HERRAMIENTAS DIGITALES E INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE TORRE DE RECEPTOR CENTRAL

Bonilla J.*, Carballo J.A.*, Avila-Marín A.*, Berenguel M. **

* CIEMAT - Plataforma Solar de Almería (PSA), Ctra. de Senés km 4.5, E-04200 Tabernas, Almería, España
** CIESOL, Centro de Investigaciones en Energía Solar, Universidad de Almería - CIEMAT, Departamento de Informática, E-04120, Almería, España

RESUMEN

El desarrollo de herramientas digitales avanzadas y la integración de técnicas de inteligencia artificial (IA) están transformando el diseño, la operación y el mantenimiento de las plantas termosolares de concentración. La Plataforma Solar de Almería (CIEMAT-PSA) está llevando a cabo diversas iniciativas orientadas a la digitalización integral de las plantas de torre de receptor central, con el objetivo de mejorar su eficiencia operativa y reducir los costes asociados a la operación y el mantenimiento. Este trabajo presenta los avances en el desarrollo e implementación de una arquitectura que integra sistemas de adquisición y gestión inteligente de datos, modelos predictivos basados en aprendizaje automático, y diferentes herramientas y sistemas de control apoyados en técnicas de inteligencia artificial. Se describen además ejemplos de casos de uso implementados en las instalaciones experimentales de la PSA. Los resultados preliminares demuestran el potencial de la combinación del modelado físico con herramientas digitales, algoritmos de IA y sistemas de control automático para incrementar la eficiencia energética y reducir los costes de operación y mantenimiento. Esta línea de trabajo sienta las bases para el desarrollo de estrategias de operación inteligente y autónoma en futuras plantas termosolares de torre de receptor central, contribuyendo a la mejora de la competitividad y la sostenibilidad de la energía solar de concentración en el contexto de la transición energética.

PALABRAS CLAVE: Digitalización, Inteligencia artificial, Sistemas de torre de receptor central

ABSTRACT

The development of advanced digital tools and the integration of artificial intelligence (AI) techniques are transforming the design, operation, and maintenance of concentrating solar power (CSP) plants. The Plataforma Solar de Almería (CIEMAT-PSA) is carrying out several initiatives aimed at the comprehensive digitalization of central receiver tower plants, with the objective of improving operational efficiency and reducing operation and maintenance costs. This work presents the progress achieved in the development and implementation of an architecture that integrates intelligent data acquisition and management systems, predictive models based on machine learning, and various tools and control systems supported by artificial intelligence techniques. In addition, examples of use cases implemented in the experimental facilities of the PSA are described. Preliminary results demonstrate the potential of combining physical modeling with digital tools, AI algorithms, and automatic control systems to increase energy efficiency and reduce operation and maintenance costs. This line of work lays the foundation for the development of intelligent and autonomous operation strategies for future central receiver tower plants, contributing to the improvement of the competitiveness and sustainability of concentrating solar power in the context of the energy transition.

KEYWORDS: Digitalization, Artificial Intelligence, Central receiver tower systems

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de energía solar de concentración (CSP, por sus siglas en inglés), y en particular los sistemas de torre con receptor central, han demostrado un alto potencial para la generación renovable a gran escala gracias a su capacidad para alcanzar elevadas temperaturas de operación y su integración con sistemas de almacenamiento térmico. Sin embargo, la competitividad de esta tecnología sigue dependiendo en gran medida de la mejora de su eficiencia operativa, la fiabilidad de los sistemas y la reducción de los costes de operación y mantenimiento.

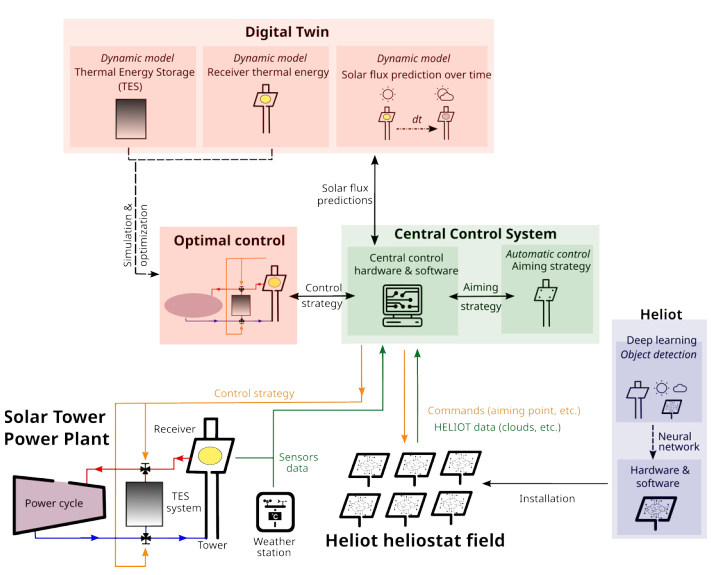
En los últimos años, el rápido desarrollo de las tecnologías digitales, incluyendo la inteligencia artificial (IA), la analítica de datos y los gemelos digitales, ha abierto nuevas oportunidades para optimizar sistemas energéticos complejos (Xu et al., 2020). Estas herramientas permiten avanzar hacia una operación más inteligente mediante el análisis predictivo, la toma de decisiones basada en datos y el desarrollo de estrategias avanzadas de control y mantenimiento predictivo, lo que contribuye a mejorar la eficiencia global de las plantas termosolares.

La Plataforma Solar de Almería (PSA-CIEMAT), como una de las infraestructuras de investigación de referencia internacional en energía solar térmica de concentración, está desarrollando un conjunto de herramientas digitales y metodologías basadas en IA aplicadas específicamente a las plantas de torre de receptor central. Estas iniciativas se enmarcan en una tendencia internacional hacia la digitalización integral del entorno operativo de las plantas termosolares, combinando la adquisición y gestión inteligente de datos en tiempo real, el modelado predictivo y los sistemas de control automático (Camacho et al., 2012).

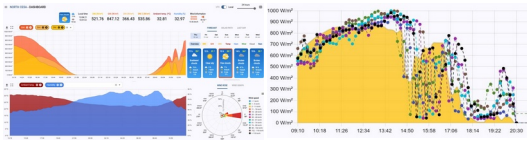
El presente trabajo presenta los avances más recientes en el desarrollo e integración de estas herramientas en las instalaciones experimentales de la PSA, destacando su aplicación en la monitorización y control de distintos subsistemas, así como la visión global a futuro de la digitalización completa de la planta. El objetivo final es sentar las bases para una operación autónoma e inteligente de las futuras plantas termosolares de receptor central, contribuyendo a una energía solar de concentración más competitiva y sostenible en el marco de la transición energética hacia un sistema descarbonizado, sostenible y climáticamente neutro.

DIGITALIZACIÓN EN SISTEMAS DE TORRE

La Figura 1.1 muestra una visión global del enfoque de digitalización aplicado a los sistemas de torre de receptor central. En la Plataforma Solar de Almería (PSA) se están desarrollando actualmente muchos de estos componentes, con el objetivo de integrarlos en un sistema digital unificado. Otros elementos aún se encuentran en fase de planificación y serán abordados en etapas futuras. A continuación, se incluye una lista y se describen brevemente los principales desarrollos que están en curso.

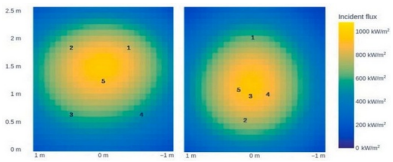


1. Esquema global



2. Estación meteorológica 3. Predicción radiación

4. Sistema SCADA 5. Seguidor inteligente



6. Estrategia de apunte en el receptor

Fig. 1. Digitalización de sistemas de torre de receptor central

- **Software para estaciones meteorológicas modular basado en micro servicios.** Plataforma flexible que permite la adquisición, procesamiento y distribución de datos meteorológicos mediante componentes independientes y escalables, facilitando su integración con otros sistemas digitales (ver Fig. 1.2) (Bonilla et al. (2025)).

- **Modelos de predicción de la radiación solar basados en IA.** Algoritmos de aprendizaje automático entrenados con datos históricos para estimar la irradiancia solar a corto y medio plazo, mejorando la precisión de las previsiones y optimizando la planificación operativa (ver Fig. 1.3) (Abad-Alcaraz et al. (2025)).

- **Sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition).** Entorno centralizado para la supervisión y control en las instalaciones termosolares, que incorpora capacidades de análisis avanzado y conectividad con plataformas digitales y herramientas de inteligencia artificial (ver Fig. 1.4) (Carballo et al. (2024)).

- **Seguidor solar inteligente para heliostatos en lazo cerrado.** Sistema de control automático que ajusta la orientación de los heliostatos en tiempo real mediante una cámara de bajo coste, mejorando la fiabilidad del seguimiento y reduciendo los coste de instalación y operación (ver Fig. 1.5) (Carballo et al. (2019)).

- **Estrategía de apunte en el receptor basada en aprendizaje por refuerdo.** Agente inteligente que optimiza en tiempo real la estrategia de apunte de los heliostatos sobre el receptor según las condiciones operativas, maximizando la potencia absorbida mientras respeta las limitaciones de estrés térmico para preservar la integridad de los materiales y aumentar la durabilidad del receptor (ver Fig. 1.6) (Carballo et al. (2025)).

FUTUROS TRABAJOS

Con el objetivo de alcanzar la digitalización completa de los sistemas de torre, se ha planificado el desarrollo de nuevos subsistemas, así como la integración y validación del sistema digital global en las instalaciones de CIEMAT-PSA. Estos nuevos desarrollos incluyen sistemas para la medida de flujo en el receptor mediante agentes inteligentes, el diseño de un gemelo digital para sistemas de receptor central, la implementación de estrategias de control óptimo de la planta y el desarrollo de agentes destinados a la detección de fallos y al mantenimiento predictivo.

AGRADECIMIENTOS

Los desarrollos previamente descritos se están llevando a cabo gracias a diversos proyectos de investigación en los que participa el personal de la Unidad de Foco Puntual de la Plataforma Solar de Almería. Entre ellos destacan los proyectos HORIZON Innovation Actions: ASTERIx-CAESar (n.º 101122231), así como el proyecto CSP ERANET LEIA (PCI2022-135015-2).

REFERENCIAS

Abad-Alcaraz, V., Castilla, M., Carballo, J. A., Bonilla, J., & Álvarez, J. D. (2025). Multimodal deep learning for solar radiation forecasting. Applied Energy, 393, 126061. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126061

Bonilla, J., Carballo, J. A., Abad-Alcaraz, V., Castilla, M., Álvarez, J. D., & Fernández-Reche, J. (2025). A real-time and modular weather station software architecture based on microservices. Environmental Modelling & Software, 186, 106337. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106337

Camacho, E. F., Berenguel, M., Rubio, F. R., & Martínez, D. (2012). Control of Solar Energy Systems. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5149-1

Carballo, J. A., Bonilla, J., Fernández-Reche, J., Avila-Marín, A., & Díaz, B. (2024). Modern SCADA for CSP systems based on OPC UA, Wi-Fi mesh networks, and open-source software. Energies, 17(24), 6284. https://doi.org/10.3390/en17246284

Carballo, J. A., Bonilla, J., Berenguel, M., Fernández-Reche, J., & García, G. (2019). New approach for solar tracking systems based on computer vision, low-cost hardware and deep learning. Renewable Energy, 133, 1158–1166. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.101

Carballo, J. A., Bonilla, J., Cruz, N. C., Fernández-Reche, J., Álvarez, J. D., Ávila-Marín, A., & Berenguel, M. (2025). Reinforcement learning for heliostat aiming: Improving the performance of Solar Tower plants. Applied Energy, 377, 124574. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124574

Xu, Y., Yan, C., Liu, H., Wang, J., Yang, Z., & Jiang, Y. (2020). Smart energy systems: A critical review on design and operation optimization. Sustainable Cities and Society, 62, 102369. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102369