

## DISEÑO Y SIMULACIÓN ÓPTICA DE UN SISTEMA DE CONCENTRACIÓN SOLAR PARA APLICACIONES DE ALTA TEMPERATURA

Guerreiro L.\*, Pujol-Nadal R.\*\*

\*\* Univ. Évora, IIFA, Palácio Vimioso, 7002 Évora, Portugal, lguerreiro@uevora.pt

\*\* Departament d'Enginyeria Industrial i Construcció, Universitat de les Illes Balears, Ctra. Valldemossa, Palma, 07122, (Illes Balears) España, ramon.pujol@uib.es

### RESUMEN

Diseño y simulación óptica de un sistema de concentración solar para aplicaciones de alta temperatura (hasta 1400°C). La simulación se ha llevado mediante el software de ray-tracing OTSun para el análisis óptico de sistemas de captación solar. Con la finalidad de alcanzar la potencia nominal de diseño de 40 kW, se ha optimizado la geometría variando parámetros de diseño considerando el tamaño angular del sol y errores de dispersión en la reflectancia de los espejos. La geometría utilizada se ha basado en la óptica del reflector Cassegrain incorporando un receptor tipo CPC. Distintos parámetros han sido optimizados en el diseño del CPC como el ángulo de aceptación, el factor de truncación y el diámetro de apertura. La energía capturada anual ha sido calculada para el sistema óptico optimizado en diferentes localidades.

**PALABRAS CLAVE:** energía solar térmica de concentración, Cassegrain, ray-tracing, OTSun software, optimización.

### ABSTRACT

Design and optical simulation of a solar concentration system for high-temperature applications (up to 1400°C). The simulation has been carried out using the OTSun ray-tracing software for the optical analysis of solar concentrating systems. With the aim of achieving the nominal design power of 40 kW, the geometry has been optimized by varying design parameters such as the angular size of the sun as well as scattering errors in the reflectance on the mirrors. The geometry used is based on the optics of the Cassegrain reflector with the incorporation of a CPC type receiver. Several parameters have been optimized in the design of the CPC such as the acceptance angle, the truncation factor and the aperture diameter. The annual captured energy has been calculated for the optimized optical system at different locations.

**KEYWORDS:** concentrating solar power, Cassegrian, ray-tracing, OTSun software, optimization.

### INTRODUCCIÓN

Los concentradores solares de disco parabólico constan de un espejo parabólico que concentra la luz solar en un punto focal donde se ubica el receptor. Existen varias tipologías según la aplicación, sin embargo, el tipo más común consiste en disponer de un motor Stirling en la zona focal del paraboloide [1]. Otros concentradores integran como receptores distintos elementos, como son tuberías [2] y pequeñas turbinas de gas [3]. Los concentradores de disco parabólico pueden alcanzar eficiencias ópticas superiores al 94%, así como temperaturas de 1000 °C y factores de concentración entre 500 y 2000.

Las tecnologías solares de concentración (CSP en inglés) son tecnologías renovables muy prometedoras, ya que pueden proporcionar energía de manera intermitente cuando se dispone de un sistema de almacenamiento térmico. Un ejemplo son las plantas CSP que almacenan la energía térmica en depósitos de sales fundidas que suelen trabajar con mezclas binarias o ternarias de nitratos a temperaturas hasta 600°C en centrales de torre como sea la central de Gemasolar de 19,9 MWe ubicada en Sevilla [4]. Esta tecnología precisa de transportar la energía térmica capturada en el receptor mediante tuberías a los tanques de almacenamiento, lo que conlleva un coste significativo en infraestructura y en pérdidas térmicas [5], además se producen pérdidas por radiación en el receptor. Con la finalidad de mitigar estos inconvenientes, el concepto *beam-down* nace, precisamente, para disponer de un reactor, o sistema de almacenamiento térmico, integrado al propio receptor. Algunos ejemplos que se encuentran operativos, de tipo torre central, se ubican en Emiratos Árabes Unidos (Masdar) [6], en Miyazaki (Japón) [7] y en Italia [8]. El diseño óptico diferenciador de los sistemas *beam-down* se basa en ubicar el receptor en la parte inferior del sistema óptico con la finalidad de integrar el sistema de almacenamiento térmico, y/o reactor, y reducir así las pérdidas térmicas, ver Fig. 1 (izquierda). Además, con este diseño hay una simplicidad y reducción de costes para el mantenimiento del sistema una vez que los principales componentes están muy cerca del suelo.

En este contexto, los concentradores solares de disco parabólico presentan el inconveniente de disponer el receptor a cierta altura del espejo concentrador, lo que implica elevar a esa misma altura los elementos necesarios para capturar/transformar/almacenar la energía reflejada por el reflector primario. Si bien este tipo de concentradores se encuentran en fase comercial, difícilmente se puede integrar un reactor, y/o sistema de almacenamiento, al receptor. Así pues, se precisa del uso del concepto *beam-down* para poder llevar a cabo este propósito, y a su vez disminuir las pérdidas térmicas de radiación en el receptor. En abril de 1672 el físico Laurent Cassegrain publicó un nuevo diseño de telescopio en la revista *Journal des sçavans*. El telescopio estaba formado por un reflector primario (parabólico) que concentra la luz en el punto focal de un reflector secundario (hiperbólico). Este segundo reflector refleja la luz hacia el otro punto focal de la hipérbola para generar la imagen, ver Fig. 2 (derecha). Siguiendo este principio, dado que permite ubicar el receptor en la parte inferior del sistema óptico, se puede diseñar un concentrador solar de tipo Cassegrain para aplicaciones térmicas. Sin embargo, antes de abarcar la descripción y resultados del concentrador que en este trabajo se expone, cabe señalar casos similares para contextualizar la innovación del trabajo que aquí se expone.

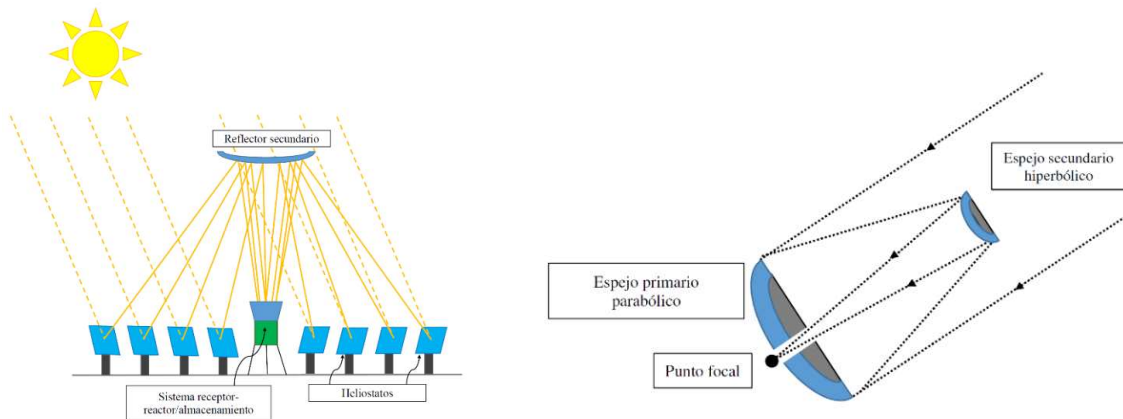


Fig. 1. Izquierda: Principio de funcionamiento de un concentrador solar *beam-down* de tipo torre central. Derecha: Principio óptico del telescopio Cassegrain.

O. J. Nydal [10] analizó mediante software de trazado de rayos el diseño óptico de un concentrador solar de tipo Cassegrain para aplicaciones térmicas. El trabajo se centró en determinar el efecto de la posición del reflector secundario, la sensibilidad en el error de seguimiento y el efecto del tamaño de los espejos planos para el reflector primario (además de considerar superficies curvas). Todo ello dejando fijos el resto de los parámetros estructurales en cuanto a la geometría óptica. Meng et al. [11] analizaron, mediante el software Trace Pro, el diseño óptico de un concentrador solar de tipo Cassegrain con parámetros estructurales predeterminados. La finalidad del estudio se centró en conocer el efecto del tamaño angular del sol y el error angular en la reflexión de los espejos. El diseño propuesto consiste en un receptor mixto PVT donde la radiación solar que impacta en los bordes de la zona focal es aprovechada por células PV para la producción directa de electricidad, y la energía solar donde se produce el pico de radiación se aprovecha en un receptor térmico para producir calor. Dhäler et al. [12] realizaron un estudio muy completo sobre el diseño óptico y caracterización experimental de un concentrador solar tipo Cassegrain para la producción de combustible mediante ciclos redox termoquímicos. Analizaron siete configuraciones diferentes del sistema de concentración, con parámetros estructurales fijos, obteniendo la potencia en función del radio de apertura del reactor solar. El sistema alterna dos reactores de manera intermitente. El análisis óptico se llevó a cabo mediante el software de trazado de rayos LightTools.

Como puede apreciarse de los artículos aquí citados, que si bien es cierto es tan sólo una muestra de lo que se encuentra publicado pero que a su vez han sido seleccionados por la relación con el trabajo que aquí se presenta, la gran mayoría de los parámetros geométricos que definen el sistema óptico vienen fijados en anterioridad a la optimización y análisis óptico del sistema. Este hecho puede provocar que las optimizaciones realizadas se basen en diseños que, a priori, podrían no ser los más óptimos para la aplicación propuesta, produciéndose un margen de mejora para que los sistemas puedan alcanzar eficiencias aún mayores. En referencia a ello, en el reciente estudio bibliográfico sobre concentradores solares de doble etapa (con espejos secundarios) realizado por Malik et al. [1], donde la gran mayoría son de tipo Cassegrain, se concluye que la gran parte de los estudios revisados sólo validan los sistemas propuestos de forma experimental, y que los resultados analíticos ayudan a identificar futuras iniciativas de investigación hacia una implementación más amplia de los sistemas de concertación. Además, los modelos paramétricos también pueden ayudar a identificar mejores diseños, combinando geometría y condiciones ambientales, según las aplicaciones energéticas.

Por todo ello, en el presente trabajo se muestra el diseño conceptual de un concentrador solar disco parabólico tipo Cassegrain, y su optimización según cuatro parámetros geométricos de diseño. Las simulaciones ópticas se han llevado a cabo mediante el uso del software OTSun [13], un trazado de rayos de código abierto que permite dibujar la geometría del concentrador mediante el programa de diseño mecánico FreeCAD [14], y que caracteriza la óptica del trazado de rayos mediante las ecuaciones de óptica electromagnética de Fresnel. El carácter diferenciador de nuestro estudio es que la geometría consta de cuatro parámetros geométricos variables, y por tanto se trata de un modelo paramétrico que pretende encontrar el diseño más eficiente a partir de unas condiciones estructurales fijas de partida. Además, al usar el software OTSun, ha permitido trabajar con objetos tipo CAD emulando las cotas y dimensiones de cada uno de los elementos que forman el sistema. El objetivo final es el diseño de un sistema de captación solar con una potencia nominal de diseño de 40 kW.

## DISEÑO DE LA GEOMETRÍA: DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

El objetivo de este trabajo es encontrar el diseño óptico que alcanza mayor eficiencia de un concentrador solar tipo Cassegrain para aplicaciones de alta temperatura. El concentrador solar debe cumplir con las siguientes especificaciones técnicas:

- Eficiencia óptica global ~ 80%.
- Temperatura de trabajo ~ 1400 °C.
- Potencia térmica (considerando radiación directa de 1000 W/m<sup>2</sup>) ~ 40 kW.

El estudio que aquí se presenta se enmarca en el proyecto *HighStorage*, y se ha llevado a cabo mediante una colaboración con una empresa de desarrollo de soluciones de concentración solar. Algunos de los detalles técnicos no pueden ser expuestos por motivos de confidencialidad.

El sistema consta de un reflector tipo disco parabólico de sección rectangular formado por dos mitades, cada una de ellas de 4.2 metros de ancho por 7.5 metros de largo. El espacio que se encuentra entre las dos secciones del espejo primario se precisa para ubicar el sistema receptor/almacenamiento. El espejo hiperbólico secundario presenta un diámetro de 1.4 metros y se ubica a 6 metros de altura. La posición del espejo secundario ha venido determinada tras un análisis dimensional de la estructura soporte junto con un análisis óptico para minimizar la dispersión de los rayos reflejados hacia el reflector (no se exponen los resultados por limitaciones de espacio). El sistema receptor está formado por un concentrador tipo CPC acoplado a una esfera. La esfera es de 0.3 metros de diámetro. Las dimensiones de la esfera se han determinado mediante un análisis previo que tuvo en cuenta la superficie mínima para garantizar la transferencia de calor, y a su vez teniendo en cuenta el espacio disponible para los elementos auxiliares (de nuevo, no se exponen los resultados por limitaciones de espacio). En la Fig. 2 puede apreciarse imágenes en FreeCAD del sistema propuesto, y en las Figs. 3 y 4 las cotas que determinan el sistema óptico.

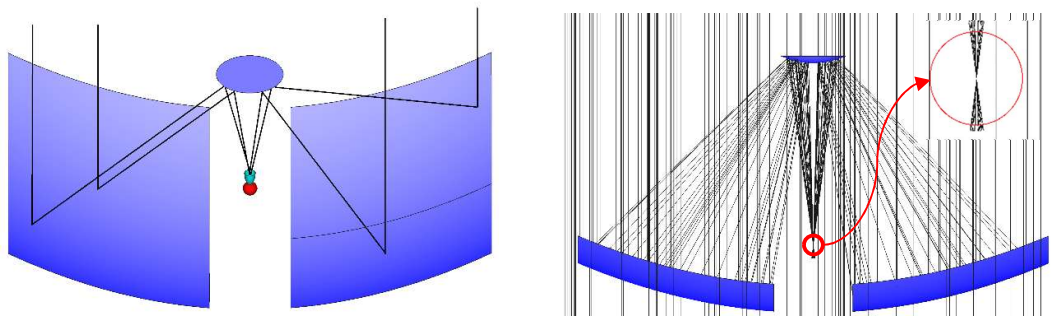


Fig. 2. Izquierda: Concentrador solar tipo Cassegrain. Derecha: Trazado de rayos del concentrador solar en condiciones ideales, no se ha considerado la dispersión especular en los espejos ni el tamaño angular del sol, donde se prescinde del sistema receptor para apreciar el foco puntual.

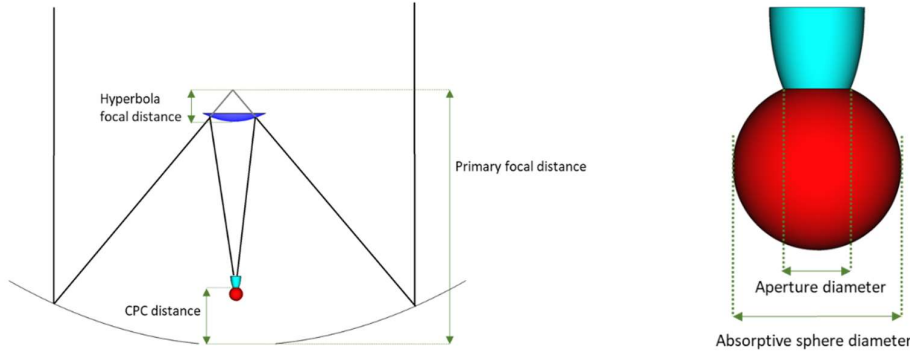


Fig. 3. Esquema donde se muestran los parámetros geométricos ópticos de diseño: la distancia focal del espejo primario (6 metros), la distancia focal de la hipérbola (variable), la distancia del origen a la apertura del receptor (1446.5 mm), la apertura del receptor (variable) y el diámetro de la esfera absorbente (300 mm).

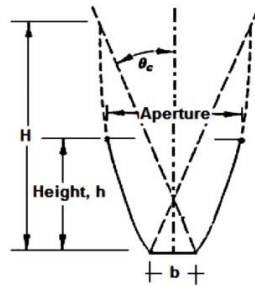


Fig. 4. Esquema de los parámetros de diseño del CPC: la relación  $h/H$  es el factor de truncamiento (variable) y  $\theta_c$  es el ángulo de aceptación (variable). En este caso,  $b$  es el diámetro de apertura que se muestra en la Fig. 3. Para la construcción de la geometría del CPC, se implementaron las expresiones matemáticas que aparecen en [15].

A modo de resumen, a continuación, se detallan los valores de las cotas consideradas fijas y la justificación de los valores considerados:

- Apertura del espejo primario =  $63 \text{ m}^2$ , con la finalidad de alcanzar la potencia nominal de 40 kW.
- Diámetro del espejo secundario = 1400 mm, ya que es la cota máxima disponible para su ubicación.
- Distancia focal del espejo primario = 6000 mm, resultado de un análisis previo estructural.
- Apertura de la esfera absorbente = 300 mm, resultado de un análisis térmico para garantizar la transferencia de calor y no tener demasiadas pérdidas térmicas.
- Posición del CPC = 1446.5 mm, que coincide con el centro de gravedad del sistema de seguimiento.

Una vez fijadas las especificaciones geométricas fijas, es necesario definir los valores del resto de parámetros que definen la geometría. Los rangos de valores que toman los parámetros variables son los siguientes:

- Distancia focal de la hipérbola: de 400 a 800 mm
- Diámetro de apertura del receptor: de 120 a 200 mm
- Ángulo de aceptación de la CPC: de 5 a 35 grados
- Factor de truncamiento de la CPC: de 0.2 a 1

## BALANCE ENERGÉTICO: MODELO ÓPTICO

Las herramientas de trazado de rayos son utilizadas habitualmente para analizar ópticamente los concentradores solares, ya que permiten predecir las eficiencias energéticas en condiciones reales de funcionamiento, así como optimizar geometrías de diseños que todavía se encuentran en fases iniciales. En este trabajo se hecho uso del trazado de rayos OTSun [13], una librería de código abierto en python desarrollado por investigadores de la Universidad de las Islas Baleares. Los modelos ópticos implementados en OTSun se basan en las ecuaciones de óptica electromagnética de Fresnel en su forma más general, y puede ser aplicado tanto a sistemas térmicos como fotovoltaicos. Los objetos geométricos para diseñar el concentrador solar se crean con el programa FreeCAD [14], de acceso gratuito y de código abierto, que permite la construcción de geometrías arbitrarias en CAD. Estas, y otras capacidades del software, hacen que OTSun sea extremadamente flexible y preciso para el análisis óptico de

dispositivos solares de geometría arbitraria. Adicionalmente, cabe destacar la existencia de la herramienta web OTSunWebApp, disponible públicamente en <http://otsun.uib.es>, que ha sido desarrollada para permitir realizar experimentos sin tener que instalar el código fuente. Se pueden encontrar algunos tutoriales de esta herramienta en el siguiente enlace: <https://github.com/bielcardona/OTSun/tree/master/OTSunWebApp>.

Las simulaciones se han llevado a cabo considerando el error especular para la reflectancia de los espejos. Para ello, OTSun considera el error especular mediante la función densidad de probabilidad de la desviación entre un vector normal a la superficie y el vector normal ideal  $\theta_\sigma$ . Esta función viene dada por la Ec. (1) [16]:

$$f(\theta_\sigma) = \frac{\theta_\sigma}{\sigma^2} e^{-\frac{\theta_\sigma^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

En este trabajo consideramos  $\sigma = 2$  mrad por ser un valor típico que se encuentra en la bibliografía en el caso de espejos solares tanto de primera como de segunda superficie [17]. En las simulaciones también se ha considerado el tamaño angular del sol con el modelo de Buie [18] con una relación circunsolar CSR = 0.05. Los valores CSR < 0.05 dominan en el rango de 400-1200 W/m<sup>2</sup> para la irradiancia normal directa (DNI) [19].

En cuanto a las propiedades ópticas de los materiales que forman el concentrador, a continuación se detallan los valores considerados y su justificación:

- Reflectancia del reflector primario = 95,6%, valor para un espejo de segunda superficie de 1 mm [17].
- Reflectancia del reflector secundario = 95,6%, valor para un espejo de segunda superficie de 1 mm [17].
- Reflectancia del reflector CPC = 89,0%, valor para un espejo de primera superficie de aluminio [17].
- Absortancia del material receptor = 96%, valor para un absorbedor selectivo multicapa [20].

Mediante simulaciones ópticas con OTSun se determina la eficiencia óptica de cada uno de los diseños en función de los cuatro parámetros variables mencionados, esto es  $\eta_{opt}$ . El balance de la potencia capturada por el receptor vendrá dado por la Ec. (2)

$$\dot{Q} = G_{DNI} S_{net} \eta_{opt} - S_r \varepsilon \sigma T^4, \quad (2)$$

donde  $G_{DNI}$  es la irradiancia directa normal (1000 W/m<sup>2</sup>),  $S_{net}$  es el área de apertura neta del concentrador (63 m<sup>2</sup>),  $\eta_{opt}$  es la eficiencia óptica (determinada mediante OTSun),  $S_r = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$  es la superficie a través de la cual se producen pérdidas por radiación (que depende del llamado "diámetro de apertura del receptor"  $D$ ),  $\varepsilon$  es la emisividad del material absorbedor (que será igual a la absorptividad del material del receptor 0.96 haciendo uso la ley de Kirchhoff de la radiación térmica y asumiendo que se trata de un material que trabaja a muy alta temperatura),  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann y  $T$  es la temperatura de trabajo (1676 K).

## RESULTADOS

Previamente a los resultados que aquí se exponen, se ha realizado la simulación de 1800 casos diferentes con la finalidad de identificar los valores que toman los cuatro parámetros variables en los diseños más óptimos. Debido a la extensión del trabajo, tan sólo se mostrarán los resultados finales en el último proceso de optimización, que consta de los siguientes rangos de valores que toman los parámetros geométricos variables:

- Distancia focal de la hipérbola: de 450 a 750 mm; paso = 50 mm
- Diámetro de apertura: de 140 a 200 mm; paso = 5 mm
- Ángulo de aceptación del CPC: de 10 a 16 grados; paso = 1 grado
- Factor de truncamiento del CPC: de 0.4 a 1; paso = 0.1

Para determinar la eficiencia óptica con una precisión de  $\pm 1\%$ , mediante OTSun se emitieron 50000 rayos en las simulaciones ópticas. Se simularon un total de 3853 casos (según rangos mostrados) que precisó más de 80 horas de computación. Los resultados de las simulaciones ópticas se muestran en la Fig. 5, donde aparecen los valores de la eficiencia óptica de todos los casos simulados en función de cada uno de los parámetros variables de diseño. Se puede observar que la eficiencia óptica máxima se sitúa en torno al 78.4%, y se alcanza con el siguiente caso:

- Distancia focal de la hipérbola = 600 mm
- Diámetro de apertura = 200 mm
- Ángulo de aceptación del CPC = 12 grados
- Factor de truncamiento del CPC = 0.7

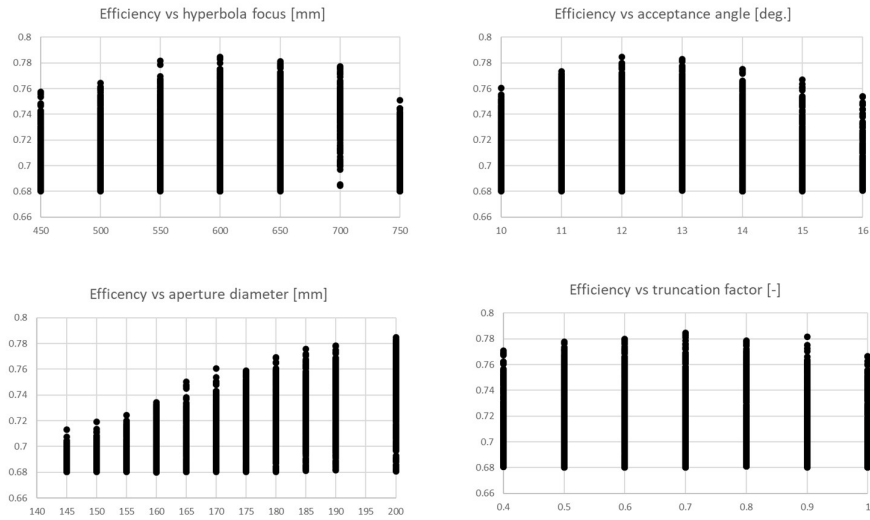


Fig. 5. Eficiencia óptica en función de parámetros geométricos variables.

De los resultados de la Fig. 5 se puede apreciar que, para los parámetros de la distancia focal de la hipérbola, el ángulo de aceptación del CPC y el factor de truncación, se alcanza un máximo local de la eficiencia óptica. Lo que permite señalar que los rangos de valores escogidos para cada uno de los parámetros de diseño contemplan aquellos valores donde la eficiencia es máxima. En cuanto al parámetro de la apertura del receptor, no se observa un máximo local. Esto se debe a que cuanto más grande es este valor, mayor energía se captura por el sistema receptor. Sin embargo, este hecho se torna relevante sólo si se determina el balance térmico tal como se ha expuesto en la Ec. (2), ya que las pérdidas por radiación serán proporcionales al diámetro a la segunda potencia. En la Fig. 6 se muestra la potencia capturada según la Ec. (2) en función del diámetro del receptor, donde ahora sí se observa un máximo local, y por consiguiente se considera que el rango de valores considerado sí ha sido el adecuado.

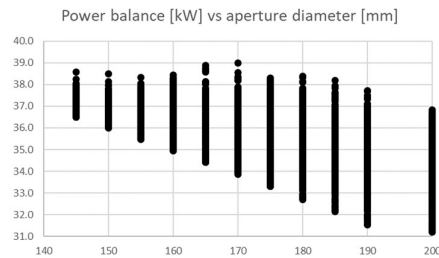


Fig. 6. Balance de potencia neta en función del diámetro de apertura del receptor.

De los resultados obtenidos se pudo apreciar que el caso más eficiente desde el punto de vista óptico (mostrado anteriormente) es capaz de alcanzar una potencia térmica de 36.8 kW, un 8% inferior que el valor de 40 kW indicado como objetivo en el inicio del proyecto. En cambio, el caso de la Fig. 6 que alcanza una potencia máxima es de 39.0 kW, que es un 2.5% inferior al objetivo de 40 kW. A continuación, en la Tabla 1 se muestran los casos correspondientes a una potencia térmica igual o superior a 38,5 kW.

Tabla 1. Valores que toman los parámetros de diseño variables en los casos de mayor potencia capturada.

Foco hipérbola [mm]	Diámetro de apertura [mm]	Ángulo de aceptación [deg.]	Factor de truncamiento	Eficiencia óptica	Potencia [kW]
650	170	12	0.6	0.76	39.0
650	165	12	0.6	0.75	38.9
650	165	12	0.5	0.75	38.7
650	165	12	0.7	0.75	38.7
650	145	10	0.6	0.71	38.6
650	165	11	0.5	0.75	38.6
650	170	12	0.7	0.75	38.6
650	150	11	0.7	0.72	38.5

Una vez determinado el caso de mayor potencia, se procedió a analizar mediante trazado de rayos posibles mejoras para poder alcanzar el objetivo de 40 kW. Analizando la Fig. 7, se pudo observar que los rayos que proceden de las esquinas del espejo primario no alcanzaban el espejo secundario. Una mejora consistiría en disponer de un espejo de sección rectangular para el espejo secundario con la finalidad de interceptar los rayos que escapan considerando sección circular. Otra mejora consistiría en replantear el sistema de seguimiento con la finalidad de cubrir más superficie reflectora ubicada en la separación de los dos espejos que forman el reflector primario, ver Fig. 1. Ello precisaría de un replanteamiento del diseño estructural original.

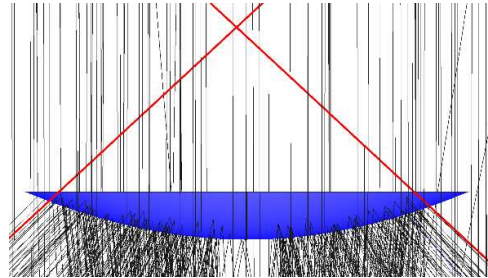


Figura 7. Trazado de rayos del modelo más eficiente de la Tabla 1 en la zona del reflector secundario.

Para finalizar, con el objetivo de cuantificar la energía que podría capturar el sistema más eficiente de la Tabla 1 en función de las condiciones climáticas según su ubicación, en la Tabla 2 se muestra la energía capturada en MJ para las ubicaciones de Sevilla, Lisboa, Brasilia y Santiago (Chile). Para ello se ha considerado que el concentrador solar trabaja a 1400 °C durante las horas de sol anuales.

Tabla 2. Valores de la radiación directa y la energía anual capturada según la ciudad de ubicación. Los valores de la radiación se han tomado de la base de datos nacional de EEUU <https://nsrdb.nrel.gov/>.

Ciudad	DNI [kWh/día]	Energía Anual [MJ]
Sevilla (España)	5.93	220465
Lisboa (Portugal)	5.12	169505
Brasilia (Brasil)	5.88	217319
Santiago (Chile)	7.6	325532

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.

Se ha optimizado, mediante modelo paramétrico, un concentrador solar de tipo Cassegrain para altas temperaturas utilizando técnicas de trazado de rayos. Los resultados han permitido identificar los diseños más eficientes, llegando a una eficiencia óptica de 78,4%. El mejor diseño simulado presenta una potencia térmica nominal de 39 kW. La cantidad total de energía captada en un año por el sistema ubicado en Santiago de Chile (con radiación solar directa de 7.6 kWh/día) sería de 325532 MJ. Se han identificado posibles mejoras a realizar para futuras optimizaciones.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en el marco de un contrato de colaboración entre la Universitat de les Illes Balears y la empresa MG.

## REFERENCIAS

1. M. Z. Malik, P. H. Shaikh, S. Zhang, A. A. Lashari, Z. H. Leghari, M. H. Baloch, Z. A. Memon, and C. Caiming, "A review on design parameters and specifications of parabolic solar dish Stirling systems and their applications," *Energy Reports* **8**, 4128–4154 (2022).
2. Y. Zhang, H. Xiao, C. Zou, Q. Falcoz, and P. Neveu, "Combined optics and heat transfer numerical model of a solar conical receiver with built-in helical pipe," *Energy* **193**, 116775 (2020).
3. G. Gavagnin, D. Sánchez, G. S. Martínez, J. M. Rodríguez, and A. Muñoz, "Cost analysis of solar thermal power generators based on parabolic dish and micro gas turbine: Manufacturing, transportation and installation," *Appl. Energy* **194**, 108–122 (2017).

4. W. Ding and T. Bauer, "Progress in Research and Development of Molten Chloride Salt Technology for Next Generation Concentrated Solar Power Plants," *Engineering* **7**(3), 334–347 (2021).
5. C. Prieto, R. Osuna, A. I. Fernández, and L. F. Cabeza, "Molten salt facilities, lessons learnt at pilot plant scale to guarantee commercial plants; heat losses evaluation and correction," *Renew. Energy* **94**, 175–185 (2016).
6. S. Yang, J. Wang, P. D. Lund, C. Jiang, and X. Li, "Modelling and performance evaluation of an integrated receiver-storage for concentrating solar power beam-down system under heterogeneous radiative conditions," *Sol. Energy* **188**, 1264–1273 (2019).
7. T. Kodama, N. Gokon, K. Matsubara, K. Yoshida, S. Koikari, Y. Nagase, and K. Nakamura, "Flux measurement of a new beam-down solar concentrating system in Miyazaki for demonstration of thermochemical water splitting reactors," in *Energy Procedia* (Elsevier Ltd, 2014), **49**, pp. 1990–1998.
8. J. Sment, M. Magaldi, U. d'Agostino, F. Bassetti, K. Repole, L. Gonzalez-Portillo, N. Schroeder, K. Albrecht, and C. Ho, *Design and Technoeconomic Analysis of High-Temperature Particle Conveyance Components for a 100 MWe Concentrating Solar Power Plant*. (2022).
9. "Concentrated solar power (CSP) system. Magaldi. | Magaldi Group," <https://www.magaldi.com/en/products-solutions/csp-concentrating-solar-power>.
10. O. J. Nydal, "Ray tracing for optimization of a double reflector system for direct illumination of a heat storage," in *Energy Procedia* (Elsevier Ltd, 2014), **57**, pp. 2211–2220.
11. X. long Meng, X. lin Xia, C. Sun, Y. Li, and X. lei Li, "A novel free-form Cassegrain concentrator for PV/T combining utilization," *Sol. Energy* **135**, 864–873 (2016).
12. F. Dähler, M. Wild, R. Schäppi, P. Haueter, T. Cooper, P. Good, C. Larrea, M. Schmitz, P. Furler, and A. Steinfeld, "Optical design and experimental characterization of a solar concentrating dish system for fuel production via thermochemical redox cycles," *Sol. Energy* **170**, 568–575 (2018).
13. G. Cardona and R. Pujol-Nadal, "OTSun, a python package for the optical analysis of solar-thermal collectors and photovoltaic cells with arbitrary geometry," *PLoS One* **15**(10 October), (2020).
14. "FreeCAD: An open-source parametric 3D CAD modeler," <http://www.freecadweb.org>.
15. R. Winston, J. C. Miñano, P. Benitez, N. Shatz, and J. C. Bortz, *Nonimaging Optics* (Elsevier Inc., 2005).
16. G. Johnston, "On the analysis of surface error distributions on concentrated solar collectors," *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME* **117**(4), 294–296 (1995).
17. F. Sutter, S. Meyen, A. Fernández-García, and P. Heller, "Spectral characterization of specular reflectance of solar mirrors," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **145**, 248–254 (2016).
18. D. Buie, C. J. Dey, and S. Bosi, "The effective size of the solar cone for solar concentrating systems.," *Sol. Energy* **74**(5), 417–427 (2003).
19. A. Neumann, S. A. Jones, G. Schmitt, and A. Witzke, "Representative Terrestrial Solar Brightness Profiles," *J. Sol. Energy Eng.* **124**(2), 198–204 (2002).
20. P. Bermel, J. Lee, J. D. Joannopoulos, I. Celanovic, and M. Soljačić, "SELECTIVE SOLAR ABSORBERS," *Annu. Rev. Heat Transf.* **15**, (2012).