

Central termosolar combinada torre-cilindro parabólica



Jorge López Moreno

Ingeniero del ICAI (promoción 2011), especialidad mecánica. Máster en Ingeniería Mecánica en el Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne. Título "Thermo-economic optimization of a tower/trough combination thermal solar power plant". Ha realizado los cursos "Applying knowledge management. Successful change management for engineers. Project management for engineers in Hi-Tech companies" (Universidad de Oxford) y "Leadership and Communication for leaders" (Haas School of Business, Universidad de Berkeley, California).

Germain Augsburger

Candidato a Doctor en Ingeniería Mecánica, en el Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne. Máster en Ingeniería Mecánica en la École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suiza (2008). Actualmente se encarga del modelado termo-económico y la optimización de plantas termosolares en Industrial Energy System Laboratory. Entre sus publicaciones, con otros autores, están: "Thermo-economic Optimisation of the Heliostat Field of Solar Tower Thermal Power Plants (2010) y "Evaluation of a combined-cycle setup for Solar Tower Power Plants (2009).

Palabras clave: Energía solar térmica de concentración, Integración energética, Central solar de torre, Central solar cilindroparabólica, Optimización termo-económica.

Resumen:

El contexto energético actual, marcado por los altos precios de los combustibles fósiles, el elevado ritmo de crecimiento poblacional, sin precedentes, y la creciente preocupación por el cambio climático y por un esquema energético futuro basado en la energía nuclear, hacen que el progreso rápido, económicamente viable y seguro de las energías renovables se haya convertido en una prioridad de nuestros días. Hoy, somos nosotros los que tenemos la responsabilidad de construir el esquema energético de mañana.

Entre todas las fuentes de energías renovables, explotables hoy de forma comercial, la energía termosolar ha demostrado ser fiable, aunque todavía requiere tarifas y subvenciones apropiadas para ser competitiva. Asimismo, esta tecnología ofrece importantes ventajas, como la posibilidad de almacenamiento y el buen control de la energía transformada, implicando grandes beneficios a la hora de conectar esta producción a

Key words: Concentrating solar power, Energy integration, Solar tower power plant, Solar trough power plant, Thermo-economic optimization.

Abstract:

Current energetic context involving skyrocketing oil prices, unprecedented population growing rates and increasing concerns about nuclear energy and climate change issues requires rapid, economically feasible and reliable progress in the field of renewable energies. We have the responsibility today of building the energetic scheme of tomorrow.

Amongst the different renewable energies, thermal solar energy has already proven both reliable and competitive, with adequate feed-in tariffs and offers some key advantages such as the possibility to store the energy, as well as the good controllability of the transformed energy that translates into a great connectivity to the grid.

This article studies the possibility of combining two types of thermal solar power plants, namely a tower power plant together with a trough power plant. To do so, detailed and accurate modelling of each of the power plants has been necessary. Afterwards, the energy integration of both power plants has been addressed.

la red eléctrica. En este artículo se estudia la posibilidad de combinar dos tipos de centrales termosolares, una central de torre y heliostatos con una central cilindroparabólica. Para ello, ha sido necesario un modelado detallado y preciso de cada una de las centrales, para después pasar a la integración energética del conjunto.

Las centrales combinadas torre-cilindroparabólicas, cuando están integradas de forma óptima, y los ciclos de potencia debidamente adaptados, presentan rendimientos energéticos (energía solar a electricidad) más elevados que cualquiera de las dos centrales que forman la combinación. Un estudio en profundidad de esta posibilidad, incluyendo una integración energética completa así como una optimización multi-objetivo (4) apunta a soluciones de centrales termosolares combinadas torre-cilindroparabólica de alrededor de 80 MW eléctricos de potencia nominal, con un rendimiento energético del 17%, que es mayor incluso que el de las centrales de torre actuales, añadiendo la ventaja de un bajo coste de la electricidad producida, en torno a 0.09 \$/kWh (coste estimado si la construcción se realizara hoy), y muy similar a los valores de centrales cilindroparabólicas actuales. Es decir, las centrales combinadas reúnen las ventajas de cada una de las centrales, alto rendimiento propio de la torre y menor coste de la electricidad producida, propio de centrales cilindroparabólicas.

Estos resultados representan un avance significativo en el ámbito de la energía termosolar de concentración, tecnología que está comenzando a cobrar verdadera importancia entre las energías renovables.

Trough-tower combination power plants, when properly integrated, present higher energetic efficiencies than those of either the tower or the trough power plants individually. A further study (4) about this possibility, including the global energy integration between power plants as well as a multi-objective optimization, has pointed out solutions featuring nominal powers around 80 MW (electrical), as large as the largest current trough power plants, yet featuring an energetic efficiency (17%) even higher than current state-of-the-art tower power plants and similar levelised energy costs (0.09 \$/kWh) (estimated cost if construction was launched today) to typical values of trough power plants. In other words, combined trough-tower power plants, if the energy integration has been performed carefully, turn to be a combination of the advantages of each of the power plants: resulting energy efficiency is even higher than the energy efficiency of the tower power plant and the obtained levelised energy cost is fairly close to typical trough power plant values.

These results represent another step forward for concentrating solar power, technology that is certainly called to play a major role in tomorrow's energetic scheme.

Introducción

Las centrales solares de torre son actualmente más caras que las centrales cilindroparabólicas, aunque más eficientes. Sin embargo, se espera una tendencia descendente de estos costes que, presumiblemente, hará que los costes de una central de torre caigan por debajo incluso de los costes de una central cilindroparabólica, de aquí a los próximos años, incrementando al mismo tiempo aún más su eficiencia, gracias a nuevas tecnologías para el receptor y otros avances tecnológicos.

La combinación de ambas centrales podría, por un lado, llevar a una solución intermedia entre una central de torre y una cilindroparabólica y sus respectivas ventajas, es decir, puede resultar en un equilibrio entre la alta eficacia de una central de torre y el menor coste de una central cilindroparabólica. Por otro lado, la integración energética de ambas centrales, presentando diferentes niveles de temperatura, podría conllevar una

mejora en el rendimiento del ciclo termodinámico y por consiguiente, una mejora en la eficiencia global de la central combinada torre-cilindroparabólica.

Para estudiar la combinación de ambas centrales, el primer paso ha sido la modelización. Para la central de torre, se ha utilizado un modelo altamente

detallado ya existente y desarrollado por el Sr. J. Spelling (1). El modelo de la central cilindroparabólica se ha desarrollado de forma completa y validado con datos reales de centrales actuales.

Modelo de la central de torre

La turbina de gas procesa los gases desde el punto 3 hasta el punto 4 del

Figura 1: Esquema de la combinación de ambas centrales

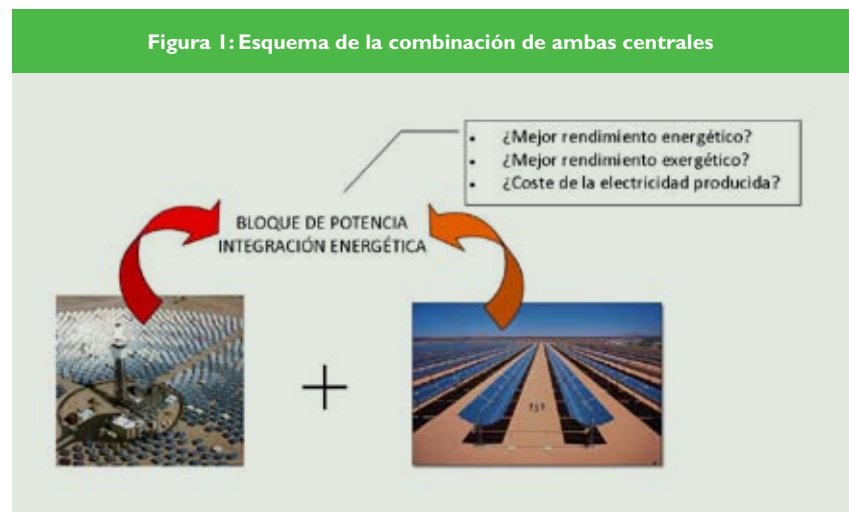
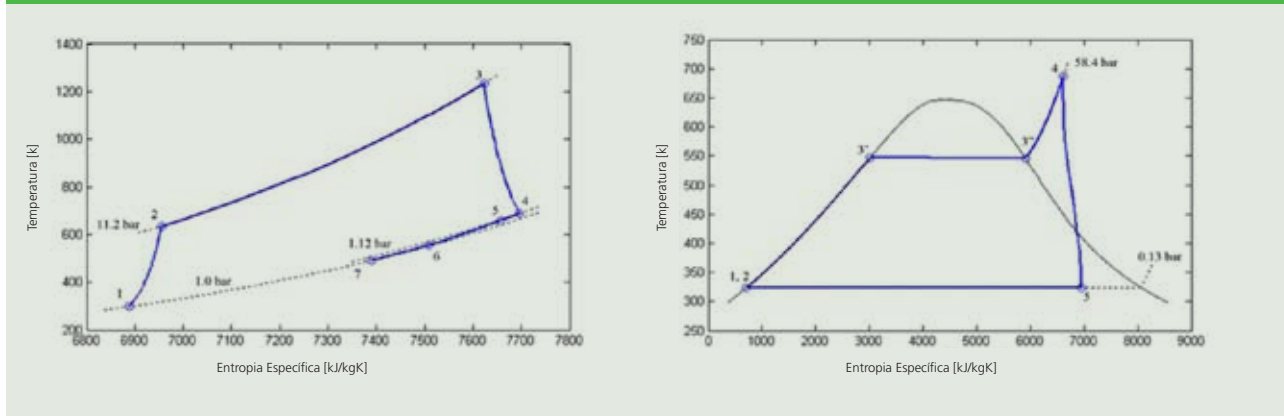


Figura 2: Brayton (izda.) y Rankine (dcha.) de la central de torre (1)



ciclo Brayton. La energía térmica contenida aún en el punto 4 será aprovechada para calentar el flujo del ciclo de Rankine.

Aunque una buena parte de la energía térmica residual es aprovechada mediante el ciclo Rankine, la producción de electricidad puede incluso aumentar realizando algunas modificaciones tanto al ciclo Brayton como al ciclo Rankine: por ejemplo se podrían introducir distintos niveles de evaporación, así como algunos recalentamientos, etc. En todo caso, los 350°C de los gases de escape de la turbina de gas suponen una temperatura suficientemente alta como para generar una parte importante de la electricidad total del ciclo combinado.

La integración energética de la recuperación de energía térmica en los gases de escape y combinación de ambos ciclos de potencia se lleva a cabo mediante el correspondiente análisis de pinzamiento (a menor diferencia de temperatura de pinzamiento, mayor recuperación energética, aunque a mayor coste, debido a la necesidad de mayor área de intercambiadores de calor).

El siguiente diagrama representa esta integración energética entre ambos ciclos de potencia. En rojo se representa el flujo caliente proveniente de la salida de la turbina de gas, que se aprovecha para el precalentamiento, evaporación y sobrecalentamiento del ciclo Rankine.

Como se menciona en el párrafo anterior, las curvas Q-T frías y calientes se pueden desplazar horizontalmente has-

ta alcanzar el valor óptimo de diferencia de temperatura entre el flujo caliente y el flujo frío (el punto de pinzamiento). Desde un punto de vista puramente energético se tenderá a hacer esta diferencia de temperatura la menor posible para poder así recuperar un máximo de la energía térmica contenida en el flujo caliente (2). Tan sólo se presentarán aquí estos aspectos del modelo de la central de torre, puesto que sirven de base para poder comprender el problema global de la integración energética de ambas centrales, que consistirá en añadir un nuevo flujo caliente proveniente de la central cilindroparabólica al diagrama de pinzamiento anterior y determinar la disposición óptima del ciclo combinado que maximice la producción de electricidad.

Se han introducido algunas modificaciones al modelo de la central de torre para poder combinarlo con el nuevo modelo de la central cilindro-

parabólica, así como para poder observar la influencia de ciertas variables como, por ejemplo, el número de horas de operación al día, parámetro con una gran influencia no sólo en los costes de la central sino también en el rendimiento de la misma.

Modelo de la central cilindroparabólica

Se ha desarrollado un modelo nuevo, completo para la central cilindroparabólica, con el fin de poder estimar los costes, el rendimiento óptico de los colectores solares y el rendimiento energético global de la central. También se ha prestado especial atención a la precisión del modelo óptico de los colectores, puesto que de la exactitud del modelo dependerá finalmente la fiabilidad de las conclusiones de este estudio. El problema hidráulico de la central también se ha abordado para poder calcular la caída de presión que

Figura 3: Integración energética del ciclo combinado gas-vapor. Diagrama de pinzamiento. Curvas Q-T (1)

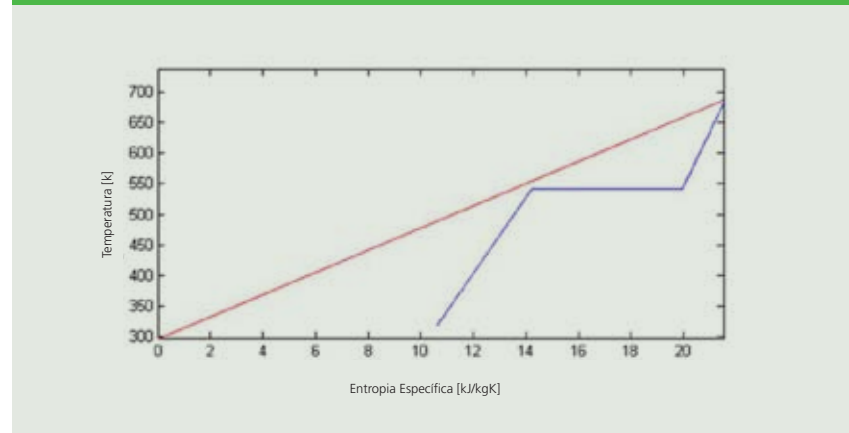
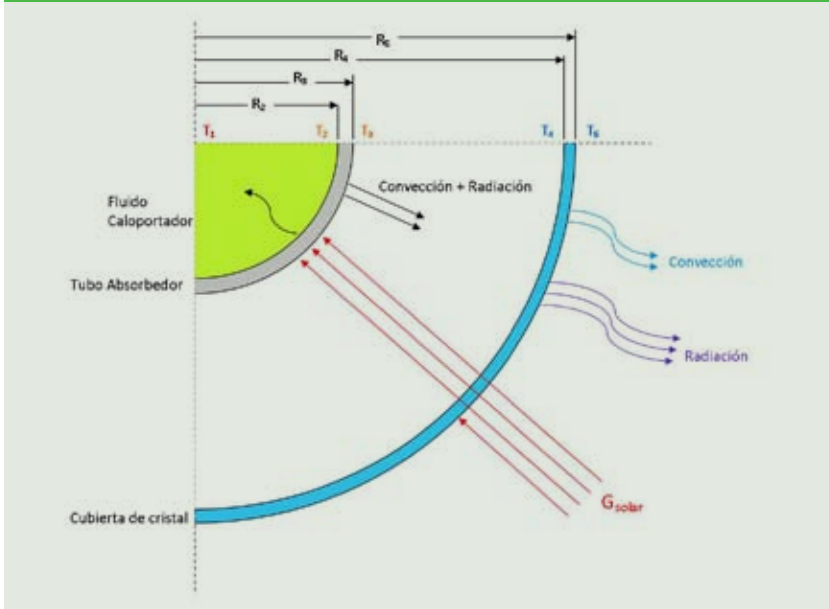


Figura 4: Flujos de calor en las distintas superficies del colector solar



experimenta el fluido caloportador a través del campo solar:

El balance energético para cada superficie de los colectores solares puede expresarse en función de los flujos de calor; que, a su vez, serán función de las temperaturas nodales del circuito térmico equivalente. Algunos de estos flujos de calor son difícilmente cuantificables si no fuera mediante el uso de correlaciones. Por ejemplo, la correlación de Gnielinsky se ha utilizado para la convección del fluido caloportador con la superficie interna del tubo absorbedor; y la correlación de Zhukauskas para estimar la convección externa con el ambiente.

La transferencia de calor en un dispositivo de este tipo presenta numerosas complejidades, mezclando varios tipos de transferencia de calor (radiación, convección y conducción), además de verse influenciada por fenómenos ópticos como la concentración de la radiación sobre el receptor; etc. Por ello, la elección de las correlaciones adecuadas, así como el método de resolución cobran especial importancia. Las ecuaciones de balance de energía para cada superficie y para el fluido caloportador forman un sistema de ecuaciones no lineal. Para su resolución se ha implementado el método de Newton, obteniéndose una convergencia rápida, en tan sólo dos o tres iteraciones.

Las líneas de colectores solares se han discretizado en intervalos. Para cada intervalo, de una longitud suficiente como para poder aplicar correlaciones de transferencia de calor para cilindro infinitamente largo, o de forma práctica $L \gg D$, el problema de transferencia de calor se aborda y resuelve como se describe en el párrafo anterior; obteniendo así las temperaturas nodales (temperaturas de cada superficie y temperatura media del fluido caloportador) para cada intervalo, pudiendo observar la evolución de estas temperaturas a lo largo de las líneas de colectores (ver figura 5).

Puesto que de esta forma se obtiene la evolución precisa de las temperaturas a lo largo de las líneas de receptores, las propiedades del fluido caloportador (altamente dependientes de la temperatura) se actualizan para cada intervalo a la correspondiente temperatura, in-

crementando por consiguiendo la precisión del modelo.

El modelo de la central cilindroparabólica, definiendo previamente la potencia térmica nominal de la central, el número de horas de operación al día y otros parámetros ópticos, hidráulicos etc., nos proporciona pues el tamaño de la central, la disposición de las líneas de colectores, la caída de presión a través del campo solar; el coste de la central y el flujo másico de fluido caloportador que se hace circular; y que es calentado por los colectores desde una temperatura de 295°C hasta 395°C, que representa el rango óptimo de operación de los fluidos comúnmente utilizados. El modelo simula en todo caso un régimen permanente de funcionamiento.

Combinación de las dos centrales

La combinación de ambas centrales se puede simplificar en un primer momento a la modificación del flujo másico del ciclo de Rankine para explotar la nueva potencia térmica disponible, que ahora incluye el flujo caliente que proviene de la central cilindroparabólica y que se supone se enfría desde 395°C hasta 295°C.

La integración energética se reduce en este caso a ajustar el flujo másico del ciclo de Rankine para explotar la nueva cantidad de energía térmica a disposición (salida de turbina de gas combinada con el flujo caliente de la central cilindroparabólica). Esta integración energética, aunque básica, nos permite extraer conclusiones muy claras sobre las ventajas que se obtienen al combinar los dos tipos de central solar. En efecto, el diagrama Q-T de la integración para la central de torre

Figura 5: Discretización de las líneas de colectores solares y circuito térmico equivalente para cada intervalo

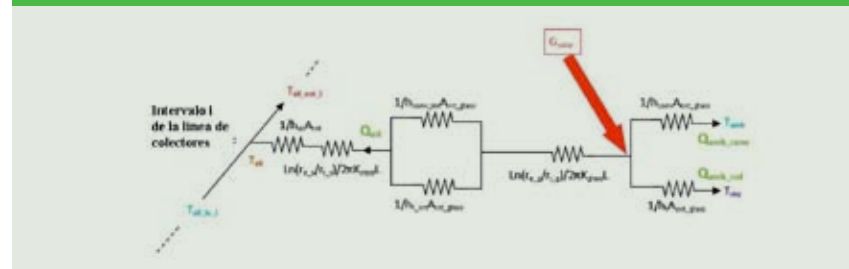
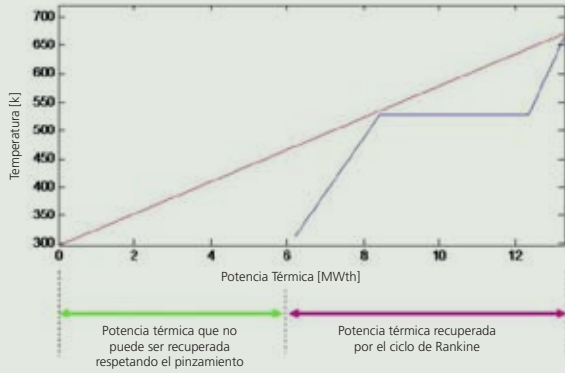


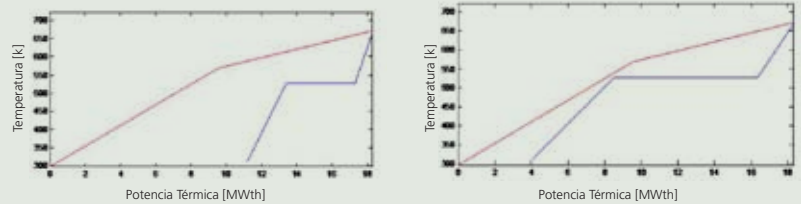
Figura 6: Diagrama Q-T de la integración energética de la central de torre



(ciclo Rankine de cola que aprovecha el calor residual del flujo caliente de los gases a la salida de la turbina de gas) tiene el aspecto mostrado en la siguiente figura 6.

Como se puede apreciar, debido a la geometría de las curvas calientes y frías, la recuperación energética por parte del ciclo Rankine tiene unos límites, en este caso (que representa una central de torre de 10 MW eléctricos), el ciclo Rankine es incapaz de recuperar 6 MW térmicos, lo que representa una pérdida importante puesto que se recupera tan sólo algo más de la mitad de la energía térmica disponible en el flujo caliente. Esta situación cambia cuando se combinan ambas centrales y al flujo caliente de salida de la turbina de gas, se le añade (en niveles de temperatura similares,

Figura 7: Evolución de las curvas Q-T, ajuste del flujo másico del ciclo de Rankine



295°C - 395°C) el flujo caliente de la central cilindroparabólica. La nueva geometría de las curvas Q-T caliente, permite aumentar el flujo másico del ciclo de Rankine, como se observa en las siguientes figuras:

Como se comprueba, la nueva geometría de la curva Q-T caliente permite al ciclo Rankine recuperar más energía que en el caso anterior; redu-

ciendo la cantidad de energía térmica perdida de 6 MW térmicos iniciales a 4 MW térmicos en este caso, donde se combinan ambas centrales.

Efectivamente, este cambio en la geometría de las curvas Q-T que permite una recuperación energética más efectiva explica la ganancia en rendimiento energético con respecto al ciclo combinado turbina de gas, turbina de vapor inicial de la central de torre. Es la mejora que se obtiene en el rendimiento termodinámico del ciclo (menores pérdidas térmicas), lo que permite una mejora en el rendimiento energético global de la central combi-

nada torre-cilindroparabólica con respecto a, incluso, el rendimiento de la central de torre.

Existe además otro interés en añadir potencia térmica proveniente de una central cilindroparabólica: al presentar ésta un menor coste de la electricidad producida se conseguirá, por tanto, reducir el coste de respecto a la central de torre y acercarlo así al



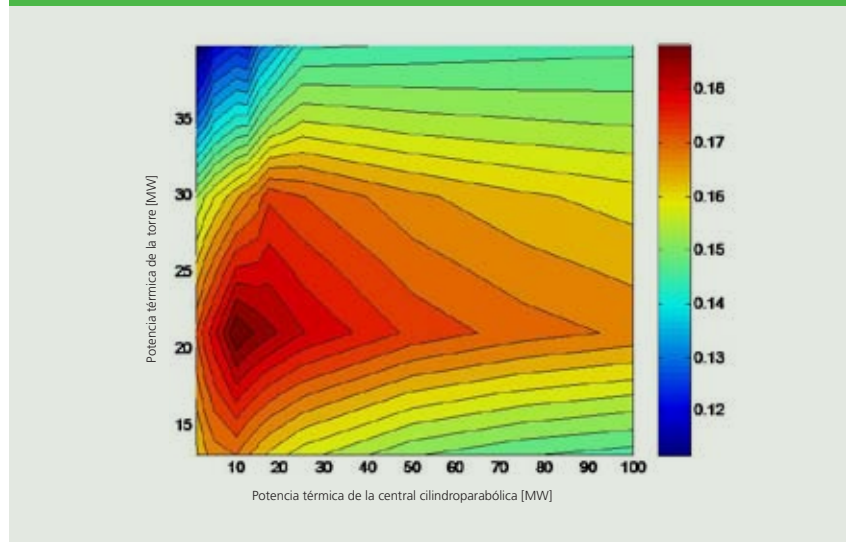
coste de la electricidad propio de una central cilindroparabólica.

Se ha mostrado cómo, al combinar los flujos de ambas centrales, la integración energética se vuelve más eficiente y, por tanto, el rendimiento global de la central mejora, dando lugar a rendimientos mayores que los de una central de torre de ciclo combinado (Brayton y Rankine). Es evidente que esta mejora en el rendimiento global de la central combinada dependerá en gran medida de la geometría de las curvas Q-T, que a su vez están relacionadas con los tamaños de ambas centrales que forman la combinación. Existirá entonces una combinación tal que la integración energética sea óptima (tan sólo modificando el flujo másico del ciclo de Rankine) y que resulte en un rendimiento energético global (energía solar a energía eléctrica) máximo. Se han evaluado múltiples combinaciones de centrales, variando las potencias térmicas de cada una. Para la central de torre, la potencia térmica se considera como la potencia disponible a la salida del sistema de almacenamiento térmico o a la salida del receptor de torre. Para la central cilindroparabólica, la potencia térmica se define como la disponible a la salida del campo solar de colectores. Para cada combinación, la integración energética (que consiste en este caso únicamente en ajustar el flujo másico del ciclo de Rankine) se ha llevado a cabo obteniendo para cada combinación un determinado rendimiento. Así, el mapa de rendimiento energético global (energía solar a energía eléctrica) se muestra en la figura siguiente:

Se observa cómo una combinación de una central de torre entregando una potencia térmica de alrededor de 20 MW a la salida del receptor de torre y una central cilindroparabólica de 10 MW térmicos resulta en un rendimiento global máximo de alrededor del 19% (energía solar a electricidad).

Hay que tener en cuenta que, puesto que la integración energética que se ha presentado aquí es relativamente básica ya que tan sólo se modifica el flujo másico del ciclo Rankine, existe un potencial todavía mayor cuando la integración se realiza de forma com-

Figura 8: Mapa de rendimiento energético global (solar a electricidad) de la central combinada torre-cilindroparabólica



pleta, es decir, modificando los niveles de presión del ciclo de vapor, el número de niveles de evaporación, de condensación, niveles de temperatura, etc. La integración energética completa, así como una optimización multi-objetivo de la central combinada, se ha llevado a cabo también (4), aunque sus resultados no se presentarán aquí, puesto que la ganancia de rendimiento al combinar las dos centrales ya se ha explicado. La integración energética global y la optimización aportan soluciones ciertamente interesantes, combinando ambas centrales y obteniendo rendimientos mayores que el de una central de torre pero con un coste de electricidad producida muy próximo al de una central cilindroparabólica.

Conclusión

La combinación de una central de torre con una central cilindroparabólica, debido a los diferentes niveles de temperatura de cada una, resulta en una mejora de la integración energética de los ciclos de potencia que supone menores pérdidas y un mejor aprovechamiento de la energía térmica entregada por las centrales.

Una central combinada torre-cilindroparabólica, siempre y cuando la integración energética se haya realizado correctamente, presenta un rendimiento energético mayor que el de una central de torre. Además, y dependiendo del tamaño de la central

cilindroparabólica, el coste de la electricidad producida será muy cercano al de ésta última, combinando así las ventajas de ambas centrales: alto rendimiento de la central de torre y menor coste de la electricidad producida de la central cilindroparabólica. El estudio completo de este problema, con optimización, (4), apunta, además, a soluciones con las ventajas anteriores y que presentan una potencia nominal de varias decenas de MW eléctricos, tamaños similares a las más grandes centrales cilindroparabólicas.

La combinación de estos dos tipos de central abre sin duda nuevas posibilidades para la energía termosolar; energía que, entre las renovables, está llamada a jugar un papel clave en el esquema energético futuro. ■

Bibliografía

- [1] Spelling, J., Favrat, D., Martin, A., Augsburger, G., 2011, *Thermo-economic optimization of a combined-cycle solar tower power plant*.
- [2] Bolliger, R., Becker, H., Maréchal, F., 2009, *New Generic Approach for the Analysis of Energy Conversion System Models*, LENI, EPFL.
- [3] Molyneux, A., Leyland, G., Favrat, D., *Environmental multi-objective optimisation of a district heating network considering centralized and decentralized heat pumps*, 2009, LENI, EPFL.
- [4] López Moreno, J., Augsburger, G., 2011, *Thermo-economic optimization of a combined trough-tower solar thermal power plant*, World Engineers Convention 2011, WEC 2011, Geneva.