

8

Energía solar y óptica sin imágenes para la producción de agua limpia

Manuel Collares-Pereira

INETI DER, IST, Lisboa, Portugal, correo
electrónico: collares.pereira@ineti.pt.

1. Energía Solar y Fotocatálisis

La energía solar puede utilizarse para tratar aguas contaminadas. La contaminación puede provenir de procesos químicos como los que ocurren en fábricas químicas (por ejemplo, en la industria farmacéutica, en la producción de plaguicidas o fertilizantes, etc.) o puede tratarse de una contaminación de naturaleza orgánica y/o biológica, como por ejemplo en las aguas de desecho o en las aguas superficiales de muchas áreas del mundo.

Para el tratamiento del agua es posible utilizar la fotocatálisis con TiO_2 y oxígeno singlete generado por fotosensibilización con complejos de rutenio y las técnicas foto-Fenton. La energía necesaria puede provenir de la porción del espectro solar más rica en energía, entre los 300 nm y los 400 nm para la técnica con TiO_2 y bien entrado en el azul para oxígeno singlete y foto-Fenton.

La porción del espectro solar total que se utiliza en estos procesos es pequeña, y por lo tanto existe un gran incentivo para utilizar la mejor óptica posible para obtener la recolección de la radiación solar.

La óptica sin imágenes¹ permite contar con dispositivos de recolección de energía solar que funcionen dentro de los límites de los primeros principios de la física, por lo que resulta ideal para la tarea a realizar.

En este capítulo se presenta el conjunto de características más relevantes de la óptica sin imágenes acompañadas por numerosas referencias para permitir a los interesados profundizar el estudio del tema.

La organización es la siguiente: en la sección 2 se discute la óptica sin imágenes desde el punto de vista de su relevancia en relación con la energía solar, tanto en aplicaciones térmicas como fotovoltaicas, y en la sección 3 se discute en mayor detalle la aplicación específica a la recolección UV, con ejemplos del sistema óptico que se propone para llevar a cabo la tarea requerida.

¹ Hemos traducido «Non Imaging Optics» como «Óptica sin Imágenes»; tal vez sea más correcto «Óptica no productora de Imágenes», técnicamente se la conoce como «Óptica Anidólica».

2. La relevancia de la óptica sin imágenes para la energía solar

2.1. Introducción

La energía solar está ampliamente disponible para utilizarse en aplicaciones térmicas y para la producción directa de electricidad.

En el primer caso, se ha desarrollado recolectores de energía solar que funcionan desde temperaturas muy bajas hasta temperaturas muy altas, siempre teniendo en cuenta la importancia de reducir las pérdidas de calor para asegurar una alta eficiencia.

En el segundo caso, ha habido preocupación acerca de la reducción del costo (todavía alto) de las células semiconductoras (células FV).

En ambos casos, una posibilidad para lograr estos objetivos es el uso de la concentración, es decir, la reducción del área de absorción con respecto al área de recolección, ya que las pérdidas de calor y los costos (en el caso de las células FV) son proporcionales a la primera y no a la segunda.

Con la óptica convencional de enfoque, esto se logra fácilmente mediante el uso de lentes o de espejos parabólicos, ya sea continuos o tipo Fresnel [1,3]. Sin embargo, la concentración lograda en cada caso está muy lejos del límite establecido por la segunda ley de la termodinámica o por los principios de conservación del espacio de fase que se utilizan en óptica [2].

Esto significa que es posible lograr un mejor desempeño con otro tipo de sistema óptico. Estos sistemas se conocen como concentradores sin imágenes, concentradores de tipo CPC, concentradores de tipo Ideal o Winston [2] (por el nombre de su inventor, a fines de los sesenta) y pertenecen a una nueva rama de la Óptica llamada Óptica sin Imágenes.

Es precisamente porque son concentradores sin imágenes y que no hacen foco que pueden lograr el límite referido para la concentración. Procesan solamente el flujo de radiación con el propósito de lograr la concentración más alta posible, sin conservar información acerca de sus direcciones, que es algo que todos los sistemas con imágenes deben hacer. En este capítulo se hace una breve mención a la utilidad de la óptica sin imágenes en varias aplicaciones solares, tanto térmicas como fotovoltaicas.

2.2. El valor máximo de concentración

Consideremos una fuente de radiación incidente o una apertura (un segmento en 2D, un círculo en 3D) y que llena isotrópicamente un ángulo $\pm\epsilon$ (en 2D)² o un ángulo sólido ϵ (en 3D). ¿Cuál es la concentración máxima de la radiación incidente que es posible lograr en este caso? En otras palabras, si a es el ancho de la apertura (área) y b el ancho de la apertura de salida (área), ¿cuál es el valor máximo de concentración C que se puede lograr: $C = a/b$?

La respuesta puede derivarse de la segunda ley de la termodinámica [4] o de la conservación del espacio de la fase [2] y es en 2D la ecuación (1), y la (2) en 3D. En estas ecuaciones, n es el índice de refracción en la apertura de salida (suponiendo que en la apertura de entrada sea $n = 1$). Para hacer la comparación debe destacarse que las lentes convencionales y los espejos parabólicos quedan por debajo de este límite en un factor de 3 ó 4.

² 2D: la geometría relevante está definida sobre el plano; el dispositivo tiene geometría cilíndrica; 3D: el dispositivo está definido en tres dimensiones.

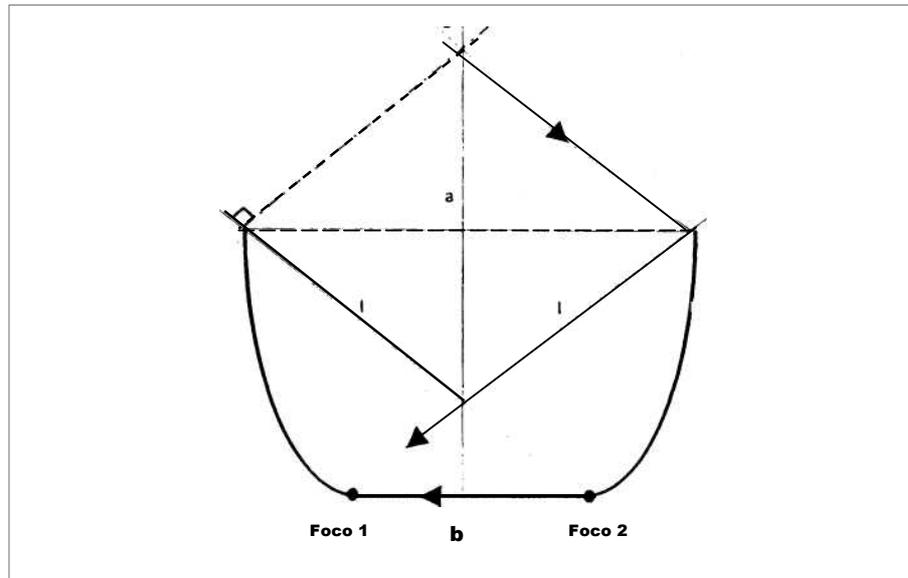
$$C_{\max} = n/\text{sen}\epsilon \quad \text{sen } \epsilon \quad (1)$$

$$C_{\max} = n^2/(\text{sen}\epsilon)^2 \quad \text{sen } \epsilon \quad (2)$$

¿Hay algún sistema práctico que esté funcionando en este límite? Hay muchos.

Consideremos el que se muestra en la figura 1. Los espejos son arcos de parábola con focos en los bordes del segmento b y con ejes respectivamente paralelos a $+\epsilon$ y a $-\epsilon$, de donde se deriva el nombre Concentrador Parabólico Compuesto (CPC).

Figura 1. Ejemplo de ópticas con $C \cong C_{\max}$.



Consideremos los dos rayos que inciden en los bordes de a desde la dirección $+\epsilon$. Invocando el principio de Fermat, la trayectoria óptica para ambos rayos debe ser la misma, ecuación (3),

$$l + a \cdot \text{sen}(\epsilon) = l + b \quad (3)$$

Para el caso $n = 1$, esto significa que $C = a/b = C_{\max} = 1/\text{sen}(\epsilon)$, como deseábamos demostrar.

En la apertura de salida la radiación se encuentra entre $\pm 90^\circ$, es decir que se perdió toda la información (incluida en la distribución angular de la radiación de entrada), como se esperaba según lo explicado en la Introducción. Ahora debe destacarse que la apertura de salida puede tener cualquier forma u orientación, por ejemplo, puede ser tubular en cuyo caso la óptica ya no sería un conjunto de arcos de parábola, [4] por lo que se aplica el nombre de colector «tipo CPC». Esto se usa en el diseño del reactor SOLWATER (discutido en otros capítulos). La figura 2 es un ejemplo de un CPC diseñado para una aleta con forma de V invertida.

Tampoco hay nada que evite que el dispositivo sea asimétrico y/o a y b podrían no ser paralelos entre sí, es decir, también es posible concentrar de una manera ideal la radiación que incide entre $+\epsilon_1$ y $-\epsilon_2$, en cuyo caso tendríamos la ecuación (4).

$$C_{\max} = 2/(\text{sen}\epsilon_1 + \text{sen}\epsilon_2) \quad (4)$$

Además, las consideraciones prácticas dictan que los CPCs no se construyen con su máxima altura, ya que la mitad superior contribuye poco con la concentración

a expensas de mucha área de espejo. Es así que normalmente están los CPCs marcadamente truncados [5,6].

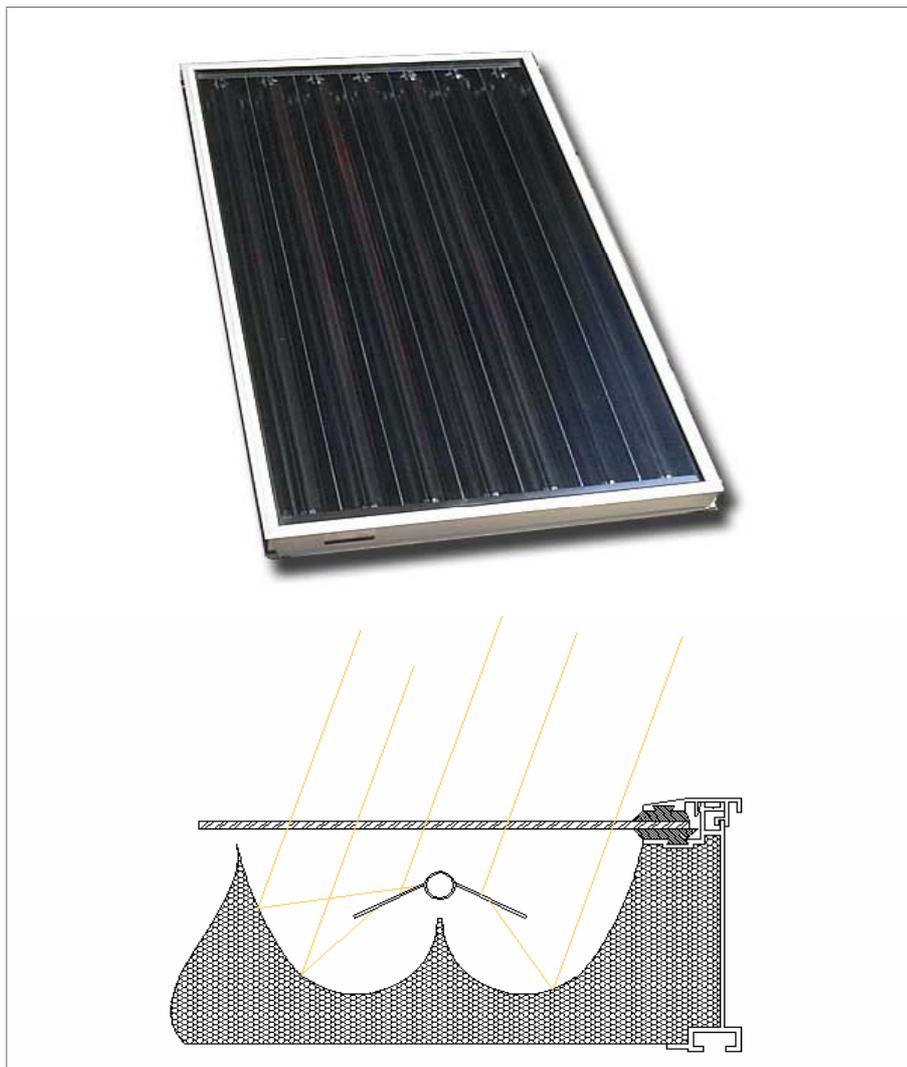
2.3. Aplicaciones térmicas

$$T < 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Las aplicaciones de baja temperatura tradicionalmente han utilizado colectores de placa plana, estacionarios, que recolectan la radiación difusa. Éstas son ventajas que es deseable preservar en cualquier alternativa pero que no se logran fácilmente (económicamente) a temperaturas más altas sin utilizar arreglos de doble cubierta o vacío.

Los concentradores convencionales tendrían que seguir el movimiento aparente del sol y no recolectan una porción importante de radiación difusa. Por lo tanto, la

Figura 2. Colector CPC [9]: (a) fotografía y (b) corte transversal de un canal que muestra la aleta de absorción con forma de V invertida y la óptica ideal de concentración asociada a la misma.



solución ideal es un concentrador del tipo CPC. Si è tiene el ancho suficiente como para acomodar el movimiento aparente del sol en el cielo durante todo el año, puede construirse de manera que sea completamente estacionario y, al mismo tiempo lograr que la pérdida de calor sea menor gracias al efecto de concentración. Este tipo de colectores existe [7], se han producido en el pasado (por ejemplo, [8] y están disponibles comercialmente, [9] a bajo costo y alta calidad. Su costo es el de un colector de placa plana de buena calidad y su rendimiento, de hasta $\dot{A}T/I = 0,08 \text{ m}^2/\text{W}$ puede ser superior al de los colectores tubulares evacuados.

La figura 2 es un ejemplo del estado del arte en lo que hace a colectores CPC [10], con un absorbedor que es completamente iluminado en ambos lados por la óptica correcta de tipo CPC.

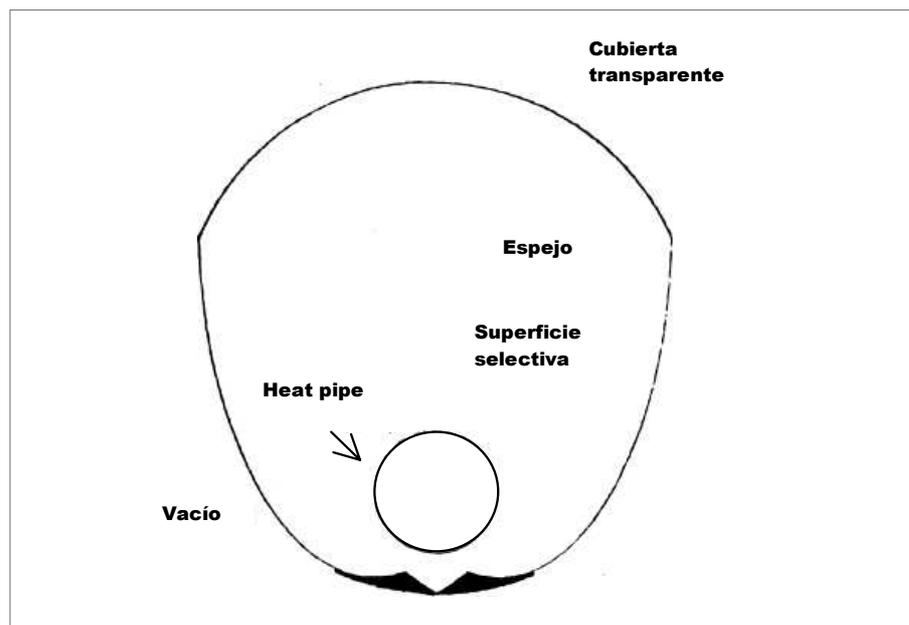
Aplicaciones como los sistemas solares de calefacción y refrigeración (absorción de efecto simple o adsorción), los sistemas para calentar agua, el secado solar y la desalinización, entre otros, se encuentran dentro del alcance de estos sistemas de tipo CPC. Aplicaciones recientes de óptica CPC incluyen cocinas solares [11-13].

$100^\circ\text{C} < T < 200^\circ\text{C}$

La misma tecnología, con valores de concentración levemente superiores (por debajo de 2, para conservar completamente la propiedad de estacionariedad [4], mejores materiales y una cubierta doble (película de teflón) puede ofrecer temperaturas de aproximadamente 150°C con eficiencias superiores a 0,50.

La combinación de un dispositivo tipo CPC con vacío [14] puede hacer que la temperatura se aproxime a los 180°C , figura 3.

Figura 3. Colector tipo CPC diseñado para concentrar la radiación incidente sobre un tubo y para acomodar el espacio grande entre el tubo externo de vidrio, cuya parte inferior está revestida internamente con una película reflectora, todo el volumen interno está al vacío; el tubo de vidrio se ha moldeado según la geometría requerida [B9].



De esta manera es posible contar con aplicaciones como el enfriamiento de absorción de efecto doble o la producción de vapor para la industria, con colectores completamente estacionarios.

Actualmente hay varias empresas que producen y venden colectores evacuados tubulares de vidrio y que utilizan espejos para iluminar absorbedores tubulares o con forma de aleta dentro de los envoltorios exteriores de vidrio. Éstos a menudo son una aproximación al CPC completamente desarrollado que también podrían utilizar para ese propósito.

$$250^{\circ}\text{C} < T < 500^{\circ}\text{C}$$

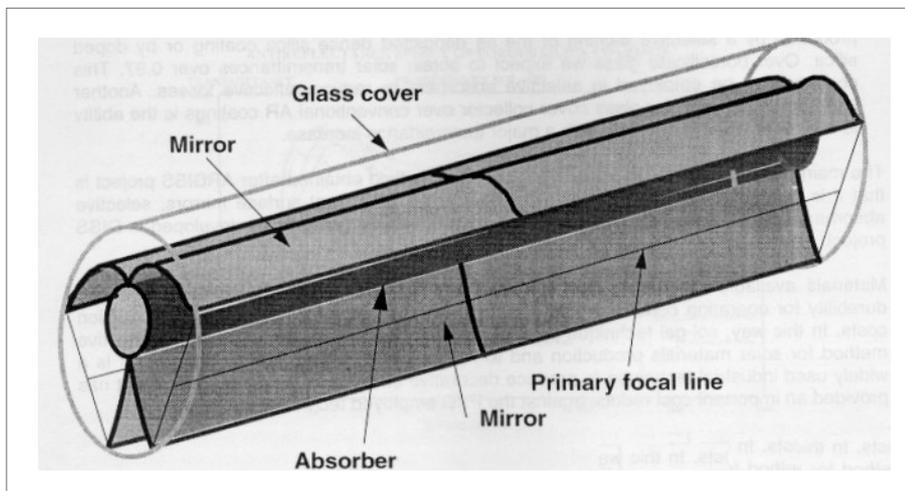
Sin embargo, si el objetivo es lograr temperaturas más altas, es necesario un valor mayor de concentración.

El colector simple tipo CPC está en desventaja porque, para ángulos más pequeños, debe ser muy alto en relación al ancho, lo que lo vuelve impráctico. La solución [1,3,15] es combinarlo con colectores de enfoque (primera etapa) colocándolo en el plano focal o cerca de él para lograr así una mayor concentración (segunda etapa).

Este procedimiento aumenta la concentración (normalmente en un factor de 2 o superior) de los colectores de enfoque para el mismo ángulo de aceptación, y/o relaja la precisión de rastreo.

En la actualidad se está diseñando un concentrador de segunda etapa para un canal parabólico [16] para producir directamente vapor a 450°C , para la producción de electricidad (figura 4).

Figura 4. Un concentrador tipo CPC de segunda etapa diseñado para un receptor solar de canal parabólico.



$$T > 600^{\circ}\text{C}$$

A temperaturas más altas es necesario que la concentración sea mayor, por lo que se utilizan geometrías 3D. Aplicaciones como la producción de electricidad con un motor Stirling, la pirólisis integral de biomasa, carbón o hidrocarburos, la obtención de combustibles más limpios, el procesamiento de materiales, el almacenamiento

químico de energía en reacciones químicas endotérmicas, son sólo algunos ejemplos de usos muy interesantes de la energía solar.

Nuevamente, la solución ideal es la combinación de platos parabólicos con concentradores tipo CPC de segunda etapa.

Para la segunda etapa, la primera etapa actúa como una fuente de energía que se encuentra a una distancia finita. En este caso, la solución ideal puede ser de diferentes tipos: un CEC (concentrador elíptico compuesto, [17]), un TERC (concentrador a medida de rayos marginales, por sus siglas en inglés [18]), o el concentrador tipo trompeta [19]. Se desarrolló una combinación de un plato parabólico y un TERC para fundir zirconia a 2.700°C; la figura 5 muestra el TERC diseñado para el Horno Solar de la Plataforma Solar de Almería [20].

Figura 5. TERC secundario para un plato parabólico primario.



Otro concentrador convencional, tipo Fresnel, es la Torre Central con helióstatos de seguimiento. Nuevamente, si la idea es, por ejemplo, generar una temperatura de 1.300°C y combinar la energía solar con una turbina de gas en un ciclo combinado para la producción de electricidad [21], es indispensable contar con un dispositivo de segunda etapa de óptica sin imágenes y es posible lograr una eficiencia de recolección superior al 90%.

¿Cuál es la altura máxima?

La respuesta se encuentra en la aplicación de la ecuación (2) al caso de la apertura solar, o sea $\theta = 0,27^\circ$. Con un índice de refracción de 1,78 (zafiro) se obtiene $C_{\max} = 140.000$.

Ya sabemos que es necesario utilizar un concentrador de primera etapa – un plato parabólico – el que, combinado con un dispositivo ideal de óptica sin imágenes hecho de zafiro, estará cercano a ese límite. Debe notarse que este dispositivo depende de una reflexión interna total 2 [22] dentro de la segunda etapa (de zafiro) para lograr su concentración. Este dispositivo ha sido construido [23] y logró 84.000 ± 2.000 veces la intensidad del sol, 72 W/mm^2 , mayor que el flujo en la superficie solar, de 63 W/mm^2 . Las concentraciones muy altas tienen aplicaciones especiales como el bombeo directo de un láser de Ni Yag [24].

Mientras que el costo de las células solares no disminuya lo suficiente, e incluso si nunca lo hace, la combinación con dispositivos de óptica sin imágenes sería una excelente solución.

Se ha estudiado una gran variedad de configuraciones [25,26]. En la actualidad hay planes para el desarrollo industrial de una celda cristalina con dos caras de Si y con óptica CPC del tipo descrito en [7] en vez de utilizar la reflexión sobre un espejo.

2.5. Conclusiones

Cada vez más se percibe a la óptica sin imágenes como la forma de lograr la recolección de energía solar para una amplia gama de aplicaciones con costo más bajo y/o mayor simplicidad; en algunos casos incluso resulta imposible (o demasiado impráctico) lograr los objetivos deseados sin ella.

Para temperaturas más bajas ya existen colectores que son un avance en cuanto a la calidad con respecto a las tecnologías solares convencionales y bien pueden convertirse en el futuro estándar para la próxima década.

3. Aplicación de la óptica sin imágenes al tratamiento de agua

3.1. Introducción

Como se vió en la sección 2, se ha diseñado colectores solares para concentrar o simplemente para entregar radiación solar de una forma ideal a los absorbedores (sin pérdidas ópticas para un ángulo de aceptación dado, junto con la concentración más alta posible compatible con ese ángulo de aceptación), listas para muchas aplicaciones diferentes. Un caso específico interesante es el que ocurre cuando los absorbedores son colocados dentro de un líquido con un índice de refracción n .

Éste es el caso de la fotocatalisis, cuando lo que importa es la recolección de radiación solar (sólo UV o UV más la porción de mayor energía del espectro visible, el azul) en presencia de un catalizador para tratar efluentes líquidos (detoxificación) o aguas con contaminación orgánica o biológica (aguas superficiales, por ejemplo) para producir agua potable. La forma en la que se agrega el catalizador al efluente a tratar condiciona el diseño óptico.

Este capítulo describe qué es lo que se debe hacer cuando el catalizador se fija a un tubo, cuando se fija a una aleta paralela al eje óptico del concentrador tipo CPC, así como cuando se encuentra en suspensión. Tenemos en trámite una patente de estas soluciones ópticas [9] y se encuentra en preparación un trabajo fundamental que explica en detalle el diseño óptico [27].

A continuación se describe brevemente la óptica utilizada y se muestra la solución práctica desarrollada para cada uno de los tres casos. Los prototipos resultantes están en etapa de pruebas químicas y biológicas y los resultados se discuten a lo largo del Curso y del Simposio que sigue al Curso [28,29].

3.2. Diseño óptico [9,27]

Todos los dispositivos prácticos que utilizan CPCs para aplicaciones térmicas tienen como característica común que sus absorbedores están inmersos en aire o al vacío, por lo que no aprovechan el grado extra de concentración que resultaría si el absorbedor estuviera inmerso en un medio con un índice de refracción n [27].

Normalmente, el agua a tratar circula por tubos, por lo que es conveniente tener recolectores solares con absorbedores tubulares transparentes para permitir que la radiación solar penetre el agua en circulación. En cuanto al catalizador, puede encontrarse en suspensión o estar fijo a un sustrato con una geometría dada.

En este capítulo consideramos al catalizador en dos configuraciones preferidas: sobre un sustrato tubular y sobre una aleta vertical fija en la parte inferior de un tubo. La tercera opción, que es tenerlo en suspensión, no proporciona una nueva solución al problema.

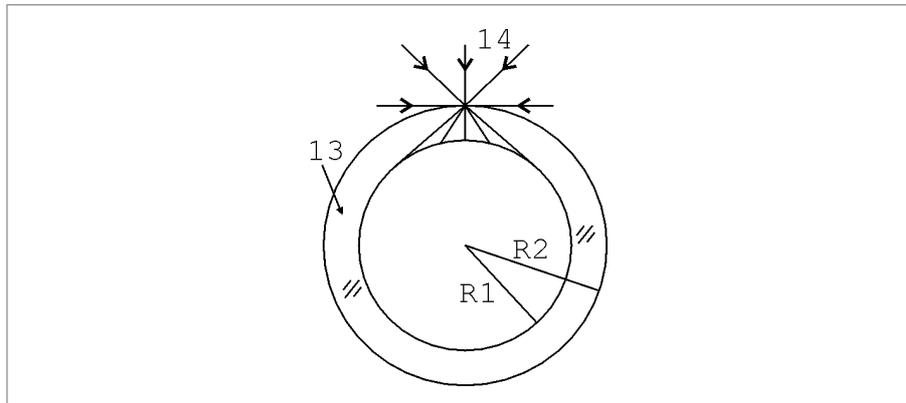
En este capítulo no se tuvo en cuenta el efecto del índice de refracción del vidrio; esto equivale a suponer que el espesor del vidrio es próximo a cero. Esta suposición simplifica el análisis; ni la solución ni las conclusiones se verían afectadas en gran medida si se considerase el espesor de la pared de vidrio (típicamente ~ 2 mm para tubos de ~ 50 mm de radio).

Catalizador fijo

La primera configuración es el absorbedor tubular inmerso en un fluido con un índice de refracción de valor n . El fluido circula entre dos tubos concéntricos. La segunda configuración es una aleta vertical unida a la parte inferior de un tubo e inmersa en un fluido con índice de refracción de valor n . El fluido circula entre la aleta y el tubo externo. En [30] los autores ya discuten esta solución.

El catalizador se encuentra fijado sobre un tubo

Figura 6. Tubo de vidrio transparente con un tubo interior concéntrico, cubierto por el catalizador.

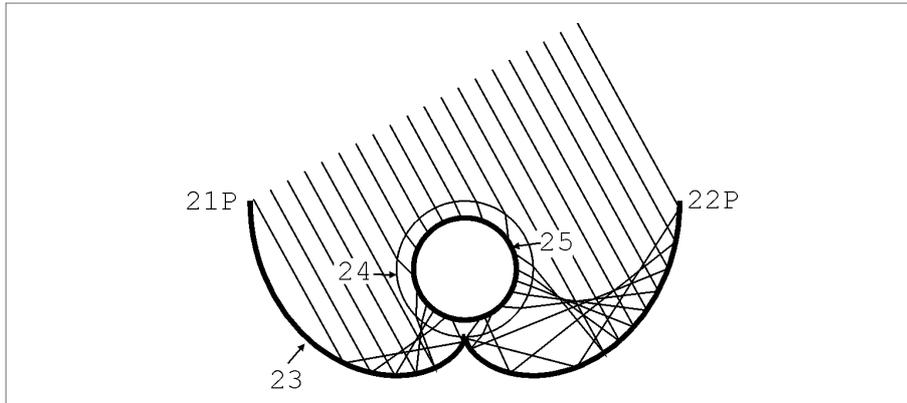


La figura 6 muestra un tubo interno de radio $R1$ inmerso en un medio líquido 13 con un índice de refracción n . Este líquido está contenido dentro de un tubo de radio $R2$. La relación entre los radios es $R1 = R2/n$. Todos los rayos de luz que inciden sobre el tubo exterior son refractados y absorbidos sobre el tubo interior.

En las aplicaciones UV lo que importa es en realidad la recolección máxima de radiación y no el grado de concentración que puede llegar a lograrse restringiendo el ángulo de aceptación. De esta manera el ángulo de aceptación del dispositivo debe ser lo más grande posible, en este caso $\pm\pi/2$.

La figura 7 muestra la óptica tipo CPC diseñada para esta configuración. Recolecta toda la luz que ingresa por la apertura de entrada contenida entre los puntos 21P y 22P y la concentra sobre el tubo interno. Los espejos están moldeados con involutas hacia la superficie externa 24 de la capa dieléctrica. Los rayos del

Figura 7. Óptica tipo CPC diseñada para el absorbedor de la figura 1; resultado del seguimiento de un rayo proveniente de una dirección particular.



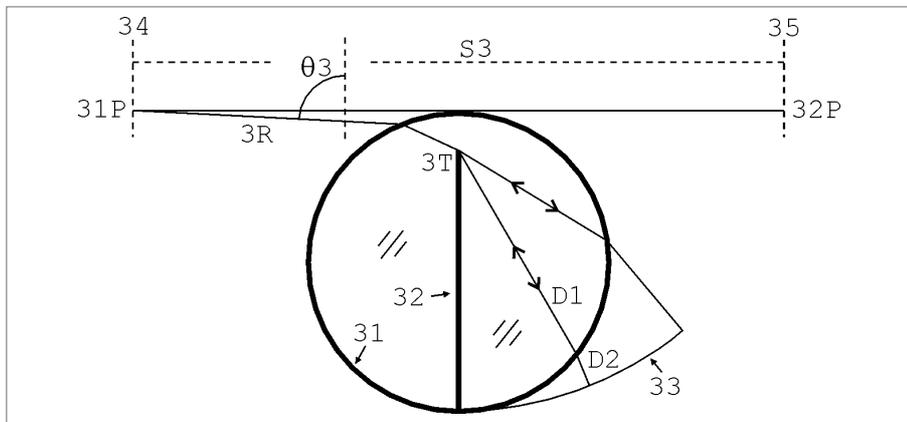
borde para el tubo exterior 24 son tangentes a él y son reflejados por el espejo como rayos nuevamente tangentes a él. Sin embargo, luego de la refracción, los rayos se vuelven tangentes al receptor 25, de manera que en realidad el espejo en involuta transforma los rayos entrantes tangentes al tubo 24 externo en rayos tangentes al tubo 25 interno, es decir, transforma los rayos del borde de la radiación entrante en rayos del borde del receptor interno. Esta óptica logra el grado máximo de concentración de la radiación incidente sobre el tubo interno que es exactamente n , sin ninguna pérdida óptica (geométrica). Si se elige $R2$ de manera que sea mayor que el valor mencionado, habrá algo de pérdida en el factor de concentración, pero igualmente se recolectará toda la radiación. Si se elige $R2$ de manera que sea menor, entonces se perderá algo de radiación, que saldrá del arreglo tubular concéntrico.

Si se eligiera un ángulo de aceptación más pequeño, la modificación seguiría el diseño convencional de la óptica de tipo CPC para receptores tubulares [31].

El catalizador se encuentra fijado sobre una aleta (vertical)

Se elige una solución vertical (es decir, sobre el eje óptico del sistema) porque cualquier otra orientación de la aleta tendría pérdidas ópticas a través del espacio entre la óptica y el absorbedor.

Figura 8. Óptica de la parte inferior en el caso de una aleta vertical inmersa en un líquido de índice n .



Por este mismo motivo buscamos una solución en la que la aleta se encuentre en la parte inferior del tubo.

La figura 8 muestra el receptor con forma de aleta 32 de pie sobre la base del tubo y extendiéndose verticalmente hasta el punto 3T. Nuevamente, el tubo contiene un líquido con índice de refracción n . La apertura de entrada del dispositivo lleno estará entre los puntos 31P y 32P. Es posible diseñar un sistema óptico para concentrar la luz hacia el receptor interno 32. Igual que antes, será un espejo y el diseño comienza con la porción 33, que se calcula de manera tal que los rayos que entran por la punta 3T del receptor sean reflejados de vuelta hacia 3T. Esto puede lograrse manteniendo constante la longitud del camino óptico entre 3T y el espejo 33 para todos sus puntos. Esto significa que $n D1 + D2 = \text{constante}$. El espejo termina cuando el rayo R3 que se está utilizando para el diseño hace un ángulo dado θ_3 con la vertical. Este ángulo es el ángulo de diseño óptico del dispositivo y, como antes, debe ser cercano a $\delta/2$.

Ahora el diseño debe continuar enfocando los rayos al punto 3T formando un ángulo θ_3 con la vertical. Como se muestra en la figura 9, estos rayos son perpendiculares a un frente de onda plano 4W. Sin embargo, el tubo exterior forma un cáustico 41 de estos rayos dentro del tubo y el diseño no puede continuar.

Figura 9. Se forma un cáustico dentro del tubo de vidrio.

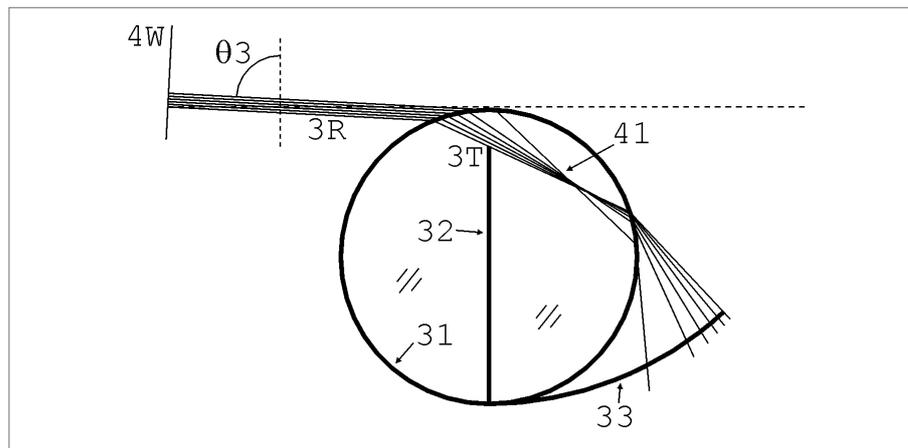
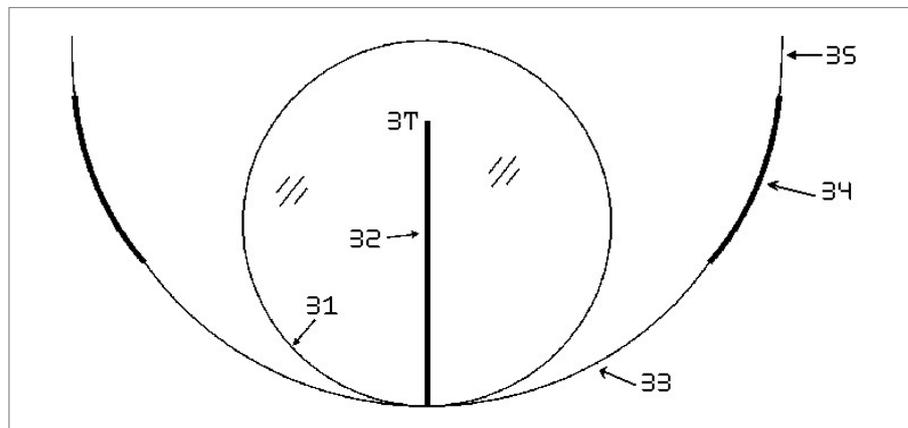


Figura 10. Óptica completa para el caso en el que el ángulo de aceptación es $\theta_3 = \pm 86^\circ$.



La figura 10 muestra la solución final. Los detalles son demasiado complicados como para poder dar una explicación sencilla como es la intención para el presente capítulo, por lo que sólo se incluyen algunos comentarios.

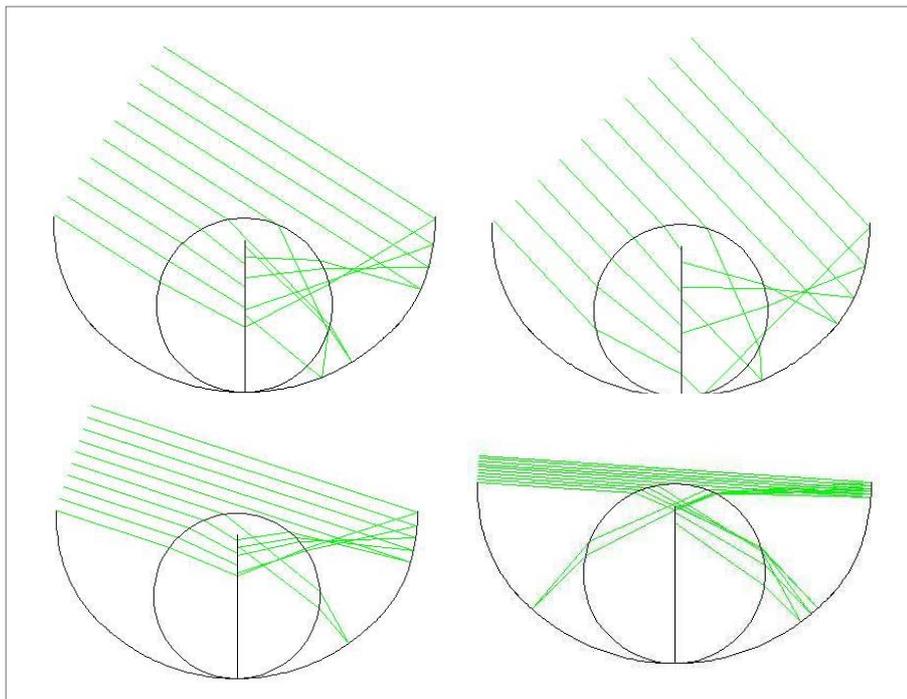
La porción 33 refleja la radiación desde el frente de la onda 4W hasta la punta superior de la aleta (punto 3T). La porción 34 se obtiene de manera de que los rayos tangentes al tubo sean reflejados hacia la punta 3T del receptor. Todos sus puntos también cumplen una condición de longitud constante de camino óptico; la constante se calcula de manera de garantizar la continuidad del espejo [25]. Esta porción del espejo no recibe luz del tubo. Por este motivo, los rayos entrantes del borde considerados para el diseño son tangentes al tubo según la descripción ya mencionada.

Si se hace una elección conveniente de ϵ_3 y S (el tamaño de la apertura de entrada), el espejo será continuo entre las porciones 33 y 34. Sin embargo, la derivada de la forma del espejo tendrá una discontinuidad en el lugar donde se encuentren.

A causa de la existencia de cáusticas dentro del tubo, el método de diseño no garantiza la concentración ideal de luz sobre el receptor. Por lo tanto, la apertura de entrada es menor de lo que sería en el caso ideal. En el caso presentado arriba, la dimensión de la apertura de entrada es un 93% de la ideal.

El tamaño ideal de la apertura de entrada puede calcularse igualando la *étendue* para la fuente y para la radiación entrante. La *étendue* para el receptor está dada por $ES = 2x2xnxH$, donde H es la longitud de la aleta. La *étendue* para la radiación entrante es $ER = 2 \times S \times \sin(\epsilon_3)$. Al hacer $ES = ER$ es posible calcular el valor ideal para S, el tamaño de la apertura de entrada.

Figura 11. Resultado del rastreo de rayos incidentes desde cuatro direcciones particulares



Una opción alternativa habría sido recuperar la concentración total permitiendo un espejo discontinuo, pero esto habría causado pérdidas ópticas de la radiación entrante y la solución final habría sido menos elegante y más difícil de fabricar.

La figura 11 es el resultado de hacer un rastreo de los rayos provenientes de cuatro direcciones particulares.

Catalizador en suspensión

Este diseño es igual al de la figura 7, la radiación penetra el efluente y no se aprovecha el factor de concentración extra posible.

3.3. Prototipos producidos

Se produjeron algunos prototipos para los proyectos CADOX (catalizador en suspensión) y SOLWATER, AQUACAT (catalizador fijo). Estos prototipos fueron producidos según las demandas de los proyectos específicos y se muestran en las figuras 7 a 11, a continuación.

Todos los tubos utilizados fueron de vidrio de borosilicato [32] de 1,8 mm de espesor, 50 mm de diámetro externo y 150 mm de longitud. Los espejos están hechos de láminas de aluminio de 0,4 mm de espesor [33] y se les dio la forma necesaria para respetar las especificaciones de la óptica ya descrita, en cada caso. Las conexiones se hicieron de plástico resistente a la radiación UV.

Los prototipos AQUACAT y SOLWATER

Las figuras 12 a 15 a continuación muestran los prototipos construidos para AQUACAT y para SOLWATER. En ambos casos puede observarse claramente la ubicación de la aleta y el arreglo de los tubos concéntricos. El catalizador está fijado sobre papel [32] (ver Capítulo 9) y es posible verlo fuera de los tubos de vidrio en las figuras 13 y 15. En el caso de la aleta, el papel envuelve a una aleta plástica, y en el caso de los tubos envuelve un tubo plástico. Las bandejas de ambos colectores están conectados en serie y cubren un área de recolección útil de $\sim 1\text{m}^2$.

Figura 12. Prototipo para el caso tubular, sin el absorbedor.



Figura 13. Detalle de un canal y el absorbedor tubular que se está insertando.

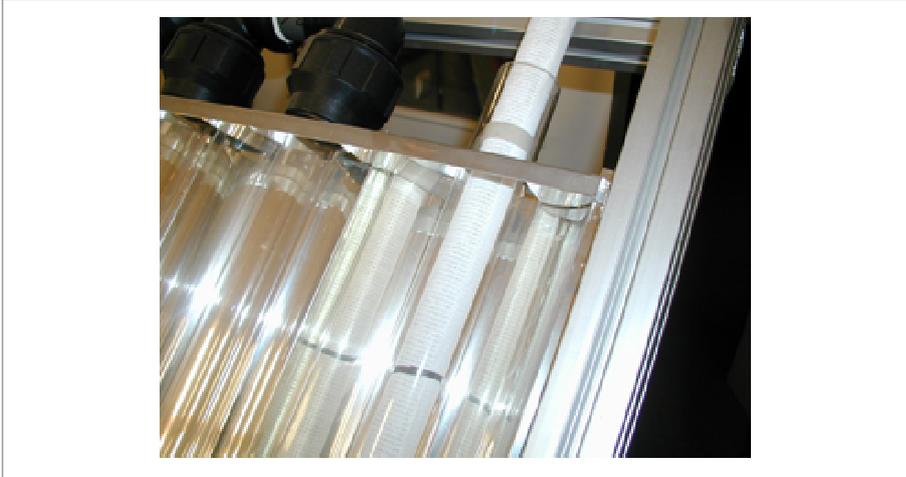


Figura 14. Prototipo para el caso de la aleta, sólo los espejos, los tubos de vidrio y las conexiones.

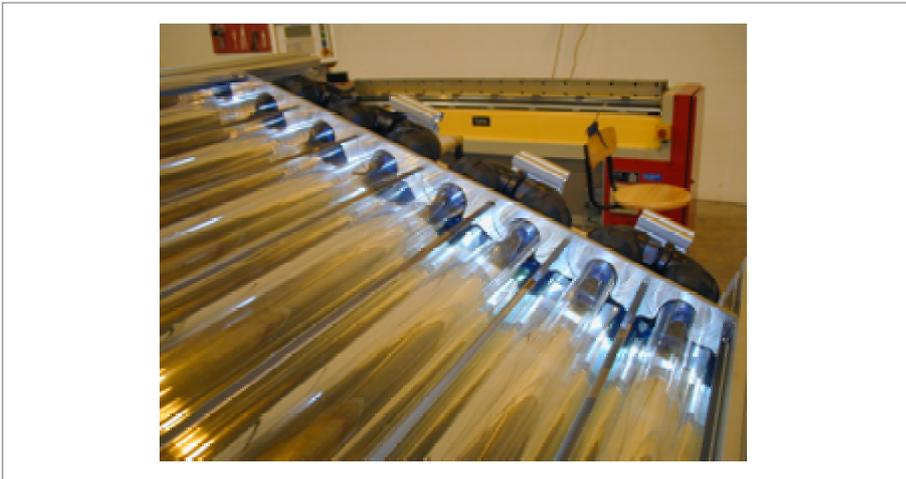


Figura 15. Detalle de un canal y el absorbedor en aleta que se está insertando.



Una vez que los prototipos están llenos con agua, la apertura de entrada de arriba se vuelve completamente blanca (el color del absorbedor), lo que señala que la óptica funciona según lo que se requiere.

El prototipo CADOX

En el caso del prototipo CADOX, los tubos fueron conectados en serie, de a dos, definiendo de esta manera canales de aproximadamente 3 metros de longitud. Éstos a su vez fueron conectados en serie entre ellos para lograr el prototipo de 4 m² que se puede observar en la figura 16.

Figura 16. Proyecto CADOX: Prototipo de 4m², se observan los tubos, los espejos y las correspondientes conexiones plásticas.



4. Conclusiones

Se introdujo y explicó el tema de la Óptica sin Imágenes.

Se presentaron también ejemplos de su aplicación para la recolección de energía solar.

Luego se aplicó óptica de tipo CPC o sin imágenes al tratamiento de agua y se procedió a analizar y discutir varias soluciones específicas que recolectan la radiación UV y la porción azul del espectro visible.

Se indicó el rendimiento óptico en el caso de una nueva solución presentada para el caso de una aleta inmersa en agua.

Luego se aplicaron los principios analizados al desarrollo de tres tipos de colectores que se utilizan dentro del marco de tres proyectos financiados por la UE bajo tres contratos específicos, para estudiar así los procedimientos para el tratamiento de aguas con contaminación química y aguas con contaminación biológica.

Esta aplicación es un trabajo en desarrollo y aún está pendiente la obtención y presentación de los resultados finales.

(Este trabajo ha sido financiado por la UE bajo los contratos SOLWATER [35], AQUACAT [36] y CADOX [37]).

Referencias

- 1) M. Collares Pereira, A. Rabl y R. Winston, Lens-Mirror Combinations with Maximal Concentration, *Applied Optics*, 16, 10, (1977).
- 2) R. Winston y W.T. Welford, *The Optics of Non-Imaging Concentrators*, Academic Press, New York, (1948).
- 3) M. Collares Pereira, High Temperature Solar Collector with Optimal Concentration - Non Focusing Fresnel Lens with Secondary Concentrator, *Solar Energy*, 23, (1979).

- 4) A. Rabl, *Active Solar Collectors and Their Applications*, Oxford University Press, New York, (1985).
- 5) M. Collares Pereira, M.J. Carvalho, J.M. Gordon y A. Rabl, Truncation of CPC Solar Collectors and its Effect on Energy Collection, *Solar Energy*, 35, 5, (1985).
- 6) M. Collares Pereira, M.J. Carvalho y J.M. Gordon, Economic Optimization of Stationary Non-Evacuated CPC Solar Collectors, *Journal of Solar Energy Engineering*, (1987).
- 7) M. Collares Pereira, M.J. Carvalho, J.C. Oliveira, J. Farinha Mendes, A. Haberle y V. Wittwer, Optimal and Thermal Testing of a new 1.12X CPC Solar Collector, Sun at Work in Europe, (Junio 1994).
- 8) SETSOL, Lda. - Capa Rota, Manique de Cima, 2750 Sintra, Portugal.
- 9) Portuguese patent application, CPC type collectors for solar energy collection in absorbers immersed in a liquid of index of refraction n, J. Chaves, M. Collares Pereira, J. Correia de Oliveira.
- 10) AO SOL, Energias Renováveis, Lda; www.aosol.pt.
- 11) SUN-CO, Companhia de Energia Solar S.A., www.sun-cook.com.
- 12) M.Collares-Pereira, J. Farinha Mendes, R. Leal y J. Almeida, Solar cooker incorporating CPC type optics and heat pipe technology description and testing, EuroSun, the 5th ISES Europe Solar Conference, Freiburg, Germany (20 a 23 de Junio 2004).
- 13) M.Collares Pereira, J.P.Almeida y J.Correia de Oliveira, Description and testing of a novel solar box type cooker incorporating CPC type optics, ISES Solar World Congress, Goteborg, (Junio 2003).
- 14) M. Collares Pereira y J. Farinha Mendes, Tubo de Calor para Aplicacao em 30 Colector Solar do Tipo CPC, IV Congresso Iberico da Energia Solar, Porto, (Julio 1988).
- 15) M. Collares Pereira, J.M. Gordon, A. Rabl, B. Leide y M.J. Carvalho, Accuracy of the European Solar Water Heater Test Procedure, Part 2: Prediction of Long-Term Performance, *Solar Energy*, 47, 17-25, (1991).
- 16) ARDISS (EU) Project: leader - CIEMAT (Madrid) with the participation of INETI (Lisbon).
- 17) HCM Project with PSA - Almeria (Spain), with the participation of INETI.
- 18) T.M. Gordon y H. Ries, Tailored Edge-Ray Concentrators as Ideal Second Stages for Fresnel Reflectors, *Applied Optics*, 93, 32, 13.
- 19) E. Kritchman, Optimized Second Stage Concentrator, *Applied Optics*, 20:2929, (1981). E. Kritchman, Non-Imaging Second Stage Elements - a Brief Comparison, *Applied Optics*, 20:3824, (1982).
- 20) M. Collares-Pereira, J. Farinha Mendes, D. Martinez, J. Rodriguez y D. Alarcon Padilla, Testing results of a second stage concentrator designed for the solar furnace of plataforma solar de Almeria, *J. Phys.*, IV France, 9 (1999).
- 21) Archimedes Proposal, presented to JOULE Program (DGXII).
- 22) A. Luque y J.C. Minano, Optical Aspects in Photovoltaic Energy Conversion, *Solar Cells*, 31, 237-258, (1991).
- 23) R. Winston, D. Locke, P. Gleckman, H. Krebs, J. O'Gallagher y D. Sagie, Brighter than the Sun, Proceedings ISES Solar World Congress, Denver, (1991).
- 24) A Yogeve, Weizman Institute of Science, Rebovot, 76100, Israel.
- 25) M. Collares Pereira y J.M. Gordon, Amorphous Silicon Photovoltaic Solar Cells - Inexpensive, High Yield Optical Designs, *AS ME Journal of Solar Energy Engineering*, (1989).
- 26) J.C. Minano y J.C. Gonzalez, New Method of Design of Non-Imaging Concentrators, *Applied Optics*, 31(16), (1992).
- 27) J. Chaves, M. Collares-Pereira, The optics of New CPC solar collectors for TiO₂ and Ru(II) Singlet Oxygen Photocatalysis and Photo Fenton for the treatment of surface and waste waters, en redacción.
- 28) J. Blanco, S. Malato, M. I. Maldonado, I. Oller, W. Gernjak, D. Alarcón, P. Fernández, First Commercial Step in Solar Photocatalytic Applications, *Solar Paces*, Mexico, (2004).
- 29) P. Fernández, J. Blanco, D. Alarcón, S. Malato, Applied to Drinking Water Disinfection Using Low Cost Solar Collectors, *Solar Paces*, Mexico, (2004).
- 30) J.C. Miñano, J.M. Ruiz y A. Luque, Design of Optimal and ideal 2-D concentrators with the collector immersed in a dielectric tube, *Applied Optics*, 22(24), (1983).
- 31) R. Winston y W.T. Welford, Non Imaging Optics.
- 32) Schott Rohrglass-Germany.
- 33) Alanod, Aluminium Veredlung, GmbH%Co.KG- Egerstr.12 , 58256 Ennepetal, Germany.
- 34) Ahlstrom Research and Competence Centre S.A.- Z.I de l'Abbaye, Impasse Louis Champin 38780 PONT EVEQUE, France.
- 35) SOLWATER- INCO IC ICA4-CT-2002-10001.
- 36) AQUACAT- INCO- IC A3-CT-2002-10016.
- 37) CADOX- EESD-ESD-3 ; EVK1-CT-2002-0012.