

DISEÑO DE REACTORES PARA FOTOCATÁLISIS: EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS DISTINTAS OPCIONES

Julián Blanco Gálvez, Sixto Malato Rodríguez, José Peral, Benigno Sánchez y Ana Isabel Cardona

1. INTRODUCCIÓN

Existen varios factores importantes a la hora de diseñar un reactor fotocatalítico dado que la necesidad de utilizar un catalizador sólido complica el proceso al añadir otra fase al sistema. En este tipo de reactores es evidente que, además de tener que conseguir un buen contacto entre los reactivos y el catalizador (elevada área superficial de catalizador por unidad de volumen del reactor), es igualmente necesario lograr una exposición eficiente del catalizador a la luz útil para el proceso (distribución óptima de luz dentro del reactor). Además hay que considerar los parámetros convencionales tales como distribución de flujo, mezclado e interacción entre reactivos y catalizador, transferencia de masa, etc, que juegan un papel relevante como ya se ha explicado anteriormente [1].

También se debe de tener en cuenta que el diseño y escalado de un reactor multifase, en las diferentes posibles opciones posibles (catalizador en suspensión o fijado en algún tipo de soporte para el caso de procesos en agua, o bien catalizador monolítico o también soportado para el caso de procesos en fase gaseosa), es un problema considerablemente más complejo que el diseño y escalado de un reactor químico convencional o un fotorreactor homogéneo.

Es evidente que la aplicación práctica de todo proceso fotocatalítico va a requerir el diseño de un fotorreactor que sea eficiente. Hasta la fecha, la investigación básica realizada a nivel de laboratorio se ha basado, normalmente, en dispositivos experimentales en los cuales la eficiencia no resultaba tan importante como la obtención de unas condiciones experimentales que permitiesen una adecuada reproducibilidad de resultados para la obtención de un conocimiento exhaustivo sobre la influencia de los diferentes parámetros relevantes del proceso (Figuras 1 y 2). Este planteamiento, que resulta adecuado desde un punto de vista científico, no es suficiente cuando se intenta realizar un cambio de escala para poder llevar a una aplicación práctica los conocimientos generados.

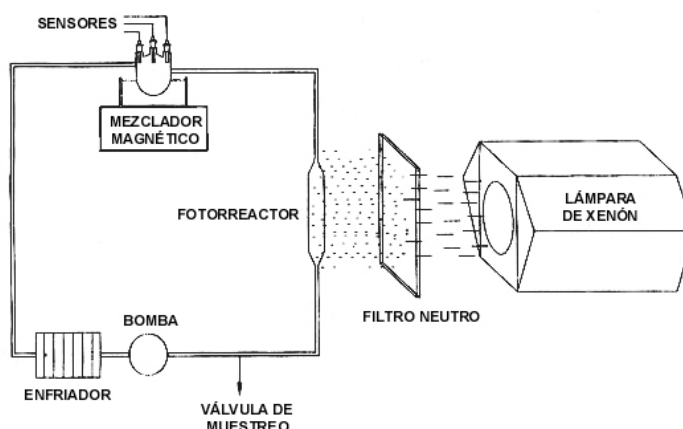


Figura 1. Sistema fotocatalítico en recirculación con reactor iluminado mediante lámparas.

Los dos conceptos de reactores más comunes en sistemas fotoquímicos de laboratorio son los representados en las Figuras 1 y 2. En el primer caso se representa un fotorreactor iluminado dentro de un sistema en recirculación, mientras que el segundo representa un sistema fotoquímico de reactor continuamente agitado.

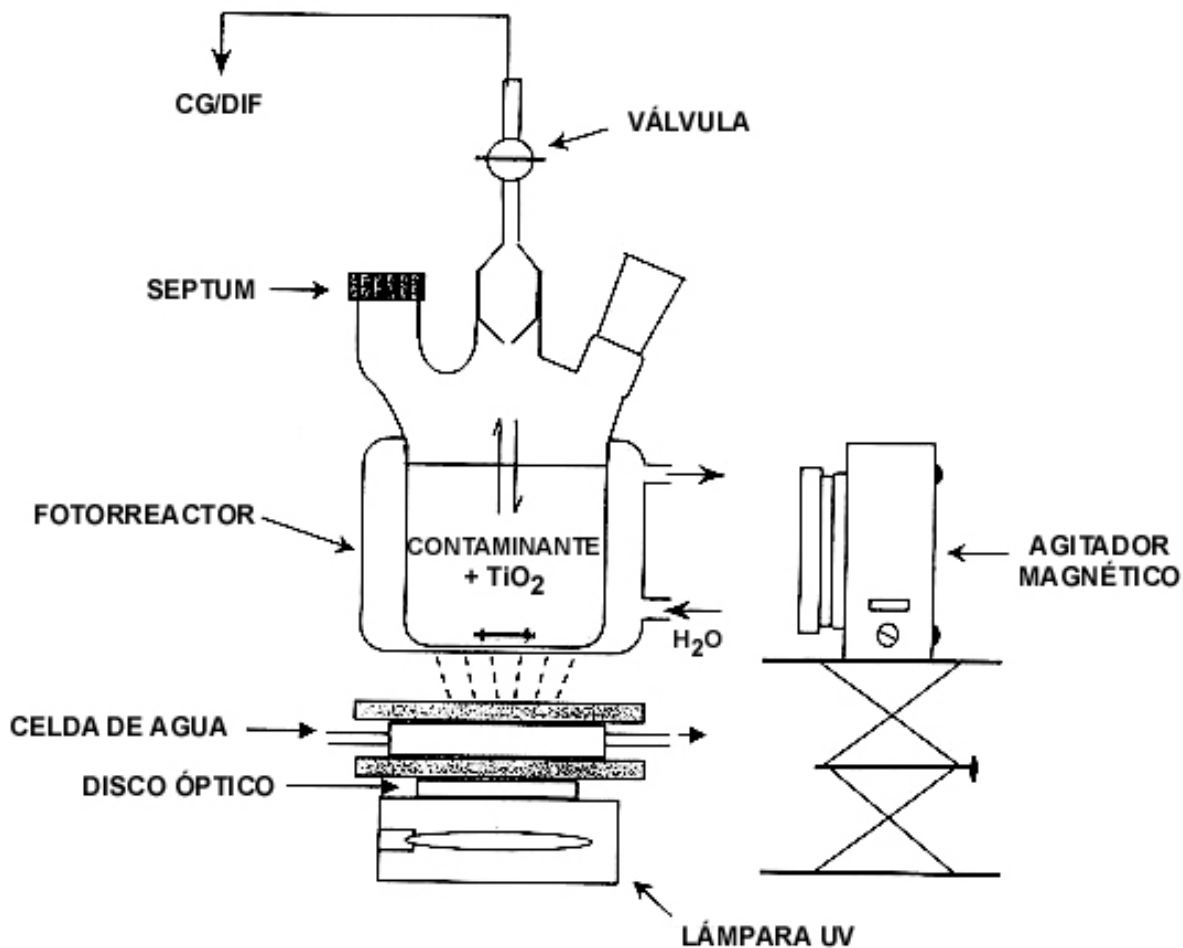


Figura 2. Sistema fotocatalítico de reactor continuamente agitado iluminado con lámparas.

Resulta claro que en este tipo de configuraciones, usadas típicamente en sistemas experimentales de laboratorio, sólo un determinado porcentaje de los fotones útiles son interceptados por el reactor por lo que, desde un punto de vista práctico, son altamente ineficientes. No es hasta el planteamiento de los primeros diseños de plantas piloto que aparecen diseños optimizados de reactores para procesos de fotocatálisis con TiO₂. Estas primeras plantas piloto fueron desarrolladas, a finales de la década de los 80 y considerando reactores que utilizaban la luz solar, por el *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) y *Sandia National Laboratories*, ambos en USA.

Estos primeros sistemas experimentales (la Figura 3 muestra uno de ellos) utilizaron colectores cilindro parabólicos, inicialmente diseñados para aplicaciones térmicas, que fueron modificados simplemente reemplazando el tubo receptor por un tubo de Pyrex[®] a lo largo del cual fluía el agua contaminada [1]. Desde entonces diferentes conceptos con una amplia variedad de diseños han sido propuestos y desarrollados en todo el mundo, en un continuo esfuerzo por aumentar la eficiencia y reducir los costes de los sistemas fotocatalíticos para la descontaminación y el tratamiento de aguas y gases.



Figura 3. Colector cilindro-parabólico adaptado para fotocátalisis solar. Experiencia realizada por National Renewable Energy Laboratory en Livermore (California) en 1991 para el tratamiento de agua contaminada por tricloroetileno. Foto por cortesía de NREL (USA).

Una de las primeras cuestiones relevantes que aparecen a la hora del diseño de reactores para procesos de fotocátalisis es la decisión entre reactores que van a trabajar con luz concentrada o los que se basan en sistemas sin concentración lumínica, en sistemas tanto en fase acuosa como gaseosa. Los sistemas de concentración presentan la ventaja de tener un área de reactor sustancialmente menor, lo que puede significar un volumen más reducido de reactor, un circuito menor y una mayor facilidad para confinar, controlar y manipular el fluido que se pretende tratar. Por lo tanto, la utilización de reactores que van a trabajar con alta irradiancia o radiación concentrada parece lógica, desde los puntos de vista tanto económico como ingenieril, cuando se trate de reactores que presenten una alta complejidad, elevada calidad en sus materiales (por ejemplo, el uso de cuarzo para conseguir una elevada transmisividad de la radiación UV), o costosos mecanismos de soporte o fijación del catalizador (este coste elevado puede proceder tanto del sistema de soporte en sí, como del derivado del necesario reemplazamiento periódico del citado catalizador soportado).

No obstante, los sistemas basados en reactores con concentración o alta irradiancia lumínica tienen tres importantes desventajas frente a los sistemas sin concentración. La primera es su invalidación para el uso de la luz solar ya que no pueden concentrar (y, por tanto, aprovechar) la radiación solar difusa; esto no es importante en el caso de aplicaciones térmicas de la radiación solar dado que la radiación difusa es una pequeña fracción de la radiación solar total. Sin embargo, como ya se ha reseñado, la descontaminación fotocatalítica con TiO_2 como catalizador utiliza sólo la fracción UV del espectro solar, y ya que esta radiación no es absorbida por el vapor de agua atmosférico, se produce una dispersión de dicha radiación a lo largo de la atmósfera similar a la que se produce con la longitud de onda

correspondiente al color azul y que hace que veamos el cielo de ese color. Como ejemplo, esta dispersión (conversión de radiación UV directa en difusa) puede superar el 50 % del total de radiación UV para un valor de masa de aire de 1.5: $MA = 1.5$ [2] (La Masa de Aire relativa – “*Air Mass*”- se define como el cociente entre la trayectoria óptica oblicua descrita por un fotón a lo largo de la atmósfera y la trayectoria vertical mínima que tendría que recorrer para llegar al mismo punto sobre la superficie terrestre). Dado que los colectores solares sin concentración pueden aprovechar ambas componentes de la radiación UV (directa y difusa), su eficiencia puede llegar a ser muy alta.

La segunda desventaja es su mayor complejidad, coste y, como consecuencia, mayores requisitos de mantenimiento. La tercera desventaja se fundamenta en las experiencias llevadas a cabo por diferentes grupos de investigación [3], 5-7]. Durante estas experiencias, se ha podido comprobar cómo la relación entre la velocidad de las reacciones fotocatalíticas (r) y la intensidad de irradiación incidente en los foto-reactores (I) varía al aumentar esta última (Figura 4). Esta transición no se produce a una intensidad determinada (diferentes autores obtienen resultados distintos), puesto que las condiciones experimentales influyen de manera importante [8]. Sin embargo, la forma que adquieren los gráficos, cuando se representa la velocidad de reacción en función de la intensidad de reacción incidente, es siempre parecida a la que apareció en la [Figura 6 del Capítulo 3](#), (dependencia de la velocidad de reacción con la intensidad de iluminación). Varios autores [8-11] responsabilizan de la transición de orden 1 a orden $\frac{1}{2}$ [$r = k(I^{1.0})$] $\rightarrow$ [$r = k(I^{0.5})$] al exceso de especies fotogeneradas (e_{bc}^- , h_{bv}^+ y $\bullet OH$). A intensidades de irradiación aún mayores se produce la transición de orden $\frac{1}{2}$ a orden 0 [$r = k(I^{0.5})$] $\rightarrow$ [$r = k(I^0)$]. En este momento, la reacción fotocatalítica abandona su dependencia con la intensidad de irradiación recibida, para depender únicamente de la transferencia de masa en el seno de la reacción, estabilizándose la velocidad de reacción por mucho que aumente ya la intensidad de irradiación. Este efecto puede deberse a diferentes causas, como pueden ser, las limitaciones que tiene el catalizador iluminado en cuanto a la producción de huecos (h^+), la falta de concentración suficiente de captadores de electrones, o de moléculas orgánicas en las proximidades de la superficie del catalizador y/o excesiva cantidad de productos de reacción ocupando centros activos del catalizador. La consecuencia de estas desventajas es la tendencia actual a escala mundial del uso de reactores sin concentración para las aplicaciones de procesos de fotocátalisis.

Otro aspecto relevante a la hora del diseño de reactores es la dificultad para poder comparar diferentes reactores entre sí, lo que suele complicar tanto el diseño de nuevos reactores para fotocátalisis como su optimización. Esto es debido, por un lado, a los muchos parámetros que intervienen en el proceso y a la complejidad del sistema fotocatalítico y, por otro, a las importantes diferencias que suele haber entre reactores distintos cuando además varía la escala de los mismos. Este problema se complica aún más cuando se trabaja con radiación solar ya que, además, se tiene una iluminación que va cambiando continuamente.

Cuando se realizan ensayos de degradación fotocatalítica de diferentes sustancias, tanto en agua como en gases, el parámetro más comúnmente utilizado para referir los resultados y la evolución del proceso es el tiempo de residencia (t_R), que indica el tiempo de exposición a la luz de la mezcla (acuosa o gaseosa) que está pasando por el reactor. Debido a lo indicado en el párrafo anterior, la utilización del tiempo de residencia no permite comparar experiencias realizadas en sistemas experimentales diferentes ni, por lo tanto, extraer conclusiones sobre la eficiencia comparativa de sistemas distintos. Este problema puede evitarse representando la evolución de un proceso fotocatalítico en función de la energía útil que ha ido acumulando el reactor a lo largo del tiempo, en vez de en función del tiempo de residencia. Esto puede realizarse utilizando una expresión como la indicada en la ecuación (1), que integra los principales parámetros del reactor:

$$E_{UV,n} = E_{UV,n-1} + \Delta t_n \overline{UV}_{G,n} \left(\frac{A}{V} \right) ; \quad \Delta t_n = t_n - t_{n-1} \quad (1)$$

donde $E_{UV,n}$ es la energía acumulada, por unidad de volumen de reactor, para una muestra n del proceso fotocatalítico; $\overline{UV}_{G,n}$ es la radiación media útil incidente ($\text{W}_{\text{UV}} \text{ m}^{-2}$) sobre la superficie del reactor en el intervalo de tiempo Δt_n que representa el intervalo de tiempos entre dos muestras experimentales consecutivas; A es la superficie exterior del reactor y V es el volumen total del mismo. La utilización de esta relación entre el tiempo experimental, el volumen del reactor, su superficie externa y la densidad de la radiación útil disponible permite describir la evolución de un proceso fotocatalítico en función de la energía captada por el reactor (por unidad de volumen) y, por lo tanto, permite comparar la eficiencia intrínseca de diferentes fotorreactores.

2. PARÁMETROS LIMITANTES DE DISEÑO

2.1. Disposición del catalizador

En cualquier tipo de aplicación, tanto en el caso del tratamiento de aguas contaminadas como en el de gases, resulta evidente el requisito previo del diseño de un fotorreactor eficiente. La investigación básica del proceso a nivel de laboratorio ha sido realizada, la mayoría de las veces, mediante dispositivos experimentales en los que no importaba su posible eficiencia si no conseguir unas condiciones idóneas que permitieran reproducibilidad de los resultados y un conocimiento exhaustivo de la influencia de todos los parámetros importantes. Esto es correcto cuando se pretende conocer los fundamentos de un proceso, pero no siempre resulta suficiente para intentar el cambio de escala. Para ello hay que trabajar más en distintos aspectos relacionados con el diseño de fotorreactores.

En el caso de procesos de fotocatalisis heterogénea los principales factores que se deben optimizar, en estos reactores, son el aprovechamiento energético de la radiación y la disposición del catalizador. En cuanto al rendimiento energético, los diseños que sitúan la fuente de energía (habitualmente una lámpara UV) en el centro de un reactor anular, son los que dan mejores resultados, y de hecho prototipos comerciales, como el patentado por Nulite [12], se basan en este principio.

La disposición del catalizador dentro del reactor, así como el tipo de soporte inerte a utilizar, si no se quiere trabajar con suspensiones, es un aspecto todavía a desarrollar ya que existen múltiples propuestas y no hay una decisión sobre cuál sería más idónea [13]. Se ha usado para ello tanto vidrio (en forma de bolas o depositando el catalizador directamente sobre la superficie del tubo por donde circula el agua), como diferentes materiales cerámicos, polímeros e incluso algunos metales. Estos soportes pueden ser en forma de malla, reticulares, etc. Las ventajas de trabajar con el catalizador inmovilizado en vez de en suspensión son claras: se evita la separación posterior al tratamiento, su recuperación en unas condiciones óptimas que permitan su reutilización y la resuspensión del sólido como paso previo del proceso. Las desventajas de la utilización de soportes dentro del reactor serían:

- La disminución de superficie de TiO_2 activada, en un determinado volumen de reactor, en comparación con el mismo volumen con catalizador en suspensión.
- Limitaciones en la transferencia de materia a bajos caudales. Este efecto es más intenso cuando se aumenta la potencia de iluminación, no aprovechándose una buena parte de ella. Cuando esto ocurre, la velocidad de reacción no aumenta al hacerlo el flujo de fotones.

- Dificultades para conseguir una correcta iluminación, cuando la fuente de fotones no se sitúa en el interior del reactor. Esto es particularmente problemático cuando se pretende trabajar con radiación solar.
- Aumento de la pérdida de carga del reactor. La consecuencia es un incremento de los costes energéticos, y del capital, ya que se deben instalar sistemas de bombeo de mayor potencia.

2.2. Concentración e iluminación del catalizador / diámetro del reactor

En la bibliografía, aparecen multitud de estudios realizados sobre la influencia de la concentración de catalizador en la eficiencia del proceso. Los resultados son muy diferentes, pero de todos ellos se deduce que la forma en que la radiación incide sobre el reactor y la longitud del camino óptico de ésta en su interior son fundamentales para determinar la concentración óptima de catalizador:

- Si la lámpara está en el interior de reactor y coaxial con éste, la $[\text{TiO}_2]$ para r_{max} es muy alta (del orden de varios gramos por litro) si el camino óptico es corto (varios mm). En cambio, la $[\text{TiO}_2]$ para r_{max} es baja (cientos de mg por litro) si alcanza varios centímetros.
- Si la lámpara está en el exterior, pero el camino óptico es corto (1-2 cm max.), r_{max} se consigue con 1-2 g L⁻¹ de TiO_2 .
- Si la lámpara está en el exterior (similar a lo que se produce en un reactor iluminado por radiación solar), pero el camino óptico alcanza varios centímetros, la concentración adecuada de catalizador es de unos cientos de miligramos por litro.

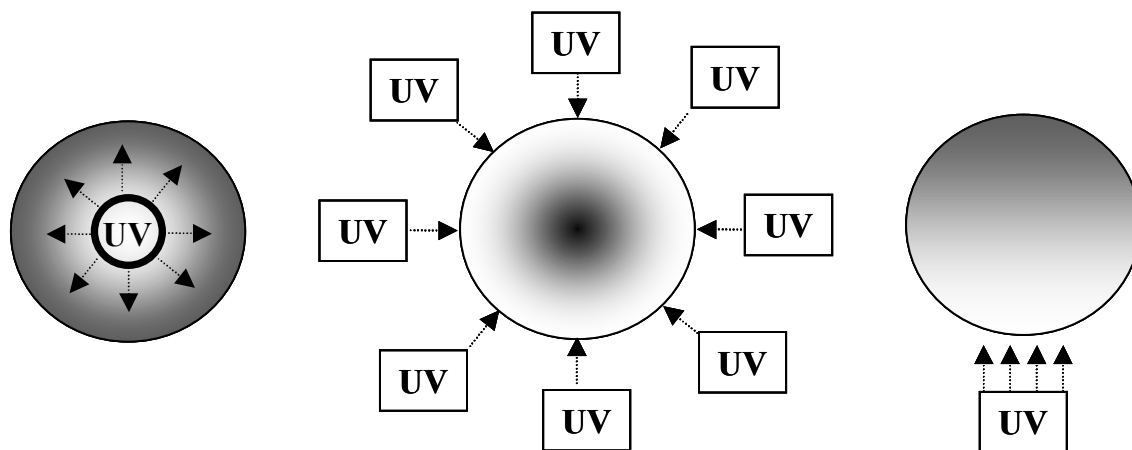


Figura 4. Efecto de "apantallamiento" en función de la posición de la fuente de alimentación en reactores fotocatalíticos para tratamiento de agua.

En todos los casos anteriormente expuestos, se produce también un efecto de "apantallamiento", cuando la concentración de TiO_2 es muy alta. La velocidad de reacción disminuye debido a la excesiva opacidad de la disolución, que impide que el catalizador de la parte más interna del reactor se ilumine.

Esto no deja de ser una aproximación, basada en los resultados obtenidos por diferentes autores. La intensidad de iluminación afecta a la relación entre la velocidad de reacción y la concentración de TiO_2 . A mayor intensidad, más elevada puede ser la concentración de catalizador. Además, la dispersión y absorción de la luz provoca un descenso

aproximadamente exponencial de la densidad fotónica, a lo largo del camino óptico recorrido dentro de una suspensión de catalizador [14]. Por todo ello, se hace necesario determinar experimentalmente la concentración de catalizador óptima para cada tipo de reactor considerado con el objetivo de determinar, en el caso de procesos en fase acuosa, la concentración mínima a la que se obtiene la velocidad de reacción máxima.

En estrecha relación con la concentración de catalizador se encuentra otro parámetro importante de diseño, como es el caso de las dimensiones del reactor, ya que en cualquier proceso fotocatalítico se debe de garantizar que el máximo número posible de fotones útiles que llegan a dicho reactor es utilizado por el mismo, evitando que los fotones salgan sin interceptar una partícula objeto de absorción de radiación. En el caso de fotorreactores tubulares, que normalmente van a ser los más frecuentes, este parámetro es el diámetro del reactor. La intensidad de iluminación afecta la relación entre velocidad de reacción y concentración catalizador/sensitizador. La dispersión y absorción de luz hace que la densidad del fotón disminuya casi exponencialmente a lo largo de su trayectoria dentro de la suspensión del catalizador por lo que, a mayor intensidad de luz, mayor puede ser, en principio, la concentración del catalizador/sensitizador.

Cuando la concentración de catalizador/sensitizador es muy alta, un efecto “pantalla” produce excesiva opacidad en la solución, impidiendo a las partículas más lejanas ser iluminadas y reduciendo el rendimiento del sistema. Cuanto más baja es la concentración del catalizador/sensitizador, menos opaca es la suspensión. Como ejemplo, en el caso de fotocatalisis con dióxido de titanio, 1 g L^{-1} de catalizador TiO_2 reduce la transmitancia a cero en el eje de un cilindro de 10 mm de diámetro interior con luz concentrada en un colector cilindro parabólico. Así pues, en un tubo con diámetro más ancho, solo se iluminará una capa exterior del reactor. Esto significa también que un reactor con diámetro interior más amplio permite utilizar un catalizador con concentración más baja. Los diámetros demasiado pequeños no tienen sentido debido a la alta pérdida de presión y un diámetro muy grande implica un volumen oscuro considerable, reduciendo el rendimiento global del sistema. Esto significa que un diámetro interior práctico para fotorreactores tubulares debe ser optimizado para cualquier proceso específico teniendo en cuenta todos los factores relevantes.

Finalmente, en el caso de procesos heterogéneos en fase acuosa con el catalizador TiO_2 en suspensión, es importante diseñar el sistema evitando cualquier posible sedimentación del catalizador, lo que puede ocurrir en determinadas circunstancias si se alcanza un flujo laminar en alguna zona del circuito hidráulico. En este sentido, se debe de realizar el diseño teniendo en cuenta que el número Reynolds (Re) debe estar siempre por encima de 4000 para garantizar un caudal turbulento.

2.3. Tiempo de residencia

Finalmente, otro parámetro altamente relevante, tanto en procesos fotocatalíticos en fase acuosa como gaseosa, es el Tiempo de Residencia o tiempo que cada unidad de fluido va estar expuesto a la radiación en su pase por el reactor. Este parámetro puede no ser relevante en el caso de procesos en recirculación (es decir, aquellos en los que el tiempo necesario para alcanzar la degradación deseada excede notablemente el tiempo de residencia y es por lo tanto necesario realizar una serie de ciclos sucesivos de paso del fluido por el reactor), pero sí resulta evidente que se trata de un parámetro fundamental cuando se pretende completar el proceso fotocatalítico con un único paso por el reactor (procesos en línea), ya que en este último caso hay que conseguir que el tiempo de residencia en el reactor sea, cuando menos, igual al tiempo requerido por el proceso fotocatalítico.

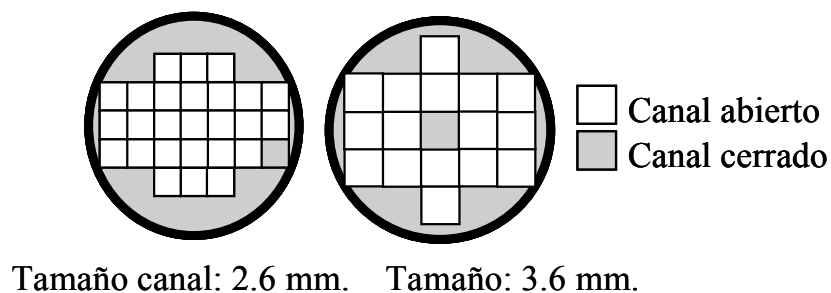


Figura 5. Dos secciones transversales diferentes de reactor con catalizador monolítico para procesos fotocatalíticos en fase gas. El distinto tamaño de los canales por los que circula el gas permite obtener tiempos de residencia diferentes.

Un parámetro que nos permite modificar el tiempo de residencia es, obviamente, el caudal másico que se tenga en el proceso. Sin embargo éste no siempre es posible modificarlo libremente por cuestiones del propio proceso que genera dicho caudal o bien por posibles restricciones del propio proceso fotocatalítico (sedimentación de catalizador en fase acuosa, suministro de oxígeno al proceso, consumo energético inadecuado, etc.).

En el caso de aplicaciones que impliquen luz solar, deberán de considerarse normalmente procesos fotocatalíticos en recirculación ya que no va a ser posible garantizar procesos en línea con una fuente de luz no controlable como es el sol.

3. MATERIALES PARA DISEÑO DE REACTORES

Dado que los reactores fotocatalíticos que poseen unos mayores requisitos a la hora de su diseño, desde el punto de vista de comportamiento y especificaciones de materiales, son los que van a trabajar con luz solar (debido sobre todo a los condicionantes que conlleva el trabajo continuo en intemperie), el análisis de los materiales para diseño se realiza para este tipo de reactores. No obstante, gran parte de los conceptos y condicionantes que se indican son igualmente válidos para reactores que vayan a trabajar en condiciones interiores con lámparas eléctricas.

Desde el punto de vista del uso de la luz solar, los materiales específicos necesarios para aplicaciones fotocatalíticas tienen mucho en común con los usados normalmente para aplicaciones solares térmicas. Como resultado, los reactores de sistemas fotocatalíticos solares han seguido inicialmente diseños de captación de fotones ya utilizados en colectores térmicos, como son los colectores cilindro-parabólicos (PTC) y los colectores sin concentración. A partir de aquí, los diseños deben diferenciarse debido a que:

- El fluido debe estar expuesto a la radiación solar UV y, por lo tanto, el material del reactor debe ser transparente (o translúcido) a la luz solar.
- La temperatura no representa un papel significativo en los procesos fotocatalíticos por lo que el aislamiento térmico no resulta necesario.

Lo que a continuación se indica es válido para todo tipo de reactores, con ciertas particularidades en cada caso. Estas particularidades dependerán del tipo de superficie reflectiva que se use para ayudar en la captación de fotones, o si ésta es necesaria o no (colectores sin concentración) y, por último, de la forma en que circule el fluido a través del reactor (muy diferente en el caso de un tubo, superficie inclinada, balsa agitada, etc.). Los componentes básicos que van a definir por tanto un reactor para aplicaciones fotocatalíticas

van a ser el reflector (que puede ser concentrador o no) y el material del propio reactor (normalmente tubular).

3.1. Superficie reflectante

Esta superficie tiene por objeto dirigir y reflejar la luz útil hacia el reactor para conseguir un máximo aprovechamiento de ésta y evitar pérdidas innecesarias, debiendo estar compuesta por un material que sea altamente efectivo para la reflexión de la radiación ultravioleta. Los espejos tradicionales basados en plata tienen una elevada reflectividad (radiación reflejada/radiación incidente) en el visible, pero no así en el intervalo de longitudes de onda entre 300 y 400 nm, siendo la mejor opción en este caso la utilización de espejos a base de aluminio (Figura 6). Además, el vidrio utilizado normalmente como cubierta protectora de los espejos convencionales no es adecuado ya que absorbe también parte de la radiación UV que lo atraviesa, lo que ocurre doblemente ya que la luz lo traspasa dos veces en su camino, hacia y desde la superficie metalizada.

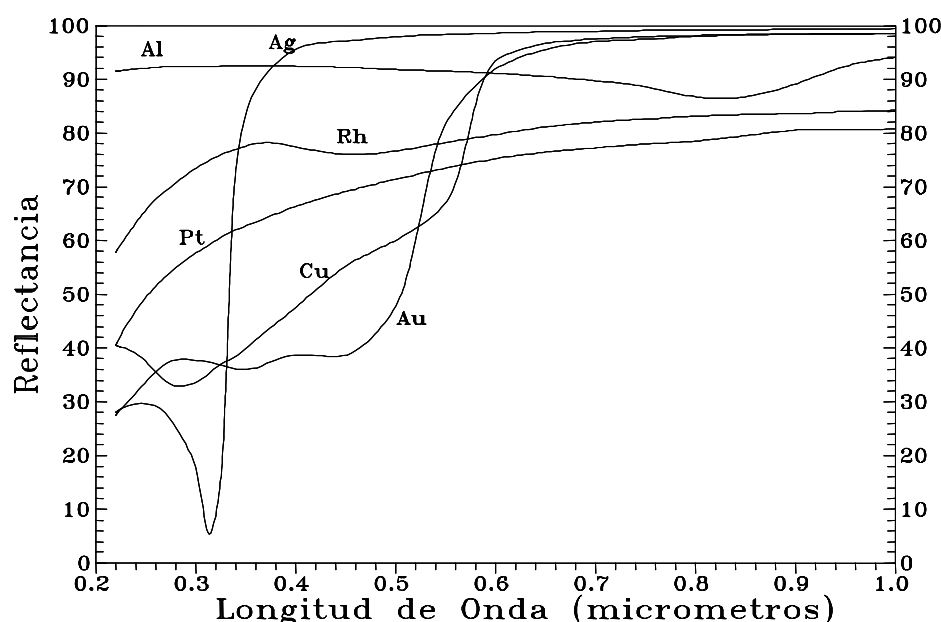


Figura 6. Reflectancia espectral de diferentes metales electro-depositados al vacío.

El desarrollo de una superficie de alta reflectancia en el rango UV que tenga además buenas características de durabilidad y de resistencia no es algo sencillo. Una superficie de aluminio como la indicada en la Figura 6 se va a oxidar y degradar rápidamente con lo que va a perder sus características. Varias han sido las soluciones hasta ahora aportadas para la resolución de este problema. Una de ellas es proteger la capa anterior de aluminio mediante una capa de anodizado (delgada capa de óxido). Cuanto mayor sea esta capa, más elevada será la resistencia a la abrasión y agentes externos, pero también menor irá siendo la reflectancia.

Otra posible solución pasa por el desarrollo de superficies flexibles tipo "sandwich" compuestas de tres partes: plástico-aluminio-plástico, estando formada la capa exterior por un material de elevada resistencia y transmisividad en el UV (como es el caso de varios copolímeros comerciales obtenidos a partir de politetrafluoretileno y etileno). Existen en el mercado diversas láminas formadas por una delgada capa de aluminio fijadas a una base acrílica [15].

Finalmente, una tercera posibilidad es el uso de técnicas sol-gel para proteger de forma eficaz el aluminio y, simultáneamente, mejorar su reflectancia en el UV utilizando el efecto de interferencia. Este efecto tiene lugar cuando un material es recubierto con una capa que posee un espesor próximo a la longitud de onda de la radiación incidente. La máxima reflectancia se obtiene cuando el producto del espesor de dicha capa y el índice de refracción de la misma es $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda. Para poder producir reflectores UV de alta eficiencia es necesario alternar capas con un material de alto índice de refracción, como el TiO_2 , con capas de otro material de bajo índice de refracción, como el SiO_2 (Figura 7)

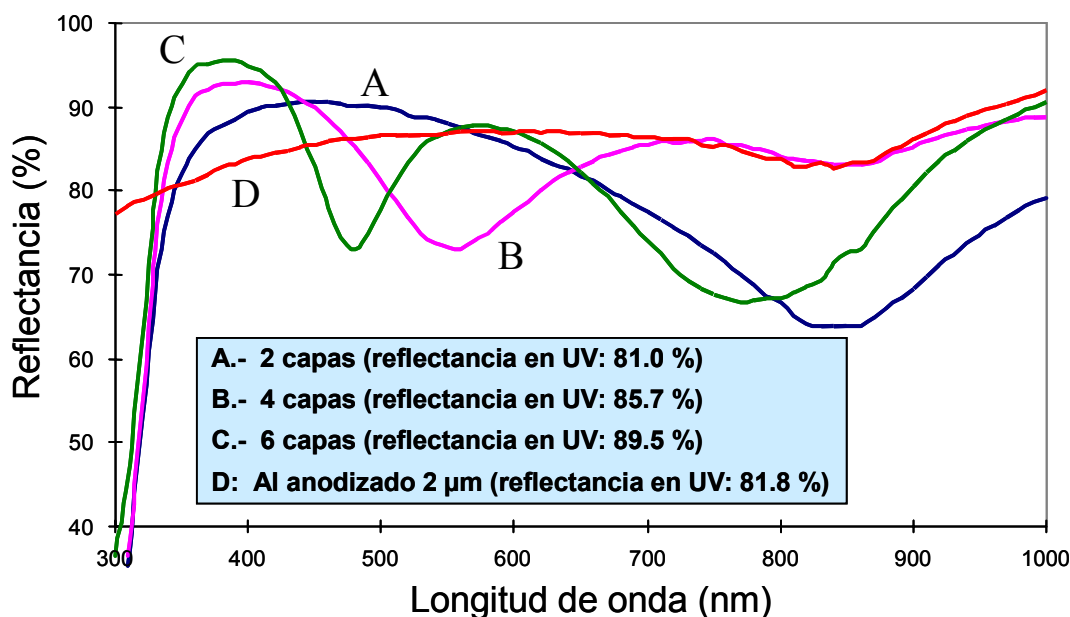


Figura 7. Mejora de la reflectividad de aluminio anodizado mediante la deposición de diferentes capas de $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$, mediante técnicas sol-gel, utilizando el efecto de interferencia con la radiación UV incidente.

No obstante, se debe de considerar que el problema de la superficie reflectante no ha sido completamente resuelto por el momento, ya que ninguna de las utilizadas hasta ahora cumple con una de las principales características que la harían óptima: un precio razonable combinado con unas condiciones de eficiencia y durabilidad aceptables.

3.2. Fotorreactor

Con respecto a los materiales válidos como reactores para procesos de fotocátalisis, la necesidad de tener una elevada transmisividad en el UV y una elevada resistencia a la degradación hace que las posibilidades de elección sean limitadas. Entre las posibles alternativas se encuentran los fluoropolímeros (inertes químicamente, con buena transmisividad y resistencia y buenos difusores de luz UV), materiales acrílicos y varios tipos de vidrio (necesariamente con bajo contenido en hierro ya que este absorbe UV). El cuarzo es también un material excelente pero muy costoso, lo que lo invalida desde un punto de vista práctico (Figura 8).

La utilización de materiales plásticos puede ser una buena opción ya que existen diversos materiales (politetrafluoretileno, etileno-tetrafluoretileno, etilpropileno fluorado, materiales acrílicos, etc) que pueden ser extruídos en forma tubular y poseen las necesarias características de trasmisividad y resistencia térmica, así como el mantenimiento de sus propiedades durante su uso a la intemperie. Sin embargo, una de sus principales desventajas es la necesidad de incrementar el espesor del material cuando se desea que el reactor soporte

condiciones de presión medias o elevadas y el hecho de que las conexiones normalmente pueden soportar menos presión debido a la falta de rigidez del material. Esto puede suponer un problema cuando se desea impulsar el agua a través de colectores conectados en serie.

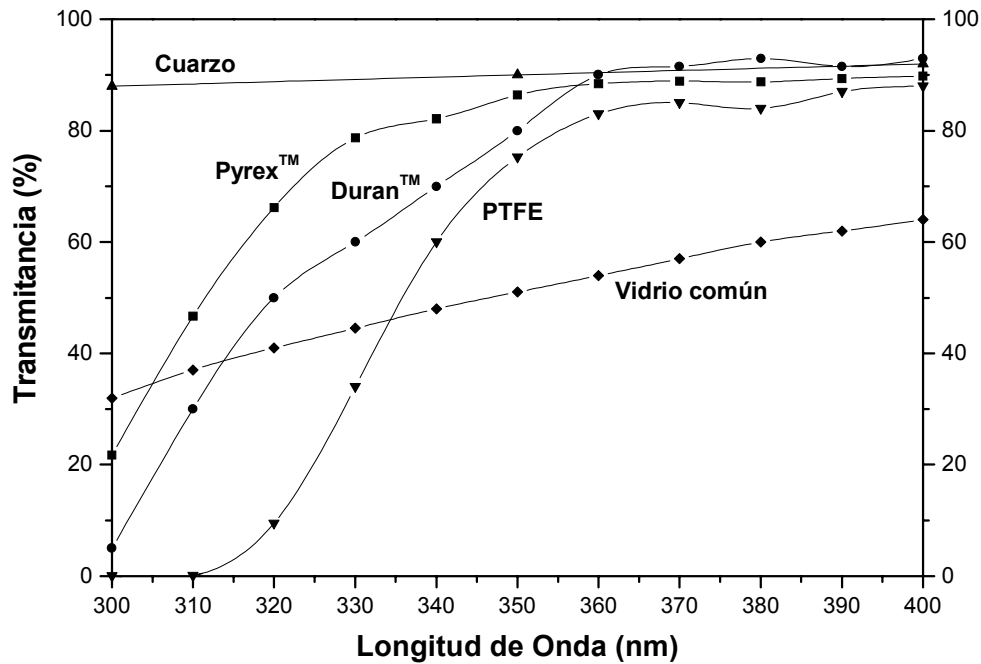


Figura 8. Transmitancia de diferentes materiales válidos para reactores fotocatalíticos.

El vidrio es otro material alternativo para fotorreactores. Como puede apreciarse en la Figura 8, el vidrio común no es adecuado ya que absorbe parte de la luz UV que llega al fotorreactor, debido al contenido en hierro. Por ello sólo resultan adecuados aquellos vidrios que poseen un bajo contenido en hierro, como es el caso del borosilicato (Figura 9).

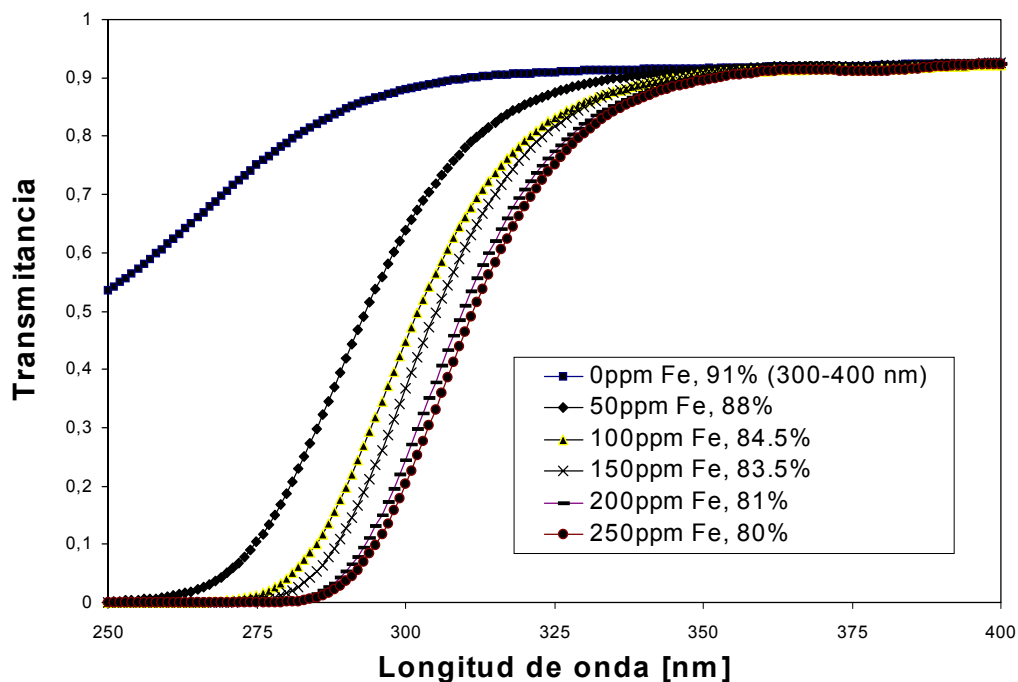


Figura 9. Influencia de la concentración de hierro en la transmitancia espectral de un fotorreactor tubular de vidrio (cortesía de Schott-Rohr glas GmbH, Alemania).

Entre las diferentes configuraciones que puede adoptar el reactor la forma más usual es la tubular debido a la sencillez de manejo del fluido. En estos casos uno de los parámetros más importantes es el diámetro del reactor ya que se ha de garantizar una adecuada relación entre la distribución de iluminación, la concentración de catalizador y la eficiencia del proceso fotocatalítico. Cuanto menor es la concentración de TiO_2 , menos opaca es la suspensión y mayor va a ser la penetración de la luz. Una concentración de 1 g L^{-1} de TiO_2 reduce la iluminación a cero después de solo 10 cm de trayectoria óptica, por lo que si el diámetro del tubo es superior sólo la parte exterior estará iluminada (Figura 10). Los valores prácticos para fotorreactores tubulares van a estar normalmente entre 25 y 50 mm.; diámetros menores van a suponer unas elevadas pérdidas de carga y valores mayores un excesivo volumen sin iluminar, con la consiguiente reducción de la eficiencia general del proceso.

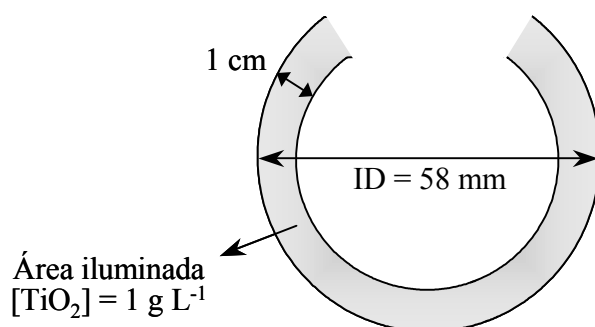


Figura 10. Zona de penetración de luz solar (sin concentrar) en un reactor tubular con una concentración de TiO_2 de 1 g L^{-1} (catalizador en suspensión).

Todo lo indicado anteriormente es también aplicable en el caso de considerar un reactor plano (horizontal o inclinado). Sin embargo el principal problema de este tipo de reactores es que suelen estar abiertos a la atmósfera, lo que origina problemas como la pérdida de contaminantes volátiles, transferencia de polvo y suciedad al líquido reaccionante, dificultades para enriquecer el agua en oxígeno cuando las cargas contaminantes son muy altas, etc.

4. REACTORES PARA TRATAMIENTO DE GASES

En los reactores fotocatalíticos en fase gas se van a tener presentes interfases gas-sólido por lo que van a surgir una serie de complicaciones fluidodinámicas. Al ser el absorbedor de la radiación el sólido, se van a tener problemas de opacidad, "scattering" y de profundidad de penetración de la radiación. Estos problemas afectan al diseño de tal forma que los resultados obtenidos para sistemas homogéneos no pueden apenas considerarse. Una de las posibles soluciones es mantener la fase sólida en suspensión lo que puede conseguirse mediante agitación mecánica y mediante fluidización o seguir otras técnicas. Al igual que los reactores químicos convencionales, los fotorreactores en fase gas pueden ser clasificados en diferentes formas según sea el criterio de clasificación utilizado:

Según la clase de operación. En continuo o en recirculación. Según sea la aplicación interesa que el fluido a tratar pase una única vez por el reactor o que sea recirculado tantas veces como sea necesario según los fines que se persiguen. En los estudios cinéticos son de interés sistemas con posibilidad de recirculación para estudiar la variación de concentración en

función del tiempo, mientras que a escala de planta piloto o industrial puede ser que interese, por operatividad, sistemas continuos o de un único paso del fluido por el reactor.

Según el tipo de catalizador. La configuración del catalizador va a influir de forma fundamental en el diseño del fotorreactor, puesto que es necesario que esté bien iluminado para que pueda darse la reacción y a la vez permitir unas buenas condiciones fluidodinámicas del gas a tratar. Los catalizadores utilizados en las reacciones fotocatalíticas en fase gas incluyen desde catalizadores impregnados o soportados (Figura 11), a catalizadores másicos, pellets, en polvo, etc. En los catalizadores impregnados la fase activa del catalizador (TiO_2) está dispuesta sobre un material que actúa de soporte. En los catalizadores denominados másicos la fase activa se mezcla en masa con un soporte inactivo que le aporta las condiciones adecuadas para la configuración de un catalizador sólido; este es el caso de los monolitos. En ocasiones se utiliza el catalizador finamente dividido o en polvo surgiendo la necesidad de su agitación o fluidización para mejorar el contacto con el fluido a tratar y la iluminación.

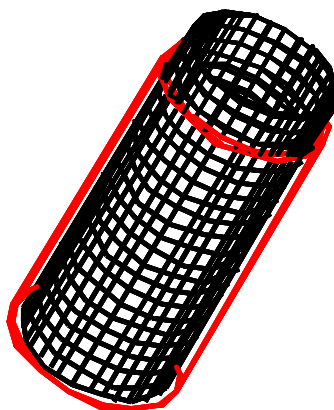


Figura 11. Catalizador soportado sobre una malla iluminada por su parte exterior, mientras que el gas circulará por la parte interior.

Según el tipo de fuente de luz empleada. Luz artificial y/o luz solar real. En la actualidad existen muchas fuentes de radiación (lámparas) disponibles en el mercado, pero son relativamente pocas de ellas las que son utilizadas para la fotoquímica. Esto depende en gran medida de que la luz que se necesita pertenece a la región ultravioleta (UV) del espectro y esto restringe la elección a lámparas de arco y tubos fluorescentes. El rango de potencia va desde unos pocos vatios hasta incluso más de 100 kW. En cuanto a la utilización del sol como fuente de luz para procesos de fotocátalisis, es necesario el desarrollo de reactores fotocatalíticos capaces de coleccionar eficientemente la radiación solar.

Según la dimensión de la aplicación. Escala de laboratorio o escala piloto o industrial. En la elección del mejor fotorreactor para una cierta aplicación debe de considerarse la escala y propósito de dicha aplicación. Es evidente que las aplicaciones de laboratorio generalmente tienen propósitos diferentes que las industriales. En el último caso el propósito es por lo general producir un cierto proceso químico donde la relación coste/eficiencia y los problemas prácticos y de seguridad son el único criterio de elección, mientras que las aplicaciones de laboratorio generalmente tienden a obtener resultados reproducibles para poder interpretar los fundamentos del proceso. Así por ejemplo, el conocimiento del campo de radiación es muy importante en las aplicaciones de laboratorio [16-17] mientras que no es de gran importancia en las aplicaciones industriales. En la práctica, para una aplicación concreta, el mejor

fotorreactor a escala de laboratorio es generalmente diferente del mejor fotorreactor a escala de planta piloto o escala industrial [18].

Según la geometría del sistema fuente de luz-reactor. Planos, tubulares, etc. Este último criterio se considera de los más importantes ya que la geometría juega un papel importante en determinar el rendimiento de la reacción también como la operatividad del reactor. Por ejemplo, probablemente en un reactor convencional de buena mezcla no debería preocupar si el tanque donde se produce la reacción es cuadrangular o cilíndrico, mientras que esto constituiría una diferencia fundamental en el caso de un fotorreactor que ha de ser irradiado externamente. En la elección de la geometría se debe tener en cuenta la potencia, forma y requerimientos de enfriamiento de las lámparas de la longitud de onda requerida para la reacción que están comercialmente disponibles.

A continuación se describen algunos tipos de reactores más utilizados, o potencialmente utilizables, para procesos fotocatalíticos en fase gaseosa [19][20].

4.1. Fotorreactor de pared sumergida

Fue el primer fotorreactor establecido y continúa siendo utilizado especialmente a escala industrial. Viene de la simple idea de tomar un reactor convencional, del tipo de mezcla, e insertar lámparas en su interior a través de aberturas en el armazón exterior. A pesar de la ventaja de la simplicidad y muy alta eficiencia fotónica, ya que todos los fotones emitidos llegan al medio reactante, esta clase de planteamientos presenta algunos inconvenientes. La radiación es transmitida al medio absorbente a través de superficies transparentes relativamente pequeñas. La consecuencia de este alto flujo resultante causa que se depositen en la superficie externa de la lámpara productos de reacciones secundarias lo que progresivamente baja la cantidad de radiación que alcanza el medio absorbente (proceso de *filming*). La limpieza de la lámpara debe ser, por lo tanto, frecuente para asegurar una operación regular. La desconfianza en el escalado depende de la dificultad de la modelización del campo de radiación, lo que suele ser muy complejo.

4.2. Fotorreactor anular

En esta clase de reactores, dos cilindros coaxiales delimitan la zona de reacción mientras que la lámpara es colocada en el eje axial de simetría. Esta simple geometría permite la modelización del campo de radiación [21-23], y prácticamente todos los fotones emitidos por la lámpara alcanzan el medio reactante. En el caso de que una cantidad relevante de fotones alcanzara la pared exterior del reactor, debido a una baja anchura óptica de la disolución podría colocarse un espejo exterior parcialmente recubriendo el sistema. En el caso de reactores en continuo, el flujo en el interior del reactor puede ser organizado de tal forma que los reactantes crucen la longitud del reactor más de una vez. Esto tiene la ventaja de asegurar que todo el elemento fluido es llevado, al menos una vez, a la región altamente irradiada cercana a la pared interna del reactor. Aunque este reactor se utiliza industrialmente especialmente en el campo de la esterilización del agua, también puede utilizarse para procesos en fase gaseosa. En este sentido el reactor de la Figura 12 ha sido utilizado para el estudio comparativo de las eficiencias de destrucción de tricloroetileno en fase gas por vía fotocatalítica utilizando diferentes catalizadores basados en TiO_2 [24] y para el estudio de la influencia de la temperatura en la degradación de tricloroetileno [25].

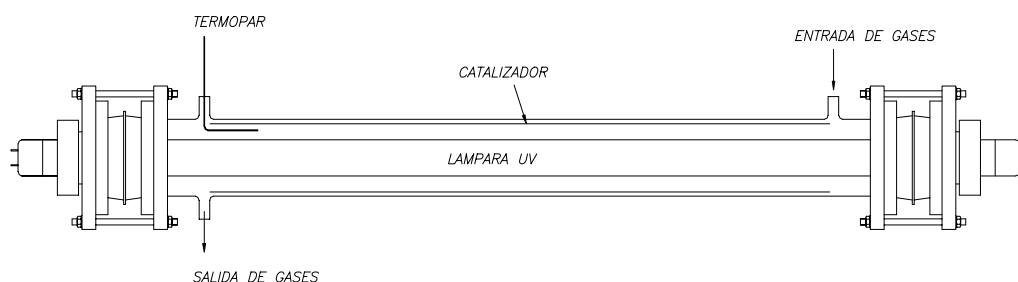


Figura 12. Reactor tubular para ensayos fotocatalíticos en fase gas con lámparas UV.

4.3. Fotorreactor elíptico

Este tipo de fotorreactor consiste en un cilindro de sección elíptica cuya superficie interna está recubierta por un material reflectante. La lámpara y el reactor tubular están verticalmente montados con sus ejes principales de simetría coincidentes con los ejes focales de la elipse. Debido a esta geometría, la mayoría de los fotones emitidos por la lámpara alcanza el medio reactante radialmente. Como en el caso del fotorreactor anular, el camino que lleva el flujo en el interior del reactor puede disponerse de forma que haga varios pasos por el reactor. Esta clase de configuración se utiliza extensivamente en el laboratorio y ha recibido mucha atención por los modelistas. Se debe enfatizar que el campo de energía radiante en la pared exterior del reactor no es uniforme, ya que la intensidad de la radiación depende de las coordenadas axiales y angulares. Este fotorreactor está siempre sujeto a que se depositen películas pero gracias a la separación física del reactor y la lámpara, normalmente se permite una fácil limpieza y mantenimiento de las partes. Un inconveniente grande para las aplicaciones industriales es la necesidad de mantener con una alta eficiencia la amplia superficie reflectante.

4.4. Fotorreactor multilámpara

Este diseño de reactor es especialmente útil cuando se utilizan lámparas de baja presión o tubos fluorescentes, los cuales se caracterizan por su pequeña potencia. Esta configuración permite la instalación de muchos tubos fluorescentes en paralelo dando lugar así a flujos radiantes altos. El reactor es cilíndrico y externamente rodeado por varias lámparas las cuales se pueden a su vez rodear de adecuadas superficies reflectantes. El flujo del fluido a tratar dentro del reactor puede ser de sección única o simple. Al igual que el anular, este reactor ha sido también empleado industrialmente en el campo de la esterilización del agua.

4.5. Fotorreactores de pared plana

Hasta ahora los fotorreactores descritos poseen una pared transparente cilíndrica y un campo de radiación más o menos radial. Cuando se dispone de un campo de radiación de rayos paralelos, como es el caso de lámparas de arco cortos proporcionados con espejo cóncavo y óptica adecuada, en el caso de luz láser o irradiación solar, la pared del reactor es generalmente plana (Figura 13). En el caso de un reactor en continuo, el campo de radiación puede disponerse en el mismo sentido de paso de flujo, en sentido contrario, o de forma que la dirección de irradiación y la dirección de flujo sean perpendiculares (disposiciones "cocurrent", "countercurrent" o en "cross-flow"). Los dos primeros son fotorreactores axialmente irradiados y su eficiencia relativa depende, de una forma compleja, del tipo de

reacción implicada y de su cinética. El tercer reactor se ha utilizado en la investigación en laboratorio para sistemas gas-sólido en los cuales el sólido puede ser fijo o fluidizado.

El reactor de la Figura 13 con catalizador monolítico mezcla en masa de silicato magnésico y TiO_2 ha sido utilizado para el estudio de la degradación fotocatalítica de tolueno, xileno y tricloroetileno [26-27] así como para hacer un estudio comparativo de eficiencia de destrucción fotocatalítica con el reactor tubular de la Figura 12 [28]. Es a considerar también el trabajo realizado sobre modelización del flujo en un reactor fotocatalítico con monolito de Hossain et al. [29]. Respecto a los reactores planos hay que apuntar algunos trabajos realizados sobre el funcionamiento de estos reactores [30-31] y su modelización [32-33].

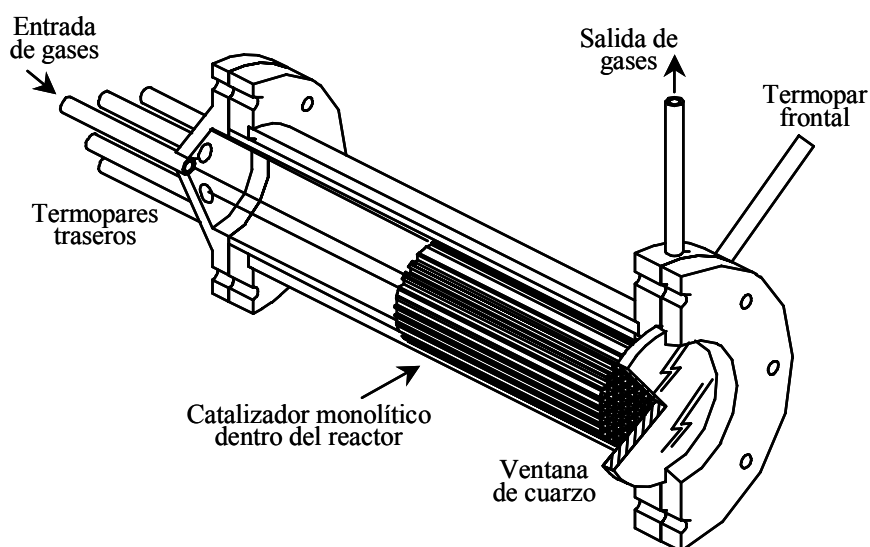


Figura 13. Reactor de pared plana para usar luz solar concentrada. La luz penetra a través de la ventana de cuarzo en sentido contrario a los gases sobre los que se quiere aplicar el proceso fotocatalítico a lo largo de un catalizador monolítico situado en la zona iluminada del reactor.

4.6. Fotorreactores de película

Para solucionar el problema anteriormente indicado del *filming*, se han ideado algunos diseños alternativos los cuales resuelven el problema por eliminación del contacto entre el medio reactante y la pared transparente del reactor. Con este fin el medio reactante es generalmente esparcido en una superficie sobre la cual fluye formando una película, la cual se irradia externamente. Este concepto puede ser aplicado a cualquier geometría de reactor concebible y resulta un tipo de configuración es particularmente útil con medios altamente absorbentes.

A la hora de la elección del fotorreactor más adecuado para una cierta aplicación se debe de considerar, ante todo, la escala y el propósito de tal aplicación. La elección de una lámpara adecuada generalmente antecede al montaje del fotorreactor y la geometría de la lámpara y el número necesario para llevar a cabo el proceso a menudo restringe la elección del diseño. Cuando una fase sólida está presente, como en el caso de las reacciones fotocatalizadas, se tienen que considerar cuidadosamente todos los factores que intervienen como son el tipo de catalizador y la geometría luz-catalizador-reactor. Deben de tenerse también en cuenta la turbulencia y los niveles de mezcla más adecuados en cada caso. Todo esto, junto con el conocimiento de la vida media de los intermedios de reacción excitados, puede ser una guía en la elección del tipo de fotorreactor y sus dimensiones. Teniendo en cuenta las diferentes premisas indicadas a lo largo de esta sección, sólo la imaginación limita

los posibles diseños, como el ejemplo indicado en la Figura 14 que está en sintonía con la línea de trabajo iniciada por algunos investigadores con fibra óptica [34].

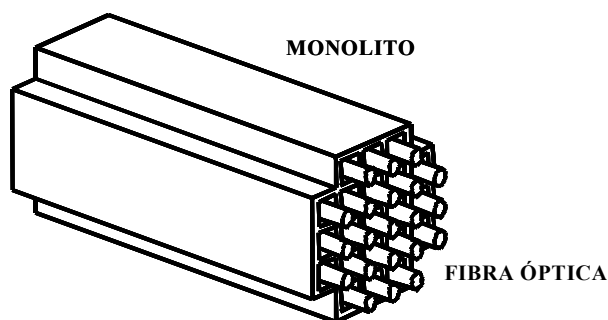


Figura 14. Propuesta de reactor fotocatalítico basado en un catalizador monolítico al que se aportan los fotones necesarios captados mediante un colector solar y transportados mediante fibra óptica.

5. REACTORES PARA TRATAMIENTO DE AGUAS

En los últimos años ha tenido lugar un importante desarrollo en el diseño de reactores para procesos fotocatalíticos de tratamiento de aguas. Este desarrollo puede considerarse particularmente notable en el caso de dispositivos para usar la luz solar, mientras que los diseños basados en lámparas no han cambiado mucho desde los primeros conceptos (básicamente cilíndricos con la fuente de luz en un cilindro interior). Dado que, además, una gran parte de los conceptos aplicados a reactores solares pueden ser también usados en reactores basados en lámparas, a continuación se hace una revisión de los principales diseños desarrollados basados en el uso de la luz solar.

5.1. Reactores cilindro-parabólicos (PTCs)

Originalmente, los fotorreactores solares para descontaminación de aguas mediante fotocátalisis de TiO_2 fueron diseñados para su uso en focos lineales de concentradores cilindro parabólicos. Los PTCs pueden ser de dos tipos:

- *Cilindro-parabólicos con seguimiento en un eje.*
- *Cilindro-parabólicos con seguimiento en dos ejes (Figura 15).*

Los primeros fueron desarrollados en los Laboratorios Nacionales Sandia (EE.UU., 1989) [35] y los segundos en la Plataforma Solar de Almería (España, 1990) [36]. Ambos se operaron en grandes plantas piloto (cientos de metros cuadrados de superficie colectora) y pueden considerarse las primeras etapas en la industrialización de los procesos fotocatalíticos.

Aunque los PTCs de seguimiento en un eje han demostrado ser los más convenientes (económicamente) para las aplicaciones térmicas, los PTCs con seguimiento en dos ejes, se han mostrado muy eficientes para el conocimiento exacto de la radiación que llega en cada momento al fotorreactor [37-38] y permiten evaluar correctamente todos los demás parámetros relacionados con la fotocátalisis solar. Esta exactitud ha permitido la comparación con multitud de trabajos realizados con fotorreactores de laboratorio, donde el cálculo de la radiación incidente es mucho más sencillo, al trabajar con fuentes de radiación constante, y

con sistemas mucho menores. Esto también ha permitido reducir el número de variables a ensayar, al poder utilizar los conocimientos ya desarrollados por otros autores.



Figura 15. Colector cilindro-parabólico con seguimiento en dos ejes instalado en la PSA.

Los componentes básicos de un PTC para aplicaciones fotocatalíticas son: el concentrador reflectante, el tubo absorbente (fotorreactor), el sistema de seguimiento y la estructura soporte. De ellos los dos últimos no ofrecen particularidad alguna en fotocatalisis con respecto a las aplicaciones térmicas para los que fueron originalmente diseñados.

5.2. Reactores solares sin concentración (sistemas de un sol)

Aunque los diseños de un sol poseen importantes ventajas, el diseño de un fotorreactor robusto que capte la luz sin concentrarla no es trivial, debido a la necesidad de resistencia a la intemperie y al empleo de materiales inertes a los productos químicos. Sin embargo, este tipo de sistemas posee importantes ventajas ya que los fotorreactores solares sin concentración (razón de concentración, $RC = 1$) son, en principio, más baratos que los PTCs ya que no tienen partes móviles o mecanismos de seguimiento solar. Al no concentrar la radiación su eficiencia no se ve reducida por factores asociados a la reflexión, concentración y seguimiento solar. Los costes de construcción pueden ser menores al ser sus componentes más simples, lo que también se puede traducir en un mantenimiento más sencillo y reducido. Además, los sistemas sin concentración requieren estructuras más económicas y de instalación sencilla y, finalmente, la superficie requerida para su instalación es más reducida porque al ser estáticos las sombras que proyectan son menores que las que proyectan los sistemas con seguimiento solar para la misma superficie de colector.

Como consecuencia de un intenso esfuerzo realizado en los últimos años en el diseño de diferentes conceptos de este tipo de sistemas, un amplio número de reactores solares sin concentración ha sido desarrollado para aplicaciones fotocatalíticas. En base a ello se puede realizar la siguiente clasificación de fotorreactores:

- *Placa plana o cascada:* están formados por una placa inclinada hacia el sol por la que el agua a tratar fluye (Figura 16). El catalizador se fija a la superficie de la placa. Suelen estar

abiertos a la atmósfera, por lo que no pueden ser utilizados para tratar aguas con componentes volátiles [39]. Los reactores de flujo de película son una variante de este tipo de dispositivos.



Figura 16. Instalación experimental de un colector de placa plana utilizado por el ISFH (Institut für Solarenergieforschung GmbH, Hannover, Alemania) en las instalaciones de la PSA.

- *Placa plana hueca* (Figura 17): consisten en dos placas unidas entre las cuales circula el líquido a tratar [40].



Figura 17. Instalación experimental de un colector de placa plana hueca construido a partir de materiales plásticos.

- *Tubulares*: esta clase de colectores consisten en gran cantidad de pequeños tubos conectados en paralelo (Figura 18) y funcionan con flujos más altos que los de placa plana, aunque el funcionamiento es básicamente el mismo [41].



Figura 18. Colector tubular experimental desarrollado por NREL (National Renewable Energy Laboratory, Denver, USA). Foto por cortesía de NREL (USA).

- *Balsa superficial*: estos colectores son una interesante variedad (Figura 19), especialmente para la industria de tratamiento de aguas de desecho, ya que son de fácil construcción “in situ” [42]. Básicamente consisten en un depósito tipo balsa con poca profundidad para permitir que penetre la luz a lo largo del espesor de agua existente.



Figura 19. Instalación experimental de un colector tipo balsa superficial ensayándose en la Plataforma Solar de Almería (CIEMAT, España).

Dado que los sistemas no concentradores requieren significativamente más superficie de fotorreactor que los sistemas de concentración, los sistemas a escala real (normalmente formados por cientos de metros cuadrados de colectores) deben ser diseñados para soportar presiones normales de operación para el manejo de fluidos a través de un campo grande. Por este motivo, la utilización de fotorreactores tubulares entre los diferentes sistemas indicados anteriormente, tiene una clara ventaja debido al rendimiento estructural inherente de los tubos;

los tubos están disponibles en una gran variedad de materiales y tamaños y es una elección natural para un sistema de flujo cerrado. Además, su construcción puede ser económica y eficiente con pérdidas de carga reducidas.

5.3. Reactores Cilindro-Parabólico Compuestos (CPCs)

Los colectores solares CPCs son una interesante mezcla entre los PTCs y los sistemas sin concentración y suponen una de las mejores opciones para las aplicaciones fotocatalíticas utilizando la luz solar. Antes de introducir los colectores tipo CPC, y debido a sus especiales características, resulta interesante exponer las principales ventajas e inconvenientes de los colectores PTCs y colectores sin concentración, lo que se realiza en la “Tabla I”.

<i>Reactores Cilindro-Parabólicos</i>		<i>Reactores sin concentración</i>	
<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>
- Flujo turbulento (favorece la transferencia de materia). - Ausencia de vaporización de compuestos volátiles.	· Sólo aprovechan la radiación directa. · Alto coste. · Baja eficiencia óptica · Baja eficiencia cuántica · Sobrecalentamiento del agua a tratar	· Aprovechamiento de la radiación directa y difusa · No se produce sobrecalentamiento del agua a tratar. · Bajo coste. · Alta eficiencia óptica y cuántica.	· Flujo laminar (baja transferencia de materia). · Vaporización de compuestos volátiles.

Tabla I. Comparación cualitativa entre reactores PTC y reactores sin concentración para aplicaciones fotocatalíticas, usando TiO_2 y luz solar.

Los reactores tipo CPC son unos sistemas estáticos con una superficie reflectante enfocada hacia un fotorreactor cilíndrico siguiendo una involuta (Figura 20). Estos dispositivos proporcionan una de las mejores ópticas para los sistemas de baja concentración, pudiendo además ser diseñados con una $\text{RC} = 1$, con lo que se consiguen simultáneamente las ventajas de los PTCs y de los reactores sin concentración.

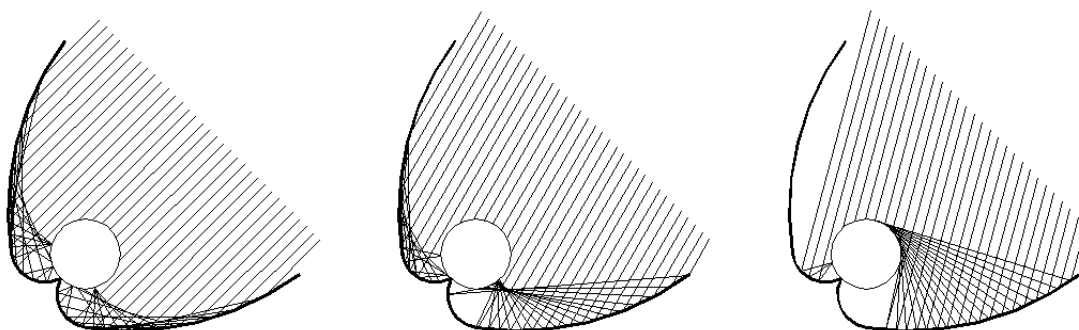


Figura 20. Radiación solar reflejada en un colector CPC. Toda la luz que llega a la apertura del colector será reflejada sobre el reactor si el ángulo de incidencia es menor del ángulo de aceptación del CPC (ver [Capítulo 3, Sección 6](#)).

Gracias al diseño de su superficie reflectante, casi toda la radiación que llega al área de apertura del colector (no sólo la directa, también la difusa) puede ser recogida y estar disponible para el proceso fotocatalítico en el reactor. La radiación UV reflejada por el CPC

es además distribuida alrededor de la parte trasera del tubo fotorreactor y como resultado la mayoría de la circunferencia del tubo fotorreactor se encuentra iluminada. Además, como en un PTC, el agua es más fácilmente conducida y distribuida que en los diseños de los colectores sin concentración. A diferencia de las instalaciones de PTCs, no se necesitan equipos de refrigeración (que aumentan el coste de la instalación) porque no existe un sobrecalentamiento del agua.

Algunas iniciativas han tenido como objeto el desarrollo de este tipo de reactores, sin concentración solar, para aplicaciones fotocatalíticas [43]. En estos casos en los que no hay concentración solar ($RC = 1$) ningún punto del tubo recibe mucho más de 1 Sol de radiación UV, debido a la relación entre la superficie del tubo fotorreactor y del colector. Como resultado, la radiación UV incidente en el reactor es muy similar a la de los fotorreactores basados en colectores de placa plana. La eficiencia máxima de captación anual, para colectores estáticos sin seguimiento, se consigue con un ángulo de inclinación del colector sobre la horizontal semejante a la latitud del lugar de emplazamiento. Es importante resaltar también que en estos reactores sin concentración se tiene una relación lineal entre la velocidad de la reacción y la intensidad de irradiación incidente, según se comentó en el [Capítulo 3](#). Todos estos factores contribuyen a un excelente comportamiento de los colectores CPCs en las aplicaciones fotocatalíticas solares.



Figura 21 Detalle de un colector CPC donde se observa la configuración de los tubos reactores.

La ecuación explícita para un reflector CPC con un reactor tubular se indica en la Figura 22; un punto reflector genérico S puede describirse en términos de dos parámetros: el ángulo θ , sostenido por líneas originadas en O (centro del tubo reactor) y los puntos A y R, y la distancia ρ , dado por segmento RS, que es tangente al tubo reactor en el punto R:

$$\theta = \overline{OA} \angle \overline{OR} \quad (2)$$

$$\rho = \overline{RS} \quad (3)$$

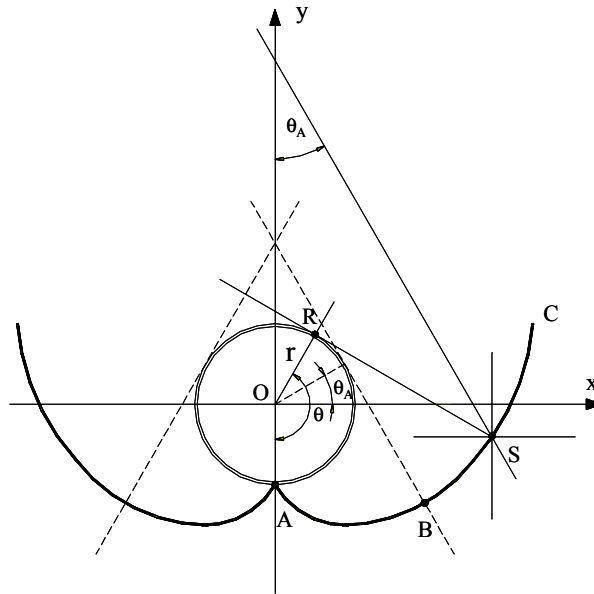


Figura 22. Construcción de un reactor Cilindro-Parabólico Compuesto (CPC).

Un parámetro importante para la definición de CPC es el ángulo de aceptación $2\theta_a$, que es el rango angular dentro del cual todos los rayos incidentes en el plano de apertura del colector van, bien a incidir directamente sobre el reactor, o bien a ser reflejados sobre él, sin necesidad de mover el conjunto.

La solución a la curva del CPC viene dada por dos porciones separadas, una involuta ordinaria para la curva AB y una porción exterior para la curva que va desde B a C:

$$\rho = r \theta \quad \text{para} \quad |\theta| \leq \theta_a + \pi/2 \quad \text{parte AB de la curva} \quad (4)$$

$$\rho = r \left[\frac{\theta + \theta_a + \pi - \cos(\theta - \theta_a)}{1 + \sin(\theta - \theta_a)} \right] \quad \text{para} \quad \theta_a + \frac{\pi}{2} \leq |\theta| \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_a \quad \text{parte BC} \quad (5)$$

El valor de la Razón de Concentración (RC) del CPC está dado por:

$$RC = \frac{1}{\sin \theta_a} \quad (6)$$

En el caso especial de $\theta_a = 90^\circ$, se tiene una $RC = 1$ y los puntos B y C son coincidentes. En este caso $2\theta_a = 180^\circ$, lo que quiere decir que cualquier fotón que llegue al plano de apertura del colector, sea cual sea su dirección, va a poder ser aprovechado en el reactor. Este hecho es especialmente importante ya que permite aprovechar la radiación solar UV difusa. Además, este amplio ángulo de aceptación permite absorber posibles errores de alineación y reflexión del conjunto superficie reflectora-tubo reactor, lo que también es una virtud importante para permitir un bajo coste del fotorreactor.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. P.S. Mukherjee y A.K. Ray, *Chem. Eng. Technol.*, **22**, 253-260 (1999).
- [2]. J. V. Anderson, H. Link, M. Bohn y B. Gupta, *Solar En. Mat.*, **24**, 538-549 (1991).
- [3]. M. Romero, J. Blanco, B. Sánchez, A. Vidal, S. Malato, A.I. Cardona y E. García, *Solar Energy*, **66** (2), 169-182 (1999).

- [4]. G. Al-Sayyed, J.C. D'Oliveira y P. Pichat, *J. Photochem. Photobiol.*, **58** (1), 99-114 (1991).
- [5]. D. Blake, J. Webb, C. Turchi y K. Magrini, *Solar En. Mat.*, **24**, 584-593 (1991).
- [6]. T.A. Egerton y C.J. King, *J. Oil Chem. Assoc.*, **62**, 386-391 (1979).
- [7]. D.F. Ollis, "Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy", 593-622. Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [8]. S. Malato, "Solar Photocatalytic Decomposition of Pentachlorophenol Dissolved in Water". Colección Documentos CIEMAT. Editorial CIEMAT, 1999.
- [9]. T.A. Egerton y C.J. King, *J. Oil Chem. Assoc.*, **62**, 386-391 (1979).
- [10]. C. Kormann et al, *Environ. Sci. Technol.*, **25**, 494-500 (1991).
- [11]. C.S. Turchi y D.F. Ollis, *J. Cat.*, **122**, 178-192 (1990).
- [12]. H. Al-Ekabi, Ali Safarzadeh-Amiri, W. Sifton, J. Story, *J. of Environ. and Pollution*, **1** (1-2), 125-136 (1991).
- [13]. R.L. Pozzo, M.A. Baltanás y A.E. Cassano, *Catal. Today*, **39**, 219-231 (1997).
- [14]. P. Fernández-Ibáñez, S. Malato y F.J. De Las Nieves, *Catalysis Today*, **54**, 195-204 (1999).
- [15]. G. Jorgensen y R. Govindarajan, "Ultraviolet Reflector Materials for Solar Detoxification of Hazardous Waste", Report SERI/TP-257-4418. DE91 002196. SERI, 1991.
- [16]. O.M. Alfano, R.L. Romero y A.E. Cassano, *Chemical Engineering Science*, **41**(5), 1137-1153 (1986).
- [17]. O.M. Alfano, R.L. Romero y A.E. Cassano, *Chemical Engineering Science*, **41**(3), 421-444 (1986).
- [18]. P.L. Yue, "Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air", 495-510. Eds: D.F. Ollis y H. Al-Ekabi. Elsevier Science Publishers B.V., 1993.
- [19]. L. Rizzuti y A. Brucato, "Photocatalysis and Environment. Trends and Applications", 623-636. Ed: M. Schiavello. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [20]. D.F. Ollis, "Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air", 481-494. Eds: D.F. Ollis y H. Al-Ekabi. Elsevier Science Publishers B.V., 1993.
- [21]. R.L. Romero, O.M. Alfano y A.E. Cassano, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **36**(8), 3094-3109 (1997).
- [22]. G.B. Raupp, J.A. Nico, S. Annangi y R. Changrani, *AIChE Journal*, **43**(3), 792-801, (1997).
- [23]. O.M. Alfano, R.L. Romero y A.E. Cassano, *Chemical Engineering Science*, **41**(5), 1155-1161 (1986).
- [24]. A.I. Cardona, B. Sánchez, A. Bahamonde y P. Avila, *Actas SECAT'99, Reunión de la Sociedad Española de Catálisis*. Eds: G. Blanco y C. Mira. Univ. Cádiz, 1999.
- [25]. B. Sánchez, A.I. Cardona, M. Romero, P. Avila y A. Bahamonde, *Catalysis Today*, **54**, 369-377 (1999).
- [26]. P. Avila, A. Bahamonde, J. Blanco, B. Sánchez, A.I. Cardona y M. Romero, *Applied Catalysis B. Environmental*, **17**, 75-88 (1998).
- [27]. J. Blanco, P. Avila, A. Bahamonde, E. Alvarez, B. Sánchez y M. Romero, *Catalysis Today*, **29**, 437-442 (1996).
- [28]. A.I. Cardona, B. Sánchez, M. Romero, B. Fabrellas, E. García, J. Blanco, P. Avila y A. Bahamonde, *J. Phys. IV France*, **9** Pr3, 271-276 (1999).
- [29]. Md.M. Hossain, G.B. Raupp, A. Tempe, S.O. Hay y T.N. Obee, *AIChE Journal*, **45**(6), 1309-1321 (1999).
- [30]. P. Wyness, J.F. Klausner, D.Y. Goswami y K.S. Schanze, *Transactions of the ASME*, **116**, 2-7 (1994).
- [31]. P. Wyness, J.F. Klausner, D.Y. Goswami y K.S. Schanze, *Transactions of the ASME*, **116**, 8-13 (1994).
- [32]. R.J. Brandi, O.M. Alfano y A.E. Cassano, *The 5th World Congress of Chemical Engineering: Technologies critical to a changing world. Vol. III*. American Institute of Chemical Engineers, New York, NY, USA, 1996.
- [33]. R.J. Brandi, O.M. Alfano y A.E. Cassano, *Chemical Engineering Science*, **54** (13-14), 2817-2827 (1999).
- [34]. N.J. Peill y M.R. Hoffmann, *Environ. Sci. Technol.*, **32**(3), 398-404 (1998).
- [35]. D.J. Alpert, J.L. Sprung, J.E. Pacheco, M.R. Prairie, H.E. Reilly, T.A. Milne y M.R. Nimlos, *Solar Energy Materials*, **24**, 594-607 (1991).
- [36]. J. Blanco y S. Malato, *ISES Solar World Congress*, 2097-2101. Eds: M.E. Arden, S.M.A. Burley. y M. Coleman, Pergamon Press, Oxford, 1991.
- [37]. C. Minero, E. Pelizzetti, S. Malato y J. Blanco, *Solar Energy*, **56**(5), 421-428 (1996).
- [38]. D. Curcó, S. Malato, J. Blanco y J. Giménez, *Solar Energy Mat. & Solar Cells*, **44**, 199-217 (1996).
- [39]. R. Goslich, R. Dillert y D. Bahnemann, *Wat. Sci. Tech.*, **35**(4), 137-148 (1997).
- [40]. A.E. Cassano y O.M. Alfano, *Catalysis Today*, **58**, 167-197 (2000).
- [41]. K. Pacheco, A.S. Watt y C.S. Turchi, *Joint Solar Eng. Conf.*, ASME, 43-49 (1993).
- [42]. J. Giménez, D. Curcó y M.A. Queral, *Catalysis Today*, **54**, 229-244 (1999).
- [43]. J. Blanco, S. Malato, P. Fernández, A. Vidal, A. Morales, P. Trincado, J.C. Oliveira, C. Minero, M. Musci, C. Casalle, M. Brunotte, S. Tratzky, N. Dischinger, K.H. Funken, C. Sattler, M. Vincent, M. Collares-Pereira, J.F. Mendez y C.M. Rangel, *Solar Energy*, **67** (4-6), 317-330 (2000).