

## HERRAMIENTAS DE CÁLCULO PARA EL MODELADO DE RECEPTORES CENTRALES DE ENERGÍA SOLAR DE CONCENTRACIÓN

MUÑOZ-ANTÓN, Javier; VICENTE SÁNCHEZ, Pablo; ABBAS CÁMARA, Rubén; VALDÉS DEL FRESNO, Manuel; ROVIRA DE ANTONIO, Antonio; MONTES PITA, María José

[javier.munoz.anton@upm.es](mailto:javier.munoz.anton@upm.es)

Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Departamento de Ingeniería Energética

### RESUMEN

La energía solar está viendo actualmente importantes avances en las tecnologías desarrolladas para su aprovechamiento a nivel industrial, ya sea calor de proceso o producción de energía eléctrica. Una parte importante de los esfuerzos en este ámbito se dirigen al receptor de la radiación solar concentrada, elemento en el que se persigue transmitir la energía reflejada por el sistema concentrador al fluido calorífero con las menores pérdidas térmicas posibles.

La consecución de un diseño adecuado o la mejora de uno ya establecido debe llevarse a cabo a través de un análisis exhaustivo de la física que se desarrolla en el interior del receptor, para lo que existen diversas herramientas. Las más comunes pasan por el ámbito computacional y tratan de simular la física que aparece en estos elementos, pudiendo realizarse la implementación de la física y la geometría del receptor de forma manual o adquiriendo la licencia de algún programa comercial que tenga implementada la física y quede a cargo del usuario implementar la geometría. El uso de una herramienta debe estar fundamentado por el objetivo que se persigue, por lo que no se debe tomar a la ligera.

El objetivo de este trabajo es realizar una revisión las principales tipologías de herramientas de software utilizadas en el estudio de receptores de torre central (los asociados a un mayor flujo de potencia junto con los discos parabólicos), discutiendo en qué caso es más recomendable una u otra herramienta e indicando recomendaciones sobre en qué ocasiones puede ser útil el desarrollo de una herramienta propia. Se muestra, además, el ejemplo de una herramienta generada por los autores, útil cuando se persigue el diseño conceptual (no de detalle) de una tecnología de este tipo

**Palabras clave:** Energía solar de concentración, receptor central, métodos numéricos.

## 1. Introducción

El análisis de sistemas térmicos constituye un reto dependiendo del alcance que se quiera dar: desde las temperaturas de funcionamiento hasta los esfuerzos mecánicos o las reacciones químicas que se van produciendo con el tiempo y las condiciones de trabajo que dependiendo del contexto pueden llegar a ser agresivas para materiales y fluidos. Debido a esto, es de gran interés definir el alcance antes de seleccionar una herramienta o tipo de modelo de simulación, pues definir el marco de trabajo determina también el tipo de herramientas que se deben utilizar.

Un ejemplo es el caso de diseños conceptuales de sistemas térmicos [1] en los que prima conocer una aproximación a los valores característicos de rendimiento, temperaturas, pérdidas de carga o caudales; mientras que en análisis más desarrollados interesa conocer toda la fenomenología asociada al sistema, por lo que se requiere también conocer gradientes de temperatura concretos, comportamiento de la turbulencia en la capa límite para optimizar la transmisión de calor, gradientes de temperatura diferenciales que ocasionan deformaciones o incluso roturas, etc. [2].

En cualquiera de estos dos casos extremos, uno simplista y el otro muy detallado, el modelo con que se realizan ambos diseños debe ser considerablemente diferente: para un diseño conceptual básico un modelo con ecuaciones analíticas que describan la física básica del proceso puede ser suficiente, o si se desea algo con cierta capacidad gráfica, incluso se puede implementar en una hoja de cálculo. Sin embargo, para un estudio pormenorizado ya se necesita de la aplicación del cálculo numérico, ámbito en el que aparecen códigos comerciales de reconocido prestigio que resuelven problemas físicos muy complejos con carácter general, como ANSYS, OpenFOAM, StarCCM+ o COMSOL entre otros, o programación de códigos propios que habitualmente son utilizados para aplicaciones muy concretas en C#, Matlab, Visual Basic, etc.

En la bibliografía disponible se pueden encontrar ejemplos de estas diferentes aproximaciones al complejo problema del modelado de receptores de plantas termosolares de receptor central y del resto de tecnologías termosolares, encontrándose entre todas ellas pautas interesantes a tener en cuenta al acometer una aproximación a la simulación de estas tecnologías.

En el epígrafe 2 se describen las diferentes tecnologías termosolares y sus características principales, en el 3, 'Herramientas de modelado', se describe brevemente la tendencia actual respecto a soluciones comerciales y propias, para en el punto 4, 'Ejemplo de desarrollo propio' se comenta el proceso de selección del alcance de una herramienta de cálculo para un caso concreto en el que se persigue un objetivo definido a partir de unos recursos determinados. Por último, se indica en las conclusiones la cadena de decisiones que se ha seguido para construir el modelo de esa forma y las consecuencias de dicha cadena de decisiones.

## 2. Tecnologías termosolares

Los sistemas termosolares transforman energía solar en energía térmica incrementando la entalpía específica del fluido calorífero y transformando esta energía mediante el sistema térmico adecuado al fin útil buscado, generalmente calor de proceso o producción de energía eléctrica. La baja densidad de potencia del recurso solar, con un valor orientativo de  $1000 \text{ W/m}^2$  en la superficie terrestre, hace necesario concentrar la radiación solar directa para alcanzar temperaturas que permitan utilizar el fluido calorífero en ciclos de generación de potencia, por lo que a estos sistemas se les suele llamar sistemas termosolares de concentración. Estos sistemas constan de dos bloques principales: el campo solar, y el ciclo de potencia. Adicionalmente, pueden disponer de sistema de almacenamiento y sistema de hibridación, los cuales permiten a la planta seguir operando en condiciones cercanas a las nominales en ausencia del recurso solar o cuando éste sea insuficiente.

El campo solar está compuesto por colectores que captan y concentran la energía del sol en el receptor, el cual debe poseer un ratio absorción/emisión adecuado. A través del mismo circula el fluido calorífero obteniendo el objetivo perseguido de incrementar su entalpía específica. Cuando se utilizan fluidos distintos en el campo solar y en el ciclo de potencia, es preciso un intercambiador de

calor para transmitir la energía de uno a otro. El fluido de trabajo acciona la turbina o el motor al que va acoplado un generador eléctrico.

Desde un punto de vista tecnológico y según la geometría del campo solar, pueden distinguirse actualmente cuatro tipos de tecnologías termosolares (Fig. 1):

- Colectores cilindroparábólicos (CCP): están compuestos por filas de espejos de sección parabólica dotados de seguimiento solar en un eje. Los espejos concentran la radiación solar en el tubo absorbedor situado en el foco de la parábola, por dentro del cual circula aceite térmico como fluido calorífero.
- Sistemas de receptor central (RC): están compuestos por un campo de espejos dotados de seguimiento en dos ejes, denominados heliostatos, que concentran la radiación solar en un receptor situado en una torre a cierta altura. Existen varios tipos de receptores como los exteriores, de cavidad o volumétricos. Los dos primeros utilizan agua o sales fundidas como fluido calorífero mientras que el último utiliza gas, siendo el aire el más habitual.
- Sistemas de disco parabólico (DP): Están formados por espejos parabólicos con seguimiento en dos ejes, que concentran la radiación solar en el foco del paraboloide donde se sitúa un motor Stirling.
- Sistemas lineales Fresnel (LF): formados por hileras de espejos planos situados en la horizontal del suelo que concentran la radiación solar en un tubo absorbedor, cada uno con su sistema de enfoque independiente, con seguimiento en un eje.

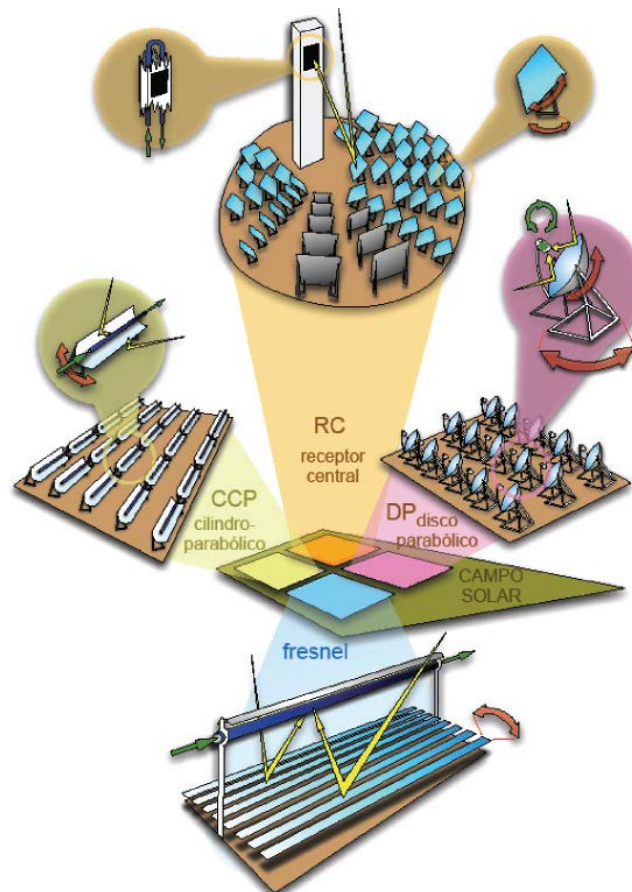


Figura 1: Tipos de tecnologías termosolares [3].

En la tabla 1 se describe de forma simplificada las principales características de las tecnologías termosolares de concentración consideradas. Puede apreciarse como la tecnología de receptor central es la segunda que mayor concentración, o flujo de potencia, recibe el receptor, cerca de los discos parabólicos. Al ser el receptor de un sistema de torre y estar más afianzados comercialmente se considera más interesante estudiar este sistema.

Tabla 1: Valores típicos de las tecnologías solares para producción de energía eléctrica [4].

Tipo de tecnología	Fresnel	Colector cilindro-parabólico	Torre central	Disco parabólico
Concentración	>60	70-80	>1000	>1300
Potencia típica de planta (MW)	10-200	10-300	10-200	0.01-0.025
Rendimiento anual típico de planta	8-10	15-16	16-17	20-25
Rendimiento pico de planta	18	14-20	23-35	30
Temperatura fluido	Comparativamente baja	Media	Alta	La más alta
Riesgo tecnológico	Medio	Bajo	Medio	Medio
Bloque de potencia	Rankine	Rankine Ciclo combinado	Rankine Ciclo combinado Brayton	Rankine Stirling

### 3. Herramientas de modelado

Atendiendo a la literatura disponible, se pueden encontrar principalmente dos tipos de herramientas de modelado diferentes: analíticas y numéricas, estas últimas pueden ser a su vez constituidas como códigos comerciales, código libre o desarrollos propios [4]. Las técnicas analíticas dependen en gran medida de la complejidad de las ecuaciones diferenciales que describan el fenómeno físico a analizar. Esto hace que en el caso del comportamiento de receptores de torre central sea prácticamente imposible aplicar estas técnicas salvo en casos muy concretos, lo cual implica que sea necesario transformarlas mediante algún tipo de discretización con objeto de aplicarlas mediante técnicas de cálculo numérico con la ayuda de un computador.

Clifford [5] analizó en su momento el importante abanico de programas orientados al análisis de la física asociada a las centrales termosolares, distinguiendo entre varios problemas físicos, a saber:

- Diseño óptico y rendimiento del campo solar
- Diseño térmico del receptor
- Fluido de termotransferencia: transporte, intercambio y almacenamiento
- Bloque de potencia
- Análisis global de planta

Para cada uno de ellos señala ejemplos representativos en el momento de redacción del documento. Aunque ahora queda algo desactualizado atendiendo al desarrollo informático realizado de 2008 a nuestros días, la clasificación sigue siendo considerablemente representativa.

Atendiendo al diseño térmico del receptor, Clifford [5] señalaba en su trabajo varios códigos como son:

- CAVITY: código desarrollado por Sandia National Laboratories y que ya en 2008 se dejó de mantener.
- DRAC y TOPAZ, con el tiempo sustituidos por NETFLOW, es otro código desarrollado por Sandia National Laboratories, especializado en flujos compresibles como el que aparece en receptores centrales que usan gas.
- FLUENT: Código comercial cerrado de CFD de propósito general, comercializado a día de hoy bajo la firma comercial ANSYS, representa una solución comercial genérica que puede simular una gran cantidad de problemas de ingeniería. Alternativas a este programa son COMSOL, OPENFOAM o STAR CCM+, por citar sólo unos pocos.

Esta muestra es característica de lo que se puede encontrar en la mayor parte de los ámbitos de ingeniería, las soluciones comerciales son realmente útiles, pero la adaptación a la problemática concreta es requerida cuando el nivel de detalle exigido es elevado. Esta aseveración [5] conlleva que el uso de herramientas comerciales necesitará de posibilidades de adaptación (por ejemplo, en el caso de FLUENT mediante 'User Defined Functions' o UDFs) o, llegado el caso, del desarrollo de aplicaciones propias, si bien, la elección de un desarrollo propio también puede estar relacionada con limitaciones presupuestarias. El desarrollo de aplicaciones propias que se pueden encontrar en la literatura disponible muestra que habitualmente se tiende a programación en lenguajes como C#, Visual Basic, Fortran, MatLab o incluso EES [1, 6, 7].

#### 4. Ejemplo de desarrollo propio

Dentro de las actividades que desarrolla actualmente el *Grupo de Investigaciones Termoenergéticas*, del que son miembros la mayor parte de los autores de este trabajo, el modelado de sistemas solares de concentración es común. Entre esos modelos existen desarrollos de gran detalle con herramientas comerciales [2] y diseños conceptuales como el presentado en [1]. La herramienta que aquí se presenta responde a un punto intermedio que se ha planteado desde el comienzo como un desarrollo a seguir actualizando y mejorando de forma continuada, partiendo de un receptor central multitubo al que se aplica una nodalización como la de la Fig. 2.

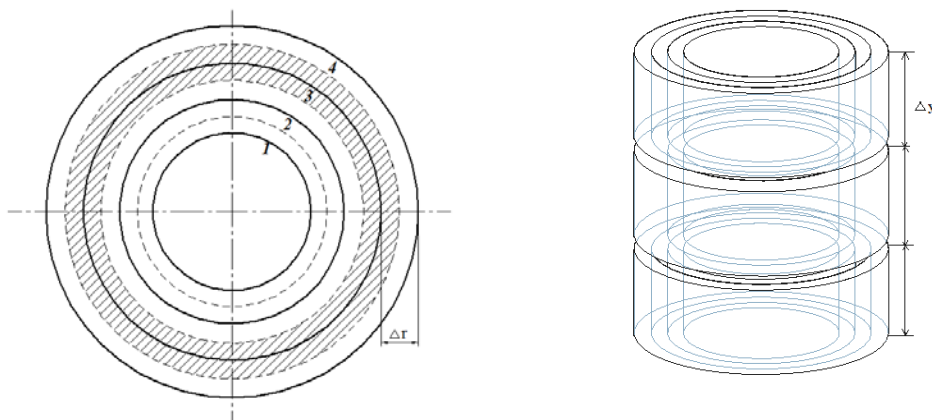


Figura 2: Ejemplo de nodalización de las tuberías del receptor

Con la nodalización determinada que da lugar a resultados independientes del mallado tras el análisis correspondiente en un proceso iterativo (más adelante se prevé implementar un mallado adaptativo en

función de los gradientes de temperatura), se localizan los tubos y se aplica sobre ellos el perfil de potencia incidente considerado. Este perfil (Fig. 3) se discretiza atendiendo a la tipología de los tubos que se considerarán en la simulación, asumiendo la tendencia de los tubos a homogeneizar la potencia incidente como han demostrado ciertos estudios [8]. La adecuada discretización del perfil de potencia incidente en el receptor tiene una importancia manifiesta, pues su mala realización puede llevar a que no se cumpla el balance de energía del sistema: el valor de cada tramo discreto no será el valor medio del perfil de potencia, será el valor de potencia que cumple con el balance de energía de la potencia incidente. Lógicamente esta consideración no tendrá sentido de llevarse a cabo si el perfil de potencia utilizado como guía para la discretización no está evaluado con el rigor esperado: en este caso se utiliza modelo óptico específico [6]. En la Fig. 3 se puede observar este proceso para el caso simplificado de 4 tubos (con un número reducido de tubos se observa mejor el proceso), donde el valor asignado a cada tubo se corresponde en la representación con un rectángulo que encierra la misma superficie que el tramo del perfil referencia de potencia incidente para que se cumpla la conservación de la energía en el cálculo.

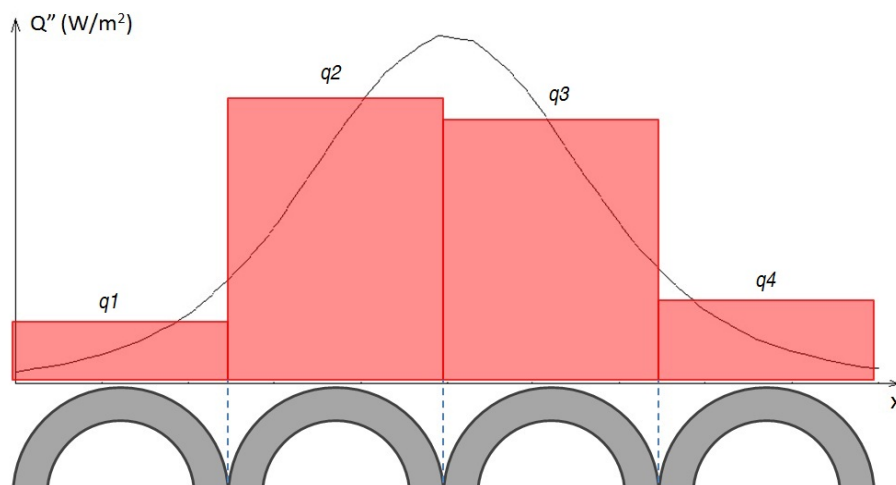


Figura 3: Discretización del perfil de potencia para un receptor con 4 tubos.

Con estas ideas básicas se puede acometer la ingeniería de software para determinar los flujos de trabajo de la herramienta, que en este caso se ha considerado para el caso concreto de generación directa de vapor, con lo que es crucial determinar la pérdida de carga de cada tubo por los efectos que tendrá en la distribución de caudal. En la Fig. 4 se puede observar dicho diagrama de flujo.

La posibilidad de realizar el modelado de un receptor de un sistema de torre central con una solución comercial plantea varios inconvenientes:

Al tratarse de un sistema de cierto tamaño, si se persigue conocer perfiles de temperatura (temperaturas máximas, gradientes de temperatura) para el posterior análisis de tensiones mecánicas por dilataciones diferenciales, este procedimiento puede simplificar considerablemente el tiempo de cálculo y la inversión económica en equipos informáticos, pues la distribución de caudal conlleva la necesidad del análisis de todo el sistema si el fluido (en este caso, agua/vapor) entra por todos los tubos sin restricción, por lo que lo que ocurre en uno de los tubos depende del resto. En términos de este análisis la función 'iteración en punto fijo' solventa el problema de pérdidas de carga diferentes en cada tubo, mientras 'pérdidas de carga' y 'resolución de un tubo' resuelven el problema hidráulico y térmico para cada tubo para el caudal que gestione 'resolución del receptor'.

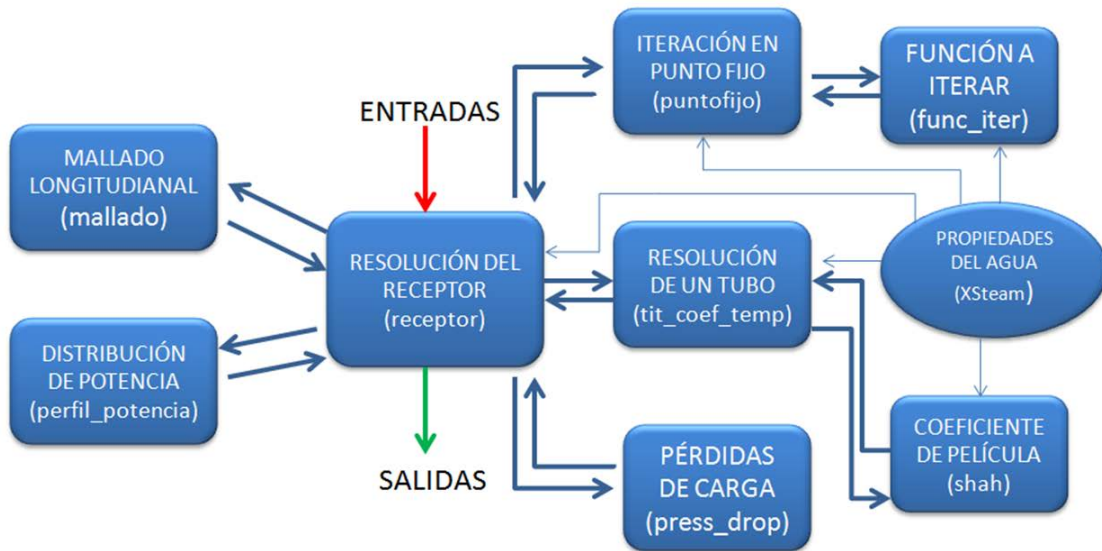


Figura 4: Diagrama de flujos del receptor analizado.

Ejemplo de resultado puede ser el campo de temperaturas, o de forma más hidráulica la determinación de alternativas a la dirección que debe seguir el fluido en cada tubo, pudiendo incluso aplicarse a receptores Fresnel multitubo (Fig. 5), es decir, la realización de este tipo de aplicaciones permite en cierto momento de su vida el poder reorientar su desarrollo hacia el análisis de sistemas relacionados, aprovechando elementos comunes como bibliotecas de propiedades, funciones genéricas, algoritmos de optimización o correlaciones específicas.

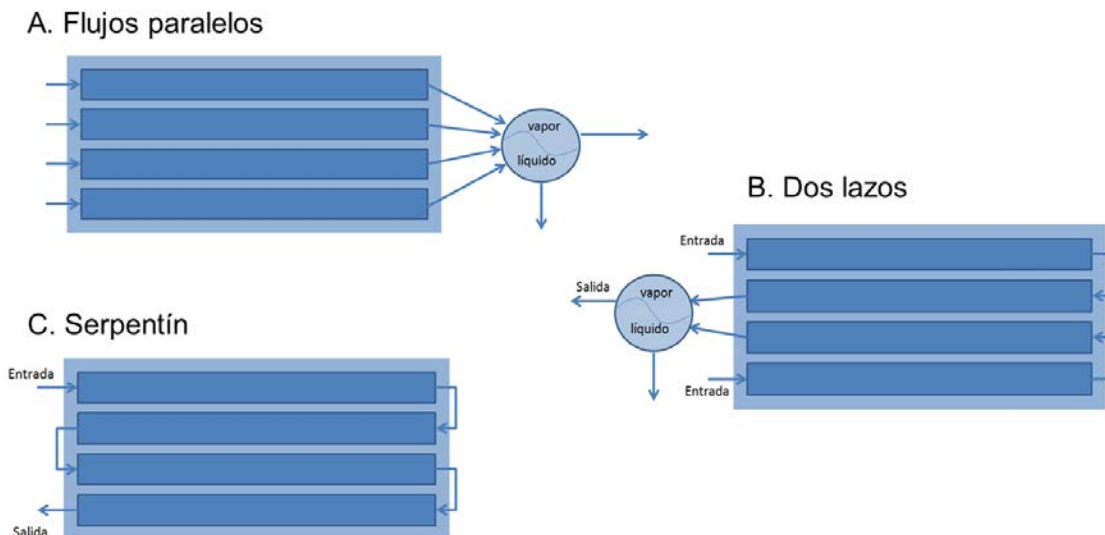


Figura 5: Ejemplos de receptores Fresnel analizables con la misma herramienta que la utilizada para receptores centrales.

## 5. Conclusiones

La simulación computacional es una forma altamente extendida de caracterizar diferentes sistemas ingenieriles sin llegar a la fase de ensayos. Ello supone un importante ahorro económico, pero aun así,

en la misma fase de simulación se puede mantener una economía de recursos si se determina claramente cuál es el alcance de la simulación a realizar.

El abanico de posibles códigos a utilizar en un problema concreto es considerablemente amplio, así como el rango de precios de sus licencias y de tiempo requerido en su aprendizaje y su utilización (incluyendo tiempo de cálculo). La consideración de todos estos aspectos es la que debe condicionar la selección de la herramienta adecuada, evitando elegir por defecto la más accesible, tendencia en ocasiones habitual, que puede conducir a una inversión innecesaria de valiosos recursos.

En el caso concreto de la herramienta descrita en este trabajo, el bagaje del investigador en MATLAB, sus conocimientos previos y el coste comparativo de otras herramientas, en términos de tiempo, dinero y capacidad de adaptación del sistema a simular a otros similares determinaron la elección. Considerar esta versatilidad desde un principio determina las posibilidades de aprovechamiento de los códigos generados, en este caso, para sistemas de receptores solares multitubo, si bien podría incluso adaptarse sin mucho esfuerzo a la simulación del hogar de la caldera de una central térmica convencional de carbón.

## 6. Agradecimientos

Los autores agradecen las discusiones técnicas con el resto de integrantes del *Grupo de Investigaciones Termoenergéticas* de la Universidad Politécnica de Madrid. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por ayudas del plan nacional Spanish Grant ‘VI Plan Nacional’ ENE2012-37950-C02-01 y ENE2012-37950-C02-02.

## 7. Referencias

- [1] PIERA, M., CORROCHANO, C., ABANADES, A., MUÑOZ-ANTÓN, J., *Conceptual design of a gas-cooled accelerator-driven reactor with very fast spectrum*. Progress in Nuclear Energy, 2015, vol. 78, pp. 361-371
- [2] MUÑOZ, J., ABANADES, A., *Analysis of internal helically finned tubes for parabolic trough design by CFD tools*, Applied Energy, Volume 88, Issue 11, November 2011, Pages 4139-4149
- [3] ABANADES-VELASCO, A., BERNARDOS-RODRÍGUEZ E., LÓPEZ-PANIAGUA, I., GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, C., MUÑOZ-ANTÓN, J., *Energía solar termoeléctrica. Tecnología y Desarrollos*. DYNA, 2010, Vol. 85 n°7, pp. 563-574
- [4] BEHAR, O., KHELLAF, A., MOHAMMEDI, K., *A review of studies on central receiver solar thermal power plants*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, vol. 23, pp. 12-19
- [5] CLIFFORD, K. H., *Software and Codes for Analysis of Concentrating Solar Power Technologies*. Sandia National Laboratories, 2008, SAND2008-8053.
- [6] ABBAS, R., MONTES, M. J., PIERA, M., MARTÍNEZ-VAL, J. M., *Solar radiation concentration features in Linear Fresnel Reflector arrays*, Energy Conversion and Management, 2012, vol. 54, pp. 133-144
- [7] BIENCINTO, M., GONZÁLEZ, L., ZARZA, E., DÍEZ, L. E., MUÑOZ-ANTÓN, J., *Performance model and annual yield comparison of parabolic-trough solar thermal power plants with either nitrogen or synthetic oil as heat transfer fluid*, Energy Conversion and Management, 2014, vol. 87, pp. 238-249
- [8] FORRISTAL, R., *Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver*, NREL (National Renewable Energy Laboratory), October 2003, Golden, Colorado, USA.