

COMPARATIVA DE DISTINTOS MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LA INCIDENCIA DE POTENCIA EN CAMPOS SOLARES DE TORRE CENTRAL

ORTEGA RUIZ, Guillermo⁽¹⁾; ROVIRA DE ANTONIO, Antonio José⁽²⁾

MUÑOZ ANTÓN, Javier⁽³⁾

guillermo@didp.uhu.es

⁽¹⁾Universidad de Huelva, Depto. Ingeniería de Diseño y Proyectos, ETS de Ingeniería

⁽²⁾UNED, Depto. Ingeniería Energética, ETS Ingenieros Industriales

⁽³⁾Universidad Politécnica de Madrid, Depto. Ingeniería Energética y Fluidomecánica, ETSII

RESUMEN

El objetivo fundamental del trabajo que se presenta es la propuesta de herramientas i formáticas de simulación y post-proceso de plantas termosolares de torre que, derivando de las técnicas *ray-tracing* aporten, sin merma apreciable de la precisión, una reducción de los tiempos de ejecución, pues se trata de uno de los principales inconvenientes del método.

En primer lugar se exponen las hipótesis de partida de los códigos desarrollados. Se continuará realizando un acercamiento a los errores ópticos involucrados en los problemas de simulación. Posteriormente se exponen los esquemas de operación de los códigos presentados. Finalmente se llevará a cabo un estudio de los tiempos de ejecución y de precisión.

En el presente documento se presentarán dos códigos de simulación de plantas termosolares de torre con receptor de cavidad. Ambos se han desarrollado en lenguaje de programación propio de MATLAB. El primero de los cuales se considera un código ray-tracing convencional (código RT), optimizado para cálculo paralelo y basado en la proyección de un solo rayo incidente encada punto de cálculo elegido sobre la superficie reflectante del heliostato. Sus prestaciones y resultados se emplearán como modelo de referencia.

El segundo código presentado (código RT-HR) considera que en un mismo punto de la superficie reflectante del heliostato se aplican más de un rayo incidente.

Palabras clave: Flujo solar, heliostato, trazado de rayos.

1. Introducción

Una primera clasificación de los códigos de simulación existentes de plantas termosolares, puede realizarse en función de la técnica empleada en la determinación del mapa de flujo radiante sobre la superficie absorbadora del receptor. En este sentido, se pueden distinguir dos métodos diferenciados [1], a saber: los basados en trazado de rayos (ray-tracing) y los basados en convolución.

La técnica de trazado de rayos, como su propio nombre indica, consiste en trazar uno a uno un número elevado de rayos incidentes procedentes del disco solar y generados según un determinado modelo de forma solar, sobre puntos aleatoriamente escogidos sobre la superficie del heliostato objeto de estudio. En base a los principios de la óptica geométrica, así como la consideración de los diversos errores ópticos intervinientes, se determina la dirección de la radiación reflejada en cada caso, obteniéndose finalmente la intersección entre esta y la superficie absorbadora del receptor, dando lugar al denominado *mapa de fotones*. El post-proceso de la nube de puntos de intersección para una determina resolución de rejilla, permitirá la obtención del mapa de flujo radiante sobre la superficie absorbadora del receptor.

El método es más preciso cuantos más rayos se empleen, lo que se traduce en unos mayores tiempos de simulación, siendo esta la principal desventaja del método.

Una descripción exhaustiva del método de trazado de rayos puede hallarse en numerosos textos sobre Óptica, por ejemplo, en [2]. Un resumen útil en el contexto de la energía solar se puede encontrar en [3]. Se trata de un documento de referencia común en la mayor parte de los códigos de ray-tracing existentes, entre los cuales se pueden destacar: MIRVAL [4], SOLTRACE [5], TONATIUH [6], SENSOL [7] o HLFDF [8].

2. Hipótesis de partida

- Se considera que la superficie geométrica del heliostato es ideal y continua, sin que existan huecos entre facetas.
- El centro del heliostato coincide con el punto más alto del pedestal.
- Se considera que el canteo del heliostato es "on-axis".
- Se considera que el grosor del vidrio de las superficies reflectantes es despreciable.
- Se considera que todos los rayos trazados tienen la misma potencia.
- Se considera que los errores ópticos siguen una distribución normal o gaussiana.

3. Consideraciones sobre la aplicación de los errores ópticos

En la simulación del subsistema óptico en centrales termosolares de torre, se pueden distinguir una amplia variedad de errores [9], tales como: los de ondulación y forma, deformaciones permanentes de la estructura de soporte del heliostato, de apuntamiento, deformaciones de origen térmico, errores por falta de especularidad, etc.

Esta amplia variedad de errores pueden clasificarse en dos grandes grupos: macroscópicos y microscópicos. Estos últimos se corresponden con el error por falta de especularidad, mientras que los primeros incluyen a los restantes citados.

Según las hipótesis de partida, la función de densidad de probabilidad (FDP) asociada al error macroscópico será una FDP normal estándar de media cero y varianza dada por:

$$\sigma^2 = \sum \sigma_i^2 \quad (1)$$

Donde los diversos σ_i pueden ir acompañados de algún coeficiente.

La aplicación de los errores macroscópicos se materializa en la práctica por la desviación de la normal en el punto de cálculo con relación a la normal ideal o geométrica, mientras que la de los errores microscópicos suponen una desviación del rayo reflejado resultante con respecto al reflejo especular.

4. Esquema del código ray-tracingconvencional (RT)

Este código considera que en un mismo punto de cálculo elegido sobre la superficie del heliostato se aplica un solo rayo incidente. De este modo, su esquema sería el siguiente:

- 1º) Se procede a determinar la orientación del heliostato.
- 2º) Se determina de forma aleatoria (con distribución uniforme) un punto cualquiera sobre la superficie del heliostato (punto P en la figura 1) y se determina en él la normal ideal o geométrica \mathbf{n}_i .
- 3º) Se genera un rayo incidente \mathbf{I} , el cual obedece al MFS seleccionado. Estando orientado \mathbf{S}_0 hacia el centro del disco solar.
- 4º) Se genera un número aleatorio comprendido entre 0 y 1 con distribución uniforme. Si dicho valor es menor a la reflectividad del heliostato, se continúa con el proceso. En caso contrario, se vuelve al paso 2º).
- 5º) Se determina la dirección del reflejo especular \mathbf{Re}_i a partir de \mathbf{I} operando con la normal ideal o geométrica \mathbf{n}_i .
- 6º) Se determina la dirección del reflejo resultante \mathbf{R} desviado por los errores macroscópico y microscópico (que sigue una ley normal de media cero y varianza dada por 2) a partir del reflejo especular \mathbf{Re} . Según [10] la varianza de la FDP resultante vendrá dada por:

$$\sigma^2 = 4 \cdot \sigma_{macro}^2 + \sigma_{micro}^2 \quad (2)$$

- 7º) Se genera un número aleatorio comprendido entre 0 y 1 con distribución uniforme. Si dicho valor es menor a las pérdidas por atenuación atmosférica se continúa con el proceso. En caso contrario, se vuelve al paso 2º).

Las citadas pérdidas por atenuación atmosférica vienen definidas según [10], como:

$$\eta_{aa} = 0.99321 - 0.0001176 \cdot d + 1.97 \cdot 10^{-8} \cdot d^2 \quad \text{si } d \leq 1000 \text{ m}$$

$$\eta_{aa} = e^{-0.0001106 \cdot d} \quad \text{si } d > 1000 \text{ m} \quad (3)$$

- 8º) Se determina la intersección de \mathbf{R} con la superficie absorbidora del receptor, previa comprobación de que éste pasa por el interior de la apertura.

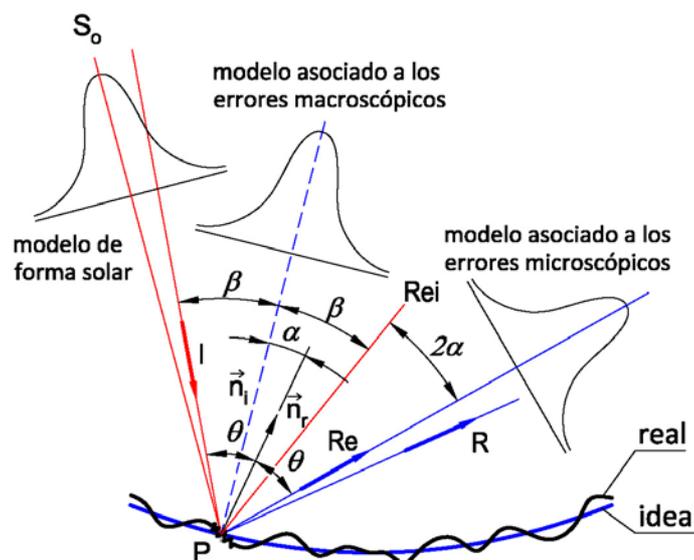


Figura 1. Esquema de la superficie reflectante ideal, normal ideal \mathbf{n}_i , modelo de forma solar y radiación incidente \mathbf{I} .

5. Esquema ray-tracing por el método del haz de rayos(RT-HR)

El código basado en haz de rayos considera que en un mismo punto de cálculo elegido sobre la superficie del heliostato se aplican más de un rayo incidente.

De este modo, se pueden proyectar un mismo número de rayos totales, con un menor número de puntos de cálculo, Nc . Por lo que se simplifica la determinación de puntos de cálculo y normales.

Con objeto de simplificar la determinación de los rayos reflejados resultantes, los rayos incidentes se generan a partir de la FDP obtenida mediante la convolución del MFS, los errores macroscópicos y los microscópicos, la cual se identificará como *MFS efectivo*. De este modo, el esquema del código ray-tracing por el método del haz de rayos sería el siguiente:

- 1º) Se procede a determinar la orientación del heliostato.
- 2º) Se determinan los puntos de cálculo sobre la superficie del heliostato, y en ellos, las normales ideales o geométricas \mathbf{n}_i .
- 3º) Se determinan Nr/Nc rayos incidentes \mathbf{I}_x , los cuales obedecen al MFS efectivo. Estando orientado \mathbf{S}_0 hacia el centro del disco solar.
- 4º) Se genera un número aleatorio comprendido entre 0 y 1 con distribución uniforme, asociado a cada uno de los rayos incidentes. Se aplicará la reflexión especular a aquellos vectores incidentes cuyo número aleatorio sea menor que la reflectividad del heliostato.
- 5º) Se determina la dirección del reflejo resultante \mathbf{R}_x mediante reflexión especular de los \mathbf{I}_x , operando con la normal ideal o geométrica \mathbf{n}_i .
- 6º) Se genera un número aleatorio comprendido entre 0 y 1 con distribución uniforme, asociado a cada uno de los rayos reflejados. Se continúa con aquellos rayos reflejados cuyo número aleatorio asociado sea menor a las pérdidas por atenuación atmosférica, dadas en la expresión (3).
- 7º) Se determina la intersección de los rayos reflejados resultantes del paso anterior con la superficie absorbente del receptor, previa comprobación de que estos pasan por el interior de la apertura.

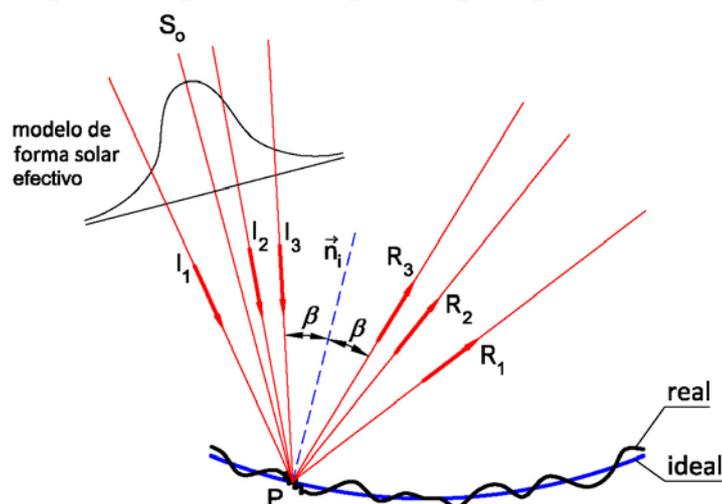


Figura 2. Esquema de la superficie reflectante idea, normal ideal \mathbf{n}_i , modelo de forma solar y radiación incidente \mathbf{I} .

Sin embargo, la potencialidad a destacar en el código basado en haz de rayos, reside en la posibilidad de aplicar relaciones homográficas entre los planos intervinientes en el proceso de cálculo.

En la figura 3, se muestra un punto de cálculo P sobre la superficie de un heliostato orientado y en éste la normal ideal o geométrica \mathbf{n} . El plano (P) representa la superficie absorbente del receptor.

Se consideran aplicados sobre P una serie de vectores de radiación incidente, generados según el MFS efectivo descrito con anterioridad. Sean q_i los puntos de intersección de los vectores citados y un plano arbitrario (Q').

Sea (Q) otro plano arbitrario. La intersección de los reflejos especulares determinados a partir de los incidentes, operando con la normal ideal o geométrica, dará lugar a las series de puntos p_i sobre (P) y q_i sobre (Q).

Se verifica que las nubes de puntos contenidos en los planos (Q) y (P) son homólogas, pues se obtienen al cortar a un mismo haz de rectas concurrentes por dos planos cualesquiera.

Asimismo, son igualmente homólogas las nubes de puntos contenidas en los planos (Q) y (Q'). Pues los rayos reflejados pueden obtenerse mediante un giro tridimensional de los incidentes, de valor 180° , utilizando como eje de giro la normal ideal o geométrica.

Por ley transitiva, se verificará finalmente que resultan homólogas las nubes de puntos contenidas en (Q') y (P).

Por tanto, se puede establecer una correspondencia biunívoca entre los puntos de (Q') que representaría los orígenes de los vectores de radiación incidente y los puntos sobre (P), que representarían los puntos de intersección de la radiación reflejada con una superficie absorbente del receptor.

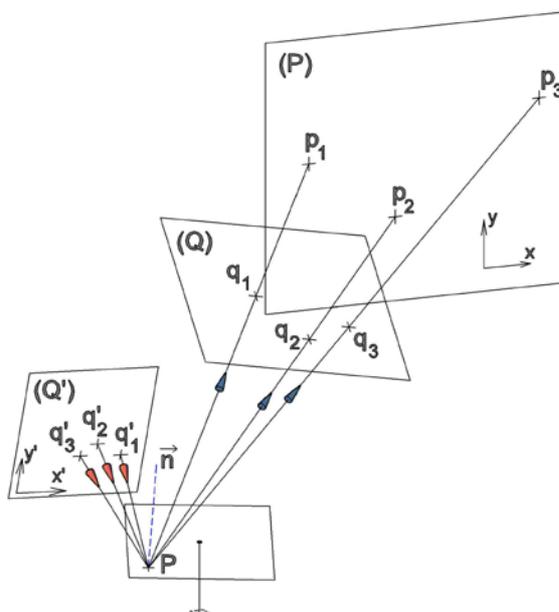


Figura 3. Esquema de malla utilizada en la determinación del mapa de flujo. Unidades en mm.

La expresión matricial que permite relacionar los puntos contenidos en los planos (P) y (Q) es, según las citas [11] o [12] la siguiente:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde (u,v,w) son las coordenadas homogéneas de los puntos contenidos en el plano (Q'). Verificándose que:

$$\begin{aligned} x' &= u / w \\ y' &= v / w \end{aligned} \quad (5)$$

Puesto que la matriz de homología posee ocho incógnitas, se requieren, en la generalidad de los casos, un mínimo de cuatro puntos sobre (Q') y otros tantos (sus homólogos) sobre (P). Además, para que el sistema sea determinado, al menos tres de esos cuatro puntos, no han de ser colineales.

6. Determinación del mapa de flujo

De acuerdo con las hipótesis de partida, la determinación de la magnitud el flujo radiante ϕ (W/m^2), se fundamenta en el recuento de puntos de intersección por cuadrícula de rejilla N , según la expresión:

$$\phi_{i,j} = \frac{N_{i,j} \cdot (Irr \cdot S \cdot \eta_{\cos} \cdot \eta_{\text{syb}})}{\Delta x \cdot \Delta y} \quad (6)$$

Toda vez que los efectos del rendimiento por reflexión y por atenuación atmosférica han sido introducidos de forma no determinista.

El rendimiento por factor coseno se considera constante y se determina en el centro del heliostato según su eje óptico para la dirección principal.

7.1. Estudio de tiempos de ejecución y precisión

En el presente apartado se realizará una comparación sistemática entre los resultados obtenidos por las dos aplicaciones desarrolladas. Para ello se realizarán diversas simulaciones para una posición, tamaño y geometría del heliostato, así como para una altura de torre, geometría de la cavidad, instante del año y factores de rendimiento arbitrarios, aunque iguales en todos los casos.

Para el estudio de errores, se obtendrán previamente los correspondientes mapas de flujo y se compararán con un patrón o modelo obtenido mediante el código RT empleando $50 \cdot 10^6$ rayos trazados.

7.2. Datos comunes de las simulaciones

Se pretende analizar los resultados obtenidos para los siguientes datos de partida:

- La latitud, fecha y hora solar son respectivamente: $37^{\circ}18'51''$, 15/11 y 12:42:00h.
- Heliostato con espejo esférico, canteo "on-axis", de 10 m de ancho y 8 m de alto. Posición según coordenadas: (50,150,5).
- Centro del blanco a cota 60 m s.n.s. y cavidad semi-hexagonal (dimensiones según figura 4).
- Modelo de forma solar polinómico, dado según [13]:

$$\begin{cases} I = 1 - 0.5138 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^4 & \text{si } r \leq R \\ I = 0 & \text{si } r > R \end{cases} \quad (7)$$

Donde I es la intensidad asociada al rayo incidente, que forma un ángulo r (mrad) con respecto a la dirección principal, So . Siendo R es una constante igual a 4.65 mrad.

- Irradiancia = $800 \text{ W}/\text{m}^2$.
- Rendimiento por reflexión, y por sombra y bloqueos: $\eta_{\text{ref}} = 0.8$ y $\eta_{\text{syb}} = 1.0$, respectivamente.
- Errores ópticos macroscópicos y microscópicos iguales a 2y 1 mrad, respectivamente.

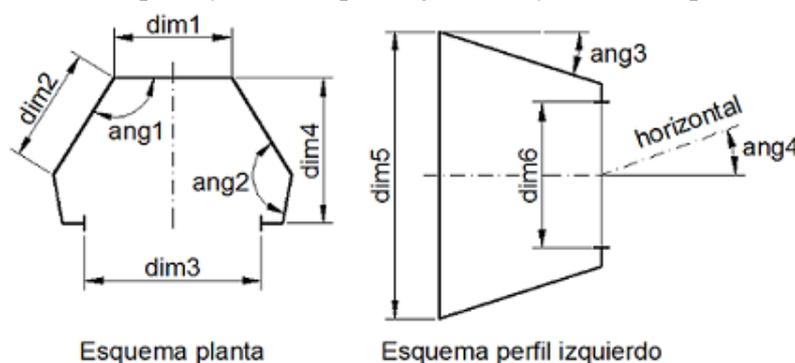


Figura 4. Esquema de malla utilizada en la determinación del mapa de flujo. $\text{dim1}=\text{dim2}=3.2 \text{ m}$, $\text{dim3}=4.8\text{m}$, $\text{dim4}=\text{dim6}=4.0\text{m}$, $\text{dim5}=8.0\text{m}$, $\text{ang1}=120^{\circ}$, $\text{ang2}=140^{\circ}$, $\text{ang3}=\text{ang4}=20^{\circ}$.

7.3. Resultados estudio de tiempos de ejecución

Tabla 10: Tiempos de simulación en segundos RT/ Tiempos de simulación en segundos RT-H.

Nr/Nc	Nc			
	5 ²	10 ²	20 ²	40 ²
1·10 ³	0,447/0,052	1,193/0,116	4,225/0,367	16,073/1,348
2·10 ³	0,668/0,060	2,215/0,160	8,319/0,542	32,044/2,103
4·10 ³	1,193/0,081	4,225/0,239	16,073/0,876	64,034/3,408
8·10 ³	2,215/0,117	8,319/0,401	32,044/1,514	139,353/6,167

7.4. Resultados estudio de errores

Tabla 11: Error cuadrático medio RT/Error cuadrático medio RT-HR.

Nr/Nc	Nc			
	5 ²	10 ²	20 ²	40 ²
1·10 ³	500,8/496,8	242,7/259,4	125,4/128,3	62,3/64,9
2·10 ³	355,6/357,5	178,3/179,3	87,7/88,6	44,8/47,1
4·10 ³	242,7/247,6	125,4/123,3	62,3/62,8	33,8/32,9
8·10 ³	178,3/175,1	87,7/88,6	44,8/45,5	25,0/24,8

8. Conclusiones y consideraciones finales

De acuerdo con la tabla 1, el código ray-tracing basado en haz de rayos presenta unos tiempos de simulación entre 8.5 a 22.6 veces más rápidos que el código ray-tracing convencional. Presentándose las mayores discrepancias cuanto mayor es el número total de rayos trazados.

Por otra parte, según la tabla 2, los valores de error cuadrático medio obtenidos en ambos casos resultan comparables en magnitud, por lo que se concluye que ambos códigos dan lugar a valores de flujo similares, con pequeñas variaciones atribuibles al carácter aleatorio de los rayos incidentes generados según el MFS y la aplicación de los errores ópticos.

El código RT-HR constituye, por tanto, una herramienta de simulación que permite la obtención de mapas de fotones y flujo, con precisión similar a la de una herramienta ray-tracing convencional, pero con unos tiempos notablemente inferiores.

Esta característica supondría un acercamiento a las posibilidades de simulación/optimización del subsistema óptico en centrales termosolares en general y de torre en particular, llevadas a cabo por los códigos basados en convolución.

9. Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad la financiación proporcionada al trabajo, a través de los proyectos de Plan nacional de I+D+i ENE2012-37950-C02-01 y ENE2012-37950-C02-02.

10. Referencias

- [1] [1] GARCÍA, P., FERRIERE, A., BEZIAN, J. Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: A comparative review. *Solar Energy*, 2008, vol. 82, pp. 189-197.
- [2] [2] HECHT, E. *Óptica*. Madrid: 2000. 708 p. (Ed. PearsonEducación).
- [3] [3] SPENCER, G.H., MURTY, M.V.R.K. *General Ray-Tracing Procedure*. *Journal of the Optical Society of America*, 1962, vol. 52, pp. 672-678.
- [4] [4] LEARY, P.L., HANKINS, J.D. *A user's guide for MIRVALA computer code for comparing designs of heliostat-receiver-optics for central receiver solar power plants*. Albuquerque: 1979. 132 p. (Department of Energy, Sandia Laboratories).
- [5] [5] WENDELIN, T. *SolTrace: A New Optical Modeling Tool For Concentrating Solar Optics*. *International Solar Energy Conference*, 2003, pp. 15-18.
- [6] [6] BLANCO, M.J., AMIEVA, J.M., MANCILLA, A. *The TONATIUH software development project: an open source approach to the simulation of solar concentrating systems*. *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, Florida*, 2005.
- [7] [7] RELLOSO, S., DOMINGO, M. *Solar projects analysis using SENSOL*. *Proceedings of SolarPACES 13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies*, Seville (Spain), 2006.
- [8] [8] YU, Q., WANG, Z., XU, E., ZHANG, H., LU, Z., WEI, X. *Modeling and simulation of 1 MWe solar tower plant's solar flux distribution on the central cavity receiver*. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012, vol.29, pp. 123-136.
- [9] [9] LEE, H. The geometric-optics relation between surface slope error and reflected ray error in solar concentrators. *Solar Energy*, 2014, vol. 101, pp. 299-307.
- [10] [10] NOONE, C. J., TORRILHON, M., MITSOS, A. *Heliostat field optimization: A new computationally efficient model and biomimetic layout*. *Solar Energy*, 2012, vol. 86, pp. 792-803.
- [11] [11] AYRES, F. *Geometría proyectiva*. México: 1971. 243 p. (Ed. McGRAW-HILL Interamericana de México).
- [12] [12] GARCIA, J.L. *Geometría proyectiva y formas cuádricas*. Murcia: 2004. 295 p. (Ed. DM).
- [13] [13] DELLIN, T.A., FISH, M.J., YANG, C.L. *A user's manual for DELSOL3: a computer code for calculating the optical performance and optimal system design for solar thermal central receiver plants*. Sandia National Laboratories, Livermore (1986).