

**UTILIZACIÓN DE UN COLECTOR PARABÓLICO COMPUESTO CPC  
PARA LA PURIFICACIÓN DE AGUA**

**CINTHIA ALEXANDRA GUTIERREZ RUIZ  
LISBETH NATHALIE ROBLES CASTELLANOS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CATÁLISIS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2009**

**UTILIZACIÓN DE UN COLECTOR PARABÓLICO COMPUESTO CPC  
PARA LA PURIFICACIÓN DE AGUA**

**CINTHIA ALEXANDRA GUTIERREZ RUIZ  
LISBETH NATHALIE ROBLES CASTELLANOS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de:  
Ingeniero Químico**

**Director**

**Prof. ARISTÓBULO CENTENO HURTADO**

**Co-director**

**Prof. SONIA AZUCENA GIRALDO DUARTE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CATÁLISIS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

***Gracias a Dios por brindarnos el entendimiento.  
A nuestros padres por su continuo apoyo y a todos los  
que contribuyeron y compartieron con sinceridad  
y alegría este nuevo logro.***

***Cinthia y Lisbeth***

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue posible gracias a la financiación de COLCIENCIAS, en el marco del proyecto 1102341-19419.

La Universidad Industrial de Santander, especialmente a la escuela de Ingeniería Química, por brindarnos la formación como profesionales íntegros.

El profesor Aristóbulo Centeno, por su colaboración como director de este trabajo y por compartir con nosotras todo su conocimiento y sabiduría.

La profesora Sonia Giraldo, por brindarnos su comprensión y cooperación.

A los ingenieros Andrea Moreno y Camilo Castro, por su constante apoyo y orientación en el desarrollo de este trabajo.

Todos los miembros del Centro De Investigación en Catálisis – CICAT, por su valiosa colaboración.

A todas las demás personas y grupos que de una u otra forma, nos brindaron su apoyo y contribución para llevar a cabo la realización de esta investigación.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	1
1 MARCO TEÓRICO	3
2 DESARROLLO EXPERIMENTAL	
2.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO	8
2.2 SECCIÓN EXPERIMENTAL	10
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1 RESULTADOS PRELIMINARES	
3.1.1 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE TiO <sub>2</sub>	13
3.1.2 EFECTO DEL RÉGIMEN DE FLUJO EN LA DEGRADACIÓN DE NARANJA II	14
3.2 APLICACIONES	
3.2.1 EFECTO DE LA DEGRADACIÓN DE NARANJA II	16
3.2.2 DESINFECCIÓN DE UNA MATRIZ SIMULADA	18

	<b>Pág.</b>
3.2.3 DESINFECCIÓN DE UNA MATRIZ REAL	19
CONCLUSIONES	22
RECOMENDACIONES	23
BIBLIOGRAFÍA	24
ANEXOS	26

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Molécula de Naranja II .....	3
Figura 2. Procesos que ocurren en la interface semiconductor electrolito bajo iluminación .....	4
Figura 3. Esquema general del Colector Parabólico Compuesto.....	6
Figura 4. Radiación solar reflejada en un CPC.....	6
Figura 5. Efecto de la concentración de catalizador en la degradación de 10 ppm de Orange II .....	14
Figura 6. Efecto en la degradación de 10 ppm de Naranja II a diferentes caudales.....	15
Figura 7. Efecto de la degradación de diferentes concentraciones de Naranja II con 50 ppm de TiO <sub>2</sub> y un caudal de 1,41 GPM.....	16
Figura 8. Desinfección de la matriz simulada.....	18

**Pág.**

Figura 9. Comparación de la inactivación de una matriz de agua real y una contaminada artificialmente.....	20
Figura 10. Obtención de la curva de un captador CPC.....	27
Figura 11. Vista frontal del Colector Parabólico Compuesto CPC .....	30
Figura 12. Vista posterior del Colector Parabólico Compuesto CPC ....	30

## LISTA DE TABLAS

**Pág.**

Tabla 1. Conteo de microorganismos para determinar el tiempo efectivo de desinfección.

21

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo 1. Colector Parabólico Compuesto CPC	26

## RESUMEN

**TITULO:** UTILIZACIÓN DE UN COLECTOR PARABÓLICO COMPUESTO CPC PARA LA PURIFICACIÓN DE AGUA\*

**AUTORES:** CINTHIA ALEXANDRA GUTIERREZ RUIZ, LISBETH NATHALIE ROBLES CASTELLANOS\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Fotocatálisis Heterogénea,  $\text{TiO}_2$ , Orange II, *E.coli*, Colector Parabólico Compuesto (CPC).

En este trabajo se estudió el funcionamiento y puesta en marcha de un Colector Parabólico Compuesto (CPC), buscando su aplicación en la desinfección de aguas contaminadas y en la degradación de compuestos orgánicos recalcitrantes a métodos tradicionales. Para este propósito se usó el colorante Naranja II y el microorganismo *Escherichia coli* como indicadores de la oxidación fotocatalítica; se analizó la incidencia del tipo de agua usando una artificialmente contaminada y otra natural tomada del Río Frío de Floridablanca. Se determinaron las condiciones de operación evaluando la influencia de la cantidad de catalizador y el régimen de flujo teniendo en cuenta que los resultados fueran reproducibles y comparables siendo necesario estandarizarlos teniendo en cuenta que los experimentos se evaluaron bajo condiciones climáticas diferentes.

Se encontró que las condiciones apropiadas para operar el Colector Parabólico Compuesto son flujo turbulento y baja cantidad de catalizador. La estandarización de los resultados permitió contrastar la degradación solar con el efecto combinado del dióxido de titanio y la irradiación en el sistema estudiado, logrando una reducción significativa del tiempo de reacción comparado con otras técnicas. Se observó que el CPC funciona eficientemente para la aplicación de la fotocatalisis heterogénea como una posible solución para la descontaminación de aguas en pequeñas poblaciones alejadas que no cuentan con servicio de agua potable.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química.  
Prof. Arristóbulo Centeno. Prof. Sonia A. Giraldo

## SUMMARY

**TITLE:** USE OF A PARABOLIC COLLECTOR COMPOSED CPC FOR THE PURIFICATION OF AGUA\*

**AUTHORS:** CINTHIA ALEXANDRA GUTIERREZ RUIZ, LISBETH CASTELLANOS  
NATHALIE ROBLES \*\*

**KEY WORDS:** Heterogenous Fotocatálisis, TiO<sub>2</sub>, Orange II, *E.coli* , *Composed Parabolic Collector (CPC)*.

In this work was studied the operation and beginning of *Composed Parabolic Collector (CPC)*, looking for its application in the contaminated water disinfection and the recalcitrant organic compound degradation of traditional methods. For this intention was used Orange II dye and the microorganism *Escherichia coli* like indicators of the fotocatalytic oxidation; analyzed the incidence of the type of water using one artificially contaminated and another native of the Rio Frío of Floridablanca. The conditions of operation were determined evaluating the influence of the amount of catalyst and the regime of flow considering that the results were reproducibles and comparable being necessary to standardize considering them that the experiments they were evaluated under different climatic conditions.

According to the results obtained, the appropriate conditions to operate the Compound Parabolic Collector are turbulent flow and low amount of catalyst. The standardization of the results allowed to compare the solar degradation with the combined effect of TiO<sub>2</sub> and the irradiation in the studied system, obtaining a significant reduction of the time of reaction compared with other techniques. The results showed that the CPC works efficiently for the application of the heterogenous fotocatalysis like a possible solution for the decontamination of water in small remote populations that do not count on service of potable water.

---

\* Final studies work report.

\*\*Physical-Chemistry Engineering Faculty. Chemical Engineering School.  
Prof. Aristóbulo Centeno. Prof. Sonia A. Giraldo

## INTRODUCCIÓN

En la última década el avance en las investigaciones sobre el tratamiento de los contaminantes ha progresado a través del uso de tecnologías avanzadas de oxidación como alternativas ó complementos a técnicas convencionales, una de éstas es la fotocatálisis heterogénea (FH) con dióxido de titanio, la cual se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante por el fotocatalizador, es de fácil implementación para degradar compuestos recalcitrantes, descontaminar aguas y económicamente viable.

Existen dos tecnologías que abarcan los diferentes tipos de reactores para la aplicación de la fotocatálisis heterogénea, los sistemas sin concentración, que son conjuntos estáticos sin mecanismos de seguimiento solar y los sistemas con concentración los cuales cuentan con dispositivos mecánicos que les proporciona un movimiento de modo que la radiación solar incide perpendicularmente al reactor. Los equipos de tipo placa plana y los PTCs (cilindros parabólicos con seguimiento solar), son tradicionalmente usados para la implementación de procesos fotoquímicos con luz solar, sin embargo presentan falencias en la eficiencia de la captación de energía, una mezcla de estos dos son los Colectores Parabólicos Compuestos CPCs, éstos son sistemas simples que muestran una curvatura especial en su superficie reflectante lo que les permite reunir las ventajas de ambas tecnologías y captar al máximo la radiación, con mínimos costos de inversión y necesidades de mantenimiento [1]. El uso de éstos muestra grandes ventajas, entre ellas, se alimenta con energía solar, destruye totalmente el contaminante orgánico (por lo que no hay problemas de disposición

posterior de residuos del proceso industrial), emplea como insumo básico una sustancia económica y no-tóxica, el dióxido de titanio.

En este trabajo se estudió el funcionamiento y puesta en marcha de un Colector Parabólico Compuesto (CPC), buscando su aplicación en la desinfección de aguas especialmente en pequeñas comunidades de difícil acceso. Para este propósito se usó el colorante Naranja II y el microorganismo *Escherichia coli* como indicadores del comportamiento de este sistema fotocatalítico en la oxidación de materia orgánica y en la inactivación de bacterias. Se pretende incrementar la capacidad bactericida del efecto térmico de la luz solar con la adición de la acción oxidante asociada al fotocalizador. De esta manera se podría lograr una desinfección de aguas contaminadas en menor tiempo que el necesario para lograrla por efecto térmico solamente y su aplicación en regiones con poca captación de radiación solar.

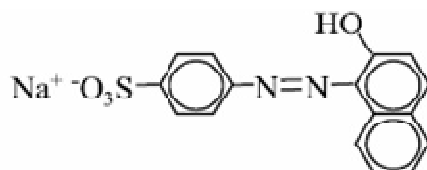
Se analizó la incidencia del tipo de agua usando una artificialmente contaminada y otra natural tomada del Río Frío de Floridablanca.

El presente estudio se desarrolló en el Centro de Investigaciones en Catálisis (CICAT) y está enmarcado en el proyecto de investigación 1102341-19419, “Desarrollo e implementación de procesos heliofotocatalíticos para la producción de agua potable en pequeñas comunidades de Santander” financiado por Colciencias.

## 1. MARCO TEORICO

La fotocatalisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$  es comúnmente usada para la reducción de iones metálicos [2], la muerte de numerosos microorganismos [3] y la degradación de moléculas orgánicas recalcitrantes a otro tipo de tratamientos como cloración, floculación, filtración, lodos activados y biodegradación; un ejemplo de este tipo de moléculas es el colorante azoico Naranja II (Figura 1) que se emplea en la industria textil, posee una alta estabilidad y al ser aplicado en tela de algodón genera un agua residual excesivamente coloreada [4].

**Figura 1.** Molécula de Naranja II

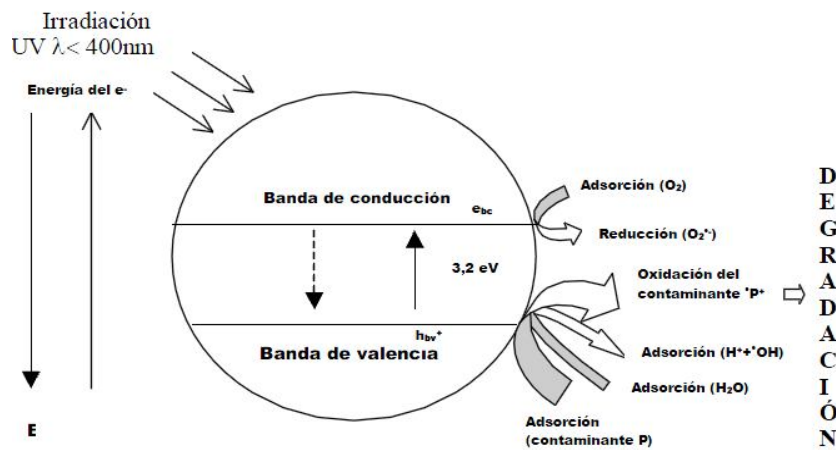


*Fuente. V. Augugliaro, C. Baiocchi, A. Bianco, E. García-López, V. Loddo, S. Malato, G. Marci, L. Palmesano, M. Pazzi, E. Pramauro. Chemosphere. 49. (2002)1223*

El proceso de la fotocatalisis se basa en las propiedades que tienen los materiales semiconductores, cuando son irradiados con luz. Dentro de estos materiales, el  $\text{TiO}_2$  es el más utilizado como fotocatalizador, puesto que presenta los mejores desempeños fotocatalíticos y máximos rendimientos debido a que posee un potencial redox de la banda de valencia lo suficientemente positivo para hacer factible la mineralización de la materia orgánica, además es resistente a la fotocorrosión, no tóxico y posee elevada área activa. Cuando el  $\text{TiO}_2$  recibe irradiación con luz de frecuencia cercana a la de la ultravioleta (< 385 nm) excita

los electrones de la banda de valencia haciendo que éstos salten hacia la banda de conducción originando el denominado par electrón – hueco en la superficie del sólido. Este par electrón-hueco da lugar a reacciones de óxido reducción (Figura 2) debido a que se produce una transferencia interfacial de las cargas. Las reacciones de foto-oxidación tienen lugar en los huecos, mientras que las de foto-reducción se dan por los electrones promovidos a la banda de conducción; los huecos después de migrar a la superficie reaccionan con sustancias adsorbidas como el agua o con iones  $\text{OH}^-$  generando radicales  $\text{OH}^\bullet$ , los cuales tienen la capacidad de oxidar diferentes sustancias orgánicas que se encuentran en la cercanía de la superficie del  $\text{TiO}_2$ . De esta forma se puede alcanzar la mineralización total.

**Figura 2.** Procesos que ocurren en la interface semiconductor-electrolito bajo iluminación



Fuente: J. M. Herrmann, *Destrucción de contaminantes orgánicos por FH*

Las primeras aproximaciones para el empleo de la radiación solar en procesos de desinfección se encuentran en la tecnología SODIS (solar disinfection) [5], en la cual se emplean recipientes transparentes que se

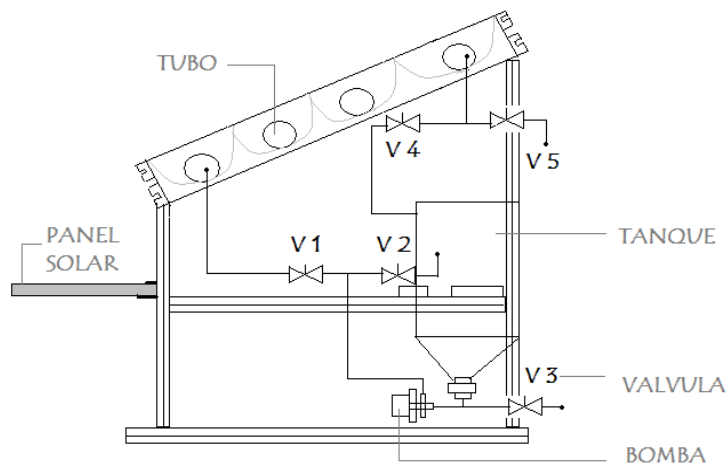
exponen a la radiación solar, permitiéndoles absorber las longitudes ultravioleta e infrarrojo, lo que produce alteraciones en el material genético de los patógenos e incrementa la temperatura del agua, respectivamente. Esta combinación de efectos contribuye de forma sinérgica a inactivar microorganismos presentes en el agua. Reúne como limitaciones largo tiempo de exposición, volúmenes a tratar pequeños y lugares con alta radiación.

Diferentes tipos de reactores se han desarrollado para aplicaciones fotocatalíticas como los Captadores Cilindro Parabólicos y los reactores Planos Estáticos; los resultados más promisorios tanto para descontaminación como desinfección los han mostrado los CPCs (Figura 3), éstos surgieron para lograr concentrar la radiación solar en dispositivos estáticos (no siguen la trayectoria del sol). Son sistemas con una superficie reflectante enfocada hacia un fotorreactor cilíndrico siguiendo una involuta (Figura 4). Estos dispositivos proporcionan una de las mejores ópticas, pudiendo además ser diseñados con una razón de concentración equivalente a uno; los Captadores Cilindro Parabólicos alcanzan una razón de concentración entre 5 y 20, utilizan eficazmente la luz solar directa y gracias a la radiación concentrada permiten usar la energía térmica captada en paralelo para aplicaciones térmicas, sin embargo su alto costo, bajo rendimiento y el aprovechamiento de solo la irradiación directa lo hace poco favorable respecto a otro tipo de sistemas como los CPCs.

Los Colectores Parabólicos Compuestos resultan atractivos debido a que reúnen las ventajas de los Concentradores Parabólicos y los sistemas Planos Estáticos, pues aprovechan la radiación solar directa y difusa con alta eficiencia, tienen menores costos de inversión y de

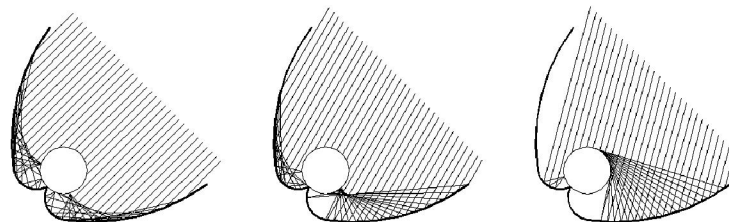
mantenimiento, opera siempre en flujo turbulento con lo que se favorece la transferencia de masa y se evitan inconvenientes por posible sedimentación del catalizador, no hay calentamiento del agua lo que impide posibles problemas de evaporación, sobre presión y no hay vaporización de compuestos volátiles, por ser sistemas cerrados.

**Figura 3.** Esquema general del Colector Parabólico Compuesto CPC



Fuente. Cinthia A Gutierrez R, Lisbeth N Robles C

**Figura 4.** Radiación solar reflejada en un CPC



Fuente. J. Blanco Gálvez, El reactor solar fotocatalítico: estado del arte.

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 localización [1].

Una aplicación interesante del funcionamiento del CPC es la inactivación de bacterias como la *E. coli*; este bacilo Gram-negativo posee una pared compleja formada por una capa interna que le da estabilidad mecánica: el peptidoglicano y una externa que le da resistencia a los ataques químicos, compuesta en su mayoría por lipopolisacáridos [6]. Se ha reportado que la acción fotocatalítica incrementa progresivamente la permeabilidad de la pared celular debido a que sufre una peroxidación lipídica que causa un incremento en la fluidez de la pared celular, disminuye la resistencia mecánica y permite la pérdida del contenido intracelular conduciendo finalmente a la muerte celular [7]. Bajo condiciones de radiación solar entre 330-500 nm, algunos microorganismos poseen la capacidad de reparar el daño causado al ADN durante la exposición y retornar al estado original, incluso volviéndose a reproducir (proceso de fotorreactivación).

Se ha comprobado que la radiación solar por si sola puede eliminar una gran cantidad de compuestos orgánicos y organismos patógenos evitando la generación de subproductos tóxicos propios de las tecnologías convencionales [8]. Los trabajos realizados en la Plataforma Solar de Almería, España en degradación de contaminantes orgánicos y desinfección de aguas han demostrado que la acción conjunta del dióxido de titanio con la radiación (SODIS modificado) en un reactor tipo CPC es una alternativa viable y competitiva desde todo punto de vista, que limita la formación de subproductos y puede aportar soluciones innovadoras en el saneamiento del agua en lugares alejados de reducida población, donde las tecnologías tradicionales son de difícil aplicación por su alto valor, baja eficiencia y elevado tiempo de tratamiento.

## **2. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

En esta unidad se presentan los materiales y procedimientos usados para realizar las pruebas con el fin de analizar el funcionamiento, operatividad y la funcionalidad del reactor CPC con  $\text{TiO}_2$  suspendido, en la oxidación fotocatalítica en el sistema estudiado.

### **2.1 METODOLOGIA DE TRABAJO**

Las pruebas experimentales de este proyecto se dividieron en tres secciones, pruebas preliminares, degradación del colorante Naranja II e inactivación de *E. coli*; estos elementos se escogieron como indicadores del comportamiento del sistema fotocatalítico, por un lado teniendo en cuenta que el colorante Naranja II es un buen representante de los compuestos orgánicos contaminantes que son recalcitrantes a la degradación por métodos tradicionales y por otro lado, la presencia de *E. coli* en el agua es señal de contaminación microbiológica; además esta bacteria presenta facilidades de cultivo y aislamiento. Las pruebas preliminares correspondieron a la elección de la cantidad apropiada de catalizador y la evaluación de la influencia del régimen de flujo.

Se utilizó como catalizador un dióxido de titanio comercial, el Degussa P-25, teniendo en cuenta que es un material que ha sido probado en la desinfección de agua contaminada con bacterias, en la degradación de compuestos orgánicos recalcitrantes tóxicos, reducción de iones metálicos, aumento de la biodegradabilidad de efluentes celulósicos y en la decoloración de diferentes pigmentos en solución [2,3]. En las pruebas realizadas se varió la cantidad de catalizador, la concentración

de reactivos así como también el régimen de flujo. En todos los experimentos se midió la radiación solar y se monitoreó la temperatura.

El CPC utilizado como reactor estaba conformado por un tanque de 20 L de capacidad, cinco válvulas, una bomba que puede operar en un rango de 0.1607 hasta 1.4051 GPM cuyo régimen de flujo en todos los casos es turbulento con un número de Reynolds cercano a 5000, un espejo de aluminio y cuatro tubos de vidrio borosilicato, la descripción detallada del equipo se encuentra en el Anexo 1.

La intensidad de la radiación solar UV se midió por medio de un radiómetro global (ACADUS 85-PLS) el cual provee datos de energía incidente ( $W/m^2$ ) y energía acumulada ( $W/m^2 \cdot h$ ) cuya longitud de onda se encuentra entre 300 y 400 nm; cuando se trabaja con radiación solar, se tiene una iluminación que va cambiando continuamente y es diferente según la posición. Una forma común de representar el avance de un proceso de degradación fotocatalítica es teniendo en cuenta el tiempo de residencia ( $t_R$ ), que indica el tiempo de exposición a la luz de la mezcla que pasa constantemente por el reactor, pero este no permite comparar, ni analizar la eficiencia de diferentes experimentos. Se ha demostrado que un método para evitar esta falencia es representar el desarrollo del proceso en función de la energía útil que ha acumulado el reactor a través del tiempo mediante la siguiente ecuación [9]:

$$Q_{UV, n} = Q_{UV, n-1} + \Delta t_n \overline{UV}_{G, n} \frac{A_{CPC}}{V_{TOT}}$$

Donde:

$Q_{UV, n}$  Es la energía acumulada.

$\Delta t_n$	Intervalo de tiempo entre dos muestras experimentales consecutivas.
$\overline{UV}_{G,n}$	Es la radiación media útil incidente ( $W_{UV} m^{-2}$ )
$A_{CPC}$	Superficie del colector.
$V_{TOT}$	Volumen total.

El tiempo de exposición en el reactor es proporcional a cada punto de la energía incidente estandarizada. Cada una de las pruebas se realizaron mínimo dos veces comparando los resultados obtenidos bajo las mismas condiciones y de esta forma garantizar la reproducibilidad de los experimentos. Se reportan en los resultados los promedios de las mediciones.

## 2.2 SECCION EXPERIMENTAL

### ➤ Prueba de degradación helio-fotocatalítica de Naranja II.

Para los experimentos de degradación de Naranja II se utilizó agua desionizada (tomada del equipo de Ósmosis Inversa para garantizar la ausencia de contaminantes, sales disueltas e inexistencia de microorganismos). El procedimiento empleado para la reacción fue el siguiente: se llenó el tanque con un volumen de 18 L, a éste se le adicionó la cantidad a usar de catalizador y de colorante las cuales variaron de 30 a 70 y de 5 a 20 ppm respectivamente, dependiendo de lo establecido para cada experimento, se dejó homogenizar la mezcla en el reactor en oscuridad total por media hora y posteriormente se expuso al sol el reactor. En ese instante se tomó la primera muestra lo

que se constituyó en el tiempo cero para la reacción. Se continuó la toma de muestras cada 30 minutos hasta la desaparición total del tono naranja, momento en el que considera que ocurrió la degradación total del colorante. Las muestras se centrifugaron durante 15 minutos y se analizaron por medio de espectrofotometría de Ultravioleta Visible con un equipo UV-Vis HP 8453 midiendo la absorbancia óptica a la longitud de onda correspondiente a 486 nm [2], que se encuentra ubicado en el centro de Investigaciones en Catálisis CICAT- UIS. Se calculó la degradación del Naranja II como la concentración presente en cada muestra; por último se lavó el reactor.

➤ **Prueba de desinfección helio-fotocatalítica de agua.**

Se realizaron pruebas con agua contaminada artificialmente con la cepa de *E.coli* ATCC 11229 y con agua natural tomada del Río Frío del municipio de Floridablanca (Santander).

El protocolo empleado para la reacción fue: Se cargó el equipo con 18 L de agua desionizada; antes de cada prueba se accionó el sistema de bombeo con agua bajo oscuridad y al cabo de 30 minutos se obtuvo una muestra para medir posible contaminación microbiana del ambiente. Seguidamente, se agregó el inóculo de bacterias y se adicionó la cantidad de catalizador seleccionada en las pruebas preliminares, se dejó homogenizar por 15 minutos. A continuación el reactor se expuso al sol y se tomó la primera muestra (tiempo cero de la reacción), se continuó tomando alícuotas cada 15 minutos y cada una de éstas se diluyó 4 veces en solución salina (0.85% p/v), para posteriormente realizar siembra por duplicado en agar recuento y llevar a incubación por 18 horas a 35 °C, por último se contaron las unidades

formadoras de colonia (UFC) por mililitro. Para la prueba de desinfección de la matriz real se tomaron 18 L de agua del Río Frío, se siguió el procedimiento citado anteriormente hasta el máximo aprovechamiento de la luz solar; el recuento de coliformes totales se obtuvo de la siembra de la muestra inicial en el medio selectivo Agar Mc Conkey (AMC; Oxoid).

En el lavado del reactor se adicionó hipoclorito de sodio al 13% y se dejó en recirculación durante 5 horas en oscuridad, finalmente se adicionó agua con el fin de eliminar los residuos de catalizador e hipoclorito.

➤ **Cultivo de *E. coli* ATCC 11229**

El crecimiento se llevó a cabo tomando dos colonias de un cultivo previo en Agar Recuento (ARC, Merck) que se inocularon en 20mL de medio nutritivo Luria Bertani (LB; triptona; Oxoid, al 1% p/v; extracto de levadura; Oxoid, al 0.5% p/v y NaCl; Carlo Erba, al 1% p/v). El inóculo se mantuvo por 2,5h en agitación constante a 120 rpm y  $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ , seguidamente éste se adicionó a 180mL de LB y se mantuvo a las mismas condiciones de temperatura y agitación por 24h más hasta alcanzar la fase de crecimiento bacteriano [6,10].

Para los ensayos de inactivación de microorganismos todo el material a utilizar se esterilizó mediante el uso de autoclave por 15 minutos; se preparó el cultivo en medio Luria Bertani, se centrifugó por 15 minutos para obtener el pellet de biomasa el cual se diluyó con solución salina y se sometió a una segunda centrifugación para finalmente adicionarle agua desionizada.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se presentan los resultados y el análisis de la elección de las condiciones apropiadas de operación para la puesta en marcha del CPC utilizando como indicadores la degradación fotocatalítica del colorante Naranja II y la inactivación del microorganismo modelo *E. coli* (ATCC 11229) usando  $\text{TiO}_2$  como fotocatalizador, para la aplicación en el saneamiento de una fuente de agua natural.

#### **3.1 RESULTADOS PRELIMINARES**

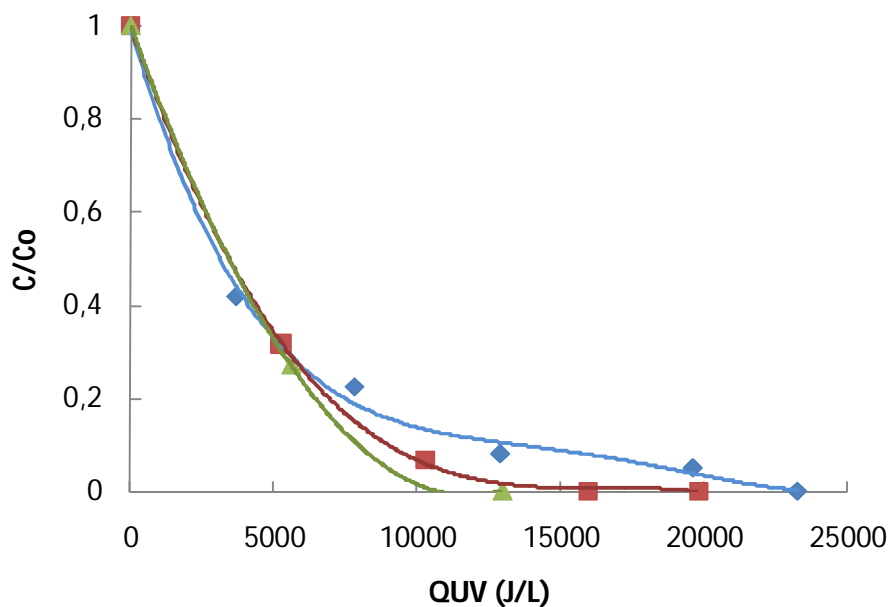
##### **3.1.1 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL CATALIZADOR**

La Figura 5 muestra como varían los requerimientos de irradiación dependiendo de la cantidad de catalizador presente en una solución de 10 partes por millón de colorante. Se observa en esta figura que a medida que la concentración de dióxido de titanio aumenta, se requiere menor energía incidente acumulada ( $Q_{UV}$ ) y por consiguiente el tiempo de reacción disminuye.

Se esperaba que al incrementar la cantidad de  $\text{TiO}_2$  presente en la solución, la velocidad de degradación aumentara y por ende el cambio en la cantidad de energía necesaria fuese relevante, pero la diferencia entre usar una concentración de 50 y 70 ppm no fue significativa puesto que la variación en la energía incidente acumulada de cada uno de éstos para la degradación total fue de tan solo un 19%, lo cual se atribuye al efecto “pantalla”, este fenómeno se presenta cuando la concentración de catalizador es alta y consiste en una excesiva opacidad de la disolución que impide que el dióxido de titanio de la

parte mas interna del reactor se ilumine afectando directamente la velocidad de reacción, en base a lo anterior se decidió que la concentración de catalizador apropiada para trabajar con el CPC es de 50 ppm.

**Figura 5.** Efecto de la concentración de catalizador en la degradación heliofotocatalítica de 10 ppm de naranja II con:  $\blacktriangle$  70 ppm  $\text{TiO}_2$ ,  $\blacksquare$  50 ppm  $\text{TiO}_2$ ,  $\blacklozenge$  30 ppm  $\text{TiO}_2$ .

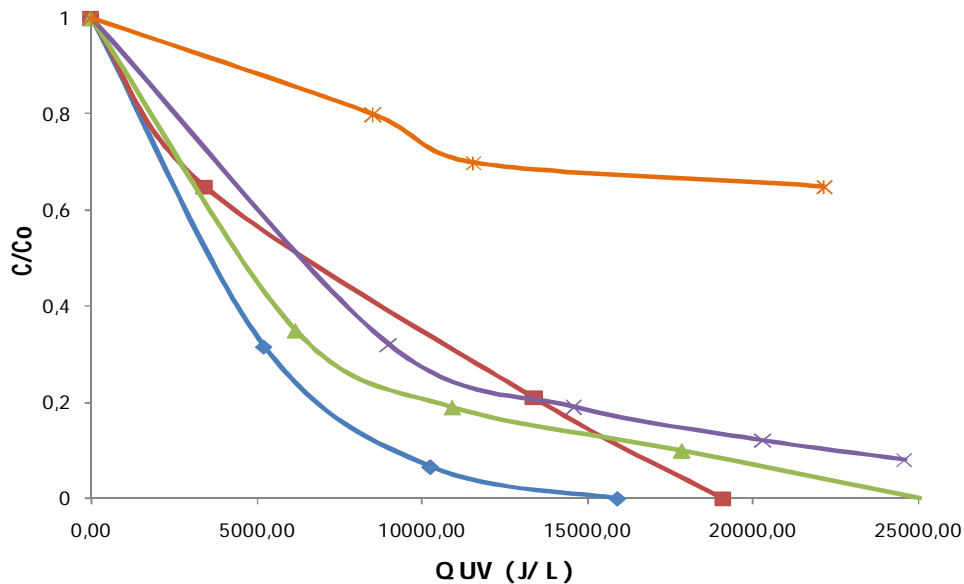


Fuente. Cinthia A Gutierrez R, Lisbeth N Robles C

### 3.1.2 EFECTO DEL RÉGIMEN DE FLUJO EN LA DEGRADACIÓN DEL NARANJA II

Una de las variables manipulables en el CPC es el régimen de flujo a través de la variación del caudal. En la Figura 6 se presenta la influencia del régimen de flujo en la degradación de 10 ppm de colorante.

**Figura 6.** Efecto en la degradación de 10 ppm de Naranja II a diferentes caudales, \* 0,1607 GPM, — 0,2172 GPM, — 0,6475 GPM, — 1,2007 GPM, — 1,4051 GPM.



*Fuente. Cinthia A Gutierrez R, Lisbeth N Robles C*

Se aprecia en la Figura 6 que si disminuye el régimen de flujo, la velocidad de reacción se hace más lenta, hecho que se traduce en una disminución en el número de Reynolds, provocando sedimentación del catalizador. Por otro lado cuando se opera con menor turbulencia el tiempo de exposición a la radiación solar es mayor, situación que resulta favorable para la activación del catalizador, sin embargo como las partículas de  $TiO_2$  interaccionan menos con las moléculas de Naranja II se limita la transferencia de masa ocasionando un menor rendimiento en la degradación.

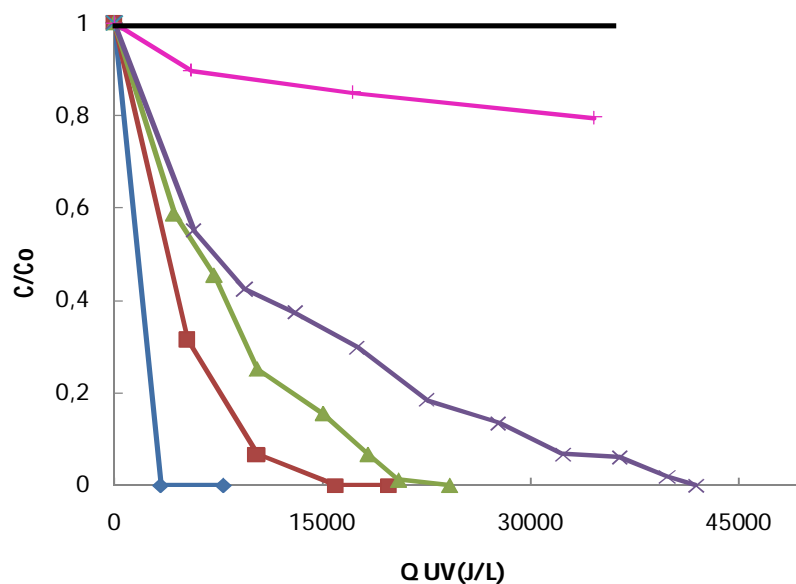
Según lo anteriormente expuesto, para continuar con el estudio de las condiciones de degradación de Naranja II y desinfección de agua, se eligió el régimen de flujo mas turbulento el cual corresponde a un caudal de 1.41 GPM y a un número de Reynolds de 5635.

### 3.2 APLICACIONES

#### 3.2.1 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE NARANJA II

En la Figura 7 se muestran los resultados de la degradación helio-fotocatalítica de diferentes concentraciones de colorante.

**Figura 7.** Efecto en la degradación de diferentes concentraciones de Naranja II con 50 ppm de  $TiO_2$  y un caudal de 1.41 GPM. — 20ppm OII, — 15 ppm OII, — 10 ppm OII, — 5ppm OII, — Degradación solar, — Prueba en presencia de catalizador y en oscuridad total.



Fuente. Cinthia A Gutierrez R, Lisbeth N Robles C

En la Figura 7 se observa que a medida que aumenta la concentración de Naranja II la degradación se hace más lenta, debido a que hay una excesiva cantidad de partículas de colorante respecto a la proporción de especies oxidantes presentes en la disolución y por tanto se requiere de un aumento de energía y tiempo de irradiación para la total mineralización del contaminante.

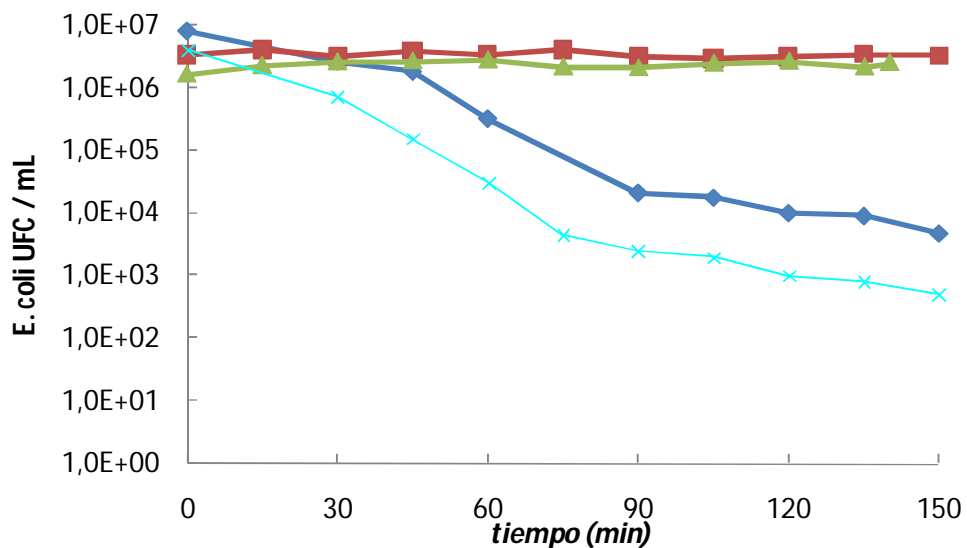
Se aprecia también en la Figura 7 el efecto de la degradación solar sobre el Naranja II. Se consiguió reducir la concentración de colorante en un 20% durante un periodo de 3 horas de reacción debido a que las longitudes de onda de la radiación que logra captar el CPC pueden romper algunos enlaces de la molécula del Naranja II, generando dicha disminución en la coloración. Las publicaciones sobre este tema aseguran que la disminución en la concentración de tinta contaminante no es significativa cuando se usa la fotólisis como medio de descontaminación, puesto que después de 32 horas de reacción tan solo se elimina el 10.68% [11], para el caso del CPC del Centro de Investigación en Catálisis el tiempo de exposición decrece a tan solo 3 horas y se duplica el porcentaje de degradación.

La adsorción de Naranja II por parte de las moléculas de dióxido de titanio es mínima en el periodo de oscuridad sin importar que tan extenso sea este tiempo, esto podría explicarse considerando que el catalizador no está activo y por tanto no hay especies oxidantes en la solución, lo cual se evidencia en la Figura 7 donde no se observa algún cambio en la concentración del colorante.

### 3.2.2 DESINFECCIÓN DE UNA MATRIZ DE AGUA SIMULADA

La Figura 8 muestra las condiciones que intervienen en la desinfección de una matriz de agua contaminada artificialmente.

**Figura 8.** Desinfección de la matriz simulada. — estrés mecánico — efecto bactericida del catalizador — efecto combinado del catalizador y la radiación — SODIS



Fuente. Cinthia A Gutierrez R, Lisbeth N Robles C

La inactivación de *E. Coli* por luz solar (SODIS) representada en la Figura 8 muestra una disminución considerable en la concentración debido a que la radiación incidente ataca de forma directa la membrana celular, explícitamente la continuidad de la cadena de peptidoglicanos de la que está compuesta. Para conseguir la muerte de toda la población de microorganismos en este tipo de agua cuya concentración inicial de bacterias es de  $10^6$  se necesitan de 6 a 7 horas de exposición.

Como se aprecia en la Figura 8 la cantidad de bacterias permaneció constante al analizar el efecto bactericida del catalizador representado por la línea verde; se ha reportado que el dióxido de titanio en ausencia de radiación posee dicho efecto [12], en las pruebas realizadas en el CPC este efecto no fue notorio debido a que el catalizador no se activó y no se produjeron radicales hidroxilo que son los encargados de iniciar el proceso de lisis celular.

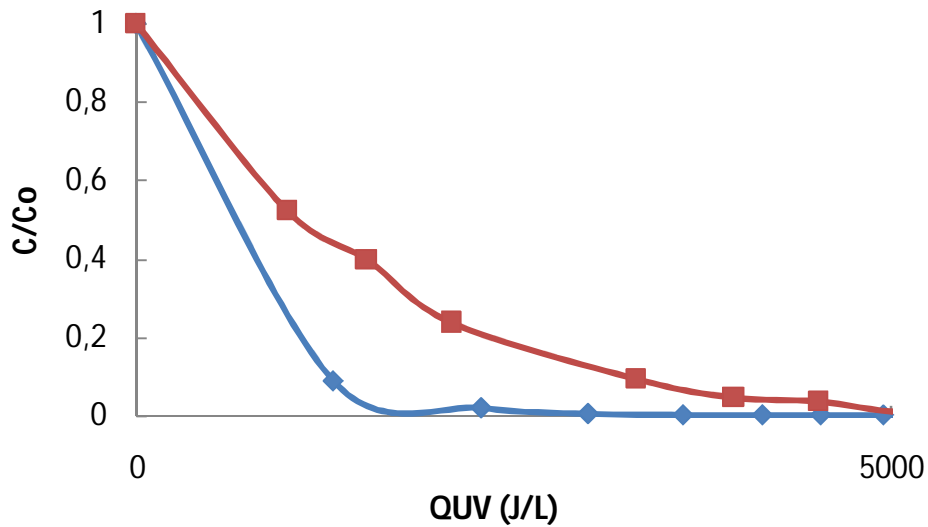
Al evaluar el efecto del estrés mecánico simbolizado por la línea roja, causado por el régimen de flujo, el paso por uniones, tubería y la geometría del sistema se encontró que las UFC/mL permanecieron constantes durante el tiempo de reacción.

Para la inactivación total de bacterias el efecto conjunto de la radiación UV y el dióxido de titanio, (SODIS modificado) tiene relevancia, ya que la concentración microbiana al final del periodo de exposición es prácticamente nula además, el tiempo de reacción es mucho menor que cuando se usa solo irradiación (SODIS), tarda alrededor de 3 a 4 horas; la eficacia de dicha combinación se debe a que el  $\text{TiO}_2$  al ser irradiado genera radicales hidroxilo que destruyen total o parcialmente la pared celular por medio de la oxidación de los lípidos insaturados que la componen, además a través de fagocitosis las células ingieren las moléculas del catalizador para su posterior digestión, causando la lisis celular.

### **3.2.3 DESINFECCION DE UNA MATRIZ DE AGUA REAL**

En la Figura 9 se muestra la comparación de la inactivación de una matriz de agua real y una contaminada artificialmente.

**Figura 9.** Comparación de la inactivación de una matriz de agua real y una artificial.



Fuente. Cinthia A Gutierrez R, Lisbeth N Robles C

En la Figura 9 se observa que la matriz de agua real compuesta por *E. coli* con una población inicial de  $10^3$  UFC/mL y por coliformes fecales con una concentración de  $5 \cdot 10^2$  UFC/mL tiene el mismo comportamiento en la desinfección que el agua contaminada artificialmente, dicha conducta se basa en que las bacterias aún siendo una cepa salvaje mueren por los radicales que se generan al irradiar el catalizador los cuales rompen la membrana celular, asimismo requieren igual cantidad de energía incidente acumulada para la inactivación.

En la Tabla 1. se presenta el conteo de microorganismos para determinar el tiempo efectivo de desinfección.

**Tabla 1.** *Conteo de microorganismos para determinar el tiempo efectivo de desinfección.*

<b>Tiempo (min)</b>	<b>UFC/ml</b>
60	$1,4 \cdot 10^4$
120	$1,1 \cdot 10^2$
240	$2,5 \cdot 10^2$
315	$1,5 \cdot 10^2$

*Fuente. Cinthia A Gutierrez R, Lisbeth N Robles C*

Al realizar el conteo de microorganismos para determinar el tiempo efectivo de desinfección del agua de Río Frío se encontró que a pesar que al final de la reacción la población de *E. coli* fue aparentemente nula, las bacterias se regeneraron por sus mecanismos de defensa al estrés oxidativo y alcanzaron la concentración existente al inicio del proceso, este fenómeno posiblemente se deba a que el daño celular fue reparado por ellas mismas con ayuda de algunas longitudes de onda de la radiación UV, lo que indica que para la inactivación total de microorganismos de una matriz de agua real, se necesita mayor tiempo de irradiación fuerte y constante, una mayor cantidad de catalizador ya que como es mas de una especie de bacterias la que se encuentra presente se genera una competencia por los radicales hidroxilos formados ó un catalizador cuyo ancho de banda permita una mayor absorción de la radiación.

## CONCLUSIONES

Se pudo demostrar que el fotorreactor solar CPC es eficiente para la desinfección de aguas contaminadas y para la degradación de compuestos orgánicos durante periodos cortos de exposición, cuando se utiliza en combinación de dióxido de titanio en suspensión como fotocatalizador.

La degradación de compuestos orgánicos contaminantes como el Naranja II por medio de la desinfección solar (SODIS) demostró ser efectiva disminuyendo considerablemente el tiempo de degradación y duplicando el porcentaje de decoloración respecto a otros sistemas.

El uso de la fotocatálisis en un CPC conduce a la desinfección de 18 litros de agua contaminada con *E. coli* como consecuencia de la unión del efecto térmico de la luz solar y de las especies oxidantes generadas en la superficie del catalizador (SODIS modificado)., en un periodo de 4 a 5 horas de tratamiento.

El régimen adecuado para la operación del CPC corresponde a flujo turbulento el cual garantiza que el catalizador permanezca en suspensión, favoreciendo la producción de radicales hidroxilo y la interacción de éstos con los contaminantes.

La concentración de catalizador a usar para la aplicación de este tipo de tecnología debe ser baja, puesto que a concentraciones altas se produce el efecto "pantalla".

## **RECOMENDACIONES**

Realizar una investigación profunda respecto a la influencia de la naturaleza del catalizador y el tiempo de exposición, con el fin de aplicar este tipo de tecnología en una población rural de difícil acceso.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Julián Blanco, Sixto Malato, Claudio A. Estrada, Erick R. Bandala, Silvia Gelover y Teresa Leal, Purificación de aguas por fotocatalisis heterogénea: estado del arte. Argentina: CYTED, 2001 .p.51-76
- [2] J. Fernández, J. Kiwi, C. Lizama, J. Freer, J. Baeza, H.D. Mansilla. Factorial experimental design of Orange II photocatalytic decolouration En: Journal of photochemistry and photobiology. 2002, No 23 (Agosto, 2002).p.213-219
- [3] Castro Camilo, Arámbula Alba, Centeno Aristóbulo, Giraldo Sonia. Evaluación de la degradación heliofotocatalítica de *E. coli* con  $TiO_2$  modificado en sistemas tipo SODIS. 2009
- [4] Luís Fernando Garcés Giraldo, Gustavo Antonio Peñuela Mesa, Fotocatalisis de aguas residuales de la industria textil utilizando colector solar. En: Revista Lasallista de investigación, No 1 .p. 7-14
- [5] Wegelin, M.; Canonica, S.; Mechsner, K.; Fleishmann, T.; Pesaro, F. & Metzler, A. Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. 1994
- [6] Camilo A. Castro, Andrea Moreno, Alba L. Arámbula, Giovanna Rincón, Aristóbulo Centeno, Sonia A. Giraldo, Efectos causados por tratamientos Fotocatalíticos con  $TiO_2$  sobre la *E. coli.*, Bucaramanga 2008

- [7] Huang, Z.; Maness, P. C.; Blake, D. M.; Wolfrum, E. J.; Smolinski, S. L.; Jacoby, W. A.. Bactericidal mode of titanium dioxide photocatalysis. *J. Photochem. Photobiol* ,2000
- [8] J. Calkins, J.D. Buckles y J.R. Moeller, *J. Photochem. Photobiol.* 1976. p. 24-49
- [9] S. Malato, J. Blanco, A.R. Fernandez-Alba, A. Aguera, Solar photocatalytic mineralization of commercial pesticides: acrinathrin, *CHEMOSPHERE*, 1999
- [10] Andrea Moreno, Camilo Castro, Aristóbulo Centeno, Sonia A. Giraldo, Cinética de la desinfección fotocatalítica de agua con *E.coli*, Simposio Colombiano de Catálisis (6<sup>to</sup>: 2009: Medellín). Memorias del VI. Simposio Colombiano de Catálisis. Medellín, 2009
- [11] Xavier Domènech, Wilson F. Jardim y Marta I. Litter, Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. Argentina: CYTED, 2001.p.3-26
- [12] Pilar Fernández Ibáñez, Desinfección con reactores solares: experiencia operativa.La Plata:Solar Safe Water,2005 .p.259-274
- [13] J. Blanco, S. Malato, J. Peral, B. Sánchez y A. Cardona, Diseño de reactores para la fotocatalisis: evaluación comparativa de las distintas opciones. Argentina: CYTED, 2001 .p.201-241
- [14] J. Blanco Gálvez, El reactor solar fotocatalítico: estado del arte.La Plata: Solar Safe Water, 2005 .p.277-297

## ANEXO 1.

### COLECTOR PARABÓLICO COMPUESTO – CPC

La ecuación explícita para un reflector CPC con un reactor tubular se puede obtener de la Figura 10, donde un punto reflector genérico  $S$  puede describirse en términos de dos parámetros: el ángulo  $\theta$ , comprendido entre los segmentos  $OA$  y  $OR$  ( $O$  es el centro del tubo receptor), y la distancia  $\rho$ , que viene dada por el segmento  $RS$  (tangente al tubo receptor en el punto  $R$ ).

$$\rho = \overline{RS}$$

La solución matemática para la curva de la Figura 10 viene dada por dos porciones separadas: una involuta ordinaria para el tramo entre los puntos  $A$  y  $B$  y una porción exterior desde  $B$  a  $C$ . Un parámetro importante para la definición de CPC es el ángulo de aceptación ( $2\theta_a$ ), que delimita el rango angular dentro del cual todos los rayos incidentes son interceptados directamente por el tubo receptor o reflejados sobre el mismo.

$$\rho = r\theta \quad \text{para} \quad \text{parte AB de la curva}$$

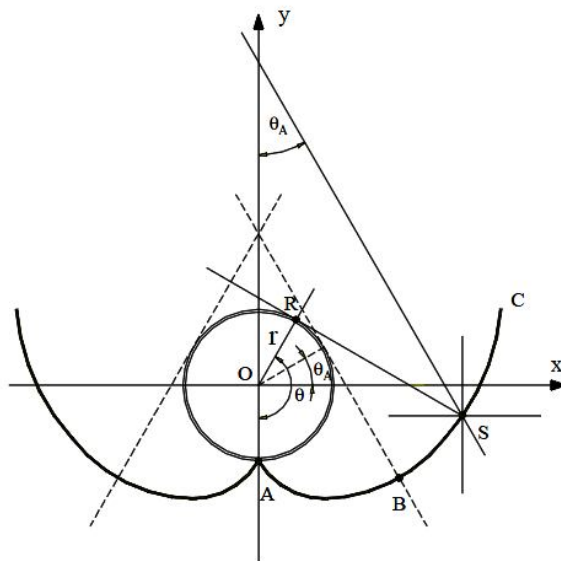
$$\rho = r \left[ \frac{\theta + \theta_a + \pi - \cos(\theta - \theta_a)}{1 + \text{sen}(\theta - \theta_a)} \right] \quad \text{para} \quad \theta_a + \frac{\pi}{2} \leq |\theta| \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_a \quad \text{parte BC}$$

El factor de concentración ( $C_{CPC}$ ) de un captador CPC viene dado por:

$$C_{CPC} = \frac{1}{\text{sen } \theta_a}$$

Los valores normales para el semi-ángulo de aceptación ( $\theta_a$ ), en el caso de aplicaciones fotoquímicas, van a estar entre 60 y 90 grados. Este amplio ángulo de aceptación permite al receptor captar tanto la luz directa como una gran parte de la difusa, con la ventaja adicional de absorber errores tanto de la superficie reflectante como de alineamiento del tubo receptor, lo que resulta importante para conseguir un bajo coste del foto-reactor.

**Figura. 10.** Obtención de la curva de un captador CPC.



*Fuente. J. Blanco, S. Malato, J. Peral, B. Sánchez y A. Cardona, Diseño de reactores para la fotocatalisis: evaluación comparativa de las distintas opciones.*

Un parámetro importante en este tipo de equipos son las dimensiones de estos, ya que en cualquier proceso fotocatalítico se debe 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. 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. En un tubo con diámetro ancho, solo se iluminará una capa exterior del reactor. Esto significa 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. En los sistemas tipo CPC se maneja un flujo turbulento (Reynolds superior a 4000) lo cual le confiere una ventaja adicional puesto que permite garantizar que el catalizador siempre estará en suspensión y que este no se sedimentara en ninguna parte del circuito.

La superficie reflectante tiene por objeto dirigir y reflejar la luz útil hacia el reactor para conseguir un máximo aprovechamiento de esta 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 [13, 14].

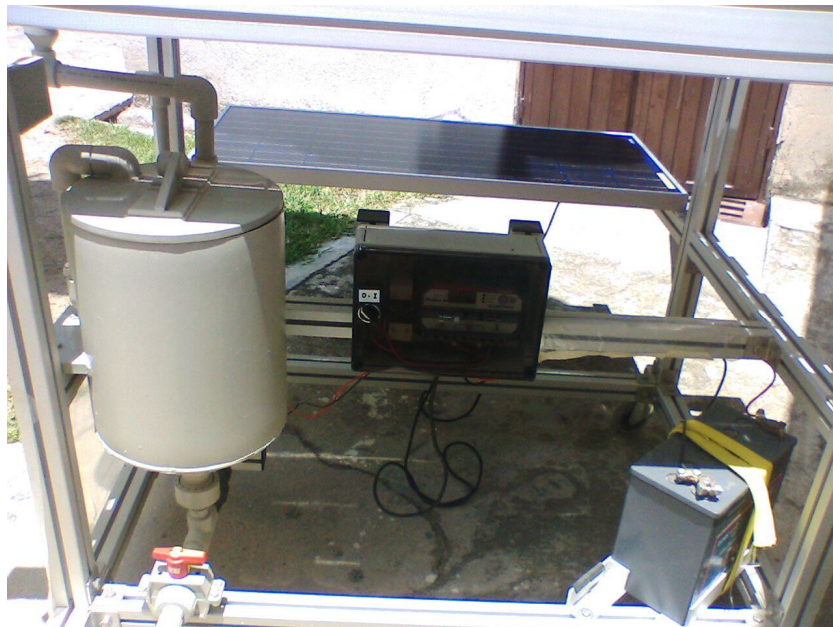
El colector parabólico compuesto con el que cuenta el Centro de Investigación en Catálisis (Figuras 11 y 12) se encuentra soportado por una estructura de aluminio desarrollada por Ecosystem – Environmental Services, S.A. (Barcelona, España). El colector solar está constituido por un CPC unitario ( $0.59\text{m}^2$ ) de cuatro tubos de borosilicato de 50 mm de diámetro, 1.8 mm de espesor y 1000 mm de largo conectados por uniones plásticas y dispuesto a  $10^\circ$ . Un panel fotovoltaico produce la energía eléctrica necesaria, la cual es acumulada en un controlador. Una batería que proporciona energía a una bomba centrífuga DANGER DEN D5 con el fin de recircular el agua del tanque a los tubos. La intensidad de la radiación solar UV es medida por un radiómetro global (ACADUS 85-PLS) el cual provee datos de energía incidente ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) y energía acumulada ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{ h}$ ) cuya longitud de onda se encuentra entre 300 y 400 nm.

**Figura 11.** Vista frontal del Colector Parabólico Compuesto – CPC.



Fuente. Cinthia A Gutierrez R, Lisbeth N Robles C

**Figura 12.** Vista posterior del Colector Parabólico Compuesto – CPC.



Fuente. Cinthia A Gutierrez R, Lisbeth N Robles C