

CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE UN REFLECTOR FRESNEL LINEAL MEDIANTE LA APLICACIÓN OTSunWebApp

Gómez D.*, Cardona G.**, Pujol-Nadal R.***

* Estudiante del Grado de Ingeniería Electrónica y Automática, Universitat de les Illes Balears, Ctra. Valldemossa, km. 7.5, Palma, 07122, España, d.gomezsos@hotmail.com

**Departament de Matemàtiques i Informàtica, Universitat de les Illes Balears, Ctra. Valldemossa, km. 7.5, Palma, 07122, España, gabriel.cardona@uib.es

***Departament d'Enginyeria i Construcció, Universitat de les Illes Balears, Ctra. Valldemossa, km. 7.5, Palma, 07122, España, ramon.pujol@uib.es

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2072>

RESUMEN

En este artículo se presenta el diseño de un reflector lineal Fresnel (LFR) y su caracterización mediante el software libre OTSun, un programa de trazado de rayos basado en el método de Monte Carlo que permite obtener la eficiencia óptica de captadores solares. OTSun utiliza la librería de código abierto FreeCAD para generar la geometría del captador solar. A su vez, OTSun viene acompañado de la aplicación OTSunWebApp, con la cual el usuario puede hacer uso de algunas de las prestaciones más relevantes de OTSun sin la necesidad de instalar el código fuente de manera local. En cuanto al diseño del LFR, se compone de una serie de elementos que a partir de ciertos parámetros de entrada quedan definidos. Así pues, el objetivo de este artículo es diseñar la geometría de un concentrador solar con partes móviles en FreeCAD para ser simulado con OTSunWebApp. El LFR diseñado también ha sido simulado con Tonatiuh para comparar ambos resultados, y validar así los algoritmos implementados en OTSun. El artículo expone de manera precisa cómo realizar una simulación del LFR con la aplicación de libre acceso OTSunWebApp.

PALABRAS CLAVE: Captador Solar Térmico, Reflector Lineal Fresnel, Trazado de Rayos

ABSTRACT

In this paper, a design of the geometry of a Linear Fresnel Reflector (LFR), and its characterization, is discussed using the free software OTSun, a ray tracing program based on the Monte Carlo approach which allows to obtain the optical efficiency of a solar collector. OTSun enables the importation of geometries created from the open source software FreeCAD. In addition, OTSun is accompanied by an online web-App, the OTSunWebApp, in which the user can use some of the most significant OTSun features without the need to install anything locally. As for the design of the LFR shown here, it is composed of a set of elements such that, from certain input parameters, they are defined. Thus, the aim of this paper is to design the geometry of a solar concentrator with moving parts in FreeCAD in order to be simulated in OTSun. The LFR design has been also simulated with Tonatiuh software in order to compare both results, and thus to validate the algorithm implemented in OTSun. The paper presents a step-by-step description on how to carry out a simulation of the LFR with the freely available OTSunWebApp.

KEYWORDS: Solar Thermal Collector, Linear Fresnel Reflector, Ray-Tracing

INTRODUCCIÓN

Tanto por la estabilidad en la generación de la demanda energética, como por el agotamiento progresivo de los combustibles fósiles, es inevitable que las energías renovables estén ganando de cada vez más terreno en el sector eléctrico. Una de las tecnologías que está teniendo más importancia de cada vez más es la energía solar por concentración (*Concentrating Solar Power*, CSP), por las prestaciones que presenta en cuanto a estabilidad y almacenaje. Las tecnologías CSP concentran la luz del sol en un receptor con la finalidad de transferir energía a un fluido, que después puede ser transformada en electricidad. De esta manera se puede generar vapor que alimenta una turbina y generar electricidad. Entre las tecnologías de concentración solar más habituales nos encontramos con: el Concentrador Cilindro Parabólico, el Reflector Lineal Fresnel (LFR) y la Torre Central de Heliostatos.

Para simular el comportamiento óptico de un concentrador solar suelen utilizarse programas de trazado de rayos. Estos programas, haciendo uso de la óptica geométrica, generan rayos de manera aleatoria que interceptan con el captador solar, para así poder obtener la eficiencia del sistema. Los programas de trazado de rayos se basan, habitualmente, en métodos de Monte Carlo, donde se aplican las ecuaciones de óptica geométrica para determinar la interacción de la luz con el sistema. Existen varios softwares de trazado de rayos, algunos de ellos de código abierto (como OTSun y Tonatiuh), y otros licenciados comercialmente. Los autores de este artículo son desarrolladores del software OTSun (Cardona and Pujol-Nadal, 2017). OTSun utiliza la librería FreeCAD (Riegel et al., 2020), también de código abierto, para generar la geometría del captador. FreeCAD es un modelador 3D paramétrico desarrollado principalmente para diseñar objetos de la vida real de cualquier tamaño.

Durante el proyecto marco de OTSun se ha desarrollado también la aplicación web OTSunWebApp (Cardona G. and Pujol-Nadal R., 2018) que permite ejecutar algunas de las prestaciones de OTSun sin la necesidad de tener que instalar la librería de manera local. Se destacan aquí las siguientes prestaciones que ofrece la aplicación OTSunWebApp: obtención de la eficiencia óptica espectral, eficiencia óptica ponderada según el espectro solar, y una visualización del camino óptico de los rayos simulados en la escena. En la librería OTSun se han implementado gran diversidad de materiales para poder crear un sistema afín a la realidad, permitiendo considerar fenómenos tales como: longitud de onda de la luz, polarización de la luz, ángulo de incidencia, fenómenos de interferencia, atenuación de la luz en medios homogéneos (ley de Beer-Lambert), tamaño angular del sol según el modelo de Buie (Buie et al., 2003), movimiento de objetos para el seguimiento solar, dispersión en los espejos (mediante probabilidad bi-gaussiana), implementación de materiales reflectantes metálicos, refractivos (índice de refracción complejo), semiconductores (para aplicaciones PV) y selectivos (absorbedores térmicos), dispersión total difusa (materiales lambertianos), ... Para poder tener en cuenta todos estos fenómenos ha sido necesario implementar las ecuaciones de óptica de EM Fresnel en su sentido más amplio (sin aproximaciones), e implementar (de manera externa) el Método de la Matriz Transferencia (TMM) para poder considerar fenómenos de interferencia en películas delgadas (*thinfilms*) y materiales selectivos.

El paquete de la librería OTSun se encuentra en continuo desarrollo, y recientemente se han implementado los métodos para considerar partes móviles con la finalidad de realizar un seguimiento solar, a saber: movimiento de espejos con la finalidad de focalizar la radiación solar en un *Target* (ya sea lineal o puntual) y movimientos de partes móviles con la finalidad de rastrear el sol. Ambos tipos de movimientos permiten rotaciones tanto axiales como puntuales, en función de la aplicación que se desee (i.e. concentradores axiales / campo de heliostatos). Por otra parte, y tomando como referencia otro software de código abierto para su comparación, cabe mencionar el software Tonatiuh. Tonatiuh también ha sido diseñado para el análisis del comportamiento óptico y la distribución de energía de la radiación de sistemas CSP. En cuanto a la óptica de los materiales, Tonatiuh considera materiales refractivos, definidos por su transmitancia e índice de refracción (ambos parámetros constantes), la dispersión especular (mediante probabilidad gaussiana, ...), y materiales especulares (con reflectancia constante). Cabe señalar que las ecuaciones ópticas electromagnéticas de Fresnel no están implementadas en Tonatiuh, a diferencia de OTSun donde sí han sido implementadas rigurosamente en su forma más general.

Por todo lo expuesto, y con la finalidad de demostrar las prestaciones que presenta OTSun, en el presente documento se propone caracterizar un captador solar con partes móviles, de tipo LFR, mediante la aplicación web OTSunWebApp. A su vez, y mediante la comparación de los resultados obtenidos con Tonatiuh, se ha validado la herramienta desarrollada OTSun, y por consiguiente los algoritmos implementados durante el desarrollo del mismo.

DISEÑO DEL CONCENTRADOR SOLAR LFR

En este apartado se describe el diseño en FreeCAD de cada uno de los elementos que componen el LFR, el cual se divide principalmente en los espejos primarios y el receptor. Este apartado consta de dos partes, la primera muestra el diseño de cada una de las partes del LFR, y la segunda una justificación del diseño adoptado.

Espejos primarios

El LFR está formado por once espejos parabólicos de 0,5 m de ancho y 32 m de largo, con una separación de 0,2 m entre sí. Queda por tanto definida la posición del eje de rotación (longitudinal) de cada uno de ellos, que por conveniencia van posicionados según el eje X tomando valores x_i siendo i el indicador de cada uno de los espejos ($i = -5, -4, \dots, 0, \dots, 5$). Los pasos a seguir para crear cada uno de los espejos en FreeCAD consiste, en primer lugar, en generar la curva parabólica correspondiente centrada en x_i y truncadas 0,5 m. En cuanto a la distancia focal de cada espejo primario, F_i , corresponde a la distancia entre el punto focal del receptor (denominado *Target*) y la posición central de cada uno de los espejos x_i , ver Ec. (1). Seguidamente, y con la finalidad de mostrar la orientación que deben adoptar los espejos en incidencia normal, cada uno de los espejos se rota un ángulo θ_i definido por la Ec. (2), de tal manera que se reflejen los rayos al punto focal (*Target*). Por último, se realiza una extrusión de 32 m a cada una de las parábolas. El resultado final puede verse en la Fig. 1.

$$F_i = \sqrt{h^2 + x_i^2} \tag{1}$$

$$\theta_i = -\frac{1}{2} \arctan \left(\frac{x_i}{F} \right) \tag{2}$$

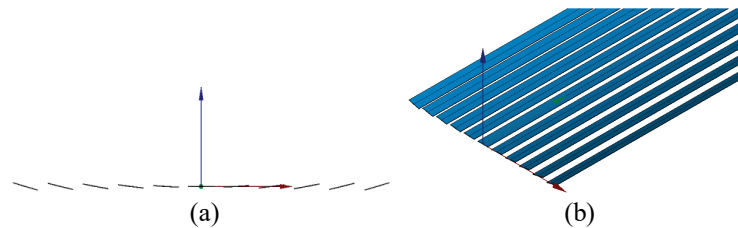


Fig. 1. Vista (a) en alzado y (b) axonométrica de los espejos primarios

Receptor

El receptor está formado por tres elementos: reflector secundario, el absorbedor situado a una distancia h respecto a la apertura y una cubierta de vidrio transparente en la apertura del receptor. Las dimensiones de los dos últimos elementos dependen del reflector secundario, por lo que una vez diseñado este, las dimensiones de los otros dos quedan definidas. El tipo de reflector secundario utilizado es un concentrador parabólico compuesto (CPC) con receptor lineal, ver Fig. 2. Este tipo de concentrador solar concentra los rayos incidentes pertenecientes a un rango definido por el ángulo de aceptación θ_c . Está formado por dos parábolas, cada una de ellas con una distancia focal en el extremo más bajo de la parábola opuesta. Todos los rayos con ángulo de incidencia menor o igual a θ_c son reflejados en el receptor (idealmente). En cuanto a la formulación matemática, se ha tomado como referencia el libro (Winston et al., 2005). La Ecuación (3) muestra la relación entre la apertura ($2a$) y el tamaño del receptor ($2a'$). También se pueden definir otras relaciones en función del ángulo de aceptación, como son la distancia focal de ambas parábolas y la altura del CPC, ver Ecs. (4) y (5) respectivamente.

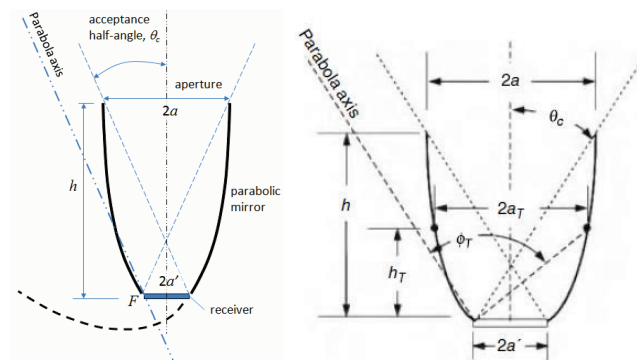


Fig. 2. Vista transversal de un CPC.

$$2a' = 2a \cdot \sin(\theta_c) \tag{3}$$

$$f = a'(1 + \sin(\theta_c)) \tag{4}$$

$$h_{CPC} = \frac{f \cdot \cos(\theta_c)}{\sin^2(\theta_c)} \quad (5)$$

La altura del CPC, h_{CPC} , tiene un papel crucial en el comportamiento óptico del CPC. En este sentido, el CPC puede ser truncado de una altura h_{CPC} a una $h_{T,CPC}$ definida. Así, la nueva apertura del concentrador es a_T . Las Ecuaciones (6) y (7) relacionan los parámetros $h_{T,CPC}$ y a_T con el ángulo de aceptación θ_c .

$$h_{T,CPC} = \frac{f \cdot \cos(\phi_T - \theta_c)}{\sin^2(\phi_T/2)} \quad (6)$$

$$a_T = \frac{f \cdot \sin(\phi_T - \theta_c)}{\sin^2(\phi_T/2)} - a' \quad (7)$$

El ángulo de truncamiento ϕ_T , ver Fig. 2, corresponde al ángulo entre el eje de una de las parábolas y la recta que une el extremo inferior de la parábola contraria con el extremo superior de la parábola de la cual se ha considerado el eje. Nótese que cuando el CPC no está truncado $\phi_T = 2\theta_c$. Con todo lo expuesto, se puede apreciar cómo el CPC depende de tres parámetros: a' , θ_c y ϕ_T . Una vez fijados estos tres parámetros el CPC (truncado o no) queda definido. Tal como se ha expuesto anteriormente, para definir parábolas en FreeCAD es preciso definir el foco de la parábola sobre el eje X y su truncamiento en el eje Y . Por consiguiente, el objetivo, en primer lugar, es encontrar una ecuación que relacione estas distancias de truncamiento de las parábolas en función de los parámetros del CPC. La Figura 3 muestra el esquema de una parábola de un CPC con todos sus parámetros donde las letras m y n son los valores de truncamiento necesarios para crear la parábola en FreeCAD. Trigonómicamente se pueden obtener estos valores en función de a' , θ_c y ϕ_T , ver las Ecs. (8) y (9). El resultado de crear dos parábolas tomando como ejemplo $a' = 0,035$ y $\theta_c = 30^\circ$ aparece en la Fig. 4a, Seguidamente se deben trasladar horizontalmente y verticalmente para su adecuada posición (Fig. 4b). Los vectores de traslación también se pueden deducir trigonómicamente a partir de la Fig. 3. Finalmente, se hace una extrusión a cada una de las parábolas una distancia de 32 m (Fig. 4c).

$$m = \frac{a' + a_T}{\sin(\phi_T - \theta_c)} \cdot \sin(\phi_T) \quad (8)$$

$$n = 2a' \cdot \cos(\theta_c) \quad (9)$$

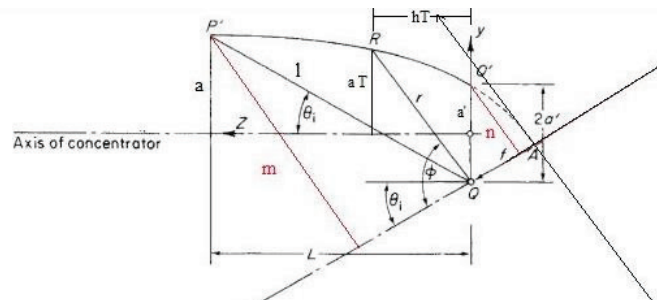


Fig. 3. Esquema de una parábola de un CPC.

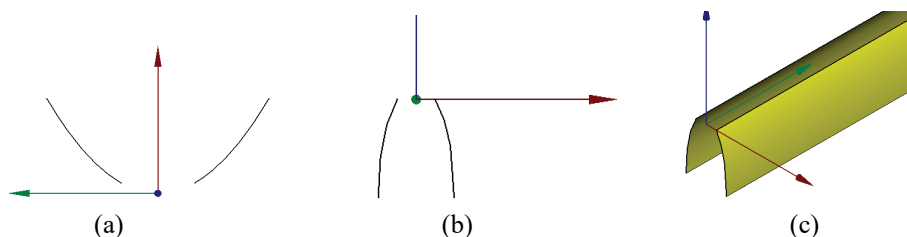


Fig. 4. Parábolas creadas en FreeCAD: (a) posición original, (b) posición y orientación adecuadas y (c) extruidas

Diseño adoptado

Una vez definida la geometría de un CPC de manera genérica, el objetivo es modificar el CPC variando sus parámetros para conseguir una eficiencia aproximadamente del 70% en condiciones realistas (Hack et al., 2017). Para ello se ha hecho uso de OTSUnWebApp, en concreto la utilidad *Plot of Rays*, para visualizar cómo evolucionan los

rayos interceptando con el CPC cuando son reflejados por los espejos primarios. Se ha hecho uso también de la utilidad *Total Analysis* para determinar la eficiencia óptica de cada uno de los casos analizados. Para más información sobre cómo realizar simulaciones en OTSunWebApp y hacer uso de las prestaciones, se recomienda realizar los tutoriales ubicados en <https://github.com/bielcardona/OTSun/tree/master/OTSunWebApp>.

Los parámetros variables que definen el LFR, y por consiguiente, afectan a la eficiencia óptica, son: h , a' , θ_c , ϕ_T y posición del foco F de los espejos primarios (*Target*). Se ha decidido fijar el tamaño del receptor a 0,07 m, por lo que $a'=0,035$. Ahora, el procedimiento consiste en ir modificando los diferentes parámetros variables para ver cómo varía la eficiencia global del LFR. En las sucesivas pruebas realizadas se ha tomado un valor de *Circum Solar Ratio* (CSR) igual a 0,05 según el modelo de Buie (Buie et al., 2003). Una vez realizadas las sucesivas simulaciones se aprecia que, por una parte, cuanto más alto se ubica el receptor más rayos llegan al receptor, por lo que se han hecho pruebas con $h=4$, 6 y 8 m de altura. Pese a que con 8 m se consiguen mejores resultados, se ha decidido considerar una altura de 6 m en consonancia con otros diseños LFR comerciales (Kincaid et al., 2019). En la Fig. 5 se muestra una visualización mediante la utilidad *Plot of Rays* de OTSunWebApp, comparando con un mismo CPC a $h=4$ m y $h=6$ m de altura. A modo de ejemplo se ha tomado un valor de $\theta_c = 30^\circ$ para generar el CPC sin truncamiento y el foco de los espejos primarios (*Target*) ubicado en la parte media del receptor.

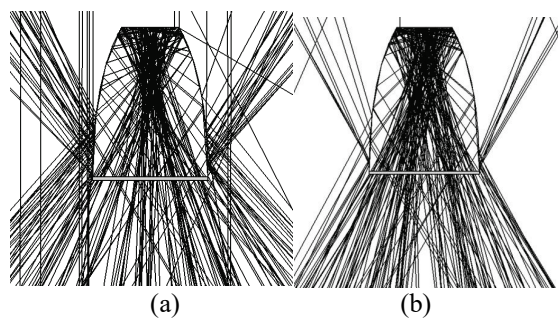


Fig. 5. Rayos entrando en un CPC situado a (a) 4 m y (b) 6 m de altura

La posición del foco de los espejos primarios juega un papel fundamental. Se ha experimentado en colocarlo en tres puntos diferentes sobre la vertical central del CPC (ver Fig. 6d, posiciones A, B y C): en el receptor (Fig. 6a, posición A), en el punto donde interseccionan las líneas con un ángulo de incidencia igual a θ_c (Fig. 6b, posición B) y en la entrada del CPC (Fig. 6c, posición C). Con la altura fijada a 6 m, en la Fig. 6a se aprecia que una mayoría de rayos impactan en la parte externa del CPC, por lo que habría que aumentar el ángulo de aceptación y por consiguiente el CPC dispondría de un bajo nivel de concentración. En la Fig. 6b se observa que la mayoría de rayos son dirigidos hacia el receptor, pero aun así algunos de ellos impactan en la parte exterior del CPC. En la Fig. 6c todos los rayos entran en el CPC, pero como una cantidad considerable de ellos incide con un ángulo mayor a θ_c salen reflejados del CPC. En la posición B, los rayos que se pierden representan un 1% de los rayos totales generados, mientras que en la posición C representan un 6% (en el caso analizado). De esta manera se ha elegido el punto B como el óptimo para ubicar el foco F (*Target*) de los espejos primarios. Sin embargo, aún hay rayos reflejados que no entran en el CPC, por lo que modificando los parámetros θ_c y $h_{T,CPC}$ podría mejorarse el comportamiento óptico del LFR.

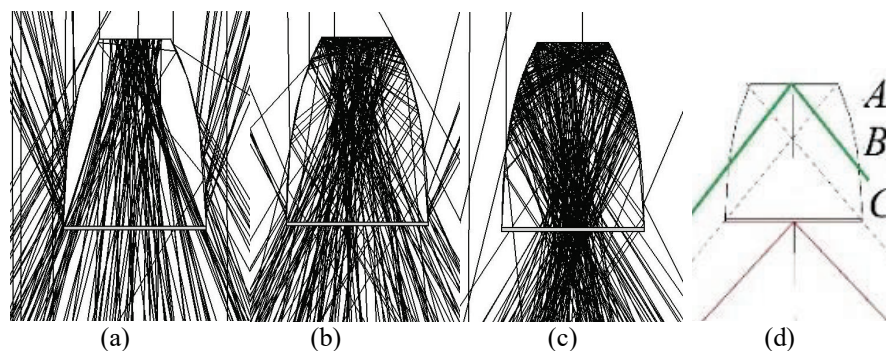


Fig. 6. Rayos entrando en el CPC en los tres puntos de foco propuestos

Para acabar de definir la forma del receptor, se ha observado cómo evoluciona la eficiencia óptica mediante simulaciones *Total Analysis* en OTSunWebApp modificando θ_c y $h_{T,cpc}$ (este último sustituye a ϕ_T por ser más intuitivo, siendo la Ec. (6) la que relaciona ambos). Mediante el método de ensayo y error, los resultados han mostrado que con $\theta_c=37^\circ$ y truncando el CPC a la mitad se consigue una eficiencia aproximadamente de un 73% con una incidencia normal de los rayos. Cabe mencionar que en estas simulaciones se han considerado materiales ópticos realistas (mismos parámetros que aparecen en la Tabla 1 pero considerando además la dispersión angular en los

espejos, tanto primarios como secundarios, con una desviación estándar de 4 y 2 mrad respectivamente). La Fig. 7 muestra el diseño final del CPC adoptado.

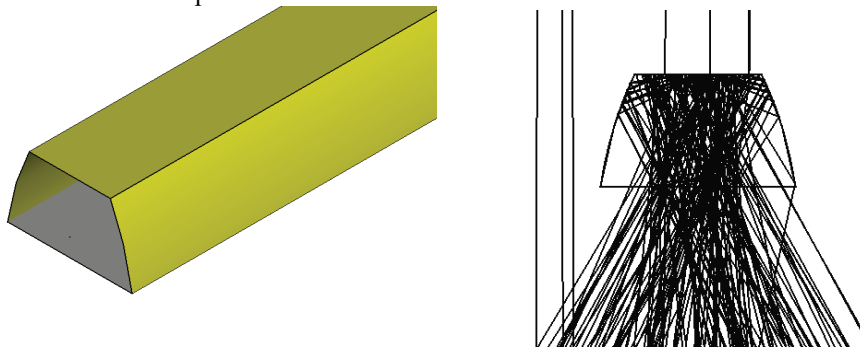


Fig. 7. Diseño final adoptado del CPC

VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA OTSUN

Una vez construida la geometría en FreeCAD del LFR para poder hacer simulaciones con OTSUN, se procede a validar los resultados obtenidos mediante la aplicación OTSUNWebApp. Para ello es necesario disponer de otra herramienta de trazado de rayos y reproducir así el mismo diseño del LFR con los mismos materiales. De esta manera se obtienen dos modelos iguales y se puede comparar la eficiencia óptica de ambos programas. Para dicha validación, se ha recurrido al software de simulación de trazado de rayos Tonatiuh (Blanco et al., 2005). En la Tabla 1 se describen los materiales considerados. Se han obtenido dos curvas de eficiencia con cada uno de los softwares: eficiencia óptica transversal y longitudinal. Los resultados pueden observarse en la Fig. 8, en ambos casos se han simulado 10^5 rayos para cada posición del sol, y se ha considerado el tamaño angular del sol según el modelo de Buie con $CSR=0.05$.

Tabla 1. Materiales utilizados en OTSUNWebApp y Tonatiuh para el LFR

Componente	Etiqueta	Descripción material	Propiedades ópticas
Espejos Primarios	Mir1	Material especular de reflectancia constante	Reflectancia = 0,95 Dispersión = 0 mrad
CPC	Mir2	Material especular de reflectancia constante	Reflectancia = 0,91 Dispersión = 0 mrad
Cubierta	Trans	Material transparente de transmitancia constante	Transmitancia = 0,965
Absorbedor	Abs	Material absorbedor de absortancia constante	Absortancia = 0,95

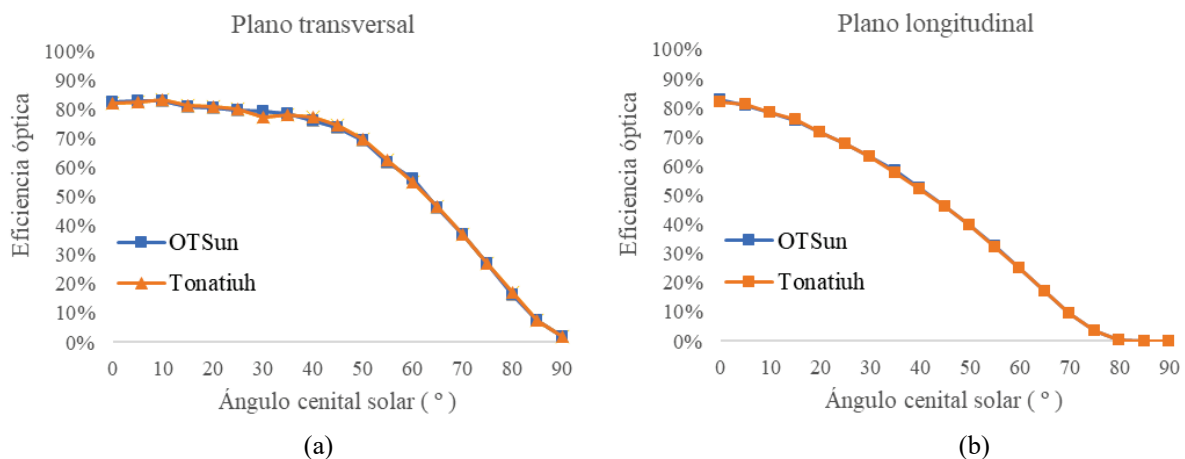


Fig. 8. Análisis (a) transversal y (b) longitudinal de las eficiencias.

Con la finalidad de comparar los resultados de ambos programas, se ha calculado el error medio (ME) y la desviación mediante la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), esto es:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Eficiencia\ OTSUN - Eficiencia\ Tonatiuh}{Eficiencia\ Tonatiuh} \tag{10}$$

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Eficiencia\ OTSun - Eficiencia\ Tonatiuh}{Eficiencia\ Tonatiuh} \right)^2 \quad (11)$$

El ME sirve para discernir si OTSun sobrevalora (o subvalora) la eficiencia óptica respecto a Tonatiuh. En cambio, el RMSE proporciona información sobre desviaciones de los valores obtenidos mediante un software respecto al otro. En la Tabla 2 se muestran los valores del ME y RMSE en los casos analizados. En la curva de la eficiencia óptica longitudinal no se han tenido en cuenta las eficiencias con un cénit igual a 85° y 90° para evitar divergencias, ya que su valor es prácticamente nulo. Se puede observar como el ME sobrepasa apenas el 0,15% sin presentar ninguna tendencia de sobrevaloración por parte de alguno de los dos softwares. Por otro lado, el RMSE presenta un valor inferior al 0,3% en ambos casos. Visto los valores que toman los indicadores del error, se concluye que ambos programas caracterizan ópticamente de manera análoga el LFR diseñado junto con los materiales considerados (Tabla 1). Estos resultados sirven de validación para los métodos implementados en OTSun.

Tabla 2. ME y RMSE del análisis transversal y longitudinal

Tipo de análisis	ME	RMSE
Transversal	-0.1535%	0.2905%
Longitudinal	0.1503%	0.1671%

SIMULACIÓN DEL LFR MEDIANTE OTsunWebApp

En este apartado se describen los pasos necesarios para llevar a cabo una simulación del LFR definido en apartados anteriores mediante OTSunWebApp. En primer lugar se recomienda visualizar la geometría del LFR en FreeCAD accediendo al siguiente fichero: [test_LFR.FCStd](#). En la Fig. 9 se muestran los elementos que forman el LFR. Puede apreciarse el nombre de cada uno de los elementos, donde en paréntesis aparece el nombre del material óptico seguido de (si fuera el caso para objetos móviles): el eje de rotación, la normal del espejo, y el punto focal. Para más detalles ver el Tutorial 4 en <https://github.com/bielcardona/OTSun/tree/master/OTSunWebApp>, donde se especifica paso a paso cómo realizar dicha simulación en OTSunWebApp.

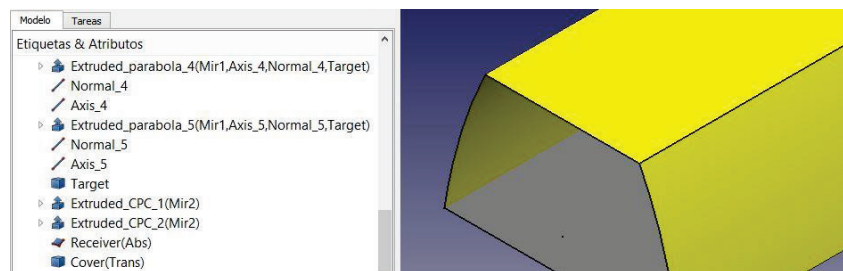


Fig. 9. Visualización de la geometría en FreeCAD

Una vez familiarizado con la geometría, se accede a la aplicación OTSunWebApp en el siguiente link: <http://otsun.uib.es/otsunwebapp/node/start>. El primer paso es introducir un email donde se enviarán los resultados obtenidos. Seguidamente, la aplicación web solicita un archivo FreeCAD, entonces cabe seleccionar el archivo [test_LFR.FCStd](#). En la siguiente pantalla (Fig. 10a) debe cargarse una carpeta .zip con cada uno de los materiales ópticos que componen el LFR. Para ello, en primer lugar, se deben crear los materiales mediante el link que se proporciona, redirigiendo al usuario a la página *Creator of Materials* (Fig 10b). En esta página se introduce el nombre que aparece en primer lugar dentro del paréntesis en los objetos del archivo [test_LFR.FCStd](#), y seguidamente se elige el tipo de material: superficie o volumen. Seguidamente, se selecciona la clase de material pertinente junto a los parámetros que lo definen. En este ejemplo se tomarán los valores indicados en la Tabla 3 (para más detalles ver tutorial el Tutorial 4 indicado anteriormente). Para cada uno de los materiales se genera un archivo *.otmaterial, los cuales deben ser guardados de forma local en una carpeta .zip para ser subidos posteriormente. Antes de continuar, marcar 'Yes' para especificar que los espejos rastreen el sol, ya que se trata de una geometría con partes móviles. En la siguiente página se selecciona el tipo de experimento para la simulación. En este caso se elige *Total Analysis*, con la finalidad de obtener la eficiencia óptica (según el espectro solar) para diferentes posiciones del sol. Seguidamente se introducen los parámetros de entrada, que para obtener la eficiencia óptica transversal son: posición del sol ($\phi_i = \phi_f = 0^\circ$, $\theta_i = 0^\circ$, $\theta_f = 90^\circ$ y $\Delta\theta = 5^\circ$), número de rayos (100000), apertura del captador (176000000 mm²) y distribución angular del sol según el modelo de Buie ($CSR=0,05$). Entonces la aplicación muestra la evolución de la simulación al refrescar la página. Una vez finalizada la simulación, se recibe un archivo .zip con los resultados obtenidos al email proporcionado anteriormente. Los resultados de este ejemplo pueden verse en la Fig. 8a.

OTSunWebApp

You must upload a zip file with the .otmaterial files of the following materials:

Solids:

Faces:

- Trans
- Mir2
- Abs
- Mir1

You can create these files following this [link](#)

Creator of Materials

Identifier of material to create

Name

Kind of material

Choose one

Fig. 10. (a) Página donde cargar la carpeta con los materiales y (b) página para crear los materiales

Tabla 3. Propiedades de los materiales del LFR a utilizar

Material	Name	Type – subtype of material	Optical properties
Primary Mirror	Mir1	<i>Surface – Reflector Specular layer</i>	R = 0.95
CPC Mirror	Mir2	<i>Surface – Reflector Specular layer</i>	R = 0.91
Transparent material	Trans	<i>Surface – Transparent Simple layer</i>	T = 0.965
Absorber material	Abs	<i>Surface – Absorber simple layer</i>	$\alpha = 0.95$

CONCLUSIONES

OTSun es un software de código abierto para la simulación óptica de captadores solares tanto térmicos como fotovoltaicos. El software hace uso de la librería de acceso libre FreeCAD para generar la geometría del captador solar. OTSun viene acompañado de la herramienta web OTSunWebApp que permite hacer uso de las prestaciones más relevantes de OTSun sin la necesidad de tener que instalar el código fuente de manera local. En el presente documento se ha expuesto el diseño de un LFR con una eficiencia aceptable, y se ha descrito el procedimiento para su construcción en FreeCAD. Posteriormente se han obtenido las curvas de eficiencia óptica en los planos transversal y longitudinal mediante OTSunWebApp y Tonatiuh. Se han validado los algoritmos implementados en OTSun comparando las curvas obtenidas mediante ambos softwares. Finalmente, se ha expuesto de manera concisa, facilitando el archivo FreeCAD del LFR, el procedimiento para realizar dichas simulaciones en OTSunWebApp.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) español, Agencia Estatal de Investigación (AEI) y Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (FEDER) [ENE2015-68339-R].

REFERENCIAS

- Blanco, M.J., Amieva, J.M., Mancilla, A., 2005. The Tonatiuh Software Development Project: An open source approach to the simulation of solar concentrating systems, in: Proceedings of the ASME Computers and Information in Engineering Division. ASME, pp. 157–164. <https://doi.org/10.1115/IMECE2005-81859>
- Buie, D., Dey, C.J., Bosi, S., 2003. The effective size of the solar cone for solar concentrating systems. Sol. Energy 74, 417–427. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00156-7](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00156-7)
- Cardona G. and Pujol-Nadal R., 2018. WebAppOTSun [WWW Document]. URL <http://otsun.uib.es/otsunwebapp> (accessed 10.9.20).
- Cardona, G. and Pujol-Nadal, R., 2017. OTSun [WWW Document]. URL <https://github.com/bielcardona/OTSun> (accessed 10.9.20).
- Hack, M., Zhu, G., Wendelin, T., 2017. Evaluation and comparison of an adaptive method technique for improved performance of linear Fresnel secondary designs. Appl. Energy 208, 1441–1451. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.009>

Kincaid, N., Mungas, G., Kramer, N., Zhu, G., 2019. Sensitivity analysis on optical performance of a novel linear Fresnel concentrating solar power collector. *Sol. Energy* 180, 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.054>

Riegel, J., Mayer, W., van Havre, Y., 2020. FreeCAD.

Winston, R., Miñano, J.C., Benitez, P., Shatz, N., Bortz, J.C., 2005. *Nonimaging Optics*, Nonimaging Optics. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-759751-5.X5000-3>