

ANÁLISIS DE LOS FACTORES DE INFLUENCIA EN EL RENDIMIENTO ÓPTICO DE LOS ESPEJOS INSTALADOS EN CENTRALES TERMOSOLARES CON TECNOLOGÍA CCP

Oscar Sandín-Romano

RIOGLASS, S.A.

José Luis Gutiérrez-López

Ana González-Marcos

Jesús Las-Heras-Casas

Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de La Rioja

Abstract

Nowadays, one of the major challenges that the world faces is obtaining a clean and secure energy. To this end, renewable energy technologies are developing rapidly. Among them, parabolic trough collector (PTC) technology is currently the most popular solar thermal electric technology. This system consists of parabolic trough solar collectors that focus the sun's radiation on a linear receiver located at the focus of the parabola. The collected solar energy is used to heat a fluid as it circulates through the receiver pipes. Finally, this thermal energy is used to produce electricity. Since one of the key components of this technology is the reflective surface, it is clear that any improvement in this area will improve the system performance, which results in an increase in profitability. This work analyzes the operation of this technology and verifies that there are some geometrical factors in the reflection which are of particular importance for optical performance. This knowledge and its relationship with existing control systems can set new criteria for quality in the market, encouraging further research and development.

Keywords: *solar thermal energy; parabolic trough collector; optical performance*

Resumen

En la actualidad, conseguir energía limpia y segura es uno de los principales retos con los que se enfrenta la humanidad. Para ello, las energías renovables están desarrollándose con celeridad. Dentro de ellas, la energía termosolar y, más concretamente, la tecnología con colector cilindro-parabólico (CCP) es una de las que más auge ha adquirido en los últimos años. Este sistema consiste en un colector de vidrio espejado con sección parabólica que concentra la radiación sobre un conducto por el que circula un fluido del que se aprovechará su energía térmica. Puesto que uno de los componentes fundamentales de esta tecnología es la superficie reflectora, resulta evidente que cualquier mejora en dicha superficie mejorará el rendimiento del sistema, lo que supone un incremento en la rentabilidad. En este trabajo se analiza la explotación de esta tecnología y se comprueba que existen algunos factores geométricos en la reflexión de especial importancia para el rendimiento óptico. Su conocimiento y relación con los sistemas de control actuales permite establecer nuevos criterios de calidad en el mercado, favoreciendo la investigación y desarrollo posterior.

Palabras clave: *energía termosolar; colector cilindro-parabólico; rendimiento óptico*

1. Introducción

En la actualidad, la demanda de energía, fundamentalmente eléctrica, aumenta de forma vertiginosa. Además, la época de los combustibles fósiles está finalizando. Todo esto hace que conseguir energía limpia y segura sea uno de los principales retos con los que se enfrenta la humanidad.

Entre las energías limpias o renovables se encuentra la energía solar y, a su vez, dentro de este grupo, se encuentra la termosolar, que comprende, entre otros sistemas, los colectores cilindro-parabólicos, discos Stirling, fresnel, etc. Todos ellos se caracterizan porque se aprovecha la radiación solar concentrándola sobre un receptor que de alguna forma genera electricidad (bien sea directamente, como los motores Stirling, o bien mediante un intercambio energético entre un fluido calentado en los colectores y agua para generar vapor y así disponer de una generación mediante turbinas).

El presente trabajo se centra principalmente en los sistemas cilindro-parabólicos, por ser los de mayor difusión industrial y comercial en la actualidad entre todos los termosolares. No obstante, la teoría de lo aquí descrito es aplicable a todos los casos de concentración mencionados anteriormente.

El colector cilindro-parabólico (CCP) o también llamado *Eurotrough* (figura 1), se basa en la concentración de los rayos solares en unos tubos receptores de alta eficiencia térmica, localizados en la línea focal de unos colectores con sección parabólica. Dicha radiación, ya concentrada, calienta un aceite sintético que circula por el interior del tubo receptor, pudiendo llegar a alcanzar temperaturas superiores a 400°C. Posteriormente, este aceite es bombeado a unos intercambiadores que generan el vapor necesario para convertir su energía en electricidad mediante unas turbinas convencionales.

Figura 1. Colector cilindro parabólico



Cada colector mide 12 metros y está formado por 28 espejos, 14 de cada tipo. En la imagen se aprecian varios colectores en serie.

Estos sistemas están diseñados para generación a gran escala, con potencias entre 50 y 200 MW, aunque se puede ampliar si son ciclos combinados con gas (no permitido en algunos países) o bien si disponen de sistemas de almacenamiento con sales, lo que permite generar energía por la noche, durante el tiempo que no hay radiación solar directa. Las inversiones rondan los 5 €/Wp, lo que quiere decir que para una planta de 50 MW se puede

esperar una inversión de 250 M€, aunque se espera que en un futuro próximo este tipo de centrales sean comparables a las tecnologías de centrales eléctricas convencionales que operan en la actualidad.

En este contexto, resulta evidente que cualquier aporte de mejora en el rendimiento supone un incremento la rentabilidad del negocio, lo que acelera el desarrollo y la implantación de este tipo de tecnologías limpias de forma comercial.

Dentro de los componentes fundamentales de esta tecnología se encuentra la superficie reflectora. En la actualidad, el 100% de los casos industriales utiliza una superficie compuesta por vidrios autoportantes de unos espesores que oscilan entre 3 y 5 mm, con unas superficies efectivas del orden de los 2,5 metros cuadrados y una geometría que forma la sección parabólica del colector.

El desarrollo de este producto, como el resto de componentes, se encuentra unido a la investigación general del sistema, pero hay cierta carencia de investigación pura sobre este elemento, salvo contados casos promovidos por empresas privadas que tratan de mejorar su producto para evitar o mejorar la competencia.

El vidrio es controlado (y por tanto regulado contractualmente en el sector), fundamentalmente por su rendimiento óptico (capacidad de reflejar la radiación en el foco objetivo) medido en laboratorio. Hace unos años este sistema era perfectamente válido, pues los rendimientos se encontraban aún lejos del óptimo, por lo que la capacidad de mejora era patente. Sin embargo, en la actualidad, los rendimientos ópticos de los vidrios espejados rondan el 100%, por lo que las líneas de mejora llevadas a cabo hasta ahora comienzan a agotarse.

En este trabajo se pretende mostrar que la capacidad de mejora geométrica está aún por explotar, ya que existen una serie de factores no tenidos en cuenta en el laboratorio que determinan el rendimiento óptico durante el uso en las instalaciones.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se presentan los objetivos y la metodología planteados en este estudio. En la sección 3 se exponen los sistemas de control actuales y los parámetros fundamentales utilizados en este trabajo. En las secciones 4 y 5 se presentan los análisis realizados, así como los resultados obtenidos en cada uno de ellos. Finalmente, en la sección 6, se comentan las principales conclusiones de esta investigación.

2. Objetivos y metodología

El vidrio espejado que forma la superficie reflectora en los colectores cilindro-parabólicos es uno de los componentes fundamentales de este tipo de instalaciones. Su desarrollo es, por tanto, sinónimo de mejora en la rentabilidad de las centrales y la producción de energía.

A nivel de laboratorio, este producto está desarrollado y la tecnología existente permite disponer productos de muy alta eficiencia óptica, llegando a rendimientos superiores al 99%, de media, en una instalación completa. Sin embargo, y dado que los sistemas de control actuales toman medidas en condiciones ideales de insolación –como la posición cenital del sol, entre otros factores de menor importancia para este estudio–, no es posible medir los espejos (junto al resto del colector) en condiciones de uso.

Partiendo de esta idea, se plantean los siguientes objetivos:

- Describir aquellos factores de uso durante la explotación que dependen del rendimiento óptico del espejo del colector, y que no son medidos con los sistemas de control actuales.

- Mostrar nuevas posibilidades de control y mejora de las instalaciones a los promotores de las centrales termosolares, planteando conceptos nuevos para la especificación del producto.
- Relacionar los parámetros de los sistemas de control actuales en laboratorio con aquellos factores de influencia en campo durante la explotación.

Para avanzar en la consecución de estos objetivos, se propone el análisis de algunos aspectos que, si bien se consideran influyentes en la generación de energía como rendimientos globales, no se han estudiado hasta ahora desde el punto de vista del espejo:

1. *Influencia de la elevación solar en la distancia focal.*

Parámetro considerado en el diseño de una central, fundamentalmente, en cuanto a la apertura solar del colector, que se ve mermada cuanto menor es el ángulo de incidencia. El problema radica en que el aumento de la distancia focal como consecuencia de la elevación se considera de forma genérica, para un rendimiento de interceptación medio. Esto puede provocar que un vidrio con un alto rendimiento en laboratorio, pero con una desviación del teórico importante, para ciertas elevaciones, pierda por completo su rendimiento óptico.

2. *Pérdidas de radiación por reflexión en el tubo del receptor solar.*

Como consecuencia del ángulo de incidencia del haz de luz sobre dicho tubo (en ambos ejes), se producen unas pérdidas que hasta ahora son cuantificadas por el fabricante del tubo a partir de valores medios de reflexión del colector. Sin embargo, al igual que antes, no se ha considerado la desviación real del vidrio del colector para este cálculo, incurriendo nuevamente en el error de considerar los vidrios como completamente homogéneos y definidos por las medias de los valores que presentan.

En los siguientes apartados se estudia la influencia de la superficie reflectora en cada uno de estos aspectos, siendo fundamental relacionarlos con valores medibles en los sistemas de control actuales para poder implementar estos conceptos en los diseños actuales.

3. Sistemas de control actuales

El control de los espejos es un factor fundamental para el desarrollo de la tecnología. Es preciso darse cuenta de que la facultad fundamental de este producto es su capacidad de reflexión en la dirección deseada, por lo que hay dos controles fundamentales:

1. *Reflectividad:* Es fácil de medir con equipos de laboratorio, donde mediante probetas facilita una gráfica del espectro de luz, presentando la reflectividad para cada frecuencia.
2. *Índice de interceptación:* Es este factor el que presenta un nuevo concepto. Las mediciones tridimensionales de la geometría no son válidas para controlar el curvado del vidrio, ya que en este caso el conocer las coordenadas de un punto no asegura su adecuada reflexión. Lo importante es conocer el ángulo que presenta la tangente en la superficie respecto a la teórica.

Para determinar el índice de interceptación existen dos métodos aceptados en el sector:

1. *Interceptación láser.* Mediante el uso de un láser es posible reproducir un haz solar y comprobar su reflejo. Con este sistema se puede recorrer con precisión gran parte de la superficie del vidrio y localizar aquellas zonas cuya geometría provoque desviaciones del haz fuera del foco. Sin embargo, este método presenta tres inconvenientes fundamentales:
 - Es discreto, ya que con el haz láser solamente se pueden verificar una cantidad de puntos de la superficie, que puede oscilar entre los 100 y los 1000 puntos.

- El segundo problema es la interpretación de esta información, ya que solamente se dispone de la interceptación y grado de desviación de cada punto medido, no siendo posible obtener conclusiones más profundas sobre la geometría.
 - El tercer problema, y quizá más importante, es el tiempo de inspección. Requiere por pieza unos 2 minutos, incluyendo la manipulación, y eso considerando un sistema semiautomático.
2. *Deflectometría*. Se trata de un sistema óptico que consiste en comparar fotografías tomadas sobre el espejo con una imagen artificial de lo que debiera haber sido si el reflejo fuera perfecto. El equipo ha sido desarrollado por *CSP Services* en conjunto con el DLR alemán (*German Aerospace Center*). Mediante esta técnica se pueden conseguir resoluciones de hasta un millón de puntos de control. Este sistema, que dispone de equipos para medir en laboratorio o en campo, debido a la mayor resolución, presenta mucha más información que la interceptación, ya que le permite aplicar herramientas estadísticas para definir otros parámetros de control que se comentan a continuación:
- *Slope deviation* (SDx y SDy): Se trata de la desviación de la pendiente en cada punto del plano tangente a la superficie. Se mide en miliradianes (mrad) y existen dos valores, para distinguir entre ambos ejes: Eje X es el contenido en el plano perpendicular del receptor; Eje Y es el longitudinal del tubo.
 - *Focus deviation* (FDx y FDy): Se trata del valor en mm de desviación que tiene el haz en el foco. Así, por ejemplo, un vidrio perfecto dispondrá de un FDx de 0, mientras que si presenta una irregularidad, el FDx irá aumentando hasta ser de 35, máximo en un tubo de 70 mm de diámetro.
 - *Interceptación* (*Intercept laser*): Se disponen de varios datos de interceptación, como son el IC70, IC60 e IC40, dependiendo del diámetro del tubo que se quiera estudiar. Los datos son presentados en porcentaje.
 - *Intercept sun* (ICSUN70): Con el mismo concepto que el anterior, pero toma en consideración en cono solar para sus cálculos. En términos generales el ICSUN70 es más bajo que el IC70, debido a que la radiación del cono solar de la periferia de la pieza es perdido, mientras que el IC70 considera un 100% de rendimiento si el haz alcanza el foco.

En todos los casos se calcula cada valor para cada punto medido. Debido a que la distribución de las mediciones se puede suponer normal, es factible el uso de propiedades estadísticas comunes para obtener valores extensibles a todo el vidrio, por tanto, un informe típico de este equipo es presentar 8 valores (FDx, FDy, SDx, SDy, IC70, IC60, IC40, ICSUN70) para todo el vidrio, que se pueden considerar como los valores característicos del mismo.

Todos estos parámetros son fundamentales para el desarrollo de este estudio, ya que aportan la información necesaria como punto de partida y control para la búsqueda de nuevos caminos de mejora en el rendimiento, como se verá más adelante.

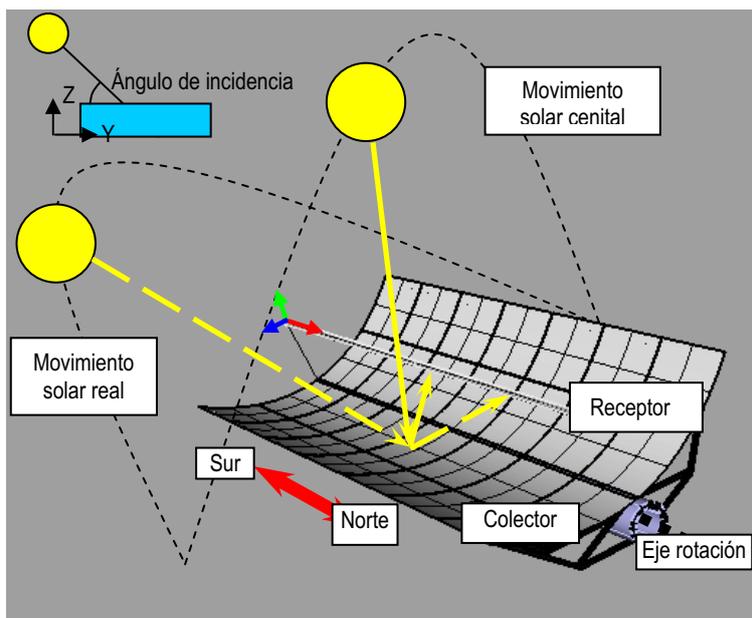
4. Influencia de la elevación solar en la distancia focal

4.1 Descripción del problema

Los colectores CCP disponen de seguimiento al sol exclusivamente en un eje. En teoría, no es necesario un seguimiento en el segundo eje, puesto que su carácter lineal favorece la reflexión a lo largo del tubo en caso de desviación angular que afecte en la dirección del colector.

Tal y como se observa en la figura 2, cuando el sol hace un movimiento cenital sobre el colector (plano XY), la reflexión está comprendida en el mismo plano. Sin embargo, el sol durante su movimiento real no pasa por el cenit del colector, sino que forma un ángulo que influirá en el reflejo. Teóricamente, al ser un sistema lineal, dicho reflejo seguirá dando en el receptor, pero si existen mínimas desviaciones en el plano de reflexión, se producirá una desviación proporcional a la nueva distancia focal que se genere.

Figura 2: Esquema del ángulo de incidencia entre el sol y el colector

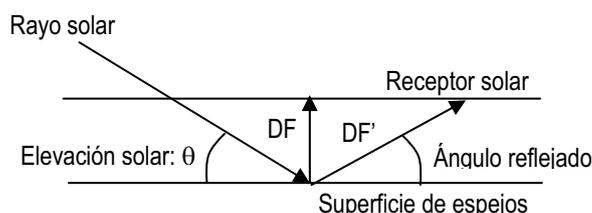


Como ya se ha comentado, la elevación real del sol provoca que la reflexión sobre el receptor aumente su distancia focal. En este apartado se buscan las relaciones entre dicha elevación y el rendimiento óptico real en función de los parámetros de control de los espejos, de forma que se puedan establecer nuevos límites de control en base a los ángulos de reflexión reales.

4.2 Relación entre la elevación del sol y la distancia focal

La geometría para calcular esta relación se puede plantear con el esquema de la figura 3. El rayo solar incide sobre la superficie de los espejos con un cierto ángulo θ . La distancia teórica para cualquier comprobación de laboratorio es la mínima (DF). Sin embargo, la distancia real para dicha elevación es DF' , manteniendo un ángulo de reflejo igual al de entrada.

Figura 3. Esquema representativo del efecto que tiene la elevación del sol en la distancia focal

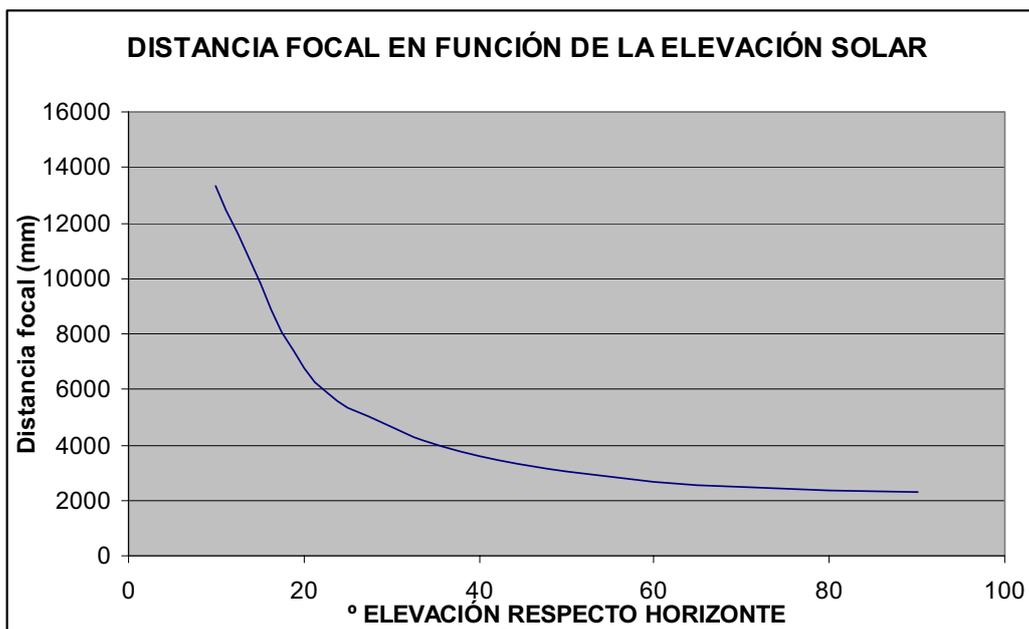


De este análisis se puede obtener fácilmente la ecuación que relaciona la distancia focal con la elevación solar:

$$DF' = \frac{DF}{\cos(90 - \theta)} \quad (1)$$

Tal y como se observa en la figura 5, para elevaciones pequeñas del sol el aumento de las distancias focales es muy importante.

Figura 5. Relación entre la elevación del sol y la distancia focal



Para ver la importancia de este dato, se pone como ejemplo la latitud de Madrid, que es de 40°26'. En estas circunstancias, la elevación máxima del día corresponde a $\theta = 26,12^\circ$, que es cuando la radiación es mayor. Al comienzo y final del día la posición respecto al colector mejora, pero son las horas de menor radiación.

4.3 Efecto de la elevación solar en el rendimiento óptico del vidrio

Si la superficie del colector fuera ideal, el problema de la elevación sería completamente despreciable, pues el aumento de la distancia focal no repercute en el rendimiento óptico debido a que el sistema es lineal, como ya se ha comentado (siempre y cuando no se considere el cono solar). Sin embargo, la realidad es que la superficie reflectora presenta desviaciones angulares que repercuten en que estas desviaciones adquieran relevancia.

Es necesario, pues, cuantificar estos efectos y relacionarlos con parámetros medibles en los espejos.

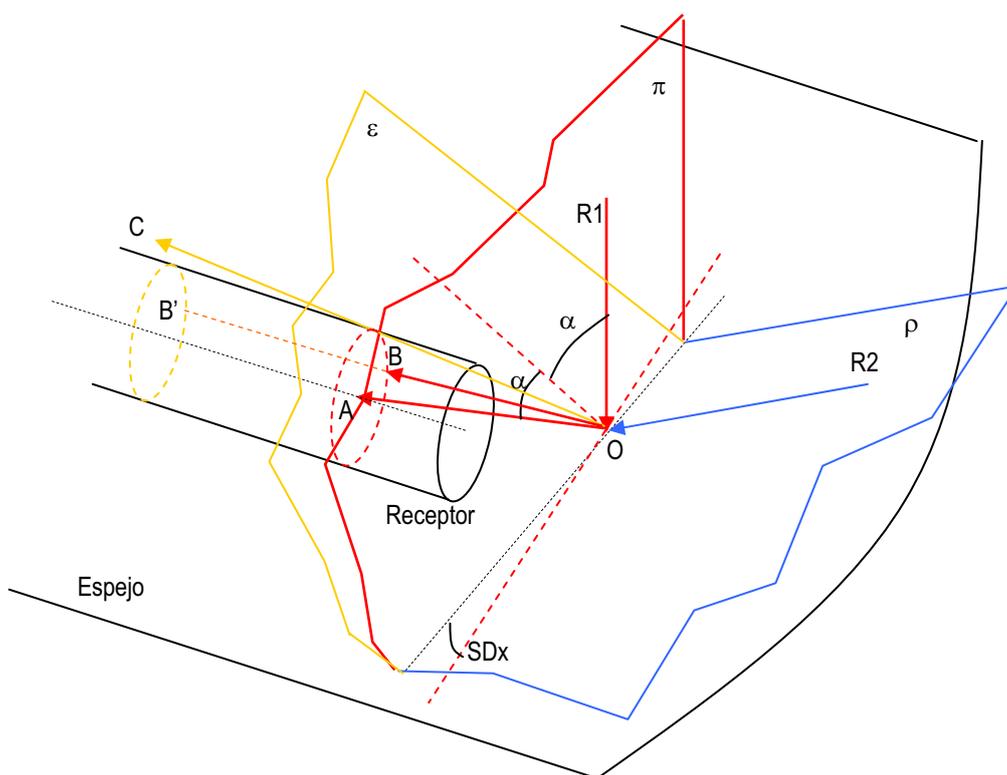
- **Relación con SDx**

En la figura 6 se observa cómo con el sol en posición cenital toda la reflexión se genera en el plano π , reflejando el rayo R1 en el punto A mediante la dirección OA. En este caso, si

hubiera un SDx de desviación en la pendiente del espejo en ese punto, se generaría un rayo de reflejo según el vector OB, generando el punto B de incidencia en el tubo, que no es el óptimo pero sí válido para calentar el fluido.

Si la radiación inicial tuviera una elevación diferente a 90° , por ejemplo, la R2, comprendida en el plano ρ , su reflejo ya no sería en B, sino que se desplazaría a lo largo del tubo, a reflejar en B'. Pero debido al efecto del SDx la reflexión de R2, contenida en el plano ε refleja fuera del tubo, en el punto imaginario C.

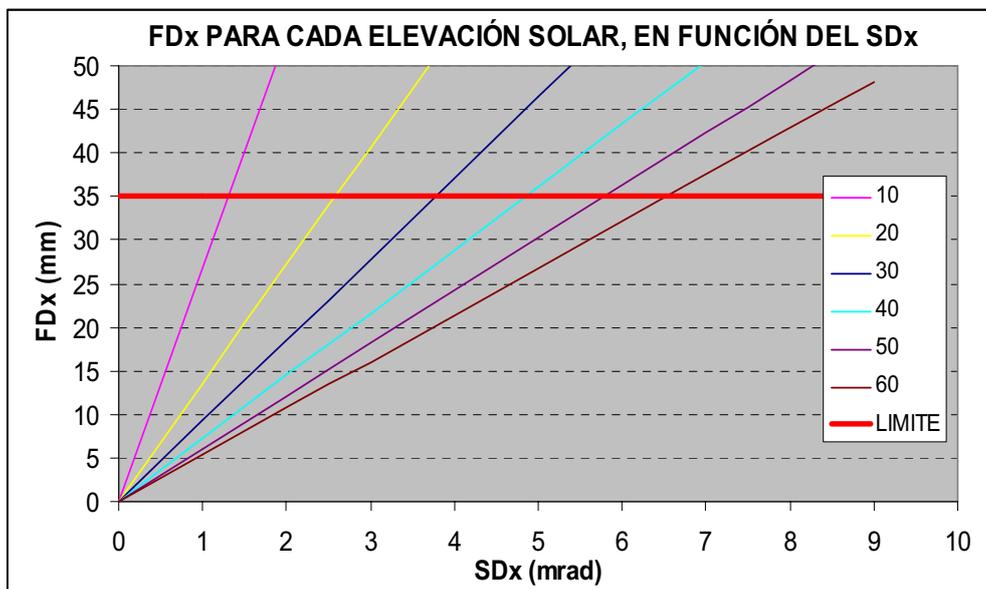
Figura 6. Esquema de la influencia del SDx en la reflexión



En estas condiciones, interesa saber el FDx para la nueva distancia focal generada. Si fuera mayor que el diámetro del tubo receptor, la radiación quedaría fuera. En la figura 7 se muestra la relación entre el SDx del vidrio y el FDx resultante, para diferentes elevaciones (modificando, por tanto, su distancia focal). Para la ejecución de esta gráfica, se ha supuesto una distancia focal inicial de 2319 mm, media de la distancia focal de todos los puntos de un colector estándar. En cualquier caso, se puede calcular en función de cualquier distancia focal de forma análoga

Si, por ejemplo, se considera un vidrio con 4 mrad de SDx como referencia de su superficie, se observa que con ángulos de elevación inferiores a 30° la reflexión queda fuera del receptor. En estas condiciones, si el colector fuera completamente horizontal, para algunos días de diciembre y enero, donde durante todo el día el sol no se eleva por encima de los 30° , el vidrio no reflejaría en ningún momento en el tubo. Dicho con otras palabras, un vidrio con 100% de rendimiento óptico en laboratorio rendiría un 0% en campo ciertos días.

Figura 7. Relación entre el SDx y el FDx en función del ángulo de elevación solar



- **Relación con SDy**

En este caso, el parámetro SDy no afecta al rendimiento por sí solo, pues aunque el reflejo se aleje como consecuencia de su efecto, no modifica el ángulo respecto al plano perpendicular al receptor, por lo que en ningún caso provocará la salida del rayo del absorbedor.

Sin embargo, la combinación de los dos puede, al igual que el caso anterior, provocar la pérdida de rendimiento para aquellos casos en que el FDx esté próximo al máximo del tubo.

5. Pérdidas de radiación por reflexión en el tubo de vidrio del receptor solar

5.1 Descripción del problema

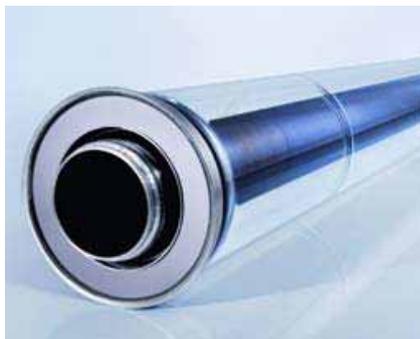
El tubo absorbente (figura 8) es otro de los componentes fundamentales de un colector CCP, ya que su eficacia afecta directamente al rendimiento de la planta solar. Dicho tubo, localizado en la línea focal de los colectores, está compuesto fundamentalmente por acero y actúa como intercambiador, transmitiendo la energía de la radiación a un fluido que se calienta hasta superar los 400°C y se utiliza posteriormente para generar el vapor. Debe disponer de la máxima absorción de calor y la mínima emisividad. Precisamente para evitar pérdidas por radiación, estos tubos van recubiertos a su vez por una doble piel fabricada en vidrio. Su función es mantener el vacío entre ambos tubos y minimizar así las pérdidas por este medio. El sellado de este elemento es fundamental, de ahí la aparición de soldaduras vidrio-metal, que asegure la estanqueidad al aire. La tecnología para producirlos es de importancia industrial, y se trata de uno de los secretos más importantes de este sector.

La incorporación de estos tubos en medio del camino de la radiación provoca que se generen algunos reflejos, dependiendo del ángulo de ataque, lo que reduce la energía total que llega al tubo receptor.

Existe, como es lógico, información de estos recubrimientos, pero siempre de forma teórica e ideal, es decir, se presupone que el colector es perfecto y la radiación tiene dirección y

comportamiento ideales. Pero la realidad es que los espejos, junto con el resto del colector, presentan imperfecciones que provocan que los rayos no siempre sean perpendiculares al receptor, provocando reflexiones que es necesario cuantificar y relacionar con la calidad óptica de los espejos.

Figura 8. Imagen del tubo receptor [Fuente: Schott Solar AG]



En este apartado se estudia el grado de reflexión que se da en el tubo de vidrio que recubre los receptores solares, desde el punto de vista de los espejos del colector. Es decir, se analiza la importancia que representa el ángulo de ataque de la radiación sobre el tubo provocado por desviaciones en la reflexión sobre los espejos, de forma que se limitan las posibles imperfecciones geométricas u ópticas que presenten éstos.

En un principio se supondrá que el vidrio tiene un rendimiento del 100% en el tubo de 70 mm del receptor. Se determinará entonces qué porcentaje de pérdida puede tener en función del grado de precisión que tenga el elemento. Para ello se considera los nuevos criterios que aporta el QDec (CSP Services, 2010) en la medición de los espejos.

5.2 Pérdidas por reflexión en función de la desviación del haz solar en el foco (FDx)

Para llevar a cabo este estudio se plantea la geometría presentada en la figura 9 y se analiza el caso límite, donde se supone que el rendimiento óptico es del 100% en el tubo de 70 mm del receptor (figura 10).

Figura 9. Esquema de la incidencia del haz solar sobre el colector CCP

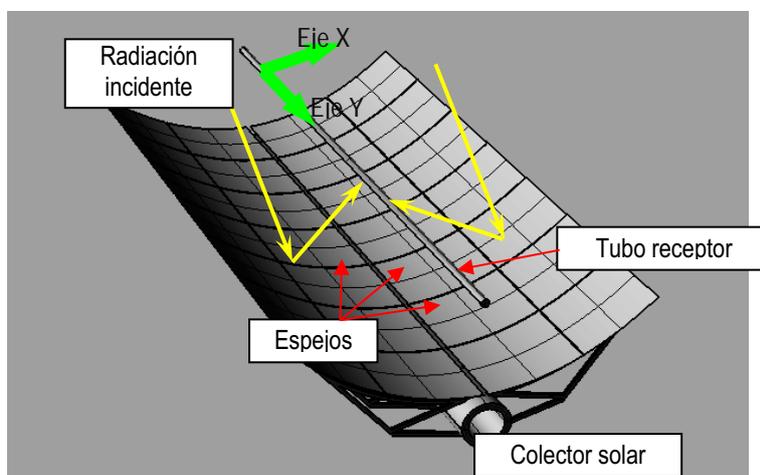
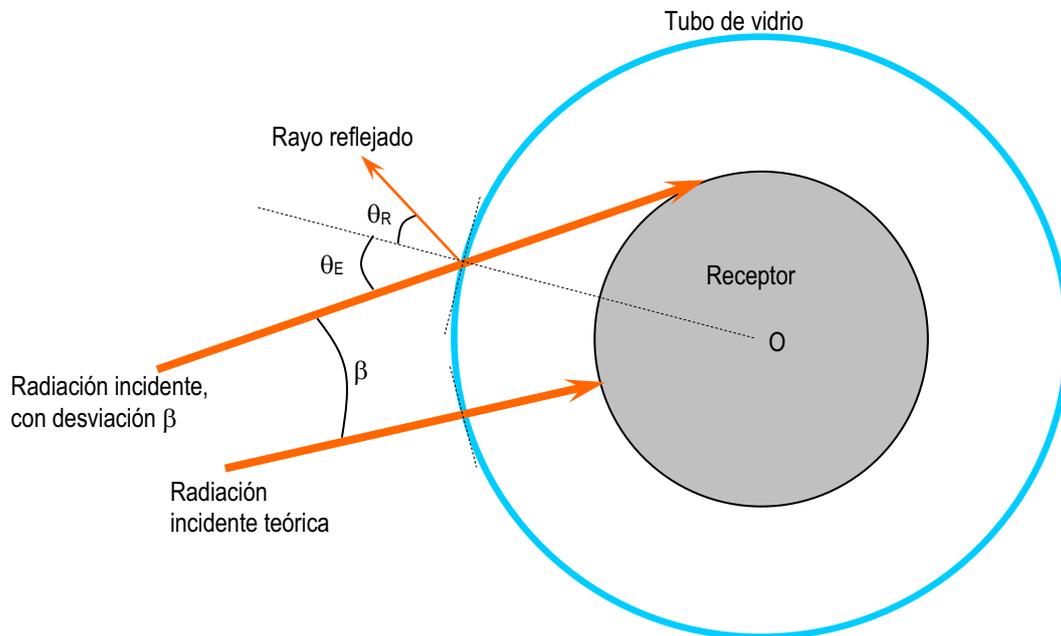


Figura 10. Esquema de una sección de tubo receptor



Para un haz proveniente del colector, la máxima desviación factible es siendo tangente al tubo absorbedor. En esta situación, el haz forma un ángulo θ_B con el tubo de vidrio.

En primer lugar, se deben establecer las leyes que relacionan las amplitudes de las ondas reflejadas y refractadas en función de la amplitud de la onda incidente. Para ello, se utilizan las ecuaciones de Fresnel, quien estudió el comportamiento de la luz al desplazarse en medios de diferentes índices de refracción, como son el aire y el vidrio.

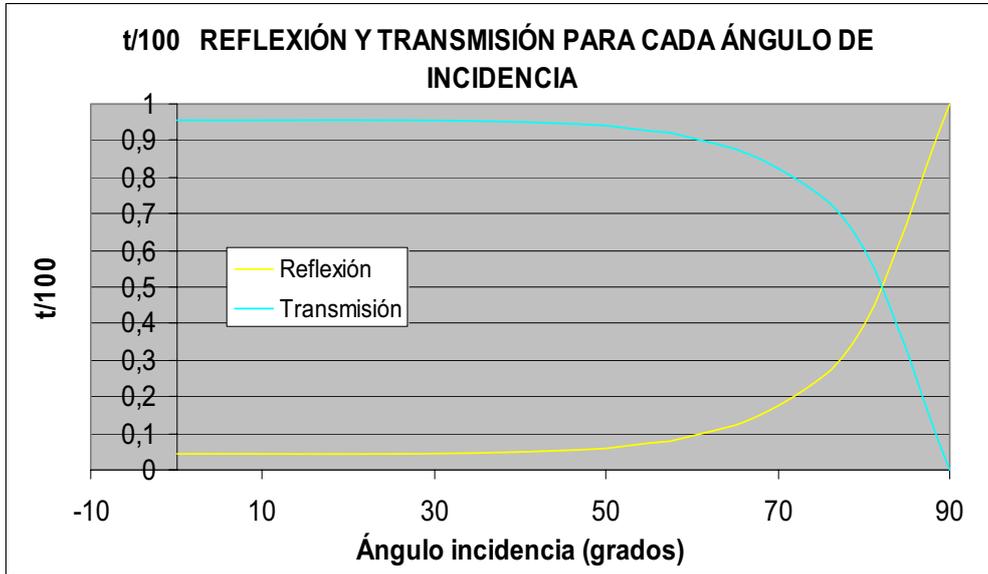
La luz reflejada en los espejos del colector tiene el foco objetivo en el centro del receptor (punto O de la figura 10). Sin embargo, debido a imperfecciones en la geometría de los espejos o del propio colector, el ángulo reflejado viene con una nueva dirección que forma un ángulo β con la dirección teórica.

Los parámetros del colector utilizados son:

- Distancia focal (F): 1710 mm
- Ecuación de la parábola: $y = x^2/4F$
- Apertura solar: 5774 mm
- Diámetro del receptor: 70 mm
- Diámetro del tubo de vidrio: Media de los dos productores: 120 mm
- Índice refracción vidrio: 1,52
- Índice refracción aire: 1

Operando con la formulación anteriormente citada y aplicando el caso práctico planteado, se obtienen los resultados de reflexión y transmisión mostrados en la figura 11.

Figura 11. $t/100$ de reflexión en función del ángulo de incidencia



Si se convierte el ángulo de incidencia en un valor de posible medición en los espejos, como puede ser el factor FDx (que es la desviación en mm que se pueden medir en el foco de la desviación de un rayo), se obtiene la relación presentada en la figura 12. En la figura 13 se muestra una ampliación de la zona de FDx válidos para tener un rendimiento del 100% (máximo de 35 mm).

Figura 12. Relación entre el FDx y el $t/100$ de reflexión

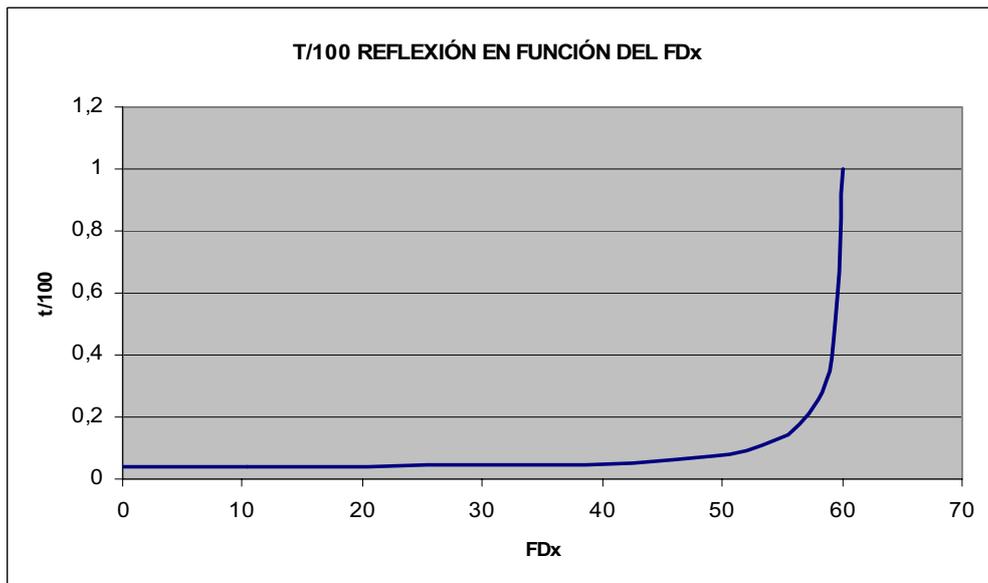
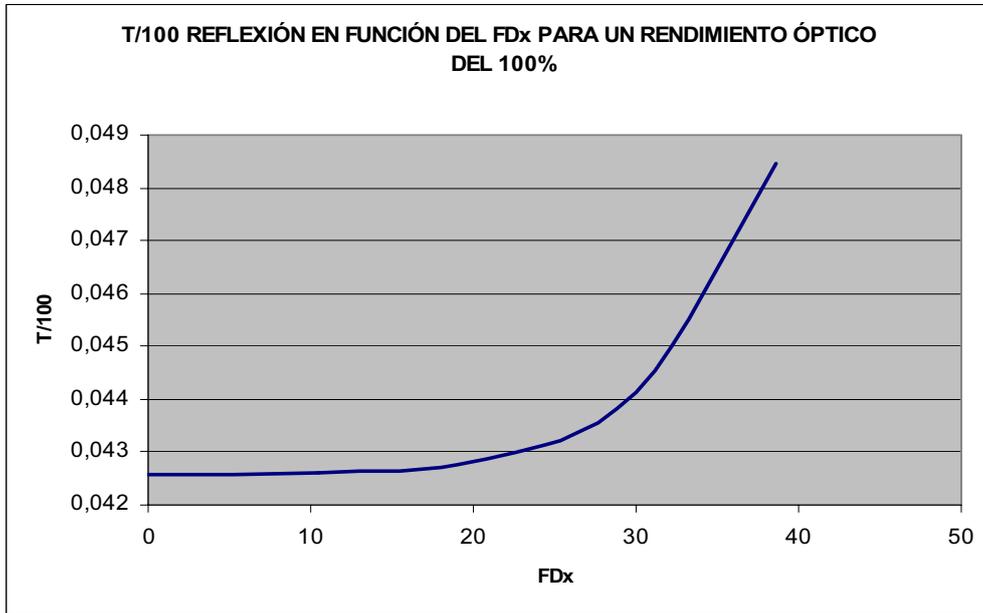


Figura 13. Relación entre los FDx comunes en los vidrios actuales y el t/100 de reflexión



Todos estos datos se han obtenido considerando la reflexión teórica. En la práctica, el vidrio dispone de una capa anti-reflejo que minimiza las pérdidas a un 1% en la dirección normal y a partir de los 45° deja de hacer efecto (según el propio fabricante). Tomando una aproximación lineal (se desconoce las propiedades de esta capa), se obtienen los resultados mostrados en las figuras 14 y 15.

Figura 14. Reflexión y transmisión producida como consecuencia del ángulo de incidencia para un tubo de vidrio con capa antirreflejo

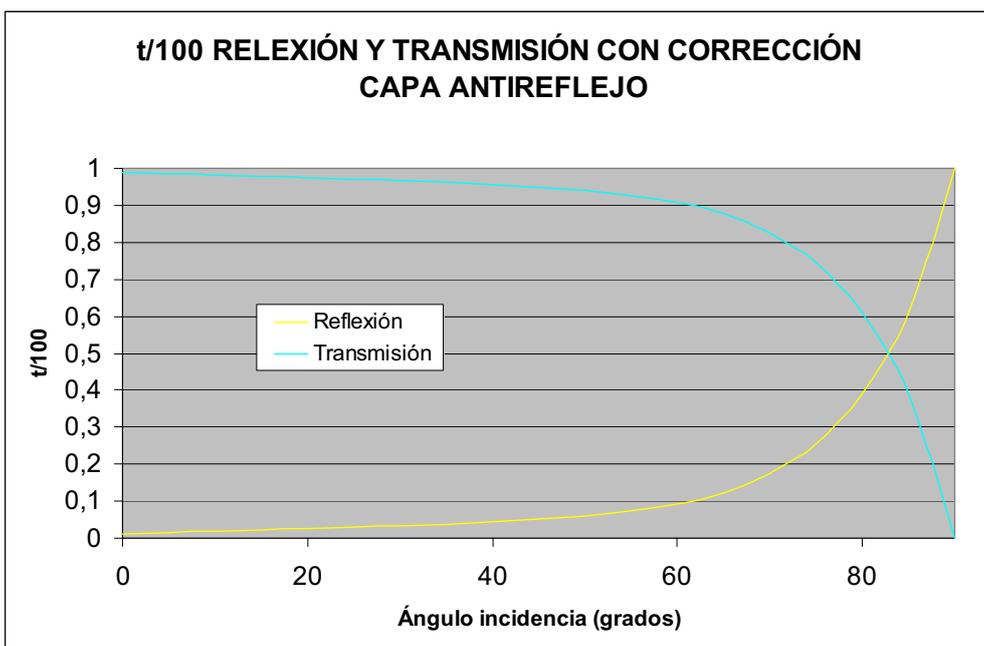
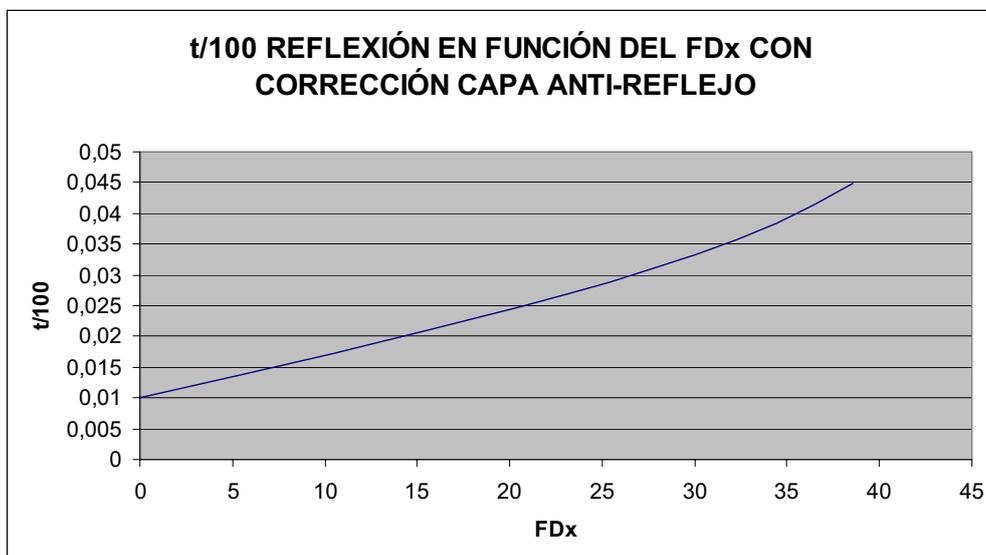


Figura 15. Porcentaje de pérdida por reflexión para un tubo con protección antirreflejo en función del FDx del colector



En estas circunstancias, el ángulo de entrada θ_E permanece constante para toda la apertura del colector, pues es función exclusivamente de los diámetros del receptor y tubo de vidrio, presentando un valor de $35,6853^\circ$. Si todos los rayos incidentes fueran desviados lo máximo, pero manteniendo el 100% de rendimiento, las pérdidas absolutas por reflexión según el eje x serían de 3,9%. En un caso medio, de un vidrio con un factor FDx del entorno de 10 mm, se puede esperar una pérdida por reflexión del 1,7%.

5.3 Pérdidas por reflexión en función de la desviación en la pendiente en cada punto del plano tangente a la superficie

De todos los datos obtenidos en el apartado anterior, se desprende que las pérdidas por reflexión pueden suponer como máximo para el colector CCP estándar un 3,9% en su caso máximo, atendiendo exclusivamente a las desviaciones generadas en el eje x.

Para generalizar estos conceptos se va a realizar el mismo estudio en función del parámetro SDx (desviación en la pendiente del espejo en el punto donde incide directamente la radiación solar). Este dato es mucho más genérico, pues amplía los resultados a ecuaciones con dos variables: el propio factor SDx y la distancia focal, haciendo extensible los resultados a cualquier colector, sean cuales sean sus dimensiones.

En este trabajo se presentan las pérdidas por reflexión de los principales tubos receptores que actualmente existen en el mercado. Uno de ellos es el SCHOTT PTR®70 Receiver (Schott, 2010), que presenta una serie de mejoras sobre anteriores productos de la marca, según el propio fabricante. Por otro lado, SOLEL, empresa israelita adquirida por Siemens, fabrica el UVAC 2010 (*Universal Vacuum Air Collector*), que ofrece en el campo solar un excelente grado de eficiencia, también según el propio fabricante (Siemens Energy, 2010).

Separando por diámetro de tubo de vidrio (en referencia a los fabricantes citados), se obtienen las pérdidas mostradas en las figuras 16 y 17. De este modo, se pueden estudiar, para cualquier tipo de colector, las pérdidas esperadas para cada circunstancia a partir de las mediciones reales de los espejos en laboratorio.

Figura 16. Porcentaje de pérdida por reflexión para cada distancia focal para el tubo de Siemens (diámetro 115 mm)

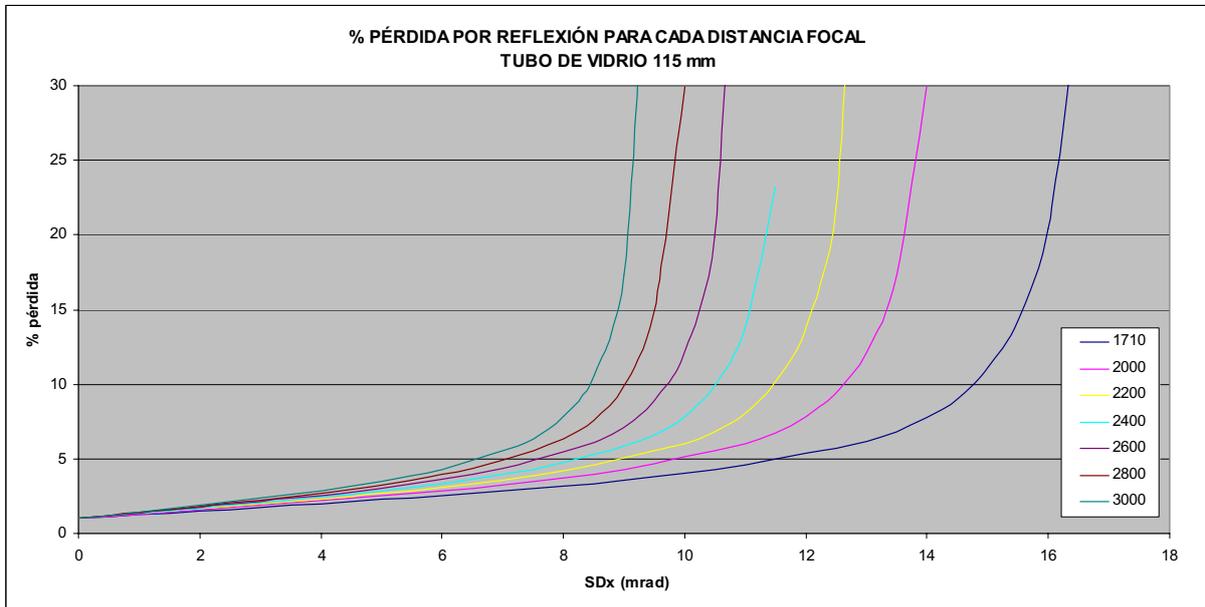
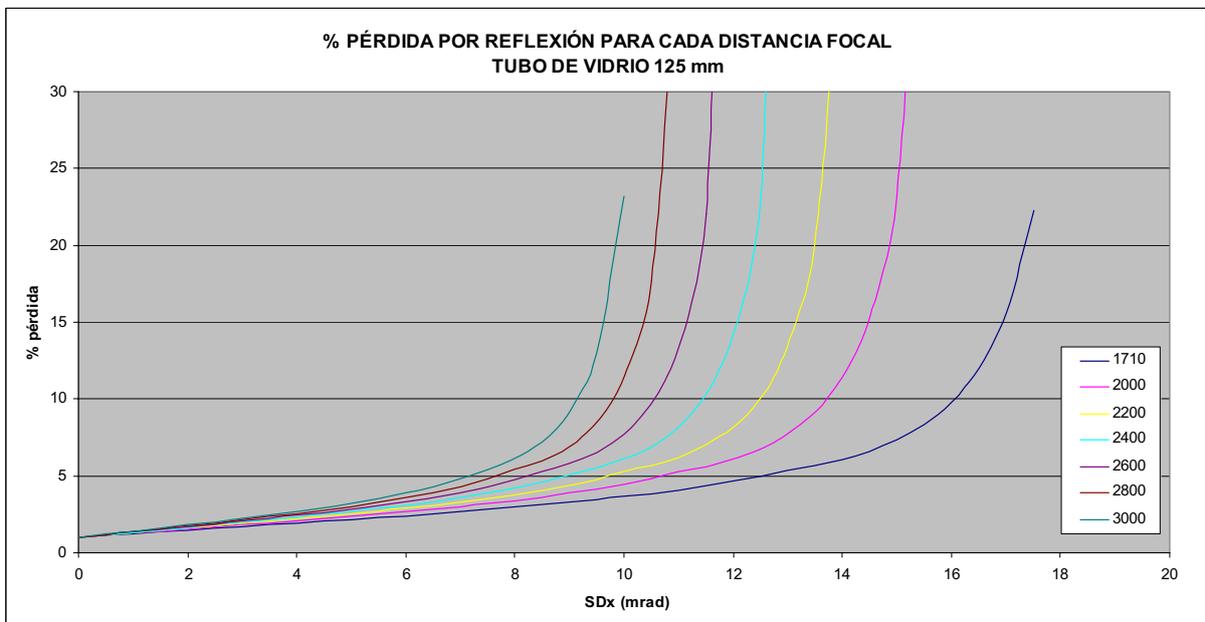


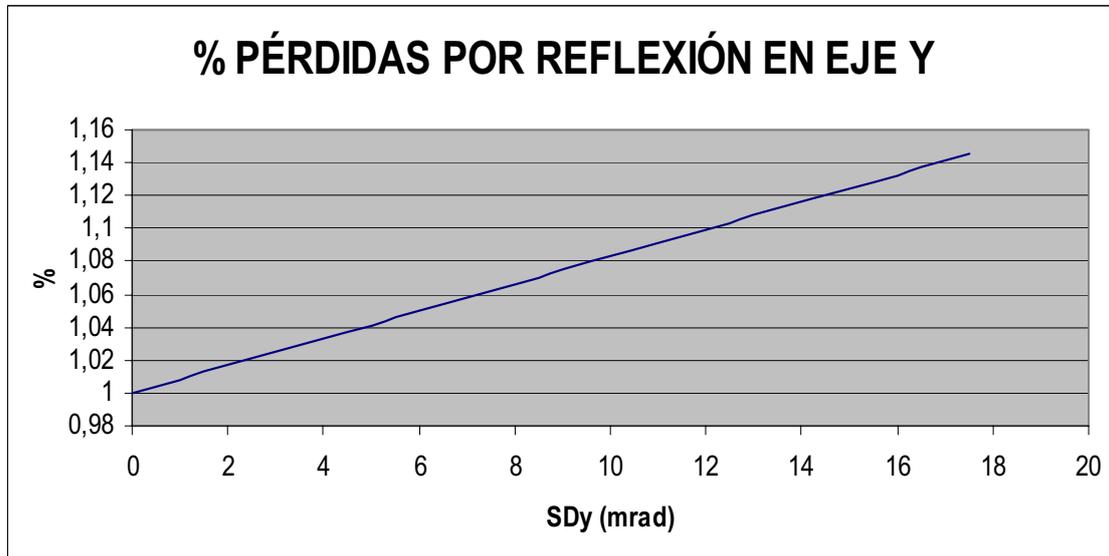
Figura 17. Porcentaje de pérdida por reflexión para cada distancia focal para el tubo de Schott (diámetro 125 mm)



Actuando de forma análoga, se pueden obtener los resultados para el factor SD_y , que es la desviación del espejo o colector en el eje y. En este caso el cálculo de los ángulos de

reflexión se simplifica, pues a efectos del reflejo el tubo permanece como una superficie plana, no afectando en consecuencia la distancia focal.

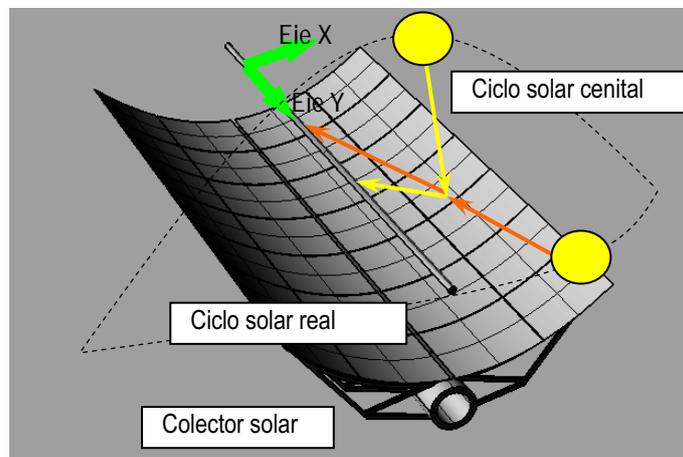
Figura 18. Gráfica que muestra las pérdidas en % por reflexión en función del SDy



En la figura 18 se puede observar que las pérdidas son menos influyentes que en el caso anterior. Para valores máximos de desviación (aprox. 4 mrad), se tienen unas pérdidas de 1,04%, muy próximas al óptimo de 1%.

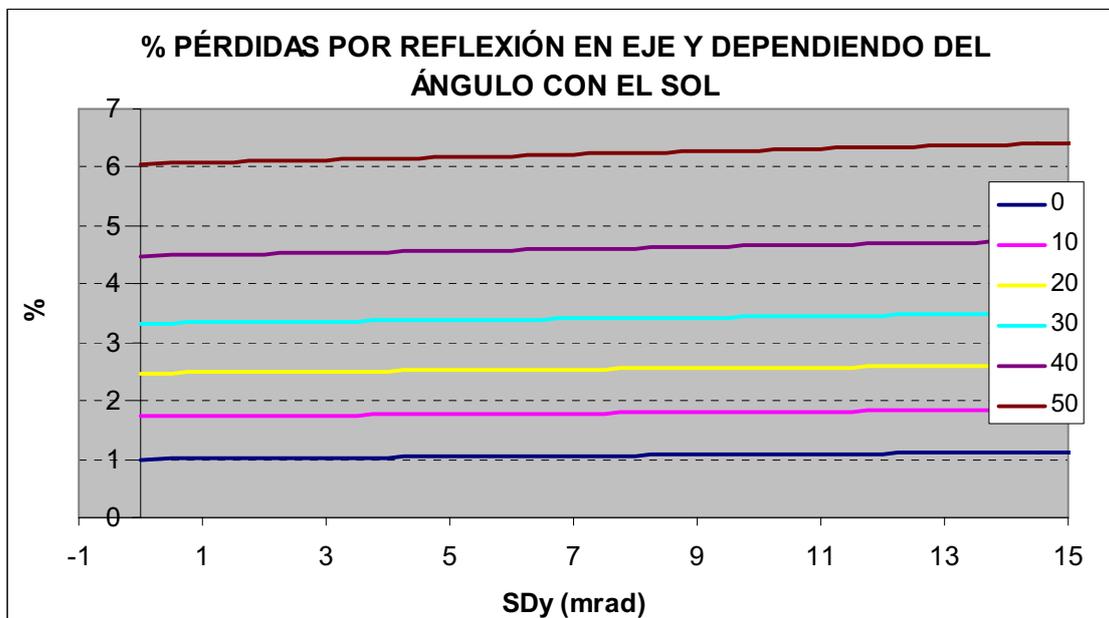
No obstante, para el eje Y aparece otro factor fundamental, que es la inclinación del sol. Como ya se ha comentado, los seguidores solares tienen seguimiento en un solo eje, que controla la reflexión según el eje X. Sin embargo, la inclinación del sol respecto a la posición cenital respecto al colector provoca una desviación en ángulo, que puede ser muy importante en función del valor que se esté tomando.

Figura 19. Esquema de la influencia de la inclinación del sol al ángulo que forma el haz reflejado y el tubo receptor.



En la figura 20 presentan nuevamente los resultados pero, además de incluir el factor SDy, se añaden unas curvas en función de la inclinación con el sol.

Figura 20. Gráfica que relaciona el SDy de un vidrio con el % de pérdida por reflexión para cada ángulo de elevación solar, considerando 0 como posición cenital (más favorable).



El ángulo mostrado corresponde al comprendido entre la elevación del sol y el cenit.

Se aprecia que la influencia del ángulo solar es mucho más importante que la propia del colector SDy.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha mostrado que la elevación solar y la reflexión sobre el tubo de vidrio tienen una importancia significativa durante la explotación del campo solar, ya que repercuten en el rendimiento global y son función de la calidad óptica de los espejos.

En consecuencia, el rendimiento de los espejos montados en un campo solar –que actualmente se mide en laboratorio– depende de nuevos factores, como son la latitud, inclinación del terreno y valores propios del vidrio, que hasta ahora no se contemplan en los acuerdos de suministro. En función de la importancia de estos factores, pudiera ocurrir que la especificación de los espejos para cada planta deba ser diferente.

Si se consideran exclusivamente los rendimientos medidos mediante deflectometría, en cuanto a interceptación, es probable que el rendimiento real no sea el esperado. Por ello, el entendimiento de los nuevos factores mencionados, permite abrir un abanico de posibilidades de mejora a bajo coste, como puede ser el dar inclinación a los espejos individualmente hacia el sur, mejorar en la fijación de los espejos en la estructura, control sobre el montaje, etc.

Los parámetros de control que aporta el sistema de control mediante deflectometría (FDx, FDy, SDx, SDy, IC70, IC60, IC40 e ICSUN70) son fundamentales para el control y definición de la planta. Así mismo, estos factores deben dejar de ser una mera información para entrar

en los cálculos de potencia final de la central. Por ello, su conocimiento por parte de los clientes favorecerá el desarrollo tecnológico de la tecnología CCP.

En términos económicos, la merma de rendimiento del 0,5 a 3%, dependiendo de las condiciones, que puede suponer la elevación solar y la reflexión sobre el tubo de vidrio, adquiere una dimensión considerable, considerando que una planta tipo en España tiene una inversión de 250 M€ (para 50MW) y la explotación prevista es para un mínimo de 25 años.

Referencias

- Lüpfert, E., & Ulmer, S. (2009, September). Solar trough mirror shape specifications. *International Conference SolarPACES*. Berlin, Deutschland. Disponible en: http://elib.dlr.de/62983/1/2009_SolarPACES_Berlin_MirrorShapeSpecs.pdf
- Geyer, M., Lüpfert, E., Osuna, R., Esteban, A., Schiel, W., Schweitzer, A., Zarza, E., Nava, P., Langenkamp, J., & Mandelberg, E. (2002, September). EUROTROUGH - Parabolic Trough Collector Developed for cost efficient solar power generation. *11th International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies*. Zurich, Switzerland. Num. 11. pag. 321-327.
- Lüpfert, E.; Osuna, R.; Esteban, A.; Schiel, W.; Zarza, E.; Nava, P. (2001, April). Eurotrough design issues and prototype testing at PSA. *Proceedings of solar Forum 2001*.
- Abengoa Solar. Conceptos sobre tecnología termosolar.[en línea] Consulta oct.2009. Disponible en: http://www.solucar.es/corp/web/es/tecnologias/termosolar/que_es/index.html
- Silva Pérez, M. (2005). Sistemas termosolares de concentración. Universidad de Sevilla. pp 5 – 18. Disponible en web: <http://www.esiold.us.es/php/infgen/aulav/energrenov/ER-STC-04-05.pdf>
- DLR (German Aerospace Center). Energy Resarch. (2009). Disponible en web: <http://www.dlr.de/en/desktopdefault.aspx/tabid-13/>
- Rioglass Solar. Generalizaciones sobre el producto y proceso. [en línea]. Consulta Feb.2010. Disponible en: <http://www.rioglassolar.com/>
- Schott Solar AG. Información técnica. The key component: SCHOTT PTR®70.[en línea]. Consulta junio 2010. Disponible en: <http://www.schottsolar.com/global/products/concentrated-solar-power/schott-ptr-70-receiver/>
- Siemens Energy. Solar Receiver AVAC2010.[en línea]. Consulta en junio 2010. Disponible en: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-generation/renewables/solar-power/concentrated-solar-power/receiver.htm>
- CSP Services. QDec Specifications. [en línea]. Consulta Julio 2010. Disponible en: <http://www.cspservices.eu/index.php?hp=35>
- Vicente del Arco, L. (1981) *Termotecnia*. Ediciones Ariel S.A. Barcelona.
- Dow Chemical Company, Technical Data about Syltherm 800 Fluid.[en línea]. Consulta en junio 2010. Disponible en: http://www.dow.com/PublishedLiterature/dh_0040/0901b80380040ba9.pdf?filepath=heattrans/pdfs/noreg/176-01469.pdf&fromPage=GetDoc
- Burkholder, F., Kutscher, C. Heat-Loss Testing of Solel's UVAC3 Parabolic Trough Receiver. Technical Report NREL/TP-550-42394 January 2008.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Ana González Marcos.
Área de Proyectos de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica.
Universidad de La Rioja
C/ Luis de Ulloa 20, 26004 Logroño, La Rioja (España).
Phone: +34 941 299 519
E-mail: ana.gonzalez@unirioja.es