

ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE PLANTAS HÍBRIDAS PV-CSP

Artero Carrillo F.A.*, Pérez García M.**

* Departamento de Ingeniería. Universidad de Almería, Ctra. de Sacramento s/n 04120 Almería, España,
francisco.artero@ual.es

** CIESOL. Centro de Investigaciones en Energía Solar. Universidad de Almería, Ctra. de Sacramento s/n 04120
Almería, España, mperez@ual.es

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2049>

RESUMEN

Las denominadas plantas híbridas PV-CSP combinan las tecnologías solares fotovoltaica y de concentración con el objetivo de explotar de una manera óptima y en una sola aplicación la principal ventaja de cada una de ellas, esto es el bajo coste de generación de la tecnología fotovoltaica y la gestionabilidad de dicha producción que ofrece la capacidad de almacenamiento de las plantas de concentración. En este trabajo se presenta un análisis de este tipo de plantas partiendo del estado del arte de los proyectos que se encuentran en construcción o en desarrollo a nivel mundial por todo el mundo. Sobre esta base, que sirve para justificar el actual interés en este tipo de plantas por parte de promotores y usuarios, se realizó un análisis tecno-económico de un proyecto de implantación, considerando diferentes variantes de hibridación PV-CSP en función de la potencia nominal de cada una de las tecnologías. Para la realización de este estudio, se escogió un emplazamiento situado en el sur de España y se utilizó el software de diseño SAM (System Advisor Model), que permite evaluar el rendimiento energético y económico de este tipo de plantas de forma individual a través de parámetros de mérito como el factor de capacidad (CF) y el coste nivelado de la energía (LCOE).

PALABRAS CLAVE: Energía solar, Plantas híbridas PV-CSP, Análisis tecno-económico.

ABSTRACT

PV-CSP hybrid plants combine photovoltaic and concentrating solar technologies, taking advantage of the benefits of them, such as power generation low cost of photovoltaic technology and energy storage capacity of concentrating solar technologies. This work presents some research studies about PV-CSP hybrid plants, as well as a compilation of projects under construction or under development using this type of hybrid plants around the world. Afterwards, to assess the performance of this type of solar energy hybrid plants, a techno-economic analysis was made, considering different combinations of concentrating technologies for the PV-CSP union. To carry out this study, a location was selected in the south of Spain and the design software SAM (System Advisor Model) was used to assess the energy and economic performance of this type of hybrid plants, determined by the parameters of capacity factor (CF) and levelized cost of energy (LCOE).

KEYWORDS: Solar energy, PV-CSP Hybrid plants, Techno-economic analysis.

INTRODUCCIÓN

La generación eléctrica a gran escala mediante energía solar es en la actualidad factible mediante dos tecnologías perfectamente diferenciadas: la tecnología solar fotovoltaica y la tecnología solar de concentración (PV y CSP, respectivamente, en terminología internacional). De una forma simplificada, en el primero de los casos la conversión radiación solar-energía eléctrica es directa a través de los procesos de absorción de fotones y transferencia de portadores de carga que tienen lugar en los diferentes materiales fotovoltaicos y en el segundo de los casos se trata de una conversión indirecta, ya que la radiación solar debe convertirse en energía térmica antes de utilizarse en la alimentación de un ciclo termo-mecánico equivalente al de las plantas eléctricas convencionales. Esta demanda térmica en términos de potencia y temperatura solo puede abordarse, hasta la fecha, a través de sistemas de concentración en sus dos modalidades más conocidas: concentradores lineales (concentradores cilindro parabólicos y Fresnel) y concentradores de foco puntual (plantas de receptor central y discos parabólicos).

Con independencia de las particularidades y recorrido de cada tecnología e iniciativa comercial, el aspecto clave que actualmente determina la decisión sobre un tipo u otro de planta es la posibilidad de contar con cierta capacidad de almacenamiento energético que pueda hacer frente a la gestionabilidad de la producción exigida en los contratos de suministro a la red o a usuarios concretos. En este sentido, frente a una tecnología como la fotovoltaica con unos costes muy reducidos en base al enorme desarrollo actual de los procesos de fabricación y mejora del funcionamiento de los módulos y a su inmediatez para la puesta en marcha de plantas dada la naturaleza modular y la simplicidad de las mismas, la tecnología CSP cuenta con la gran ventaja de poder aportar sistemas de almacenamiento energético fiables y contrastados a través de depósitos de sales fundidas a las temperaturas de operación de los ciclos de potencia que permiten contar con calor suficiente para alimentar los bloques de potencia de las plantas durante un número significativo de horas nocturnas.

En este contexto, las denominadas plantas PV-CSP, resultado de la hibridación de ambas tecnologías, constituyen un interesante campo de estudio que está cobrando especial importancia en los últimos años gracias a la aparición de algunas realizaciones comerciales muy relevantes basadas en este concepto (Escobar, 2018). En este sentido, existen diversas propuestas y esquemas de hibridación en la literatura así como diversas estimaciones de los parámetros de mérito, especialmente el coste nivelado de la energía y el factor de capacidad de planta, que requieren una labor de compilación, revisión y análisis que permita establecer de una manera más concreta y fundamentada la viabilidad tecno-económica de este tipo de proyectos (Ju et al., 2017).



Fig. 1. Representación de una planta híbrida PV-CSP. Fuente: Solar Reserve.

El objetivo principal de este trabajo ha sido establecer el estado de la técnica y realizar un conjunto de valoraciones específicas a partir de cálculos propios para establecer la viabilidad tecno-económica de plantas híbridas PV-CSP en una localización del sur de España. La consecución de este objetivo general se ha alcanzado a partir de los siguientes trabajos:

- Recopilación y sistematización de la información existente sobre proyectos ejecutados y en desarrollo a nivel mundial de plantas híbridas PV-CSP.
- Categorización por potencias y sistemas de este tipo de plantas para una mejor identificación e inter-comparación de proyectos e iniciativas.
- Identificación y cuantificación de los parámetros de mérito de funcionamiento de este tipo de plantas (CF, LCOE) y valoración de estos con relación a plantas solares no híbridas, así como su margen de mejora operativo.
- Identificación y cuantificación de las especificaciones y elementos críticos que puedan determinar el desarrollo futuro de este tipo plantas (almacenamiento, concentración, integración en red, ...).

- Aplicación de todos los avances anteriores en el análisis tecno-económico de una planta emplazada en el sur de España.

ESTUDIOS Y ESTADO DEL ARTE DE PLANTAS HÍBRIDAS PV-CSP

En los últimos años, se han realizado diferentes estudios sobre la hibridación de las tecnologías solares fotovoltaica y de concentración para diferentes configuraciones. Una recopilación no exhaustiva de los mismos puede empezar por los realizados por Green et al. (2015) que calculó el valor del factor de capacidad para un sistema híbrido PV-CSP respecto a un sistema de solo CSP. En el mismo se diseñó un modelo de sistema híbrido PV-CSP con tecnología de concentración de torre con almacenamiento de doble tanque y se utilizó una estrategia de producción estableciendo diferentes niveles de prioridad para distintos valores de potencia de salida, demostrando que se podían obtener unos valores de factor de capacidad más elevados para el sistema híbrido que para el sistema CSP.

Otro estudio posterior (Petrollese y Cocco, 2016), abordó la optimización de un sistema híbrido PV-CSP con concentradores lineales Fresnel y sistemas de almacenamiento con baterías y tanques de sales fundidas. Los resultados indicaron que el sistema híbrido era la solución más económica cuando se requiere suministrar una potencia constante por periodos superiores a 16 horas diarias, mientras que para periodos de demanda de potencia inferiores a 8 horas la solución más económica era el sistema fotovoltaico con almacenamiento mediante baterías. También en el mismo año se publicó otro estudio (Starke et al., 2016) en el que se evaluó el rendimiento de sistemas híbridos PV-CSP considerando dos tipos diferentes de sistemas de concentración: captadores cilindroparabólicos (CCP) y receptor central de torre. Los resultados demostraron que, mediante la hibridación, se consiguió reducir el tamaño del campo solar de la parte de CSP, manteniendo un alto factor de capacidad y consiguiendo una reducción del LCOE de entre el 4 y el 7% para el caso de captadores cilindroparabólicos y de entre el 1,5 y el 4% para el caso del sistema de receptor central de torre.

Desde el punto de vista del control Cocco et al. (2016) plantean para la mejora de la gestionabilidad de plantas híbridas CSP-CPV utilizando tecnologías fotovoltaicas de concentración y concentradores lineales Fresnel dos estrategias de control diferentes teniendo en cuenta por un lado la optimización individual por planta y la optimización del conjunto. Los resultados mostraron que la estrategia integrada permitió extender bastante más el tiempo de suministro de la potencia de salida que la estrategia no integrada.

Por último, citar el trabajo de Zhai et al. (2017) sobre la evaluación del rendimiento de un sistema híbrido PV-CSP utilizando tecnología de concentración de torre, en el que ambas tecnologías utilizan el sistema de almacenamiento de doble tanque de la parte de concentración y considerando dos estrategias de producción diferentes: operando las dos plantas PV y CSP de forma independiente e integrando las dos tecnologías para optimizar la producción. Los resultados obtenidos demostraron que la estrategia de producción integrada presentó un mejor rendimiento, mayor producción, CF más elevado y menor LCOE, aparte de una curva de potencia de salida más estable.

Sobre los proyectos comerciales de este tipo de plantas, la información técnica disponible en diversas fuentes permite identificar entre los más relevantes a nivel mundial los siguientes.

Cerro Dominador, Chile

El proyecto Cerro Dominador consiste en una planta híbrida PV-CSP situada en la región de Antofagasta, en el desierto de Atacama (Chile), compuesta por una planta fotovoltaica de 100 MW y una planta CSP con tecnología de torre de 110 MW con sistema de almacenamiento térmico mediante sales fundidas con capacidad de almacenamiento de 17,5 horas.

Redstone, Sudáfrica

El proyecto Redstone se encuentra en la región de Northern Cape (Sudáfrica) y está compuesto por dos plantas fotovoltaicas que suman un total de 171 MW y una planta CSP con tecnología de torre de 100 MW con sistema de almacenamiento térmico mediante sales fundidas con capacidad de almacenamiento de 12 horas.

Ashalim Solar Complex, Israel

El proyecto Ashalim Solar Complex, situado en el desierto Negev (Israel) está compuesto por la hibridación de tres tecnologías solares diferentes: una planta fotovoltaica de 30 MW y dos plantas CSP, una con tecnología de torre de 121 MW y otra con tecnología de captadores cilindroparabólicos de 121 MW con sistema de almacenamiento térmico mediante sales fundidas con capacidad de almacenamiento de 4,5 horas.

Noor Midelt, Marruecos

El proyecto Noor Midelt planea la construcción de un importante complejo solar híbrido con tecnologías fotovoltaica y de concentración, que estará situado en la localidad de Midelt (Marruecos). Se espera que alcance una potencia total de 800 MW, dividida en dos fases de unos 400 MW cada una y que tenga una capacidad de almacenamiento de al menos 5 horas.

Noor Energy I, Emiratos Árabes Unidos

El proyecto solar híbrido Noor Energy I estará situado en Dubai (Emiratos Árabes Unidos) y contará con una potencia total de 950 MW divididos en tres tecnologías solares diferentes: una planta fotovoltaica de 250 MW, tres sistemas de captadores cilindroparábolicos de 200 MW cada uno y una planta con tecnología de torre de 100 MW, además de un sistema de almacenamiento térmico mediante sales fundidas con capacidad de almacenamiento de 15 horas.

En la Tabla 1 se representan los proyectos de plantas híbridas descritos para permitir una mejor comparación entre ellos en cuanto a la tecnología usada, valores de potencia, etc.

Tabla 1. Características de proyectos híbridos en distintas partes del mundo

Proyecto	Lugar	Potencia (MW)	PV	CSP	TES (h)	Fase
Cerro Dominador	Chile	210	100 MW	Torre 110 MW	17,5	Operación
Redstone	Sudáfrica	271	171 MW	Torre 100 MW	12	Construcción
Ashalim	Israel	272	30 MW	CCP 121MW/Torre 121MW	4,5	Operación
Noor Midelt	Marruecos	800	-	-	5	Desarrollo
Noor Energy I	Dubai	950	250 MW	CCP 600MW/Torre 100MW	15	Desarrollo

EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA DE PLANTAS HÍBRIDAS PV-CSP

En este apartado, se realizará un análisis tecno-económico de diferentes opciones de hibridación de plantas solares, considerando distintas tecnologías CSP (CCP, Fresnel y torre) para la hibridación con fotovoltaica y distintas variables que tener en cuenta, como la potencia, la capacidad de almacenamiento y el tamaño del campo solar. Los estudios realizados consistirán en evaluar los efectos provocados por la hibridación PV-CSP y por las variaciones de potencia, de capacidad de almacenamiento y de tamaño del campo solar. Para ello, se analizarán los resultados obtenidos de los parámetros de mérito del factor de capacidad y LCOE.

Para la realización de las simulaciones se escogerá un emplazamiento en el sur de España, en concreto, en el desierto de Tabernas (Almería). El software utilizado para las simulaciones de las plantas de tecnologías solares fotovoltaicas y de concentración por separado será SAM (System Advisor Model) y para las simulaciones de la hibridación de tecnologías se utilizará una hoja de cálculo Excel.

Efecto de la hibridación PV-CSP

En esta parte del estudio, se realizan simulaciones de plantas solares de potencia fija 120 MW para cada una de las tecnologías por separado y también para la hibridación (20 MW PV + 100 MW CSP), con el objetivo de ver el efecto producido por la hibridación de ambas tecnologías respecto a cada una de ellas por separado.

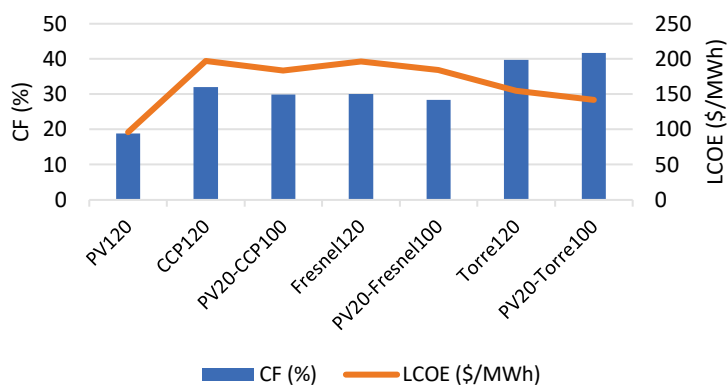


Fig. 2. Efecto producido por la hibridación PV-CSP

En la Figura 2 se puede observar que, para las tres plantas PV-CSP analizadas, la hibridación supuso un aumento del factor de capacidad respecto a una planta PV gracias a la capacidad de almacenamiento que aporta la tecnología CSP. Al mismo tiempo, la hibridación permitió reducir el LCOE respecto a una planta CSP debido al aporte de una tecnología más económica como la fotovoltaica. Realizando una comparación entre los tres tipos de plantas híbridas analizadas, la hibridación PV-Torre es la que presenta un mayor valor del factor de capacidad y un menor LCOE.

Efecto de la variación de la potencia PV

Para evaluar el efecto de la variación de potencia fotovoltaica en la hibridación, se compararán las plantas híbridas del apartado anterior (PV 20 MW + CSP 100 MW) con otras plantas híbridas en las que se aumente la potencia fotovoltaica de 20 a 100 MW sin variar la potencia CSP (PV 100 MW + CSP 100 MW).

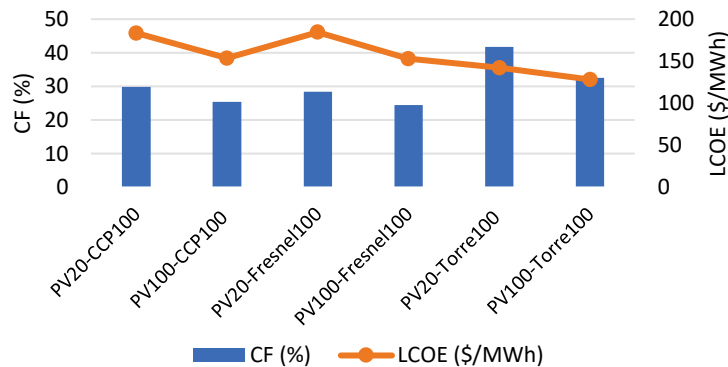


Fig. 3. Efecto producido por el aumento de la potencia PV en la hibridación

En la gráfica de la Figura 3 se puede observar que, para las tres plantas PV-CSP analizadas, el aumento de la potencia fotovoltaica en la hibridación supuso una reducción del LCOE debido a la presencia, en una mayor proporción, de una tecnología como la fotovoltaica, que es más económica que cualquiera de las tres tecnologías CSP analizadas.

Efecto de la variación de la potencia CSP

Para evaluar el efecto de la variación de potencia CSP en la hibridación, se utilizarán las plantas híbridas analizadas inicialmente (PV 20 MW + CSP 100 MW), al igual que en el apartado anterior, pero esta vez se compararán con otras plantas híbridas en las que se aumente la potencia CSP de 100 a 200 MW sin variar la potencia PV (PV 20 MW + CSP 200 MW).

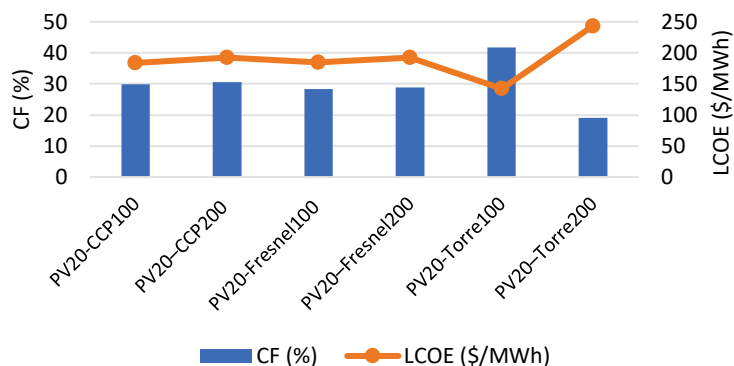


Fig. 4. Efecto producido por el aumento de la potencia CSP en la hibridación

En esta ocasión, se puede ver que el aumento de la potencia CSP apenas influyó en el factor de capacidad de las plantas híbridas con tecnologías de captadores cilindroparabólicos y Fresnel ya que, aunque aumentó la potencia de salida de la planta, esta fue aplicada durante un tiempo similar. Sin embargo, para la hibridación con tecnología de torre, se produjo una reducción significativa del factor de capacidad y un importante aumento del LCOE. Esto se debe a un tamaño del campo solar insuficiente, incapaz de aprovechar la capacidad de almacenamiento de la planta, provocando una reducción del tiempo de aplicación de la potencia de salida y un aumento de los costes de producción.

Efecto de la variación de la capacidad de almacenamiento térmico

En este apartado, se analizará el efecto de aumentar la capacidad de almacenamiento térmico (TES, Thermal Energy Storage) en plantas híbridas. Para ello, se partirá de plantas híbridas con valores de potencia PV 20 MW, potencia CSP 200 MW y almacenamiento térmico TES de 6 horas. Estas plantas se compararán con otras con un almacenamiento térmico de 12 horas sin variar ninguno de los valores de potencia PV ni CSP.

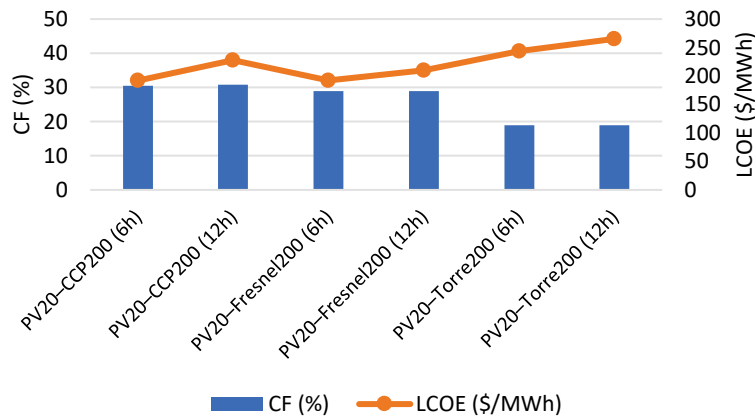


Fig. 5. Efecto producido por el aumento de la capacidad de almacenamiento TES

El aumento de la capacidad de almacenamiento TES tampoco influyó prácticamente en el valor del factor de capacidad de las plantas híbridas con tecnologías de captadores cilindroparabólicos y Fresnel, como ocurrió en el apartado anterior, pero esta vez se produjo un aumento considerable del LCOE en ambos casos. Esto es debido a que se ha producido un sobredimensionamiento del sistema de almacenamiento. En el caso de la planta híbrida con tecnología de torre, que ya en el apartado anterior se podía ver un sobredimensionado del sistema de almacenamiento, este se ha visto agravado con el aumento de capacidad TES, provocando que siga aumentando el valor del LCOE.

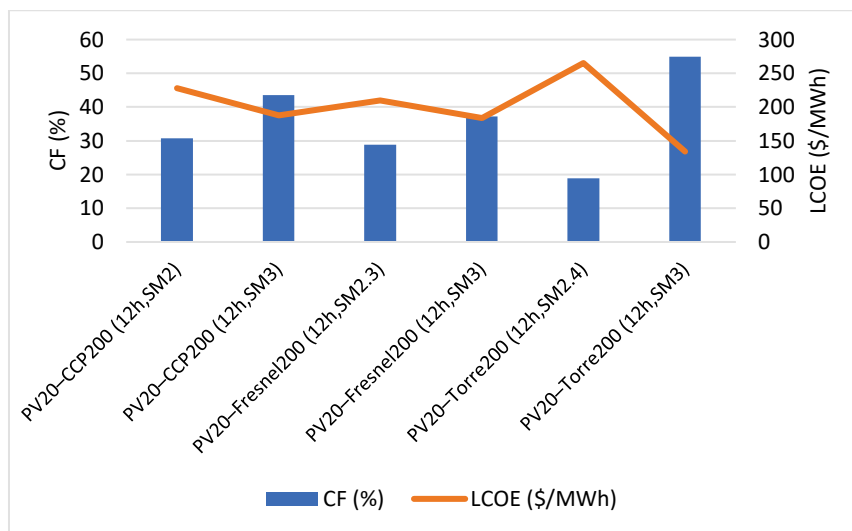


Fig. 6. Efecto producido por el aumento del tamaño del campo solar CSP

Efecto de la variación del tamaño del campo solar CSP

En este último estudio, se va a analizar el efecto provocado por el aumento del tamaño del campo solar sobre las plantas híbridas del apartado anterior. Se espera que con este aumento se pueda aprovechar mejor la capacidad del sistema de almacenamiento térmico de cada una de ellas.

El tamaño del campo solar viene determinado por el múltiplo solar (SM, Solar Multiple), que es el cociente entre la potencia térmica de salida del receptor y la potencia térmica de entrada al bloque de potencia (Montes et al., 2009). Se partirá de plantas híbridas con valores de potencia PV 20 MW, potencia CSP 200 MW y almacenamiento térmico TES de 12 horas, a las que se les aplicará un aumento del campo solar (múltiplo solar) sin variar ninguno de los parámetros anteriores de potencia PV, potencia CSP ni almacenamiento TES.

En la Figura 6 se puede observar que, para las tres plantas híbridas PV-CSP analizadas, el aumento del tamaño del campo solar supuso considerables mejoras, reflejadas en un aumento del factor de capacidad y una reducción del LCOE. Esto es debido a que la mayor cantidad de energía térmica producida por el campo solar permitió aprovechar mejor el sistema de almacenamiento de las plantas y aumentar el tiempo de generación energética. Tanto el mayor aumento del factor de potencia como la mayor reducción del LCOE se produjeron en la planta híbrida PV-Torre, debido a que esta era la planta con un mayor sobredimensionado del sistema de almacenamiento.

CONCLUSIONES

Las plantas híbridas PV-CSP permiten aprovechar las ventajas que tiene cada tecnología por separado. Por una parte, la tecnología CSP aporta sistemas de almacenamiento TES contrastados a largo plazo, que consiguen aumentar la capacidad de generación de la planta y, por otra parte, la tecnología PV es una tecnología barata, que en la hibridación permite reducir el tamaño del campo solar CSP manteniendo la potencia de salida, consiguiendo una reducción de los costes de generación energética.

Esta hibridación permite una total gestionabilidad de plantas de generación energética con energía solar, pudiendo llegar a producir 24 horas/día utilizando solamente energía solar.

El estudio y aplicación de esta tecnología híbrida PV-CSP está adquiriendo gran importancia en los últimos años, prueba de ello son los estudios de investigación y proyectos de construcción de este tipo de plantas que se están llevando a cabo por todo el mundo.

El análisis tecno-económico llevado a cabo en este trabajo ha permitido evaluar el comportamiento de este tipo de plantas híbridas, comparar entre distintas tecnologías para la hibridación, ver el efecto que en estas plantas provoca la variación de diferentes parámetros como la potencia, la capacidad de almacenamiento térmico y el tamaño del campo solar y, finalmente, analizar los resultados determinados por los parámetros de mérito de este tipo de plantas, como son el factor de capacidad y el LCOE.

REFERENCIAS

- Cocco D., Migliari L. and Petrollese M. (2016), A hybrid CSP-CPV system for improving the dispatchability of solar power plants. *Energy Conversion and Management*, 114, 312-323.
- Escobar, Rodrigo (2018). Plantas Híbridas CSP+TES+PV+BES. Fraunhofer Chile.
- Green A., Diep C., Dunn R. and Dent J. (2015), High capacity factor CSP-PV hybrid systems. *Energy Procedia*, 69, 2049-2059.
- Ju X., Xu C., Hu Y., Han X., Wei G. and Du X. (2017), A review on the development of photovoltaic/concentrated solar power (PV-CSP) hybrid systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 161, 305-327.
- Montes M.J., Abánades A., Martínez-Val J.M. and Valdés M. (2009), Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant, using oil as a heat transfer fluid in the parabolic trough collectors. *Solar Energy*, 83, 2165-2176.
- Petrollese M. and Cocco D. (2016), Optimal design of a hybrid CSP-PV plant for achieving the full dispatchability of solar energy power plants. *Solar Energy*, 137, 477-489.
- Romero-Álvarez M. y Zarza E. (2007), Concentrating Solar Thermal Power. *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*, Kreith F. and Goswami Y. (eds), pp. 21-1 - 21-98. CRC Press.
- Starke A.R., Cardemil J.M., Escobar R.A. and Colle S. (2016), Assessing the performance of hybrid CSP-PV plants in northern Chile. *Solar Energy*, 138, 88-97.
- Zhai R., Liu H., Chen Y., Wu H. and Yang Y. (2017), The daily and annual technical-economic analysis of the thermal storage PV-CSP system in two dispatch strategies. *Energy Conversion and Management*, 154, 56-67.