

EVALUACIÓN DE UN PROCESO TÉRMICO – FOTOCATALÍTICO PARA LA DESINFECCIÓN DE AGUA PROVENIENTE DE FUENTES NATURALES MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR

M. GUALDRÓN*, S. PÁEZ*, E. F. CASTILLO**, J. A. PEDRAZA***,
Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander
* Ingeniera Química UIS

** Director Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales – CEIAM

***Centro de Investigaciones en Catálisis - CICAT

E-mail: **ceiam@uis.edu.co ***japedrazavella@gmail.com

Fecha Recepción: 24 de Agosto de 2006
Fecha Aceptación: 12 de Octubre de 2006

RESUMEN

Se diseñó y construyó un colector solar de tipo cilindro parabólico (CCP) a pequeña escala de concentración media de energía, con el propósito de disminuir la concentración de coliformes totales y fecales presentes en el agua proveniente de fuentes naturales de abastecimiento mediante la aplicación de procesos térmicos y térmico-fotocatalíticos (TiO_2 Degussa P25) que hacen uso de la radiación solar. Los resultados de esta investigación permiten concluir que aunque la luz solar por sí sola tiene un efecto bactericida, el TiO_2 en presencia de radiación solar inactiva los coliformes más rápidamente empleando menores temperaturas comparada con el proceso térmico, lo que hace de este un método efectivo para el tratamiento del agua para consumo humano.

Palabras claves: Agua, Desinfección, Fotocatálisis, Colector cilindro-parabólico, Energía solar

INTRODUCCIÓN

En América Latina y el Caribe las enfermedades de origen hídrico resultantes de la contaminación microbiológica de las aguas de consumo humano causan un gran impacto en la población. Particularmente en pequeñas comunidades y áreas rurales, la desinfección de agua con cloro es el único procedimiento disponible para obtener agua potable. Se han detectado en el agua potable clorada la existencia de subproductos generados por reacción del cloro con la materia orgánica natural (NOM), estos subproductos de la desinfección, llamados DBP (Desinfection By Products), son principalmente trihalometanos (THM), ácidos haloacéticos y haloacetónitrilos. Los THM son potencialmente dañinos para la salud humana (mutaciones, cánceres, disfunción hormonal). Es por esto que se plantean nuevas alternativas de bajo costo para la desinfección del agua mediante el uso de energía solar, en aquellas comunidades rurales que cuentan con un buen potencial energético.

Entre las nuevas alternativas para la desinfección de agua cabe destacar el método térmico y el térmico-fotocatalítico con TiO_2 . En el primero, las altas temperaturas tienen un marcado efecto sobre todos

los microorganismos; las células vegetativas mueren debido a la desnaturalización de las proteínas y la hidrólisis de otros componentes. En general puede afirmarse que la mayoría de las bacterias mueren entre los 40 y los 100°C, mientras que las algas, protozoarios y hongos lo hacen entre los 40 y los 60°C.

El método térmico no produce cambios físicos o químicos notables en el agua tratada. La latitud y la altitud geográfica, la hora, las nubes, la temperatura, la turbiedad de agua y el color; son parámetros que se deben tener en cuenta para una óptima desinfección utilizando radiación solar.

El término fotocatalisis incluye un proceso según el cual se produce una alteración fotoquímica de alguna especie química como resultado de la absorción de radiación por otra especie fotosensible que es, en este caso el catalizador.

El proceso fotocatalítico consta de distintas fases de reacciones químicas que generan especies reactivas (radical hidroxilo, peróxido de hidrógeno, superóxido, electrón de la banda de conducción y hueco de la banda de valencia), las cuales interaccionan con la

pared externa de los microorganismos causándoles su destrucción.

Los procesos térmico-fotocatalíticos están basados únicamente en la captación de fotones con energía específica para promover ciertas reacciones químicas, en contraste con los procesos térmicos, los cuales se basan en la captación y concentración del mayor número posible de fotones para alcanzar un rango de temperatura deseada.

Los métodos empleados en la preparación de la película del fotocatalizador se pueden clasificar en dos grandes grupos, los que usan suspensiones en fase líquida (acuosa o alcohólicas), como es el método *Sol-gel* y en el segundo grupo se encuentran los que usan una fase vapor para el transporte de material a depositar. Entre los métodos especiales de fijación de la película se tiene el *dip-coating*, *spin-coating* y sus variantes.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Diseño y Construcción del Colector Solar CCP

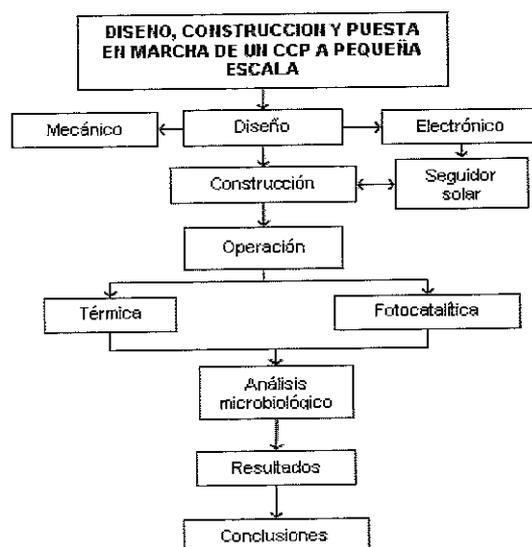
Se diseñó y construyó un colector solar de tipo cilindro parabólico (CCP) de concentración media de energía a pequeña escala (L: 0,6 m, área de apertura: 0,36 m²), que puede ser transportado e instalado con facilidad en regiones que carecen de los servicios básicos (electricidad, gas doméstico y agua potable) y es de fácil operación.

La superficie reflectora del CCP se construyó sobre un soporte de fibra de vidrio en forma parabólica con acero inoxidable 430, pues este material además de mostrar una buena reflexión de la radiación presenta facilidad para su instalación y mantenimiento. Se implementó un sistema de seguimiento solar electrónico que con ayuda de un motor paso a paso se encarga de posicionar al colector para que este reciba siempre los rayos solares de manera perpendicular. El movimiento del giro se hace en un sólo eje (de oriente a occidente) pues debido a la posición geográfica de Colombia los desplazamientos norte-sur del sol pueden despreciarse. Para las pruebas térmicas se utilizó un tubo de vidrio Pyrex (L: 70 cm, D_{ext}: 3 cm, D_{int}: 2,54 cm) posicionado en el foco de la superficie reflectora y para las pruebas térmicas-fotocatalíticas se empleó un tubo con las mismas características al cual se le depositó en el interior una película de TiO₂ (Degussa P25) por el método *sol-gel*, empleando como precursor tetraetil ortosilicato (TEOS).

El sistema completo para la desinfección de agua está constituido además por un tanque de 235 l

fabricado en polietileno (resistente a la exposición solar y al impacto) donde se almacena el agua a tratar, seguido de un filtro de arena, gravilla y carbón activado que remueve los sólidos suspendidos y un intercambiador de calor de aluminio donde el agua es precalentada antes de entrar al tubo del colector, empleando el agua caliente que ya ha sido tratada. El agua permanece en el tubo del colector hasta alcanzar una temperatura determinada (*set point*).

Figura 1. Diagrama de bloques del desarrollo experimental.



Preparación de la Película de TiO₂

Se mezcló 21,1 g de TEOS, 24,3 g de Isopropanol, 3,65 g de H₂O, se añadió una gota de HCl 3M, para iniciar la reacción y romper los enlaces. Se agitó durante un determinado tiempo y se dejó en reposo por un día. Luego se agregó un gramo de TiO₂ y se agitó nuevamente.

Previamente se le dio un tratamiento al tubo absorbedor (substrato) con el fin de eliminar los iones que podrían influir en la eficiencia esperada de la película de catalizador (TiO₂), por lo cual el tubo fue dejado con H₂SO₄ 3M para eliminar la grasa, el sodio y el potasio que contiene el vidrio, luego se dejó con NaOH, finalmente se lavó con agua y se secó.

Debido a la geometría del tubo absorbedor (L=70 cm y D_{int} = 2,54 cm), no fue posible emplear las técnicas de deposición (*dip-coating*, *spin-coating*), por lo cual fue necesario inclinar el tubo para la deposición de

la película. Finalmente se realizó una evaporación del solvente, a una temperatura de 100°C por 4 horas, dando lugar a la formación de la película.

Operación del Colector

Las pruebas de desinfección se llevaron a cabo con muestras de agua del Río de Oro tomadas a la altura del municipio de Piedecuesta (Santander) y estuvieron encaminadas hacia tres objetivos fundamentales:

1. La determinación de la temperatura a la cual era posible la eliminación de la contaminación microbiológica presente en el agua por los métodos térmico y térmico-fotocatalítico.
2. La comparación entre el método térmico y el termo-fotocatalítico.
3. La evaluación de la eficiencia del colector.

Los experimentos se realizaron en el barrio El Poblado de Girón (Santander, Colombia) durante los meses de marzo-abril de 2006, en el horario de las 8 de la mañana hasta las 4 de la tarde.

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL AGUA

Para el análisis microbiológico del agua se empleó la técnica del número más probable con medio de

sustrato definido, cabe anotar que este análisis fue realizado inmediatamente antes de iniciar con las pruebas e inmediatamente después de terminarlas; esto se aclara, pues la falta de refrigeración de las bacterias al ser envasadas aumenta la capacidad de reproducirse y por tanto su concentración en el agua.

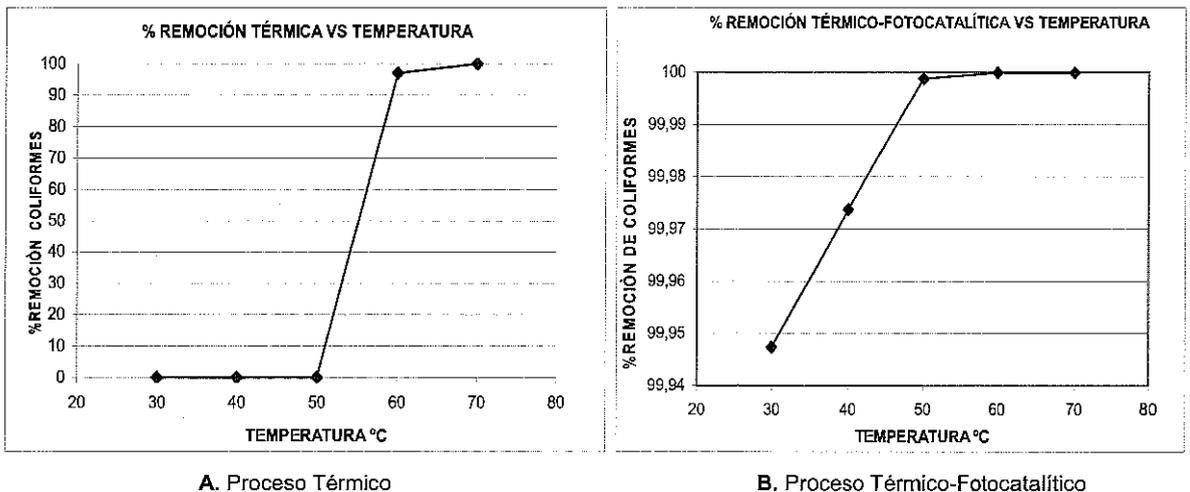
Se empleó como medio de cultivo un caldo de enriquecimiento selectivo (*Fluorocult® Caldo LMX modificado*), para la identificación simultánea de coliformes totales y *Escherichia Coli* en la investigación bacteriológica de aguas [6].

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para determinar la temperatura mínima de operación del sistema que garantizara una desinfección eficiente, se realizaron pruebas utilizando como *set point* temperaturas de 30, 40, 50, 60 y 70°C. Al agua tratada se le practicó un análisis microbiológico mediante la técnica del número más probable (NMP), empleando como medio de cultivo un caldo de enriquecimiento selectivo para la identificación simultánea de coliformes totales y coliformes fecales (*E. Coli*).

Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Figura 2. Porcentaje de remoción de coliformes - Proceso térmico.



Se pudo establecer que mediante el proceso térmico es necesaria una temperatura superior a 50°C para lograr al menos una desinfección parcial del agua tratada. A 60°C se logra una remoción del 98,99% de los coliformes fecales mientras que a 70°C se

alcanza una desinfección del 99,99% de *E. Coli*, garantizando que el agua es apta para consumo humano. Esta última fue tomada como temperatura de control para el proceso térmico. Mientras que utilizando el tubo recubierto con TiO_2 la

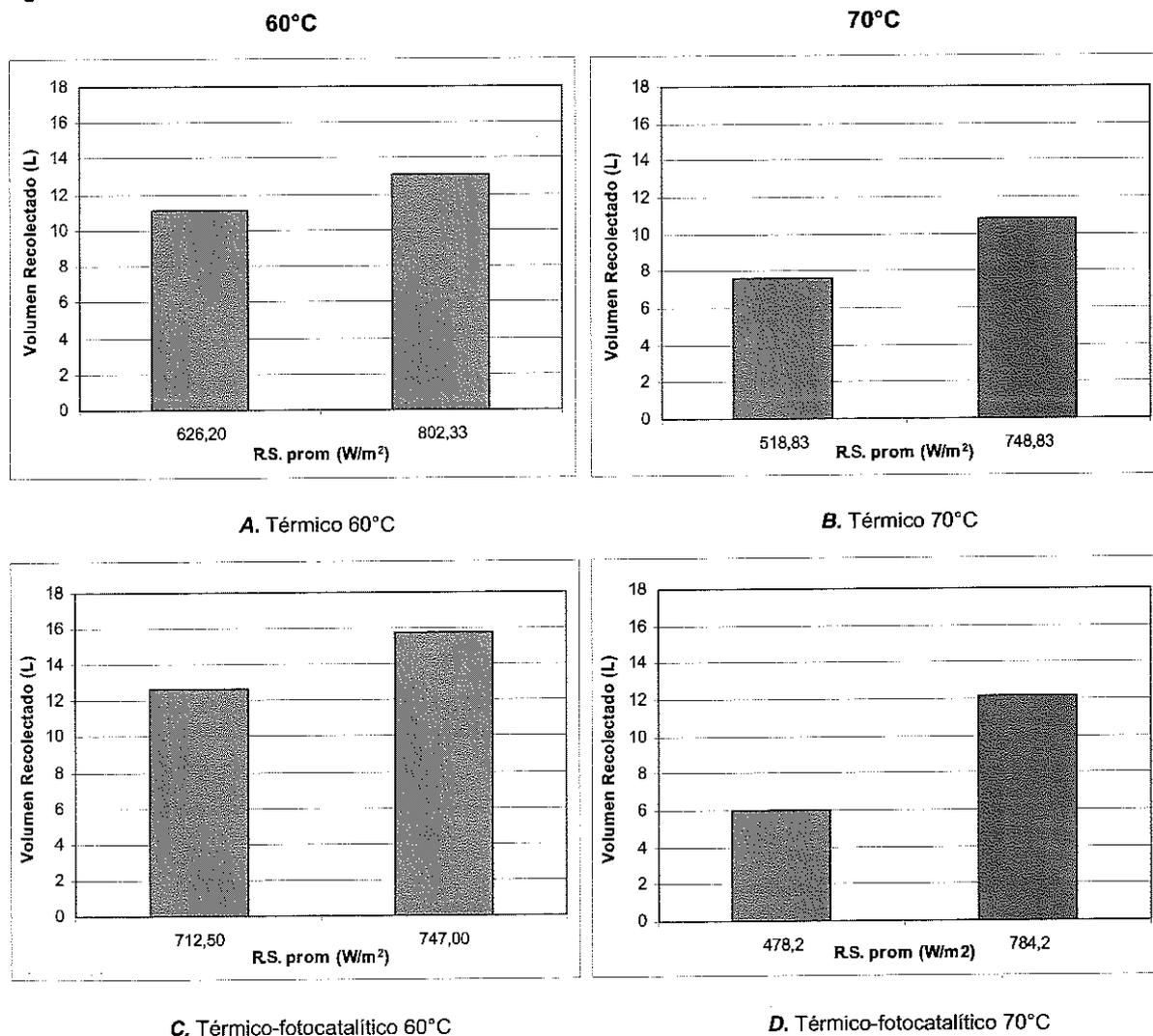
concentración de coliformes disminuye drásticamente desde los 30°C alcanzándose una remoción del 99,945%. A partir de 60°C se logra la desinfección en cumplimiento con la norma colombiana de calidad del agua (Decreto 475 de 1998).

Para establecer las condiciones más adecuadas para la operación del colector, se evaluaron 5 diferentes temperaturas de *set point* en el rango entre 60 y 70°C (60, 64, 66, 68 y 70°C) con el fin de determinar la influencia de éste sobre el volumen de agua tratada. Igualmente se estudió el efecto de la

intensidad de radiación incidente sobre dicho volumen, utilizando los datos suministrados por la CDMB para la zona donde se realizó el estudio. Un análisis de estos resultados permitió comparar los métodos térmico y térmico-fotocatalítico.

El volumen de agua tratada tiene una relación directa con la cantidad de radiación incidente y con el valor de *set point* tomado para la prueba (Figura 3). A medida que se incrementa la radiación aumenta el volumen de agua tratada y a un mayor valor de *set point* es menor la cantidad de agua tratada (se necesita más tiempo para alcanzarlo).

Figura 3. Influencia de la radiación solar y la temperatura en el volumen de agua tratada.

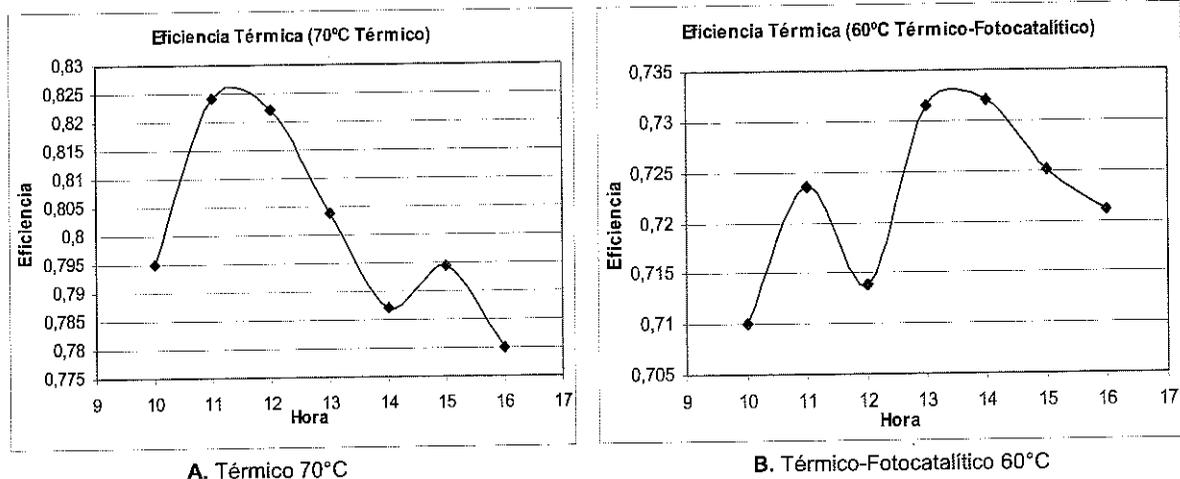


Al analizar la segunda columna de las figuras 3.b y 3.c, las cuales corresponden a pruebas realizadas en condiciones muy similares de radiación incidente

($I \approx 747-748 \text{ W/m}^2$) y donde se alcanza una desinfección equivalente ($< 3 \text{ NMP/100 mL}$ de

coliformes fecales), se puede concluir que mediante el método térmico-fotocatalítico pueden alcanzarse mayores volúmenes de agua tratada que por el método térmico.

Figura 4. Eficiencia térmica del CCP.



El proceso térmico es más eficiente en las horas de la mañana, ya que se presenta una mayor intensidad de radiación visible e infrarroja, mientras que el proceso térmico-fotocatalítico es más eficiente en horas de la tarde, debido a que es menor el calor reflejado VIS-IR y mayor el UV reflejado (Figura 4).

CONCLUSIONES

Es posible concluir que el acoplamiento del proceso fotocatalítico (recubrimiento interior del tubo receptor con TiO_2) conlleva a un mejoramiento significativo de la efectividad del proceso térmico pues implica menores temperaturas y por tanto menores tiempos de operación para lograr la desinfección del agua tratada.

El método térmico permitió a 70°C una remoción del 99,99% y la obtención de un volumen de 10,85 l por día, mientras que el método térmico-fotocatalítico permitió recolectar mayores volúmenes de agua (15,72 l por día), logrando la desinfección (99,99%) a una menor temperatura (60°C).

Es importante tener en cuenta que el volumen de agua tratada aumenta a medida que se incrementa la intensidad de radiación solar y a un mayor valor de *set point* es menor la cantidad de agua tratada, ya que es necesario un mayor tiempo para alcanzarlo.

A partir de los datos de radiación solar suministrados por la CDMB, se calculó la eficiencia térmica del colector, para el proceso térmico y el térmico-fotocatalítico operando con *set point* de 70 y 60°C respectivamente.

ABSTRACT

A kind of parabolic cylinder solar collector (CCP) was designed and constructed on a small scale of average concentration of energy, with the intention of decreasing the concentration of coliformes total and fecal present in the water gotten of natural sources of supply by means of the application of thermal processes and thermal photocatalytic (TiO_2 Degussa P25) that use the solar radiation. The results of this investigation allow to conclude that though the solar light for itself has a bactericidal effect, the TiO_2 in presence of solar inactive radiation the coliformes more rapidly using less temperatures compared with the thermal process, which does of this one an effective method for the treatment of the water for human consumption.

Keywords: Water, Disinfection, Photocatalysis, Cylinder-Parabolic Collector, Solar Energy

BIBLIOGRAFÍA

1. BLANCO, J. (2003). *Desarrollo de colectores solares CPC para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes persistentes en agua*. Madrid, España: CIEMAT.
2. BLANCO, J. y BLESÁ, M. (2005). *Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua*. Buenos Aires, Argentina: UNSAM.

3. BLANCO, J., MALATO, S. FERNÁNDEZ, P. et al. (1999). Compound parabolic concentrator technology development to commercial solar detoxification applications. *Solar energy*, Vol. 67(No. 4-6), 317-330.
4. BOLTON, J. (1996). Desintoxicación Solar. *Solar Energy*, Vol. 56(No. 5), 375.
5. CASSANO, A. y ALFANO, O. (2000). Reaction engineering of suspended solid heterogeneous photocatalytic reactors. *Catalysis Today*, 58, 167-197.
6. FERNÁNDEZ, P., MALATO, S. y ENEA, O. (1999). Photoelectrochemical reactors for the solar decontamination of water. *Catalysis Today*, Vol. 54, 329-339.
7. MALATO, S. R.; RICHTER, C.; BLANCO, J. et al. (1996). Degradación fotocatalítica de aguas industriales residuales. *Solar Energy*, Vol. 56(No. 5), 401-410.
8. Merck. (1994). *Manual de medios de cultivo*, 276.
9. MINERO, C.; PELIZZETTI, F.; MALATO, S. et al. (1996). Gran planta solar de descontaminación fotocatalítica de agua: Efecto de los parámetros operacionales. *Solar Energy*, Vol. 56(No. 5), 421-428.
10. NOGUEIRA, R. y JARDIM, W. (1996). Reactor con una película de TiO_2 para la descontaminación de agua mediante luz solar. *Solar Energy*, Vol. 56(No. 5), 471-477.