

Jornadas de Automática

Sistema de supervisión y control de captadores solares con reflectores

Martínez-Roa, Antonio^a, Gil, Juan D.^{a,*}, Pataro, Igor M. L.^a, Berenguel, Manuel^a

^aUniversidad de Almería, Centro Mixto CIESOL, ceia3, Ctra. Sacramento s/n, 04120, Almería, España.

To cite this article: Martínez-Roa, Antonio, Gil, Juan D., Pataro, Igor M. L., Berenguel, Manuel 2025. Supervision and control system for a solar collector field with reflectors.Jornadas de Automática, 46.

<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12172>

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema SCADA (por sus siglas en inglés, *Supervisory, Control And Data Acquisition*) para la supervisión y el control de un campo solar térmico que abastece una planta de destilación por membranas. Dicho sistema permitirá la adquisición en tiempo real de datos de operación, la gestión eficiente de los recursos y la interacción con los dispositivos de campo. Su principal objetivo es proporcionar a los investigadores datos precisos para llevar a cabo el modelado y control avanzado de las principales variables en futuros estudios. El trabajo incluye la implementación del sistema SCADA y el diseño y prueba preliminar de algunos de los bucles básicos de control principales, como el de posición de los reflectores y el de la temperatura de salida del campo. Todo el trabajo se desarrolla en la infraestructura experimental Agroconnect, ubicada en el centro IFAPA junto a la Universidad de Almería.

Palabras clave: Supervisión de procesos, Control de procesos, Sistema de instrumentación y control, Adquisición de datos de sensores remotos, Control de recursos de energía renovable, Modelado e integración de sistemas de energía renovable.

Supervision and control system for a solar collector field with reflectors

Abstract

This work presents the development of a SCADA system (Supervisory, Control, and Data Acquisition) for the supervision and control of a solar thermal field that feeds a membrane distillation plant. The system enables real-time acquisition of operational data, efficient resource management, and interaction with field devices. Its main objective is to provide researchers with accurate data to support the modeling and advanced control of the main variables in future studies. The work includes both the implementation of the SCADA system and the preliminary design and testing of key control loops, such as the reflector position control and the solar field outlet temperature control. All activities are carried out within the Agroconnect experimental infrastructure, located at the IFAPA center in collaboration with the University of Almería.

Keywords: Process supervision, Process Control, Instrumentation and control systems, Remote sensor data acquisition, Control of renewable energy resources, Renewable Energy System Modeling and Integration.

1. Introducción

Los sistemas de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA, por sus siglas en inglés, *Supervisory, Control And Data Acquisition*) son plataformas diseñadas para gestionar y monitorizar procesos industriales o sistemas físicos. Sus funciones principales incluyen la recopilación de datos en tiempo real, la visualización de estos a través de interfa-

ces gráficas, su almacenamiento para su posterior análisis y la ejecución de algoritmos de control para optimizar el rendimiento de los procesos (Rodríguez et al., 2016). Además, los sistemas SCADA suelen incluir funcionalidades de alarmas y notificaciones para garantizar una respuesta rápida ante eventos anómalos, siendo fundamentales en sectores como la manufactura, la energía y la automatización de edificios.

* Autor para correspondencia: juandiego.gil@ual.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

La interconexión de múltiples elementos de distintos fabricantes y comunicados en diferentes escalas temporales plantea desafíos importantes en los sistemas SCADA, como la latencia en las comunicaciones, la pérdida de datos o las vulnerabilidades de seguridad. Para mitigar estos riesgos, es esencial garantizar una comunicación robusta y confiable entre los distintos dispositivos del sistema (Deac et al., 2019; González et al., 2017). Una de las soluciones implementadas en la industria es la comunicación por protocolo OPC UA (por sus siglas en inglés *Open Platform Communications Unified Architecture*), un estándar basado en la tecnología COM/DCOM, que permite el cambio de datos independiente de la plataforma y extensible, de manera segura y versátil. En este contexto, OPC UA se posiciona como una herramienta clave para los sistemas SCADA, al permitir una integración eficiente y segura de datos provenientes de diversas fuentes, reforzando así la confiabilidad y escalabilidad de la infraestructura de automatización.

El sistema SCADA adquiere un papel esencial en aplicaciones complejas de campos de captadores térmicos como es la destilación por membranas (MD, por sus siglas en inglés *Membrane Distillation*), donde la estabilidad operativa y la eficiencia energética dependen del control preciso de variables críticas (Andrés-Mañas et al., 2020). Entre ellas destacan los caudales y las temperaturas de alimentación, las cuales se ven influenciadas por las condiciones meteorológicas, principalmente por la irradiancia solar (Gil et al., 2020). Dado que el rendimiento del sistema depende en gran medida de variables como la temperatura de alimentación, el caudal del circuito primario y las condiciones meteorológicas, es imprescindible contar con una supervisión continua y un control automático preciso. En este contexto, el control de los captadores solares se convierte en un elemento clave, ya que fluctuaciones en la irradiancia solar o en el flujo térmico afecta directamente la capacidad de evaporación del sistema MD. El sistema SCADA permite integrar la adquisición de datos, el análisis en tiempo real y la implementación de acciones de control, asegurando que los captadores operen en condiciones óptimas y que el aporte térmico se mantenga dentro de los márgenes requeridos.

Ante la necesidad un sistema eficaz de supervisión y control del campo de captadores solares para plantas de desalación tipo MD, este trabajo presenta el desarrollo e implementación de un sistema SCADA diseñado específicamente para la operación y la monitorización de un campo solar térmico equipado con reflectores para su uso en desalación térmica. La instalación se encuentra en su fase inicial de operación y aún carece de sistemas automáticos de control y supervisión. La planta esta ubicada en el centro IFAPA, integrada en la infraestructura experimental Agroconnect (www.agroconnect.es). El sistema SCADA ha sido diseñado con protocolos de comunicación basados en OPC UA, lo que permite garantizar la interoperabilidad entre los distintos instrumentos y subsistemas de la planta. Además del diseño e integración del sistema, el trabajo incluye pruebas preliminares de los controladores implementados para las principales variables operativas, como la posición de los reflectores solares y la temperatura de salida del campo solar, elementos clave para el rendimiento térmico y la eficiencia global del proceso de desalación.

El documento se organiza como sigue: la sección 2 mues-

tra los principales materiales y métodos usados para el desarrollo del trabajo. La sección 3 presenta los principales resultados, describiendo la implementación del SCADA y algunos ensayos preliminares de controladores. Por último, la sección 4 recoge las principales conclusiones y algunas ideas de trabajos futuros.

2. Materiales y métodos

Esta sección presenta una descripción completa del campo solar térmico y los circuitos primario y secundario de la planta de desalación, así como de los principales elementos hardware y software que se han utilizado. Nótese que en este trabajo también se han usado metodologías clásicas de la Ingeniería de Control como el modelado mediante funciones de trasferencia y el diseño de controladores de tipo Proporcional, Integral y Derivativo (PID), las cuales no se incluyen por el amplio conocimiento previo existente en el área.

2.1. Descripción del sistema

En la Fig. 1 se puede observar el campo de captadores solares térmicos avanzados, instalado en la infraestructura Agroconnect (<https://agroconnect.es/installaciones/>).



Figura 1: Campo de captadores solares avanzados.

Este trabajo se centrará en dicho campo de captadores, cuya principal peculiaridad con respecto a los clásicos captadores planos, es la incorporación de unos reflectores para el aumento de la eficiencia de los mismos. El esquema de los sensores y actuadores que conforman el campo y lo unen con la MD se muestra en la Fig. 2.

El agua ingresa a los diferentes circuitos, con una bomba externa desde una bolsa de almacenamiento. Una vez que los circuitos están correctamente presurizados y llenos, se puede de comenzar a operar el sistema. En el circuito primario, el agua es impulsada por una bomba hacia el campo solar, donde es calentada por los captadores. Tras salir de los captadores, llega a una válvula de 3 vías. En esta, puede ser distribuida hacia un aerotermo, para reducir su temperatura si fuese necesario, o directamente enviada a un intercambiador de calor. En el intercambiador, el agua trasfiere temperatura al circuito secundario, por lo que se enfriá y es nuevamente impulsada hacia el campo solar para continuar el calentamiento del agua.

En el circuito secundario, a la derecha del intercambiador, una segunda bomba impulsa agua desde el depósito 3 hasta el intercambiador, para calentarla y ser almacenada en el depósito 1, consiguiendo almacenar agua a una alta temperatura en

este primer depósito durante un largo periodo de tiempo. Por último, en el circuito terciario el agua es impulsada por una nueva bomba desde el primer depósito hasta un nuevo intercambiador de calor para calentar el agua que alimenta la planta MD. Como consecuencia de calentar el agua en dicho intercambiador, esta regresa al tercer depósito más fría, para que, desde allí, la bomba de circuito secundario la vuelva a impulsar hacia el primer intercambiador de calor, para ser calentada nuevamente y completándose así el ciclo.

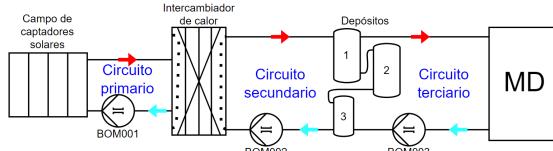


Figura 2: Esquema del campo solar térmico.

2.2. Elementos Hardware

La instalación está completamente instrumentada, incorporando una variedad de sensores y actuadores que permiten tanto la adquisición de datos como la manipulación de las principales variables que afectan al sistema. La instrumentación utilizada se resume en la Tabla 1.

Tabla 1: Resumen de la instrumentación y actuadores de la instalación.

Sensor	Modelo/Fabricante
Temperatura	TST90 / Endress+Hauser
Caudal	50P40 / Endress+Hauser
Inclinación	INX360D / Pepperl+Fuchs
Radiación	SP-214 / Apogee Instruments
Vel. Viento	PA2 / SensoVant
Actuador	Modelo/Fabricante
Bomba	TP 32-150 / Grundfos
Variador	OPTIDRIVE E2 / Invertek Drives
Válvula	AME 435 / Danfoss
Relés	RSB2A080B7 / Schneider Electric

La instrumentación se encuentra gobernada por un PLC (por sus siglas en inglés, *Programmable Logic Controllers*) de la empresa Schneider Electric, cuyo modelo es TM262L20MESE8T. Destaca por su capacidad para ofrecer servicios de comunicación mediante el protocolo OPC UA.

2.3. Software para la elaboración del sistema SCADA

Para la realización del sistema SCADA, se ha seleccionado FUXA (<https://frangoteam.org>) como la herramienta principal. Esta elección se debe a su versatilidad, facilidad de uso y capacidad para abordar una amplia gama de aplicaciones industriales, de una forma robusta y accesible a través de tecnologías web. FUXA se destaca como un robusto software de código abierto basado en la web, diseñada para la visualización y supervisión de procesos industriales. Permite la rápida creación y despliegue de sistemas SCADA, interfaz hombre-máquina, *dashboard* o IIoT (por sus siglas en inglés, *Industrial Internet of Things*).

Gracias a su compatibilidad con múltiples protocolos de comunicación industrial, entre ellos el OPC UA, y Ethernet/IP, el SCADA FUXA se integra fácilmente con una amplia

variedad de equipos y sistemas. Además, ofrece un editor web intuitivo basado en tecnologías como Node.js y Angular, que simplifica el diseño y despliegue de proyectos sin necesidad de instalaciones complejas. Finalmente, incluye un motor de base de datos SQLite integrado, que facilita el almacenamiento de grandes volúmenes de datos de procesos.

2.4. Controladores

2.5. Controladores de tipo PID

Como un primer acercamiento al control regulatorio de la planta, se diseñaron dos controladores de tipo PI. Uno que relaciona el porcentaje de acción de la bomba con el caudal que circula y otro que relaciona dicho caudal con la temperatura de salida del campo. Para ello, se consideró la función de transferencia del controlador C(s) (en el dominio de Laplace) con estructura ideal (Åström y Hägglund, 2006):

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right), \quad (1)$$

donde K_p es la ganancia proporcional y T_i es el tiempo integral. Estos controladores han sido probados en primer lugar con ayuda de Matlab, para posteriormente incorporarlos en el PLC incluyendo el mecanismo *anti-windup* mediante Diagrama de Bloques Funcionales. Nótese que para el control de la temperatura del campo se han usado estructuras de control basadas en este tipo de controladores como el control en cascada o el predictor de *Smith*. Los esquemas concretos se presentarán en la sección de resultados. No obstante, el lector interesado puede consultar más información acerca de estas metodologías en el trabajo de Åström y Hägglund (2006).

2.6. Control de inclinación de los reflectores

El control de la inclinación de los reflectores se ha llevado a cabo utilizando las ecuaciones de control proporcionadas por la empresa Seenoso Renoval S.L., en el marco del convenio específico de colaboración n.º 10310 suscrito con la Universidad de Almería. Por razones de confidencialidad, dichas ecuaciones no pueden ser incluidas en este documento. No obstante, en la siguiente sección se muestra un diagrama de bloques que representa la estructura del sistema de control empleado.

3. Resultados

En esta sección se presenta, en primer lugar, el desarrollo y la implementación del sistema SCADA. Posteriormente, se describirán los tres controladores fundamentales implementados en el campo. Se debe destacar que todos los elementos se han integrado siguiendo el esquema presentado en la Fig. 3, excepto el control de temperatura, que hasta el momento solo ha sido probado en simulación.

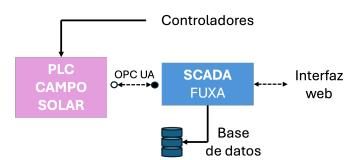


Figura 3: Esquema de integración de los diferentes componentes.

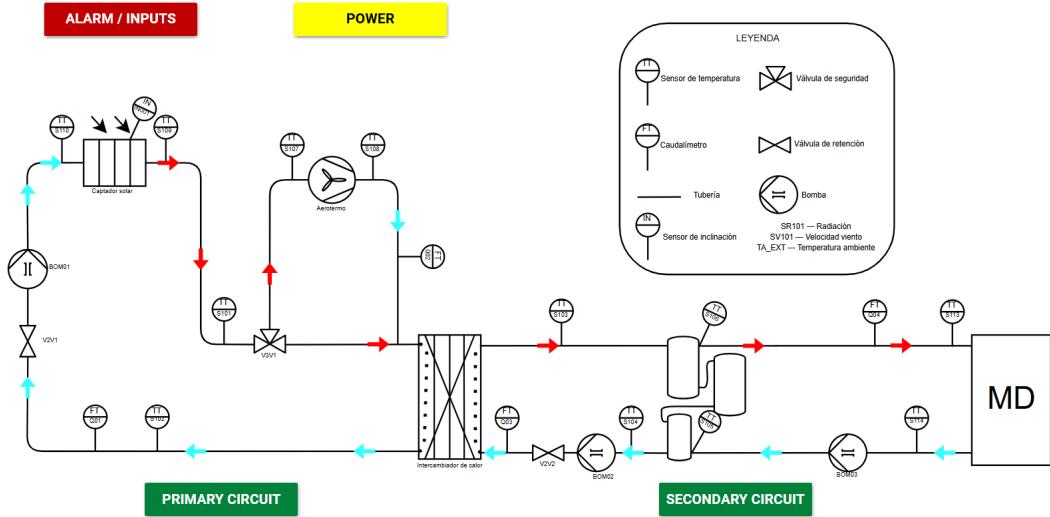


Figura 4: Pantalla principal del sistema SCADA FUXA.

3.1. Diseño y desarrollo del SCADA

Antes de iniciar el desarrollo del sistema de adquisición de datos, se llevó a cabo una fase de diseño para garantizar que el sistema cumpliera con las expectativas y necesidades del usuario. Esta fase implicó un análisis que permitió definir criterios claros y requisitos funcionales.

El diseño priorizó una interfaz de usuario sencilla e intuitiva, asegurando que los usuarios pudieran interactuar con la aplicación de manera eficiente y sin necesidad de conocimientos técnicos avanzados. Además, se implementaron medidas de seguridad que garantizaron un acceso seguro a los datos, permitiendo que solo usuarios autorizados pudieran realizar modificaciones en el mismo. También se consideró la capacidad de almacenar datos con diferentes tiempos de muestreo, adaptándose a las necesidades específicas de cada tipo de variable, y para poder visualizar los datos históricos de la variable deseada en otro momento.

Por otro lado, se consideró fundamental que la interfaz gráfica de usuario se ajustara a la norma UNE:2016 (Asociación Española de Normalización (UNE), 2016), orientada a la correcta caracterización de las tuberías y la identificación precisa del fluido que circula por ellas. Asimismo, se incorporaron las normas ISA-5.1 (International Society of Automation, 2024) e ISA-5.2 (International Society of Automation, 1976), que proporcionan directrices para la identificación y etiquetado de instrumentos y sistemas de control, contribuyendo a la estandarización y claridad.

Así, el sistema SCADA desarrollado se muestra en las Figs. 4, 5 y 6. Este SCADA cuenta con 3 ventanas principales, las cuales se detallan a continuación. La pantalla principal, representada en la Fig. 4, ilustra un diagrama completo del circuito junto con un botón para alarmas y parámetros de entrada. Dicho botón despliega una ventana emergente que permite verificar que alarma se encuentra activa o modificar los parámetros principales del sistema. Además, se incluye un botón etiquetado como *POWER*, que conduce a una ventana donde se puede monitorear el consumo eléctrico del sistema. Los dos botones restantes facilitan el acceso a otras ventanas principales.

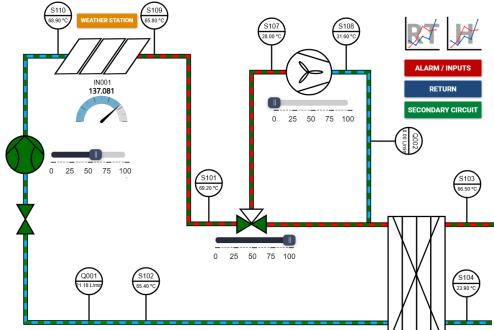


Figura 5: Circuito primario.

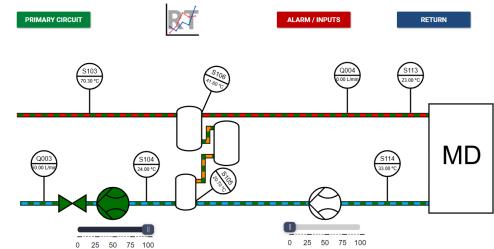


Figura 6: Circuito secundario.

Las ventanas para los circuitos primario y secundario-terciario, mostradas en las Figs. 5 y 6, respectivamente, son muy parecidas. En estas, se visualiza el diagrama correspondiente a cada sección del circuito, junto con los valores que presentan los sensores y actuadores. Además, se suman botones que permiten la visualización gráfica de las variables del sistema. Finalmente, se incorporaron botones que facilitan la navegación entre estas ventanas y un botón de *RETURN* para regresar a la pantalla principal. Exclusivamente en el circuito primario, existe un botón que ofrece acceso a los valores en tiempo real de la estación meteorológica.

Además de almacenar los datos en el SCADA para su visualización, los datos se exportan a través de un script en Python a formato .csv, lo que facilita su análisis en otras aplicaciones.

3.2. Diseño, implementación y pruebas de los bucles de control regulatorio

Para desarrollar los bucles de control regulatorio, el primer paso consistió en describir las dinámicas fundamentales utilizando modelos dinámicos lineales de bajo orden. Específicamente, se usaron modelos de primer orden definidos por su ganancia estática k y su constante de tiempo τ . Para identificar estos modelos, se utilizó del método de curva de reacción, donde se llevó a cabo pruebas en bucle abierto en el sistema mediante la introducción de diversos escalones en las señales de entrada. Posteriormente, los modelos se identificaron con el *toolbox* de identificación de MATLAB.

El primer modelo representa la función de transferencia entre el porcentaje de frecuencia del variador ($BOM101_{Mod}$ – entrada [%]) y el caudal del circuito primario ($Q001$ – salida [L/min]). El modelo identificado presenta una ganancia de $k_1 = 0,1268$ [L/min·%] y una constante de tiempo $\tau_1 = 4,65$ [s]. Así, tras obtener el modelo dinámico lineal, se diseñó un controlador PI utilizando el método de cancelación de polos (Åström y Hägglund, 2006), sintonizado para una constante de tiempo en lazo cerrado igual a la que se encontraba presente en lazo abierto, logrando una ganancia proporcional $K_{p,1} = 7,8864$ [%·L/min] y un tiempo integral $T_{i,1} = 4,65$ [s].

En las Figs 7 y 8, se observa el esquema de control y se presentan los resultados obtenidos, respectivamente. Como se puede apreciar en el ensayo, el controlador implementado alcanza la referencia con un comportamiento muy próximo al especificado para bucle cerrado. El lazo de control de caudal fue utilizado para poder obtener el modelo de los captadores, que relaciona la temperatura de salida con el caudal de alimentación. Esta metodología sigue los pasos clásicos para la implementación de un controlador en cascada en estos tipos de sistemas (Gil et al., 2020).

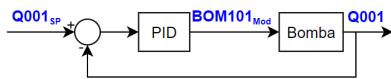


Figura 7: Esquema de control de la bomba.

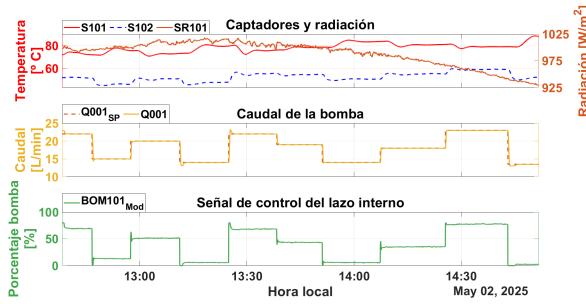


Figura 8: Resultados del control del caudal de la bomba.

Como consecuencia del carácter no lineal de los captadores (como se observa en los modelos no lineales descritos por Camacho et al. (2012)) fue implementado un método de identificación donde se obtuvo un modelo de orden superior nominal y, posteriormente, se aproximó a un modelo de primer orden aplicando la Regla de la mitad de Skogestad (Skogestad, 2004). De esta forma, el segundo modelo, que relaciona el

caudal del circuito primario ($Q001$ – entrada [L/min]) con la temperatura de salida del agua de los captadores ($S101$ – salida [°C]), presenta una ganancia $k_2 = -1,0206$ [°C·L/min], una constante de tiempo $\tau_2 = 826,2781$ [s] y un retardo dominante de 1151,1 [s]. El retardo es atribuido a la considerable longitud de la tubería entre la bomba y la posición del sensor de temperatura. Considerando el retardo dominante, se implementó la estrategia predictor de Smith (Smith, 1959), donde el controlador PI puede ser diseñado mediante cancelación de polos sobre el sistema sin retardo, dada la capacidad del predictor de compensar retardo modelado del proceso. Los parámetros obtenidos fueron $K_{p,2} = -0,9798$ [L/min·°C] y $T_{i,2} = 826,2781$ [s]. El filtro fue calculado de acuerdo con la información encontrada en el trabajo de Normey-Rico et al. (2009). Las Figuras 9 y 10 muestran el esquema de control y los resultados obtenidos de la implementación de la estrategia en simulación. Cabe señalar que, hasta el momento, solo se han realizado pruebas en simulación, ya que se tiene previsto instalar un nuevo sensor más cercano a la salida del campo. Además, es necesario revisar algunos problemas en la instrumentación que, hasta ahora, han impedido lograr una caracterización y control precisos de este lazo.

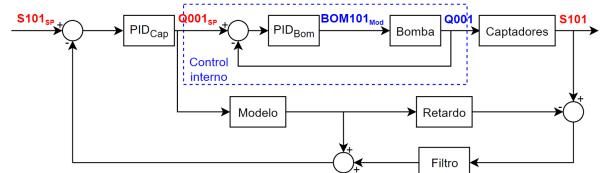


Figura 9: Esquema del control en cascada.

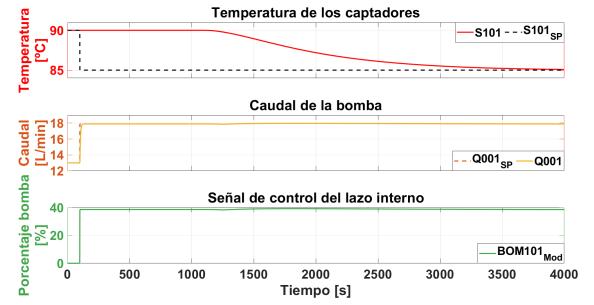


Figura 10: Simulación del control en cascada.

3.3. Control automático de los reflectores

El diseño de este sistema de control para reflectores solares permite maximizar el aprovechamiento de la radiación solar, asegurando a la vez la protección de los componentes mecánicos y eléctricos frente a condiciones ambientales adversas. El sistema opera basándose en el cálculo continuo del ángulo óptimo de los reflectores en función de la posición del sol. Este ángulo se actualiza cada segundo, garantizando que los espejos reflejen la mayor cantidad posible de radiación hacia los captadores solares. Los ángulos permitidos están limitados entre 35°, cuando los reflectores están paralelos a los captadores, y 180°, cuando se encuentran paralelos al suelo. Para evitar daños en el motor que mueve los mismos, se ha definido un margen de tolerancia de ±0.5° respecto al ángulo objetivo, dentro del cual no se activa el movimiento.

El sistema de control incluye medidas de seguridad para proteger tanto los componentes como la instalación. Antes de permitir que los reflectores se abran hacia el ángulo deseado, se verifica que la radiación solar sea superior a un umbral determinado por el operador. Además, se supervisa continuamente la velocidad del viento. Si esta supera un límite máximo preestablecido, el sistema mantiene los reflectores cerrados para evitar daños estructurales y se activa un temporizador que mantiene los reflectores cerrados durante un período de 10 minutos. En la Fig 11, se puede observar el esquema de control de los reflectores. En dicho esquema, lo más importante es la obtención del ángulo de referencia de los reflectores en función de la posición del sol, concretamente de la altura solar (α) y del azimut (γ). Como se ha comentado anteriormente, esta ecuación se ha desarrollado en colaboración con la empresa en base al acuerdo de colaboración específico con la Universidad de Almería. Así, el sistema recibe información sobre la fecha y hora, para calcular a partir de esta información la posición del sol. También se encuentran instalados un piranómetro y un anemómetro, para obtener los valores de radiación solar global y velocidad del viento en tiempo real.

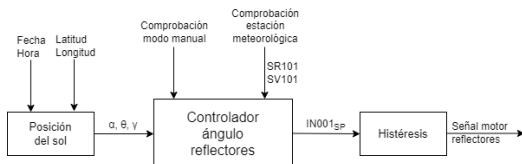


Figura 11: Esquema del control automático de los reflectores.

Finalmente, se llevó a cabo una prueba en la que los reflectores fueron forzados manualmente a su apertura máxima para que trascurrido un tiempo vuelvan a seguir la referencia automática, con el objetivo de verificar que esta referencia aumenta la temperatura de los captadores. Para evaluar únicamente el efecto de los reflectores en la temperatura, el ensayo se realizó manteniendo constantes es resto de factores. Los resultados de esta prueba se presentan en la Figura 12.

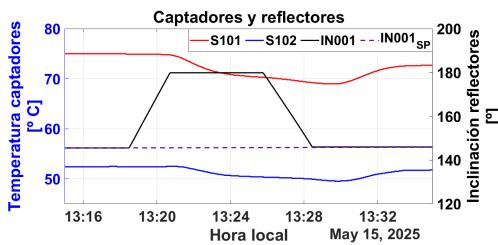


Figura 12: Resultado del control automático de los reflectores.

4. Conclusiones y trabajos futuros

En el presente trabajo se ha implementado un sistema SCADA para la supervisión y control de un campo de captadores solares térmicos avanzados, diseñado para suministrar energía térmica a una planta de destilación por membranas. Además, se han implementado varios controladores, dos de tipo PID para la regulación del caudal y la temperatura del campo, así como un controlador adicional para el seguimiento automático de los reflectores solares, optimizando su orientación según la posición del sol. Se debe hacer notar que los resultados obtenidos hasta el momento son preliminares, si

bien muestran un funcionamiento prometedor. No obstante, se prevé su mejora progresiva a medida que el sistema entre en operación regular y se disponga de más datos e instrumentación precisa y bien posicionada para el ajuste fino de los controladores y la optimización del rendimiento global.

Como líneas futuras de trabajo, se plantea el desarrollo de modelos híbridos que capturen adecuadamente la dinámica no lineal de la planta. Asimismo, se prevé la implementación de estrategias avanzadas de control orientadas a maximizar la eficiencia energética y la precisión operativa. Además, se intentará integrar este sistema SCADA con el sistema SCADA de la planta MD y el de la ósmosis inversa.

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto de I+D+i PID2023-150739OB-I00 y la infraestructura Agroconnect EQC2019-006658-P, ambos financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y "FEDER Una manera de hacer Europa", y agradecer a Proyecto de Fortalecimiento de Grupos de Investigación (código P_FORT_GRUPOS_2023/14 - Universidad de Almería), financiado por la Secretaría General de Investigación e Innovación de la Consejería de Universidad, Investigación e Innovación de la Junta de Andalucía, en el marco del Programa Operativo FEDER Andalucía 2021-2027.

Referencias

- Andrés-Mañas, J. A., Roca, L., Ruiz-Aguirre, A., Acién, F. G., Gil, J. D., Zaragoza, G., 2020. Application of solar energy to seawater desalination in a pilot system based on vacuum multi-effect membrane distillation. *Applied Energy* 258, 114068.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114068
- Asociación Española de Normalización (UNE), 2016. Norma UNE 1063:2016. caracterización de tuberías. Madrid, España.
- Åström, K. J., Hägglund, T., 2006. Advanced PID Control. Vol. 461. ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, Research Triangle Park, NC, USA.
- Camacho, E. F., Berenguel, M., Rubio, F. R., Martínez, D., 2012. Control of Solar Energy Systems. Springer, London, England.
DOI: 10.1007/978-0-85729-916-1
- Deac, G. C., Georgescu, C. N., Popa, C. L., Cotet, C. E., Chiscop, F., 2019. New method for sending data to the cloud from an OPC UA client application. *Proceedings in Manufacturing Systems* 14 (2), 55–60.
- Gil, J. D., Roca, L., Zaragoza, G., Normey-Rico, J. E., Berenguel, M., 2020. Hierarchical control for the start-up procedure of solar thermal fields with direct storage. *Control Engineering Practice* 95, 104254.
- González, I., Calderón, A. J., Barragán, A. J., Andújar, J. M., 2017. Integration of sensors, controllers and instruments using a novel OPC architecture. *Sensors* 17, 1–26.
DOI: 10.3390/s17071512
- International Society of Automation, 1976. ISA-5.2-1976 (R1992): Binary Logic Diagrams for Process Operations. International Society of Automation, Research Triangle Park, NC, USA.
- International Society of Automation, 2024. ANSI/ISA-5.1-2024: Instrumentation Symbols and Identification. International Society of Automation, Research Triangle Park, NC, USA.
- Normey-Rico, J. E., Guzman, J. L., Dormido, S., Berenguel, M., Camacho, E. F., 2009. An unified approach for dtc design using interactive tools. *Control Engineering Practice* 17, 1234–1244.
DOI: 10.1016/j.conengprac.2009.05.007
- Rodríguez, F., Guzmán, J., Castilla, M., Sánchez-Molina, J., Berenguel, M., 2016. A proposal for teaching SCADA systems using virtual industrial plants in engineering education. *IFAC-PapersOnLine* 49 (6), 138–143.
- Skogestad, S., 2004. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Modeling, Identification and Control* 25 (2), 85–120.
DOI: 10.4173/mic.2004.2.2
- Smith, O. J. M., 1959. A controller to overcome dead time. *ISA Journal* 6 (2), 28–33.