

Gestión de recursos heterogéneos bajo el paradigma de los sistemas ciber-físicos

F. García-Mañas*, F. Rodríguez, M. Berenguel

Universidad de Almería, Departamento de Informática, CIESOL, ceiA3, 04120 Almería, España

Resumen

Este trabajo se centra en la exposición de la temática de tesis doctoral del autor en correspondencia, que se encuentra en su primer año de doctorado. El problema que se desea abordar consiste en lograr un uso eficiente de energía y de recursos debido a la necesidad de asegurar la sostenibilidad medioambiental, centrándose fundamentalmente en el sector de la agricultura intensiva bajo plástico. El proyecto de tesis pretende ofrecer soluciones desde el control automático para la gestión óptima de recursos bajo el paradigma de los sistemas ciber-físicos. Uno de los objetivos que se persiguen consiste en el desarrollo de predictores y estimadores que permitan conocer con antelación la demanda de recursos en un distrito agroindustrial. En este artículo, se expone brevemente el desarrollo de un mecanismo de predicción para el crecimiento del cultivo de tomate en invernadero. Este mecanismo facilitaría la planificación a corto plazo del flujo de recursos que puede demandar un invernadero para satisfacer unos criterios óptimos de producción. *Copyright © 2020 CEA.*

Palabras Clave:

Reparto de recursos, sistemas de gestión de energía, problemas de optimización, predicción, agricultura

1. Introducción

En la actualidad existe una creciente preocupación por el uso eficiente de energía y de recursos debido a la necesidad de mantener la economía moderna y asegurar la sostenibilidad medioambiental. Esta problemática se debe abordar especialmente en los distritos agroindustriales, como ocurre en la provincia de Almería, en la que la agricultura intensiva bajo invernadero es uno de los principales sectores económicos. Los distritos agroindustriales están formados por explotaciones agrícolas, empresas de transformación y de suministro de insumos localizadas en un determinado territorio. Los sistemas que componen estos distritos poseen distintas necesidades de recursos heterogéneos, tanto energéticos (electricidad y calor/frío), como de agua y CO₂, por ejemplo.

En los últimos años se han realizado distintos planteamientos que persiguen incrementar la eficiencia en los procesos de producción, transporte, consumo y almacenamiento de recursos y energía. Algunos autores han propuesto conceptos como la multi-generación distribuida (DMG) (Chicco and Mancarella, 2009) y los denominados sistemas multi-energía (MES) (Mancarella, 2014). Además, el problema de la gestión de recursos heterogéneos también ha sido planteado desde el punto de vista

de los *Energy Hubs* (Ramos-Teodoro et al., 2018). A todos estos paradigmas se les unen los nuevos planteamientos como el “Internet de las cosas” o la Industria 4.0 (Wang et al., 2015), que han ido emergiendo con el fuerte desarrollo de Internet y de las comunicaciones, junto con una tendencia global a implementar sistemas de control cada vez más complejos, interconectados y aplicados a mayores escalas. En este contexto surge el paradigma de los sistemas ciber-físicos, con intereses gubernamentales y estratégicos para el desarrollo de la sociedad (Kim and Kumar, 2012). El término de sistemas ciber-físicos surgió en EE.UU., en el año 2006, para caracterizar los avances técnicos que se estaban produciendo en sistemas que interactúan con el mundo físico, que poseen capacidades computacionales y que pueden comunicarse entre sí mediante sistemas cibernéticos, como, por ejemplo, Internet (Lee, 2015). Debido a la novedad de este paradigma, existe una necesidad de establecer arquitecturas de diseño que permitan asegurar una correcta integración entre los elementos físicos y los elementos cibernéticos (Sztiapanovits et al., 2011).

Para ofrecer soluciones a los retos que plantea la gestión óptima de recursos, el autor en correspondencia de este trabajo se encuentra en el primer año de desarrollo de su proyecto de tesis doctoral en el ámbito del control automático, con la intención de realizar un planteamiento del problema desde el punto de vista de los sistemas ciber-físicos. Con dicho proyecto de tesis se pretende contribuir al análisis, diseño y aplicación de

*Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: francisco.gm@ual.es (F. García-Mañas),
frrodrig@ual.es (F. Rodríguez), beren@ual.es (M. Berenguel)

técnicas de modelado, predicción, control y optimización para conseguir una gestión de recursos adecuada en base a criterios económicos y eficiencia energética.

Las estrategias de control para sistemas ciber-físicos están en crecimiento y precisan aún de más desarrollo, pero en la literatura científica se pueden destacar algunas aplicaciones del control basado en eventos, control distribuido, control en red y control basado en pasividad (Villalonga Jaén et al., 2018). En el caso de las redes inteligentes de energía, *Smart Grids*, se han empleado técnicas de control predictivo distribuido basado en modelo, pero se precisa de más investigación para encontrar soluciones robustas, inteligentes y adaptativas en sistemas con alta complejidad (Yu and Xue, 2016).

Este documento se divide de la siguiente forma: en la sección 2 se expone el contexto en el que se enmarca la temática de la tesis; en la sección 3 se explican la hipótesis y los objetivos que se persiguen; en la sección 4 se presentan algunos resultados preliminares obtenidos hasta el momento; y en la sección 5 se finaliza con las conclusiones y trabajos futuros.

2. Contexto

La temática de tesis doctoral que se expone en este artículo se enmarca en el proyecto de investigación “Control y gestión óptima de recursos heterogéneos en distritos productivos agroindustriales integrando energías renovables”, CHROMAE (www2.ual.es/chromae), DPI2017-85007-R, coordinado por el grupo Automática, Robótica y Mecatrónica (ARM, TEP-197) de la Universidad de Almería.

Uno de los objetivos del proyecto es el de desarrollar estrategias de control que permitan coordinar el flujo entre los elementos del distrito que se muestra en la Figura 1, de tal forma que se produzca un impacto ambiental lo más reducido posible.

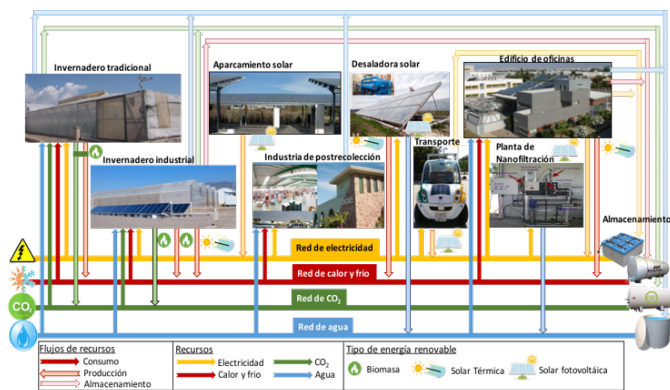


Figura 1: Esquema del distrito agroindustrial del proyecto CHROMAE

Los elementos que integran el distrito agroindustrial para el proyecto CHROMAE se describen brevemente a continuación:

- Instalaciones de la Fundación Cajamar en la Estación Experimental “Las Palmerillas”, El Ejido. Cuentan con un invernadero tradicional de tipo parral de 877 m² equipado con un sistema de calefacción y captura de CO₂.

- Instalaciones del Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA), en el Centro La Mojonera (Almería). Poseen un invernadero semicerrado industrial de 1000 m² y una instalación de generación térmica híbrida solar-biomasa.
- Industria de post-recolección y comercialización Hortofrutícola Mabe S.A.T, en El Ejido.
- Edificio bioclimático CIESOL. Ubicado en la Universidad de Almería, está completamente monitorizado para realizar estudios de consumo y producción de recursos.
- Vehículo eCARM de la Universidad de Almería. Vehículo eléctrico con autonomía de 90 km y velocidad máxima de 45 km/h. Posee unas placas solares propias para cargar las baterías.
- Aparcamiento solar. Instalación fotovoltaica en la Universidad de Almería con una potencia de 1.176,48 kW_p.
- Plantas de desalación solar y de nanofiltración en la Plataforma Solar de Almería, Tabernas.

3. Hipótesis y objetivos

El enfoque que se plantea consiste en modelar las plantas autónomas que conforman el distrito productivo descrito por la Figura 1 como sistemas ciber-físicos interconectados, capaces de intercambiar información sobre los recursos que consumen, producen y almacenan, para decidir las acciones de control óptimas bajo criterios económicos y medioambientales.

El interés de realizar el planteamiento bajo el paradigma de los sistemas ciber-físicos se debe a su aplicabilidad a diferentes escalas y a la necesidad de integración de sistemas de distinta naturaleza con demandas cambiantes en un mismo distrito. Por tanto, se deberán tener en cuenta las características particulares de cada sistema y de las redes de comunicaciones que puedan afectar al desarrollo de modelos y de estrategias de control. Asimismo, se pretende establecer nuevos criterios de gestión (además del criterio económico de mínimo coste), y considerar varias escalas temporales para la planificación de recursos.

Los principales objetivos que se persiguen con esta tesis son los siguientes:

- Desarrollar modelos para los sistemas físicos en distintos niveles de abstracción.
- Diseñar predictores y estimadores para la demanda y las perturbaciones.
- Validar experimentalmente los modelos y estimadores.
- Diseñar estrategias de control que permitan la optimización de consignas y coordinación de procesos, teniendo en cuenta los sistemas ciber-físicos que afectan a las acciones de control.
- Aplicar y validar las estrategias de control en el distrito agroindustrial.

Las estrategias de control podrían implementarse con algoritmos de control predictivo basado en modelo (MPC) y sus variantes. Otras posibles opciones son los controladores basados en reglas y/o teoría de juegos. Para la optimización de consignas y del conjunto de procesos y sistemas, previsiblemente será necesario el empleo de algoritmos evolutivos y técnicas de computación de alto rendimiento.

4. Predictor del crecimiento del cultivo tomate bajo invernadero

Uno de los objetivos anteriormente expuestos consiste en el desarrollo de predictores y estimadores que permitan conocer con antelación la demanda de recursos por parte de cada instalación del distrito. De todos los elementos del distrito, el cultivo es el resultado de emplear un amplio conjunto de materias primas para su producción y, por tanto, se entiende al invernadero como el centro del agrosistema. Por este motivo, se ha decidido comenzar con el desarrollo de un mecanismo para predecir el crecimiento de un cultivo de tomate en función de las condiciones del clima externo al invernadero.

La principal variable que indica el crecimiento de un cultivo es el índice de área foliar (IAF). El problema que existe actualmente para su monitorización es que únicamente se puede medir de forma fiable realizando ensayos destructivos de la plantación, que además se producen de forma esporádica durante una campaña. Debido a esta dificultad, en la literatura han ido surgiendo modelos dinámicos capaces de ofrecer una estimación de aquellas variables no medibles o difícilmente medibles del crecimiento. Uno de los modelos más destacables es el modelo TOMGRO (Jones et al., 1991) y sus versiones reducidas (Jones et al., 1999) para cultivos de tomate, que ofrecen una estimación del crecimiento a partir de las condiciones climáticas que hay en el interior del invernadero.

El mecanismo propuesto para la predicción del crecimiento del cultivo de tomate en invernadero se muestra en la Figura 2. Como se puede apreciar, predecir el crecimiento del cultivo en horizontes futuros requiere conocer con antelación el clima interior del invernadero. El modelo de clima del invernadero y el modelo de crecimiento de tomate que se han empleado para el predictor se describen de forma completa en (Rodríguez et al., 2015), donde pueden consultarse sus ecuaciones y parámetros característicos. El modelo de clima está preparado para simular el clima interior del invernadero a partir del clima exterior, basándose en principios físicos, biológicos y balances de masa y energía. Las principales variables de estado de este modelo son la temperatura y la humedad del aire interior del invernadero. La temperatura, $x_{T,a}$, se calcula según la siguiente ecuación diferencial:

$$c_{den,a} \cdot c_{cesp,a} \cdot \frac{c_{vol,a}}{c_{area,ss}} \cdot \frac{dx_{T,a}}{dt} = \sum Q + \sum Q(x_{T,a}) \quad (1)$$

donde $c_{den,a}$ es la densidad del aire, $c_{cesp,a}$ es el calor específico del aire, $c_{vol,a}$ es el volumen total de aire que hay en el invernadero, $c_{area,ss}$ es el área del suelo, y Q son flujos de energía, como la transferencia de calor que se produce por convección

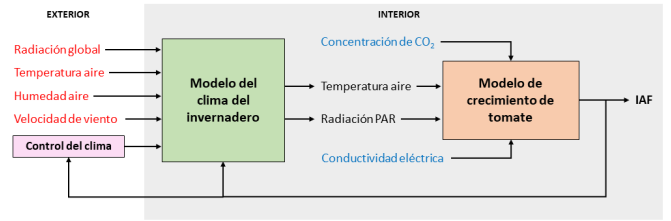


Figura 2: Representación por bloques del mecanismo de predicción de crecimiento de cultivo de tomate bajo invernadero

y conducción en la cubierta entre el aire exterior y el aire interior del invernadero. En cuanto a la humedad $x_{H,a}$, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$c_{den,a} \cdot \frac{c_{vol,a}}{c_{area,ss}} \cdot \frac{dx_{H,a}}{dt} = \sum M + \sum M(x_{H,a}) \quad (2)$$

donde M representa los intercambios de vapor de agua, como ocurre con la transpiración del cultivo, por ejemplo.

Por otro lado, el modelo calcula la radiación solar que atraviesa la cubierta del invernadero mediante una expresión estática. La temperatura del aire interior y la radiación fotosintéticamente activa (*photosynthetically active radiation*, PAR) se emplean como entradas para el modelo de crecimiento de tomate, que como salida ofrece el valor de índice de área foliar. Además, el crecimiento también se ve afectado por la concentración de CO_2 en el aire interior del invernadero, que puede ser una variable controlada mediante un sistema de enriquecimiento carbónico según las necesidades del cultivo. Asimismo, la conductividad eléctrica también se considera una variable controlable mediante sistemas de fertirrigación.

El mecanismo de predicción debe ser provisto con pronósticos meteorológicos para las variables que se muestran en rojo en la Figura 2. Existen servicios de predicción meteorológica como el que ofrece la Agencia Estatal de Meteorología, AEMET, con cuatro predicciones diarias con un horizonte de 48 horas cada una. De esta forma, el mecanismo anteriormente expuesto se podría ejecutar de forma recursiva cada 6 horas para ofrecer escenarios del crecimiento del cultivo a corto plazo.

En la Figura 3 se muestran los resultados tras ejecutar el mecanismo de estimación con dos pronósticos meteorológicos de la AEMET en el día 29 de agosto de 2019. En lo que a tendencia respecta, las variables del modelo de clima se estiman de forma adecuada, sobre todo cuando el día presenta un perfil regular de radiación solar, como se puede apreciar para el día 30 de agosto. Sin embargo, existen diferencias que son más notables en el caso de la humedad relativa y que pueden deberse a la incertidumbre asociada al pronóstico meteorológico que se haya empleado como datos de entrada al predictor. En cuanto al índice de área foliar, hay que destacar que inicia desde un valor pequeño dado que los datos corresponden al inicio de la campaña. No obstante, el predictor ofrece una tendencia de crecimiento aceptable en un horizonte de 48 horas. Además, se puede observar que, al ejecutarse de forma recursiva, a partir de las 20:00 hora local, el crecimiento se recalcula partiendo del valor que haya proporcionado la predicción anterior.

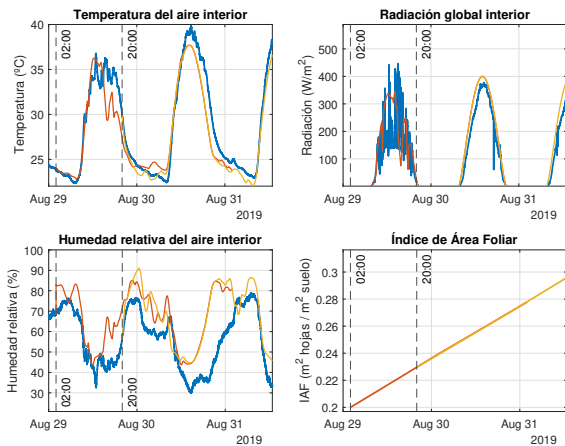


Figura 3: Ejemplo de resultados para el mecanismo de predicción. En azul se muestran los datos reales medidos en el invernadero de la Estación Experimental "Las Palmerillas", en rojo la predicción a partir de las 02:00 hora local, y en amarillo la predicción a partir de las 20:00 hora local

El clima del invernadero se puede ver modificado por el uso de actuadores para tratar de controlar las variables climáticas de su interior con el objetivo de cumplir una serie de consignas óptimas que aseguren un crecimiento del cultivo idóneo o que respondan a criterios económicos de producción. Los actuadores más habituales en un invernadero suelen ser: ventilación natural, sistemas de calefacción, humidificadores, deshumidificadores y mallas de sombreo, entre otros. Estos actuadores llevan asociados el consumo, la producción o el almacenamiento de recursos que se comparten en el distrito agroindustrial. El mecanismo de predicción propuesto facilitaría la planificación a corto plazo del flujo de recursos desde el distrito hacia el invernadero conociendo con antelación la demanda de los mismos.

5. Conclusión y trabajos futuros

El proyecto de tesis que se presenta en este trabajo se centra ofrecer soluciones desde el control automático para los retos que plantean la coordinación óptima recursos bajo el paradigma de los sistemas ciber-físicos. Algunos de estos retos se recogen en (Rajkumar et al., 2010), entre los que cabe destacar el control jerárquico de sistemas con dinámicas que transcurren en diferentes escalas de tiempo o el modelado de los procesos físicos a distintos niveles.

En este artículo, se han expuesto resultados preliminares del desarrollo de mecanismos de predicción que puedan ayudar a planificar la demanda de recursos de un invernadero en función del estado del cultivo. El mecanismo de predicción propuesto

permite utilizar pronósticos meteorológicos de las condiciones climáticas exteriores al invernadero para simular el clima que se originará en su interior y, a partir del mismo, obtener una estimación del crecimiento del cultivo.

En trabajos futuros se espera que las estrategias de control que se propongan para la gestión de los recursos del distrito agroindustrial puedan ser validadas sobre los sistemas reales, o empleando técnicas de *Hardware in the Loop* (HIL).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto I+D+i del Plan Nacional DPI2017-85007-R del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y Fondos FEDER. F. García-Mañás cuenta con el apoyo de una ayuda FPU del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Este documento contiene resultados obtenidos a partir de información cedida por la Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Referencias

- Chicco, G., Mancarella, P., 2009. Distributed multi-generation: A comprehensive view. *Renewable and sustainable energy reviews* 13 (3), 535–551.
- Jones, J., Kenig, A., Vallejos, C., 1999. Reduced state-variable tomato growth model. *Transactions of the ASAE* 42 (1), 255.
- Jones, J. W., Dayan, E., Allen, L., Van Keulen, H., Challa, H., 1991. A dynamic tomato growth and yield model (tomgro). *Transactions of the ASAE* 34 (2), 663–672.
- Kim, K.-D., Kumar, P. R., 2012. Cyber-physical systems: A perspective at the centennial. *Proceedings of the IEEE 100 (Special Centennial Issue)*, 1287–1308.
- Lee, E. A., 2015. The past, present and future of cyber-physical systems: A focus on models. *Sensors* 15 (3), 4837–4869.
- Mancarella, P., 2014. Mes (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. *Energy* 65, 1–17.
- Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L., Stankovic, J., 2010. Cyber-physical systems: the next computing revolution. In: *Design Automation Conference*. IEEE, pp. 731–736.
- Ramos-Teodoro, J., Rodríguez, F., Berenguel, M., Torres, J. L., 2018. Heterogeneous resource management in energy hubs with self-consumption: Contributions and application example. *Applied energy* 229, 537–550.
- Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzmán, J. L., Ramírez-Arias, A., 2015. Modeling and control of greenhouse crop growth. Springer.
- Sztipanovits, J., Koutsoukos, X., Karsai, G., Kottenstette, N., Antsaklis, P., Gupta, V., Goodwine, B., Baras, J., Wang, S., 2011. Toward a science of cyber-physical system integration. *Proceedings of the IEEE 100 (1)*, 29–44.
- Villalonga Jaén, A., Castaño Romero, F., Haber Guerra, R., Beruvides López, G., Arenas, J., 2018. El control de sistemas ciberfísicos industriales. revisión y primera aproximación. *Actas de las XXXIX Jornadas de Automática*, Badajoz, 5-7 de Septiembre de 2018.
- Wang, L., Törngren, M., Onori, M., 2015. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems* 37, 517–527.
- Yu, X., Xue, Y., 2016. Smart grids: A cyber-physical systems perspective. *Proceedings of the IEEE 104 (5)*, 1058–1070.



Universidad
Politécnica
de Cartagena



Tesis Doctorales en Ingeniería de Control

Simulación de escenarios de reparto económico en sistemas multi-energía
[Jerónimo Ramos Teodoro](#). Universidad de Almería

Reglas de Ajuste para Controladores Reseteados MISO
[José Francisco Saez Pérez](#). Universidad de Murcia

Gestión de recursos heterogéneos bajo el paradigma de los sistemas ciberfísicos
[Francisco García Mañas](#). Universidad de Almería

Desarrollo de Sensor Portátil de Bajo Coste para la Medida de Temperatura Foliar con Aplicación en Agricultura de Precisión
[Jaime Giménez-Gallego](#). Universidad Politécnica de Cartagena

Estudio de Factores Influyentes en el Proceso de Calibración de Sensores de Humedad de Suelo para el Control Automático del Riego
[Juan D. González-Teruel](#). Universidad Politécnica de Cartagena

Diseño e implementación de mecanismos de control realimentado para la optimización de bioproducción mediante circuitos genéticos
[Fernando Nóbél Santos Navarro](#). Universidad Politécnica de Valencia

Analysis of a solar heating industrial plant based on a parabolic dish collector
[Ovidio López Espinosa](#). Universidad de Murcia.



XVIII Simposio de Ingeniería de Control y VI Seminario de Innovación Docente en Automática



XVIII Simposio de Ingeniería de Control y el V Seminario de Innovación Docente en Automática



Murcia, 29-31 enero de 2020



Universidad Politécnica de Cartagena





Universidad
Politécnica
de Cartagena



Publicado por

Comité Español de Automática de IFAC (CEA-FAC)
www.ceautomatica.es

Proceedings del XVIII Simposio CEA de Ingeniería de Control

Universidad de Murcia, Murcia
29, 30 y 31 enero, 2020

Editado por

J.L. Guzmán, M.G Ortega, A. Baños
Editores

ISBN - 978-84-09-18075-2

Todos los derechos reservados. Copyright © 2020, CEA