

DISEÑO Y MODELADO TÉRMICO DE UN COLECTOR-REACTOR SOLAR EXPERIMENTAL PARA DESCONTAMINACIÓN DE SOLUCIONES ACUOSAS

Enrique D. Albizzati¹, Germán H. Rossetti^{1,2} y Orlando M. Alfano²

(1) Facultad de Ingeniería Química - Universidad Nacional del Litoral
Santiago del Estero 2654 - 3000 - Santa Fe – Argentina - Email: albizzati@fiquis.unl.edu.ar

(2) INTEC (CONICET- Universidad Nacional del Litoral)
Güemes 3450 - 3000 - Santa Fe – Argentina - Email: alfano@ceride.gov.ar

RESUMEN. En este trabajo se presenta un colector-reactor solar para descontaminación de corrientes acuosas. En el equipo se lleva a cabo una reacción fotoquímica y térmica (reacción de foto-Fenton). El sistema experimental se completa con un tanque agitado y una bomba de recirculación. El modelo teórico está conformado por las ecuaciones del balance térmico del sistema, y el análisis óptico-térmico del colector-reactor. Los resultados de la solución del modelo muestran los parámetros característicos del equipo solar (coeficiente de pérdidas de calor y eficiencia óptica total) y la eficiencia térmica global del proceso. El modelo teórico y el método de cálculo pueden ser aplicados para el sistema de descontaminación en diversas condiciones operativas.

Palabras clave: Fenton-Solar-Ultravioleta-Térmica-Descontaminación.

INTRODUCCIÓN

Los denominados Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs), se pueden utilizar para la destrucción de sustancias orgánicas contaminantes contenidas en corrientes acuosas, ya que producen la mineralización de dichos contaminantes generando agua, dióxido de carbono e iones inorgánicos. Uno de los AOPs más estudiados, es el sistema químico en el cual participan a temperatura ambiente el peróxido de hidrógeno y sales de hierro, generando radicales hidroxilo (reacción de Fenton) que reaccionan rápidamente con sustancias tóxicas, produciendo las sustancias no contaminantes.

La capacidad del proceso Fenton para la destrucción de los contaminantes se aumenta mediante el uso de radiación UV o UV-Vis (reacción de foto-Fenton). La radiación utilizada para asistir a la reacción de Fenton puede ser artificial o natural. En varios trabajos se presenta la aplicación de la energía solar (por ejemplo en Gernjak et al., 2003; Krutzler et al., 1999; Malato et al., 2001; Malato et al., 2005; Rossetti et al., 2004a).

Recientemente se ha demostrado que el aumento de la temperatura de operación en la reacción de foto-Fenton aumenta la conversión de las sustancias contaminantes (Pérez et al., 2002; Malik y Saha, 2003; Torrades et al., 2003; Rossetti et al., 2004b). También se han propuesto un proceso fotoquímico-térmico asistido con radiación solar para acrecentar la conversión de los contaminantes (Sagawe et al., 2001), y un nuevo sistema fotocatalítico-fotovoltaico para la conversión de energía solar y descontaminación de corrientes acuosas (Sarria et al., 2005).

En este trabajo se describe un sistema experimental para descontaminación de corrientes acuosas compuesto por un colector-reactor solar, un tanque agitado y una bomba de recirculación. El equipo solar utiliza la radiación solar UV-Vis y la radiación solar IR, cuando se lleva a cabo una reacción fotoquímica y térmica (reacción de foto-Fenton). Se presentan los modelos ópticos y térmicos del colector-reactor y el balance térmico del sistema. Luego simulando ensayos térmicos en días típicos se calculan los parámetros que caracterizan al equipo y la eficiencia térmica global durante del proceso.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema a experimentar para la descontaminación de las soluciones acuosas cuenta básicamente con un colector-reactor solar, un tanque con agitación y una bomba centrífuga de recirculación (Figura 1). El tanque se carga con la solución a descontaminar y se le agregan las sustancias para producir la reacción de foto-Fenton. Luego se hace circular en forma continuada una corriente por el colector-reactor solar, impulsada con la bomba. Al cabo de un cierto tiempo de operación se procede a efectuar una toma de muestra en el tanque, que una vez analizada permitirá conocer la conversión del contaminante.

El dispositivo posibilita estudiar la variación de la conversión del contaminante principalmente con el tiempo, la temperatura de operación, la posición del Sol, y la relación entre las concentraciones iniciales del contaminante y la sustancia utilizada como oxidante en el proceso. Las experiencias pueden llevarse a cabo en diversas épocas del año, variando el caudal circulante por el circuito, la orientación e inclinación del colector-reactor, y la temperatura inicial de la solución. Se dispone

de instrumental para la medición de temperatura (ambiente, en el tanque y de ingreso y egreso al colector-reactor), radiación solar (UV y total sobre el colector-reactor), caudal volumétrico y velocidad del viento.

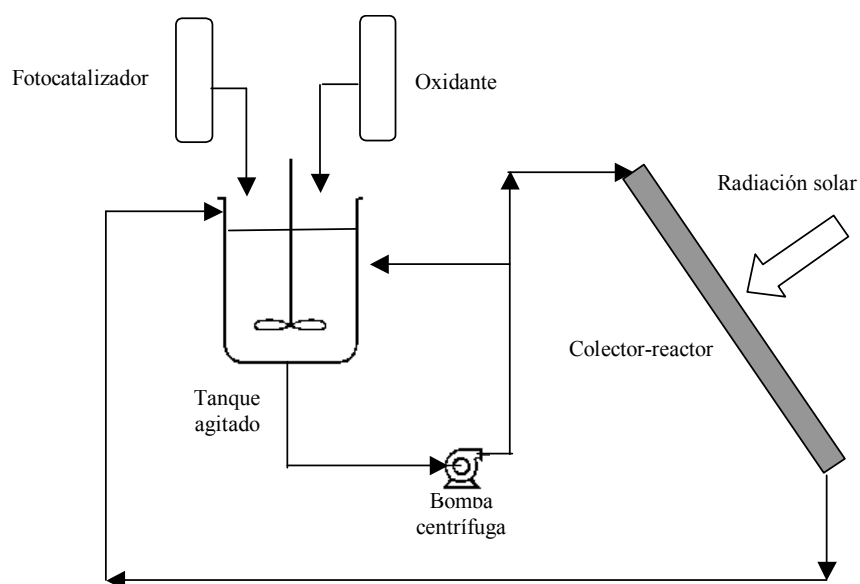


Figura 1. Esquema del sistema de descontaminación.

El dispositivo posibilita estudiar la variación de la conversión del contaminante principalmente con el tiempo, la temperatura de operación, la posición del Sol, y la relación entre las concentraciones iniciales del contaminante y la sustancia utilizada como oxidante en el proceso. Las experiencias pueden llevarse a cabo en diversas épocas del año, variando el caudal circulante por el circuito, la orientación e inclinación del colector-reactor, y la temperatura inicial de la solución. Se dispone de instrumental para la medición de temperatura (ambiente, en el tanque y de ingreso y egreso al colector-reactor), radiación solar (UV y total sobre el colector-reactor), caudal volumétrico y velocidad del viento.

DISEÑO DEL COLECTOR-REACTOR

Debido a que la reacción de foto-Fenton es fotoquímica y térmica, tanto la radiación UV-Visible como la temperatura influyen sobre la destrucción del contaminante. Es por ello que se ha diseñado un colector-reactor asistido con energía solar, que aprovecha la radiación solar UV-Vis y la radiación solar IR (Figura 2).

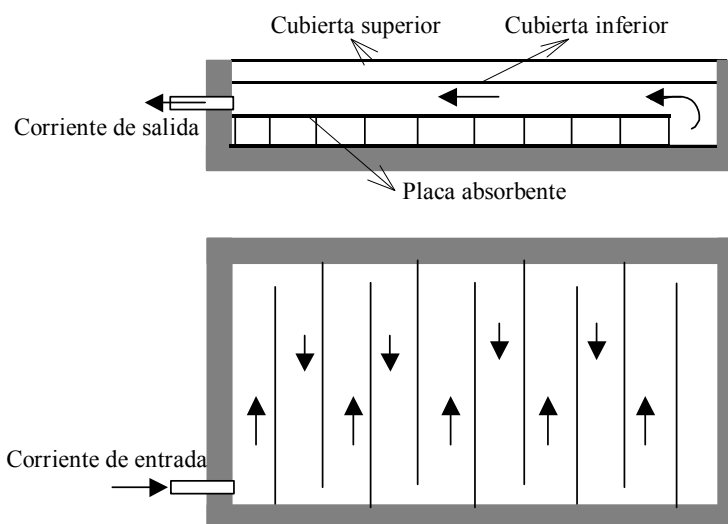


Figura 2. Esquema del colector-reactor.

El equipo tiene las dimensiones: 40 cm de ancho, 75 cm de largo y 15 cm de alto (Figura 2). Los laterales y el fondo están aislados. Tiene dos cubiertas acrílicas semitransparentes a la radiación solar, separadas entre sí por una cámara de aire de 2 cm de espesor, y una placa absorbente de la radiación solar. El conjunto denominado placa absorbente es de acero inoxidable y capta la radiación en una placa superior, y posee aletas transversales que apoyan en otra placa colocada debajo. La cara

absorbente de la radiación solar está recubierta con una pintura negra horneada. El aislante utilizado en el equipo es lana de vidrio. La caja contenedora de los materiales está construida con acero inoxidable.

El fluido circula en dos pasos por el equipo. Al ingresar recorre en forma transversal el paso inferior, por los canales conformados en la placa absorbente. Posteriormente circula axialmente por el paso superior, entre la placa absorbente y la cubierta inferior de acrílico; en el primero y segundo paso recibe energía térmica transferida desde la placa absorbente, mientras que sólo en el segundo paso absorbe la radiación solar UV-Vis que se transmite a través de las dos cubiertas. Éstas, cuyo espesor es 3,2 mm, son de un material acrílico que transmite especialmente la radiación ultravioleta.

MODELO TEÓRICO

Balance térmico

En el balance global de energía térmica del colector-reactor se consideran la acumulación de calor del fluido térmico con el tiempo y el intercambio asociado a las corrientes de entrada y salida. Asimismo, según el modelo de Whillier-Bliss típico para los colectores de radiación solar, el equipo es caracterizado mediante la eficiencia óptica (η_o^*) que representa la fracción absorbida de la radiación solar incidente y el coeficiente global de pérdidas de energía (U_p^*).

$$V_c \rho c_p (dT/dt) + Q \rho c_p (T_s - T_e) = \eta_o^* I_T A - U_p^* A (T - T_o) \quad (1)$$

En la ecuación (1) t es el tiempo, ρ y c_p son la densidad y el calor específico del fluido térmico, V_c el volumen interno, Q el caudal circulante, I_T la radiación total incidente sobre el equipo, A el área de captación de la radiación solar, y T_o la temperatura ambiente. Como se ha previsto operar con tiempos de residencia relativamente bajos, menores a cinco minutos, la temperatura promedio del fluido en el interior del sistema (T) es aproximadamente la media aritmética de la temperatura de entrada (T_e) y la de salida (T_s) del colector-reactor.

Por otra parte al efectuar el balance térmico en el tanque agitado se contemplan un coeficiente global (U_t) y un área (A_t) equivalentes para las pérdidas de calor al ambiente, acumulación en el volumen interno V_t , y las corrientes de entrada y salida:

$$V_t \rho c_p (dT/dt) + Q \rho c_p (T_e - T_s) = -U_t A_t (T - T_o) \quad (2)$$

Luego el balance de energía térmica del sistema completo, equipo solar y tanque de acumulación, se obtiene sumando las ecuaciones (1) y (2):

$$(V_c + V_t) \rho c_p (dT/dt) = \eta_o^* I_T A - (U_p^* A + U_t A_t) (T - T_o) \quad (3)$$

Análisis óptico

En el colector-reactor se considera que la radiación solar puede ser absorbida por la cubierta superior (c_2), la cubierta inferior (c_1), el agua que circula por el paso superior (w) y la placa absorbente (p). La eficiencia óptica total es la suma de las eficiencias de captación en los medios absorbentes:

$$\eta_o^* = \eta_{c2} + \eta_{c1} + \eta_w + \eta_p \quad (4)$$

La eficiencia de cada uno de los absorbentes es la fracción de la radiación solar I_T que es captada. En su cálculo se tienen en cuenta las absorbancias (α) y transmitancias (τ) de los referidos medios, en correspondencia con la trayectoria de la radiación en el interior del equipo solar. Resultan entonces:

$$\eta_{c2} = \alpha_{c2} \quad (5)$$

$$\eta_{c1} = \tau_{c2} \alpha_{c1} \quad (6)$$

$$\eta_w = \tau_{c2} \tau_{c1} \alpha_w \quad (7)$$

$$\eta_p = \tau_{c2} \tau_{c1} \tau_w \alpha_p \quad (8)$$

Análisis térmico

Para el colector-reactor, se conforman los balances térmicos para el agua que se usa como fluido térmico, las dos cubiertas semitransparentes, la placa absorbente y el aislante térmico. Para el tratamiento de la placa absorbente, ésta se divide en dos partes espacialmente isotérmicas, la zona superior que capta la radiación solar e intercambia calor con el fluido que circula

por ambos pasos, y la zona inferior, que intercambia calor sólo con el fluido del primer paso y está en contacto con el aislante.

En el balance del agua se considera acumulación de energía con el tiempo, pero los materiales constituyentes del colector-reactor se suponen en estado cuasi-estacionario. Se desprecian las resistencias térmicas superficiales en las caras del aislante, en contacto con la placa absorbente y con el medio ambiente. Las pérdidas de calor se contemplan en el tope y en el fondo, no así en las superficies laterales del equipo solar.

La energía térmica se transfiere en el equipo por conducción, convección forzada, convección natural y radiación. Las ecuaciones siguientes se formulan sucesivamente para el agua, la cubierta superior, la cubierta inferior, la zona superior de la placa y la zona inferior de la placa, cuyas temperaturas respectivas son.: T , T_{c2} , T_{c1} , T_{p2} y T_{p1} .

$$V_c \rho c_p (dT/dt) + m c_p (T_s - T_e) = \eta_w I_T A + h_{c1} A^* (T_{p2} - T) + h_{c2} A (T_{p2} - T) - h_{c1} A^* (T - T_{p1}) - h_{c2} A (T - T_{c1}) \quad (9)$$

$$0 = \eta_{c2} I_T A + (h_{ri} + h_{ci}) A (T_{c1} - T_{c2}) - h_{co} A (T_{c2} - T_o) - h_{ro} A (T_{c2} - T_c) \quad (10)$$

$$0 = \eta_{c1} I_T A + h_{c2} A (T - T_{c1}) - (h_{ri} + h_{ci}) A (T_{c1} - T_{c2}) \quad (11)$$

$$0 = \eta_p I_T A - h_{c1} A^* (T_{p2} - T) - h_{c2} A (T_{p2} - T) \quad (12)$$

$$0 = h_{c1} A^* (T - T_{p1}) - (k_a / e_a) A (T_{p1} - T_o) \quad (13)$$

Se emplean los coeficientes de transferencia de energía: por convección forzada del agua en el paso inferior (h_{c1}) y en el paso superior (h_{c2}), por convección forzada del viento exterior (h_{co}), por convección natural en la cámara interior (h_{ci}), por radiación entre las dos cubiertas semitransparentes (h_{ri}) y por radiación desde la cubierta superior al cielo (h_{ro}).

En las ecuaciones T_c es la temperatura del cielo, que depende de la humedad y temperatura del ambiente. La conductividad térmica del aislante es k_a y el espesor es e_a . A es el área de la superficie que absorbe la radiación solar e intercambia calor con el agua circulante por el paso superior, y también el área de pérdidas de calor por el fondo. Además A^* es el área de contacto entre el fluido del paso inferior y ambas zonas delimitadas de la placa absorbente.

Resolución del modelo

Interesa fundamentalmente la variación de la temperatura del agua con el tiempo. Sumando las ecuaciones (2) y (9) se obtiene para el fluido:

$$(V_c + V_t) \rho c_p (dT/dt) = \eta_w I_T A + h_{c1} A^* (T_{p2} - T) + h_{c2} A (T_{p2} - T) - h_{c1} A^* (T - T_{p1}) - h_{c2} A (T - T_{c1}) - U_t A_t (T - T_o) \quad (14)$$

Para conocer la evolución de las temperaturas de los medios participantes con el tiempo se requiere solucionar las ecuaciones (10)-(14) antes planteadas. En las mismas se considera que la radiación I_T y la temperatura T_o varían durante el ensayo del colector-reactor. El procedimiento de cálculo requiere suponer las temperaturas de los distintos medios para estimar los coeficientes de transferencia de calor por convección forzada, por convección natural y por radiación, y una vez evaluadas las temperaturas T , T_{c2} , T_{c1} , T_{p2} y T_{p1} en cada instante de tiempo, se recalculan los coeficientes de transferencia hasta que ajusten los resultados calculados.

En el cálculo de las eficiencias formuladas en las ecuaciones (5)-(8), se evalúan las transmitancias y absorbancias de los medios participativos según lo propuesto por Siegel y Howell (2001). Cada propiedad óptica se calcula para todas las componentes de la radiación solar incidente (directa, difusa y reflejada por el suelo); luego se obtiene un promedio pesando proporcionalmente los valores de cada componente. La absorbancia de la placa se corrige en función del ángulo de incidencia de cada componente de la radiación solar (Duffie y Beckman (1991)).

Con el fin de determinar los coeficientes de transferencia de energía por convección forzada y natural necesarios para el cálculo se utilizan correlaciones recomendadas por Duffie y Beckman (1991) e Incropera y de Witt (1990). Las expresiones de los coeficientes de transferencia de calor por radiación también pueden consultarse en las mismas fuentes bibliográficas.

Fijada la temperatura inicial y determinada la temperatura final del fluido térmico y la eficiencia óptica total, se calculan el coeficiente de pérdidas de calor promedio del equipo solar (U_p^*) y la eficiencia térmica global del sistema de descontaminación (η).

Predicciones teóricas

Se simula el ensayo térmico del colector-reactor en días típicos con cielo sin nubes de la ciudad de Santa Fe (1 de junio y 1 de diciembre). El equipo solar se supone mirando al norte geográfico y con un ángulo de inclinación de 25°. En el ensayo con agua se supone su temperatura inicial (T_i) mayor a la ambiente. Dado que se ha previsto que el equipo de descontaminación sea experimentado durante dos horas como máximo, las predicciones se inician a las 13 h, y finalizan a las 15 h; la temperatura ambiente se eleva desde 14°C hasta 16°C el 1 de junio y desde 26°C hasta 29°C el 1 de diciembre.

La radiación solar directa y difusa sobre la superficie horizontal se hallan con el modelo parametrizado SMARTS (Gueymard, 1995). En la Tabla 1 se muestran los valores medios de la temperatura ambiente (T_o), el ángulo cenital (θ_z), el ángulo de incidencia (θ), el espesor de la capa de ozono (O_3), el coeficiente de turbidez de la atmósfera (β), la radiación directa horizontal (I_D) y la radiación difusa horizontal (I_d). Se fijan también la humedad relativa ambiente (60%), el albedo de dispersión de aerosol (0,81), el factor de asimetría de aerosol (0,70), y el albedo del suelo (0,20).

Día	T_o (°C)	θ_z (°)	θ (°)	O_3 (U.D.)	β	I_D (W/m ²)	I_d (W/m ²)
1/6	15	57,3	34,8	275	0,060	411,8	94,4
1/12	27,5	19,7	24,9	268	0,115	771,7	184,1

Tabla 1. Valores medios de datos, parámetros de cálculo y componentes de la radiación solar horizontal.

La radiación incidente sobre el colector-reactor (componentes directa, difusa y reflejada por el suelo), se calcula con el modelo propuesto por Duffie y Beckman (1991). La radiación difusa y la reflejada se consideran como radiación directa cuyo ángulo de incidencia depende de la inclinación del equipo receptor. Para la radiación difusa aplica el modelo de Hay y Davies (es la radiación difusa isotrópica más la radiación circumsolar). La radiación solar total sobre el equipo durante los ensayos varía entre 813,1 y 653,0 W/m² el día 1 de junio, y entre 1017,4 y 844,2 W/m² el día 1 de diciembre.

Para hallar las eficiencias ópticas y las temperaturas de los medios participantes, se utilizan en este caso funciones polinómicas de la radiación solar total incidente sobre el colector-reactor y de la temperatura ambiente con el tiempo. Además la velocidad del viento es 0,8 m/s, el caudal de agua circulante es 6,95.10⁻⁵ m³/s, el volumen del equipo solar es 14,7 lt, y el volumen del tanque es 24,0 lt. En el cálculo de las eficiencias ópticas (Tabla 2), se usan también índices de refracción para las cubiertas acrílica y para el agua iguales a 1,49 y 1,33; los coeficientes de absorción para ambos medios son 16 m⁻¹ y 0,3 m⁻¹ respectivamente. La absorbancia normal de la placa se adopta igual a 0,90.

Día	η_{c2}	η_{c1}	η_w	η_p
1/6	0,055	0,046	0,009	0,603
1/12	0,053	0,045	0,008	0,612

Tabla 2. Valores medios de las eficiencias ópticas en el colector-reactor.

En la Tabla 3 se muestran valores de los coeficientes de transferencia de calor obtenidos en las predicciones. La emisividad de las placas de acrílico adoptada para hallar los coeficientes de transferencia de energía por radiación es 0,85.

Día	h_{c1} (W/m ² K)	h_{c2} (W/m ² K)	h_{co} (W/m ² K)	h_{ci} (W/m ² K)	h_{ri} (W/m ² K)	h_{ro} (W/m ² K)
1/6	281	102	7,9	2,1	5,2	4,5
1/12	415	103	7,5	1,9	5,9	5,2

Tabla 3. Valores medios de los coeficientes de transferencia de calor en el colector-reactor.

Los parámetros que caracterizan el equipo solar en la simulación efectuada (coeficiente de pérdidas de calor y eficiencia óptica total) se muestran en la Tabla 4.

Día	T_i (°C)	ΔT (°C)	U_p^* (W/m ² K)	η^*_o	η
1/6	27	4,5	7,2	0,713	0,530
1/12	40	5,9	7,8	0,718	0,551

Tabla 4. Valores de la temperatura inicial y el salto térmico del fluido, el coeficiente promedio de pérdidas del colector-reactor, la eficiencia óptica total promedio y la eficiencia global del sistema.

En la tabla anterior se incluyen además la radiación solar promedio incidente, el salto térmico del fluido (ΔT) y la eficiencia térmica del sistema. Se observa que se determina previamente el valor del producto entre el coeficiente y el área de pérdidas de calor en el tanque (0,60 W/K) y se adopta una temperatura inicial de fluido en la operación.

CONCLUSIONES

- Se ha diseñado un colector-reactor solar para descontaminación de corrientes acuosas donde se lleva a cabo una reacción fotoquímica y térmica que emplea la radiación solar UV-Vis e IR (reacción de foto-Fenton).
- El sistema experimental se completa con un tanque agitado y una bomba de recirculación, y cuenta con instrumental para medición de temperaturas, radiación solar, caudal volumétrico y velocidad del viento.
- Se han formulado las ecuaciones del balance térmico del sistema, y el análisis óptico y térmico de cada uno de los medios componentes del colector-reactor.
- Resuelto el modelo teórico, se obtienen los dos parámetros característicos del equipo solar y la eficiencia térmica del proceso de descontaminación, para las condiciones de ensayo.
- El modelo y el procedimiento de cálculo desarrollado es aplicable para estudiar el sistema de descontaminación en diversas condiciones operativas.
- Se prevé verificar el modelo térmico del sistema en distintas épocas del año, y analizar la dependencia de los valores obtenidos con las condiciones operativas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Litoral (Proyecto CAI+D 2002, N°6/33) y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (Proyecto PICTO 2003, N° 14-13211) por el apoyo realizado para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Gernjak W., Krutzler T., Glaser A., Malato S., Cáceres J., Bauer R. y Fernández-Alba, A. (2003). Photo-Fenton treatment of water containing natural phenolic pollutants. *Chemosphere*, 50, 71.
- Gueymard C.A. (1995). SMARTS2, A simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine. Professional Paper FSEC-PF-270-95. Florida Solar Energy Center, Cocoa, FL, U.S.A.
- Incropera F. y de Witt D. (1990). Fundamentals of heat and mass transfer, 3rd. ed., J. Wiley and Sons, New York U.S.A.
- Krutzler T., Fallmann H., Maletzky P., Bauer R., Malato S. y Blanco J. (1999) Solar driven degradation of 4-chlorophenol. *Catal. Today*, 54, 321.
- Malato S., Cáceres J., Agüera A., Mezcua M., Hernando D., Vial J. y Fernández-Alba A. (2001). Degradation of imidacloprid in water by photo-Fenton and TiO_2 photocatalysis at a solar pilot plant: a comparative study. *Environ. Sci. Technol.* 35, 4359.
- Malato S., Blanco J., Maldonado M., Fernández P., Gernjak W. y Alberola O. (2005). Treatment of chlorinated solvents by TiO_2 photocatalysis and photo-Fenton: influence of operating conditions in a solar pilot plant. *Chemosphere*, 58, 391.
- Malik P. y Saha, S. (2003). Oxidation of direct dyes with hydrogen peroxide using ferrous ion as catalyst. *Separ. and Purif. Technol.*, 31, 241.
- Pérez M., Torrades F., Domènech X. y Peral J. (2002). Fenton and photo-Fenton oxidation of textile effluents. *Wat. Res.* 36, 2703-2710.
- Rossetti G., Albizzati E. y Alfano O. (2004a). Modeling of a flat-plate solar reactor. Degradation of an organic pollutant by the photo-Fenton reaction. *Solar Energy*, 77, 5, 443.
- Rossetti G., Albizzati E. y Alfano O. (2004b). Descomposición de ácido fórmico a distintas temperaturas empleando la reacción de Fenton asistida con radiación solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol.8, 03.37-03.42.
- Sarria V., Kenfack S., Malato S., Blanco J. y Pulgarin C. (2005). New helio-photocatalytic-photovoltaic hybrid system for simultaneous water decontamination and solar energy conversion. *Solar Energy*, 79, 4, 353.
- Sagawe S., Lehnard A., Lübber M., Rockendorf G. y Bahnemann D. (2001). The insulated solar Fenton hybrid process: fundamental investigations. *Helvetica Chimica Acta*, 84, 3742.
- Siegel, Robert y Howell John R. (2001). Thermal radiation heat transfer, 4th ed., Taylor and Francis-Hemisphere, Washington, U.S.A.
- Torrades F., Pérez H., Mansilla H. y Peral J. (2003). Experimental design of Fenton and photo-Fenton reactors for the treatment of cellulose bleaching effluents. *Chemosphere*, 53, 1211.

ABSTRACT. In this work, an solar collector-reactor for decontamination of aqueous streams is presented. In the equipment an photochemical and thermal reaction is carried out (photo-Fenton reaction). The experimental system is completed with an agitated tank and an centrifugal pump. The theoretical model is conformed by the thermal balance of system and the optical-thermal analysis of the solar collector-reactor. Results of model solution show the characteristic parameters of solar equipment (heat loss coefficient and total optical efficiency) and the global thermal efficiency of the process. The theoretical model and the calculation method can be applied for different operations conditions of the decontamination system.

Keywords: Fenton-Solar-Ultraviolet-Thermal-Decontamination.