

**PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN DE EXCELENCIA  
(Convocatoria 2010)**

Organismo	<b>Universidad de Almería</b>
Investigador Principal	<b>Francisco de Asís Rodríguez Díaz</b>
Denominación del proyecto	<b>Control del crecimiento de cultivos bajo invernadero optimizando criterios de sostenibilidad, económicos y de eficiencia energética (CONTROLCROP)</b>

**RESUMEN DE LA PROPUESTA**

Esta propuesta constituye una versión mejorada respecto a la presentada en la convocatoria de 2009, que fue bien calificada pero no superó el umbral establecido para la financiación. Se han tenido en cuenta todos los comentarios realizados por los revisores para plantear el proyecto multidisciplinar en una temática de interés estratégico para Andalucía, cuyos principales aspectos se resumen a continuación.

En este proyecto se pretende plantear una estrategia para el control del crecimiento de cultivos bajo invernadero optimizando criterios de sostenibilidad, económicos, de eficiencia energética y de calidad. En concreto, el proyecto se basa en el desarrollo de un sistema de control jerárquico que integre criterios económicos (de forma que se maximice la diferencia entre el beneficio bruto obtenido por la venta del cultivo y los costes de producción), de ahorro de energía, de mejora de la eficiencia en el uso del agua y de aumento de la calidad de los productos hortícolas. De esta forma, el productor o el técnico responsable podrá reconfigurar el funcionamiento de la explotación en base a lo que se desea obtener en cada escenario que imponga el variable mercado agrícola. La consecución del objetivo principal de este proyecto requiere abordar tres problemas fundamentales: 1) el desarrollo de un marco de referencia de control con múltiples objetivos de la producción en el agrosistema invernadero dentro de una estructura de control óptimo jerárquico, abordando el problema en su conjunto, analizando las interacciones entre estimación y los niveles de control jerárquico para obtener referencias de temperatura, concentración de CO<sub>2</sub> y cantidad y calidad de agua; 2) el desarrollo de estrategias de control de nuevas variables climáticas como la concentración de CO<sub>2</sub>, combinado con la regulación de la temperatura usando fuentes renovables de energía, como un grado de libertad más para el control del crecimiento del cultivo; y 3) el desarrollo de estrategias de control de riego y nutrientes de forma que se realice un uso eficiente del agua y se disminuyan la deposición de sales contaminantes. Para estos esquemas de control se analizará la estabilidad, robustez y convergencia cuando se considera el sistema en su conjunto y cuando el sistema se encuentra sometido a errores de modelado y perturbaciones en cualquiera de los niveles de la jerarquía de control.

Para llevar a cabo el desarrollo del proyecto se cuenta con un equipo de trabajo altamente multidisciplinar (con personal perteneciente a diversas instituciones andaluzas) y con una trayectoria importante en el campo del modelado y control de procesos agrícolas y sistemas basados en energías renovables. El equipo de investigadores se encuentra liderado por los miembros del grupo de Automática, Electrónica y Robótica (TEP-197) que en este último año se encuentra en 2º lugar de la clasificación de grupos de investigación de la Universidad de Almería (1er puesto en el área de Tecnologías de la Producción - TEP) y la 8ª posición en TEP a nivel andaluz. Además, los investigadores poseen estrechas relaciones con grupos de investigación internacionales dentro del ámbito del control automático, aspecto que será explotado durante la evolución del proyecto con el fin de aportar un carácter internacional a los resultados. El cumplimiento de los objetivos planteados supondrá una contribución significativa que, además de tener un gran impacto a nivel científico, tendrá una alta componente de transferencia tecnología, algo que se refleja en el apoyo recibido por parte de varias empresas y centros de investigación relacionados con la temática del proyecto: Fundación TECNOVA, Fundación Cajamar, Centro de Investigaciones de la Energía Solar, CADIA Ingeniería, Grupo Hispatec y Nuevas Tecnologías y Recursos Siglo XXII.

Finalmente, destacar que el desarrollo de este proyecto es una continuación natural de otros proyectos de ámbito nacional en los que se ha estado trabajando durante estos años, concretamente CICYT-DPI2005-04568 y CICYT-DPI-2007-07444-C04-04.

# **Control del crecimiento de cultivos bajo invernadero optimizando criterios de sostenibilidad, económicos y de eficiencia energética (CONTROLCROP)**

## **Contenido**

1. Antecedentes .....	3
2. Objetivos del proyecto .....	9
3. Metodología y plan de trabajo .....	9
4. Resultados esperados, difusión y explotación .....	21
5. Relación del personal del equipo que participa en la actividad .....	23
6. Financiación pública y/o privada en otros proyectos o contratos I+D.....	27
7. Descripción del carácter multidisciplinar y transversal del proyecto .....	30
8. Colaboración internacional .....	30
9. Entes promotores observadores (EPO) .....	31
10. Presupuesto global del proyecto .....	33

# 1. ANTECEDENTES

Una de las principales fuentes económicas de la provincia de Almería es el cultivo de productos hortícolas bajo invernadero, con más de 25000 hectáreas de superficie. Atendiendo a factores meramente económicos, la necesidad de ser competitivos a nivel europeo y mundial, obliga a la introducción de nuevas tecnologías en el campo de la mecanización agraria. Haciendo un poco de historia, España pudo competir en el mercado europeo por sus menores costos o por la oferta de productos fuera de estación, siendo en esta época la competencia con países en vías de desarrollo poco importante. Hoy en cambio tiene que competir con sectores muy tecnificados de países desarrollados, que ofertan buena calidad y servicio a costo medio, y con nuevos sectores en países menos desarrollados con costes de producción muy bajos. Únicamente, la mejora de la productividad y la calidad pueden permitir el mantenimiento de la rentabilidad, siendo la tecnología parte esencial de este proceso.

El invernadero es un recinto cerrado en el que se busca producir la máxima cantidad de un producto, con la mayor calidad, al coste mínimo posible y, reduciendo al máximo el impacto medioambiental. Las variables climáticas, de nutrición, bióticas y de manejo cultural influyen en el crecimiento y desarrollo del cultivo y, la gestión adecuada de éstas permite maximizar la diferencia entre los ingresos por venta de la producción y los costes asociados, evaluando a la vez los posibles riesgos a lo largo del ciclo de cultivo, gestionando adecuadamente los recursos y fuentes de energía con el fin de alcanzar la máxima sostenibilidad posible. Por tanto, definir las consignas de manejo del invernadero constituye un típico problema de control óptimo.

En la actualidad existe un gran interés en la introducción de tecnología no sólo en las fases del proceso productivo, sino también en la cadena de comercialización agrícola (desde la germinación de las semillas hasta la venta al consumidor). Evidentemente, la fase de producción es fundamental ya que en ella se definen las características del producto, por lo que es necesario realizar los mayores esfuerzos a fin de mejorar tanto la cantidad como la calidad. Debido a que el crecimiento de un cultivo se encuentra fundamentalmente determinado por las variables climáticas del entorno en el que se encuentra, por el adecuado suministro de agua y nutrientes y por el control oportuno de plagas y enfermedades, controlando estas variables se podrá controlar en gran medida su crecimiento. Por esta razón, un invernadero es ideal para cultivar, pues se pueden manejar estas variables para alcanzar un crecimiento y desarrollo óptimo de las plantas.

La introducción de computadores en este ámbito ha significado la posibilidad de controlar las variables y de adaptar los parámetros de control de forma automatizada. No obstante, en la mayoría de los casos el computador se emplea como un operador que trata con los actuadores, mientras que las estrategias de control son fundamentalmente empíricas y reflejan los métodos clásicos utilizados por los agricultores para manejar los actuadores [Bak95].

Los sistemas comerciales más avanzados de control climático que se implantan en la actualidad contienen muchas reglas heurísticas y en muchos casos varios cientos de parámetros a definir, relacionados con las trayectorias de clima y con los actuadores. Los principales problemas detectados en este tipo de controladores consisten en que [Tap00]:

- El seguimiento de las consignas no es el ideal, ya que hay interacciones entre los bucles de control y existen restricciones en los dispositivos de control.
- Las trayectorias de las variables de clima no están definidas de manera científica respecto al comportamiento del cultivo, por lo que se presenta el problema de ineficiencia en la utilización de la energía.

- El número de parámetros y reglas de decisión de los controladores es tan grande que el sistema no es transparente y por tanto los efectos sobre la eficiencia de energía o el rendimiento de los actuadores no son fáciles de discernir.

A los problemas anteriores hay que añadir que en los sistemas instalados fuera de las condiciones donde se desarrollaron se requiere de un proceso de adaptación y refinamiento de los diferentes parámetros operativos para conseguir resultados aceptables.

En sistemas de control más avanzados, que son objeto de investigación en la actualidad, el control se realiza basándose en modelos matemáticos, como ocurre generalmente en la industria de procesos. A partir de una función objetivo, con el uso de modelos del clima y del cultivo, y la utilización de técnicas de optimización, se determinan las trayectorias óptimas a seguir por los controladores durante el ciclo de cultivo [Hen94], [Tap00], [Rod02], [Ios02], [Lop03], [Hen06]. Existen pocos trabajos publicados con resultados experimentales, habiéndose simulado en la mayoría las trayectorias óptimas de las variables climáticas [Hen94], [Tap00], [Rod02], [Ios02]. En los trabajos de campo donde se han aplicado estas técnicas a la producción en invernaderos se han obtenido ahorros en los costes de energía [Tap00]. Aunque en estas experiencias preliminares se han obtenido resultados aceptables, los efectos económicos son difíciles de evaluar con los pocos ensayos realizados, y sólo se puede probar su validez con una extensiva aplicación de estas técnicas en instalaciones comerciales reales [Str00].

Abordar el problema del manejo del agrosistema invernadero desde el enfoque de control óptimo no es un problema trivial [Hen94]. La naturaleza del sistema es tal que analizado desde una perspectiva integral requiere del establecimiento de los nexos necesarios, que van desde el manejo de fotosíntesis o respiración en el nivel más detallado del sistema hasta la predicción de la tendencia de mercados del producto en cuestión. Ante la magnitud y complejidad del problema, éste se ha sido tratado como un sistema de control jerárquico [Cha93], [Tan93], [Hen94], [Tap00], [Rod02]. La suposición fundamental para la descomposición del sistema es la existencia de distintas escalas de tiempo (adaptación de subsistemas a los tiempos de respuesta). Mientras que el clima del invernadero cambia en cuestión de segundos o minutos, el cultivo desarrolla cambios después de horas o días. Se puede establecer entonces un sistema estructurado en capas que permite la interacción entre ellas de manera que las entradas a cada nivel inferior son las salidas del nivel superior [Rod03].

En una primera aproximación, el sistema de producción se puede jerarquizar en los siguientes niveles: una capa inferior de control de clima y suministro de agua y nutrientes (con escala de tiempo de minutos), una capa media correspondiente al cultivo, (con escala de tiempo de días) y una capa superior relacionada con el mercado (con escala de tiempo de meses) [Tan93], [Rod02], [Rod03]. Cada una de las capas opera de la siguiente manera [Tan93], [Rod02]:

- *Capa superior: mercado.* En función de unas condiciones iniciales estratégicas, como fecha de recolección o producción esperada, y de cómo evolucione el mercado durante la campaña agrícola, se determina la trayectoria de crecimiento que debe seguir el cultivo para optimizar el beneficio. Se le denomina *control táctico* y sería conveniente disponer de modelos de mercado que puedan predecir la demanda de los productos y otra serie de parámetros económicos de interés.
- *Capa intermedia: cultivo.* En base a las consignas recibidas de la capa superior, debe determinar las trayectorias que deben seguir las variables climáticas y de aporte de agua y nutrientes implicadas en el crecimiento del cultivo. Como todo el sistema se basa en predicciones a largo plazo, es necesaria la utilización de modelos de crecimiento y desarrollo para poder conocer en qué estado se encontrará el cultivo en función de las variables antes mencionadas.
- *Capa inferior: invernadero.* En base a las consignas recibidas de la capa intermedia, debe calcular el estado en el que deben encontrarse los sistemas de actuación instalados para modificar las condiciones climáticas, de riego y nutrición, de forma que se alcance el estado deseado del cultivo que optimice los objetivos establecidos.

En la mayoría de los trabajos recientes de investigación sobre control óptimo de la producción de cultivos en invernaderos, el problema se ha abordado desde el punto de vista de la optimización de un único objetivo, que consiste generalmente en la obtención de máximos beneficios por parte del agricultor [Hen94], [Tap00], [Rod02], o bien en algún otro criterio como la minimización de la cantidad de nitratos en el tejido de la planta [Ios02], [Lop03], o el uso eficiente del agua [Bry08], el aporte de CO<sub>2</sub> [Cha02a] [Cha02b]; y sigue siendo un problema sin resolver definitivamente ya que siguen apareciendo trabajos de investigación relacionados como los recientes [Hen09], donde se analiza la inclusión de la inyección de CO<sub>2</sub> y [Kör08] donde se estudia criterios de integrales térmicas en la toma de decisiones de control. Recientemente, se han obtenido nuevas contribuciones en el campo del control óptimo del clima en cultivos bajo invernaderos [Ios09] donde se han propuesto esquemas de una política de control óptima basada en el formalismo Hamilton–Jacobi–Bellman obteniendo resultados prometedores en simulación. Por tanto, el objetivo de este proyecto tiene como fin proponer una solución al problema del control de cultivo bajo invernadero enmarcada en un problema de optimización multiobjetivo junto con una arquitectura de control jerárquico y validarla en un invernadero real con el fin de obtener resultados experimentales.

Si bien los métodos de control se han enfocado a la solución de un único objetivo, muchos problemas de la naturaleza presentan la necesidad de optimizar varios objetivos a la vez, muchas veces en conflicto entre ellos [Coe03]. Bajo este enfoque se requiere una noción diferente de óptimo, siendo la más aceptada en el ámbito de la optimización multiobjetivo aquella que permite encontrar soluciones de compromiso, en las que se puede satisfacer gradualmente un objetivo a costa de otros [Coe03], es decir, un problema de optimización multiobjetivo puede ser definido como la búsqueda de un vector de variables de decisión que satisfaga una serie de restricciones y optimice una función vectorial cuyos elementos representan las funciones objetivo [Ocy84]. Los problemas caracterizados por objetivos en competición o conflicto se consideran habitualmente problemas de optimización multiobjetivo donde el problema se plantea como la minimización (o maximización) simultánea de  $n$  objetivos  $\varphi_i(p)$ , de un vector de variables  $p$  en el universo  $U$  [Liu03], esto es:

$$\min_{p \in U} (\varphi_1(p), \varphi_2(p), \dots, \varphi_n(p))$$

que satisfaga  $m$  restricciones de desigualdad

$$g_i(p) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

y  $j$  restricciones de igualdad

$$h_i(p) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, j$$

El problema no tiene una solución óptima que pueda optimizar simultáneamente todos los objetivos, pero existen un conjunto de soluciones eficientes o no dominadas conocidas como Pareto-óptimas [Liu08]. Este conjunto de soluciones permite encontrar un compromiso en el proceso de decisión.

Aunque hasta el momento ha predominado el criterio de maximizar beneficios en el sistema de producción en invernadero [Hen94], [Tap00], [Rod02], están surgiendo otras necesidades imperativas relacionadas con la búsqueda de calidad [Caj04], [Uff00], la reducción de contaminantes al ambiente [Sta03a], [Sid98] o la eficiencia en el uso de agua, fundamentalmente en regiones donde es un recurso escaso [Sta03a], [Pas04]. Por el fuerte impacto que representa la emisión de contaminantes a los mantos acuíferos en la producción en invernadero [Sid98], [Sta03a], el problema de reducción de contaminantes se ha incluido en las recientes directivas europeas sobre el ambiente [Pas04].

El problema de la producción desde el punto de vista del control óptimo jerárquico se resuelve, por tanto, de forma más completa cuando se tienen en consideración los distintos objetivos, pero a la vez se complica, porque la consecución de dichos objetivos puede establecer relaciones en conflicto, como son la búsqueda simultánea de la máxima calidad y rendimientos, o la reducción de costes y los máximos rendimientos [Son00], [Li01b], [Mag03], [Cha93].

De lo anterior se puede concluir que el problema del manejo del agrosistema invernadero puede ser planteado como un problema de optimización desde un enfoque de múltiples objetivos, con algunos de ellos en conflicto.

A pesar de que el enfoque multiobjetivo ha sido utilizado en muy diversos ámbitos, con dinámicas muy complejas [Sub06], como las aplicaciones en línea para el control de procesos industriales de manufactura de cristal [Ber01], control del clima en edificios [Ber99], optimización de estructuras [Coe96], inversión de capitales [Doe04], tratamiento de aguas residuales [Cad04], manejo de calidad de agua [Yan99], manejo de agua subterránea [Hel01], manejo de ecosistemas forestales [Oli03], por citar sólo algunos ejemplos, en los sistemas de producción intensiva en invernadero no hay muchas referencias sobre el tema, con excepción de un esbozo general en [Bak98] en el que se delinea cómo podría ser la aplicación de toma de decisiones mediante programación matemática, y el enfoque general ha sido el optimizar un único objetivo.

En este marco de trabajo, el grupo solicitante del proyecto de excelencia planteó en un proyecto anterior una arquitectura jerárquica que se muestra en la figura 1 [Rod03], que optimiza la rentabilidad de la producción en base, únicamente, a las variables climáticas, con la que se han obtenido buenos resultados en simulación. En estos momentos, es complicada la integración del tercer nivel en la zona del sudeste español, ya que es necesaria la utilización de modelos de mercado que todavía no se han desarrollado.

Los trabajos previos del grupo relacionados con esta temática se han desarrollado en el contexto de los siguientes proyectos de investigación, requiriendo un esfuerzo importante de experimentación en campo:

- *Modelado y control óptimo de sistemas no lineales multivariantes* (CICYT QUI99-0663-C02-01/02, 1999-2002) coordinado entre la Universidad de Sevilla (D. Eduardo Fernández Camacho) y la Universidad de Almería (D. Manuel Berenguel Soria). Como su nombre indica su objetivo principal consistía en el modelado y control de sistemas no lineales multivariantes. En concreto, la Universidad de Almería realizó sus investigaciones en el control de un fotobiorreactor para la producción de microalgas y en el modelado y control de las variables climáticas en el interior de invernadero, concretamente la temperatura con ventilación natural y calefacción por aire caliente.
- *Control predictivo para procesos con incertidumbres acotadas*. Proyecto financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología CICYT-DPI-2002-04375-C03-03 coordinado entre la Universidad de Sevilla (D. Eduardo Fernández Camacho) y la Universidad de Almería (D. Manuel Berenguel Soria), donde se mejoraron los algoritmos de control de temperatura utilizando técnicas de control predictivo para ahorro energético en el consumo de combustible.
- *Control predictivo jerárquico de procesos en operación semicontinua*. Proyecto financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología CICYT-DPI-2004-07444-C04-04 coordinado entre la Universidad de Sevilla (D. Carlos Bordons Alba) y la Universidad de Almería (D. Manuel Berenguel Soria), donde se planteó la arquitectura jerárquica descrita en la figura 1, probándose en simulación y, se realizaron los primeros ensayos de control del aporte de agua.
- *Control jerárquico de procesos con conmutación en el modo de operación: aplicaciones a plantas solares e invernaderos*. Proyecto financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología CICYT-DPI-2007-07444-C04-04 coordinado entre la Universidad de Sevilla (Teodoro Rafael Álamo Cantarero) y la Universidad de Almería (D. Manuel Berenguel Soria), y actualmente activo donde se están analizando técnicas de control híbrido y control basado en eventos para el control de la temperatura y humedad en el interior de invernadero combinando combustibles fósiles y el reciclado de los residuos de biomasa que se producen a final de las campañas agrícolas, y la utilización combinada de calefacción por aire y calefacción por tuberías de agua.

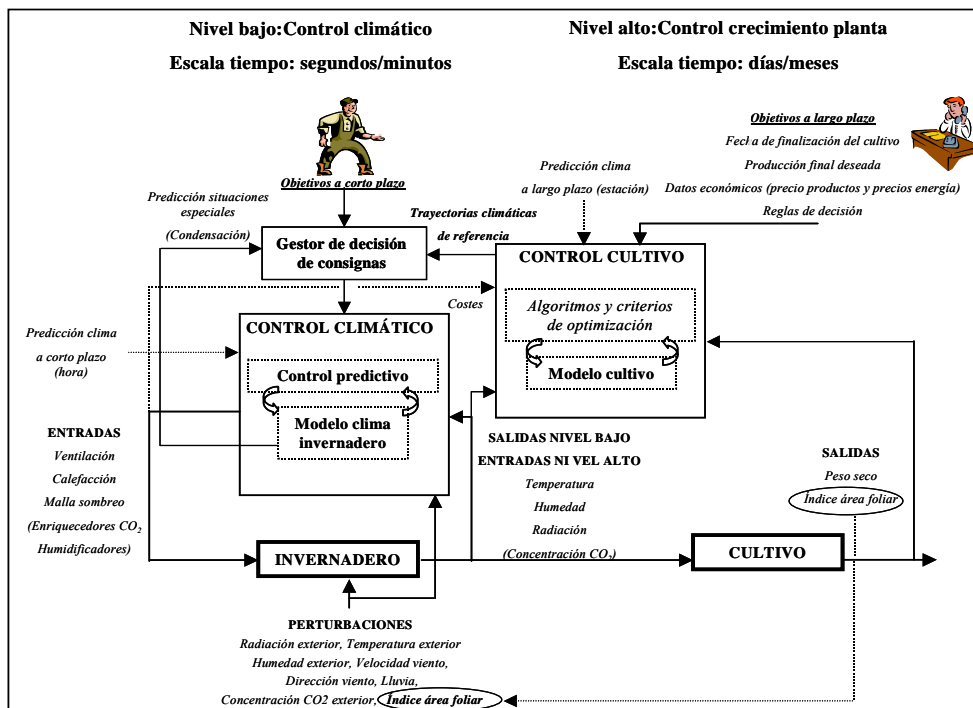


Figura 1. Esquema de control jerárquico a dos niveles de la producción de un cultivo bajo invernadero

Como se puede comprobar, estos proyectos se han centrado principalmente en la capa de bajo nivel de control de las variables climáticas, concretamente temperatura y humedad, y en plantear la estructura de control jerárquico del crecimiento del cultivo para optimizar el beneficio del productor, por lo que en la presente solicitud se pretende cubrir nuevos objetivos como la calidad de los frutos, el uso eficiente de la fertilización para el disminuir el consumo de agua y la deposición de contaminantes como los nitratos. Por otra parte, y una vez instalado el sistema de calefacción por tuberías de agua caliente, se ha abierto la posibilidad de poder controlar la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero al utilizar una caldera de biomasa, lo que aporta un grado de libertad mayor en el crecimiento del cultivo que no se había considerado en el proyecto CICYT-DPI-2007-07444-C04-04 activo y que se podría cubrir con este proyecto de excelencia. De forma global, con el proyecto se disminuirán las emisiones de CO<sub>2</sub> globales, ya que se cambiará un combustible convencional por biomasa que presenta un balance de CO<sub>2</sub> neutro, mejorando la eficiencia energética del sistema invernadero.

## Referencias

- [Bak95] Bakker J.C., Challa H. 1995. Aim of the Greenhouse Climate Control. In: *Greenhouse Climate Control: An Integrated Approach*. Eds. Bakker, J.C., Bot, G.P.A., Challa, H., Van de Braak, N.J. Wageningen. p. 1-3.
- [Bak98] Bakker E.J., van Sanden P.A.C. 1998. Application of multiple criteria decision making for the design and analysis of greenhouse cropping systems. *Acta Horticulturae* 456:509-514.
- [Ber01] Bernard T., Sajidman M., Kuntze H.B. 2001. A new fuzzy-based multiobjective optimization concept for process control systems. In: *Fuzzy days*. Ed. Reusch B. Springer Verlag. pp. 653-670.
- [Ber99] Bernard Th., Kuntze H.B. 1999. Multiobjective optimization of building climate control systems using fuzzy logic. *European Control Conference, ECC99*. Karlsruhe, Alemania. pp. 851-856.
- [Brd08] Brdys, M. A., Grochowski, M., Gminski, T., Konarczak, K., & Drew, M. ; 2008; *Hierarchical predictive control of integrated wastewater treatment systems*; *Control Engineering Practice*, 16, 751-767.
- [Cad04] Cadet C., Béteau J.F., Hernández C. 2004. Multicriteria control strategy for cost/quality compromise in wastewater treatment plants. *Control Engineering Practice* 12:335-347.
- [Caj04] Cajamar 2004. Análisis de la campaña hortofrutícola de Almería. Campaña 2003/2004. *Informes y Monografía* 5. 39 pp.
- [Cha02a] Chalabi, Z. S., Biro, A., Bailey, B. J., Aikman, D. P., & Cockshull, K. E.; 2002; Optimal control strategies for carbon dioxide enrichment in greenhouse tomato crops—Part 2: Using the exhaust gases of natural gas fired boilers. *Biosystems Engineering*, 81(3), 323-332.
- [Cha02b] Chalabi, Z. S., Biro, A., Bailey, B. J., Aikman, D. P., & Cockshull, K. E.; 2002; Optimal control strategies for carbon dioxide enrichment in greenhouse tomato crops—Part 1: Using pure carbon dioxide. *Biosystems Engineering*, 81(4), 421-431.

- [Cha93] Challa H., van Straten G. 1993. Optimal diurnal climate control in greenhouses as related to greenhouse management and crop requirements. In: *The computerized greenhouse*. Eds. Hashimoto Y., Bot G., Tantau H.J., Day W., Nonami H. Academic Press pp. 119-137.
- [Coe03] Coello C.A. 2003. Guest Editorial: Special Issue on Evolutionary Multiobjective Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 7(2):97-99.
- [Coe96] Coello C.A. 1996. *An empirical study of evolutionary techniques for multiobjective optimization in engineering design*. Ph. D. Thesis. Tulane University. 437 pp.
- [Doe04] Doerner K.F., Gutjahr W.J., Hartl R.F., Strauss C., Stummer C. 2004. Pareto ant colony optimization with ILP preprocessing in multiobjective project portfolio selection. *European Journal of Operational Research*. En prensa.
- [Hel01] Hellers P. 2001. *Groundwater management for agriculture and nature: an economic analysis*. Ph. D. Thesis. Wageningen University. The Netherlands. 126 pp.
- [Hen09] Van Henten, E.J.; Bontsema, J.; 2009; *A Time-scale decomposition of an optimal control problem in greenhouse climate management*; Control Engineering Practice (17) 88-96
- [Hen06] van Henten, E.J., Buwalda, F., de Zwart, H.F., de Gelder, A., Hemming, J. and Bontsema, J. 2006. *Toward an optimal control strategy for sweet pepper cultivation - 2. Optimization of the yield pattern and energy efficiency*. Acta Hort. (ISHS) 718:391-398
- [Hen94] van Henten E.J. 1994. *Greenhouse climate management: an optimal control approach*. Ph. D. Thesis. Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 329 pp.
- [Ios09] Ioslovich, I., Gutman, P.O., and Linker, R.; 2009. *Hamilton-jacobibellman formalism for optimal climate control of greenhouse crop*. Automatica, 45(5):1227-1231.
- [Ios02] Ioslovich I., Seginer I. 2002. *Acceptable nitrate concentration of greenhouse lettuce: Two optimal control policies*. Biosystems Engineering 83:199-215.
- [Kör08] Körner, O.; Van Straten, G.; 2008; *Decision support for dynamic greenhouse climate control strategies*; Computers and Electronics in Agriculture, (60), 1, pp 18-30
- [Li01b] Li Y.L., Stanghellini C., Challa H. 2001. Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Scientia Horticulturae* 88:11-29.
- [Liu03] G.P. Liu G, J.B. Yang, J.F. Whidborne. 2003. *Multiobjective Optimisation and Control*. Research Studies Press. 320 pp.
- [Lop03] López-Cruz I., van Willigenburg L.G., van Straten G. 2003. Optimal control of nitrate in lettuce by a hybrid approach: differential evolution and adjustable control weight gradient algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture* 40:179-197.
- [Mag03] Magán C.J.J. 2003. Efectos de la salinidad sobre el tomate en cultivo en sustrato en las condiciones del sudeste peninsular: resultados experimentales. En: *Mejora de la eficiencia en el uso del agua en cultivos protegidos*. Eds. Fernández F.M., Lorenzo M.P., Cuadrado G.M.I. Almería 2003. pp. 169-187.
- [Ocy84] Oczyszka, A. 1984. *Multicriteria optimization for engineering design*. In: Design Optimization. J.S. Gero Ed. Academic Press.
- [Oli03] de Oliveira F., Patias N.M., Sanquetta C.R. 2003. Goal programming in a planning problem. *Applied Mathematics and Computation* 140:165-178.
- [Pas04] de Pascale S., Maggio A. 2004. Sustainable protected cultivation at a Mediterranean climate perspectives and challenges. *Proceedings of Greensys 2004*. Leuven, Belgium. 16 pp.
- [Rod02] Rodríguez F. 2002. *Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero*. Tesis Doctoral. Universidad de Almería, España. 366 pp.
- [Rod03] Rodríguez F., Berenguel, M., Arahal M.R. 2003. A hierarchical control system for maximizing profit in greenhouse crop production. *Proceedings of the European Control Conference*. Cambridge, U.K. 8 pp.
- [Sid98] Siddiqi M.Y., Kronzucker H.J., Britto D.T., Glass A.D.M. 1998. Growth of a tomato crop at reduced nutrient concentrations as a strategy to limit eutrophication. *Journal of Plant Nutrition* 21(9):1879-1895.
- [Son00] Sonneveld C. 2000. *Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture*. Ph. D. Thesis. Wageningen University. The Netherlands. 151 pp.
- [Sta03a] Stanghellini C., Kempkes F.L.K., Knies P. 2003. Enhancing environmental quality in agricultural systems. *Acta Horticulturae* 609:277-283.
- [Sub06] Subbu, R., Bonissone, P., Eklund, N., Weizhong, Y., Iyer, N., Feng, X., Rasik, S., 2006. *Management of Complex Dynamic Systems based on Model-Predictive Multi-objective Optimization*. Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications. Proceedings of 2006 IEEE International Conference, July, pp. 64-69.
- [Tan93] Tantau H.J. 1993. Optimal control for plants production in greenhouses. In: *The Computerized Greenhouse*. Eds. Hashimoto Y., Bot G., Tantau H.J., Day W., Nonami H. Academic Press. USA. pp. 139-152.
- [Tap00] Tap F. 2000. *Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production*. Ph. D. Thesis. Wageningen University. The Netherlands. 127 pp.
- [Uff00] van Uffelen R.L.M., van der Mass A.A., Vreemolen P.C.M., Ammerlaan J.C.J. 2000. TQM applied to the Dutch glasshouse industry: state of the art in 2000. *Acta Horticulturae* 536:679-686.



## 2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal de este proyecto es el diseño e implementación (utilizando sistemas de coste bajo/medio) de un sistema de control jerárquico multiobjetivo del crecimiento de cultivos bajo invernadero en función del clima interior y de la fertirrigación, en el que se puedan integrar criterios económicos de forma que se maximice la diferencia entre el beneficio bruto obtenido por la venta del cultivo y los costes de producción, se ahorre energía eléctrica y combustible fósil, se mejore el uso de la eficiencia del agua y se puede aumentar la calidad de los productos hortícolas.

Para la consecución de este objetivo es necesario el establecimiento y cumplimiento de los siguientes subobjetivos:

1. Desarrollar un marco de referencia de control con múltiples objetivos de la producción en el agrosistema invernadero dentro de una estructura de control óptimo jerárquico.
2. Diseñar e implementar técnicas de control multivariable de las variables climáticas que afectan directamente al crecimiento de cultivos como la temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta aspectos de ahorro energético. En este sentido se desarrollarán estrategias de control predictivo (Model Predictive Control – MPC) incluyendo formulaciones de control predictivo cooperativo para un manejo óptimo de los distintos subsistemas existentes. Destacar que el principal objetivo será el desarrollo de estrategias con elevado potencial de aplicación práctica.
3. Diseñar e implementar técnicas de control de irrigación basadas en modelos de las necesidades hídricas de los cultivos para realizar un uso eficiente de agua y de la conductividad eléctrica de la fertirrigación para considerar el objetivo de la calidad de los productos hortícolas.

## 3. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

### 3.1. Instalaciones disponibles

Los ensayos de campo necesarios para la consecución de los objetivos planteados en el presente proyecto, se realizarán en los invernaderos pertenecientes a la Estación Experimental “Las Palmerillas” de la Fundación Cajamar localizada en el término municipal de El Ejido (36°48’N, 2°43’O, a 63 m sobre el nivel del mar).

La estructura del invernadero cuyas condiciones climáticas se desean controlar es simétrica con orientación de cumbrera Este-Oeste con una superficie de 877 m<sup>2</sup> y una altura variable entre 2.8 y 4.4 metros (Figura 2). El cultivo que se ha utilizado en los ensayos es el de tomate (*Lycopersicum esculentum*) y el pimiento (*Capsicum annuum*) ya que son los dos cultivos que más se trabajan en esta zona.

Durante los experimentos, en el interior se tomarán medidas de temperatura ambiente (mediante 2 sensores), humedad relativa (1 sensor), temperatura de suelo a 40 y 5 cm de profundidad (1 sensor en cada capa de suelo), temperatura de la malla que cubre el suelo (2), temperatura de la cubierta del invernadero en su cara interior (4), temperatura de hoja de las plantas (4), radiación PAR (1), radiación global (1) y concentración de dióxido de carbono (2). Los sensores de temperatura, humedad relativa del ambiente y dióxido de carbono, se encuentran a 2.5m del suelo, mientras que los de radiación PAR y radiación global se instalaron a 3.5m del suelo.

Además durante los experimentos se medirán en el exterior la temperatura ambiente, la humedad relativa, la radiación global, la radiación fotosintética activa (PAR), la presencia de lluvia, así como la velocidad y dirección del viento.



Figura 2.a. Plano de situación en finca

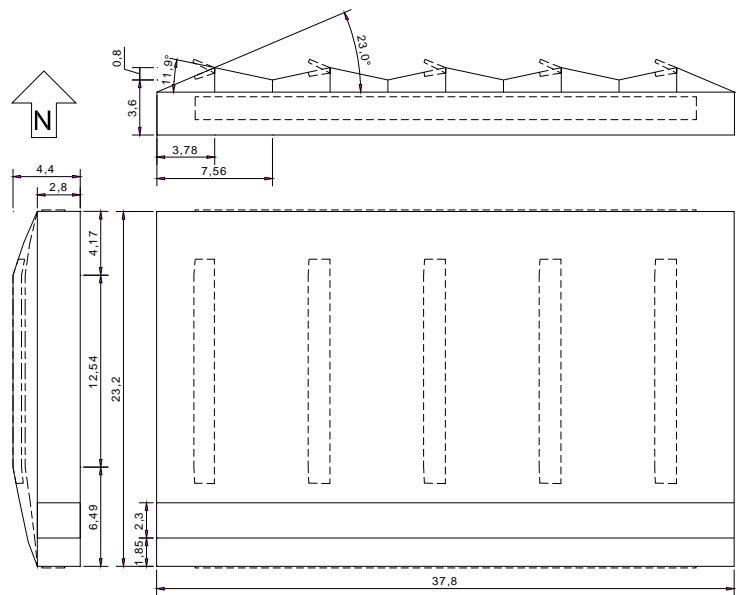


Figura 2.b. Plano del invernadero



Figura 2.c. Imagen del invernadero

Figura 2. Instalación donde se realizan las experiencias

El sistema de adquisición de datos utilizado está compuesto por una red Ethernet con módulos *Compact Field Point* de la empresa *National Instruments*. La frecuencia de toma de datos es de un minuto en todas las variables. Como actuadores dispone de un sistema de ventilación natural que consta de ventanas laterales y cenitales. Las ventanas laterales están colocadas en los lados norte y sur, accionándose mediante un sistema de eje activado por un motor de corriente alterna, sobre el cual se enrolla el plástico al abrir y se desenrolla para cerrar.

Las ventanas cenitales están colocadas en la cumbre de cada sección y abren hacia el lado oeste en un ángulo máximo de  $45^\circ$ , gobernadas también por un motor de corriente alterna. No hay sensores de posición angular instalados, por lo que la apertura de las ventanas (laterales y cenitales) se estima calculando el tiempo que tarda en abrir (o cerrar) hasta la posición deseada. Los tiempos son diferentes en apertura o cierre por el efecto de la gravedad. El sistema de calefacción está constituido por un calefactor por aire caliente alimentado con gasoil, un ventilador de distribución de aire y un depósito de combustible. El calefactor tiene una capacidad de aporte de 95000 kcal y el ventilador es de 70 cm de diámetro con potencia de 0.39 kW. En la figura 2.4 se puede apreciar la máquina y el ventilador del sistema de calefacción.

Actualmente, y en el marco del proyecto *Control jerárquico de procesos con conmutación en el modo de operación: aplicaciones a plantas solares e invernaderos* se ha diseñado e instalado un sistema de calefacción por tuberías de agua caliente. Posteriormente, a la concesión de este proyecto se ha observado que modificando la una caldera por una de biomasa, se pueda producir con bajo coste y sin contaminantes un enriquecedor de CO<sub>2</sub>, tal y como se muestra en la figura 3, por lo que se plantea en esta propuesta de proyecto el control de la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero en periodos diurnos.

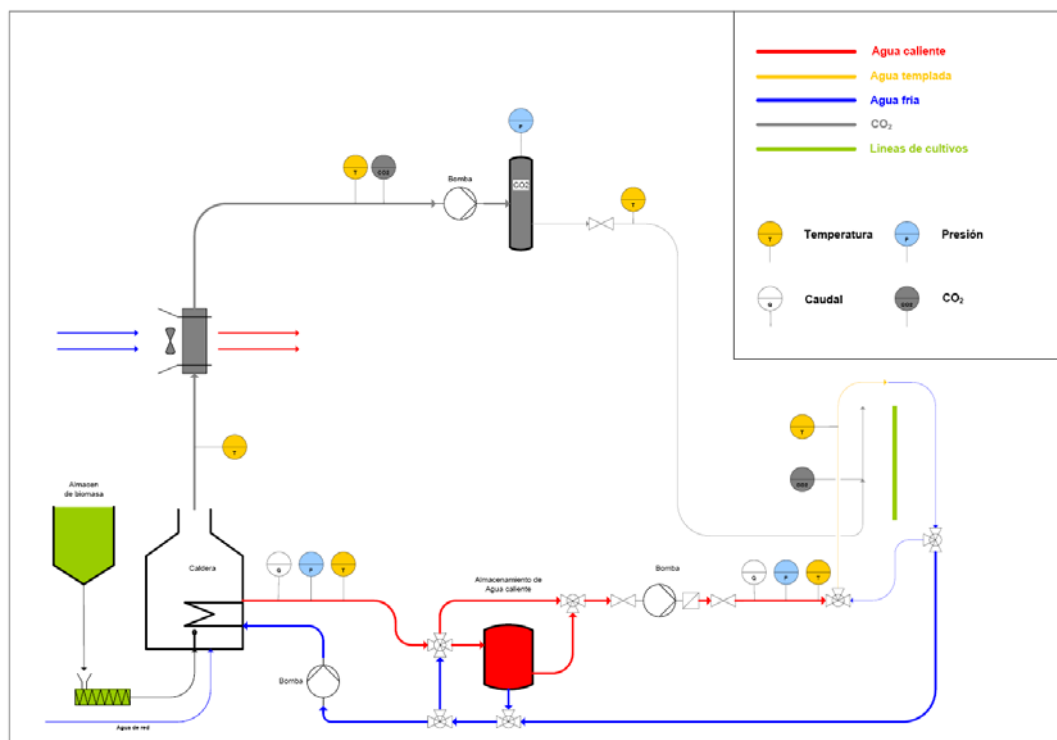


Figura 3. Planos de la nueva instalación de calefacción y enriquecimiento de CO<sub>2</sub>

Para tener un control completo sobre el clima del invernadero en la presente solicitud se incluye la instalación de un sistema de humidificación para disponer de más grados de libertad para la refrigeración en periodos cálidos de primavera y verano.

Con respecto a la instalación de riego, actualmente se utiliza la centralizada de la Estación Experimental sobre la que no se tiene acceso, por lo que en este proyecto se solicita también una partida presupuestaria para poder controlar de forma autónoma el aporte de agua y fertilizantes de este invernadero. Por otra parte, con la finalidad de evaluar el balance hídrico en el sistema de cultivo sin suelo, se pueden realizar mediciones de transpiración mediante una balanza-lisímetro. Este sistema está formado por una estructura metálica que soporta un bloque de lana de roca, sobre el cual se desarrollan las plantas de las que se mide la transpiración; la estructura se monta sobre la plataforma de la balanza, de manera que cualquier cambio en peso de las plantas o del contenido de agua del bloque de lana de roca es registrado por el software de la balanza.

En el sistema de nutrición y riego de las plantas también se realizarán mediciones de potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (C.E.), tanto en la disolución nutritiva de aporte como en los drenajes y de volumen de la solución nutritiva aportada y volumen de drenaje. El volumen de aporte y de drenaje se mide en dos escalas de tiempo: medidas automatizadas cada minuto y mediante recogida de aporte y drenaje diario; en estas muestras se realizarán además mediciones de pH y C.E., utilizadas para el manejo de consignas del sistema de fertirriego.

### 3.2. Metodología de trabajo

La metodología a seguir en cada uno de los objetivos planteados se describe a continuación.

#### **Tarea 1. Desarrollar un marco de referencia de control con múltiples objetivos de la producción en el agrosistema invernadero dentro de una estructura de control óptimo jerárquico.**

En este objetivo se pretende definir un marco de trabajo diferente desde la perspectiva de control multiobjetivo, que requiera la integración de un modelo que incluye crecimiento y desarrollo en función de las condiciones climáticas, salinidad y de suministro de riego. Para ello, se proponen las siguientes actividades:

##### *1.1. Análisis del sistema invernadero para la determinación de los objetivos que se desean analizar*

Los diversos elementos que componen el sistema invernadero y las múltiples relaciones que se establecen hacen de él un sistema complejo, en el cual los flujos de energía, masa e información (la inherente al material genético de las plantas y la que el hombre proporciona) son dinámicos y de diferente magnitud. El cultivo es su elemento central y sobre éste actúan variables como el clima (temperatura, humedad del ambiente, radiación fotosintética activa y dióxido de carbono), la nutrición (agua y nutrientes), bióticas (plagas, enfermedades, virus, bacterias y malas hierbas) y de manejo cultural (podas). Estas variables establecen interacciones entre sí de manera que su complejidad ha hecho necesario que sean estudiadas en profundidad e identificadas en subsistemas.

En una fase preliminar se han seleccionado los siguientes objetivos: beneficios económicos, calidad en el fruto y eficiencia en el uso del agua, aunque a lo largo del proyecto se determinará si se considera alguno más, por ejemplo relacionado con el control del CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero para llegar a concentraciones de compromiso entre las requeridas por el cultivo y las nocivas para los operarios que tienen que trabajar en el interior del invernadero.

Una fase importante es la caracterización o cuantificación estos objetivos, por ejemplo considerando los costes como de combustible, energía eléctrica, agua y fertilizantes; la calidad del fruto incluye elementos organolépticos como sabor (caracterizado por cantidad de azúcares y acidez valorable), firmeza y tamaño de fruto.

En este enfoque inicial, los objetivos anteriores pueden ser planteados en primera instancia utilizando las siguientes funciones objetivo:

$$J_1 = V_{pr}(t_f)X_{FFT}(t_f) - \int_{t_i}^{t_f} V_{cos}(t) dt$$

$$J_2 = \int_{t_i}^{t_f} (w_{ssol}V_{ssol,n} + w_{av}V_{av,n} + w_{fi}V_{fi,n} + w_{tf}V_{tf,n})$$

$$J_3 = X_{FFT}(t_f) / \int_{t_i}^{t_f} A_{ap}(t) dt$$

donde  $J_1$  es la función objetivo que maximiza beneficios,  $J_2$  es la función objetivo de maximización de calidad en frutos y  $J_3$  la de maximización de eficiencia en el uso del agua;  $V_{pr}$  son ingresos por venta de producto,  $V_{cos}$  son costos de producción (calefacción, electricidad, agua y fertilizantes),  $X_{FFT}$  el rendimiento en fruto fresco,  $t_i$  el tiempo inicial,  $t_f$  el tiempo final,  $V_{ssol,n}$  el contenido de azúcares en el fruto,  $V_{av,n}$  el grado de acidez valorable en el fruto,  $V_{fi,n}$  la firmeza del fruto,  $V_{tf,n}$  el tamaño de fruto,  $w_{ssol}$ ,  $w_{av}$ ,  $w_{fi}$  y  $w_{tf}$  son factores de ponderación y  $A_{ap}$  el agua aportada.

En principio, estos factores que intervienen en las funciones de costo indicadas son función de la temperatura ambiente y de la conductividad eléctrica, además de perturbaciones medibles tales como la radiación fotosintética activa o la concentración de dióxido de carbono, suponiendo en todo caso que el cultivo está bien irrigado. La solución del problema de optimización multiobjetivo debe proporcionar por tanto las consignas óptimas diurna y nocturna tanto de conductividad eléctrica del drenaje como de temperatura ambiente y concentración de  $\text{CO}_2$  para el resto de la campaña.

Posteriormente habría que formular la función de coste de problema multiobjetivo planteado y seleccionar el método de resolución del mismo que mejor se adapte, analizando técnicas de ponderación simple, de sumas ponderadas,  $\varepsilon$ -restricciones, programación de metas, teoría de juegos y algoritmos evolutivos [Coe03], [Liu03], [Laa04]; debiendo considerar también aspectos de sistemas bajo incertidumbres [Hu04].

Este problema es general de optimización no lineal con restricciones. En un primer paso, las prioridades que se asignan para alcanzar un objetivo se determinan utilizando pesos seleccionados por el usuario en cada objetivo, habiendo que resolver el siguiente problema de optimización:

$$\begin{array}{ll}
 & \text{Minimizar } \lambda_0 \\
 \text{Sujeto a:} & \\
 & g_i(x) \leq 0 \\
 & f_i(x) - w_i \lambda_0 \leq b_i \\
 \text{donde:} & \\
 & f_{1,2,3} = J_{1,2,3} \\
 w_i: & \text{pesos del problema de optimización} \\
 \lambda_0: & \text{vector escalar no restringido en signo} \\
 b_i: & \text{vector de metas y vector de soluciones} \\
 g_i: & \text{restricciones sobre conductividad eléctrica,} \\
 & \text{temperatura máximas y mínimas diurnas y nocturnas} \\
 & \text{y concentración de } \text{CO}_2 \\
 x: & \text{vector de soluciones de consignas de temperatura,} \\
 & \text{Conductividad eléctrica y concentración de } \text{CO}_2
 \end{array}$$

Es importante señalar que los objetivos entran en conflicto y que no será obtenida ninguna solución que logre el máximo de todos ellos, siendo la meta encontrar un conjunto de soluciones no dominadas, por lo que otra línea de trabajo en esta actividad consistirá en la selección automática de los pesos de cada uno de los objetivos.

Para la resolución del problema multiobjetivo anteriormente descrito, se hará uso de resultados recientemente publicados sobre control predictivo (MPC) basado en optimización multiobjetivo [Bem09]. En esta estrategia, en cada instante de tiempo la acción del control del MPC se escoge entre un conjunto de soluciones óptimas de Pareto que son variantes en el tiempo y que dependen del criterio de selección escogido. Dicha estrategia ha mostrado resultados satisfactorios desde un punto de vista teórico pero no ha sido validada con resultados experimentales, actividad que se pretende llevar a cabo en esta tarea del proyecto.

## Referencias

- [Bem09] Bemporad, A., Muñoz de la Peña, D. 2009. Multiobjective model predictive control, *Automatica* 45: 2823-2830.
- [Coe03] Coello C.A. 2003. Guest Editorial: Special Issue on Evolutionary Multiobjective Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 7(2):97-99.
- [Hu07] Hu, Z., Chan, C., Huang G., 2007; *Multi-objective optimization for process control of the in-situ bioremediation system under uncertainty*. Engineering Applications of Artificial Intelligence Vol. 20, pp. 225-237.
- [Laa04] Laabidi, K., Bouani, F., 2004, *Genetic Algorithms for Multiobjective Predictive Control*. Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, pp 149-152.
- [Liu03] G.P. Liu G, J.B. Yang, J.F. Whidborne. 2003. *Multiobjective Optimisation and Control*. Research Studies Press. 320 pp.

### 1.2. Adaptación de la arquitectura jerárquica al problema multiobjetivo

Como se ha comentado anteriormente, el grupo solicitante del proyecto de excelencia planteó en un proyecto anterior una arquitectura jerárquica, que optimiza la rentabilidad de la producción en base, únicamente, a las variables climáticas, probándose sólo en simulación, por lo que habría que modificar la capa superior para incluir el planteamiento multiobjetivo que se plantee.

Para ello, habrá que implementar un algoritmo de optimización con restricciones de forma que se resuelva el problema multiobjetivo de forma eficiente y se obtengan las trayectorias de las consignas que deben seguir las variables climáticas y de fertirrigación a lo largo del horizonte de optimización.

Para el buen funcionamiento de esta arquitectura, son necesarios los siguientes dos sistemas que se han considera como actividades independientes.

### 1.3. Diseño e implementación de un sistema de predicción meteorológica automático

La optimización debe ser realizada en un horizonte de planificación de semanas o meses, por lo que se han de obtener los datos promedio del día o de la noche correspondientes a la predicción meteorológica, y es la es una de las principales fuentes de error de este tipo de sistema ya que de ella dependen la trayectorias óptimas de referencia de la variables climáticas y de aporte de agua. La *Agencia Estatal de Meteorología* de España dependiente del *Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino* es la referencia que se utiliza para la predicción meteorológica en este país, ofreciendo una estimación del clima por localidad para una serie temporal de 6 días.

La idea del diseño del sistema de predicción meteorológico para una campaña agrícola se basa en que realmente, las variables climáticas repiten, en cierta medida, patrones de comportamiento cada año, por lo que se pueden utilizar series de datos históricos y considerarlas como predicciones meteorológicas para una determinada campaña. En esta línea de trabajo, la propuesta de investigación que se presenta en este proyecto consiste en:

- Demostrar la hipótesis de partida acerca de la repetición de patrones de comportamiento meteorológicos en series temporales de variables climáticas adquiridas en los proyectos de investigación que se han desarrollado desde 1995, utilizando técnicas de minería de datos.
- Desarrollar una herramienta informática para realizar la predicción a largo plazo cuya funcionamiento consistiría en:
  - Extraer automáticamente vía Web la información de la predicción meteorológica de la *Agencia Estatal de Meteorología*.
  - Parametrizarla, de forma que se le asignen valores a cada una de las variables climáticas de las que ofrecen información (temperatura, radiación y velocidad y dirección del viento).
  - Buscar en las series de datos históricos series de días consecutivos que presenten los patrones deseados.
  - La serie de datos de predicción a largo plazo estará constituida por datos de la serie temporal seleccionada comenzando por los días seleccionados y escogiendo el número de días necesario hasta completar el horizonte.

### 1.4. Diseño e implementación de un sistema de supervisión experto

Como se ha podido comprobar, en este sistema se trabaja con un gran número de señales procedentes de sensores de distintas características e instalados en condiciones muy agresivas con temperaturas de hasta 60 °C, alta humedad relativa, polvo y ambientes abrasivos por los productos fitosanitarios, por lo que es necesario una ardua tarea de supervisión y mantenimiento que se realiza manualmente. Para automatizar aun más la arquitectura propuesta, se plantea la actividad novedosa del diseño e implementación de un sistema de supervisión que detecte funcionamientos anómalos, diagnostique la posible fuente de error y reconfigure el sistema de forma automática.

Para ello se plantea analizar el histórico de todos los datos adquiridos en el marco de proyectos de investigación anteriores utilizando técnicas de minería de datos para encontrar patrones de malos comportamientos, fallos o errores de los sensores para que se pueda supervisar el proceso de forma automática, mediante métodos estadísticos, analíticos o basados en conocimiento.

**Tarea 2. Diseñar e implementar técnicas de control multivariable de las variables climáticas que afectan directamente al crecimiento de cultivos como la temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta aspectos de ahorro energético.**

En el objetivo 1, se establecen las consignas que deben seguir las variables climáticas para alcanzar las metas impuestas en el problema de optimización, por lo que en este segundo objetivo del proyecto se deben diseñar los controladores que permitan alcanzarlas, por lo que se proponen las siguientes actividades.

*2.1. Diseño, instalación e integración de nuevos sistemas de actuación climática*

Como se ha comentado anteriormente, para disponer de más grados de libertad para el control del crecimiento del cultivo en invernadero, se propone la instalación de dos nuevos sistemas de actuación climática:

- Enriquecimiento de CO<sub>2</sub>. Este sistema se puede instalar aprovechando la caldera del sistema de calefacción, obteniéndose dos beneficios importantes, aumentar la concentración de CO<sub>2</sub> del aire interior del invernadero necesaria para la realización de la fotosíntesis de las plantas y fijarlo antes de que salga a la atmósfera limitando su efecto contaminante. Además, como se pretende controlar mediante un quemador de biomasa, podría significar un ahorro de energía en forma de combustible fósil.
- Humidificadores. Uno de los principales problemas del control de clima en la zona del sudeste de España es la refrigeración por las altas temperaturas que se producen en primavera y verano, por lo que se plantea en este proyecto la instalación de sistemas de humidificación para disminuir la temperatura en periodos diurnos.

Para llevar a cabo esta actividad habrá que dimensionar correctamente los nuevos sistemas de actuación para el volumen de aire que encierra el invernadero en donde se realizarán los ensayos, determinar la instrumentación necesaria (sensores, cableado, tarjetas de entrada/salida) y la integración y modificación del sistema SCADA que actualmente supervisa las instalaciones.

*2.2. Desarrollo de modelos de temperatura, concentración de CO<sub>2</sub> y déficit de presión de vapor del aire interior del invernadero*

Las variables climáticas del sistema invernadero son procesos complejos de controlar por lo que en los últimos años se están aplicando técnicas de control que se han utilizado con éxito en otros ámbitos industriales, fundamentalmente las relacionadas con el control adaptativo, predictivo, óptimo o robusto, por lo que es necesario disponer de modelos de las variables climáticas a controlar. La obtención de modelos de un sistema dinámico es un proceso complejo, que depende de las características de la dinámica del proceso objeto de estudio.

Cuando se modela un sistema complejo, una de las cuestiones que hay que discernir es si se hace uso de modelos basados en primeros principios o modelos entrada-salida basados en la adquisición de datos experimentales. Los primeros generalmente proporcionan una información más detallada sobre el proceso en cuestión en comparación con los modelos entrada-salida, pero por el contrario son generalmente mucho más complejos y requieren mucho más tiempo en su desarrollo.

Aunque los modelos basados en primeros principios (modelos fundamentales) pueden ser utilizados en estructuras de control basado en modelo, en práctica se suelen utilizar más en el ámbito de la simulación y los modelos tipo entrada-salida para control. Un valor añadido del uso de modelos entrada-salida es que pueden proporcionar información sobre la dinámica del proceso que pueda ser utilizada para refinar los modelos fundamentales, que se suelen basar en una serie de suposiciones (en las que generalmente se considera que determinados términos y sus efectos se pueden despreciar) que en cierta medida puedan no ser muy acertadas.

Actualmente se dispone de un modelo basado en primeros principios validado de temperatura del aire interior del invernadero donde se van a realizar los ensayos, pero con los actuadores disponibles (ventilación, calefacción por aire y por agua caliente), por lo que en este proyecto se debe completar este modelo incluyendo el efecto de los humidificadores. Por otra parte, ya que se desea controlar la concentración de  $\text{CO}_2$  y el contenido de agua en el aire en forma de déficit de presión de vapor, se van a desarrollar dos modelos basados en primeros principios de estas variables

En una primera fase, se desarrollarán modelos basados en primeros principios para la realización de simuladores; y en una segunda fase, se valorará la posibilidad de desarrollar modelos basados en datos de entrada-salida lineales multivariantes para la utilización en el diseño de controladores. En el caso de la concentración de  $\text{CO}_2$ , como está muy influenciado por la apertura de ventilación, se realizarán los siguientes ensayos para determinar la dinámica de esta variable:

- Ensayo en escalón sin cultivo para la determinación de la tasa de pérdida con el invernadero cerrado.
- Ensayos en escalón sin cultivo para la determinación de la tasa de pérdida con el invernadero con ventilación lateral cerrada y la cenital abierta a distintos tramos (10%, 20%, ..) para determinar el efecto de este actuador.
- Ensayos en escalón sin cultivo con ventilación cenital cerrada y la lateral abierta a distintos tramos (10%, 20%, ..) para determinar el efecto de este actuador.
- Ensayos en escalón sin cultivo con ventilación lateral y cenital abierta a distintos tramos (10%, 20%, ..) para determinar el efecto combinado de ambos actuadores.
- Ensayos en escalón con cultivo con el invernadero cerrado para determinar la absorción de  $\text{CO}_2$  por parte del cultivo en diferentes estados del mismo, determinados en función del índice de área foliar.

Ensayos similares se experimentarán con el sistema de humidificación combinado con la ventilación natural para determinar el efecto de estos actuadores sobre las dinámicas de la temperatura y el contenido de agua en el aire.

### *2.3. Desarrollo de un sistema de control multivariable de temperatura, humedad y concentración de $\text{CO}_2$ en periodos diurnos*

Las plantas utilizan el  $\text{CO}_2$  para la realización de la fotosíntesis en presencia de radiación (periodos diurnos), pero en las latitudes del sudeste de España para refrigerar el invernadero se utiliza la ventilación natural, lo que produce un efecto convectivo que hace que el aire exterior el invernadero se mezcle con el interior perdiéndose el  $\text{CO}_2$  aportado por enriquecimiento artificial.

Por otra parte, para una óptima absorción del  $\text{CO}_2$  es necesario que los estomas se encuentren abiertos por lo que se necesita un control del déficit de presión de vapor. Por tanto, en esta actividad habrá que diseñar e implementar un sistema de control multivariable (temperatura, humedad y concentración de  $\text{CO}_2$ ) utilizando tres actuadores (ventilación natural, humidificadores y enriquecedores de  $\text{CO}_2$ ).



Para ello, se plantea la siguiente metodología:

- En una primera fase, se diseñará una estrategia de control clásico tipo PID desacoplados, incluyendo mejoras de la estrategia anterior mediante la inclusión de compensadores por adelanto derivado en una estrategia de control por desacoplo.
- Posteriormente, se diseñará una estrategia de control MPC multivariable incluyendo las restricciones de manera sistemática [Cam04]. Una de las principales ventajas de la estrategia MPC es que el control de procesos multivariables pueden ser abordado de manera relativamente sencilla mediante una extensión natural del algoritmo de control para sistemas monovariantes. Sin embargo, debido al carácter fuertemente no-lineal de las dinámicas que se plantean controlar en esta tarea, la estrategia de control MPC se combinará con técnicas de linealización por realimentación [Pin05] que permitan reducir las no-linealidades presentes y que han sido utilizadas por algunos de los investigadores de este proyecto en procesos con dinámicas similares obteniendo resultados satisfactorios [Roc09].

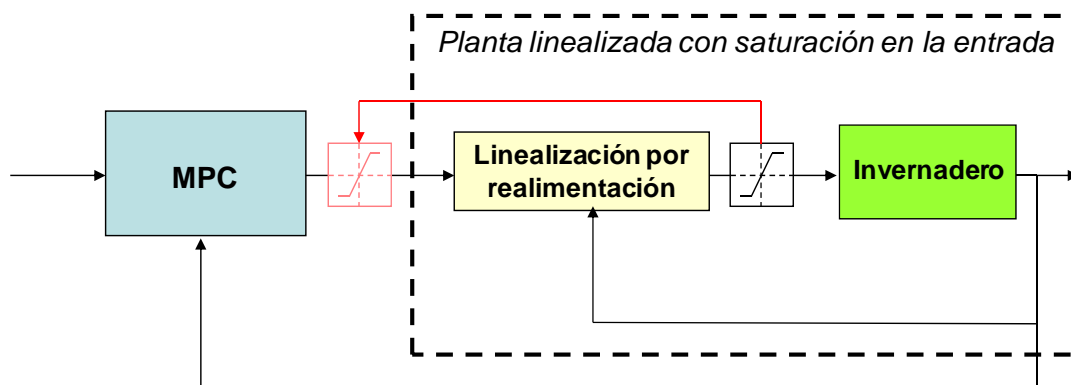


Figura 4. Control predictivo con linealización por realimentación

- De la misma forma, dicho problema de control se llevará a cabo de un punto de vista robusto donde las no-linealidades del sistema serán consideradas como fuentes de incertidumbre a un proceso nominal definido. Se desarrollarán estrategias de control predictivo robusto que permitan obtener una solución al problema de seguimiento de referencias a pesar de las incertidumbres y problemas de saturación en la entrada. En este sentido, se hará uso de resultados obtenidos recientemente [Guz09] donde se hace uso de una estructura de control en cascada combinando un lazo interno con estrategias control clásicas tipo PID, con un lazo externo gestionado por un controlador MPC que suministre las referencias adecuadas al lazo interno para compensar los problemas de saturación en la entrada e incertidumbre.

Además, se valorará la posibilidad de diseñar el sistema de control como una estrategia basada en eventos donde se analizarán distintas técnicas de muestreo así como el posible desarrollo de un algoritmo de control predictivo para este tipo de sistemas multivariables. En un sistema de control basado en eventos las acciones del control se llevan a cabo de manera asíncrona, es decir, el periodo de muestreo es gestionado por eventos y es llamado muestreo basado en eventos. La idea del muestreo basado en eventos es una idea muy antigua [Arz99] e indica que el método más apropiado para muestrear consiste en transmitir la información sólo cuando existe un cambio significativo en la señal, que justifica la adquisición de una nueva muestra. Este tipo de estrategias de muestreo ha recibido diferentes nombres en la literatura [Dor08]: criterio de diferencia de amplitudes constante, muestreo basado en magnitud, modulación delta asíncrona, método de banda muerta, método *send-on-delta*, muestreo por cruce de nivel y muestreo de Lebesgue. A pesar de sus nombres diferentes el principio básico es el mismo: la señal se muestrea cuando el valor absoluto de la diferencia entre el valor actual  $x(t_s)$  y el último valor muestreado  $x(t_k)$  es mayor que un límite especificado  $\delta$ .

Cuando el cambio en la señal es relativamente pequeño, el número de muestras es significativamente menor que en el caso del método del muestreo periódico [Dor08]:

$$|x(t_k) - x(t_s)| > \delta$$

De un modo general, un controlador basado en eventos consiste en dos partes: un detector de eventos y un controlador. El detector de eventos indica al controlador que debe producir una acción del control por que un evento ha ocurrido. Por ejemplo, la decisión para calcular una nueva señal del control podría consistir en, cuando el valor absoluto de la diferencia entre el valor actual del error,  $e(t_k)$ , y el último valor del error calculado,  $e(t_s)$ , es mayor que un límite  $\delta$ , o cuando el tiempo transcurrido desde que se calculó la última supere un límite  $h_{max}$ . La última condición es una simple medida de seguridad:

$$|e(t_k) - e(t_s)| > \delta \quad \text{and} \quad t_k - t_s \geq h_{max}$$

El efecto de esta condición será que el regulador se ejecutará en el tiempo nominal del muestreo  $h_{nom}$  durante transitorios, por ejemplo, cambios de consigna y perturbaciones de carga, y que el regulador se ejecutará en el intervalo de muestreo máximo durante los periodos estacionarios [Arz99].

## Referencias

- [Arz99] K. J. Arzen. A simple event-based pid controller. In Proceedings of 14th IFAC World Congress. Beijing, China, 1999.
- [Cam04] Camacho, E.F., C. Bordons. Model Predictive Control. Springer-Verlag, 2004.
- [Dor08] S. Dormido, J. Sánchez, and E. Kofman. Muestreo, Control y Comunicación Basados en Eventos. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 5(1):5–26, 2008.
- [Guz09] Guzmán, J.L., Álamo, T., Berenguel, M., Dormido, S., Camacho, E.F. A robust constrained reference governor approach using linear matrix inequalities. Journal of Process Control 19: 773–784, 2009.
- [Pin05] Piñon, S., Camacho, E. F., Kuchen, B., Peña, M. Constrained predictive control of a greenhouse. Computers and Electronics in Agriculture, 49, 317–329, 2005.
- [Roc09] Roca, L., J. L. Guzmán, J. E. Normey-Rico, M. Berenguel, and L. Yebra, —Robust constrained predictive feedback linearization controller in a solar desalination plant collector field, □ Control Engineering Practice, vol. 17, pp. 1076–1088, 2009.

## **Tarea 3. Diseñar e implementar técnicas de control de irrigación basadas en modelos de las necesidades hídricas de los cultivos para realizar un uso eficiente de agua y de la conductividad eléctrica de la fertirrigación para considerar el objetivo de la calidad de los productos hortícolas.**

Todos los cultivos utilizan la radiación solar, la concentración de  $\text{CO}_2$  del aire que los rodea, agua y nutrientes para producir biomasa (raíces, tallos, hojas y frutos) mediante el proceso de fotosíntesis. Cuando los estomas de las hojas se encuentran abiertos para captar el  $\text{CO}_2$ , la planta realiza una emisión de vapor de agua mediante el proceso de transpiración, que es un coste que el cultivo debe realizar para producir azúcares. Por otra parte, se pierde agua por evaporación desde la superficie del suelo, por lo que al conjunto de estas pérdidas de agua se les conoce como evapotranspiración y deben ser repuestas mediante el riego.

En invernaderos acolchados con el suelo cubierto con mantas plásticas, como en el que se van a realizar los ensayos, la evaporación en el mismo es despreciable y más aún si se trata de cultivo hidropónico, por lo que se puede considerar sólo el proceso de la transpiración. El agua se debe aplicar en una cantidad justa para cubrir el consumo del cultivo ya que, un exceso supone un lavado de fertilizantes excesivo lo que puede acarrear contaminación de aguas subterráneas, o el encharcamiento del sustrato o asfixia radicular.

Si el riego no aporta la cantidad de agua suficiente, puede provocar un déficit hídrico, lo que conlleva una reducción de la producción. Por tanto, los sistemas de control de riego son herramientas fundamentales para poder suministrar agua al cultivo en la cantidad y frecuencia requeridas. Además, al ser el agua un recurso limitante en muchas áreas agrícolas, debe ser objetivo básico de su manejo optimizar su productividad mediante riegos adecuados y eficientes para obtener las máximas producciones.

En este objetivo del proyecto, se van a desarrollar un sistema de control de aporte de agua de forma que su uso sea más eficiente y que incluya los nutrientes adecuados medidos como conductividad eléctrica para poder controlar la calidad de los frutos que están directamente relacionados con esta variable.

Para ello, es necesario realizar las siguientes actividades.

### *3.1. Diseño, instalación e integración de un sistema de aporte de fertirriego al invernadero*

Como se ha comentado en el apartado de la instalación de la que se dispone, el sistema de riego que actualmente se utiliza es el central la Estación Experimental sobre la que no se tiene acceso, por lo que habrá que dimensionar y diseñar un sistema que se conecte en serie al cabezal de riego central para obtener el agua y la solución nutritiva, pero que sea controlado por la herramienta que gestiona la arquitectura de control jerárquica. Para llevar a cabo esta actividad habrá que dimensionar correctamente la instalación auxiliar de riego compuesta por un depósito, bombas y electroválvulas, determinar la instrumentación necesaria (sensores, cableado, tarjetas de entrada/salida) y la integración y modificación del sistema SCADA que actualmente supervisa las instalaciones.

### *3.2. Desarrollo de un modelo dinámico de balance hídrico acoplado a modelos de crecimiento de cultivo.*

Para el modelado de la transpiración de un cultivo existen distintas metodologías, optando en este proyecto por analizar, en una primera fase, los modelos estáticos derivados de la *ecuación de Penman-Monteith* y de gran hoja; y estimar modelos empíricos lineales obtenidos por técnicas de identificación para el diseño de controladores. Para poder desarrollar estos modelos se propone la siguiente metodología:

- Estimar la transpiración real utilizando balanzas liximétricas.
- Calcular el consumo medio diario del cultivo mediante la relación riego-drenaje para determinar el buen funcionamiento de las balanzas.
- Medida del estado del cultivo mediante el índice de área foliar y el peso seco.
- Realización de ensayos en escalón de las variables climáticas que afectan directamente a la transpiración como la radiación (realizando los ensayos con mallas de sombreo) y el déficit de presión de vapor (realizando los ensayos con el sistema de humidificación).
- Calibrar y validar de los modelos estáticos de transpiración basados en la *ecuación de Penman-Monteith* y de gran hoja.
- Calibrar y validar de los modelos dinámicos obtenidos por técnicas de simulación
- Comparación de ambos tipo de modelos para su posible utilización en los sistemas de control de aporte de agua.

### 3.3. Desarrollo de un sistema de control de aporte de agua y nutrientes y validar técnicas de riego basadas en modelos asociados a la demanda del cultivo.

Para diseñar un buen controlador de aporte de agua mediante riego, se deben contestar las siguientes preguntas ¿Cuándo se debe regar?, es decir, ¿cuál debe ser la frecuencia de los riegos? y ¿qué cantidad de agua se debe aplicar en cada riego para reponer la evapotranspiración?. Para resolver este problema, se propone una arquitectura jerárquica con los siguientes dos niveles:

- Nivel de control, en el que se utiliza un controlador PI basado en eventos descrito en la tarea 2.3, de forma que cuando se produzca un determinado evento, ya sea por tiempo, por variación de una determinada variable climática como la radiación o por un determinado estado del cultivo, se utilizaría un controlador PI para alcanzar la consigna de aporte de agua que estime la capa superior de la arquitectura.
- Nivel de generación de consignas, que en base a las condiciones climáticas del invernadero (temperatura, humedad relativa y radiación global) y al estado del cultivo medido por el índice de área foliar (superficie de hojas por superficie de suelo invernadero), determina la transpiración instantánea del cultivo, acumulándola hasta que se produzca un evento determinando así la consigna de aporte de agua.

## **Tarea 4. Evaluación del funcionamiento de las distintas partes del sistema y de la integración del mismo**

### 4.1. Evaluación de cada uno de los módulos de la arquitectura jerárquica.

A lo largo de las seis primeras campañas agrícolas de los tres primeros años se evaluará el funcionamiento de cada uno de los módulos que componen el sistema, concretamente:

- El comportamiento de los controladores de las variables climáticas.
- El comportamiento de los controladores de las variables de fertirrigación.
- La bondad de las predicciones meteorológicas y la robustez del sistema ante sus posibles errores.
- El comportamiento del sistema de supervisión experta.

### 4.2. Evaluación de la integración del sistema.

Para probar el buen funcionamiento de todo el sistema, integrando sus distintos módulos, se realizarán ensayos en las dos últimas campañas agrícolas en el otoño del tercer año, y la primavera del último en el que se analizará el comportamiento del cultivo al modificar los objetivos de calidad de frutos, el consumo de agua priorizando ese objetivo y la variación del rendimiento económico en distintos escenarios.

## **3.3. Cronograma previsto**

Para el desarrollo del proyecto se han considerado cuatro años que abarcan ocho campañas agrícolas (cuatro de otoño y cuatro de primavera). En estudios anteriores del grupo de investigación solicitante, se ha observado un comportamiento diferente en los modelos climáticos y los de las variables que describen el crecimiento de un cultivo ya que las condiciones son muy diferentes en ambos tipos de campañas, por tanto se ha considerado una planificación de forma que:

1. Durante las dos primeras campañas (de otoño y de primavera) se instalarán los nuevos sistemas y se comenzarán los procesos de modelado.

2. Durante las dos siguientes campañas (de otoño y de primavera) se validarán los modelos y se ensayarán las primeras estrategias de control de las variables climáticas y de fertirrigación.
3. Durante las campañas quinta y sexta (de otoño y primavera) se realizarán los ensayos con la arquitectura de control jerárquica multiobjetivo con diferentes metas para comprobar su funcionamiento.
4. Durante las dos últimas campañas de otoño y primavera se validará el funcionamiento del sistema desarrollado gestionado por productores y técnicos de campo.

Bajo estas premisas, el desarrollo de las diferentes tareas a desarrollar para alcanzar los objetivos propuestos en el proyecto que se solicita, se ajustará al cronograma que se muestra en la página 22.

## **4. RESULTADOS ESPERADOS, DIFUSIÓN Y EXPLOTACIÓN**

### **4.1. Resultados esperados**

La consecución del objetivo principal de este proyecto consistente en el diseño e implementación de un sistema de control jerárquico multiobjetivo del crecimiento de cultivos bajo invernadero en función del clima interior y de la fertirrigación, permitirá que una explotación agrícola bajo invernadero del sudeste de España se realice de una forma más sostenible, a partir de los siguientes cuatro resultados fundamentales:

- La utilización adecuada del CO<sub>2</sub> combinado con la regulación de la temperatura como un grado de libertad más para el control del crecimiento del cultivo, obtenido de la combustión de la biomasa procedente de los residuos vegetales de otras campañas lo que repercute en el impacto ambiental, fijando además dióxido de carbono que se emitiría a la atmósfera.
- El uso eficiente del agua de riego, ya que con el sistema a desarrollar se aportará la cantidad que el cultivo necesita en cada instante de tiempo, por lo que se consumirá menos cantidad y se depositarán en el sustrato menos sales procedentes de la inyección de fertilizantes, algunas de ellas muy contaminantes como los nitratos.
- El hecho de conseguir las condiciones óptimas de las variables climáticas y de fertirrigación supone un coste económico en cuanto a energía (electricidad y combustible), agua y fertilizantes se refiere. Por tanto, lo ideal desde el punto de vista económico no será en principio obtener el máximo de producción, sino optimizar el beneficio entendido como la diferencia entre los ingresos procedentes de la venta de la producción final y sus costes asociados, aportando este resultado la arquitectura de control jerárquico.
- Ofertar al productor o al técnico responsable de la explotación de un marco de control multiobjetivo, de forma que el sistema de gestión integral del invernadero se reconfigure en base a lo que se desea obtener en cada escenario que produzca el mercado agrícola. Hay que señalar que los precios de compra en origen (los que se pagan al agricultor) fluctúan a lo largo de la campaña por lo que lo ideal sería obtener la producción y vender cuando los precios fueran máximos, o bien, atrasar o adelantar el crecimiento del cultivo para recolectar en esos instantes. Es importante señalar que, aunque existan patrones de comportamiento, el mercado es impredecible, por lo que una herramienta de este tipo es de gran utilidad para poder adaptarse a la variabilidad de los precios.

TAREAS	Año 1												Año 2												Año 3												Año 4											
	e	f	m	a	m	j	j	a	s	o	n	d	e	f	m	a	m	j	j	a	s	o	n	d	e	f	m	a	m	j	j	a	s	o	n	d	e	f	m	a	m	j	j	a	s	o	n	d
<b>Coordinación</b>																																																
<b>Tarea 1. Desarrollar un marco de referencia de control con múltiples objetivos de la producción en el agrosistema invernadero dentro de una estructura de control óptimo jerárquico</b>																																																
1.1. Análisis del sistema invernadero para la determinación de los objetivos que se desean analizar																																																
1.2. Adaptación de la arquitectura jerárquica al problema multiobjetivo																																																
1.3. Diseño e implementación de un sistema de predicción meteorológica automático																																																
1.4. Diseño e implementación de un sistema de supervisión experto																																																
<b>Tarea 2. Diseñar e implementar técnicas de control multivariable de las variables climáticas que afectan directamente al crecimiento de cultivos como la temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta aspectos de ahorro energético</b>																																																
2.1. Diseño, instalación e integración de nuevos sistemas de actuación climática																																																
2.2. Desarrollo de modelos de temperatura, concentración de CO <sub>2</sub> y déficit de presión de vapor del aire interior del invernadero																																																
2.3. Desarrollo de un sistema de control multivariable de temperatura, humedad y concentración de CO <sub>2</sub> en periodos diurnos																																																
<b>Tarea 3. Diseñar e implementar técnicas de control de irrigación basadas en modelos de las necesidades hídricas de los cultivos para realizar un uso eficiente de agua y de la conductividad eléctrica de la fertirrigación para considerar el objetivo de la calidad de los productos hortícolas</b>																																																
3.1. Diseño, instalación e integración de un sistema de aporte de fertirriego al invernadero																																																
3.2. Desarrollo de un modelo dinámico de balance hídrico acoplado a modelos de crecimiento de cultivo.																																																
3.3. Desarrollo de un sistema de control de aporte de agua y nutrientes y validar técnicas de riego basadas en modelos asociados a la demanda del cultivo																																																
<b>Tarea 4. Evaluación del funcionamiento de las distintas partes del sistema y de la integración del mismo</b>																																																
4.1. Evaluación de cada uno de los módulos de la arquitectura jerárquica																																																
4.2. Evaluación de la integración del sistema.																																																

## 4.2. Difusión y explotación de los resultados

A nivel internacional se utilizarán las vías convencionales de difusión de los resultados científicos como son los artículos y comunicaciones técnicas en libros, capítulos de libros, revistas y congresos internacionales. Principalmente se hará un gran esfuerzo en difundir los resultados que se obtengan en importantes revistas de alto prestigio incluidas en el *Journal Citation Reports del Science Citation Index (Institute of Scientific Information, Philadelphia, PA, USA)*, relacionadas con la temática del proyecto y las áreas de conocimiento de los investigadores participantes como por ejemplo *IEEE Trans. On Automatic Control, Automatica, Control Engineering Practice, IEEE Trans. On Control Systems Technology, Journal of Process Control*, etc.; así como la presentación de comunicaciones en las más importantes conferencias internacionales organizadas por las asociaciones relacionadas con la temática como IFAC (*International Federation of Automatic Control*), IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), IEE (*The Institution of Electrical Engineers*), EUCA (*The European Union Control Association*), ISA (*The Instrumentation, Systems, and Automation Society*), ACM (*Association Computing for Machinery*) o ISHS (*International Society for Horticultural Science*), destacando los congresos *IFAC World Congress, European Control Conference (ECC), Conference on Decision and Control (CDC)* y *American Control Conference (ACC)*.

Otra vía de hacer accesible los resultados de la investigación tanto a la comunidad científica como a cualquier persona interesada, es la creación de una página Web del proyecto (en castellano e inglés) donde se muestre toda la información generada durante el desarrollo del proyecto.

En cuanto a transferencia de la tecnología de todo el conocimiento y la información generada durante la ejecución del proyecto se emplearán las Jornadas técnicas que organizadas por la Estación Experimental de la Fundación Cajamar, en modalidad presencial, semipresencial y virtual a distancia. Este centro aporta un Doctor Ingeniero Agrónomo al equipo del proyecto, vinculado a la organización de dichas jornadas. Por otra parte, es obvio que también los resultados obtenidos completarán las diferentes actividades de formación e investigación que se realizan en los Departamentos de Lenguajes y Computación y Arquitectura de Computadoras y Electrónica de la Universidad de Almería (Cursos de Másteres, Proyectos fin de carrera, Tesis doctorales, Cursos de enseñanzas propias, etc.).

Además, continuando con la transferencia tecnología, ésta se refleja en el apoyo recibido por parte de varias empresas y centros de investigación relacionados con la temática del proyecto como la Fundación TECNOVA, Fundación Cajamar, Centro de Investigaciones de la Energía Solar, CADIA Ingeniería, Grupo Hispatec y Nuevas Tecnologías y Recursos Siglo XXII. En concreto, una de las actividades fundamentales de la Fundación TECNOVA y del Centro de Investigaciones de la Energía Solar es la difusión de resultados de I+D+i en ámbitos empresariales y científicos respectivamente. El interés de todas estas empresas y centros con respecto a este proyecto así como la relación con los grupos de investigación solicitantes se detalle en el apartado 9. *Entes Promotores Observadores (EPO)* de esta memoria.

## 5. RELACIÓN DEL PERSONAL DEL EQUIPO QUE PARTICIPA EN LA ACTIVIDAD

### 5.1. Personal investigador

Los investigadores (trece de los cuales son doctores) que se han comprometido en la participación en este proyecto son los siguientes (clasificados en base al Grupo de investigación al que pertenecen):

<b>Automática, Electrónica y Robótica (Grupo PAI TEP-197)</b>					
<b>Investigador</b>	<b>DNI</b>	<b>Categoría</b>	<b>Titulación</b>	<b>Institución</b>	<b>Área de conocimiento</b>
Dr. Francisco Rodríguez Díaz	27521319W	Profesor Titular de Universidad	Ingeniero Telecomunicación Dr. Ingeniero Informático	Universidad de Almería	Ingeniería de Sistemas y Automática
Dr. Manuel Berenguel Soria	27525303F	Catedrático de Universidad	Dr. Ingeniero Industrial	Universidad de Almería	Ingeniería de Sistemas y Automática
Dr. Antonio Giménez Fernández	27521246K	Profesor Titular de Universidad	Dr. Ingeniero Informático	Universidad de Almería	Ingeniería Mecánica
Dr. Julián García Donaire	34849978X	Profesor Titular de Universidad	Dr. Ingeniero Informático	Universidad de Almería	Arquitectura Computadores
Dr. José Carlos Moreno Úbeda	34856844E	Profesor Titular de Universidad	Dr. Ingeniero Informático	Universidad de Almería	Ingeniería de Sistemas y Automática
Dr. José Luis Guzmán Sánchez	75234101C	Profesor Titular de Universidad	Dr. Ingeniero Informático	Universidad de Almería	Ingeniería de Sistemas y Automática
Dr. Luis Yebra Muñoz	34842420L	Investigador CIEMAT	Dr. Licenciado en Física	Plataforma Solar de Tabernas	Grupo de Informática y Automática Industrial
Dr. Lidia Roca Sobrino	75241746Y	Investigador CIEMAT	Dr. Licenciada en Física	Plataforma Solar de Tabernas	Grupo de Informática y Automática Industrial
D. Javier Bonilla Cruz	75249965Z	Investigador CIEMAT	Ingeniero Informático	Plataforma Solar de Tabernas	Grupo de Informática y Automática Industrial
D. Andrzej Pawloski	AAB223198	Becario FPI	Ingeniero en Electrónica	Universidad de Almería	Ingeniería de Sistemas y Automática

<b>Sistemas de Información (Grupo PAI TIC-194)</b>					
<b>Investigador</b>	<b>DNI</b>	<b>Categoría</b>	<b>Titulación</b>	<b>Institución</b>	<b>Área de conocimiento</b>
Dr. Antonio Corral Liria	52516777A	Profesor Titular de Universidad	Dr. Ingeniero Informático	Universidad de Almería	Lenguajes y Sistemas Informáticos
Dr. Manuel Torres Gil	27533684Q	Profesor Titular de Universidad	Dr. Ingeniero Informático	Universidad de Almería	Lenguajes y Sistemas Informáticos

<b>Análisis de datos (Grupo PAI TIC-172)</b>					
<b>Investigador</b>	<b>DNI</b>	<b>Categoría</b>	<b>Titulación</b>	<b>Institución</b>	<b>Área de conocimiento</b>
Dr. José Samos Jiménez	24211488D	Profesor Titular de Universidad	Dr. Ingeniero Informático	Universidad de Granada	Lenguajes y Sistemas Informáticos

<b>Análisis de datos (Grupo PAI FQM-244)</b>					
<b>Investigador</b>	<b>DNI</b>	<b>Categoría</b>	<b>Titulación</b>	<b>Institución</b>	<b>Área de conocimiento</b>
Dr. José del Sagrado Martínez	08908381K	Profesor Titular de Universidad	Dr. Ingeniero Informático	Universidad de Almería	Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial

<b>Estación Experimental "Las Palmerillas" Fundación Cajamar</b>					
<b>Investigador</b>	<b>DNI</b>	<b>Categoría</b>	<b>Titulación</b>	<b>Institución</b>	<b>Área de conocimiento</b>
Dr. Esteban José Baeza Romera	45581884R	Investigador	Dr. Ingeniero Agrónomo	Fundación Cajamar	

## 5.2. Distribución del trabajo

La implicación de los investigadores en cada una de las actividades planteadas en el apartado 3 para la consecución de los objetivos del proyecto es la siguiente:

<b>Tarea 1. Desarrollar un marco de referencia de control con múltiples objetivos de la producción en el agrosistema invernadero dentro de una estructura de control óptimo jerárquico</b>		
Tarea 1.1.	<i>Análisis del sistema invernadero para la determinación de los objetivos que se desean analizar</i>	
	Responsable	Francisco Rodríguez Díaz
	Participantes	Manuel Berenguel Soria, José Luis Guzmán Sánchez, José Carlos Moreno Úbeda, Antonio Giménez Fernández, Julián García Donaire, Luis Yebra Muñoz, Lidia Roca Sobrino, Javier Bonilla Cruz, Andrzej Pawlowski, Manuel Torres Gil, Antonio Corral Liria, José Samos Jiménez, José del Sagrado Martínez, Esteban José Baeza Romera
Tarea 1.2.	<i>Adaptación de la arquitectura jerárquica al problema multiobjetivo</i>	
	Responsable	Francisco Rodríguez Díaz
	Participantes	Manuel Berenguel Soria, José Luis Guzmán Sánchez, José Carlos Moreno Úbeda, Antonio Giménez Fernández
Tarea 1.3.	<i>Diseño e implementación de un sistema de predicción meteorológica automático</i>	
	Responsable	Antonio Corral Liria
	Participantes	Francisco Rodríguez Díaz, Antonio Giménez Fernández, Julián García Donaire, Manuel Torres Gil, José del Sagrado Martínez



<b>Tarea 1. Desarrollar un marco de referencia de control con múltiples objetivos de la producción en el agrosistema invernadero dentro de una estructura de control óptimo jerárquico</b>		
Tarea 1.4.	<i>Diseño e implementación de un sistema de supervisión experto</i>	
	Responsable	Manuel Torres Gil
	Participantes	Francisco Rodríguez Díaz, Manuel Berenguel Soria, José Luis Guzmán Sánchez, José Carlos Moreno Úbeda, Antonio Giménez Fernández, Julián García Donaire, Luis Yebra Muñoz, Lidia Roca Sobrino, Javier Bonilla Cruz, Andrzej Pawlowski, Antonio Corral Liria, José Samos Jiménez, José del Sagrado Martínez, Esteban José Baeza Romera
<b>Tarea 2. Diseñar e implementar técnicas de control multivariable de las variables climáticas que afectan directamente al crecimiento de cultivos como la temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta aspectos de ahorro energético</b>		
Tarea 2.1.	<i>Diseño, instalación e integración de nuevos sistemas de actuación climática</i>	
	Responsable	Antonio Giménez Fernández
	Participantes	José Luis Guzmán Sánchez, Esteban José Baeza Romera, Javier Bonilla Cruz
Tarea 2.2.	<i>Desarrollo de modelos de temperatura, concentración de CO<sub>2</sub> y déficit de presión de vapor del aire interior del invernadero</i>	
	Responsable	Luis Yebra Muñoz
	Participantes	Francisco Rodríguez Díaz, Manuel Berenguel Soria, José Luis Guzmán Sánchez, José Carlos Moreno Úbeda, Antonio Giménez Fernández, Julián García Donaire, Lidia Roca Sobrino, Javier Bonilla Cruz, Andrzej Pawlowski, Manuel Torres Gil, Antonio Corral Liria, José Samos Jiménez, José del Sagrado Martínez, Esteban José Baeza Romera
Tarea 2.3.	<i>Desarrollo de un sistema de control multivariable de temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub> en periodos diurnos</i>	
	Responsable	José Luis Guzmán Sánchez
	Participantes	Francisco Rodríguez Díaz, Manuel Berenguel Soria, José Carlos Moreno Úbeda, Antonio Giménez Fernández, Lidia Roca Sobrino, Andrzej Pawlowski
<b>Tarea 3. Diseñar e implementar técnicas de control de irrigación basadas en modelos de las necesidades hídricas de los cultivos para realizar un uso eficiente de agua y de la conductividad eléctrica de la fertirrigación para considerar el objetivo de la calidad de los productos hortícolas</b>		
Tarea 3.1.	<i>Diseño, instalación e integración de un sistema de aporte de fertirriego al invernadero</i>	
	Responsable	Esteban José Baeza Romera
	Participantes	José Luis Guzmán Sánchez, Julián García Donaire, Javier Bonilla Cruz
Tarea 3.2.	<i>Desarrollo de un modelo dinámico de balance hídrico acoplado a modelos de crecimiento de cultivo.</i>	
	Responsable	Julián García Donaire
	Participantes	Francisco Rodríguez Díaz, José Luis Guzmán Sánchez, Javier Bonilla Cruz, Manuel Torres Gil, Antonio Corral Liria, José Samos Jiménez, José del Sagrado Martínez, Esteban José Baeza Romera
Tarea 3.3.	<i>Desarrollo de un sistema de control de aporte de agua y nutrientes y validar técnicas de riego basadas en modelos asociados a la demanda del cultivo</i>	
	Responsable	José Carlos Moreno Úbeda
	Participantes	Francisco Rodríguez Díaz, Manuel Berenguel Soria, José Luis Guzmán Sánchez, Antonio Giménez Fernández, Lidia Roca Sobrino, Andrzej Pawlowski
<b>Tarea 4. Evaluación del funcionamiento de las distintas partes del sistema y de la integración del mismo</b>		
Tarea 4.1.	<i>Evaluación de cada uno de los módulos de la arquitectura jerárquica</i>	
	Responsable	Francisco Rodríguez Díaz
	Participantes	Manuel Berenguel Soria, José Luis Guzmán Sánchez, José Carlos Moreno Úbeda, Antonio Giménez Fernández, Julián García Donaire, Luis Yebra Muñoz, Javier Bonilla Cruz, Manuel Torres Gil, Antonio Corral Liria, José Samos Jiménez, Esteban José Baeza Romera
Tarea 4.2.	<i>Evaluación de la integración del sistema.</i>	
	Responsable	Manuel Berenguel Soria
	Participantes	Francisco Rodríguez Díaz, José Luis Guzmán Sánchez, José Carlos Moreno Úbeda, Antonio Giménez Fernández, Julián García Donaire, Luis Yebra Muñoz, Lidia Roca Sobrino, Javier Bonilla Cruz, Andrzej Pawlowski, Manuel Torres Gil, Antonio Corral Liria, José Samos Jiménez, Esteban José Baeza Romera

Se ha estimado conveniente solicitar la contratación de personal investigador postdoctoral ya que en los grupos de investigación que solicitan el proyecto disponen de doctores que actualmente están contratados en cargo a contratos I+D+i con empresas, centros e instituciones con formación en modelado y control de sistemas dinámicos y en temas relaciones con las energías renovables y eficiencia energética que serían de gran utilidad para la realización de las tareas de este proyecto.

En caso de ser asignado, se requería un perfil de ingeniero informático, doctor y con conocimientos modelado y control de sistemas dinámicos aplicados a sistemas donde su fuente principal de energía sea la solar como es el caso de los invernaderos tal y como se indica en la siguiente proyecto. Por tanto, participará principalmente en las tareas 2, 3 y 4. Su lugar de trabajo se ubicaría en el laboratorio del grupo de investigación TEP-197, que precisamente va a entregar a mediados de 2010, contando con instalaciones y medios suficientes para que pueda acometer sus tareas.

Perfil del personal doctor a contratar	
Titulación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingeniero en Informática</li> <li>• Doctor en ingeniería</li> </ul>
Requerimientos indispensables	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Experiencia demostrada en el campo de la identificación y simulación de sistemas dinámicos, tanto lineales como no lineales</li> <li>• Experiencia demostrada en el diseño e implementación de controladores basado en modelos de sistemas dinámicos</li> <li>• Experiencia demostrada en el diseño e implementación de sistemas SCADA's ((Supervisory Control and Data Acquisition)</li> <li>• Experiencia en el uso y manejo de las herramientas informáticas MATLAB, Simulink, Sysquake y Labview para el modelado y control de sistemas dinámicos</li> </ul>
Se valorará	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conocimientos y experiencia en control jerárquico y optimización multiobjetivo</li> <li>• Experiencia demostrada en aplicaciones de energías renovables</li> <li>• Experiencia demostrada en aplicaciones para invernadero</li> </ul>

### 5.3. Resumen del historial del equipo investigador

La realización del proyecto que se solicita se llevará a cabo por investigadores pertenecientes a varios grupos de investigación, investigadores del CIEMAT-Plataforma Solar de Almería e investigadores de la *Estación Experimental de la Fundación Cajamar*. Los mencionados grupos son *Automática, Electrónica y Robótica* (Código TEP-197), *Grupo de Sistemas de Información* (Código TIC-194) y *Grupo de Análisis de Datos* (Código FQM-244).

La líneas de investigación del grupo de investigación TEP-197 son: control predictivo, adaptativo y robusto, instrumentación electrónica y transmisión de datos, modelado y simulación de procesos industriales, robótica de manipulación y móvil, técnicas de control aplicadas a procesos agrícolas y energías renovables. Dicho grupo de investigación obtuvo el año pasado la 2ª posición en la clasificación de grupos de investigación de la Universidad de Almería (1er puesto en los grupos de tecnología de la producción) y la 8ª posición de entre 105 grupos TEP a nivel andaluz. Dicho grupo posee una extensa experiencia en aspectos que están directa e indirectamente relacionados con la temática del proyecto. Los investigadores han participado en más de 20 proyectos de investigación sobre modelado y control de invernaderos y plantas termosolares (5 de la Unión Europea, 10 CICYT, 3 FEDER, 1 Junta de Andalucía, 10 contratos con empresas). Concretamente, los proyectos CICYT en los que se ha estado trabajando durante los últimos años (CICYT projects QUI99-0663-C02-02, DPI2001-2380-C02-02, DPI2002-04375-C03-03, DPI2004-07444-C04-04 y CICYT DPI2007-66718-C04-04) han sido la base para este nuevo proyecto. Además, el grupo ha obtenido numerosas publicaciones sobre la temática en cuestión, destacando más de 50 trabajos en artículos en revistas, más de 100 trabajos en congresos, 7 capítulos de libro internaciones, 4 patentes y 9 tesis doctorales.

Actualmente, el investigador principal de esta propuesta es el coordinador del Máster Oficial en Informática Industrial de la Universidad de Almería en el que se imparten todos los contenidos relacionados con el modelado, simulación, control y automatización de procesos industriales; además de participar como profesor de los cursos de Automatización de Invernaderos y Conceptos Avanzados de Automatización de Invernaderos del Máster Oficial de Tecnologías de Invernaderos, y del curso de Mecanización y Automatización de Procesos Agrícolas del Máster de Producción Vegetal, ambos de la Universidad de Almería.

Así mismo, se le ha solicitado la coordinación del módulo de Automatización y Control de Procesos Agrícolas de la propuesta de Máster Oficial Internacional en Nuevas Tecnologías de la Información y la Comunicación Aplicadas a la agricultura.

Por otra parte, los investigadores Manuel Berenguel Soria y Francisco Rodríguez Díaz son los representantes españoles en el Technical Committee TC8.01 "Control in Agriculture" de la International Federation of Automatic Control. También, los investigadores Francisco Rodríguez y José Luis Guzmán Sánchez pertenecen al Grupo de Trabajo 9 "Sensores y Control de Procesos" de la Asociación Española de AgroIngeniería.

Además, los investigadores que participan en esta propuesta son revisores de revistas internacionales en el ámbito del control automático como Journal of Process Control, Control Engineering Practice, IEEE Transactions on Control System Technology, entre otras, y relacionadas directamente con la temática del proyecto como Computers and Electronics in Agriculture, Food and Bioprocess Technology, Environmental Modelling and Software y Transactions of ASABE.

Por lo que respecta a los grupos TIC-194 y TIC-172, el primero de ellos centran su trabajo en el desarrollo de bases de datos, ingeniería del software y lenguajes de programación. Entre los miembros del grupo cabe destacar que ha participado en un total de 2 proyectos, que han dado lugar a 4 patentes y 2 tesis doctorales. Con respecto al TIC-172, al que pertenece el investigador D. José Samos Jiménez, su actividad investigadora se apoya actualmente en dos piezas fundamentales: los almacenes de datos y Sistemas OLAP, y la Web Semántica, a partir de las cuales desarrollan su trabajo. Los tres investigadores de estos grupos que participan en este proyecto poseen más de 90 publicaciones, 11 de ellas firmadas por ambos grupos.

Las líneas de investigación del grupo FQM-244 son: análisis difuso de datos, análisis y diseño óptimo de experimentos, distribuciones disgregadas, sistemas expertos probabilísticos y teoría y técnicas de muestreo. Los miembros del grupo han participado en 18 proyectos y contratos I+D relacionados con esas líneas de investigación que han dado lugar a una serie de publicaciones científicas (27 libros, 46 capítulos de libros y 95 publicaciones internacionales) y una patente.

## 6. FINANCIACIÓN PÚBLICA Y/O PRIVADA EN OTROS PROYECTOS O CONTRATOS I+D

Los miembros del equipo de investigación han participado en numerosos proyectos en numerosos proyectos de I+D, con financiación tanto pública como privada en los últimos años. Destacar en todos ellos los objetivos se han conseguido satisfactoriamente. A continuación, se relacionan los proyectos en los que han participado miembros del equipo investigador en los últimos 8 años (periodo 2000-2008):

### 6.1. Internacionales

Título del proyecto o contrato	Investigador Principal	Entidad financiadora	Periodo de vigencia
Meeting the challenges of the farm of tomorrow by integrating farm management information systems to support real-time management decisions and compliance to standards - futurefarm	Jose Luis Guzmán Sánchez	FP7-KBBE-2007-1	2008-2010
Definición y desarrollo de sistemas globales de cultivos en condiciones controladas para las regiones intertropicales cálidas	José Ramón Díaz Álvarez	CYTED IBK 03 304.	2004-2006
Análisis basado en datos del comportamiento de controladores para plantas solares sometidas a perturbaciones	Manuel Berenguel Soria	MAE-AECI	2004-2005

**6.2. Nacionales**

<b>Título del proyecto o contrato</b>	<b>Investigador Principal</b>	<b>Entidad financiadora</b>	<b>Periodo de vigencia</b>
Modelado y control óptimo de sistemas no lineales multivariables	Eduardo Fernández Camacho	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) QUI99-0663-CO2-01	1999-2001
Control predictivo de procesos industriales con funcionamiento discontinuo. Modelado y aspectos computacionales	Manuel Berenguel Soria	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) DPI2001-2380-CO2-02	2001-2004
Control óptimo jerárquico del crecimiento de cultivos bajo invernadero basado en variables climática y de fertirrigación	Francisco Rodríguez Díaz	Convocatoria Univ. Almería/CAJAMAR. CR-UAL-0206	2002-2004
Control predictivo para procesos con incertidumbres acotadas	Manuel Berenguel Soria	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) DPI2002-04375-CO3-03	2002-2005
Desarrollo y evaluación de técnicas de aplicación de productos fitosanitarios usando plataformas móviles automatizadas en los cultivos hortícolas bajo invernadero del sudeste español	Julián Sánchez-Hermosilla López	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) AGL2002-00982	2002-2005
Sistemas multiprocesador: aplicación al procesamiento de imágenes, vídeo y optimización	Inmaculada García Fernández	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) TIC2002-00228	2002-2005
Sistema inalámbrico de monitorización aplicado a los servicios móviles de emergencias sanitarias	José Antonio Gázquez Parra	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) TIC2003-07953-CO2-02	2003-2006
Sistema integrado de diseño macarrónico asistido por computador orientado a la optimización automática de estructuras de robots de servicio	Antonio Giménez Fernández	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) DPI2003-08479-CO2-02	2003-2006
Control predictivo jerárquico de procesos en operación semicontinua (CJPROS)	Manuel Berenguel Soria	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) - DPI2004-07444-CO4-04	2004-2007
Aprendizaje adaptativo de modelos gráficos: Aplicaciones a la asesora académica y personalización de navegadores Web	Antonio Salmerón Cerdán	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) TIN2004-06204-CO3-01	2004-2007
Arquitectura bioclimática y frío solar. Arfrisol	Manuel Berenguel Soria	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) PSE1-2005	2005-2008
Racionalización de las aplicaciones fitosanitarias en cultivos hortícolas bajo invernadero mediante una plataforma móvil autónoma	Julián Sánchez-Hermosilla López	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) - AGL2005-00848	2005-2008
Red temática en ingeniería de control (2006)	Francisco Rodríguez Rubio	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) DPI2006-26332-E	2006
Robot bípedo con técnicas de control de caminar pasivo	Antonio Giménez Fernández	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) DPI2006-15443-CO2-01	2006-2009
Control jerárquico de procesos con conmutación en el modo de operación: aplicaciones a plantas solares e invernaderos	Manuel Berenguel Soria	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) DPI2007-66718-CO4-04	2007-2010
Diseño de nuevos algoritmos para modelos gráficos probabilísticos. Implementación en Elvira	José Manuel Llamas Sánchez	CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología) TIN2007-67418-CO3-02	2008-2009

### 6.3. Regionales

Título del proyecto o contrato	Investigador Principal	Entidad financiadora	Periodo de vigencia
Estudio de un modelo de lectura neurocognitivo-computacional adaptado a las necesidades educativas de niños sordos: diseño e implementación de una aplicación Web adaptativa como herramienta de ayuda en el aprendizaje de la lectura	María Teresa Daza González	Junta de Andalucía P07-SEJ-03214	2008-2012
Análisis y evaluación de las técnicas de aplicación de productos fitosanitarios en invernaderos. Reducción del impacto ambiental y optimización técnico-económica	Julián Sánchez-Hermosilla López	Junta de Andalucía P07-AGR-02995	2008-2012
Generación fotosintética de polímeros carbonados acoplada a la eliminación de CO <sub>2</sub>	Miguel García Guerrero	Junta de Andalucía EXC/2005/CVI-422	2006-2009

### 6.4. Contratos I+D+i con empresas e instituciones

Título del proyecto o contrato	Investigador Principal	Entidad financiadora	Periodo de vigencia
Análisis y diseño de un sistema inteligente aplicado a la geriatría y gerontología	José Carlos Moreno Úbeda	Clínica San Rafael (400357)	2002
Diseño y desarrollo de un sistema de control climático bajo invernaderos abierto y configurable	Francisco Rodríguez Díaz	<i>Institut De Recerca I Tecnologia Agroalimentàries (Generalitat de Catalunya) OTRI 400343</i>	2002
Sistema de control distribuido de temperatura y humedad bajo invernadero utilizando ventilación forzada	Francisco Rodríguez Díaz	Cajamar - "Las Palmerillas" OTRI 400331	2002
Desarrollo de sistemas y herramientas de control para plantas termosolares	Manuel Berenguel Soria	CIEMAT – Plataforma Solar de Almería OTRI 400373	2002-2005
Asesoramiento al diseño y desarrollo de algoritmos de control y modelado de variables climáticas en el interior de invernaderos industriales	Francisco Rodríguez Díaz	<i>Ulma C. y E, S. Coop OTRI 400659</i>	2003
Sistema distribuido y configurable de monitorización de variables climáticas en el interior de invernaderos	Francisco Rodríguez Díaz	CAJAMAR (Las Palmerillas) (400408)	2003
Desarrollo de sistemas y herramientas de control para plantas solares	Manuel Berenguel Soria	CIEMAT-Plat. Solar de Almería (400373)	2003-2006
Formación y asesoramiento al diseño, implementación y validación de algoritmos de control climáticos de invernaderos	Francisco Rodríguez Díaz	<i>Ulma C. y E., S. Coop. (400440)</i>	2004
Asesoramiento y formación en el diseño y desarrollo de un sistema supervisor SCADA de control y monitorización de las variables climáticas en el interior de un invernadero	Francisco Rodríguez Díaz	<i>Ulma C. y E., S. Coop.</i>	2005
Diseño e implementación de un sistema dinámico basado en web para la adquisición y gestión de datos de la estación experimental Las palmerillas a través de internet	Manuel Berenguel Soria	Fundación Cajamar OTRI (000513)	2005
Monitorización de las variables climáticas para la evaluación en campo de la efectividad de filmes	Francisco Rodríguez Díaz	Iberocons (000564)	2005-2006
Asesoramiento y formación en el diseño y desarrollo de sistemas scada avanzados y reconfigurables	Jose Luis Guzmán Sánchez	Fundación Cajamar (400571)	2006
Multiplicación de Esfuerzos para el Desarrollo, Innovación, Optimización y Diseño de Invernaderos Avanzados (MEDIODIA)	Francisco Rodríguez Díaz	Fundación Cajamar (400668)	2006-2010
Asesoramiento y formación en el diseño y desarrollo de herramientas de adquisición y control basadas en Labview	Jose Luis Guzmán Sánchez	Fundación Cajamar (400638)	2007
Asesoramiento, reparación y mejora del software de adquisición y control del proyecto watergy	Jose Luis Guzmán Sánchez	Fundación Cajamar (000705)	2007
Diseño de modelos y estrategias de simulación, control, ensayo y monitorización del lazo Senertrough	Manuel Berenguel Soria	Grupo COBRA (000679)	2007
Estudio y diseño de sistemas para animación, comportamiento y robotizado de juegos inmersivos 3D	Francisco Rodríguez Díaz	Imagital (000655)	2007
Inversos: mejora de la eficiencia de la producción hortícola en invernadero en clima semi-árido	Francisco Rodríguez Díaz	Fundación Cajamar (400674)	2007-2012
Asesoramiento al desarrollo de un sistema de aprovechamiento de biomasa de invernadero con recuperación de calor y CO <sub>2</sub>	Francisco Rodríguez Díaz	BESEL (400800)	2008-2009
Modelado, automatización y robotización de un sistema de fabricación de dientes diamantados	Manuel Berenguel Soria	Iberina (140197)	2008-2009
Almacenamiento de sales en torre central	Manuel Berenguel Soria	SATOHE (000740)	2008-2010

## 7. DESCRIPCIÓN DEL CARÁCTER MULTIDISCIPLINAR Y TRANSVERSAL DEL PROYECTO

Como se puede deducir de los objetivos de este proyecto, se trata de investigar cómo mejorar el sector de la producción agrícola bajo invernadero de forma sostenible, fundamental para el desarrollo económico del Sudeste de Andalucía, aplicando tecnologías de la producción, de la información y las comunicaciones como:

- Instrumentación electrónica y comunicaciones.
- Técnicas avanzadas de modelado de sistemas dinámicos.
- Técnicas de control basado en modelo y eventos de variables dinámicas.
- Técnicas de control jerárquico para el cumplimiento de objetivos económicos y de sostenibilidad.
- Métodos de optimización de procesos multiobjetivo.
- Técnicas de análisis de datos como la minería de datos.
- Sistemas basados en conocimiento.
- Técnicas de búsqueda semántica automática en WWW.

Por tanto, y como se puede observar en el apartado 5 de esta memoria relativo al equipo de trabajo, es necesario disponer de un personal multidisciplinar de distintas titulaciones (Ingeniería Industrial, Ingeniería de Telecomunicación, Ingeniería Informática, Ingeniería Química, Ingeniería Agrónoma y Licenciados en Ciencias Físicas) para poder abordar este problema concreto, en el que se pueden distinguir las siguientes principales disciplinas:

1. Análisis de datos.
2. Modelado de sistemas dinámicos.
3. Control automático de procesos.
4. Sistemas basados en conocimiento.
5. Aplicaciones a variables climáticas, de fertilización y crecimiento de cultivo.

Por esta razón, se han reunido un equipo de trabajo compuesto por personas con dilatada experiencia en estos campos, pertenecientes a los grupos de investigación *Automática, Electrónica y Robótica, Grupo de Sistemas de Información y Grupo de Análisis de datos*, además de necesitar el apoyo de disciplinas agrícolas aportado por de la *Estación Experimental de la Fundación Cajamar*, donde se van a realizar todos los ensayos y el seguimiento de los cultivos.

## 8. COLABORACIÓN INTERNACIONAL

Durante los últimos 5 años se han defendido 5 tesis doctorales por parte de los miembros de los grupos de investigación en las cuales ha existido una amplia colaboración internacional con diversas universidades. Algunos de los profesores y universidades con los que se ha estado y se está colaborando son Prof. Karl Johan Aström y Prof. Tore Hägglund del Lund Institute of Technology (Suecia), Prof. Robin de Keyser de la Universidad de Gante (Bélgica), Prof. Daniel Rivera de la Arizona State University (USA), Prof. Joao Lemos del Instituto Superior Técnico de Lisboa (Portugal), Prof. Julio Normey-Rico de la Universidad de Santa Catalina (Brasil), Prof. Antonio Visioli de la Universidad de Brescia (Italia), Prof. Ryszard Klempous de la Wroclaw Politechnic University (Polonia), Prof. Eldert van Henten y Prof. Ep Heuvelink de la Universidad de Wageningen (Holanda). Fruto de dichas colaboraciones se han obtenido más de 20 publicaciones internacionales en el ámbito del modelo y control automática, siendo algunas de ellas específicas del campo de cultivo bajo invernaderos.

Además, relacionado directamente con la transferencia de tecnología sobre el control de crecimiento en invernaderos que proviene de la investigación del grupo solicitante (TEP-197), se trabaja con la Universidad Autónoma de Chapingo (Méjico) a través del profesor D. Armando Ramírez Arias y con la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (Colombia) con la profesora Dña. Ana Paola Montoya Ríos. Fruto de estas colaboraciones se ha defendido una Tesis doctoral y se han realizado seis estancias de personal de estas universidades en la Universidad de Almería.

Por otro lado, algunos miembros del grupo de investigación forman parte como coordinadores departamentales de los Programa Erasmus y Leonardo de la Universidad de Almería, lo que permite realizar intercambios de estudiantes de otras universidades para trabajar en proyectos del grupo de investigación.

Finalmente, destacar que recientemente se ha recibido la aceptación de un proyecto de cooperación internacional con Brasil (PHB2009-0008-PC) entre los grupos de Automática, Electrónica y Robótica de la Universidad de Almería y el Departamento de Automação e Sistemas de la Universidad de Santa Catalina (Brasil). Este proyecto tiene como fin un intercambio continuo entre investigadores y estudiantes de doctorado entre ambas universidades (con un total de 15 estancias de investigación) con el objetivo de trabajar en estrategias de control no lineal con compensación de retardo, resultados que pueden ser de gran interés para la temática del proyecto planteado.

## 9. ENTES PROMOTORES OBSERVADORES (EPO)

En el objetivo del proyecto y los resultados esperados, las siguientes empresas han mostrado su interés (Las cartas de interés de estas empresas, se adjuntan en el Anexo a esta memoria) tanto en la explotación de los mismos como en la participación activa en la realización de las actividades planteadas:

Empresa	Tipo participación	Descripción breve
Fundación Cajamar	Activa y explotación	<p>Consciente de la necesidad de experimentar nuevas estructuras y técnicas de cultivo que modernicen y hagan más rentables los sistemas productivos del sector agroalimentario, Cajamar creó la Estación Experimental "Las Palmerillas" de la Fundación Cajamar, ubicada en el paraje Las Palmerillas del término municipal de El Ejido (Almería). Las líneas de trabajo de la estación tratan de compatibilizar economía y medio ambiente, desarrollando programas de trabajo cuyos resultados ayuden a mejorar el sistema productivo de forma compatible con el entorno medioambiental.</p> <p>La relación del Grupo de investigadores con la Fundación Cajamar se inició en el año 2002, realizándose hasta ahora los siguientes contratos I+D+i:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de control distribuido de temperatura y humedad bajo invernadero utilizando ventilación forzada</li> <li>• Sistema distribuido y configurable de monitorización de variables climáticas en el interior de invernaderos</li> <li>• Diseño e implementación de un sistema dinámico basado en Web para la adquisición y gestión de datos de la estación experimental Las palmerillas a través de Internet</li> <li>• Asesoramiento y formación en el diseño y desarrollo de sistemas SCADA avanzados y reconfigurables</li> <li>• Asesoramiento y formación en el diseño y desarrollo de herramientas de adquisición y control basadas en Labview</li> <li>• Asesoramiento, reparación y mejora del software de adquisición y control del proyecto Watery</li> <li>• MEDIODIA: Multiplicación de Esfuerzos para el Desarrollo, Innovación, Optimización y Diseño de Invernaderos Avanzados (en el ámbito de un proyecto CENIT)</li> <li>• INVERSOS: Mejora de la eficiencia de la producción hortícola en invernadero en clima semi-árido (en el ámbito de un proyecto de la Corporación Tecnológica de Andalucía)</li> </ul> <p>El interés de la Estación Experimental radica en actuar como difusor y catalizador para poder transferir a los conocimientos y tecnologías que se adquieran y desarrollen en este proyecto, a los empresas, técnicos y explotaciones del sector agrícola de la provincia de Almería.</p>

Empresa	Tipo participación	Descripción breve
Fundación TECNOVA	Explotación	<p>La Fundación TECNOVA, es el centro tecnológico de la industria auxiliar de la agricultura. Está integrado por más de 120 empresas que aportan valor al sector agrícola. Las principales actividades desarrolladas por el centro son: I+D+i, formación, promoción y comercio exterior. El desarrollo de proyectos de I+D+i y la prestación de servicios tecnológicos avanzados es una prioridad dentro del departamento de innovación.</p> <p>Su ámbito de actuación es tanto regional, como nacional e internacional, prestando apoyo a los sectores de la industria auxiliar de la agricultura y la agroindustria a través de varias líneas estratégicas.</p> <p>El contacto con la Fundación TECNOVA se inició durante la pasado año 2009 y todavía no se ha realizado ningún proyecto conjunto, pero tras exponerles los objetivos del proyecto que se solicita, mostraron mucho interés en los resultados ya que podrían ser transferidos a algunas de las empresas patronas de esta Fundación relacionadas con la producción bajo invernadero.</p>
Centro de Investigaciones de la Energía Solar, CIESOL	Explotación	<p>El Centro de Investigaciones de la Energía Solar, CIESOL nació con el objetivo de ser una pieza clave en el desarrollo de nuevas fuentes de energía, principalmente la energía solar, y su utilización y aplicación en diferentes sectores, tanto desde el punto de vista de aprovechamiento energético como del tratamiento de aguas y la fotoquímica.</p> <p>La relación con el grupo que solicita el proyecto es muy fluida, participando en las actividades docentes del Centro en el Máster en Energía Solar y en labores de I+D+i en el marco del Proyecto Científico-Tecnológico Singular de carácter estratégico ARFRISOL del Plan Nacional I+D+i 2004-2011, cuyo objetivo es demostrar la adecuación de la arquitectura bioclimática y la energía solar (fotovoltaica y termosolar) empleada en edificios, como elementos básicos de la construcción en el futuro.</p>
CADIA Ingeniería, S.L.	Activa y explotación	<p>Se trata de una empresa innovadora que ofrece servicios de ingeniería y consultoría en el campo de la automatización y el diseño industrial de sistemas productivos. Su carácter multidisciplinar les permite investigar y dar soluciones en distintos ámbitos productivos relacionados con la agricultura intensiva, piedra natural y artificial, energías renovables, control y telecomunicaciones, procesos productivos, manufactura y automoción.</p> <p>El interés de la empresa en este proyecto radica en el hecho de que está desarrollando equipos y sistemas de control para los ámbitos de la agricultura intensiva y el medio ambiente, por lo que los resultados que se esperan obtener podrían ser implantados en los sistemas tanto a nivel de hardware específico como a nivel de algoritmos programados en sus propios desarrollos.</p> <p>Hay que indicar que la relación de I+D+i con esta empresa son muy fluidas, habiéndose colaborado en los proyectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Estudio y diseño de sistemas para animación, comportamiento y robotizado de juegos inmersivos 3D</i> para la empresa IMAGITAL</li> <li>• <i>Sistema integrado de gestión de parámetros para el proceso de elaboración de piedra en la industria</i> para PCRUZ, S.A.</li> </ul> <p>También se está colaborado en el desarrollo de productos propios de la empresa como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Máquina clasificadora de frutas y hortalizas portátil, de la que se está pendiente de la concesión de patente.</li> <li>• Sistema de control empotrado basado en agentes</li> <li>• Sistema de control y gestión de la germinación de semillas y crecimiento de plántulas basada en visión artificial.</li> </ul> <p>Por otra parte, la empresa está interesada y, ya lo ha comunicado a la OTRI de la Universidad de Almería, de que se le transfiera la petición de patente del <i>Vehículo autónomo polivalente para trabajos en invernadero</i> en el participó el grupo investigador que solicita este proyecto.</p>
Nuevas Tecnologías y Recursos Siglo XXII, S.L.	Explotación	<p>Se trata de una empresa ubicada en Granada, dedicada a los avances tecnológicos en domótica, inmótica y urbótica., con la idea de tender a edificios y ciudades energéticamente eficientes, utilizando entre otras, la energía solar como generación de energía.</p> <p>El contacto con esta empresa se inició durante la pasado año 2009 y todavía no se ha realizado ningún proyecto conjunto, pero tras exponerles los objetivos del proyecto que se solicita, mostraron mucho interés en los resultados ya que podrían ser integrados en sus sistemas y adaptarlos para un nuevo campo como el de la producción bajo invernaderos, lo que supondría una nueva línea de aplicación de sus productos.</p>
Grupo Hispatec	Explotación	<p>Hispatec es el experto en software agroalimentario. Nació del propio sector, junto a la agricultura intensiva almeriense, líder mundial en producción hortícola. A partir de ahí han apostado por un crecimiento sostenido hacia otras regiones y otros sectores, hacia la agricultura extensiva, y hacia los demás eslabones de la cadena de valor del negocio agroalimentario.</p> <p>El contacto con esta empresa se ha iniciado a principios de este año 2010 y todavía no se ha realizado ningún proyecto conjunto, pero tras exponerles los objetivos del proyecto que se solicita, mostraron mucho interés en los resultados ya que podrían integrarse en los sistemas ERP de gestión de una explotación agraria que desarrolla esta empresa.</p>



## 10. PRESUPUESTO GLOBAL DEL PROYECTO

### 10.1. Costes de ejecución. Material inventariable

Para el cálculo del coste de amortización del material inventariable correspondiente al equipamiento científico-técnico, se ha utilizado la siguiente fórmula basada en las prácticas de contabilidad:

$$\text{Coste amortización} = \frac{A}{B} \times C \times D$$

Donde A es el número de meses que el equipo será usado durante el proyecto, B el periodo de amortización (36 para equipos informáticos y 60 para el resto), C el coste del equipo y D el porcentaje de uso del equipo en el proyecto (1.0 es el 100%)

Concepto	Coste del equipo €	Coste de amortización €	Justificación de la necesidad y de los parámetros de la amortización
Sistema de humidificación	15.000,00	12.000,00	Es necesario instalar nuevos actuadores como el sistema de humidificación para disponer de un grado de libertad para el control de la temperatura y un mejor control de la humedad del aire en el interior del invernadero. En este caso se ha considerado que el equipo se utilizará durante los 48 meses de duración del proyecto y el porcentaje de uso es el 100%.
Sistema de control de riego	4.000,00	3.200,00	Para la implementación de futuras arquitecturas de control de riego es necesario instalar un pequeño sistema de distribución de riego para disponer de total independencia del sistema general de la Estación Experimental. Se compondrá de un depósito de mezcla de solución nutritiva, la red de tuberías de conexión con la general de la instalación y, bombas y electroválvulas para regular el aporte de fertirrigación. En este caso se ha considerado que el equipo se utilizará durante los 48 meses de duración del proyecto y el porcentaje de uso es el 100%.
Nueva instrumentación para el invernadero	6.000,00	4.800,00	Es necesario incorporar nueva instrumentación al invernadero experimental para la medida de nuevas variables necesarias en la ampliación de los modelos existentes y la implementación de la arquitectura de control como sensores de CO <sub>2</sub> , monitores de planta, temperatura de hoja, medidas de iones de fertirrigación, etc. En este caso se ha considerado que el equipo se utilizará durante los 48 meses de duración del proyecto y el porcentaje de uso es el 100%.
Sistema distribuido de control	5.000,00	5.000,00	Para la implementación de complejas arquitecturas de control es necesaria una arquitectura distribuida de controladores programables dotada con diversos módulos ampliables preparados para la incorporación de tarjetas de entrada y salida con interfaces de comunicación inteligentes. Con este tipo de dispositivos es posible descargar, de manera totalmente transparente, una aplicación desarrollada en un computador para trabajar de manera empujada y conectada directamente a tarjetas de entrada-salida. Gracias a su gran capacidad de trabajar con múltiples protocolos de comunicación permite la configuración del sistema de forma escalable así como su control y supervisión remota. Se trata de un equipo informático por lo que el periodo de amortización se cubre durante el proyecto.
Computadores para instalaciones e investigación	3.000,00	3.000,00	Para la instalación de herramientas adquisición de datos y control, así como para el ajuste de la instrumentación de campo y la realización de ensayos puntuales en las instalaciones, y para tareas de investigación y tratamiento de datos. Se trata de un equipo informático por lo que el periodo de amortización se cubre durante el proyecto.
<b>Total</b>	<b>33.000,00</b>	<b>28.000,00</b>	<b>€</b>

Como se ha comentado anteriormente, no se ha incluido en esta solicitud de proyecto la instalación del sistema enriquecedor de CO<sub>2</sub> ya que se va a financiar con el proyecto *I+D+i Asesoramiento al desarrollo de un sistema de aprovechamiento de biomasa de invernadero con recuperación de calor y CO<sub>2</sub>*, firmado con la empresa *Besel* del que los responsables son Francisco Rodríguez Díaz y Gabriel Acien Fernández y cuya cuantía asciende a 29.000 €. De ellos, 9.000 se invertirán en el quemador de biomasa del sistema de enriquecimiento de CO<sub>2</sub>.

## 10.2. Costes de ejecución. Material fungible

Hay que indicar que esta partida del presupuesto es elevada debido al mantenimiento del invernadero donde se van a realizar los ensayos, ya que hay que las labores de cultivo requieren unos costes fijos de inversión en semillas, fertilizantes, fitosanitarios, agua de riego, mano de obra, energía, control biológico, etc., los cuales han sido estimados por la *Estación Experimental de la Fundación Cajamar* en torno a 7500 € anuales (dos campañas agrícolas al año).

Concepto	Coste €	Justificación de la necesidad
Material fungibles para ensayos en invernaderos (Semillas, fertilizantes, fitosanitarios, agua...)	30.000,00	En las instalaciones que se van a utilizar para realizar los ensayos, es necesario abonar los gastos de energía (electricidad, combustibles fósiles, etc.), agua y fertilizantes. Además, en el caso de los invernaderos hay una serie de gastos adicionales asociados con las semillas de los cultivos hortícolas, mantenimiento de las técnicas culturales (podas, entutorados, etc.), productos fitosanitarios para el control de plagas y enfermedades, mano de obra de recolección, etc.; por lo que esta partida es fundamental en el desarrollo del proyecto.
Material de oficina y fungible informático	2.000,00	Para la realización del proyecto será necesario la adquisición de material de oficina (carpetas, folios, etc.) para la gestión del proyecto y fungible informático como dispositivos de almacenamiento o mantenimiento de impresoras, etc.
Material eléctrico y electrónico	4.000,00	Los ensayos del proyecto se llevan a cabo en invernaderos donde las condiciones de entorno son muy agresivas (altas temperaturas, humedad relativa muy elevada, productos corrosivos como los fitosanitarios, polvo, etc.). Además, le suministro eléctrico de las zonas rurales de Almería es deficiente, produciéndose cortes de corrientes y subidas de tensión que afectan gravemente a los equipos electrónicos e informáticos. Por estas razones, es necesaria una partida de material fungible eléctrico y electrónico para mantenimiento y ampliación de instalaciones (cableado, componentes electrónicos, cajas estancas, etc.)
<b>Total</b>	<b>36.000,00</b>	<b>€</b>

## 10.3. Gastos complementarios

Para la difusión y explotación de los datos, tal y como se ha descrito en el apartado 4, así como para cubrir los gastos de transportes y dietas a las instalaciones de la *Estación Experimental de la Fundación Cajamar*, se plantean los siguientes conceptos.

Concepto	Coste €	Justificación de la necesidad
Presentación de resultados en congresos internacionales	10.000,00	Para difundir los resultados que se vayan obteniendo en el proyecto, se enviarán artículos a congresos internacionales de prestigio que se celebran durante el periodo 2010-2012 como la Conferencia de Control Europea ECC o el Congreso Mundial de IFAC. También, se asistirá a congresos nacionales como las Jornadas de Automática, por lo que habrá que abonar los gastos de transporte, alojamiento y dietas.
Inscripción a congresos y/o cursos	4.800,00	La inscripción media a un congreso internacional es de unos 500 euros, mientras que la de un congreso nacional es de unos 300 euros. Se estima que este grupo de trabajo asistan a 2 congresos internacionales y dos nacionales anualmente, por lo que el gasto de inscripciones a congresos ascendería a unos 4.800 euros anuales.
Viajes y dietas para la realización de ensayos en Estación Experimental Las palmerillas (40km)	4.250,00	Las instalaciones de la Estación Experimental "Las Palmerillas" de la Fundación Cajamar se encuentra en el término municipal de El Ejido a unos cincuenta kilómetros de la Universidad de Almería, por lo que cuando se realicen ensayos, habrá que abonar los gastos de desplazamiento y comida a los investigadores asociados a esas experiencias a realizar durante los tres años de duración del proyecto.
Gastos derivados de publicaciones en revistas	2.400,00	En los últimos años, algunas editoriales facturan los gastos de publicación en sus revistas y libros una vez que el artículo ha sido aceptado científicamente, por lo que esta partida se solicita para sufragar este concepto. Considerando una media de gastos de 600 euros por publicación y teniendo en cuenta que se puedan publicar un artículo anualmente en este tipo de revistas, el total de previsión ascendería a los 2.400 euros.
<b>Total</b>	<b>21.450,00</b>	

#### 10.4. Costes de personal.

Como se ha comentado anteriormente, se ha estimado conveniente solicitar la contratación de personal investigador postdoctoral ya que en los grupos de investigación que solicitan el proyecto disponen de doctores que actualmente están contratados en cargo a contratos I+D+i con empresas, centros e instituciones con formación en modelado y control de sistemas dinámicos y en temas relaciones con las energías renovables y eficiencia energética que serían de gran utilidad para la realización de las tareas de este proyecto.

En caso de ser asignado, se requería un perfil de ingeniero (informático), doctor y con conocimientos de instrumentación electrónica, modelado y control de sistemas dinámicos aplicados a sistemas donde su fuente principal de energía sea la solar como es el caso de los invernaderos.

Perfil	Número de meses	Justificación
Ingeniero	48	Se requiere dedicación completa de un ingeniero que, a parte de tareas de investigación, realice los ensayos en los invernaderos de la Estación Experimental Las Palmerillas. Además, debe programar los modelos de los sistemas y algoritmos de control
<b>Total</b>		<b>172.560,00</b>

#### 10.5. Resumen del presupuesto.

Concepto	Coste €	Coste Total €
<b>Costes de Personal</b>	<b>172.560,00</b>	<b>172.560,00</b>
<b>Costes de ejecución:</b>		<b>64.000,00</b>
Material inventariable	28.000,00	
Material fungible	36.000,00	
<b>Costes Complementarios:</b>		<b>21.450,00</b>
<b>Total (€)</b>		<b>258.010,00</b>

## ANEXO.

### Cartas de interés de los Entes Promotores Observadores



D. Francisco Rodríguez Díaz  
Departamento de Lenguajes y Computación  
Área de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Universidad de Almería  
Ctra. Sacramento s/n  
04120 Almería

10/2/2010

Estimado Francisco,

Teniendo conocimiento de la solicitud de proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía que va a realizar en el programa de Tecnologías de la Producción y la Construcción **"Control del crecimiento de cultivos bajo invernadero optimizando criterios de sostenibilidad, económicos y de eficiencia energética"**, te transmito mediante la presente el interés que para nuestra entidad representa tanto el ensayo de este tipo de sistemas de control predictivo integral en un invernadero de nuestras instalaciones como la explotación de los resultados que se esperan obtener en dicho proyecto, pues podrían ser implantados en nuestras instalaciones

Sin otro particular, recibe un cordial saludo

Fdo. D. Roberto García Torrente



Fundación  
para las Tecnologías  
Auxiliares  
de la Agricultura

At. D. Francisco Rodríguez Díaz  
Departamento de Lenguajes y Computación  
Universidad de Almería  
Ctra. Sacramento s/n  
04120 La Cañada (Almería)

Almería, 1 de febrero de 2010

Muy Sr. mío,

La Fundación para las tecnologías auxiliares de la agricultura, como centro tecnológico de la industria auxiliar de la agricultura en la provincia de Almería, está interesada en los avances que se pudieran producir en el sector de la mejora de la producción agrícola en invernaderos. Por tanto, conociendo la propuesta que está realizando del proyecto "Control del crecimiento de cultivos bajo invernadero optimizando criterios de sostenibilidad, económicos y de eficiencia energética", le escribimos para mostrarle nuestro interés en los resultados de dicho proyecto ya que pueden ser de gran repercusión para algunas de nuestras empresas patronas.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo



Fdo. Dña. M. Carme Galera

Gerente de la Fundación Tecnova



D. Francisco Rodríguez Díaz  
Dpto. de Lenguajes y Computación  
Universidad de Almería  
Ctra. de la Playa, S/N  
04120 Almería

Estimado Francisco,

El *Centro de Investigaciones de la Energía Solar*, **CIESOL** nació con el objetivo de ser una pieza clave en el desarrollo de "nuevas" fuentes de energía, principalmente la energía solar, y su utilización y aplicación en diferentes sectores, tanto desde el punto de vista de aprovechamiento energético como del tratamiento de aguas y la fotoquímica.

Después de analizar la propuesta de Excelencia de la Junta de Andalucía del proyecto **Control del crecimiento de cultivos bajo invernadero optimizando criterios de sostenibilidad, económicos y de eficiencia energética** que nos expuso, le informamos que los objetivos coinciden con algunas de las líneas de trabajo de CIESOL y estamos muy interesados en los resultados, para poder difundirlos en la sociedad científica internacional y su utilización en los proyectos que se lleven a cabo bajo nuestro ámbito

Un saludo

Almería, 5 de febrero de 2010

Fdo. D. Manuel Pérez García  
Director





Cadia | Soluciones Tecnológicas  
Sede Científica PITA, Campus de la JAL  
04120 L. Cañada (Almería)  
t: 950 21 43 74 – f: 950 21 43 25 [info@cadia.es](mailto:info@cadia.es)

D. Francisco Rodríguez Díaz  
Departamento de Lenguajes y Computación  
Universidad de Almería  
Ctra. Sacramento s/n  
04120 Almería

Almería, 5 de febrero de 2010

Estimado Sr. Rodríguez,

Como bien sabe, nuestra empresa está desarrollando equipos y sistemas de control para los ámbitos de la agricultura intensiva y el medio ambiente y conociendo los trabajos de su grupo en estos campos y, en concreto, de la propuesta que está realizando del proyecto **"Control del crecimiento de cultivos bajo invernadero optimizando criterios de sostenibilidad, económicos y de eficiencia energética"**, le escribimos para mostrarle nuestro interés tanto en los objetivos como en los resultados que esperan obtener en dicho proyecto, pues podrían ser implantados en nuestros sistemas tanto a nivel de hardware específico como a nivel de algoritmos programados en nuestros sistemas.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo

Fdo. D. Alfredo Sánchez Gimeno  
Consejero Delegado de CADIA Ingeniería, S.L.





D. Francisco Rodríguez Díaz  
Departamento de Lenguajes y Computación  
Universidad de Almería  
Ctra. Sacramento s/n  
04120 Almería

Almería, 9 de febrero de 2010

Estimado Francisco,

Nuestra empresa se centra en temas de Eficiencia Energética mediante sistemas domóticos, inmóticos y urbóticos y estamos planteándonos utilizarlos en la agricultura intensiva bajo plástico. Teniendo conocimiento de la propuesta que están solicitando a la Junta sobre "Control del crecimiento de cultivos bajo invernadero optimizando criterios de sostenibilidad, económicos y de eficiencia energética", le indicamos que estamos muy interesados en el objetivo de este proyecto así como en los resultados que se esperan obtener para analizar si pueden integrarse en nuestra línea de trabajo sobre eficiencia energética en invernaderos.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo

Darío Fernández Muñoz  
Gerente  
Nuevas Tecnologías y Recursos, Siglo XXI S.L.  
B 18 921 783

[www.sXXII.es](http://www.sXXII.es)