

GESTIÓN DE RECURSOS EN DISTRITOS AGROINDUSTRIALES DEL NEXO ENERGÍA-AGUA-ALIMENTACIÓN EN EL PROYECTO CHROMAE

El nexo agua, energía y alimento se ha postulado en las últimas décadas como una cuestión de interés para la comunidad científica por las potenciales sinergias entre los respectivos sectores involucrados. De ahí nace el proyecto CHROMAE, el cual pretende contribuir, desde la disciplina del control automático, a la gestión eficiente, sostenible y equitativa de los recursos empleados para la producción de alimentos en distritos agroindustriales, ya sea energía (electricidad y calor/frío de proceso) u otros como agua y CO₂.

El grupo Automática, Robótica y Mecatrónica de la Universidad de Almería (TEP-197), adscrito al Centro de Investigación en Energía Solar CIESOL, centro mixto de la Universidad de Almería y la Plataforma Solar de Almería-CIEMAT, ha liderado el proyecto "Control y gestión óptima de recursos heterogéneos en distritos productivos agroindustriales integrando energías renovables", CHROMAE, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través de la ayuda con referencia DPI2017-85007-R. En este proyecto también participan investigadores de otras instituciones como la Plataforma Solar de Almería, la Universidad Miguel Hernández, el Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía y, la Fundación Cajamar.

El trabajo de investigación se ha llevado a cabo sobre un conjunto de instalaciones experimentales e industriales que conforman un distrito típico de la provincia de Almería (ver Figura 1), en el que coexisten diferentes agentes productores y de transformación: invernaderos de distinto nivel tecnológico, industria auxiliar, comercializadora y de postrecolección, edificios de apoyo para tareas administrativas, y sistemas de transporte. A ello se han añadido diferentes plantas de producción de recursos (agua, CO₂, electricidad...) basados principalmente en tecnologías renovables, con la in-

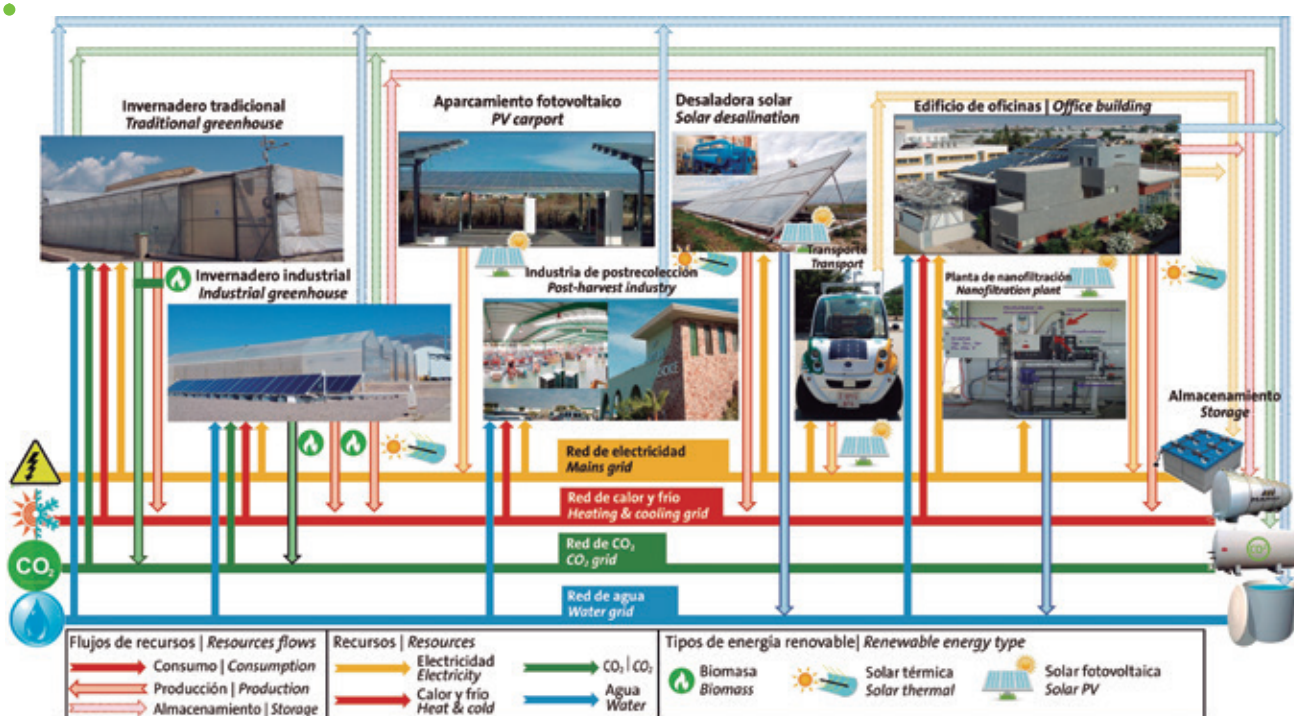
THE CHROMAE PROJECT: RESOURCE MANAGEMENT IN AGRO-INDUSTRIAL DISTRICT PLANTS OF THE ENERGY-WATER-FOOD NEXUS

In recent decades, the energy-water-food nexus has been raised as a matter of interest for the scientific community due to the potential synergies between the respective sectors involved. Hence the creation of the CHROMAE project which, from the discipline of automatic control, aims to contribute to the efficient, sustainable and equitable management of the resources used to produce food in agro-industrial districts, whether energy (electricity and process heat/cold) or other resources such as water and CO₂.

The Automation, Robotics and Mechatronics Group at the Universidad de Almería (TEP-197), affiliated to the CIESOL Solar Energy Research Centre, a joint centre of the Universidad de Almería and the Almería Solar Platform-CIEMAT, has headed up the CHROMAE project "Control and optimal management of heterogenous resources in agro-industrial production districts integrating renewable energies", funded by the Ministry of Science, Innovation and Universities through subsidy reference DPI2017-85007-R. Also taking part in this project are researchers from other institutions including the Almería Solar Platform, the Universidad Miguel Hernández, the Research and Training Institute for Agriculture and Fisheries of Andalusia and the Cajamar Foundation.

The research work has been undertaken on a combination of experimental and industrial installations that comprise a typical district in the province of Almería (Figure 1), in which different producer and transformation agents coexist: greenhouses of different technological levels, auxiliary, distributor and post-harvest industry, support buildings for administrative tasks, and transport systems. To this has been added different resource production plants (water, CO₂, electricity...) based mainly on renewable technologies, with the aim of evaluating the

Figura 1. Flujo de recursos heterogéneos entre los diferentes elementos del distrito agroindustrial | Figure 1. Flow of heterogenous resources between the different elements of the agro-industrial district



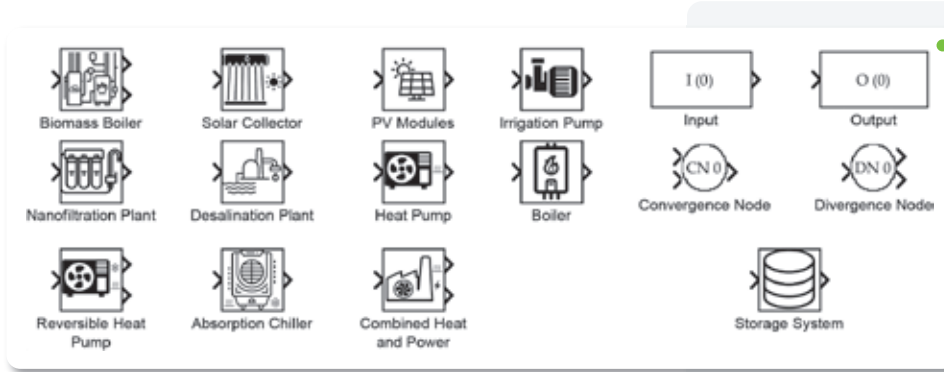


Figura 2. Componentes de la librería ODEHubs para elaborar diagramas y analizar casos de estudio
 Figure 2. Components of the ODEHubs library to draw up flowcharts and analyse case studies

feasibility of installations designed to reduce the environmental impact of the productive process.

CHROMAE has three main objectives:

tención de poner en valor la viabilidad de instalaciones destinadas a reducir el impacto medioambiental en el proceso productivo.

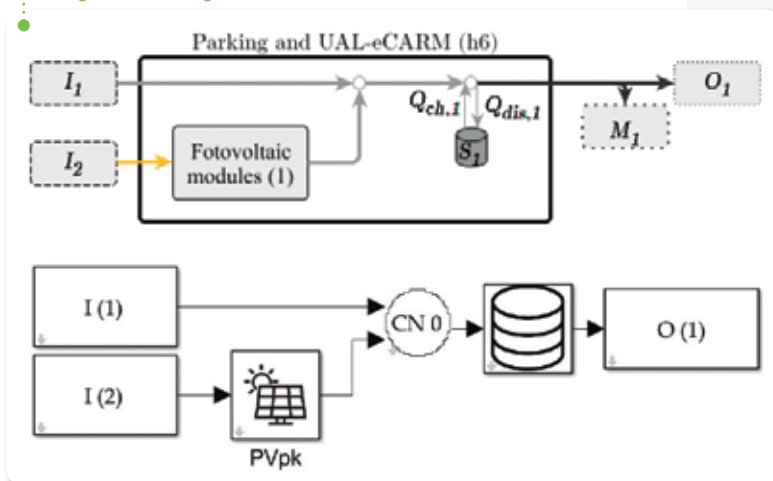
Así pues, CHROMAE persigue un triple objetivo:

- Caracterización de las interrelaciones entre los elementos del distrito agroindustrial que determinan la actividad productiva, basándose en el paradigma de los sistemas multigeneración distribuida y multienergía. El resultado prioritario del proyecto consiste en un entorno de simulación de consumo y producción que permitan analizar casos concretos, probar estrategias de gestión y tomar decisiones que optimicen la eficiencia energética.
- Desarrollo de estrategias de control para los elementos del distrito de manera que puedan satisfacer sus objetivos, cumpliendo determinadas especificaciones técnicas, minimizando el uso de los recursos necesarios para ello.
- Desarrollo de estrategias gestión integral de recursos necesarios para el funcionamiento de los elementos que conforman el distrito, utilizando técnicas de que consideren aspectos tanto económicos y medioambientales como el uso eficiente de los mismos.

Uno de los desarrollos destacables del proyecto consiste en una librería para MATLAB/Simulink (ver Figura 2) que permite simular el comportamiento de los diferentes actores de cualquier distrito industrial (ya sean productores, consumidores o almacenes de los recursos) y determinar el reparto óptimo de dichos recursos entre ellos. A modo de ejemplo para el caso de la energía eléctrica, a partir del modelo conceptual de la instalación fotovoltaica y su diagrama equivalente en Simulink (ver Figura 3), es posible planificar la gestión que se realiza del sistema de almacenamiento en función de la demanda previsible y el precio de la electricidad (ver Figura 4).

A partir de la librería anterior, se han realizado diferentes casos de estudio en el proyecto CHROMAE con el fin de evaluar la repercusión

Figura 3. Ejemplo de caso de estudio basado en la gestión de energía eléctrica con generación fotovoltaica | Figure 3. Case study example based on electrical power management with PV generation



- Characterisation of the inter-relations between the elements of the agro-industrial district that determine the productive activity, based on the approach of distributed multi-generation and multi-energy systems. The primary outcome of the project involves creating a consumption and production simulation environment that can analyse specific cases, test management strategies and take decisions that optimise energy efficiency.
- Development of control strategies for the district elements so that their objectives can be met, fulfilling specific technical specifications, while minimising the use of the resources needed for this.
- Development of management strategies that integrate the resources necessary for the operation of the elements comprising the district, using techniques that consider both economic and environmental aspects as well as their efficient use.

One of the notable project developments comprises a MATLAB/Simulink library (Figure 2), which allows the behaviour of the different agents of any industrial district to be simulated (whether producers, consumers and resource storage) and calculate the optimal distribution of these resources between them. For example, for the case of the electrical power supply, based on the conceptual model of the PV installation and its equivalent flowchart in Simulink (Figure 3), it is possible to plan the management of the storage system depending on the foreseeable demand and the electricity price (Figure 4).

Different case studies have been carried out based on the above library as part of the CHROMAE project to assess the impact that renewable sources have on the agricultural activity. To name just a few specific examples, it includes the analysis of agricultural installations with PV self-consumption; the capture and enrichment of CO₂; and the supply of water from solar desalination processes. The following potentials for improvement can be concluded from the results, which can be extrapolated to the region of Almería:

- Up to a 58% reduction in water originating from the mains grid and the aquifers in systems supplied via membrane distillation.
- Up to a 15% reduction in the total operating cost by using renewable sources.
- Up to 19% improvement in the economic benefit for small installations with self-consumption following recent legislative changes.

Similarly, although the main lines of work are related to the economic aspect, it is worth noting that both the models developed as well as the control and management strategies can take into account environmental criteria. Specifically, as regards the emissions of the CO₂ that the crop needs for its biological processes such as photosynthesis, it is

que tienen las fuentes renovables en la actividad agraria. Por citar algunos ejemplos concretos, se incluye el análisis en instalaciones agrícolas con autoconsumo fotovoltaico, la captura y enriquecimiento con CO₂ y el abastecimiento de agua a partir de procesos de desalación solar. De entre los resultados, extrapolables a la región de Almería, se desprenden los siguientes potenciales de mejora:

- Reducción de hasta un 58% de agua procedente de la red de abastecimiento o acuíferos en sistemas alimentados mediante destilación por membranas.
- Reducción de hasta un 15% del costo de operación total por el uso de fuentes renovables.
- Mejora de hasta un 19% en el beneficio económico de pequeñas instalaciones con autoconsumo tras los recientes cambios en la legislación.

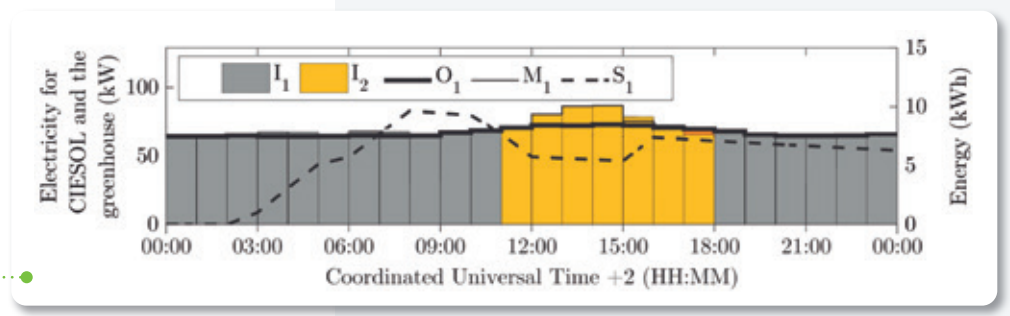
Asimismo, aunque las principales líneas de trabajo están relacionadas con el aspecto económico, cabe destacar que tanto los modelos desarrollados como las estrategias de gestión y control pueden tener en cuenta criterios ambientales. En particular, respecto a las emisiones de CO₂, como el cultivo necesita este para realizar sus procesos biológicos como la fotosíntesis, se estima que el sistema de captura y enriquecimiento con CO₂ de la planta piloto evita que alrededor un 12% de las emisiones se viertan al ambiente como consecuencia de la combustión (pese a tener la biomasa un ciclo neutro). Por otra parte, de manera indirecta, el uso de fuentes renovables permite disminuir entre un 20% y un 40% (dependiendo del caso de estudio) el consumo de la red eléctrica, reduciendo las emisiones ligadas al consumo de energía secundaria en esa misma proporción.

De forma general, las principales innovaciones de este proyecto pueden enunciarse como sigue:

- Desarrollo de un marco de modelado para distritos de cualquier naturaleza, basado en el paradigma de los “energy hubs” con los que se pueden considerar diferentes roles como productor, consumidor o almacenamiento de energía y recursos.
- Desarrollo de estrategias de gestión y validación experimental, comprobándose el funcionamiento adecuado y la consecución de un mejor uso de energía y recursos.
- Análisis del consumo y producción de energía con vistas a elaborar modelos predictivos que se integren en las estrategias de control anteriores.
- Desarrollo de una librería en abierto tanto para simulación de escenarios como para generar automáticamente el código de gestión de energía y recursos del distrito.
- Batería de datos de un distrito agroindustrial basado en invernaderos, para que puedan ser utilizados como referencia por parte de la comunidad interesada en probar estrategias de gestión energética en este tipo de distritos industriales.

Este proyecto sienta las bases para el desarrollo futuro de una red IoT que integre todos los elementos del distrito dentro de una misma arquitectura y que explote los desarrollos llevados a cabo: la implantación de las capas de control y gestión del distrito, y la instalación de una red de sensores que permite recopilar todas las variables de control necesarias para alimentar a los modelos de predicción. Dichas tareas ya han

Figura 4. Resultados del reparto de energía eléctrica a lo largo de 24 horas
 Figure 4. Results of electrical power distribution over 24 hours



estimated that the CO₂ capture and enrichment system of the pilot plant avoids around 12% of emissions being sent into the atmosphere because of their combustion (despite the biomass having a neutral cycle). Indirectly, the use of renewable sources can reduce the consumption of grid electricity (depending on the case being studied) by between 20% and 40%, reducing the emissions linked to secondary energy consumption by the same proportion.

In general terms, the main innovations of this project can be identified as follows:

- Development of a modelling framework for districts of any type, based on the energy hub model, through which different roles can be considered, as producer, consumer or as storage of energy and resources.
- Development of management and experimental validation strategies, verifying the correct operation and achieving a better use of energy and resources.
- Analysis of the energy production and consumption with a view to drawing up predictive models that are integrated into the above control strategies.
- Development of an open library for both simulating scenarios and automatically generating the energy and resources management code of the district.
- Battery of data from an agro-industrial district based on greenhouses, so that this can be used as a reference by the community interested in testing energy management strategies in this type of industrial district.

This project provides the basis for the future development of an IoT network that integrates all the elements of the district within the same architecture and exploits the developments undertaken: the deployment of layers of control and management of the district, and the installation of a network of sensors that can collate all the control variables required to feed the prediction models. These tasks have already enabled the performance of online tests and cases and it is hoped that the practical knowledge and the developments themselves are integrated into web applications, thanks to the collaborations and all the other lines of research that the Almería University research group is following. In addition, most optimal management strategies and the modelled framework used are transferable to different types of installations, meaning that it is hoped they can be developed in different environments beyond the field of agriculture.

As can be seen on the CHROMAE website, the project results have been supported by a number of publications in internationally renowned conferences and magazines (one of which was recognised in 2018 as the best work in Control Engineering at the XXXIX Automation Seminars); the culmination of five doctoral theses (one of which recognised as the best thesis in the field of control engineering by the Spanish Automation Committee in 2021); the formalisation of collaboration agreements with the business community; and the continuation of research in international projects that enjoy EU funding. Lastly, it must be highlighted that the project was one of the three finalists in

permitido la realización de ensayos y casos fuera de línea y se espera que el conocimiento práctico y los propios desarrollos sean integrados en aplicaciones web, gracias a las colaboraciones y al resto de líneas de investigación que mantiene nuestro grupo de investigación. Además, la mayoría de las estrategias de gestión óptima y el marco de modelado utilizado son transferibles a instalaciones de distinta naturaleza, por lo que se espera también poder explotarlos en entornos distintos, fuera del ámbito agrario.

Tal y como se puede consultar en la web de CHROMAE, los resultados del mismo se han visto respaldados por numerosas publicaciones en revistas y congresos de prestigio internacional (una de ellas premiada en 2018 como el mejor trabajo en Ingeniería de Control de las XXXIX Jornadas de Automática), la culminación de cinco tesis doctorales (una de ellas premiada a la mejor tesis en el área de ingeniería de control por el Comité Español de Automática en 2021), la formalización de convenios de colaboración con el tejido empresarial y la continuación de la investigación en proyectos internacionales financiados por la Unión Europea. Además, hay que destacar que el proyecto ha sido uno de los tres finalistas en la categoría Renewable Energy de la IX Edición de los enerTIC Awards 2021, otorgados por la Plataforma de empresas TIC para la mejora de la eficiencia energética y sostenibilidad. ■

the Renewable Energy category of the IX Edition of the enerTIC Awards 2021, conferred by the ITC Business Platform for improved energy efficiency and sustainability. ■



Francisco Rodríguez Díaz

Departamento de Informática, CIESOL-ceiA3, Universidad de Almería
IT Department, CIESOL-ceiA3, Universidad de Almería



Jerónimo Ramos Teodoro

Departamento de Informática, CIESOL-ceiA3, Universidad de Almería
IT Department, CIESOL-ceiA3, Universidad de Almería