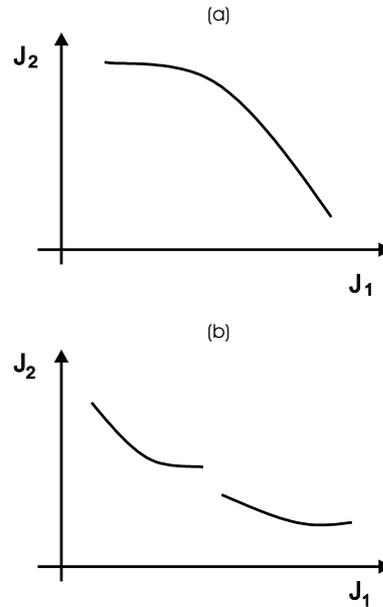


Figura 9. Frentes de Pareto. (a) Cóncavo. (b) Discontinuo.

Para resolver el problema del modelado de un invernadero mediante suma ponderada de objetivos, (ver ecuación (7)), con los inconvenientes antes apuntados, se propone la siguiente función multiobjetivo:

$$\min_{\zeta \in D} J(\zeta) = \{J_1, J_2\} \quad (23)$$

donde:

$$J_1(\zeta) = \sum_{j=1}^{te} |T_i(j) - \hat{T}_i(j)| \quad (24)$$

$$J_2(\zeta) = \sum_{j=1}^{te} |HR_i(j) - H\hat{R}_i(j)|$$

Para obtener la solución al problema de optimización multiobjetivo (23), se utiliza el algoritmo evolutivo ϵ -MOEA (Herrero *et al.*, 2005), que se caracteriza por conseguir una muestra del Frente de Pareto razonablemente bien distribuida a lo largo de éste, sin la necesidad de tener que establecer los límites del espacio de soluciones, ya que éstos se determinan dinámicamente. La figura 10 muestra el Frente de Pareto obtenido como solución al problema de optimización multiobjetivo en (23). Una vez obtenida la solución es posible escoger el modelo deseado (determinación de la solución *a posteriori*) analizando el Frente de Pareto.

Una pregunta que podría hacerse el diseñador es cuál de los modelos es el más adecuado para compensar conjuntamente ambos objetivos. Del examen de la figura 10 se puede observar que si se define el punto ideal o utópico (puesto que no es alcanzable) como aquél que minimiza ambos índices independientemente¹⁹, se podría pensar que el punto del frente de Pareto más cercano a éste podría representar el de un mejor compromiso entre ambos índices y optando por seleccionar el mismo como mejor modelo posible.

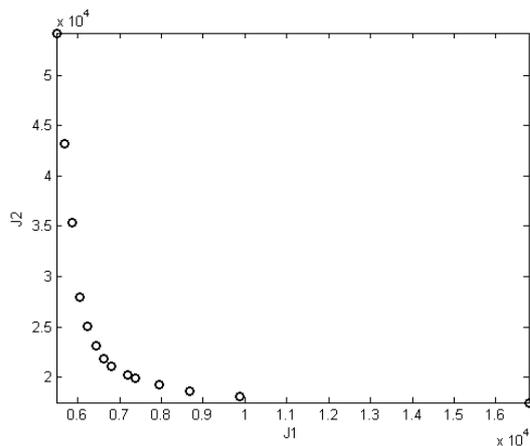


Figura 10. Frente de Pareto.

La gran ventaja que aporta la solución multiobjetivo por frente de Pareto, comparada con la agregada por suma ponderada, es la posibilidad de ver en su conjunto todas las posibilidades de solución, de manera que la elección del modelo óptimo es *a posteriori* y no mediante un costoso proceso de prueba y error. Podría pensarse que, a pesar de todo, y mediante el procedimiento de prueba y error sería siempre teóricamente posible alcanzar la misma solución que con el empleo del frente de Pareto. Esto puede ser imposible si los frentes de Pareto no son convexos, incluso muy dificultoso en el caso de ser convexos, dado que no exploran de manera distribuida y uniforme dicho frente (Messac *et al.*, 2001).

¹⁹ El punto utópico es el punto que se sitúa en la esquina inferior izquierda de la figura 10.

7. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS FUTURAS

En este artículo se ha presentado una visión conjunta teórico-práctica sobre monitorización y control de invernaderos. Inicialmente, se ha tratado de centrar la discusión identificando el área de estudio. Posteriormente, se ha pasado a analizar cómo se resuelve este problema desde un ámbito más tecnológico, asociado a las empresas, y otro más científico asociado a grupos e instituciones de investigación. En el primero, se ha hecho una búsqueda y discusión de aquellos productos tecnológicos más destacados que existen en el mercado y tratando de definir un producto 'tipo' que incorpore todos los requerimientos deseables para su aplicación en este campo. En el segundo, se ha tratado de enfocar el problema del control de invernaderos desde el ámbito científico, de manera que el lector, en función de su interés, puede analizar los campos y subcampos de aplicación concreta. Se ha pasado, a continuación, a definir un 'caso particular' o problema tipo con la propuesta de un sistema tecnológico integral para control de invernaderos, que trata de dar respuesta a todas las especificaciones exigibles, definidas con anterioridad cuando se evaluaron los productos comerciales. Este producto es la base para probar las propuestas de modelado y control avanzado de invernaderos realizadas por los autores de este artículo. Estos trabajos han tenido a los AGs como hilo conductor entre los mismos, dado que el planteamiento de la obtención de modelos y algoritmos de control diseñados requieren del empleo de alguna técnica de optimización que garantice la obtención de un óptimo global.

Como se ha comentado, la monitorización y control de invernaderos es hoy en día un campo en expansión, dado que este tipo de instalación se está haciendo cada vez más presente en el ámbito agronómico. Desde un punto de vista tecnológico los avances que parecen vislumbrarse en el futuro están asociados a la incorporación definitiva de las tecnologías de la información y las comunicaciones (redes inalámbricas, telefonía móvil, etc.). Respecto al ámbito científico, hay líneas de trabajo tanto en la definición de modelos de primeros principios como de caja negra. No obstante, parece que los primeros siguen teniendo cierta predominancia, por la facilidad con la que explican los fenómenos bajo invernadero. Respecto al control de invernaderos, propiamente dicho, la variedad es muy grande, pero se abren paso metodologías pragmáticas con incorporación de métodos heurísticos o de inteligencia artificial. Desde un punto de vista agronómico se trabaja intensamente en complementar el modelo del clima con el modelo de nutrición que están, a su vez, muy correlacionados con el modelo de evapotrans-

piración. Con ellos será posible establecer en el futuro nuevas metodologías de riego y fertilización basadas en magnitudes climáticas.

REFERENCIAS

- Albright, D., I. Seginer, L.S. Marsh y A. Oko (1985). In situ thermal calibration of unventilated greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* **31**, 265–281.
- Aström, K.J. y B. Witthenmark (1995). *Adaptive Control*. Addison Wesley, USA y Canadá.
- Baille, M., A. Baille y D. Delmon (1994). Microclimate and transpiration of a greenhouse rose crop. *Agric. Forest Meteor.* **71**, 83–87.
- Baille, M., R. Romero-Aranda y A. Baille (1996). Stomatal conductance of rose whole plants in greenhouse conditions. Analysis and modelling. *The Journal of Horticultural Science* **71**, 957–970.
- Blasco, X. (1998). Control Predictivo Basado en Modelos usando técnicas de Optimización Heurística. PhD thesis. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- Blasco, X., M. Martínez, J. Senent y J. Sanchis (1998). Generalized predictive control using genetic algorithms (GAGPC). An application to control of non-linear process with model uncertainty. *Lecture Notes in Artificial Intelligence* **1416**, 428–4437.
- Blasco, X., J.M. Herrero, M. Martínez y J. Senent (2001a). Nonlinear parametric model identification with Genetic Algorithms. Application to thermal process. *Lecture Notes in Computer Science* **2084**, 466–473.
- Blasco, X., M. Martínez, J. Senent y J. Sanchis (2001b). Model based predictive control using genetic algorithms, application to greenhouses climate control. *Lecture Notes in Computer Science* **2084**, 457–465.
- Boaventura, J., C. Couto y A. Ruano (2000). A greenhouse climate multivariable predictive controller. *Int. Conf. and British-Israeli workshop on greenhouse techniques towards the 3rd millennium. Acta Hort.* **534**, 269–273.
- Boulard, T., B. Draouiand y F. Neirac (1996). Calibration and validation of a greenhouse climate control model. *Acta Horticulturae* **406**, 49–61.
- Boulard, T. y A. Baille (1993). A simple climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. *Agric. Forest Meteor.* **65**, 145–157.
- Boulard, T. y B. Draoui (1995). Natural ventilation of greenhouse with continuous roof vents. measurements and data analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research* **61**, 27–36.
- Camacho, E.F. y C. Bordons (2004). Control predictivo: Pasado, presente y futuro. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* pp. 5–28.
- Chuine, I., P. Cour y D. Rousseau (1998). Fitting models predicting dates of flowering of temperate-zone trees using simulated annealing. *Plant, Cell and Environment.* **21**, 455–466.
- Coello, C., D. Veldhuizen y G. Lamont (2002). *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. Kluwer Academic Publishers.
- Ehrlich, H., M. Kühne y J. Jäkel (1996). Development of a fuzzy control system for greenhouses. *Acta Horticulturae* **406**, 463–470.
- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley, USA y Canadá.
- Grosdidier, P., B. Froisy y M. Hammann (1988). The IDCOP-M controller. In: *Proceedings of the 1988 IFAC Workshop on Model Based Process Control* (Y. Arkun T.J. McAvoy y E. Zafiriou, Eds.). Pergamon Press. Oxford. pp. 31–36.
- Gutman, P-O, I. Seginer y Ioslovich (1993). A non-linear optimal greenhouse control problem solved by linear programming. *Journal of Agricultural Engineering Research* pp. 335–351.
- Herrero, J.M., X. Blasco, M. Martínez y J. Sanchis (2002). Identification of continuous processes parameters using genetic algorithms. In: *Proceedings of 10th Mediterranean Conference on Control and Automation*. IEEE. Lisbon.
- Herrero, J.M., M. Martínez, X. Blasco y C. Ramos (2003). Identificación paramétrica del modelo no lineal de un invernadero mediante algoritmos genéticos. *XXIII Jornadas de Automática. León. España*.
- Herrero, J.M., X. Blasco, M. Martínez y C. Ramos (2005). Nonlinear robust identification using multiobjective evolutionary algorithms. *Lecture Notes in Computer Science* **3562**, 231–241.
- Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor: The University of Michigan Press. USA.
- Ioslovich, I., I. Seginer, P-O Gutman y M. Borshchevsky (1995). Sub-optimal CO2 enrichment of greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* **60**, 117–136.
- Ioslovich, I., P-O Gutman y I. Seginer (2003). Dominant parameter selection in the marginally identifiable case. *Mathematics and Computers in Simulation*.
- Johansson, R. (1993). *System modeling and identification*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Jolliet, O. y B. Bailey (1992). The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses:

- measurements and models comparison. *Agric. Forest. Meteor.* **58**, 43–62.
- Linker, R., I. Seginer y P.O. Gutman (1998). Optimal CO₂ control in a greenhouse modelled with neural networks.. *Computers and electronics in agriculture* **19**, 289–310.
- Linker, R., P.O. Gutman y I. Seginer (1999). Robust controllers for simultaneous control of temperature and CO₂ concentration in greenhouses. *Control Engineering Practice* **7**, 851–862.
- Linker, R., P.O. Gutman y I. Seginer (2000). Robust model-based failure detection and identification in greenhouses.. *Computers and Electronics in Agriculture* **26**(3), 255–270.
- Linker, R. y I. Seginer (2002). Greenhouse temperature modeling: A comparison between sigmoid neural networks and hybrid models. *Mathematics and Computers in Simulation*.
- Martínez, M., J.S. Senent y F.X. Blasco (1998). Generalized predictive control using genetic algorithms (GAGPC). *Engineering applications of artificial intelligence* **11**(3), 355–368.
- Martínez, M., J. Sanchis y X. Blasco (2005). Genetic algorithms for multiobjective controller design. *Lecture Notes in Computer Science* **3562**, 242–251.
- Martínez, P.F., D. Roca, R. Suay, M. Martínez, X. Blasco, J.M. Herrero y C. Ramos (2002). Avances en el control de los factores del clima para el cultivo en invernaderos. *Revista Comunidad Valenciana Agraria* (20), 29–47.
- Messac, A., E. Melachirinoudis y C.P. Sykam (2001). Mathematica and Pragmatic Perspectives of Physical Programming. *AIAA Journal* **39**(5), 885–893.
- Monteith, J.L. (1973). *Principles of environmental physics. Contemporary biology*. Edward Arnold Ed., UK.
- Morais, R. y J. Boaventura (2000). Agritronics: A distributed data acquisition and control network for agriculture environments. *Int. Conf. and British-Israeli workshop on greenhouse techniques towards the 3rd millennium. Acta Hort.* **534**, 319–325.
- Nielsen, B. y H. Madsen (1996). Identification of transfer functions for control of greenhouse air temperature. *Journal of Agricultural Engineering Research* **60**, 25–34.
- Pareto, V. (1964). *Cour d'économie politique. Librairie Droz-Geneve*.
- Pareto, V. (1971). *Manuale di economia politica, societa editrice libraria. MacMillan Press*.
- Piñón, S., E.F. Camacho M. Peña y B. Kuchen (2001). Robust predictive control for greenhouse using input/output linearization and linear matrix inequalities. *6th IFAC Symposium on Cost Automation. Berlin, Alemania*.
- Pronzalo, L. y E. Walter (1997). *Identification of parametric models from experimental data*. Springer Verlag.
- Rodríguez, F. (2002). Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero. PhD thesis. Universidad de Almería. Almería.
- Rodríguez, F. y M. Berenguel (2004). *Control y Robótica en Agricultura*. Universidad de Almería, Servicio de Publicaciones.
- Seginer, I., T. Boulard y J.B. Bailey (1994). Neural network models of the greenhouse climate. *Journal of Agricultural Engineering Research* **59**(3), 203–216.
- Seginer, I., F. Buwalda y G. van Straten (1998). Nitrate concentration in greenhouse lettuce: A modelling study. *Acta Horticulturae* **456**, 189–197.
- Seginer, I. (2002). The Penman-Monteith evapotranspiration equation as an element in greenhouse ventilation design.. *Journal of Agricultural Engineering Research* **82**(4), 423–439.
- Seginer, I. (2003). A dynamic model for nitrogen-stressed lettuce. *Annals of Botany* **91**, 623–635.
- Senent, J., M. Martínez, X. Blasco y J. Sanchis (1998). MIMO Predictive Control of Temperature and Humidity Inside a Greenhouse Using Simulated Annealing (SA) and Optimizer of a Multicriteria Index. *Lecture Notes in Artificial Intelligence* **1416**, 271–279.
- Serodio, C., J. Boaventura y C. Couto (2000). Bringing the world wide web to agricultural systems based on the java environmet. *Int. Conf. and British-Israeli workshop on greenhouse techniques towards the 3rd millennium. Acta Hort.* **534**, 293–297.
- Stanghellini, C. y T. de Jong (1995). A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* (76), 129–148.
- van Ooteghem, R.J.C., J.D. Stigter, L.G. van Willigenburg y G. van Straten (2004). Receding horizon optimal control of a solar greenhouse. *GreenSys2004, Leuven, septiembre* pp. 12–16.
- Young, P.C., A. Chotai y W. Tych (1993). Identification, estimation and true digital control of glasshouse system. In: *The Computerized Greenhouse*. pp. 3–50. Hashimoto Y., Bot G.P.A., Day W., Noanami H. Eds.

Apéndice A. MODELO CLIMÁTICO DETALLADO

De nuevo, para facilitar la tarea del lector, se presenta a continuación un apartado dedicado a notación, donde se enumeran alfabéticamente las variables y parámetros presentes en las ecuaciones de este Apéndice. En particular, se presentan los

rangos de los parámetros inciertos y que han sido objeto de identificación en éste artículo.

A.1 Ampliación de la notación.

- a : Constante para el flujo de renovación, [0.0005, 0.1].
- A : Área de viento, 130 m^2 .
- A_c : Coeficiente de pérdidas, [2, 20].
- A_i : Superficie del invernadero, 240 m^2 .
- C_p : Calor esp. del aire, $1003 \text{ J Kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
- C_{sat} : Coeficiente de saturación del aire, adimensional.
- D_i : Deficit de saturación, KPa .
- E : Evapotranspiración cultivo, $\text{KgH}_2\text{O s}^{-1}$.
- fog : Nebulización, $\text{KgH}_2\text{O s}^{-1}$.
- fog_{max} : Nebulización máxima, [0.001, 0.005] $\text{KgH}_2\text{O s}^{-1}$.
- F_v : Flujo de renovación del vapor de agua en el aire, $\text{KgH}_2\text{O s}^{-1}$.
- gwb : Conductancia de la capa límite, [0.001, 0.05] m s^{-1} .
- gws : Conductancia estomática, m s^{-1} .
- gws_{max} : Conductancia estomática máxima, [0.01, 0.03] m s^{-1} .
- gws_{min} : Conductancia estomática mínima, [0.0001, 0.005] ms^{-1} .
- G : Caudal de renovación del aire, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- G_o : Constante de fugas, [0.0005, 0.01].
- h_m : Coeficiente de conductividad entre masa térmica y aire, [1, 20] $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$.
- HR_i : Humedad relativa interior, %.
- HR_o : Humedad relativa exterior, %.
- k : Coeficiente de extinción de la radiación, [0.1, 0.7].
- k_a : Coeficiente de conductividad entre masa térmica y suelo, [0.5, 10] $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$.
- L : Índice de área foliar, [0.5, 2] $\text{m}_{hojas}^2 \text{ m}_{suelo}^{-2}$.
- MV_{fog} : Nebulización, %.
- MV_W : Calefacción, %.
- MV_α : Apertura de la ventana, %.
- $psat$: Presión de saturación del vapor de agua, KPa .
- P : Presión atmosférica, 98.1 KPa .
- Q_{cc} : Pérdidas de energía por conducción y convección, W .
- Q_e : Pérdidas de energía debidas a la evapotranspiración del cultivo, W .
- Q_f : Pérdidas hacia el fondo del suelo, W .
- Q_m : Intercambio de energía con la masa térmica, W .
- Q_n : Pérdidas de energía por nebulización, W .
- Q_s : Energía solar suministrada al aire, W .
- Q_{sm} : Energía almacenada por la masa térmica durante el día, W .
- Q_v : Intercambio de energía debido a la ventilación, W .
- Rn : Radiación solar absorbida por las plantas, $W \text{ m}^{-2}$:

- S_o : Radiación solar, $W \text{ m}^{-2}$.
- T_i : Temperatura interior, $^\circ\text{C}$.
- T_m : Temperatura masa térmica, $^\circ\text{C}$.
- T_o : Temperatura exterior, $^\circ\text{C}$.
- T_{ref} : Temperatura del suelo a la profundidad de referencia, [10, 20] $^\circ\text{C}$.
- V : Velocidad del viento, m s^{-1} .
- W : Potencia de la calefacción, W .
- W_{max} : Potencia máxima de la calefacción, 5000 W .
- x_i : Humedad absoluta int., $\text{KgH}_2\text{O Kg}_{aire}^{-1}$.
- x_o : Humedad absoluta ext., $\text{KgH}_2\text{O Kg}_{aire}^{-1}$.
- x_{sat} : Humedad absoluta de saturación, $\text{KgH}_2\text{O Kg}_{aire}^{-1}$.
- z_{ref} : Profundidad de referencia, 6 m .
- α : Ángulo de la ventana, $^\circ$.
- α_m : Factor de calor absorbido por la masa térmica, [0.01, 0.3].
- α_{max} : Ángulo máximo de la ventana, 12 ° .
- Δ : Pendiente de saturación del vapor de agua $\text{KPa}^\circ\text{C}^{-1}$.
- γ : Constante Psicométrica, $0.066 \text{ KPa}^\circ\text{C}^{-1}$.
- λ : Calor latente de vaporización, J Kg^{-1} .
- ρ : Densidad del aire, $1.25 \text{ Kg}_{aire} \text{ m}^{-3}$.
- τ : Coeficiente de transmisión del invernadero, [0.4, 0.9].

A.2 Ecuaciones complementarias.

Control de apertura de la ventana:

$$\alpha = \frac{MV_\alpha}{100} \alpha_{max} \quad (\text{A.1})$$

Control de la calefacción:

$$W = \frac{MV_W}{100} W_{max} \quad (\text{A.2})$$

Control de la nebulización:

$$fog = \frac{MV_{fog}}{100} fog_{max} \quad (\text{A.3})$$

Flujo de renovación del vapor de agua en el aire:

$$F_v = \rho G(x_o - x_i) \quad (\text{A.4})$$

Caudal de renovación del aire (Boulard y Draoui, 1995):

$$G = AV(a\alpha + G_o) \quad (\text{A.5})$$

Coeficiente de saturación del aire:

$$C_{sat} = \begin{cases} 1 & x_i < x_{sat} \\ 0 & x_i = x_{sat} \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

Relación entre humedad absoluta y relativa ²⁰:

²⁰Según los casos, corresponde al interior (T_i, HR_i, x_i) o exterior T_o, HR_o, x_o del invernadero. Permite también el cálculo de la humedad absoluta de saturación x_{sat} correspondiente a $HR = 100 \%$.

$$HR = \begin{cases} 100 & HR > 100 \\ HR & HR \leq 100 \end{cases}$$

$$HR = \frac{100xP}{0.611psat(T)} \quad (A.7)$$

$$p_{sat}(T) = 0.61 [1 + 1.414 \sin(5.82e^{-3}T)]^{8.827} \quad (A.8)$$

Evapotranspiración del cultivo (Monteith, 1973):

$$E = \frac{A_i(\Delta Rn + 2L\rho C_p D_i gwb)}{\left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{gwb}{gws}\right)\right] \lambda} \quad (A.9)$$

$$\Delta = p_{sat}(T_i + 0.5) - p_{sat}(T_i - 0.5) \quad (A.10)$$

$$Rn = (1 - e^{kL})\tau So \quad (A.11)$$

$$D_i = p_{sat}(T_i) \left[1 - \frac{HR_i}{100}\right] \quad (A.12)$$

$$\lambda = (3.1468 - 0.002365(T_i + 273))10^6 \quad (A.13)$$

$$gws = gws_{min} + (gws_{max} - gws_{min}) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau So}{160}\right)\right] g_D \quad (A.14)$$

$$g_D = \begin{cases} \frac{0.39}{0.029 + D_i} & D_i \geq 0.361 \\ 1 & D_i < 0.361 \end{cases}$$

Energía solar suministra al aire:

$$Q_s = A_i \tau So \quad (A.15)$$

Intercambio de energía por conducción y convección:

$$Q_{cc} = A_i A_c (T_i - T_o) \quad (A.16)$$

Pérdidas debidas a la evapotranspiración:

$$Q_e = \lambda E \quad (A.17)$$

Intercambio de energía debido a la ventilación:

$$Q_v = \rho C_p G (T_i - T_o) \quad (A.18)$$

Pérdidas por nebulización:

$$Q_n = \lambda f o g \quad (A.19)$$

Intercambio de energía entre la masa térmica y el aire interior:

$$Q_m = A_i h_m (T_m - T_i) \quad (A.20)$$

Energía almacenada por la masa térmica durante el día:

$$Q_{sm} = \alpha_m Q_s \quad (A.21)$$

Pérdidas de energía hacia el fondo del suelo:

$$Q_f = A_i k_a \left(\frac{T_m - T_{ref}}{z_{ref}}\right) \quad (A.22)$$