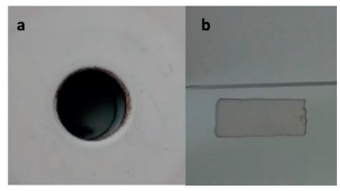
SMARTCSP: enfoque Industria 4.0 para una reducción efectiva de costos de las plantas termoeléctricas (CSP)



SMARTCSP: Industry 4.0 approach for an effective concentrated solar power (CSP) cost reduction

Cristóbal Villasante[1], Jon Mabe[1], Iñigo Les-Aguerrea[2], Adrian Peña[2], Marcelino Sánchez[2] y Susana López[1]

[1] IK4-TEKNIKER. Calle Iñaki Goenaga, 5 - 20600 Eibar, Guipuzkoa (España)
[2] CENER (National Renewable Energy Centre of Spain). Calle Ciudad de la Innovación, 7 - 31621 Sarriguren, Navarra (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9766 | Recibido: 27/01/2020 • Inicio Evaluación: 17/05/2020 • Aceptado: 17/10/2020

ABSTRACT

- Today, Concentrating Solar Power (CSP) plants and components incorporate a low degree of intelligence and autonomy that makes it expensive and makes quality control difficult. The degree of automation of CSP plants is low; the development of protocols, procedures and standards to ensure quality control during assembly, construction, commissioning and operation of the plant are still in their early stages. Meanwhile, Industry 4.0 and Industrial Internet of Things (IoT) paradigm are the key technological breakthroughs for the manufacturing industry since the last century; and such can be SMARTCSP for the CSP since its commercial inception 50 years ago. SMARTCSP benefits from this experience in the application of ICT (Information and Communication Technology) or Lean Manufacturing in mature industrial fields such as automotive or manufacturing to create a new generation of SMARTCSP Components that include a full set of relevant functionalities right from the production line. SMARTCSP will provide higher levels of distributed intelligence, autonomy and decision making in CSP plants through distributed and miniaturized processors, sensors, and communications embedded in CSP components. Moreover, a new CSP plant concept is proposed that allows for an optimized operation and maintenance of the plant. All this entails the first step towards the crystallization of the Industry 4.0 paradigm in the field of CSP technologies.
- **Key Words:** Sensores, CSP, energía solar, Industry 4.0, Energía Solar de Concentración, Energía Solar Termoeléctrica, Sensors, CSP, Solar Energy, Industry 4.0, Concentrating Solar Power.

RESUMEN

Hoy en día, las plantas y componentes de Energía Solar de Concentración (CSP) incorporan un bajo grado de inteligencia y autonomía lo que dificulta el control de calidad y aumenta los costes. El grado de automatización de las plantas CSP es bajo; el desarrollo de protocolos, procedimientos y normas para garantizar el control de calidad durante el montaje, construcción, puesta en marcha y operación de la planta todavía están en sus primeras etapas. Mientras tanto, el paradigma de la Industria 4.0 y el Internet de las Cosas (IoT) son los principales avances tecnológicos para la industria manufacturera desde el siglo pasado; y tal puede ser el concepto SMARTCSP para el CSP desde su creación comercial hace 50 años. SMARTCSP se beneficia de esta experiencia en la aplicación de las TICs (Tecnologías de Información y Comunicación) o el "Lean Manufacturing" en campos industriales maduros como la automoción o la fabricación para crear una nueva generación de SMARTCSP COMPONENTs que incluyen un conjunto completo de funcionalidades relevantes directamente desde la línea de producción. SMARTCSP proporcionará mayores niveles de inteligencia distribuida, autonomía y toma de decisiones en plantas CSP a través de procesadores, sensores y sistemas de comunicación distribuidos y miniaturizados integrados en los componentes de CSP. Además, se propone un nuevo concepto de planta CSP que permite una operación y mantenimiento optimizados de la planta. Todo esto implica el primer paso hacia la cristalización del paradigma de la Industria 4.0 en el campo de las tecnologías CSP.

Palabras Clave: Sensores, CSP, energía solar, Industry 4.0, Energía Solar de Concentración, Energía Solar Termoeléctrica, Sensors, CSP, Solar Energy, Industry 4.0, Concentrating Solar Power.

1. INTRODUCCIÓN

La Energía Solar de Concentración (CSP por sus siglas en inglés), y específicamente las plantas de energía solar termoeléctrica proporcionan energía verde bajo demanda gracias al almacenamiento de la energía térmica (TES por sus siglas en inglés) y/o la hibridación. Sin embargo, hay pocas plantas comerciales (6,2GW en todo el mundo) y las tecnologías CSP todavía están en una etapa incipiente de desarrollo tecnológico con un alto potencial de mejora.

En los últimos años, las estrategias de reducción de costes para la tecnología CSP se han basado en economías de escala y la optimización de lo que se consideran los elementos clave en el sistema. Sin embargo, para lograr reducciones de costes más rápidas y significativas, se necesitan cambios drásticos, que deben basarse en la innovación y el desarrollo tecnológico. De hecho, el grado de madurez tecnológica sigue siendo bajo en comparación con la energía fotovoltaica y la eólica.

La industria CSP se comporta de forma aislada, sin la capacidad de aprovechar las innovaciones que se van incorporando en otros sectores industriales. Esta tendencia debería cambiar para pasar de mejoras incrementales a saltos relevantes. Hoy en día las plantas y componentes CSP incorporan un bajo grado de inteligencia y autonomía lo que dificulta el control de calidad y aumenta los costes. Hay que tener en cuenta que:

- La mayoría de los sistemas CSP son sistemas ópticos con requisitos de alta precisión que en la actualidad se ensamblan in situ con medios limitados y en condiciones no controladas.

Esto se traduce en una menor precisión y una reducción de las funcionalidades del sistema.

- El montaje in situ, la instalación, la calibración y el ajuste de los principales sistemas de plantas CSP son trabajos delicados, lentos y costosos (ej. el montaje y canteo de los concentradores). Para abordar este problema, la estrategia seguida por los desarrolladores de CSP ha sido evitar a costa las recalibraciones, por lo que los sistemas están diseñados para evitar el reajuste a lo largo de una vida útil (> 20 años). En consecuencia, los sistemas están sobredimensionados para garantizar una mayor estabilidad y robustez, lo que deriva en costes incluso superiores.
- El funcionamiento de una planta típica de CSP se basa hoy en día en decisiones humanas debido a la escasa implementación de sistemas de control automático.
- El control de las condiciones de operación del campo solar (ej. mediciones de polvo) es un proceso lento, intensivo en mano de obra, inexacto, propenso a errores y costoso. Como consecuencia, los operadores de planta toman decisiones con información escasa sobre el estado de la planta lo que limita la eficiencia.

En resumen, el objetivo del concepto SMARTCSP es reducir drásticamente los Gastos de Capital (CAPEX) y especialmente los Gastos de Operación (OPEX) a lo largo del ciclo de vida de los sistemas CSP mediante la introducción de conceptos de "Lean Manufacturing", mediante componentes Plug-and-Play inteligentes y controles inteligentes autónomos que permitan que la tecnología CSP alcance los máximos niveles de competitividad.

2. ESTADO DE LA TÉCNICA Y TRABAJOS RELACIONADOS

El objetivo de las SMARTCSP PLANTS es replicar la digitalización que ya se está haciendo realidad en otros sectores como la Fabricación o la Energía [4]. Los gigantes de la automatización de procesos y los equipos industriales, como Schneider Electric, Siemens, Bosch, GE, ABB o Honeywell están viviendo el cambio más profundo de su historia corporativa [5], tratando de pasar de ser fabricantes de máquinas a desarrollar negocios totalmente digitales, donde los servicios en la nube, el análisis de "Big Data" y la sensorización a todos los niveles son las tecnologías clave que apoyan esta revolución.

En este contexto, en 2016 Schneider Electric (Rueil-Malmaison, Francia) relanzó EcoStruxure™ como un ecosistema digital para el Internet Industrial, para conectar equipos industriales, analizar datos y ofrecer información en tiempo real, y donde los sensores inteligentes y conectados desempeñan un papel crucial en las capas más bajas de la arquitectura del sistema EcoStruxure: adquisición de datos e información. Esta solución de plataforma Industry 4.0 fue diseñada para competir directamente con otras iniciativas privadas como MindSphere® o Predix® lanzadas en 2015 por Siemens (Munich, Alemania) y General Electric (Fairfield, CT, EE. UU.) respectivamente [6].

Por otro lado, fabricantes como Bosch (Stuttgart, Alemania) o ABB (Suiza) no sólo dirigen sus soluciones hacia los segmentos más altos de digitalización de la industria [7, 8], sino que también están evolucionando hacia la generación de nuevas tecnologías de sensores que satisfagan las expectativas del IoT (Internet de las cosas) en términos de integrabilidad, conectividad, inteligencia, flexibilidad e incluso coste, como esperan hacer los SMARTCSP COMPONENTs.

Echando la vista atrás, vemos que ya se han propuesto diferentes soluciones con potencial para mejorar el rendimiento de los sistemas CSP, proporcionándoles inteligencia y automatizando procesos en las plantas termosolares. Sin embargo, su aplicación práctica, ni se ha realizado a nivel de componente, ni se ha integrado en el sistema. Esto se traduce en procesos tediosos o equipos y tareas costosas y por lo tanto en soluciones poco competitivas y de calidad deficiente.

Además, estas soluciones se han desarrollado individualmente y, por lo tanto, su potencial no puede aprovecharse plenamente, ya que cada implementación ha sido diseñada para resolver un problema en particular y no el conjunto de problemáticas existentes.

Por ejemplo, el uso de cámaras, sensores y controladores robóticos para mejorar el rendimiento del heliostato (mejora de precisión de seguimiento, protección contra el viento, mapeo de suciedad, etc.) se ha propuesto muchas veces. Sin embargo, la inclusión de todos estos dispositivos no se ha hecho de una manera integrada, como se propone en la sección 3.2.

3. ENFOQUE PROPUESTO

La estrategia propuesta aquí es desarrollar un concepto innovador de planta CSP, pero beneficiándose de la experiencia y las soluciones ya aplicadas a sectores industriales maduros.

El desarrollo de la CSP debe seguir el ejemplo de la industria del automóvil, donde hoy podemos encontrar la más alta calidad y prestaciones a precios muy competitivos. Hoy en día, las tecnologías CSP todavía están en una etapa muy temprana de desarrollo, tal vez comparable a la situación experimentada por la industria de la automoción a principios del siglo XX, después de que Karl Benz patentase el primer automóvil con motor de combustión interna (1886) pero antes de que Henry Ford dejara de aplicar a los automóviles los métodos de construcción de carruajes y comenzara a producirlos de manera más eficiente. Henry Ford no inventó el coche ni la línea de montaje, pero hizo algo mucho más importante para la industria del automóvil; dio el impulso definitivo a la fabricación en línea adaptándola a la fabricación de automóviles. La gran ventaja que tenemos ahora es que sólo hay que aplicar las lecciones ya aprendidas en la industria de automoción para reducir sus costos de las tecnologías CSP al tiempo que mejoramos su rendimiento y así acelerar su desarrollo.

Algunas de estas experiencias ya se aplican en CSP, como la aplicación de técnicas de producción en masa para la fabricación de algunos componentes como espejos y receptores. Sin embargo, el enfoque del concepto SMARTCSP es más holístico. Lo que pretendemos hacer es integrar directamente en las plantas termosolares las últimas tecnologías incorporadas en la industria de la automoción que no sólo están aumentando las prestaciones de los automóviles, sino que están cambiando la experiencia de conducción haciéndolo mucho más cómodo, fácil, agradable y seguro. Los coches están cada vez más equipados con sensores y controladores que proporcionan a los vehículos información en tiempo real y grandes dosis de inteligencia. Además, los procesos de fabricación de estos dispositivos y la forma en que se integran les permiten hacerlo sin apenas aumento en el coste.

Así pues, al igual que estamos presenciando en otros dominios de aplicación como la fabricación, la distribución de energía o la automatización de edificios, los sensores se pueden integrar en plantas CSP a diferentes niveles (componentes, subsistemas y sistemas) proporcionándoles capacidad de diagnóstico y cierto grado de inteligencia para actuar de forma autónoma. Esto permitirá mejorar la calidad, durabilidad y rendimiento a largo plazo, al

tiempo que reducen los costes de instalación, puesta en marcha, operación, mantenimiento, etc.

El concepto SMARTCSP tiene como objetivo crear una generación completamente nueva de SMARTCSP COMPONENTs , que incorporará un conjunto completo de funcionalidades relevantes directamente desde la línea de producción. Esto garantiza un control de calidad eficiente y minimiza los costes de la solución completa y de la operación de la planta. Los sistemas que ya se utilizan ahora se integrarán y coordinarán con los nuevos SMARTCSP COMPONENTs para convertir las plantas de CSP en SMARTCSP PLANTs basándose en los paradigmas de la digitalización como están haciendo la nueva generación de fábricas o redes inteligentes. Por lo tanto, la visión de SMARTCSP está fundamentada sobre los siguientes pilares:

- **Mejora de la fabricación**: utilizando técnicas de "Lean Manufacturing" para reducir costes y transferir tareas complejas de la planta solar a la fábrica. Es decir, aumentando la fiabilidad gracias a incorporar la complejidad tecnológica dentro de los componentes clave que son producidos en masa en fábricas (esto ya ocurre en la tecnología fotovoltaica, donde la complejidad está embebida en los paneles mientras que su instalación en campo es muy sencilla).
- **Desarrollo de componentes autoconscientes**: desarrollando una nueva generación de los componentes CSP clave dotándolos de inteligencia y autonomía para medir, procesar, analizar, decidir acciones operativas y comunicar información relevante a otros componentes y sistemas.
- **Reducción de la complejidad de implementación**: reduciendo el tiempo de instalación y puesta a punto de las plantas CSP gracias a los nuevos componentes Plug-and-Play que se calibran y configuran automáticamente.
- **Aumento de las presentaciones de la planta**: mediante la mejora en el control y operación de planta gracias a los SMARTCSP COMPONENTs que funcionan como un único sistema autónomo o SMARTCSP PLANT.

4. DESARROLLO

Durante los últimos 3 años, TEKNIKER y CENER han estado desarrollando conjuntamente el concepto SMARTCSP dando como resultado diversos dispositivos, patentes [1, 2] y marcas internacionales registradas asociadas. El desarrollo se ha centrado en dos aspectos principales:

1. El desarrollo del concepto **SMARTCSP PLANT**, a través de la definición de la arquitectura e infraestructura global (ej. servidores, nube), la identificación de los actores relevantes (nuevos componentes de CSP, fuentes de datos externas, etc.), así como las herramientas y estrategias más adecuadas (algoritmos de análisis de datos, interfaces, etc.) que permitan explotar de forma óptima el potencial del concepto.
2. El desarrollo de algunos de los **COMPONENTES y SISTEMAS SMARTCSP clave**, en particular los conceptos de SMARTMIRROR [2] y SMARTHELIOSTAT. Entre los sistemas de una planta de CSP, los heliostatos tienen los requisitos de precisión más altos. También son elementos que tienen que ser replicados por miles en un campo solar (especialmente si se instalan heliostatos de tamaño pequeño). Es por ello que han sido seleccionados como los sistemas con mayor potencial de mejora del rendimiento y reducción de costes gracias al concepto SMARTCSP. En cuanto a los espejos, el caso es muy claro, ya que una planta CSP puede incorporar millones de espejos prácticamente idénticos (sólo su curvatura cambia de una parte de la planta a otra).

4.1 CONCEPTO DE PLANTA SMARTCSP

Como se muestra en la Fig. 1, una configuración de SMARTCSP PLANT se basa en un control distribuido, donde clústeres de SMARTCSP COMPONENTs toman decisiones y comandan actuadores a nivel local, mientras que el control central de la planta coordina los clústeres y realiza una evaluación continua que permita garantizar un funcionamiento eficiente y seguro [3]. El objetivo es maximizar el impacto en un sector tradicional, como lo es el CSP, de las Tecnologías Habilitadoras Digitales (sensores, TIC, Big Data, ...) utilizando la experiencia y el conocimiento de diferentes tecnologías ya aplicadas a otras industrias (como las industrias bienes de consumo o de automoción).

Aunque las soluciones y las infraestructuras que posibilitan la convergencia de los sistemas industriales tradicionales con herramientas como el procesamiento avanzado, el análisis de datos y la integración de sensórica de bajo coste con niveles de conectividad

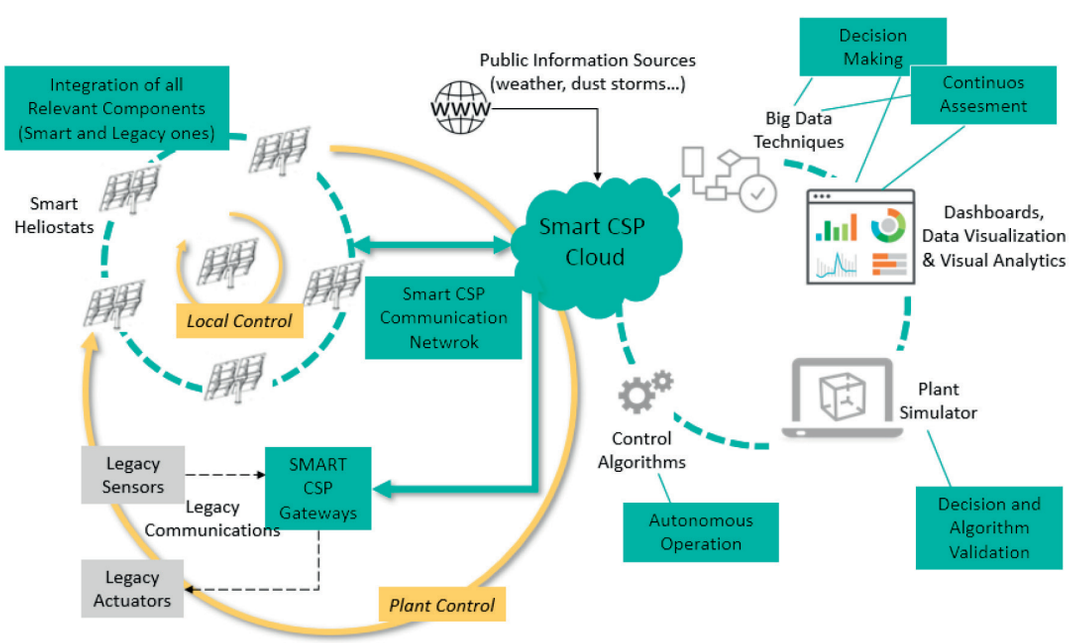


Fig. 1: Arquitectura de una SMARTCSP PLANT que donde se destacan los nuevos desarrollos en color verde

nunca vistos ya son una realidad para algunos de los principales actores en otros campos, sus beneficios aún no se aprovechan en el sector CSP.

Siguiendo esta tendencia, la idea de SMARTCSP PLANT busca impulsar la completa digitalización de las actuales plantas CSP. El pilar de este cambio de paradigma son los sistemas de sensores heterogéneos integrados que dan acceso en tiempo real a ingentes cantidades de datos, que posteriormente serán procesados y utilizados para optimizar tanto la puesta en marcha como la operación automática de la planta.

Estas técnicas de procesado intensivo de información se aprovecharán de la experiencia heredada de los servicios en la nube, el análisis de Big Data, etc. y permitirán desarrollar funcionalidades específicas como calibraciones automáticas de heliostatos, programación óptima de operaciones de limpieza, mantenimiento predictivo, modificaciones de las estrategias de control de planta en función de la información meteorológica o de nubes locales, etc. Esto sería imposible sin un verdadero enfoque de Planta Inteligente.

El paradigma SMARTCSP PLANT requiere un nuevo enfoque que permita actualizar la infraestructura de operación de la planta y desplegar soluciones para la recogida y procesamiento de datos en tiempo real, la toma de decisiones y la operación de la planta.

Los fundamentos técnicos de este nuevo concepto de planta CSP evolucionada deben aprovechar los resultados de las exitosas iniciativas de digitalización de otros sectores (Smart Grids, fábricas, edificios) que durante la última década han integrado más y más sensórica distribuida, soluciones de conectividad e interoperabilidad de datos, gestión masiva de información, etc. y han mejorado sus prestaciones mientras reducían sus costes.

Además, la implementación del enfoque SMARTCSP PLANT debe permitir la operación cooperativa de los diferentes SMARTCSP COMPONENTs. Por ejemplo, a través de sensores de suciedad distribuidos, la SMARTCSP PLANT podrá generar el mapa global de suciedad de la planta en tiempo real, combinar estos datos con previsiones meteorológicas y de polvo en suspensión, y optimizar automáticamente el cronograma de limpieza, reduciendo los costes de operación y mantenimiento (O&M), así como el consumo de agua.

Para hacer realidad el concepto SMARTCSP PLANT y basándonos en la experiencia de la digitalización de otros sectores, se deben desarrollar las siguientes fases:

1. **Integrar todos los actores relevantes,** incluyendo todos los sistemas ya existentes en la planta (válvulas, bombas, sistemas de generación de energía, etc.), los nuevos SMARTCSP COMPONENTs y sensores de última generación (estaciones meteorológicas, medidores de flujo, etc.) mediante modelos semánticos y ontológicos adecuados.
2. **Implementar técnicas cognitivas y de Big-Data**, para procesar los datos procedentes de todas las fuentes (las actuales y las nuevas) y extraer la información relevante para operar la planta de forma automática (control en lazo cerrado) o para dar un soporte adecuado al operador de planta (sistemas de ayuda a la toma de decisión).
3. **Generar entornos de simulación** permitiendo la carga off-line de datos y la modificación de históricos de información para aprender sobre el comportamiento en condiciones de funcionamiento hipotéticas y validar los enfoques de Big Data antes de su implementación real para la operación de la planta.
4. **Proporcionar interfaces interoperables** para los sistemas de apoyo a la toma de decisiones, permitiendo la interoperabilidad semántica y la interpretación inequívoca y rápida de la información mostrada en tiempo real.
5. **Integrar la arquitectura del sistema global**, (red y equipos de comunicación, servidores, bases de datos, sistemas en la nube) para proporcionar los medios de comunicación; recopilación de datos, formateo, análisis; ejecución de algoritmos; sincronización del sistema; distribución de consignas de baja latencia, difusión rápida, etc.

La transformación de las actuales plantas CSP en SMARTCSP PLANTs debe entenderse como un proceso gradual, que deberá ajustarse una vez que se realicen las primeras implementaciones. Las actividades más importantes para esta transformación digital comprenden el diseño de la arquitectura y la primera generación de los elementos marcados en verde de la Figura 1, con especial atención a las técnicas de Big Data que son críticas para lograr las mejoras de eficiencia esperadas. Además, dado que la implementación a escala de planta no es factible durante las primeras etapas de la implantación del concepto SMARTCSP, la validación de los enfoques de Big Data deberán realizarse usando un conjunto de datos híbrido, que combine datos simulados y reales.

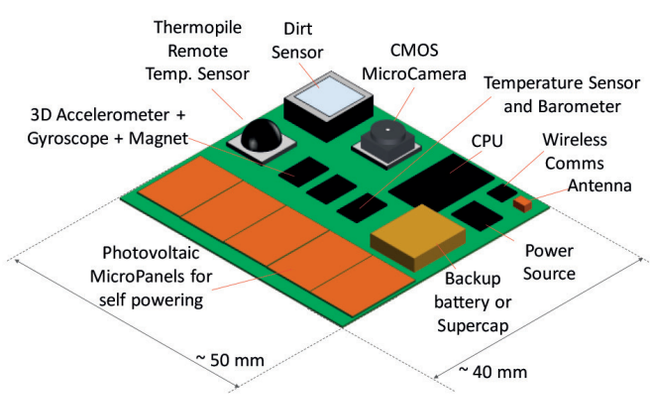


Fig. 2: Ejemplo de sensores a integrar en un SMARTHELIOSTATS para un mejor rendimiento

4.2. COMPONENTES Y SISTEMAS SMARTCSP

El esquema SMARTCSP deberá usarse para repensar casi todos los componentes de un campo solar con dos objetivos en mente:

1. El primero es incorporar en los componentes o sistemas sensores, controladores, sistemas de comunicación u otros dispositivos que les permitan: caracterizar su propio estado, identificar y caracterizar el estado de los elementos en su entorno o las condiciones ambientales, conectar y comunicarse con otros elementos, generar datos de interés para el funcionamiento de la planta, tomar decisiones autónomas, etc. Con el fin de aprovechar al máximo estos conceptos, los componentes y sistemas deberán rediseñarse para integrar eficazmente todos los elementos y funcionalidades descritos.
2. El segundo es fabricar y ensamblar estos componentes en líneas de montaje automatizadas para que puedan fabricarse a un coste mínimo, con estándares de calidad más altos e incluyendo etapas de verificación y ajuste que garanticen la precisión y fiabilidad necesarias. Mediante la aplicación de estos conceptos de "Lean Manufacturing", el objetivo es desarrollar sistemas más integrados, más baratos y más fiables, así como garantizar que las etapas de puesta en marcha en el campo sean sencillas y fiables (concepto Plug-and-Play).

Los heliostatos son un buen ejemplo que puede ilustrar las ventajas de este enfoque y uno de los sistemas en los que el equipo de TEKNIKER y CENER ha estado trabajando. Por lo tanto, se utilizará como ejemplo para ilustrar el potencial del concepto y cómo

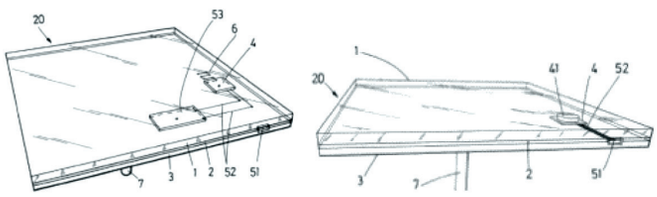


Fig. 3: Dos posibles configuraciones SMARTMIRROR®

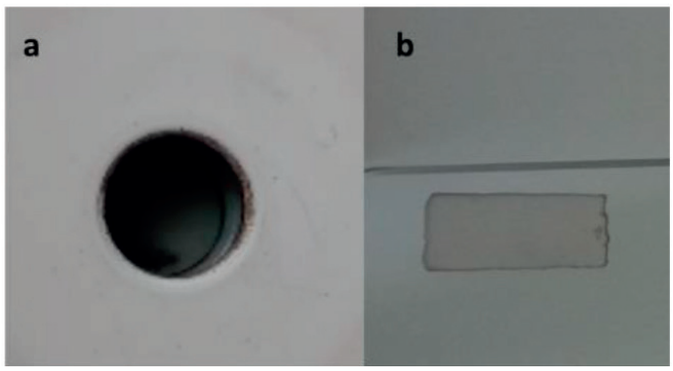


Fig. 4: Detalle de un taladro (a) o de una ventana transparente (b) para incorporar un sensor para crear una SMARTMIRROR®

implementarlo. A continuación, se describen algunos de estos intentos y se explica cómo se debe desarrollar un SMARTHELIOSTAT para superar las barreras identificadas.

Pensemos, por ejemplo, en la necesidad de mejorar la precisión del seguimiento. Calibrar el heliostato en un campo de heliostato es una operación clave y repetitiva con gran influencia en la eficiencia del campo de heliostatos. Actualmente, el método más extendido se basa en el análisis del sol reflejado sobre una superficie. Este método es tedioso y tiene limitaciones prácticas en grandes campos solares. Patentes como WO2017055663 [1] y US2011000478 [9] describen heliostatos en los que tras su instalación se monta una cámara con fines principalmente de calibración.

Aunque estos enfoques parecen prometedores, las tareas de instalación adicionales necesarias hacen que muchas empresas consideren que el avance con respecto a la solución actual puede no compensar el esfuerzo. Además, los riesgos de dañar los heliostatos (por ejemplo, deformar la estructura o mover los espejos con respecto a ella) durante la instalación u operación también son un problema. El enfoque SMARTHELIOSTAT que se propone aquí incorpora y calibra una cámara desde las fases de fabricación y evita todos los inconvenientes descritos.

Además, el enfoque propuesto no pretende resolver un solo problema (en este caso la calibración) como se ha hecho en otras ocasiones. Por el contrario, se propone un nuevo concepto de heliostato con nuevas capacidades que le permita cumplir su función desde un enfoque mucho más global. Dentro de este nuevo concepto, el SMARTHELIOSTAT que proponemos incluye las siguientes funcionalidades (véase la Fig. 2):

1. **Sensores integrados** que permiten a los SMARTHELIOSTATS reconocerse y adquirir información relevante sobre su estado, integridad, rendimiento, así como sobre los elementos circundantes y el entorno. Las capacidades propuestas incluyen:
   - **Proporcionar la orientación precisa del reflector** mediante la combinación de una cámara CMOS que enfoca objetivos distribuidos en el campo basados en la patente de CENER y TEKNIKER [1] (sensores magnéticos o acelerómetros podrían añadir información complementaria). Esto permitirá un funcionamiento óptimo gracias a una calibración periódica automatizada. Además, ayudará al montaje y a la puesta en marcha reduciendo el tiempo necesario. Así mismo, la calibración periódica reduce los requisitos a largo plazo de los componentes (estructuras, cimentaciones o seguidores) evitando el sobredimensionamiento y logrando así una reducción de costes.
   - **Medir la suciedad del espejo** (basado en un sensor fotónico patentado por TEKNIKER P201430605): proporcionará en tiempo real una medida del polvo depositado en los espejos. A partir de este mapa de intensidad de suciedad, las operaciones de limpieza se pueden programar todos los días de la manera más rentable, priorizando la limpieza de aquellos heliostatos que tenga mayor impacto en el rendimiento de la planta y en el consumo de agua.
   - **Identificar los elementos vecinos dañados o defectuosos** (basado en la cámara CMOS y visión artificial) como espejos rotos en heliostatos vecinos o incluso analizando la calidad geométrica de los reflectores circundantes (por ejemplo, utilizando técnicas de fotogrametría).
   - **Medición de las condiciones ambientales** (añadiendo sensores integrados de temperatura, presión o vibración) para conocer esas condiciones en cada heliostato. Además, gracias a la incorporación de acelerómetros de bajo coste, los SMARTHELIOSTATS proporcionarán información continua en el punto de interés sobre las deformaciones y los esfuerzos que el viento está induciendo en cada reflector. Por último, se puede tener una estimación del paso de nubes en función de las imágenes de las cámaras.
2. **Incorporación de capacidades de análisis y procesamiento.** Los SMARTHELIOSTATS procesarán y analizarán los datos de los sensores generando nueva información valiosa para el funcionamiento de la planta. El procesador interno, el sistema de visión artificial, la fotogrametría, el procesamiento de señales y los algoritmos de inteligencia artificial permiten a los SMARTHELIOSTATS la toma de decisiones, minimizando los requisitos informáticos y de comunicación de la planta CSP. Los SMARTHELIOSTATS podrán tomar decisiones por sí mismos o en conjunto con sus vecinos y generan ordenes como "ir a la posición de seguridad", "limpiar", "obviar la limpieza de un heliostato", "calibrar un heliostato", etc.
3. **Incorporación de capacidades de comunicación.** Los SMARTHELIOSTATS incluyen un sistema de comunicación que permite tener una planta conectada globalmente. Los heliostatos no sólo se conectan a un sistema central sino que a nivel local se comunican con los heliostatos vecinos para generar pequeños clusters de SMARTHELIOSTATS que operan de manera cooperativa y coordinada y proporcionan información de utilidad a nivel local.

Después de analizar dónde y cómo incorporar los elementos descritos, se decidió que la forma más eficiente y con mayor potencial de reducción de costes era incorporarlos a los espejos del heliostato.

Cada heliostato se compone de una estructura rígida en la que se fijan dichos espejos y un sistema de seguimiento que lo opera para seguir el sol. Sin embargo, son los espejos los que en última instancia reflejan la luz solar sobre el receptor, por lo que es su orientación y su estado los que definen el funcionamiento del sistema y son los elementos a controlar. Todo esto hace de los espejos el mejor elemento para integrar los sensores. Además, cada campo solar incorpora cientos de miles de espejos idénticos. Estos espejos

Reducción de CAPEX gracias a	• Sistemas funcionales producidos en masa en fábricas que utilizan técnicas de "Lean manufacturing" para **reducir el coste y aumentar la calidad.** • Electrónica de bajo coste que **añade funcionalidades** y permite la eliminación de componentes, así como la relajación de **requisitos a largo plazo** del sistema gracias a recalibraciones frecuentes. • Soluciones integrales, que incluyen componentes inteligentes que **reducen tiempo y costo**. • Reducción del riesgo técnico y, por lo tanto, el **costo financiero** gracias a una mayor fiabilidad.
Reducción de OPEX gracias a	• Componentes autónomos que mejoran **fiabilidad** y **necesidades de mantenimiento**. • Información on-line, fiable y completa de los componentes y de la planta para una **operación más fácil** y **automática** y **reducidas necesidades de inspección**. • **Operaciones de mantenimiento programadas de manera óptima,** retrasando las operaciones que aún no añaden valor y anticipando otras con impacto en la **producción de la planta**.
Aumento de la producción de energía debido a	• La **calidad** de los sistemas se mejora integrando en fábrica sistemas completos utilizando procesos de "Lean manufacturing", en condiciones controladas y con mayor control de calidad. • Los SMART COMPONENTs con funciones adicionales trabajando de forma integrada maximizarán no sólo su contribución a la **producción de energía** sino también a la **eficiencia global de la planta**. • Mejor rendimiento, fiabilidad y disponibilidad de la planta que incrementará la **potencia generada** y las **horas de funcionamiento**. • Información on-line, fiable, completa que permite reducir los márgenes de seguridad, operando el sistema más cerca de su **punto de operación óptimo** y durante más horas de funcionamiento.

Tabla I: Principales beneficios esperados del concepto de SMARTCSP

se producen en masa en líneas de producción donde es más fácil incorporar sistemas de calibración y control de calidad. De esta manera se puede optimizar su fabricación y calibración, haciendo su posterior instalación, y la puesta en marcha más simple, más barata y más eficaz, asegurando que la relación coste/valor sea la más competitiva posible. Las figuras 3 y 4 muestran diferentes realizaciones de estos SMARTMIRRORs que RIOGLASS, TEKNIKER y CENER están desarrollando (patente WO2018069558 [2]).

El costo final del heliostato debe ser igual o menor que el actual. Esto se conseguirá con un enfoque cuádruple: (i) aprovechar al máximo los desarrollos de sensores, procesadores y comunicaciones generados y ya en uso en otros sectores (smartphones, wearables, conducción autónoma); (ii) aprovechar el know-how desarrollado en otros sectores como la automoción, que han estado incorporando sensores avanzados en espejos y ventanas durante más de dos décadas; (iii) aprovechar las técnicas de "Lean Manufacturing"que permiten producir sistemas baratos de forma automatizada y económica con los más altos estándares de calidad; (iv) reducción los requisitos a largo plazo de los heliostatos gracias a las capacidades de recalibración automática.

5. RESULTADOS PREVISTOS

Todas estas mejoras se traducen en una reducción del coste de la electricidad (LCOE por sus siglas en inglés) debido a una disminución de CAPEX_y OPEX, así como un aumento significativo en la calidad de los componentes clave y del rendimiento de la planta. En la Tabla I se enumeran algunos de los beneficios esperados.

6. CONCLUSIONES

Hasta ahora, la industria CSP apenas ha incorporado innovaciones de otros sectores como las TIC. Esto debería cambiar y cambiará para permitir que la CSP se desarrolle todo su potencial superando sus limitaciones actuales.

El concepto SMARTCSP es un enfoque innovador, desarrollado conjuntamente por TEKNIKER y CENER, para lograr de manera efectiva reducciones de costes relevantes en las tecnologías CSP. Dentro de este enfoque los nuevos desarrollos de CSP se benefician de los conocimientos disponibles actualmente en tecnologías maduras como las TIC y los conceptos de "Lean Manufacturing" con una trayectoria probada en mercados tan exigentes como la industria del automóvil, la energética o la de fabricación de bienes de consumo.

Aumentando la sensorización, el control y la operación automatizada, se maximizará la eficiencia general, la confiabilidad, la disponibilidad, y la capacidad de gestión de las plantas. Todos estos factores son clave para reducir el LCOE, contribuyendo así a mejorar la competitividad de las plantas.

Componentes como los SMARTMIRRORS (cuyo desarrollo ya está en marcha) y su integración en los heliostatos permitirán implementar eficazmente mejoras que anteriormente habían sido propuestas por diferentes empresas y grupos de investigación, pero que no se podían llevar a cabo de manera eficiente y a un coste asequible.

REFERENCIAS

[1] Sánchez Marcelino (2017). Calibration method for heliostats. WO2017055663 (A1).
[2] Burisch Michael (2018). Mirror for a solar reflector, method of mirror assembly and management system in a solar field. WO2018069558.
[3] Evans, D. (2011). The Internet of Things. How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything. White Paper, Cisco, retrieved from: http://www.cisco.com/web/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
[4] Lee, J., Bagheri, B., Kao and H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters, 3, pp. 18-23.
[5] Simonds, D. (2016). Siemens and General Electric gear up for the internet of things. Press Article, The Economist, New York, USA, December 3, 2016. Retrieved from: http://www.economist.com/news/business/21711079-american-industrial-giant-sprinting-towards-its-goal-german-firm-taking-more (accessed on 16/05/2017)
[6] General Electric (2016). PREDIX, The industrial Internet Platform. White paper, General Electric Company.
[7] Hoenicke, C. (2016). Intelligent sensor systems for Industry 4.0. Press Release, Bosch Group, May 27, 2016.
[8] Bertheau, T. (2016). ABB's new condition monitoring solution is a quantum leap for millions of motors. Press Release, January 21, 2016.
[9] Reznik Dan (2011). Camera-based heliostat tracking controller. US2011000478 (A1).
[10] Fukuba Daniel (2013). Robotic heliostat calibration system and method. US2013238271 (A1).