

# Paralelizando la evaluación del campo de heliostatos

N.C. Cruz<sup>1</sup>, J.L. Redondo<sup>2</sup>, M. Berenguel<sup>3</sup> y P.M. Ortigosa<sup>4</sup>

*Resumen*— En este trabajo se estudia un esquema de paralelización para la evaluación del rendimiento óptico de campos de heliostatos. En las Centrales Solares de Recepción Central (SCRS por sus siglas en inglés), el campo de heliostatos es normalmente el subsistema más importante en términos de inversión inicial y pérdida energética. Por tanto, el diseño de este tipo de centrales debe ser cuidadosamente estudiado y estar optimizado. La optimización del diseño puede perseguir multitud de objetivos distintos y/o combinados. En este trabajo se asume que se busca optimizar la eficiencia óptica ponderada del campo solar, un criterio frecuente en la bibliografía. La evaluación de la función objetivo asociada es muy costosa desde el punto de vista computacional, lo cual puede hacer que no sea viable aplicar un proceso de optimización exhaustivo. En este trabajo, se propone una paralelización de la función objetivo aprovechando su naturaleza intrínsecamente paralela de forma desligada del optimizador. La versión paralela obtenida se comparará con su homóloga secuencial en términos de eficiencia y eficacia. Para finalizar, se extraen conclusiones de los resultados obtenidos y se proponen ciertas líneas de trabajo futuro.

*Palabras clave*— campo de heliostatos, paralelismo, optimización.

## I. INTRODUCCIÓN

Las Centrales Solares de Recepción Central (en adelante SCRS por sus siglas en inglés) son uno de los estándares más prometedores y visibles de las energías renovables. Este tipo de sistemas consiste básicamente en un receptor de radiación situado sobre una torre y un amplio conjunto de espejos de alta reflectividad. Estos espejos, conocidos como ‘heliostatos’, siguen el movimiento aparente del Sol para concentrar la radiación incidente sobre el mencionado receptor, que alcanza temperaturas muy elevadas. Estos sistemas se aplican generalmente dentro de ciclos tradicionales turbina-vapor para generar electricidad así como con fines científicos (se puede encontrar información adicional en [2], [10] y en el capítulo 10 de [11]).

El conjunto de heliostatos forma lo que se conoce como ‘campo de heliostatos’ o ‘campo solar’, representa aproximadamente el 50% de la inversión inicial en infraestructura, y puede suponer hasta un 40% de pérdida energética en el ciclo de funcionamiento de la central [7]. Por consiguiente, este subsistema debe ser cuidadosamente diseñado y estudiado. Esta necesidad lleva a abordar complejos problemas de op-

timización en los que se estudia la distribución de un conjunto de heliostatos para satisfacer, de la mejor forma posible, una serie de objetivos particulares. El rendimiento óptico [9] y el coste de desarrollo (ambos combinados en [12]) son ejemplos de objetivos recurrentes.

En este contexto, además de aplicar simplificaciones en el dominio del problema (discretización de superficies [9], [11], [12], supresión de ciertas fases de cálculo [1], [9], etc.) las técnicas de computación de altas prestaciones pueden ayudar también a reducir el esfuerzo computacional. Se trata, por tanto, de un enfoque interesante para mejorar las condiciones de resolución y exploración del espacio de búsqueda, con independencia del optimizador escogido [3].

En la siguiente sección se define una función objetivo posible como ejemplo de aplicación. Seguidamente, en la sección 3, se propone un esquema de implementación paralela de la misma. Posteriormente, en la sección 4, se compara el rendimiento de las versiones secuencial y paralela en la evaluación de distintos campos de heliostatos. Finalmente, en la sección 5, se extraen conclusiones y se definen algunas líneas de trabajo futuro.

## II. FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo es la eficiencia óptica ponderada anual que se describe en [9], aunque con algunas puntualizaciones. Esta función, particularmente versátil y definida en términos generales, representa la capacidad del campo de heliostatos para redirigir y concentrar la radiación solar sobre el receptor (propiedades ópticas) a lo largo del año. Tiene en cuenta además la radiación solar incidente como factor de ponderación (propiedades energéticas). Esta función puede formularse tal y como se describe a continuación:

$$\eta_{year,I} = \frac{\sum_{day=1}^{365} \int_{sunrise}^{sunset} I_b(t)\eta(t)dt}{\sum_{day=1}^{365} \int_{sunrise}^{sunset} I_b(t)dt} \quad (1)$$

donde  $I_b(t)$  es la radiación directa incidente y  $\eta$  es la eficiencia óptica del campo en el instante  $t$  [9].

El concepto de la eficiencia del campo de heliostatos, bien detallado en el capítulo 10 de [11], depende de sus propiedades ópticas en un cierto instante de tiempo  $t$  (como se denota en Eq.(1)). Este factor de eficiencia  $\eta$  puede expresarse en términos de un conjunto de subfactores que modelan a su vez distintas fuentes de pérdida energética en las plantas reales. Para nuestro propósito, el factor de eficiencia del campo mostrado en Eq.(1) se define a su vez

<sup>1</sup>Dpto. de Informática, Univ. de Almería ceiA3, Almería, España, e-mail: [ncalvocruz@gmail.com](mailto:ncalvocruz@gmail.com).

<sup>2</sup>Dpto. de Informática, Univ. de Almería ceiA3, Almería, España, e-mail: [jlredondo@ual.es](mailto:jlredondo@ual.es).

<sup>3</sup>Dpto. de Informática, Univ. de Almería ceiA3, Almería, España; CIESOL Research Center on Solar Energy, e-mail: [beren@ual.es](mailto:beren@ual.es).

<sup>4</sup>Dpto. de Informática, Univ. de Almería ceiA3, Almería, España, e-mail: [ortigosa@ual.es](mailto:ortigosa@ual.es).

como en [9]

$$\eta = \eta_{cos} \cdot \eta_{sb} \cdot \eta_{itc} \cdot \eta_{aa} \cdot \eta_{ref} \quad (2)$$

donde  $\eta_{cos}$ ,  $\eta_{sb}$ ,  $\eta_{itc}$ ,  $\eta_{aa}$  y  $\eta_{ref}$  son los factores de eficiencia ‘coseno’, ‘bloqueo y sombreado’, ‘intercepción’, ‘atenuación atmosférica’ y ‘reflectividad’ respectivamente. Estos conceptos, que se abordan detalladamente en el capítulo 10 de [11] y de forma más concisa en [9], se exponen brevemente en relación al modelo implementado:

1.  $\eta_{cos}$ : La porción útil del área reflectante de los helióstatos se reduce con el coseno del ángulo formado por la radiación solar incidente con la dirección normal de dicha superficie (o, de forma simétrica, por la radiación reflejada con esta misma normal). Se calcula tal y como se describe en el capítulo 10 de [11], mencionándose además que se emplea su mismo sistema de coordenadas.
2.  $\eta_{sb}$ : Los helióstatos, como cuerpos opacos, pueden obstruir la radiación incidente sobre otros generando sombras. Del mismo modo, pueden también bloquear la radiación que otros helióstatos redirigen hacia el receptor produciendo bloqueos. Este factor, de gran complejidad de cálculo, se obtiene siguiendo el esquema de [9].
3.  $\eta_{itc}$ : Es de esperar que la radiación que los helióstatos redirigen hacia el receptor incida sobre su superficie. Sin embargo, su capacidad de enfoque y orientación puede degradarse sensiblemente por diferentes razones. En nuestro caso se estima fundamentalmente dependiendo de las dimensiones del receptor y los helióstatos tal y como se hace en [4].
4.  $\eta_{aa}$ : El estado atmosférico repercute en la radiación que el conjunto de helióstatos enfoca sobre el receptor a lo largo de su recorrido desde cada reflector. Se estima empleando el modelo escogido también en [9], de uso frecuente.
5.  $\eta_{ref}$ : Las superficies reflectantes no pueden garantizar siempre un fenómeno de reflexión perfecto por su propia construcción (propiedades de los materiales, diseño...) y/o estado (deterioro, suciedad...). En nuestro caso se considera un factor constante asociado a los helióstatos.

Es además importante destacar que la Eq. (2) puede extenderse a cualquier número de helióstatos en activo mediante la combinación y promediado de sus respectivos factores particulares. La radiación incidente instantánea que aparece también en la Eq. (1) se calcula a partir del concepto de ‘masa aérea’ (‘air mass’ en inglés) mediante la aplicación del modelo de [8]. En lo que respecta a la discretización y muestreo de los diferentes días del año entre el amanecer y anochecer se hace aplicando un factor constante. Finalmente, lo relativo a la estimación de la posición solar aparente y los distintos sistemas de referencia se toman de [11].

### III. ESQUEMA DE PARALELIZACIÓN

La función (1), escogida como prueba de concepto, puede aplicarse para evaluar la aptitud de distintas distribuciones y configuraciones de helióstatos como se hace en [9]. Sin embargo, su proceso de cálculo es altamente costoso en términos de CPU, especialmente el factor de bloqueo y sombreado ( $\eta_{sb}$ ) cuando hay que considerar grandes conjuntos de helióstatos. Afortunadamente, la naturaleza de esta función es intrínsecamente paralela, lo que se puede aprovechar para acelerar el proceso.

Teniendo en cuenta que, como se comentó, la función (1) se centra sobre cada helióstato siendo además extensible a cualquier número de elementos, el total de helióstatos puede dividirse en bloques. Estos bloques o subsecciones de la central se asignan a distintas unidades de ejecución para cada instante  $t$ . Cada una de las unidades de ejecución calcula entonces la valoración de su región particular de forma concurrente y necesitando únicamente acceso de lectura al contexto global. Al concluir con la valoración de su parte cada una de las distintas unidades de ejecución basta simplemente con acumular cada resultado parcial hasta que, finalmente, se deba obtener el promedio del campo en su conjunto. Además, el aspecto fundamental a tener en cuenta es que no hay necesidad de modificar valores globales compartidos por los bloques dentro de cada instante (únicamente lecturas de aspectos como la posición aparente del Sol, la intensidad de radiación...). De esta forma, y como se ha anticipado, no hay secciones críticas que proteger dentro de cada instante  $t$ . No obstante, sí se debe destacar que en el modelo implementado se requiere garantizar que todos los helióstatos están correctamente orientados antes de proceder a calcular el factor de bloqueo y sombreado.

El esquema descrito, ilustrado en la figura 1, es generalmente aplicable al problema tratado con distintas configuraciones y teniendo en cuenta las particularidades de cada modelo como se ha destacado. De esta forma, se puede explotar el paralelismo a nivel de la propia función en el dominio del problema por su significativo coste computacional con independencia de las propiedades del optimizador aplicado. En la figura 2 se plasma esta misma idea con un enfoque más algorítmico. Se incluye también la necesidad concreta de contar con todos los helióstatos orientados antes de realizar los cálculos, y se asume una división del conjunto de helióstatos en los subconjuntos  $A$  y  $B$ .

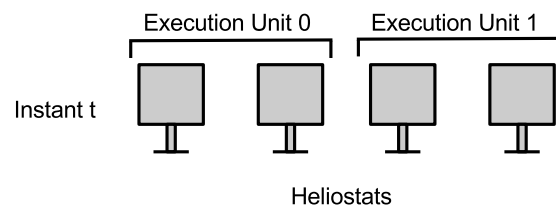


Fig. 1. Esquema de paralelización por helióstatos.

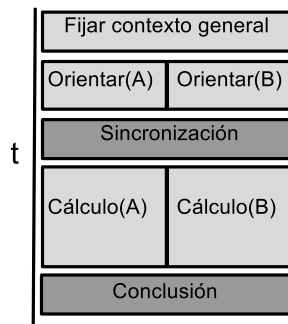


Fig. 2. Pseudocódigo de la paralelización por heliostatos.

#### IV. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

El modelo descrito se ha implementado en C++. Se han desarrollado dos versiones de dicho modelo, una secuencial y una paralela que aplica el esquema explicado en la sección anterior. Esta segunda versión paralela hace uso de la conocida librería PThreads para la gestión de hilos de ejecución en entornos de memoria compartida. Ambas han sido compiladas con el nivel de optimización '-O2'. Las dos versiones se han empleado para analizar el rendimiento óptico de diferentes distribuciones de heliostatos tal y como se define en Eq. (1). El número de heliostatos empleado varía entre 30 y 500 unidades con una superficie reflectante de 10x10 metros. El receptor se sitúa en una torre de 100 metros de altura. El número de hilos desplegado para cada instancia del problema va desde 2 hasta un máximo de 12. Todos los experimentos se han llevado a cabo en un cluster 'BullX' dedicado que se forma de 18 nodos Intel Xeon E5 2650 con 16 núcleos y 64 GB de memoria compartida por nodo.

En la figura 3 se muestra el speedup promedio obtenido en cada caso tras 5 experimentos. Tal y como se puede apreciar en dicha figura no hay duda acerca del efecto positivo de explotar el paralelismo del modelo estudiado: el mismo proceso puede llegar a completarse ahora hasta 10 veces más rápido en las instancias mayores y es acelerado de forma significativa en la mayoría de ellos (obviando el caso más reducido, con una planta de 30 heliostatos, que tampoco es especialmente realista en este contexto). Se puede añadir además que el comportamiento general registrado se muestra bastante escalable.

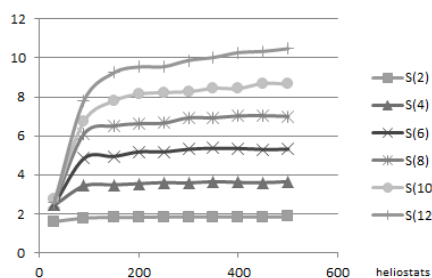


Fig. 3. Speedup promedio de la versión paralela sobre la secuencial.

#### V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se plantea y analiza un posible criterio de paralelización de una función computacionalmente costosa y aplicable a la optimización del diseño de campos de heliostatos. Seguidamente se comparan la versión secuencial original del modelo con la nueva versión paralela aplicadas al estudio de distribuciones concretas de heliostatos. Los resultados obtenidos muestran que el proceso se acelera de forma significativa, en especial cuando se trabaja con una cantidad elevada de heliostatos. Por consiguiente, cualquier proceso de optimización que se base en esta función puede llevar a cabo un mayor número de evaluaciones por unidad de tiempo con independencia de sus características y configuración. De esta forma se permiten exploraciones del espacio de búsqueda más exhaustivas y se reduce la necesidad de aplicar simplificaciones a nivel del problema tratado. Se destaca además que la explotación del paralelismo en estos problemas podría no ser opcional cuando se trabaje con plantas de miles de heliostatos (una tendencia actualmente activa) o la memoria requerida por los modelos sólo sea asumible en entornos paralelos distribuidos.

Hay numerosas áreas de trabajo sobre las que avanzar a partir de lo expuesto. En primer lugar, sería interesante analizar el impacto real de la paralelización sobre distintos procesos de optimización. En esta línea se tiene especial interés en realizar pruebas con algoritmos evolutivos como UEGO [5], [6]. En segundo lugar, sobre este problema se podrían proponer y analizar distintos esquemas de paralelización adicionales. En tercer lugar, el balanceo de la carga computacional es un aspecto complejo para este problema y debería ser estudiado con profundidad. Finalmente, las ideas comentadas podrían ser exportadas y probadas con diferentes modelos y situaciones. Esto podría ser especialmente interesante estudiando casos en los que la resolución fuera directamente inviable por medios tradicionales sin recurrir al paralelismo.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado bajo el acuerdo entre la Universidad de Almería y el PSA-CIEMAT. Ha sido financiado con fondos FEDER de la Unión Europea (red CAPAP-H5 TIN2014-53522), el Ministerio Español de Economía y Competitividad (TIN2012-37483-C03-03 y ENERPRO DPI2014-56364-C2-1-R), la Junta de Andalucía (P10-TIC-6002, P11-TIC7176 y P12-TIC301) y Fondos para el Desarrollo Regional Europeo (ERDF).

Juana López Redondo es beneficiaria del programa contractual español 'Ramón y Cajal', co-financiado por el Fondo Social Europeo.

#### REFERENCIAS

- [1] S.M. Besarati y D.Y. Goswami, *A computationally efficient method for the design of the heliostat field for solar power tower plant*. *Renewable Energy*, 69,226–232, 2014.
- [2] E.F. Camacho, M. Berenguel, F.R. Rubio y D. Martínez. *Control of solar energy systems*. *Renewable Energy*, 69,226–232, 2014.

- [3] N.C. Cruz, J.L. Redondo, M. Berenguel y P.M. Ortigosa. *Parallelizing the heliostat field layout evaluation*. Proceedings of the 15th International Conference on Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering, CMMSE 2015.
- [4] A. Gómez. *Diseño del campo de helióstatos para torres solares de receptor central*. Director de proyecto: D.J. Santana. Proyecto final de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [5] M. Jelasity. *UEGO, an Abstract Niching Technique for Global Optimization*. Parallel Problem Solving from Nature?PPSN V, volumen 1498 de Lecture Notes in Computational Science 378-387. Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- [6] M. Jelasity, P.M. Ortigosa e I. García *UEGO, an abstract clustering technique for multimodal global optimization*. Journal of Heuristics, 7(3), 215-233, 2001.
- [7] S.A. Jones, R. Lumia, R. Davenport, R.C. Thomas, D. Gorman, G.J. Kolb, y M.W. Donnelly *Heliostat cost reduction study*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550, 2007.
- [8] E.G. Laue. *The measurement of solar spectral irradiance at different terrestrial elevations*. Solar Energy [Internet], 13, 43–50, IN1-IN4, 51–57, 1970.
- [9] C.J. Noone, M. Torrilhon y A. Mitsos. *Heliostat field optimization: a new computationally efficient model and biomimetic layout*. Solar Energy, 86(2), 792–803, 2012.
- [10] V.S. Reddy, S.C. Kaushik, K.R. Ranjan y S. k. Tyagi *State-of-the-art of solar thermal power plants- A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 27, 258–273, 2013.
- [11] W.B. Stine y M. Geyer. *Power from the sun*. 2001 (Available at: <http://powerfromthesun.net/book.htm>). Last access: 22 de Mayo de 2015.
- [12] H. Zhang, I. Juchli, D. Favrat y X. Pelet. *Multi-objective thermoeconomic optimisation of the design of heliostat field of solar tower power plants*. Engineering for Sustainable Energy in Developing Countries, Rio de Janeiro, Brazil, 15–18 August 2007.