



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

“REACTOR FOTOCATALÍTICO DE TIPO COLECTOR DE
PARÁBOLA COMPUESTA (CPC) CON CIRCULACIÓN
TERMOSIFÓNICA”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUIMICA

P R E S E N T A :
ILSE LILIANA SOTO CRUZ

Asesor: Dr. Julio César Morales Mejía

Co-Asesor: Dr. Rafael Almanza Salgado



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: LA LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de Tesis**

Reactor Fotocatalítico de Tipo Colector de Parábola Compuesta (CPC) con Circulación Termosifónica.

Que presenta la pasante: **Ilse Liliana Soto Cruz**

Con número de cuenta: **308154962** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería Química**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 15 de Agosto de 2016.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Ricardo Paramont Hernández García	
VOCAL	M. en C. Gilberto Atilano Amaya Ventura	
SECRETARIO	Dr. Julio César Morales Mejía	
1er. SUPLENTE	I.Q. Paula Álvarez Fernández	
2do. SUPLENTE	Dr. Martín Rogelio Cruz Díaz	

NOTA: los síndicales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

Dedicatorias.

A mi madre Alejandra Cruz, el logro es compartido. Día a día me impulsas a ser más, lo que soy y lo que puedo llegar a ser es gracias a ti.

Al ser tan magnifico que me enseñó a compartir en todos aspectos, mi Abue.

A Zaid, David y Alfredo; en ustedes la curiosidad es infinita y eso, es la base para que se adentren en el mundo del saber. Los quiero.

A Antonio y Víctor; el proyecto es el ejemplo de su buena influencia en mí, los quiero mucho.

A mi tía Mary por siempre creer en mí y amarme tanto.

A toda mi familia, los quiero mucho.

Agradecimientos.

Principalmente a mi madre, esto es posible gracias a ti, los valores inculcados de responsabilidad y esfuerzo son la base de este logro; el amor y apoyo incondicional son incuantificables, eres todo para mí, te amo. ¡Gracias Ale!

A mi Abue por el cariño incondicional, por siempre estar, bendiciéndome simplemente con su presencia, compartiendo su sabiduría.

Al Dr. Julio César Morales, muchas gracias por la paciencia, las enseñanzas, el apoyo y la motivación para hacer un buen proyecto.

Agradezco al Dr. Rafael Almanza por la oportunidad que me brindó para realizar el proyecto en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Al personal de la Planta Solar, gracias por el gran apoyo en la construcción e instalación del reactor, gracias por la paciencia.

Gracias a SMETING S.A. de C.V. por la ayuda desinteresada en la construcción del CPC, sin ustedes esto no sería posible.

A la UNAM por la experiencia y el conocimiento adquirido a lo largo de estos años, a todos mis profesores, cada uno apporto algo bueno en mi formación.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN111416 Acondicionamiento Fotoquímico-fototérmico solar de agua para uso industrial. Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.

A la SEP por la beca otorgada como apoyo a la titulación.

ÍNDICE

-Resumen.	i
-Abstract.	ii
Introducción.	1
Objetivos.	3
Hipótesis.	4
Justificación.	5
1. Antecedentes.	
1.1 El agua y su disponibilidad en México.	7
1.1.1 Problemática de agua en México.	8
1.2 Contaminación del agua.	9
1.2.1 Contaminantes físicos.	9
1.2.2 Contaminantes químicos.	9
1.2.2.1 Problemática del naproxeno sódico como contaminante emergente en aguas residuales.	10
1.2.3 Contaminantes microbiológicos.	11
1.3 Tratamiento de aguas residuales.	11
1.3.1 Tratamiento preliminar.	11
1.3.2 Tratamiento primario.	11
1.3.3 Tratamiento secundario.	12
1.3.4 Tratamiento terciario.	13
1.4 Fotocatálisis heterogénea.	14
1.5 Oxidación química acompañada de radiación UV.	16
1.6 Reactores fotocatalíticos.	17
1.6.1 Diseño de fotoreactores.	21
1.7 Calentadores de agua solar	22
1.8 Circulación termosifónica.	23
1.9 Energía solar.	25
2. Metodología.	
2.1 Diseño y construcción del reactor tipo CPC de circulación termosifónica.	29
2.2 Diseño experimental.	34
2.2.1 Pruebas de circulación.	34
2.2.2 Oxidación química de naproxeno sódico con persulfato de sodio e irradiancia solar.	35
3. Resultados y discusión.	
3.1 Comportamiento del caudal en un reactor CPC de circulación termosifónica con CAS, en distintas posiciones haciendo circular tres volúmenes caudales diferentes.	37

3.2 Estudio de la circulación termosifónica de un CPC con un CAS en posiciones distintas y tres volúmenes diferentes respecto a la energía solar recibida.	42
3.3 Condiciones óptimas del CPC de circulación termosifónica.	47
3.4 Oxidación de naproxeno sódico con persulfato de sodio e irradiancia solar.	48
3.5 Análisis estadístico de las condiciones del CPC.	49
3.5.1 ANOVA 1 energía recibida en J/m ² para 100 L de volumen circulado.	49
3.5.2 ANOVA 2 Reynolds máximo.	51
4. Conclusiones.	54
Recomendaciones.	55
Anexos.	56
Referencias.	64

RESUMEN.

Tanto la contaminación creciente del agua como la falta de dicho recurso en muchos sitios han propiciado el desarrollo de nuevas tecnologías en materia de aguas residuales, con la meta de aminorar el gran problema. Algunos contaminantes orgánicos, como los llamados contaminantes emergentes (fármacos, edulcorantes, plaguicidas, etc.) no pueden ser eliminados en las primeras dos etapas del tren de tratamiento de aguas residuales convencional, por lo que se necesitan tecnologías más avanzadas y específicas para erradicarlos, tales como ósmosis inversa, ozonización, procesos de oxidación química avanzada (en los que se incluye a la fotocatalisis heterogénea), entre otros. Particularmente, en algunos de los procesos fotoquímicos, se emplea radiación solar como parte del procedimiento, para la degradación del contaminante.

Ante tal problemática y con la intención de aportar un poco en esta área, este proyecto consiste en el diseño, construcción y puesta en marcha de un reactor fotoquímico, para degradar contaminantes emergentes. Se trata de un fotorreactor con colector de parábola compuesta (CPC) que está basado en la circulación termosifónica del agua en tratamiento, donde la fuente de energía primaria para su funcionamiento es el sol. Como complemento se incorporó al sistema un calentador de agua solar (CAS).

La primera parte del proyecto fue entonces diseñar y construir el colector CPC con materiales de bajo costo y ya con el sistema listo, se estudió la circulación del agua por el efecto termosifónico con energía solar, donde el agua circuló totalmente a través del CPC sin la necesidad de utilizar una bomba, siendo así un proyecto sustentable y amigable con el ambiente.

Por otro lado, se estudió el funcionamiento fotoquímico del reactor realizando una oxidación química de naproxeno sódico con irradiación solar, y utilizando persulfato de sodio como oxidante químico. El resultado fue una degradación cercana al 50% en un periodo de 3 horas.

ABSTRACT.

Both the increasing water pollution and the lack of water resources in many places have led to develop new technologies in the matter of wastewater, with the goal of decline the huge problem. Some organic pollutants like emerging concern compounds (drugs, sweeteners, pesticides, etc.) can not be removed by the first and second stages of conventional water treatment; so that, more specific and advanced technologies are needed for removing, such as reverse osmosis, ozonation and advanced chemical oxidation processes (in which are included heterogeneous photocatalysis), among others. Particularly, in some of the photochemical processes, solar radiation is used as part of the procedure for the degradation of pollutant.

As an effort to solve such environmental trouble and with the intention of contributing a bit in this area of advanced treatment technologies, this project is about designing, building and starting up a photochemical reactor for degradation of emerging pollutants; it is a photoreactor with compound parabolic collector (CPC), based in the thermosiphon circulation of treated water, and with the primary power source for operation being the sun..

The construction of reactor and the study of water circulation by thermosiphon effect are the first stage of the project. The use of pump was not necessary because fluid circulated by thermosiphon flow, based on solar energy; so, it resulted a sustainable and environmentally friendly project.

The photochemical reactor type CPC operation by thermosiphon circulation was studied, performing a chemical oxidation of sodium naproxen with solar irradiance, using sodium persulfate as chemical oxidant. It resulted in a removal of about 50% of the parent compound over a period of 3 hours.

INTRODUCCIÓN.

La idea de este proyecto es la continuidad de una propuesta previa de un reactor fotocatalítico tipo CPC que se estudia en la tesis doctoral de Julio César Morales en el año 2014 (Morales, 2014). Dicho prototipo consiste en un reactor fotocatalítico solar de 2 L de volumen que utiliza la irradiancia ultravioleta tipo A (UVA) para el tratamiento de un efluente contaminado; al mismo tiempo que la irradiancia solar global brinda la energía necesaria para hacer circular termosifónicamente el fluido y evitar el consumo de energía eléctrica.

Así, se decidió realizar el diseño, construcción y puesta en marcha de un reactor tipo colector de parábola compuesta (CPC) de circulación termosifónica con un volumen variable superior a 10L, proponiendo un CPC con *índice de concentración geométrica de 1.1*, un parámetro de diseño que consiste en la relación entre el área de apertura (donde intercepta la radiación solar) y el área del absorbedor (donde se recibe la radiación)(Blanco,2005); además cinco fotoreactores de pírex de 1 pulgada de diámetro y se añadió un calentador de agua solar al sistema (CAS).

En el primer capítulo se habla de la problemática del recurso agua y de algunos tratamientos que se han implementado para disminuir la contaminación, desafortunadamente el tratamiento no se logra aún de forma homogénea a nivel global y mucho menos nacional. Contribuyendo al desarrollo de tecnologías en reactores fotoquímicos se diseñó, construyó y probó el reactor tipo CPC de circulación termosifónica, para la degradación de contaminantes emergentes utilizando tecnologías avanzadas como los procesos fotoquímicos en los cuales se procesa el agua con energía radiante solar, y agentes de oxidación.

Existen diversos equipos en los cuales se realizan este tipo de procesos, como los reactores con colectores de parábola compuesta, reactores planos, reactores cilindro- parabólicos, entre otras variantes; se emplea radiación solar o de lámparas para efectuar el proceso fotoquímico. En el capítulo uno se habla de estos reactores, de cómo es el funcionamiento del efecto termosifónico y de la energía solar.

En el capítulo dos se describe de manera detallada, la manera que se llevó a cabo el proceso para el diseño, la construcción y puesta en marcha del sistema termosifónico que consta de un reactor tipo CPC y de un calentador de agua solar. Además, se describe el diseño experimental que se realizó para estudiar la circulación termosifónica en el CPC y la parte del estudio fotoquímico que se utilizó para comprobar su funcionamiento.

Posteriormente, se realizaron una serie de pruebas en días soleados, modificando dos variables: volumen de agua y posición del calentador de tubos de cobre (como se indica en el diseño experimental), para estudiar la circulación termosifónica y el funcionamiento fotoquímico del reactor, realizándose durante los primeros meses del año.

Se obtuvieron los resultados en cada prueba, midiendo el caudal y la irradiancia global en el plano horizontal para la parte de la circulación termosifónica; y se midió la absorbancia y las irradiancias UVA y global para las pruebas de funcionamiento fotoquímico del reactor; dichos resultados son tratados y discutidos en el tercer capítulo de este trabajo.

Por último se muestran conclusiones y recomendaciones del proyecto, así como algunos anexos donde se describe parte del diseño y de los cálculos necesarios para el proyecto.

OBJETIVOS.

GENERAL.

- Diseñar, construir y operar un reactor fotocatalítico de tipo CPC de circulación termosifónica y de volumen variable.

PARTICULARES.

- Realizar mejoras en un prototipo de reactor fotocatalítico CPC con volumen de 2 L y circulación termosifónica existente y bajo proceso de patente.
- Lograr que el efluente en tratamiento circule por el efecto termosifón a través del reactor y de su tanque de almacenamiento (sin necesidad de una bomba).
- Obtener una captación de energía solar eficiente.
- Verificar la eficiencia fotoquímica del reactor de tipo CPC utilizando un agua residual preparada en laboratorio.

HIPÓTESIS.

- Entre mayor sea la irradiancia solar captada en el reactor fotocatalítico de tipo CPC de circulación termosifónica y con un calentador de agua solar (CAS), mayor será la tasa de circulación termosifónica del agua en tratamiento.
- Mediante esta acción termosifónica será posible oxidar un contaminante orgánico de manera eficiente con el empleo de la radiación solar como única fuente de energía.

JUSTIFICACIÓN.

La energía solar es una de las alternativas que hoy en día se utilizan en sistemas de calentamiento de agua. Con el propósito de disminuir el consumo de energía eléctrica y gases de combustión, se han creado diversos sistemas donde la fuente principal de energía es el sol; además de este uso, se le puede emplear como contribución a la oxidación fotoquímica (fotocatálisis heterogénea, foto Fenton, fotolisis, etc.), parte de los tratamientos terciarios de aguas residuales; en este sentido, se han creado reactores fotocatalíticos de diversas geometrías.

Como contribución a este tipo de tecnologías para beneficio del medio ambiente, este proyecto trata del diseño, construcción y operación de un reactor fotocatalítico de tipo colector de parábola compuesta (CPC) con circulación termosifónica, donde la fuente principal de energía es la solar, basado en un prototipo existente. Además del reactor tipo CPC se construyó y añadió al sistema un calentador de agua solar (CAS) con el objeto de mejorar la circulación del fluido por el efecto termosifón.

El proyecto es totalmente amigable con el ambiente, es una prueba de que la energía solar es una excelente alternativa a las energías que utilizamos cotidianamente (eléctrica, gases de combustión, petróleo, etc.) y que causan un daño muy grande al medio ambiente. Este proyecto se enfoca en el tratamiento de un efluente líquido con irradiancia UVA solar y además de que la irradiancia global proporciona la energía necesaria para hacer circular el fluido y evitar el uso de una bomba.

Capítulo 1

Antecedentes.

1.1 El agua y su disponibilidad en México.

El agua es un recurso natural de vital importancia para muchos seres vivos, constituye gran parte de la materia que los conforma, por ejemplo para un adulto humano el 60% de su cuerpo es agua; de igual manera para vegetales y animales gran parte de sus cuerpos son agua. Además de formar parte de ellos, el agua ayuda a que se efectúen diversos procesos en los organismos, como el transporte de nutrientes y la eliminación de desechos. Otra función importante que realiza el agua es el transporte de nutrientes en los suelos. Gracias a esto los ecosistemas se mantienen.

La hidrosfera de la tierra es un 75% del planeta, pero la disponibilidad para consumo es mínima alrededor 0.3% (SEMARNAT, 2011); por lo que es de suma importancia cuidarla y preservarla para beneficio de la humanidad y el resto de los organismos.

Suramérica es la región con los mayores recursos hídricos renovables del planeta (cerca del 31.8% del total), seguida por Asia (28.9%) y Europa (13.9%); en contraste, la región de Centroamérica posee tan sólo el 1.5% de la reserva total mundial (SEMARNAT, 2012), como se observa en la Fig. 1.1.

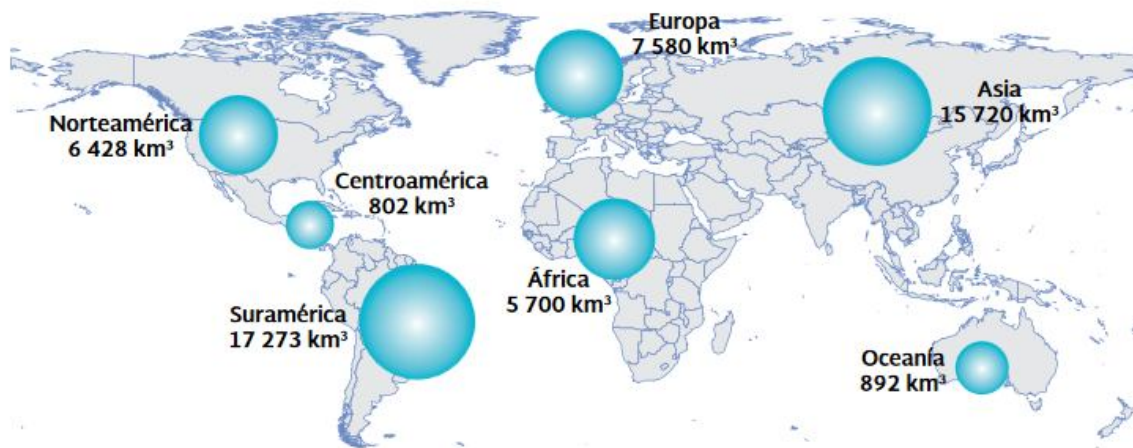


Figura. 1.1 Reservas de agua dulce en el mundo (SEMARNAT, 2012).

México es considerado un país con baja disponibilidad de agua. La situación en México en cuanto al agua renovable per cápita es preocupante, con de 3,982 m³ por habitante y por año. México ocupa el lugar 91 de 177 países de los que se dispone información según la CONAGUA (2013).

El 70% del abasto de agua de la ciudad de México proviene de fuentes dentro de la misma cuenca del Valle de México (pozos principalmente), 9% es proveniente del Río Lerma y el 21% restante del Cutzamala (CEDMA, 2006).

1.1.1 Problemática de agua en México.

Al ser considerado un país con baja disponibilidad de agua, la situación es muy preocupante ya que la población cada día va en incremento 119.5 millones de habitantes en 2015 (INEGI) y cantidad del suministro no es suficiente para abastecer las necesidades y actividades que involucren dicho recurso, sumándole la mala calidad de agua que se ve afectada por actividades antropogénicas desde décadas atrás; la problemática es grave y se debe hacer algo para contrarrestar el daño que se ha generado a tan valioso recurso.

Un agua residual se define como aquella a la que algún producto de desecho se le incorpora; este tipo de aguas tiene un origen doméstico, industrial, subterráneo y/o meteorológico (infiltración y pluviales). Las aguas residuales municipales son resultado de las actividades cotidianas de las personas, la cantidad y naturaleza de los vertidos industria es muy variada, dependiendo del tipo de industria, de la gestión de su consumo de agua y del grado de tratamiento que reciben antes de su descarga (CEDMA, 2006). La descarga de aguas residuales municipales e industriales en México en 2013 se presenta en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Descarga de aguas residuales en México (CONAGUA, 2013).

Centros urbanos (descargas municipales).		
Aguas residuales.	7.26	Miles de hm ³ /año (230.2m ³ /s)
Se recolectan de alcantarillado.	6.66	Miles de hm ³ /año (211.1m ³ /s)
Se tratan.	3.34	Miles de hm ³ /año (105.9m ³ /s)
Se generan.	1.96	Millones de toneladas DBO ₅ año
Se recolectan en alcantarillado.	1.80	Millones de toneladas DBO ₅ año
Se remueve de sistemas de tratamiento.	0.73	Millones de toneladas DBO ₅ año
Usos no municipales incluyendo la industria.		
Aguas residuales.	6.63	Miles de hm ³ /año (210.26m ³ /s)
Se tratan.	1.91	Miles de hm ³ /año (60.72m ³ /s)
Se generan.	9.95	Millones de toneladas DBO ₅ año
Se remueve de sistemas de tratamiento.	1.30	Millones de toneladas DBO ₅ año

1.2 Contaminación del agua.

De acuerdo con su naturaleza química el agua presenta polaridad en su molécula, por lo que es muy compatible con sales y otros compuestos polares, lo que la hace más propensa a contaminarse; según la RAE (2015) contaminar se refiere a un factor externo que altera nocivamente la pureza de algo, en este caso agua. Los factores principales que generan contaminación en este recurso son actividades antropogénicas como la urbanización, agricultura, la industria petroquímica, ganadería, la generación de energía eléctrica a partir de agua, entre otras actividades (SEMARNAT, 2011).

1.2.1 Contaminantes físicos.

Se refiere a agentes que interfieren con la calidad del agua en aspectos físicos como el color, turbiedad, olor, la conductividad, la temperatura, transmitancia, densidad, entre otros factores (Metcalf & Eddy, 2002).

Un contaminante físico como aquel que genera una alteración en las propiedades físicas del agua; su origen y efectos son diversos, para el caso de la temperatura, el incremento de ésta se debe a la descarga de agua con una temperatura elevada, lo que genera un desequilibrio en el ecosistema (Jiménez, 2001).

1.2.2 Contaminantes químicos.

Los contaminantes químicos son sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas o dispersas en el agua que alteran con su presencia la calidad de ésta; contaminantes de este tipo son metales como As, Cd, Ca, Cr, Co, Cu, Pb, Mg, Hg, Mo, Ni, Zn, Se, Na, compuestos inorgánicos como nitritos, nitratos, sulfuros, sulfatos, cloruros, fosfatos, carbonatos, bicarbonatos, etc. Algunos gases como O₂, CO₂, NH₃, H₂S, CH₄. Otras propiedades químicas que se ven afectadas son el pH y la alcalinidad del agua (Metcalf & Eddy, 2002).

Compuestos orgánicos también forman parte de este tipo de contaminantes en especial los denominados **emergentes**; se definen como compuestos químicos de distinto origen cuya presencia en el medio ambiente no se encuentra regulada, genera un gran impacto ecológico y efectos en la salud (Gil *et al.*, 2012). Algunos ejemplos son pesticidas, productos farmacéuticos, productos para el cuidado personal, aditivos de las gasolinas, retardantes de fuego, antisépticos, aditivos industriales, esteroides, hormonas y subproductos de la desinfección del agua, entre otros (Becerril, 2009).

Para determinar la presencia de contaminantes orgánicos en aguas residuales existen diversas pruebas que permiten cuantificar parámetros de propiedades químicas orgánicas de un efluente,

tales como demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), sólidos totales disueltos (ST), compuestos orgánicos como carbono orgánico total o COT (Metcalf & Eddy, 2002).

1.2.2.1 Problemática del naproxeno sódico como contaminante emergente en aguas residuales.

La fuentes principales de la presencia de fármacos en aguas residuales, superficiales e incluso en la potable, se deben al *consumo humano* de dichos productos, las mínimas concentraciones que el cuerpo no adsorbe son excretadas y descargadas en las aguas de residuo municipales, por otra parte el *desecho inadecuado* de un producto caduco, llegando a suelos y a través del ciclo hidráulico contaminado mantos superficiales, productos farmacéuticos de uso veterinario de descarga directa al ambiente y a los efluentes de los procesos de manufactura (Gil et al, 2012).

La presencia de fármacos en aguas residuales fue detectada por primera vez en Estados Unidos en 1976 reportando un intervalo de concentración de 0.8- 2 µg/L de ácido clofibrico, posteriormente en la década de los noventas comenzaron a ser más recurrentes la presencia de diversos fármacos en diferentes ubicaciones; en 1996 encontraron la presencia de ibuprofeno y *naproxeno* en aguas superficiales de Canadá (Silva, 2008).

La ignorancia de la presencia de contaminantes emergentes en agua, el desconocimiento de los riesgos, efectos ha propiciado el estudio de los efectos de dichos compuestos orgánicos en organismos acuáticos y humanos, desafortunadamente la información es deficiente (Becerril, 2009).

El naproxeno sódico es un fármaco clasificado como antiinflamatorio no esteroideo, empleado ampliamente para la inhibición de dolor leve, malestares ocasionados por enfermedades como la artritis reumatoide, osteoartritis, espondilitis anquilosante, además está indicado para el tratamiento de tendinitis, bursitis, esguinces y para el manejo del dolor posquirúrgico (S.S.A Catalogo de medicamentos, 2007). Por ser un medicamento de fácil acceso, ya que la venta al público no requiere de prescripción médica rigurosa, además de un costo bajo, es consumido y auto-medicado en demasía.

Es sabido que se metaboliza el 99% del fármaco en cuestión por el organismo humano, el porcentaje restante es excretado y descargado junto con los metabolitos resultantes de la digestión del fármaco en aguas de residuo, posteriormente del tratamiento de los efluentes líquidos, pequeñas porciones del naproxeno pueden quedar retenidas en los residuos sólidos que llegan a ser utilizados como fertilizantes, causando una acumulación en suelos agrícolas, siendo así la preocupación del naproxeno como contaminante emergente (Pinto, 2015).

1.2.3 Contaminantes microbiológicos.

Los contaminantes microbiológicos son aquellos microorganismos como las bacterias, protozoarios, virus, coliformes, etc. Por su presencia alteran la calidad del agua, volviéndose peligrosos, ya que de no ser eliminados del agua de consumo pueden generar un mal en plantas, animales y por supuesto en los seres humanos causando enfermedades como tifoidea, salmonelosis, cólera, etc., etc. (Jiménez, 2001).

1.3 Tratamiento de aguas residuales.

Las acciones conscientes de muchas personas desde unas décadas atrás han tratado de aminorar el problema y de encontrar alternativas para reparar los daños en cuanto a contaminación del agua y preservar este recurso tan valioso. En México tenemos 2186 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en operación de las cuales en total de capacidad instalada tenemos 126.84 m³/s y solo 93.60 m³/s de capacidad tratada (CONAGUA, 2012).

El tratamiento de aguas residuales es la acción que se realiza para limpiar y sanear efluentes líquidos que por eventos naturales o antropogénicos han sido dañados, dicho tratamiento consiste en tres principales etapas que se describen a continuación.

1.3.1 Tratamiento preliminar.

La primera etapa del tratamiento de aguas residuales por lo general consiste en una serie de procesos físicos para separar sólidos del efluente, como primera instancia sólidos de gran tamaño como trozos de madera, papel, plásticos, trapos, etc. Este proceso se realiza en un sistema de rejillas donde el efluente líquido pasa a través de ellas para eliminar estos, otra operación que se realiza en esta primera etapa es desarenado, consiste en un sistema de sedimentación y por diferencia de densidades ocurre una separación de sólidos como arena, grava, materiales que se encuentren en el agua en forma de granos; se deja un tiempo determinado el efluente y por decantación se separa el efluente líquido, quedando como residuo una especie de lodo con los materiales que se han separado, otro tipo de tratamiento que suele realizarse en dicha etapa es la coagulación- floculación, consiste en eliminar sólidos de menor tamaño, agregando agentes que ayuden a conglomerar los sólidos y sea más fácil su separación (SEMARNAT, 2012; CONAGUA, 2009).

1.3.2 Tratamiento primario.

Consiste en eliminar gran parte de los sólidos totales suspendidos contenidos en el efluente, el tratamiento puede ser físico o fisicoquímico, como la etapa que se realiza en tanques de sedimentación, donde el efluente se mantiene cierto tiempo y por medio de un proceso de

sedimentación simple por gravedad, o asistida utilizando sustancias químicas, se separen los sólidos suspendidos. En esta etapa se elimina alrededor del 60% de los sólidos en suspensión (SST) y aproximadamente 30% de la DBO (Calderón, 2009). En la figura 1.2 se observa un esquema de la etapa preliminar y primaria del tratamiento de aguas residuales.

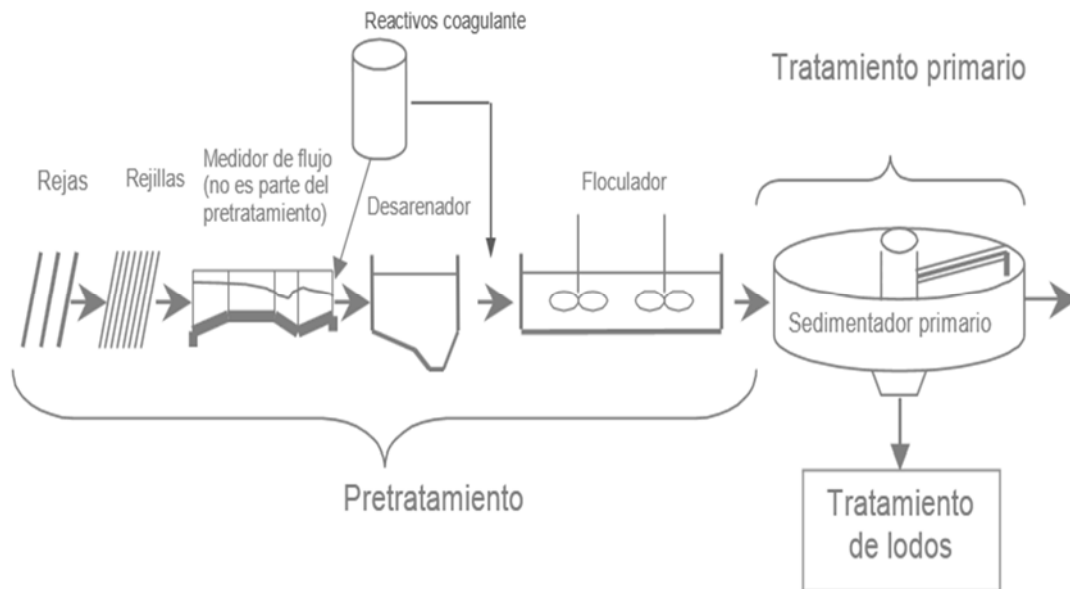


Figura. 1.2 Etapa preliminar y primaria en el tratamiento de aguas residuales (CONAGUA, 2009).

1.3.3 Tratamiento secundario.

En esta etapa del tratamiento de aguas residuales el objetivo principal es eliminar la materia orgánica disuelta, suspendida o estado coloidal, mediante un proceso de oxidación de naturaleza biológica seguido de sedimentación. Los sistemas de tratamiento secundarios, se dividen de acuerdo a la función metabólica (Metcalf & Eddy, 2002):

- Proceso aerobios. Tratamiento biológico que ocurre en la presencia de oxígeno.
- Proceso anaerobios. Tratamiento biológico que ocurre en la ausencia de oxígeno.
- Proceso anóxicos. También es llamado proceso de desnitrificación, nitratos son convertidos biológicamente en gas nitrógeno en ausencia de oxígeno.

Algunos sistemas convencionales para el tratamiento biológico son:

- a) **Lodos activados.** Consiste en un reactor biológico y un sistema de sedimentación, el agua residual se pone en contacto con la biomasa donde el proceso es aerobio, por lo que está compuesto de un sistema aireación con Oxígeno.

- b) **Filtros percoladores.** Son reactores de película, contienen un lecho empacado, el empaque descansa sobre un bajo dren que permite el paso del agua hacia los canales colectores. El agua residual se distribuye mediante brazos giratorios, escurre por la película biológica y ocurre una adsorción y asimilación biológica de la materia contaminante.
- c) **Reactores discontinuos SBR.** Consiste en un reactor biológico en el cual la entrada de flujo no es continua, el agua residual que se va a tratar permanece en el reactor por un tiempo de residencia establecido, los procesos pueden ser aerobios o anaerobios, todo el proceso se realiza en el reactor.
- d) **Reactores RAFA.** Los reactores anaerobios de flujo ascendente, el proceso biológico se realiza en ausencia de oxígeno, donde la materia orgánica se transforma a biomasa y compuestos orgánicos, la mayoría de ellos volátiles.
- e) **Humedales artificiales.** Son sistemas construidos por el ser humano con la intención que sea muy similar a un humedal natural, plantas y microorganismos asociados tratan el agua residual cuando fluye a través de la construcción.

1.3.4 Tratamiento terciario.

En esta última etapa del tratamiento el objetivo es eliminar los contaminantes que no pudieron eliminarse en las primeras dos etapas; contaminantes orgánicos y emergentes por ejemplo (Metcalf & Eddy, 2002).

Algunos ejemplos de tecnologías en esta etapa de tratamiento son:

- Adsorción
- Cloración al punto de quiebre
- Destilación
- Electrodialisis
- Filtración profunda
- Intercambio iónico
- Osmosis inversa
- Ozonización
- Oxidación química
- Fotocatálisis heterogénea

1.4 Fotocatálisis heterogénea.

Es un proceso de oxidación avanzada que se emplea para la degradación de contaminantes orgánicos que no son eliminados en los tratamientos primarios y secundarios de aguas residuales; se define, como la aceleración de una reacción química mediante un catalizador fotosensible que es activado por luz ultravioleta natural o artificial (Salgado, 2011).

La fotocatálisis puede ser homogénea o heterogénea. Esto depende del catalizador si se encuentra en la misma fase que el efluente o se encuentra en estado sólido y el efluente es líquido o gaseoso. En la fotocatálisis heterogénea por lo regular se utilizan semiconductores como catalizadores, un ejemplo es el TiO_2 ; el dióxido de titanio absorbe longitudes de onda inferiores a 400nm, que corresponden al espectro ultravioleta. Cualquier radiación de estas características tendrá la capacidad de generar en el semiconductor pares electrón-hueco (Garcés, 2007). Cuando son expuestos a la radiación electromagnética, los electrones absorben la energía de los fotones con igual o mayor energía que la de su *banda prohibida* (E_G) (Se denomina como el salto de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción); generando un conjunto de pares de electrón-hueco, en la *banda de conducción* (la banda de menor energía sin electrones) se encuentran electrones libres (e^-) y en la banda de valencia (la banda de mayor energía ocupada por los electrones) se generan los huecos(h^+) (Herrmann, 2010), (Fernández, 2012). Esto se representa en la Figura 1.3.

Los huecos y electrones que logran llegar a la superficie del catalizador inducen respectivamente reacciones de reducción y oxidación, con lo cual se generan especies de alto poder oxidante, los electrones capaces de reaccionar con los huecos fotogenerados son los grupos hidroxilo (OH^-) generando radicales hidroxilo $\bullet\text{OH}$, la especie aceptora más habitual de los electrones excitados a la banda de conducción durante la irradiación es el O_2 que se reduce al anión radical superóxido $\bullet\text{O}_2^-$. Las cuales pueden desencadenar la reacción química deseada, tal como la degradación del contaminante (Fernández, 2012).

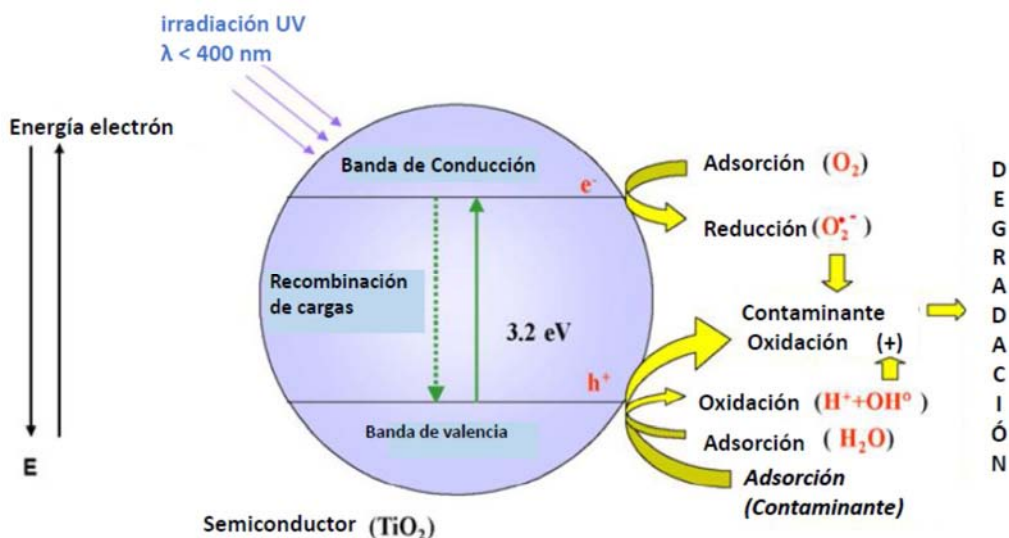


Figura. 1.3 Diagrama de Banda de Energía para la degradación de un contaminante con TiO_2 como catalizador (Herrmann, 2010).

La fotocatalisis heterogénea con TiO_2 como catalizador actualmente es una de las aplicaciones de mayor interés en materia de aguas residuales, ya que, el proceso no es selectivo y puede emplearse para tratar mezclas complejas de contaminantes y la posibilidad de utilizar radiación solar como fuente de energía primaria la hace un claro ejemplo de aplicaciones de la energía sostenible (Blanco, Malato, Estrada, 2005).

TiO₂ como fotocatalizador.

Las características importantes de un fotocatalizador para una buena eficiencia son: área superficial grande, distribución de partícula uniforme, forma esférica de las partículas, ausencia de porosidad interna y radios de partícula nanométricos (Blanco et al 2005).

El dióxido de titanio es un polvo fino blanco de bajo costo, su tamaño de partícula se encuentra entre los 50 y 100nm y predomina en la fase anatasa, es el material más usado en placas de tratamiento de aguas residuales.

El uso del TiO_2 puede ser utilizado en suspensión o fijo en un soporte, al utilizarlo en polvo implica añadir una etapa posterior para la separación y recuperación del TiO_2 del efluente tratado; la etapa de separación puede eliminarse y fijar el catalizador en un soporte, las ventajas y desventajas son las siguientes: el área superficial expuesta es menor en comparación del uso del catalizador en polvo, el soporte donde se fija el catalizador debe ser inerte en la reacción, la adherencia del TiO_2 al soporte debe ser muy eficiente debido a la abrasión que el agua provoca en la circulación (Candal et al, 2005).

1.5 Oxidación química acompañada de radiación UV.

La oxidación puede ser inducida para la degradación de fármacos que se encuentran en el ambiente, por ejemplo un agua residual. Se define a la oxidación química como la pérdida de electrones, en este caso ocurre la oxidación en la molécula de un fármaco con ayuda de un agente oxidante con el fin de degradarlo; algunos factores que influyen en la descomposición por oxidación son la temperatura, radiación, presencia de oxígeno en el sistema, catalizadores y la concentración de agentes oxidantes (Ayala, 2011).

La radiación ultravioleta promueve reacciones de oxidación iniciadas por la presencia de radicales libres. Para que estos procesos se lleven a cabo es necesaria la presencia de oxidantes químicos, los que permiten la formación de radicales (Garcés, 2007).

Un ejemplo de remoción de un fármaco por oxidación química es el trabajo de *Ghauch, Tuqan, Kibbi (2012)*, donde se remueve ibuprofeno de una solución acuosa por medio de un agente oxidante (persulfato de sodio) activado térmicamente, las condiciones óptimas experimentales que ellos reportan son las siguientes: pH=6.8- 7.0, temperatura de 60 °C, concentración inicial de ibuprofeno de entre 7.33 y 20.36 μM y de persulfato de sodio entre 1.0 y 2.8 mM. Ellos reportan también haber obtenido la degradación completa del ibuprofeno y que los radicales sulfato están más implicados que los radicales hidroxilo en el proceso de oxidación.

En un estudio realizado para la degradación de naproxeno con persulfato de sodio como oxidante químico activado térmicamente se muestra que la mejor tasa de degradación es a una temperatura de 70°C, un pH=7.5 y concentración inicial de naproxeno de 50 μM y para el persulfato de sodio 1.0mM, resultando la degradación totalmente del naproxeno en sistemas de persulfato activados térmicamente. Ahí se establece también que el mecanismo de degradación depende altamente de SO_4^- y no de radicales hidroxilo, los sistemas de activación térmica de persulfato mostraron una mineralización total del naproxeno en un efluente de hospital muy cargado por el contaminante, la presencia de iones inorgánicos afectan ligeramente la eficiencia en los sistemas de degradación de activación térmica del persulfato y la mineralización de naproxeno es proporcional a la concentración de persulfato de sodio (Ghauch, Tuqan y Kibbi ,2015).

En otro trabajo se trataron tres fármacos, el beta-bloqueador metoprolol, el antibiótico amoxicilina, el anti-inflamatorio naproxeno y el analgésico fenacetina y sus degradaciones se efectuaron mediante radiación UV, ozono, proceso de oxidación fenton y foto-fenton; la combinación de radiación UV y ozono con H_2O_2 , TiO_2 , Fe(II), and Fe(III). Utilizando tres tipos de agua, la primera agua destilada, la

segunda obtenida de un depósito de agua subterráneo, y la última de un efluente secundario de un agua residual municipal; obteniendo los índices más altos de degradación en las tecnologías combinadas UV- TiO₂ y O₃- TiO₂, la velocidad de degradación para la mayoría de los casos en el siguiente orden amoxicilina, naproxeno, metoprolol y fenacetina, y las tasas más bajas de degradación en el agua natural y el efluente secundario (Benítez *et al.*, 2011).

Los estudios anteriores son oxidaciones químicas de contaminantes emergentes, por otro lado hay un trabajo enfocado en la fotodegradación de naproxeno sódico, sin oxidación química, solo con irradiación monocromática a 254nm y las siguientes condiciones: un pH=7 y una temperatura de 25°C; en dos sistemas, el primero utilizando un sistema de aireación de oxígeno y el segundo sin la presencia del gas. Los resultados muestran que la mejor tasa de degradación y la mejor distribución relativa de los productos intermedios de reacción, ocurre en el sistema donde hay oxígeno (Marotta *et al.*, 2012).

1.6 Reactores fotocatalíticos.

La fotocatalisis es un tratamiento de oxidación avanzada en el tratamiento de aguas residuales para la eliminación de compuestos orgánicos y algunos metales, dicho proceso se realiza en reactores fotocatalíticos de diversas geometrías, colectores con o sin concentración de energía.

Colectores sin concentración.

Según Blanco (2005) los colectores sin concentración consisten en sistemas estáticos sin mecanismos de seguimiento solar, generalmente orientados hacia el ecuador con una inclinación específica dependiendo la latitud de la zona donde se ubica. Este tipo de sistemas aprovecha la radiación solar directa y difusa. Algunos ejemplos de este tipo de sistemas son los que se describen a continuación (Blanco, et. al, 2006).

- *Reactor de placa plana o cascada.* Consiste en un dispositivo estático, formado por una placa recubierta por una película de catalizador, orientada hacia el sol, por la que el efluente a tratar fluye, por lo regular se tratan efluentes con contaminantes no volátiles.
- *Placa hueca.* Este dispositivo consiste en dos placas unidas, a través de las cuales se hace circular el agua a tratar.
- *Tubulares.* Este colector solar consiste en una serie de varios tubos conectados en paralelo, que se encuentran inclinados y orientados al sol, por los cuales se hace circular el efluente a tratar. La velocidad de circulación de fluido es mayor comparada con el colector plano.

Colectores con concentración.

Consisten en sistemas de gran superficie reflejante, cuentan con ejes de movimiento y la energía captada es enfocada a un solo punto, a un fotoreactor, por el cual fluye el efluente, los colectores con concentración aprovechan la radiación solar directa para realizar el proceso fotoquímico (Salgado, 2007).

- *Colectores cilindro parabólicos (CCP).*

Los componentes básicos de un reactor con colector cilindro parabólico para aplicaciones fotocatalíticas son el concentrador reflejante de geometría parabólica, el tubo absorbedor de energía por el cual circula el agua residual, situado en el foco de la parábola y el sistema de seguimiento del reactor, puede ser en uno (acimutal o altura) o en dos ejes (acimutal y altura); el objetivo de los seguimientos es tener una mayor eficiencia en cuanto a la captación de energía. Su eficiencia óptica está entre el 50 y 75% (Salgado, 2007) (Blanco, 2005).

En la figura 1.4 se observa un reactor cilindro parabólico de seguimiento en un eje (acimutal), sólo para la orientación hacia el sol, cada que este cambie de posición a lo largo del día y que la energía captada sea enfocada al foco de la parábola donde se ubica un fotoreactor tubular por donde circula el efluente.



Figura. 1.4 Reactor cilindro parabólico instalado en la planta solar del Instituto de Ingeniería en la UNAM.

El inconveniente en este tipo de colectores es que sólo se aprovecha la radiación directa del sol y en días nublados la eficiencia es baja, el costo del seguimiento es alto.

Colectores de baja y de media concentración.

- *Reactores con colectores de parábola compuesta (CPC).*

Una interesante combinación entre los reactores cilindro parabólicos y los colectores estáticos dan origen a los reactores con colectores de parábola compuesta (CPC), una de las mejores opciones para la fotocatalisis heterogénea con energía solar. La geometría reflejante de este tipo de colectores consiste en una parábola compuesta por una involuta (Fig. 1.5), gracias a este detalle los colectores tienen una de las mejores ópticas para los sistemas de baja concentración, pueden ser diseñados con un índice de concentración igual o diferente a uno por lo que se tienen las ventajas de dispositivos de concentración y las de los reactores sin concentración, aprovechando así la radiación solar difusa y directa (Blanco, et al, 2006) (Salgado, 2011).

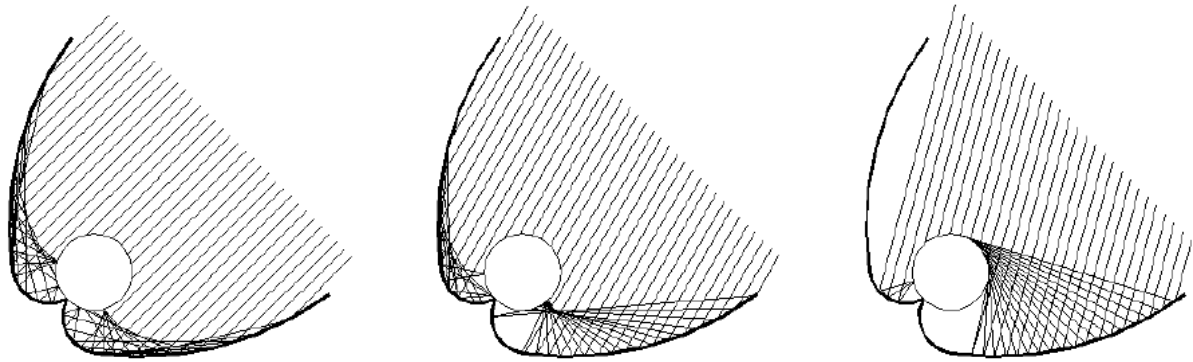


Figura. 1.5 Radiación solar reflejada en un colector CPC. (Blanco, et al., 2006).

Con esta geometría la luz que no incide directamente sobre el tubo, es reflejada y distribuida a la parte no iluminada directamente, logrando que el fotoreactor reciba la mayor parte de energía, la ventaja de este dispositivo es la posibilidad de concentrar energía solar en un sistema estático (Salgado, 2011).

Diseño óptico de los espejos del CPC.

Para el caso del reactor con colector de parábola compuesta, como primera instancia hay que considerar que el receptor, por la geometría del tubo es cilíndrico, otro parámetro importante para el diseño de los espejos de un CPC es la relación de concentración que se define como la relación entre el área de apertura del colector y el área del absorbedor (Blanco 2002). Para la relación de

concentración para un receptor cilíndrico de acuerdo con su semi ángulo máximo de apertura θ_{max} del CPC se tiene la ecuación 1.1 (Winston et al 2005).

$$RCg = \frac{1}{\text{sen } \theta_{max}} \quad \text{Ec. 1.1}$$

Para un CPC con un índice de concentración (RCg) y un diámetro del tubo definidos (de), tenemos para la parte de la involuta según Winston et al en 2005 el rango de la curva que va de acuerdo a la ecuación 1.2 donde θ es el ángulo de diseño en radianes.

$$0 \leq \theta \leq \left[\left(\frac{\pi}{2} \right) + \theta_{max} \right] \quad \text{Ec.1.2}$$

Las ecuaciones 1.3 y 1.4 están definidas para las coordenadas x, y para obtener la involuta de la curva compuesta, donde r es el radio del tubo de vidrio.

$$x = r(\text{sen}\theta - \theta\text{cos}\theta) \quad \text{Ec.1.3}$$

$$y = r(-\text{cos}\theta - \theta\text{sen}\theta) \quad \text{Ec.1.4}$$

Para la parte de la parábola en la curva compuesta el rango para el valor del ángulo de diseño θ va de acuerdo a la ecuación 1.5. La coordenada X está definida por la Ec. 1.6 y la coordenada Y por la ecuación 1.7 para la parábola.

$$\left[\left(\frac{\pi}{2} \right) + \theta_{max} \right] \leq \theta \leq \left[\left(\frac{3\pi}{2} \right) - \theta_{max} \right] \quad \text{Ec.1.5}$$

$$x = r \left[\text{sen}\theta - \left\{ \frac{\frac{\pi}{2} + \theta_{max} + \theta - \text{cos}(\theta - \theta_{max})}{(1 + \text{sen}(\theta - \theta_{max}))} \right\} (\text{cos}\theta) \right] \quad \text{Ec.1.6}$$

$$y = r \left[-\text{cos}\theta - \left\{ \frac{\frac{\pi}{2} + \theta_{max} + \theta - \text{cos}(\theta - \theta_{max})}{(1 + \text{sen}(\theta - \theta_{max}))} \right\} (\text{sen } \theta) \right] \quad \text{Ec.1.7}$$

La involuta y la parábola obtenida forman la geometría de los espejos del CPC, como se muestra en la figura 1.6.

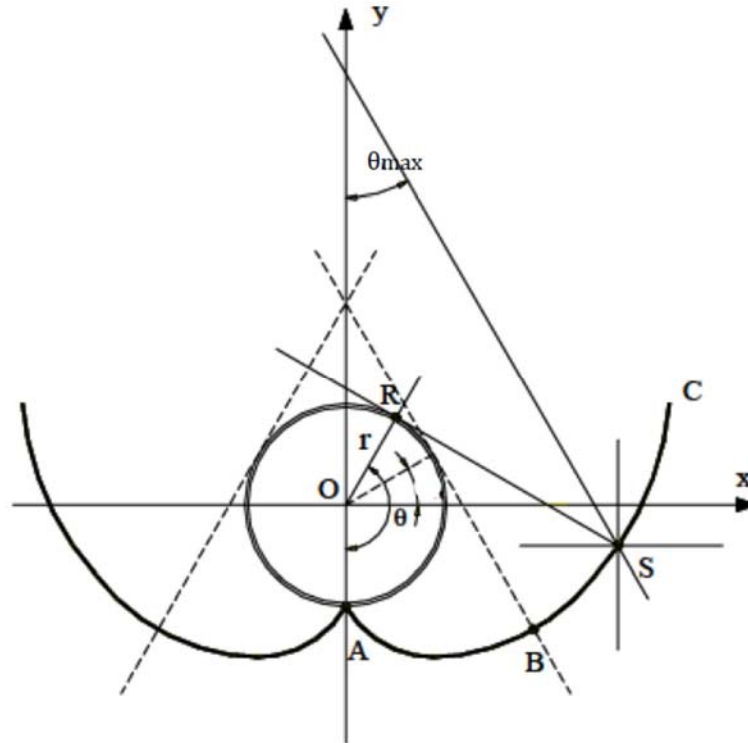


Figura. 1.6 Curva compuesta para un CPC de $RCg= 1$ (Blanco, 2005)

En donde el ángulo de aceptación $\theta_{max} = 90^\circ$ para un índice de concentración $RCg=1$, S es un punto reflector genérico, el segmento RS es la tangente al tubo del reactor, O es el centro del tubo, r es el radio del tubo, AB es la involuta y BC es la parábola de la curva compuesta.

1.6.1 Diseño de fotoreactores.

Blanco et al en 2005 hablan acerca de las comparativas y especificaciones importantes para el diseño de reactores para procesos fotocatalíticos. Un parámetro importante que define el diseño de un reactor fotocatalítico es el tipo de colector con el cual se va a trabajar, ya sea un sistema de concentración o un sistema sin concentración. La ventaja principal de los sistemas de concentración es la alta irradiancia directa que se puede captar, el área del reactor es menor por lo tanto el volumen total es menor y con ello se tiene un mejor control del fluido; por otro lado la ventaja de los sistemas sin concentración es un menor costo y mayor eficiencia ya que el sistema aprovecha tanto la radiación difusa como la radiación directa solar. Ambos sistemas tienen diversas ventajas y la decisión va a depender del fin para que se utilice el reactor.

Otro aspecto importante en el diseño de fotoreactores en el caso de utilizar un catalizador para procesos de fotocátalisis es el *área de contacto entre el catalizador y el reactivo*, esto va a depender de cómo se emplee el catalizador, ya sea en forma de una delgada película en el tubo, o el catalizador en suspensión; además de la distribución del flujo, el mezclado y la transferencia de masa. Se requiere una elevada área superficial por unidad de volumen de reactor.

Otro parámetro importante en el diseño de fotoreactores es el tiempo de residencia, se refiere al tiempo de exposición del fluido en el reactor a la irradiancia solar, es difícil que para un proceso de fotocátalisis el tiempo de residencia sea igual al tiempo que requiere el proceso fotocatalítico, por lo que es difícil establecer este parámetro, ya que depende principalmente del caudal másico del reactor y por cuestiones del mismo proceso es difícil fijar la variable.

Resulta conveniente referir los estudios fotocatalíticos en función de la energía acumulada a través del tiempo del proceso fotocatalítico en lugar del tiempo de residencia por lo que Blanco et al en 2005 establecen una relación de la energía acumulada por unidad de volumen del reactor ($E_{UV,n}$) como se indica en la ecuación 1.8, en donde A es el área superficial del reactor, V es el volumen total del reactor, Δt_n es el intervalo de tiempo entre dos muestras y $UV_{G,n}$ la radiación media útil incidente sobre la superficie del reactor (W/m^2).

$$E_{UV,n} = E_{UV,n-1} + \Delta t_n UV_{G,n} \left(\frac{A}{V}\right) \quad \text{Ec.1.8}$$

Al utilizar la relación entre el tiempo experimental y el volumen total del reactor, el área superficial del reactor y la radiación captada describe el proceso fotocatalítico en función de la energía captada.

En el proyecto se obtuvieron datos de energía global en (W/m^2) y caudal en (L/s) en intervalos de 10 min, en el tratamiento de los datos se realizó la integral en el intervalo de t_0 hasta t de la energía global y del caudal para tener la energía recibida (J/m^2) y el volumen circulado en (L).

1.7 Calentadores de agua solar.

Un calentador de agua solar es un sistema fototérmico capaz de captar, absorber y transferir energía solar a un fluido, sin la necesidad de utilizar ningún tipo de combustible; en un colector solar se presentan tres mecanismos de transferencia de calor, conducción, convección y radiación (Faurox; Jagër, 2013). Los calentadores de agua solar se clasifican de acuerdo a su temperatura en:

- Calentador solar de temperatura baja (menor a 65 grados Celsius).
- Calentador solar de temperatura media (100 – 300 grados Celsius).
- Calentador solar de temperatura alta (superior a 500 grados Celsius).

Según Placco (2009) un calentador solar debe ser elegido de acuerdo a la temperatura a la cual se requiere el fluido, a la aplicación prevista y de acuerdo al clima donde se va a instalar; existen diversos tipos de calentadores solares de acuerdo a su geometría:

- Colector de placa plana con cubierta.
- Colector de parábola compuesta estacionario.
- Colector de placa plana sin cubierta.
- Colector de tubos de vacío o evacuados.

Colector de placa plana con cubierta. Se emplea para calentar agua en hogares y en sistemas de calefacción, aplicaciones donde la demanda de temperatura se encuentre dentro de un rango de 30 y 70°C, el colector consiste en un marco metálico, una cubierta transparente, placa térmica colectora (enrejado con aletas de cobre), un aislante térmico (poliuretano, lana mineral, fibra de vidrio) y la caja del colector (aluminio o galvanizada) (Greanpeace México, 2006).

Colector de tubos evacuados. Se emplea para temperaturas más altas que el colector de placa plana, temperaturas dentro de un rango de 77- 177°C, por su geometría cilíndrica aprovecha más la radiación solar y es un 30 % más efectivo que el colector de placa plana, la desventaja que presenta es su alto costo debido al vacío que se requiere, por unidad de superficie cuesta el doble que el colector de placa plana; el sistema consiste en un conjunto de tubos de vacío, cada uno de los cuales tiene un absorbedor (plancha de metal de color negro), el cuál transfiere la energía al fluido; las pérdidas de calor son reducidas debido al vacío (Faurox; Jagër, 2013).

1.8 Circulación termosifónica.

El sistema de calentamiento de agua por circulación termosifónica se compone típicamente de un tanque de almacenamiento y de un colector solar con tubos ascendentes, placas absorbedoras, aislantes térmicos y placas de vidrio. El fluido frío proveniente del tanque de almacenamiento circula por gravedad hacia el cabezal inferior del colector, donde se calienta el fluido y por una diferencia de densidades asciende ya que la densidad disminuye al elevarse la temperatura, el fluido caliente llega a la parte superior del colector y nuevamente se incorpora al tanque de almacenamiento, este efecto de circulación se conoce como termosifón, un esquema que ejemplifica este sistema de calentamiento de agua se observa en la figura 1.7 (Chuawittayawuth, 2001).

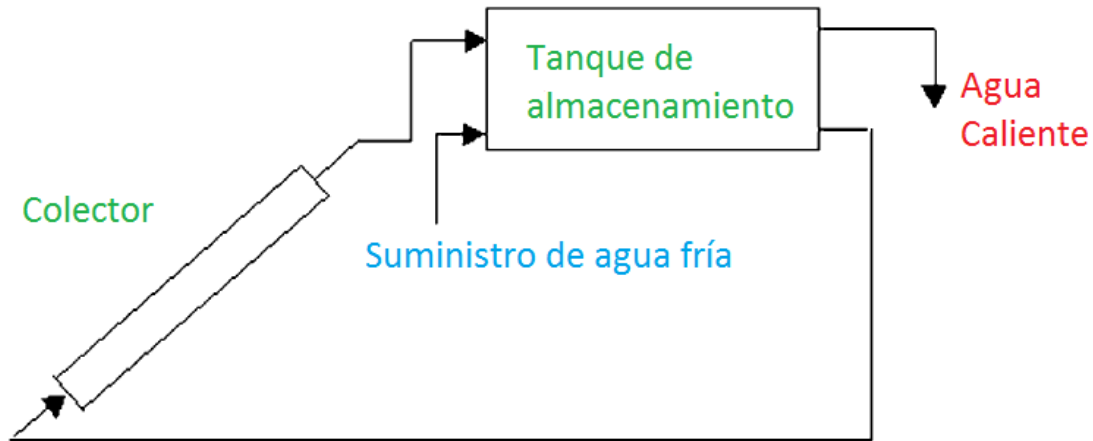


Figura. 1.7 Sistema de calentamiento de agua por circulación termosifónica (Chuawittayawuth, 2001)

Es importante mencionar que debe existir una diferencia de altura entre la parte inferior del tanque de almacenamiento y el cabezal superior del colector, además la inclinación del colector solar debe ser la adecuada de acuerdo a la zona local donde se ubique, ya que afectara al total de irradiancia en la superficie de los tubos y la transferencia de calor por convección natural (Bracamonte, et al., 2015).

La manera más simple para aprovechar este concepto es lograr la circulación de un fluido sin la necesidad de utilizar energía eléctrica, es decir, sin emplear una bomba. Esto es posible gracias al efecto termosifónico, consiste en una diferencia de densidades en un mismo fluido, está diferencia se debe al incremento de temperatura del agua, obtenida de la energía térmica captada del sol en el colector por el cual circula el fluido; al incrementar la temperatura en el fluido disminuye su densidad, como consecuencia el fluido circula a la parte superior del sistema; el fluido de temperatura menor se ubica en la parte inferior del reactor, ya que su densidad es mayor, logrando la circulación termosifonica en un sistema donde la fuente primaria de energía es el sol.

El rendimiento del sistema termosifón depende totalmente de la eficiencia instantánea de los días claros, por las condiciones variantes del clima y la radiación solar, el rendimiento del sistema es bajo cuando las condiciones climáticas no son las adecuadas, es la única variable que no podemos controlar; día a día se busca el diseño de equipos que logren captar la mayor radiación posible para efectuar dicho efecto con la mayor eficiencia posible (Lloyd, 2008).

El calentador solar de agua con circulación termosifónica es un muy interesante y simple dispositivo tecnológico para la explotación de energía solar; su autonomía en el funcionamiento y su mínimo

mantenimiento hacen que sea una alternativa interesante a cualquier sistema que utilice una bomba (Koffi et al., 2008).

En materia de calentadores solares de agua, este efecto ha sido estudiado desde mucho tiempo atrás, pero en la parte reactores fotocatalíticos que empleen esta tecnología, es difícil encontrar un estudio enfocado a dicha aplicación, es muy interesante que este efecto se utilice para un reactor con colector de parábola compuesta, un prototipo que su energía primaria al 100% sea la solar, resulta ser de mucho beneficio para contribuir al saneamiento del recurso agua y contrarrestar el daño a nuestro planeta.

1.9 Energía solar.

El sol consiste en una esfera de materia gaseosa intensamente caliente con un diámetro de 1.39×10^9 m y se encuentra a una distancia aproximada de 1.5×10^{11} m del planeta tierra, su temperatura considerándolo un cuerpo negro es de 5,777k y su densidad estimada es 100 veces más que la del agua. Los planetas orbitan alrededor de él, la energía que emite a la tierra es vital para diversos procesos naturales (Duffie; Beckman, 2013).

La energía solar se produce como resultado de una reacción nuclear de fusión entre su materia gaseosa, principalmente hidrogeno y una pequeña porción de helio a temperaturas y presiones muy elevadas, la energía generada en el interior se transmite a la fotosfera mediante mecanismos de convección, llega a la zona llamada inversión y finalmente a la cromosfera y a la corona, mediante radiación la energía llega a la tierra a través del espacio en forma de rayos ultravioleta e infrarrojo (Jutglar, 2004).

La distribución espectral de la intensidad de radiación extraterrestre solar cubre una banda de frecuencias que va desde el ultravioleta hasta el infrarrojo, pasando por la luz visible (SEMARNAT, 2010).

La energía solar que la tierra recibe anualmente es de $5,4 \times 1.024$ J que es más de 4000 veces la energía que se consume en el planeta, esta energía es gratis y es sustentable puede utilizarse en muchas aplicaciones (Romero, 2009).

La constante solar G_{sc} es la energía proveniente del sol que incide sobre una superficie perpendicular en dirección de propagación de la radiación solar ubicada a una distancia media de la tierra al sol fuera de la atmosfera (Romero, 2009); a lo largo del tiempo esta constante tiene diversos valores, para funciones practicas se utiliza el valor de $1,367$ W/m² según Duffie en 2013.

Radiación directa. Es la radiación solar recibida sobre una superficie a través de la atmósfera sin afectar su dirección y difusión. (Romero, 2009).

Radiación difusa. Se define como la radiación proveniente del sol que al pasar por la atmósfera sufre cambios en su dirección. (Duffie, 2013).

Albedo. Es la radiación solar recibida sobre una superficie procedente del reflejo de superficies no especulares, por lo tanto no es direccionada.

Radiación Global. Es la suma de la radiación directa y la difusa sobre una superficie (Jutglar, 2004).

Irradiancia (W/m^2). Se refiere a la tasa de la energía radiante llega a una superficie por unidad de área cuadrada; se utiliza el símbolo **G** y se le denotan subíndices si es directa, difusa o global (Duffie, 2013).

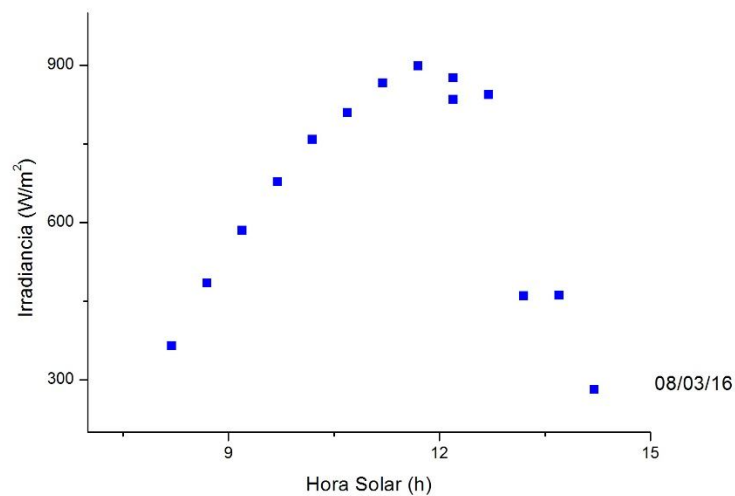


Figura.1.8 Irradiancia para un día soleado en Coyoacán, datos obtenidos de PEMBU (2016).

Irradiación (J/m^2). Es la energía radiante que incide en una superficie por unidad de área; se obtiene de la integración de la irradiancia respecto al tiempo Ec.1.9 (Duffie, 2013).

$$\int_0^t G dt = Irradiación [=] \frac{J}{m^2} \quad \text{Ec.1.9}$$

Insolación. Es un término que se aplica específicamente a la energía solar de irradiación, se utiliza el símbolo H cuando el tiempo está referido en días y cuando se trata de horas se utiliza el símbolo I (Duffie, 2013).

Hora Solar. Es el tiempo basado en el movimiento angular del sol a través del cielo con el medio día solar cuando el sol cruza el meridiano del observador, ver Ec.1.10 , por lo que la hora solar no coincide con la hora del reloj local, se utilizan dos correcciones, la primera es la diferencia entre la longitud del meridiano del observador y el meridiano local de acuerdo a la zona en la que se encuentre; la segunda diferencia es la ecuación del tiempo E, que tiene en cuenta las perturbaciones de la velocidad de rotación de la tierra (Duffie; Beckman, 2013) (Iqbal, 1983).

$$Hora\ Solar = Hora\ Local + 4 (L_{st} - L_{loc}) + E [=]min \quad Ec. 1.10$$

Donde L_{st} es el meridiano estándar en grados de la zona local en cuestión, L_{loc} es la longitud de locación en cuestión, el parámetro E se define como la ecuación del tiempo (Ec.1.11) en minutos.

$$E = 229.2 * (7.5 \times 10^{-5} + 0.001868 \cos \beta - 0.032077 \sin \beta - 0.014616 \cos 2\beta - 0.04089 \sin 2\beta) \quad Ec. 1.11$$

Donde:

$$\beta = (n - 1) \frac{360}{365} \quad Ec. 1.12$$

$n =$ número de día del año.

Radiación UV. La radiación ultravioleta proveniente del sol tiene una longitud de onda menor al espectro visible, está comprendida entre los 400 – 150 nm y mayor a la de los rayos X; existen tres tipos de radiación UV, se definen de acuerdo a un rango de longitud de onda (Amestoy, 2010). UVA se encuentra dentro de un rango de 320 a 400nm; UVB va de los 280 a 320 nm; UVC en cuanto su longitud de onda es inferior a los 280 nm.

En fotocatalisis heterogénea el dióxido de titanio se activa con la energía ultravioleta del tipo A, una longitud de onda inferior a los 400 nm. (Garcés, 2007).

Capítulo 2

Metodología.

2.1 Diseño y construcción del reactor tipo CPC de circulación termosifónica.

La primera parte desarrollada fue la construcción de un reactor fotocatalítico tipo CPC con una relación de concentración geométrica de 1.1 con base en las ecuaciones de R. Winston, Miñango y Benítez (2005). Como esta relación de concentración fue mayor que 1, se realizaron los cálculos necesarios para trazar la curva compuesta de una parábola y una involuta y poder conformar los espejos (Ver anexo 1), teniendo como resultado el perfil de la Fig.2.1.

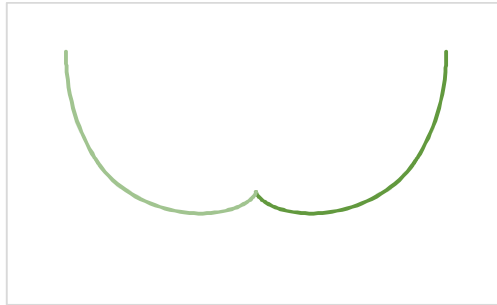


Figura.2.1 Curva del colector de parábola compuesta (CPC) para un radio de 1.25 cm.

Teniendo en cuenta que el reactor tuvo 5 tubos de vidrio tipo pirex (vidrio tipo borosilicato) y con ayuda de AutoCAD, se realizó el diseño de los soportes de los espejos como se muestra en la Figura 2.2.

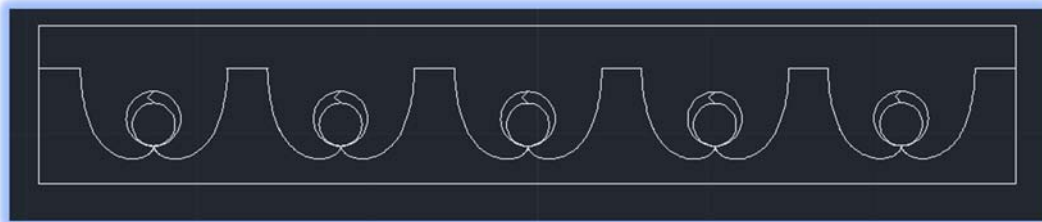


Figura.2.2 Diseño en CAD del soporte del extremo.

Se realizó el corte laser de dos soportes en triplay de 12 mm de espesor (Fig.2.3), en MiPlotter ubicado en la Facultad de Arquitectura de la UNAM, en Ciudad Universitaria.



Figura.2.3 Soporte en triplay de 12 mm.

Para los espejos, como primera idea se utilizó lámina reflejante de aluminio Alanod Miro Sun; se cortaron 5 perfiles de 90 cm x 19 cm en una cizalla; luego, con ayuda de una máquina roladora se le dio forma curva a los perfiles y se le realizaron 3 dobleces en una dobladora para obtener la forma deseada. Este proceso se realizó con apoyo desinteresado en las instalaciones de la empresa SMETING S.A. de C.V.



Figura.2.4 Perfil de lámina reflejante.

Teniendo los espejos y los soportes comenzó el ensamble del reactor en las instalaciones de la Planta Solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM.



Figura.2.5 Ensamble de espejos y soportes.

En este punto, resultó complicado el mantener la forma deseada de los perfiles para que los tubos entraran en su lugar, ya que la lámina del perfil se deformaba, haciéndose un arco en su parte central, luego los soportes de madera se rompieron y el sistema tuvo que modificarse. Por ello, se optó por cambiar de material del perfil, utilizando lámina de cobre calibre 16 a la que se le dió manualmente la forma de la curvatura. Al realizar el dobles central (inicio de la involuta) para ajustar esta pieza al perfil del colector CPC, la lámina se fracturó en esa parte (Fig. 2.6). Ante esto, se puede comentar que el cobre debe usarse en temple cero para una futura aplicación de esta tecnología.

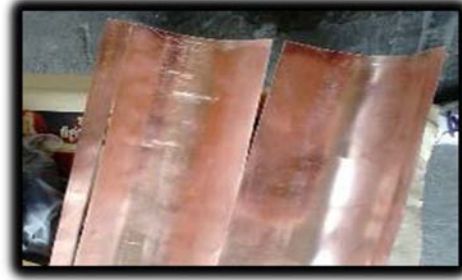
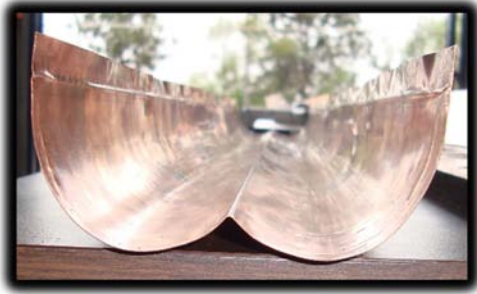


Figura.2.6 Perfiles de lámina de cobre.

Como tercera y última opción se utilizó lámina de acero inoxidable, el proceso para formar la curvatura y el ensamble de los espejos fue realizado nuevamente con el apoyo de SMETING S.A. de C.V. utilizando sus instalaciones y maquinaria (Fig. 2.7).



Figura.2.7 Ensamble de espejos y soportes.

En la planta solar, con ayuda del personal se cubrió la superficie de los espejos con una película reflejante de aluminio (Reflectech), con una solución jabonosa y una esponja para controlar la posición de la película y evitar rayar su superficie.

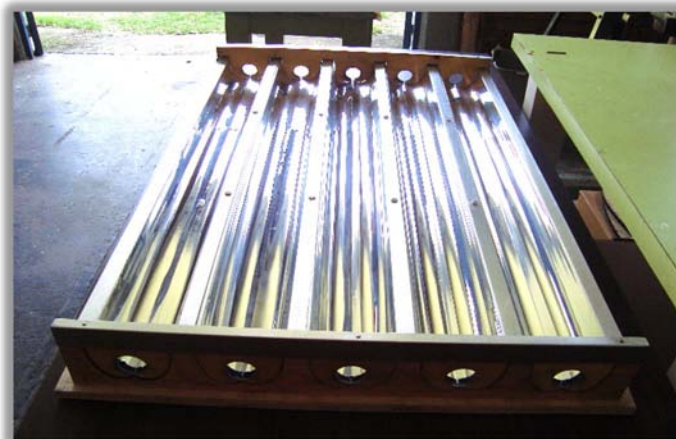


Figura.2.8 Superficie del reactor cubierta de película reflejante.

Se colocaron los 5 tubos pírex de diámetro de 1" en su lugar, se conectaron con tramos de tubería de PVC de 1", conexiones "T" y manguera con los cabezales de 1". Se colocaron dos soportes de madera en los laterales (Fig. 2.9) para fijar el reactor a una estructura de PTR con una inclinación de 20° de la planta solar.



Figura.2.9 Cabezales del reactor fotocatalítico.

Como el objetivo fue tener circulación del agua en el interior del reactor por el efecto termosifón, para evitar el uso de una bomba, se acondiciono una base para elevar un tanque por lo menos medio metro arriba del cabezal superior, con tubería de 3/4"; se realizaron las conexiones necesarias para conectar el tanque al reactor y se aisló la tubería y la manguera con poliuretano y cinta de ductos (Figura 2.10).

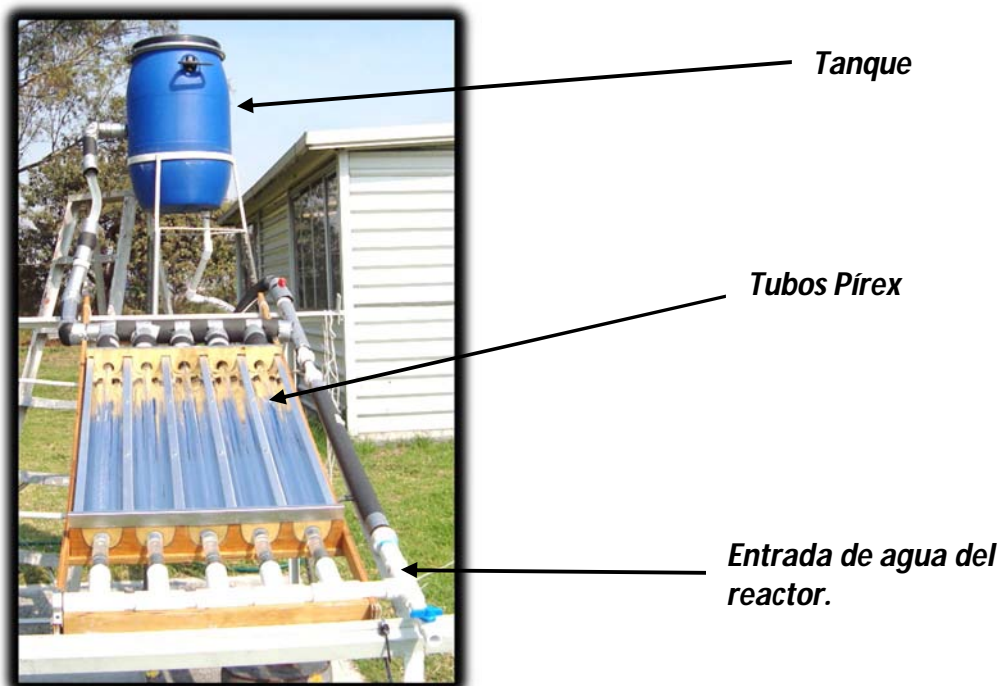


Figura.2.10 Reactor Fotocatalítico de circulación termosifónica.

Se agregó un pequeño calentador de agua solar (CAS), para ayudar a la circulación del agua entre el colector y el tanque. Se construyó utilizando cuatro tubos de cobre de 1/2" de diámetro nominal y accesorios de la misma dimensión y material, añadiendo unas aletas de lámina de cobre a cada tubo, con fibra de vidrio como aislante, aluminio para formar la coraza del calentador. Las dimensiones totales fueron de 39 cm x 44 cm, y un vidrio de 3 mm de espesor para cubrir la superficie plana del colector (Fig.2.11).



Figura.2.11 Calentador de Agua Solar (CAS).

Se determinaron dos posibles posiciones para ubicar el CAS y realizar pruebas, la primera posición fue a la salida del reactor (arriba) y la posterior fue antes de la entrada de los tubos del cabezal inferior (abajo).



Figura.2.12 Posiciones finales del CAS en el CPC termosifónico.

2.2 Diseño experimental.

2.2.1 Pruebas de circulación.

Se realizaron tres pruebas variando dos aspectos principales: el volumen y la posición del calentador solar, con tres repeticiones de cada prueba y con una duración de 4 horas cada una (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Pruebas de circulación termosifónica del reactor.

Volumen	Posición del calentador	
	CAS arriba	CAS abajo
40 L	a, b, c	a, b, c
25 L	a, b, c	a, b, c
16 L	a, b, c	a, b, c

La medición del caudal se realizó manualmente ya que se dificultó encontrar un medidor de flujo que percibiera caudales tan bajos como los esperados; así, se adaptó un sistema de inyección de colorante al colector, usando un colorante vegetal rojo y uno azul, para tomar la lectura de tiempo que éste tarda en recorrer una distancia de 20 cm.



Figura. 2.13 Sistema de inyección de colorante.

2. 2.2 Oxidación química de naproxeno sódico con persulfato de sodio e irradiancia solar.

Para probar el funcionamiento del reactor se trabajó con naproxeno sódico con una concentración de 10 mg/L como contaminante y persulfato de sodio con una concentración de 5×10^{-4} M como oxidante químico; se realizó con 3 repeticiones con un tiempo de reacción de 3 horas cada una. El contaminante se cuantificó en un espectrofotómetro (Shimadzu UV1800), a 230nm de longitud de onda. Se midió la irradiancia UVA solar en estas pruebas mediante un radiómetro portátil

2. 2.2.1 Equipo utilizado en la oxidación química.



Figura.2.17 Espectrofotómetro SHIMADZU UV-1800



Figura. 2.18 Radiómetro Lutron YK-350UV



Figura.2.19 Balanza analítica OHAUS precisión 0.1 mg

Capítulo 3

Resultados y
discusión.

3.1 Comportamiento del caudal en un reactor CPC de circulación termosifónica con CAS, en distintas posiciones haciendo circular tres volúmenes totales diferentes.

3.1.1 Posición 1 del calentador de agua solar (arriba, a la salida de los tubos del CPC).

En la primera serie de pruebas, la primera consistió en tres repeticiones con un volumen total de 40L de agua circulada termosifónicamente en el colector, con el calentador de agua ubicado a la salida del colector (Fig.2.12). Como ya se indicó, la medición del caudal se realizó manualmente, los datos arrojados de la prueba 1 permitieron realizar el cálculo del caudal a partir de la ecuación 3.1:

$$Q = v * A_s * 10^3 [=] \frac{L}{s} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde

Q es el caudal [=] L/s

V = distancia/ tiempo [=] m/s

As es el área donde pasa el fluido [=] m²

Con los datos obtenidos se realizó un gráfico del caudal respecto a la hora solar (ver anexo 2) para la pruebas 1a, 1b y 1c, resultados presentados en la Fig. 3.1; ahí se observa que, a pesar de ser las mismas condiciones en cuanto al volumen y la posición del calentador, hay pequeñas diferencias de los valores de caudales, ya que las pruebas se realizaron en diferentes días (un día por prueba); por lo tanto, la irradiancia solar fue distinta a lo largo de cada día. Por otro lado, la relación que tiene el comportamiento del caudal es que, con el paso del tiempo, llega a un máximo y comienza a descender en los minutos finales de cada prueba.

El rango máximo del caudal es de 0.018 – 0.028 L/s, son valores bajos si los comparamos con el de una bomba, pero el lograrlos es destacable ya que la circulación ocurre de una manera natural, sin emplear energía eléctrica, y con escaso aislamiento térmico en el sistema debido a que la sección fotoquímica demanda manejar temperatura baja; así, la inclinación, el gradiente de densidades con respecto a la altura y la energía solar bastaron para hacer circular agua en el CPC diseñado.

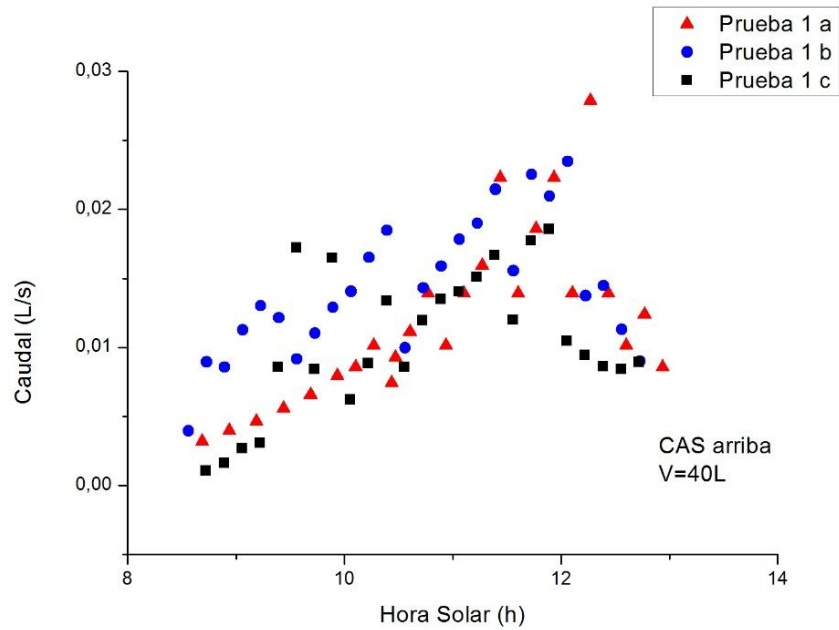


Figura.3.1 Caudal- Hora solar para 40L con CAS arriba.

La prueba 2 consistió de tres repeticiones con un volumen de 25L de agua y con el calentador de placa plana colocado también arriba del CPC. Se realizó el cálculo de caudales con la Ec. 3.1 para cada prueba y se graficó respecto a la hora solar obteniendo como resultado la Fig. 3.2, donde se observa que el comportamiento de la curva es similar a la prueba 1: ascendente hasta alcanzar un máximo, luego decreciente; el rango máximo de caudal aquí es de 0.014- 0.022 L/s.

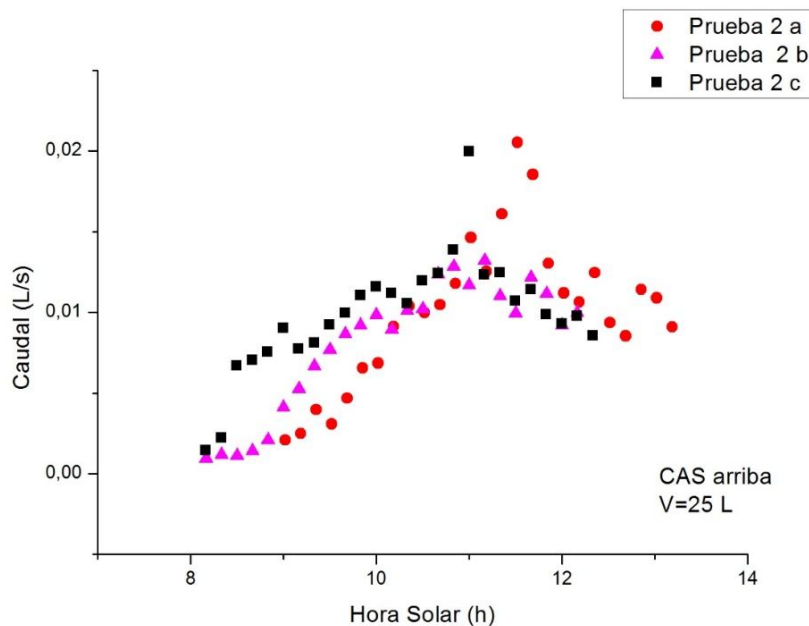


Figura.3.2 Caudal- Hora solar para 25 L con calentador solar arriba.

La prueba 3 consistió de tres repeticiones con un volumen de 16 L y con el calentador colocado arriba del CPC; realizando el cálculo de los caudales con la Ec. 3.1 se obtuvieron los datos de la Fig.3.3, donde se observa que el comportamiento es semejante con el de las dos pruebas anteriores. En cuanto el rango de caudal máximo, aquí fue menor que en las anteriores pruebas: de 0.012 a 0.016 L/s.

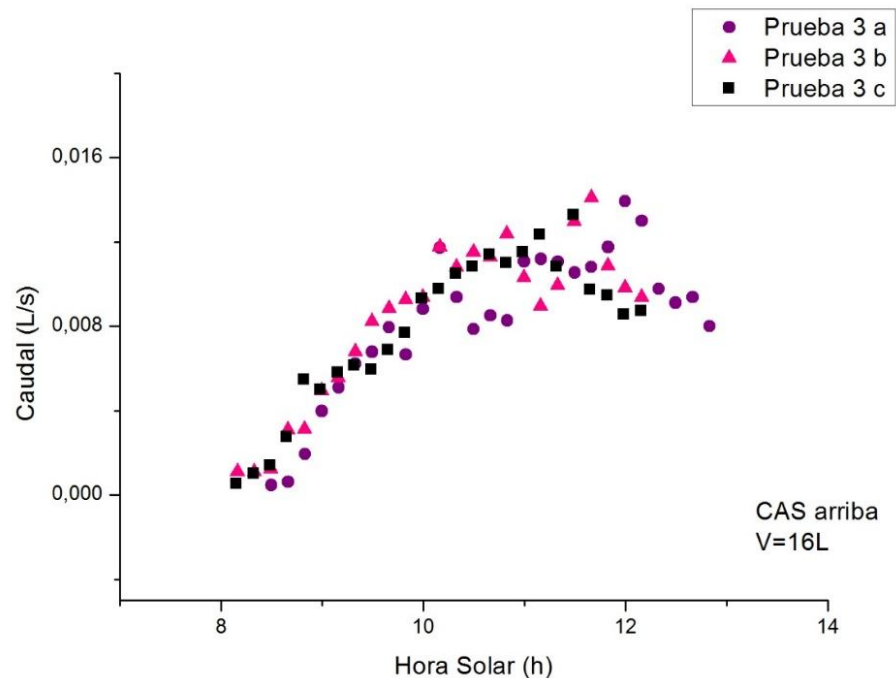


Figura.3.3 Caudal- Hora solar para 16 L con CAS arriba.

Observando el comportamiento del colector en cuanto a la circulación termosifónica del agua a lo largo de las pruebas, los resultados de los caudales se ven afectados por dos factores, el primero el clima, esto es, el qué tan soleado sea el día se ve reflejado en el resultado; por otro lado, el volumen total de agua en el sistema; haciendo una comparación entre estas primeras tres pruebas, se nota que con el volumen mayor se obtienen valores más altos en del caudal máximo, por lo que la relación caudal- volumen es, preliminarmente dicho, directamente proporcional y se espera que a volúmenes mayores los caudales sean más altos.

El inverso del tiempo de residencia está definido con la relación caudal y el volumen total del reactor, al ser el volumen constante y el caudal variable el tiempo de residencia será variable.

3.1.2 Posición 2 del calentador de agua solar (abajo, a la entrada de los tubos del CPC).

Para la segunda serie de pruebas, la prueba 1 (d, e, f) consistió en la circulación por efecto termosifón de un volumen total de 40 L de agua, colocando el CAS a la entrada de los tubos del colector en la parte más baja del sistema (Fig.2.12), para contrastar con la posición 1. De igual forma se midieron las velocidades y los datos necesarios de cada prueba para el cálculo de caudal con la Ec.3.1; con base en la información experimental obtenida se construyó la Fig.3.4, donde se observa que durante las primeras horas de la prueba los caudales se comportaron de forma ascendente respecto a la hora solar, llegando a un rango máximo de caudal y, posteriormente, a un descenso en los últimos minutos. El rango máximo que se aprecia en la Fig.3.4, siendo de 0.018-0.028 L/s.

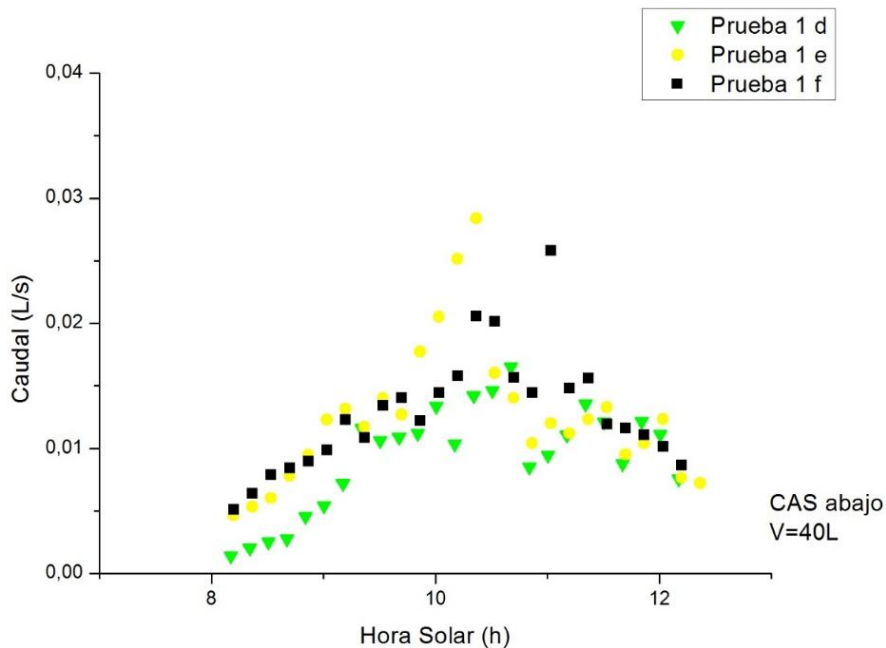


Figura.3.4 Caudal- hora solar para 40 L con CAS abajo.

La prueba 2 con sus 3 repeticiones (d, e, f), consistió en la circulación de 25 L de agua con la posición 2 del calentador de cobre; de los datos obtenidos se calcularon los caudales y, con ellos, se construyó la Figura 3.5, de la cual podemos establecer que el rango de caudal máximo para este arreglo es de 0.012-0.014 L/s. Este rango es ligeramente inferior que el de la prueba anterior. La posible explicación a esto es que el volumen global de agua es menor y hay con esto una menor diferencia de alturas entre el colector y el agua en el tanque.

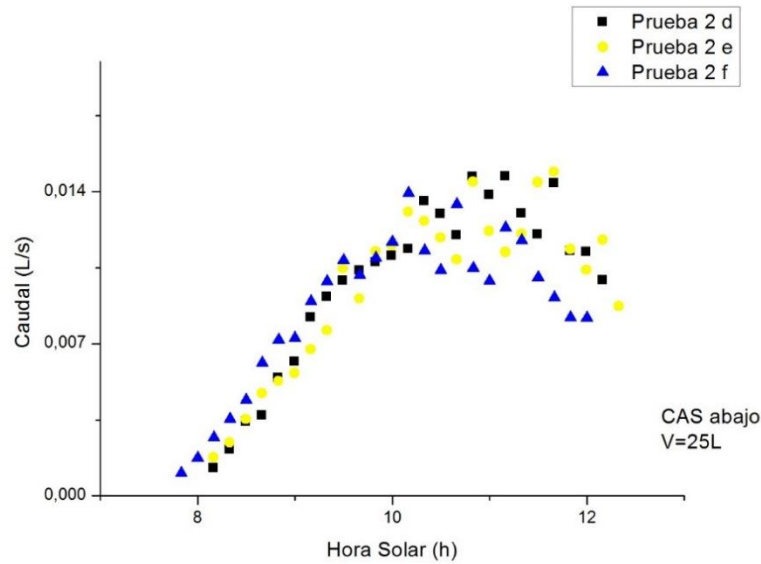


Figura.3.5 Caudal- Hora solar para 25 L con CAS abajo.

La prueba 3 (d, e, f) se realizó para un volumen de 16 L de agua circulada termosifónicamente y el reactor con el colector en la posición inferior; con los datos obtenidos se calculó el caudal y se graficó éste con respecto a la hora solar de cada día de prueba, resultando la Figura.3.6. De esta prueba podemos observar que el comportamiento de la curva es similar al resto de las pruebas y el rango máximo de caudales se encuentra en 0.012- 0.015 L/s, resultando muy similar a la prueba 2 (d, e, f).

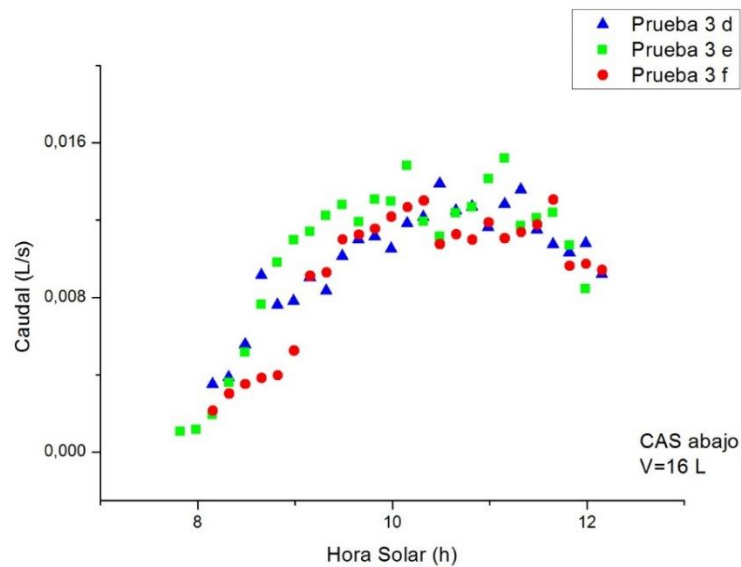


Figura.3.6 Caudal- hora solar para 16 L con CAS abajo.

Por otra parte, contrastando los caudales la posición del calentador respecto a no es relevante ya que los rangos máximos son muy similares en ambas posiciones.

3.2 Estudio de la circulación termosifónica de un CPC con un CAS en posiciones distintas y tres volúmenes diferentes respecto a la energía solar recibida.

Una vez analizado el comportamiento del caudal a lo largo de la prueba, en el software Origin Pro 8 se calculó la integral del caudal (L/s) respecto al tiempo de circulación en segundos (Ec.3.2), para obtener el volumen circulado(L) en cada prueba a las diferentes condiciones impuestas con anterioridad; los datos de energía global (W/m^2) medidos a lo largo de cada prueba en la Estación Meteorológica de CCH Sur (disponible de forma abierta en el sitio del Programa PEMBU de la UNAM en la web), se trataron de igual manera al realizar la integral de dichos datos respecto al tiempo de circulación (s) y así tener la energía recibida en (J/m^2) (Ec.3.3).

$$\int_{t_0}^t Q dt = V \text{ circulado [=]} L \quad \text{Ec.3.2}$$

$$\int_{t_0}^t E \text{ Global } dt = \text{Energía recibida [=]} \frac{J}{m^2} \quad \text{Ec.3.3}$$

Los datos de energía global (W/m^2) se obtuvieron de la estación meteorológica del CCH Sur de la UNAM, ya que se encuentra ésta es la estación de esa red más cercana a la Planta Solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en cuyas instalaciones se realizó el presente proyecto.

3.2.1 Posición 1 del calentador de agua solar (arriba), a la salida de los tubos del CPC.

Al calcular la integral del caudal respecto al tiempo y la integrar de la energía global con respecto al tiempo, se graficó la energía global recibida contra el volumen circulado, teniendo como resultado las Figuras 3.7, 3.8, 3.9 para la primer serie de pruebas, en las que el calentador de agua solar, CAS, se ubicó en la parte de arriba del sistema.

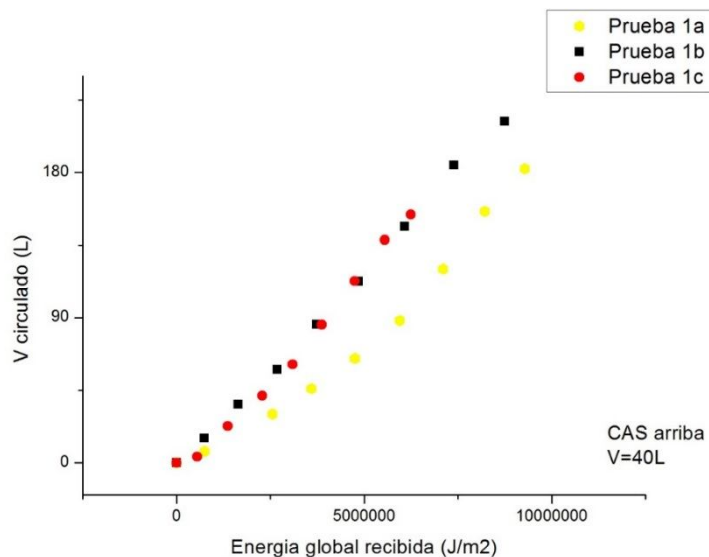


Figura.3.7 Energía global recibida vs volumen circulado para 40 L con el CAS arriba.

Se observa que el comportamiento de la curva es sigmoïdal por lo que se realizó el ajuste en Origin Pro 8 teniendo con resultado la tabla 3.1

Tabla 3.1 Ajuste sigmoïdal para la Prueba 1(a, b, c).

Prueba 1	R ²	A ₁	A ₂	X ₀	dx
a	0.99823	-35.48784	483.06369	1.05385E7	4.07132E6
b	0.99916	-88.56659	333.70771	5.15712E6	3.92676E6
c	0.99875	-28.27521	222.86039	4.24398E6	2.01987E6

En la figura 3.7 se observa que el volumen máximo circulado es de 190 L en la prueba 1 b, para la prueba 1 a tenemos un volumen máximo circulado de 180 y tenemos un volumen de 160 L para prueba 1 c. En los ajustes sigmoïdeos el valor de $r^2=0.99916$ más próximo a la unidad es el de la prueba 1 b como se observa en la tabla 3.1.

A continuación se muestra el gráfico obtenido de las repeticiones de la Prueba 2 (Fig.3.8); ahí observamos que la prueba 2 repetición b tiene un volumen máximo circulado superior a los 140 L, de igual forma la repetición c tiene el mismo volumen máximo con la diferencia de que la energía global recibida es menor que la prueba 2 b; por otro lado para el caso de la prueba 2 a, el volumen máximo circulado es de 110 L. En el ajuste según la tabla 3.2 la curva que más se ajusta es la de la prueba 2 c, con $r^2=0.99959$.

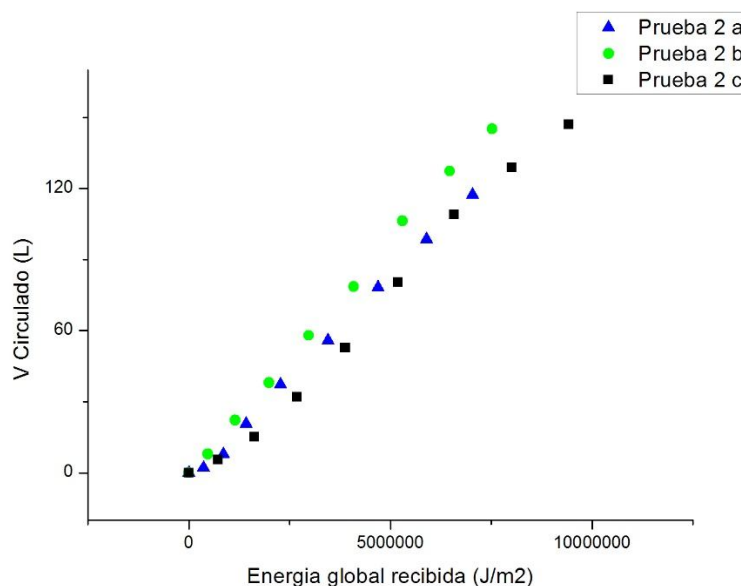


Figura.3.8 Energía global recibida vs volumen circulado para 25 L con el CAS arriba.

Tabla 3.2 Ajuste sigmoïdeo para la Prueba 2 (a, b, c).

Prueba 2	R ²	A ₁	A ₂	X ₀	dx
a	0.9976	-79.69945	193.90802	3.50653E6	3,77095E6
b	0.99944	-109.03988	243.85732	3.45172E6	4.29142E6
c	0.99959	-19.37794	168.38732	4.92474E6	2.24406E6

Para la pruebas 3 (Figura 3.9) se observa que el volumen máximo circulado para los tres casos es muy similar y ligeramente inferior a los 120 L, comparando el ajuste lineal (tabla 3.3), tenemos que la repetición c es la que presenta un valor de r² mayor, de 0.99954.

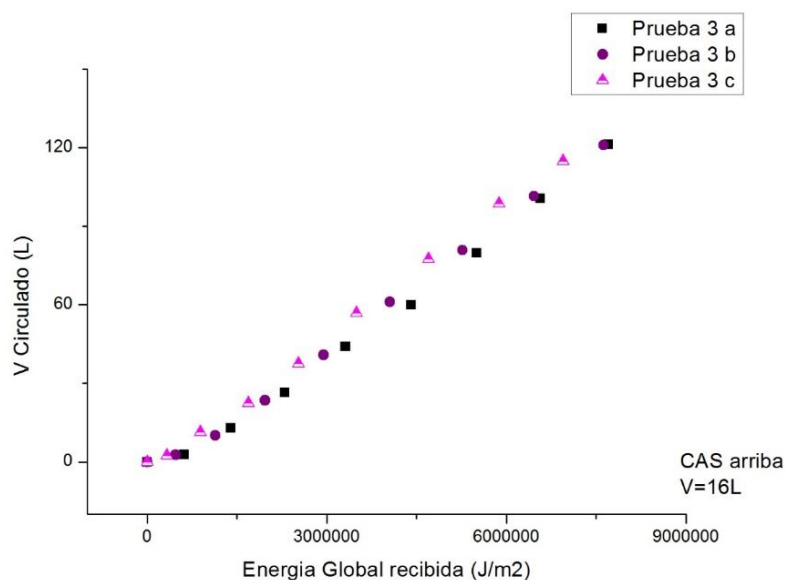


Figura.3.9 Energía global recibida vs volumen circulado para 16 L con el CAS arriba.

Tabla 3.3 Ajuste sigmoideo para la Prueba 3 (a, b, c).

Prueba 3	R ²	A ₁	A ₂	X ₀	dx
a	0.99852	-44.64058	227.16992	6.08568E6	3.63246E6
b	0.99865	-39.52864	174.89326	4.49636E6	2.9129E6
c	0.99954	-40.23155	161.99477	3.77991E6	3.66883E6

Comparando los tres casos resulta que el mayor volumen circulado, superior a los 180 L, se logró en la prueba 1 (a, b, c) en donde las condiciones son el CAS arriba y 40 L de agua en el tanque. Podemos decir a priori que hay diferencias entre cada prueba en cuanto al volumen circulado; la relación, con base en este análisis comparativo, es que entre menor fue el volumen total del prototipo, menor fue el volumen circulado entre el tanque y el reactor al final de la prueba.

3.2.2 Posición 2 del calentador de agua solar abajo, en la entrada de los tubos del CPC.

Se realizó el mismo proceso para obtener el gráfico de la energía global recibida contra el volumen circulado (Figuras 3.10, 3.11, 3.12) para la segunda serie de pruebas.

En la tabla 3.4 podemos ver que el mejor ajuste para las prueba 1 (d, e, f) es con un valor de $r^2=0.99941$ para la repetición f ; en cuanto al volumen máximo circulado en la Figura 3.10 vemos que para la prueba 1 (repeticiones e y f), el volumen circulado superó los 160 L; para el caso de la prueba 1 d, el volumen máximo circulado alcanzó los 120L al final de la prueba.

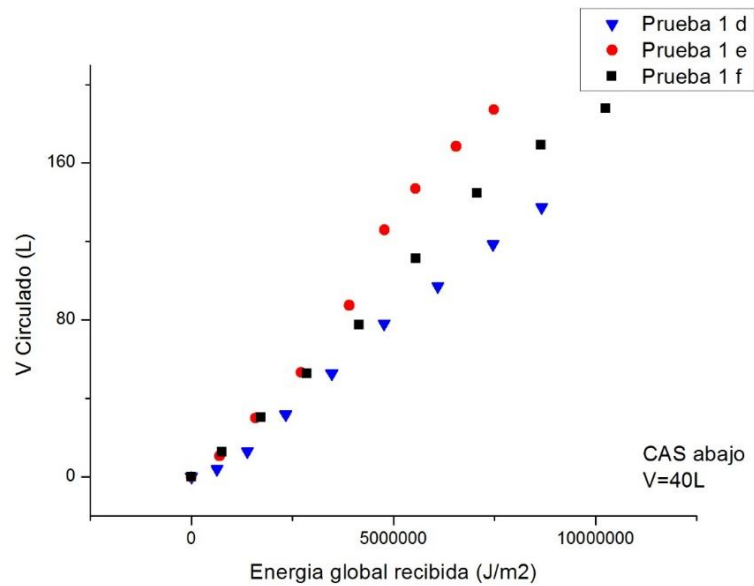


Figura.3.10 Energía global recibida vs volumen circulado para 40 L con el CAS abajo.

Tabla 3.4 Ajuste sigmoideo para la Prueba 1 (d, e, f).

Prueba 1	R ²	A ₁	A ₂	X ₀	dx
d	0.99708	-47.82439	178.14752	4.21506E7	3.04134E6
e	0.99737	-17.24214	214.3341	4.08756E6	1.69529E6
f	0.99941	-47.5817	221.24428	4.45326E6	2.95025E6

Posteriormente se muestran los resultados obtenidos de la prueba 2 repeticiones d, e y f, en la figura 3.11 se observa que el comportamiento de la curva es similar al de las demás pruebas, el volumen que se trabajó fue de 25 L con la posición 2 del CAS.

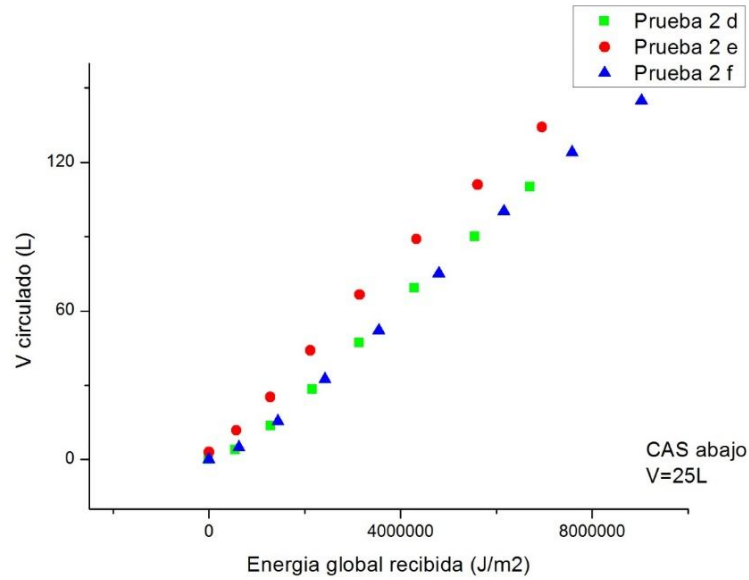


Figura.3.11 Energía global recibida vs volumen circulado para 25 L con el CAS abajo.

Tabla 3.5 Ajuste sigmoideo para la Prueba 2 (d, e, f).

Prueba 2	R ²	A ₁	A ₂	X ₀	dx
d	0.9988	-27.91209	147.226	3.816E6	2.23485E6
e	0.99903	-91.50825	196.20522	2.5308E6	3.46159E6
f	0.99958	-40.8295	189.98768	4.77822E6	3.02864E6

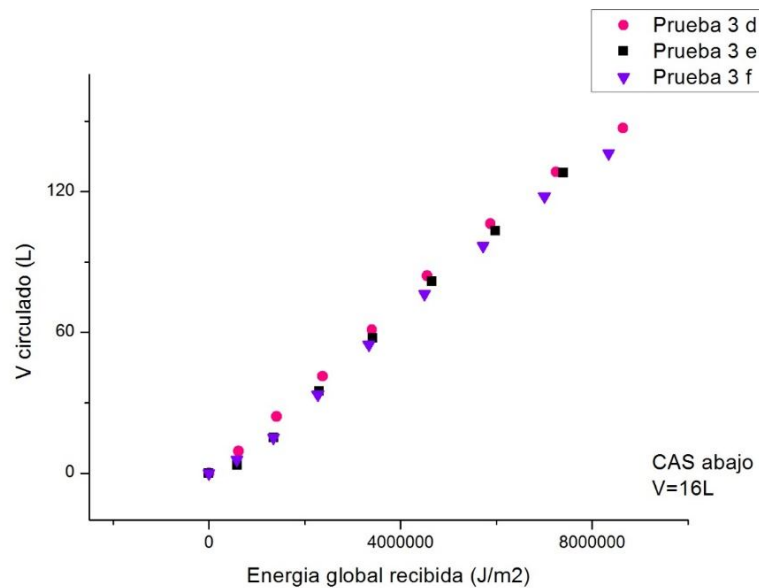


Figura.3.12 Energía global recibida vs volumen circulado para 16 L con el CAS abajo.

Tabla 3.6 Ajuste sigmoideo para la Prueba 3 (d, e, f).

Prueba 1	R ²	A ₁	A ₂	X ₀	dx
d	0.99989	-83.43573	200.70065	3.26259E7	3.6987E6
e	0.99716	-41.50136	168.29733	3.78935E6	2.56991E6
f	0.99882	-45.91247	173.12866	3.87955E6	2.8328E6

En la Fig.3.11 observamos que en el caso de la prueba 2 e y f el volumen máximo circulado es superior a los 120L y en caso de prueba 2 d alcanza a circular los 100 L, comparando el ajuste el valor más alto de r²= 0.99958 y corresponde a la prueba 2 f, según la tabla 3.5.

Para el caso de la tercer prueba (d, e, f) observando la Fig.3.12 podemos decir que para los tres casos el volumen máximo circulado es superior a los 130 L, y el mejor ajuste corresponde a la prueba 3 d con una r²=0.99989 según la tabla 3.6.

3.3 Condiciones óptimas del CPC de circulación termosifónica.

Teniendo los ajustes sigmoideos de cada prueba y la ecuación (Ec.3.4) para determinar las mejores condiciones del prototipo, considerando 100 L como el volumen máximo circulado que se puede alcanzar en todas las condiciones, se calculó las energía global recibida (J/m²) en todas las pruebas; se consideró el caso en donde se requiera menor energía para circular un volumen de 100 L de agua como la condición óptima con respecto a la posición del CAS (arriba o abajo) y el volumen (40, 25 ó 16L).

$$y = \frac{A_2 + (A_1 - A_2)}{\left(1 + e^{\left(\frac{X - X_0}{dx}\right)}\right)} \quad (\text{Ec.3.4})$$

Con los valores arrojados en las tablas (3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6) de los ajustes lineales utilizando la Ecuación 3.2 para un valor de Y = 100 L, obtuvimos el valor correspondiente a cada x (energía global recibida (J/m²)), resultando la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Energía recibida en J/m² para un volumen circulado de 100L.

Posición del CAS	CAS arriba			CAS abajo		
	40 L	25 L	16 L	40 L	25 L	16 L
Volumen total de agua						
Energía global recibida, J/m²	6.30709825E6	5.953763197E6	6.553198445E6	6.153691298E6	6.057801507E6	5.480745168E6
	4.314358671E6	5.055436838E6	6.308783814E6	4.130105508E6	4.913932187E6	5.661371783E6
	4.331095708E6	6.174921533E6	6.193166083E6	5.033333454E6	6.13483963E6	5.83637019E6

Haciendo una comparación con los datos de la Tabla 3.7 entre las posiciones del CAS, podemos decir que las menores energías requeridas para hacer circular un volumen máximo de 100L se encuentran cuando el calentador está ubicado abajo (antes de la entrada del CPC). En cuanto al volumen a elegir, para 40 L se requiere la menor dosis de energía para hacer circular los 100 L; por lo tanto la mejor condición para el reactor tipo CPC es trabajar con 40 L de agua y con el CAS ubicado en la parte de abajo.

3.4 Oxidación de naproxeno sódico con persulfato de sodio e irradiancia solar.

Para probar el funcionamiento fotoquímico del reactor fotocatalítico tipo CPC de circulación termosifónica, se decidió realizar una prueba en la que se estudió la destrucción de Naproxeno sódico con su exposición a la energía UVA del sol y al persulfato de sodio como oxidante químico, con el uso de la circulación termosifónica para circular el agua en tratamiento y .

En la tesis profesional de Sandra Pinto (FES Cuautitlán, 2015) las mejores condiciones que ella logró establecer para oxidar fotocatalíticamente este contaminante son un pH neutro, concentración de 10 mg/L de naproxeno sódico y 5×10^{-4} M de persulfato de sodio, midiendo la absorbancia a 230nm. En la presente prueba se trabajó con estas concentraciones de reactivos y contaminante, así como a la mejor configuración del reactor determinada en el actual estudio: 40 L de agua en el tanque con el calentador de agua solar (CAS) en la parte de debajo de todo el sistema. La absorbancia se determinó directamente en un espectrofotómetro UV-Vis Shimadzu UV1800. La irradiancia UVA se determinó *insitu* mediante un radiómetro portátil Lutrón YK35UV. El tiempo de reacción de las tres pruebas fue de 3 horas (1 prueba por día).

El tratamiento de los datos consistió en realizar una integral de la Energía global UVA (W/m^2) respecto al tiempo de reacción para obtener la Dosis de Energía UVA recibida (J/m^2) (Ec.3.5), esto con ayuda de Origin Pro8.

Para el estudio cinético con base en absorbancia se utilizó el cociente Abs/Abs_0 para saber el avance en la oxidación del contaminante.

$$\int_{t_0}^t G_{UVA} dt = E_{UVA} [=] \frac{J}{m^2} \quad \text{Ec.3.5}$$

Los datos arrojados de este proceso permitieron obtener la información mostrada en la Figura 3.13.

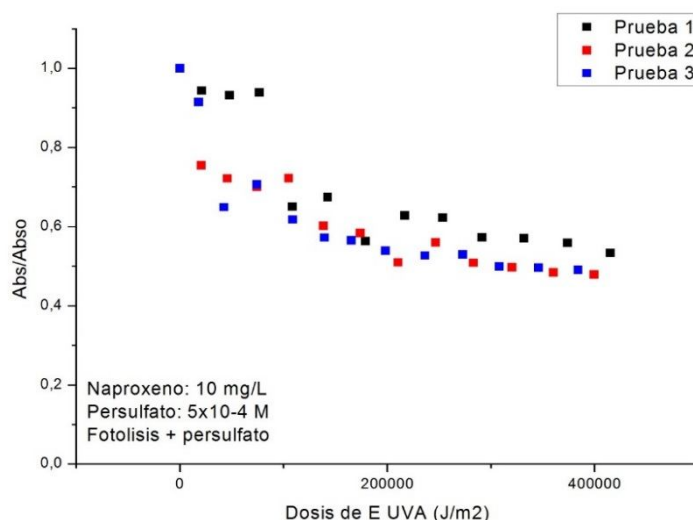


Figura. 3.13 Fotólisis de Naproxeno sódico con Persulfato de sodio.

Como se observa en la Fig.3.13 la eliminación del naproxeno para la prueba 1 fue de 53.28%, para la prueba 2 fue de 47.78% y para la prueba 3 del 49%, con lo que probamos que el reactor tienen un buen funcionamiento fotoquímico y éste se logró con circulación termosifónica (sin el uso de bomba).

3.5 Análisis estadístico de las condiciones del CPC (ANOVA).

3.5.1 ANOVA 1 energía recibida en J/m² para 100 L de volumen circulado.

Una de las variables que se analizó fue la energía solar recibida en J/m² para 100 L de volumen máximo circulado, se utilizaron los datos reportados en la tabla 3.7. Se realizó el análisis estadístico con ayuda del software Origin Pro8 utilizando tres métodos estadísticos.

En el análisis estadístico se analiza la energía recibida respecto a la posición del calentador de agua solar (fig. 2.12), en la tabla 3.11 se observan los resultados obtenidos de tres métodos estadísticos, Bonferroni, Turkey y Fisher, los cuales indican que no existe una diferencia significativa en cuanto a las posiciones del CAS, ya que el valor de significancia es igual a cero en por los tres métodos. El resultado expuesto en la tabla 3.11 indica que el rendimiento del calentador de agua solar es bueno y es indiferente la posición en la que se ubique, el funcionamiento es el mismo en ambas posiciones y no afecta la circulación termosifónica del CPC.

Por otro lado se analizó la energía solar recibida respecto al volumen total del CPC, como ya se mencionó se trabajaron tres volúmenes 40, 25 y 16L de agua, se utilizaron Bonferroni, Turkey y Fisher como métodos estadísticos; los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.12, de los cuales podemos decir que, para el Bonferroni test y el Turkey test, la comparación de la energía recibida

respecto a los tres volúmenes indica que no existe una diferencia estadística en utilizar dichos volúmenes, es decir, el funcionamiento del CPC en cuanto la circulación es eficiente tanto para un volumen menor y mayor. El análisis por el método de Fisher indica que entre los 40 y 25L y para 25 y 16L no existe una diferencia estadística representativa, pero para el volumen mayor y menor (40 y 16 L), el valor de significancia es igual a uno, lo que representa una diferencia estadística, indicando que el funcionamiento del CPC se ve influenciado por un volumen mayor, por lo tanto, se puede hacer circular un volumen superior a los 40L y tal vez la circulación sea mayor.

El ANOVA 1 indica que la posición del CAS es indiferente, ya que el funcionamiento es el mismo, en cuanto a los volúmenes que se trabajaron, la diferencia es mínima entre el volumen mayor y el menor, lo que indica, que se puede trabajar con volúmenes superiores a 40L en el CPC y la circulación se efectuará exitosamente, con un mayor volumen de agua tratada de forma fotoquímica.

De acuerdo con lo que se trabajó no se puede determinar en el rango de volúmenes totales estudiado alguna condición óptima en cuanto la posición del CAS y el volumen total del CPC; la circulación por termosifón se dio en todas las condiciones que se operó el reactor satisfactoriamente.

Tabla 3.11 Análisis estadístico en la posición del CAS.

Posición del CAS (arriba, abajo)						
Método estadístico	t value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
Bonferroni test	-0.57538	0.57566	0.05	0	-951830.24084	554134.14217
Turkey test	0.81371	0.57566	0.05	0	-951830.32877	554134.2301
Fisher test	-0.57538	0.57566	0.05	0	-951830.24084	554134.14217

Tabla 3.12 Análisis estadístico en el volumen total del CPC.

Volumen total del reactor							
Método estadístico		t value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
Bonferroni test	25L 40L	1.58334	0.41799	0.05	0	-506279.68422	1.84662E6
	16L 40L	2.26965	0.1274	0.05	0	-215789.48072	2.13711E6
	16L 25L	0.68631	1	0.05	0	-885958.04288	1.46694E6
Turkey test	25L 40L	2.23918	0.28985	0.05	0	-459034.35654	1.79937E6
	16L 40L	3.20977	0.09931	0.05	0	-168544.15304	2.08986E6
	16L 25L	0.97059	0.77573	0.05	0	-838712.7152	1.41969E6
Fisher test	25L 40L	1.58334	0.13933	0.05	0	-252042.51512	1.59238E6
	16L 40L	2.26965	0.04247	0.05	1	38447.68838	1.88287E6
	16L 25L	0.68631	0.50556	0.05	0	-631720.87379	1.2127E6

3.5.2 ANOVA 2 Reynolds máximo.

Otra de las variables que estudiamos con el ANOVA es el número de Reynolds máximo, el cual fue calculado con la ecuación 3.13 utilizando los datos obtenidos de cada prueba y considerando la velocidad máxima lograda; esto resultó en los datos de la tabla 3.13 con los que se realizó el análisis estadístico utilizando Origin Pro8.

$$Re = \frac{D v \rho}{\mu} \quad \text{Ec.3.13}$$

Donde: *Re* es el número adimensional de Reynolds

D es el diámetro por donde circula el fluido en m

V es la velocidad del flujo en m/s

ρ es la densidad del fluido en Kg/m³

μ es la viscosidad en kg/m² s

Tabla 3.13 Reynolds Máximo de cada prueba.

Posición	CAS arriba			CAS abajo			
	Volumen	40 L	25 L	16 L	40 L	25 L	16 L
Reynolds Máximo		1654.3806	1138.19339	755.98199	979.79308	927.43995	770.02455
		1426.6688	747.78953	856.7221	1540.07027	784.31539	923.25299
		1051.3846	1132.40529	753.13725	1391.8662	750.37943	793.8937

Como se observa en la tabla 3.13 el número de Reynolds máximo de cada prueba es laminar, analizando la posición del calentador solar para el número de Reynolds, según la tabla 3.14, no existe una diferencia estadística representativa en cuanto la posición del CAS por los tres métodos estadísticos utilizados, la circulación en el CPC no se ve afectada por este factor, además de que el funcionamiento del CPC es el mismo.

Tabla 3.14 Análisis estadístico en la posición del CAS.

Posición del CAS (arriba, abajo)						
Método estadístico	t value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
Bonferroni	-0.76292	0.46024	0.05	0	-280.89089	135.19579
Turkey	1.07894	0.46024	0.05	0	-280.89092	135.19581
Fisher	-0.76292	0.46024	0.05	0	-280.89089	135.19579

Tabla 3.15 Análisis estadístico en el volumen total del CPC.

<i>Volumen total del reactor</i>							
Método estadístico		t value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
Bonferroni test	25L 40L	-3.65364	0.00991	0.05	1	-752.31727	-102.22959
	16L 40L	-4.54796	0.00201	0.05	1	-856.90233	-206.81466
	16L 25L	-0.89431	1	0.05	0	-429.6289	220.45877
Turkey test	25L 40L	5.16703	0.00858	0.05	1	-739.26374	-115.28312
	16L 40L	6.43179	0.00179	0.05	1	-843.8488	-219.86819
	16L 25L	1.26475	0.65393	0.05	0	-416.57537	207.40524
Fisher test	25L 40L	-3.65364	0.0033	0.05	1	-682.07344	-172.47342
	16L 40L	-4.54796	6.6854E-4	0.05	1	-786.65851	-277.05848
	16L 25L	-0.89431	0.38874	0.05	0	-359.38508	150.21495

Por otra parte se analizó el número de Reynolds máximo respecto a los tres volúmenes empleados, en la tabla 3.15 se observan los resultados de los tres métodos estadísticos empleados Bonferroni, Turkey y Fisher, el análisis por estos tres métodos indica que no existe una diferencia significativa entre el volumen de 25L y el de 16L, ya que el valor de significancia es igual a cero; por otro lado la comparación entre el volumen de 25L y 40L el valor de significancia es igual a uno, lo que indica que existe una diferencia estadística representativa en trabajar con dichos volúmenes. De igual manera entre el volumen mayor y el menor (40 y 16 L), el valor de significancia es igual a uno, por lo que existe una diferencia representativa entre los volúmenes y se ve reflejado en la circulación termosifónica del reactor. Así, entre mayor sea el volumen total, la circulación se verá beneficiada y el número de Reynolds incrementa; tal vez, teniendo un volumen aun superior a los estudiados, el valor de Reynolds corresponda a un flujo turbulento.

Capítulo 4

Conclusiones.

CONCLUSIONES.

- Se logró la construcción y puesta en marcha del reactor fotocatalítico tipo CPC con circulación termosifónica.
- Con base a las temperaturas y los caudales obtenidos al operar el reactor se verifica que la geometría del colector es capaz de captar energía solar y transferirla al agua a tratar.
- La operación del sistema es amigable con el medio ambiente, al disminuir las emisiones del efecto invernadero.
- La circulación termosifónica de agua entre un tanque de almacenamiento y el reactor se logró de manera natural, gracias a la inclinación del colector, la elevación del tanque de almacenamiento y la única fuente de energía fue el sol.
- El calentador de agua solar ayudó a propiciar la circulación por el efecto termosifón, entre el tanque de almacenamiento y el CPC.
- No existe diferencia significativa, con base en un ANOVA, entre las dos posiciones del CAS con las que se trabajó; la eficiencia para la circulación es similar en ambos casos.
- Existe una mínima diferencia estadística entre el volumen menor (16L) y el volumen mayor (40L), lo que indica que se puede trabajar con volúmenes superiores a los 40L, lo que es benefactor al tratar un efluente.
- El flujo de agua fue laminar bajo todas las condiciones estudiadas, el número de Reynolds máximo logrado fue de 1654.38.
- Existe una diferencia estadística en el análisis del número de Reynolds respecto a los volúmenes de 25L-40L y 16L-40L, lo que indica que a mayor volumen incrementa la velocidad del caudal.
- El reactor tipo CPC funciona en procesos fotoquímicos, como en la oxidación química de naproxeno con irradiancia UV solar.
- La máxima degradación del naproxeno fue del 50% en un tiempo de 3 horas para 40 L de agua.

RECOMENDACIONES.

- En el sistema que se construyó se pueden tratar volúmenes superiores a los 40L.
- Realizar las pruebas en primavera, ya que se registraron irradiancias superiores a los 800 KW/m² y está comprobado que a mayor irradiancia la circulación del termosifón se beneficia.
- Checar las condiciones climáticas en sitios de datos meteorológicos serios de la web, para una mejor planeación del proyecto.
- Al realizar procesos fotoquímicos en el sistema, será necesario incrementar el número de Reynolds, para un mejor resultado.
- Para mejorar la circulación y lograr un flujo turbulento, será necesario añadir un calentador solar de mayor área de captación.
- Conseguir un medidor de flujo que se adapte a los caudales pequeños.

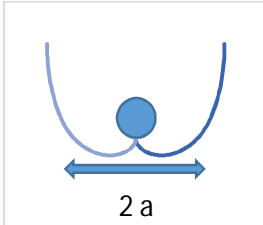
Anexos

Anexo I.

Ecuaciones de Winston, Miñango y Benítez (2005) para el cálculo de la curva compuesta Parábola-involuta.

Para una relación de concentración $RCg = 1.1$

$r = 1.25 \text{ cm}$ Radio de los tubos pírex.



La relación de concentración se define como:

$$RCg = \frac{A.p}{Arecp} \quad (1)$$

Donde

$$A.p = 2a (\text{longitud}) \quad \text{Área superficial de los espejos.} \quad (2)$$

$$Arecp = \pi (d \text{ ext}) (\text{longitud}) \quad \text{Área lateral del cilindro.} \quad (3)$$

Despejando $A.p$ de la ec1 tenemos:

$$A.p = (RCg)(Arecp) \quad (4)$$

Sustituyendo ec 2 y 3, en ec4 tenemos ec 5:

$$\text{Para } RCg = 1.1$$

$$2a(\text{long}) = 1.1 (\pi . d \text{ ext} . \text{long}) \quad (5)$$

Eliminando el término longitud resulta:

$$2a = 1.1(\pi . d \text{ ext}) \quad (6)$$

$$\text{Para } d \text{ ext} = 2.54 \text{ cm.}$$

$$2a = 1.1(\pi . 2.54 \text{ cm}) = 8.77 \text{ cm} \quad (7)$$

Para 5 tubos se tiene un área de superficie de $2a \times 5 = 43.89 \text{ cm}$.

Para obtener el valor del semi ángulo máximo de apertura del CPC θ_{max} a partir de la relación de concentración $RCg=1.1$ tenemos $\theta_{max}=65.38^\circ$

Involuta.

$$0 \leq \theta \leq \left[\left(\frac{\pi}{2} \right) + \frac{\theta_{max} \pi}{180} \right]$$

$$x = r(\text{sen}\theta - \theta \text{cos}\theta)$$

$$y = r(-\text{cos}\theta - \theta \text{sen}\theta)$$

$$\theta [=] \text{Rad}$$

Parábola.

$$\left[\left(\frac{\pi}{2} \right) + \frac{\theta_{max} \pi}{180} \right] \leq \theta \leq \left[\left(\frac{3\pi}{2} \right) - \frac{\theta_{max} \pi}{180} \right]$$

$$x = r \left[\text{sen}\theta - \left\{ \frac{\frac{\pi}{2} + \theta_{max_{rad}} + \theta - \text{cos}(\theta - \theta_{max_{rad}})}{1 + \text{sen}(\theta - \theta_{max_{rad}})} \right\} (\text{cos}\theta) \right]$$

$$y = r \left[-\text{cos}\theta - \left\{ \frac{\frac{\pi}{2} + \theta_{max_{rad}} + \theta - \text{cos}(\theta - \theta_{max_{rad}})}{1 + \text{sen}(\theta - \theta_{max_{rad}})} \right\} (\text{sen}\theta) \right]$$

Para $r=1.25 \text{ cm}$

$$\theta_{max} = 65.38^\circ = 1.14 \text{ rad}$$

<i>Involuta</i>		
Θ (Rad)	X	Y
0.00	0.000	-1.250
0.05	0.000	-1.252
0.10	0.000	-1.256
0.15	0.001	-1.264
0.20	0.003	-1.275
0.25	0.006	-1.288
0.30	0.011	-1.305
0.35	0.018	-1.324
0.40	0.026	-1.346
0.45	0.037	-1.370
0.50	0.051	-1.397
0.55	0.067	-1.425
0.60	0.087	-1.455
0.65	0.110	-1.487
0.70	0.136	-1.520
0.75	0.166	-1.554
0.80	0.200	-1.588
0.85	0.238	-1.623
0.90	0.280	-1.658
0.95	0.326	-1.693
1.00	0.376	-1.727
1.05	0.431	-1.760
1.10	0.490	-1.792
1.15	0.554	-1.823
1.20	0.622	-1.851
1.25	0.694	-1.877
1.30	0.770	-1.900
1.35	0.850	-1.920
1.40	0.934	-1.937
1.45	1.022	-1.950
1.50	1.114	-1.959
1.55	1.209	-1.963
1.60	1.308	-1.963
1.65	1.409	-1.957
1.70	1.513	-1.946
1.75	1.620	-1.930
1.80	1.729	-1.907
1.85	1.839	-1.878
1.90	1.951	-1.843
1.95	2.064	-1.802
2.00	2.177	-1.753

2.05	2.291	-1.698
2.10	2.404	-1.635
2.15	2.517	-1.565
2.20	2.629	-1.488
2.25	2.739	-1.403
2.30	2.848	-1.311
2.35	2.954	-1.212
2.40	3.057	-1.105
2.45	3.156	-0.990
2.50	3.252	-0.869
2.55	3.343	-0.740
2.60	3.429	-0.604
2.65	3.510	-0.462
2.70	3.585	-0.312
2.71	3.603	-0.276

<i>Parábola</i>		
Θ (Rad)	X	y
2.712	-3.603	-0.276
2.720	-3.614	-0.251
2.740	-3.642	-0.189
2.750	-3.656	-0.157
2.800	-3.723	0.003
2.850	-3.788	0.168
2.900	-3.850	0.339
2.950	-3.909	0.515
3.000	-3.965	0.697
3.050	-4.018	0.886
3.100	-4.068	1.082
3.150	-4.114	1.285
3.200	-4.156	1.495
3.250	-4.195	1.714
3.300	-4.229	1.941
3.350	-4.258	2.178
3.400	-4.282	2.425
3.450	-4.301	2.682
3.500	-4.315	2.951
3.520	-4.318	3.062
3.540	-4.320	3.175
3.560	-4.322	3.290
3.570	-4.322	3.348
3.571	-4.322	3.356

Anexo II

Hora Solar

Calculo de la hora solar para el día 08 de marzo de 2016.

Para el valor de beta tenemos:

$$n = 68$$

$$\beta = (n - 1) \frac{360}{365} = 1.15 \quad (1)$$

Sustituyendo la ecuación 1 en la ecuación 2 resulta:

$$E = 229.2 * (7.5 \times 10^{-5} + 0.001868 \cos \beta - 0.032077 \sin \beta - 0.014616 \cos 2\beta - 0.04089 \sin 2\beta) = -0.19 \quad (2)$$

Para la hora solar tenemos la ecuación 3.

$$\text{Hora Solar} = \text{Hora Local} + 4 (L_{st} - L_{loc}) + E [=] \text{min} \quad (3)$$

Con ayuda de Excel se realizó el cálculo de la hora solar que se presenta en la tabla 1.

hora(hh:mm)	hora local	hora solar(s)
9:00	9.00	8.20
9:10	9.17	8.37
9:20	9.33	8.54
9:30	9.50	8.70
9:40	9.67	8.87
9:50	9.83	9.04
10:00	10.00	9.20
10:10	10.17	9.37
10:20	10.33	9.54
10:30	10.50	9.70
10:40	10.67	9.87
10:50	10.83	10.04
11:00	11.00	10.20
11:10	11.17	10.37
11:20	11.33	10.54
11:30	11.50	10.70
11:40	11.67	10.87
11:50	11.83	11.04
12:00	12.00	11.20
12:10	12.17	11.37
12:20	12.33	11.54
12:30	12.50	11.70
12:40	12.67	11.87
12:50	12.83	12.04
13:00	13.00	12.20

Para Coyoacán, Ciudad de México.

$$L_{st} = \text{longitud estandar} = 90^\circ$$

$$L_{loc} = \text{longitud local} = 99,15^\circ$$

Anexo III

Análisis de varianza.

El trabajo de Tamayo en 2009 se define al análisis estadístico de varianza (ANOVA) como una técnica utilizada en el tratamiento de datos de diseños experimentales con el objetivo de contrastar varios grupos y variables para determinar si existe una diferencia significativa o no entre sí.

Este procedimiento permite dividir la varianza de la variable dependiente en dos o más componentes, cada uno puede ser atribuido a un factor identificable (variable independiente controlada por el analista).

El AVOVA de una vía es utilizado para experimentos en donde se controla una sola variable y como objetivo tiene comparar grupos o muestras que dependen de un solo factor. Por otro lado se encuentra el análisis de varianza de dos vías, en el cual varios grupos dependen de dos factores o variables independientes controladas por el investigador y se realiza una comparación entre las muestras arrojadas del experimento.

Según Kreyszig en el análisis de varianza de dos vías la suma de cuadrados se descompone en tres partes, donde dos corresponden a los dos factores que se investigan y el tercero a la variación aleatoria. En un arreglo experimental doble tenemos dos factores, A y B , de tal forma que A tiene r niveles (A_1, \dots, A_r) y B tiene p niveles (B_1, \dots, B_p); para estudiar el efecto de A y B sobre una variable aleatoria X tomamos una muestra $n=rp$, valores X_{ik} ($i=1, \dots, r; k=1, \dots, p$) podemos arreglar esta muestra en de forma rectangular que conste de r renglones y p columnas:

		p columnas			
		X_{11}	X_{12}	...	X_{1p}
		X_{21}	X_{22}	...	X_{2p}
	
		X_{r1}	X_{r2}	...	X_{rp}
r renglones					

A continuación se muestran ecuaciones para el cálculo de ANOVA en experimentos de dos factores.

$$g_i = \sum_{k=1}^p x_{ik} = \text{Suma de los valores del } i - \text{ésimo renglón}$$

$$h_k = \sum_{i=1}^r x_{ik} = \text{Suma de los valores del } k - \text{ésima columna}$$

$$g^- = g_1 + g_2 + \dots + g_r = \text{Suma total}$$

$$g = g^{-2} / n$$

$$u = \sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^p x_{ik}^2 = \text{suma de los cuadrados de todos los valores}$$

$$q = u - g$$

$$q_1 = \frac{1}{p} (g_1^2 + g_2^2 + \dots + g_r^2) - g$$

$$q_2 = \frac{1}{r} (h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_p^2) - g$$

$$q_3 = q - q_1 - q_2$$

Las pruebas post hoc se realizan para conocer relaciones específicas entre los grupos y los factores, existen diversas pruebas como Fisher, Bonferroni, Turkey, entre otras.

En el proyecto se analizó el efecto de la posición del CAS y el volumen total, respecto a la energía requerida para circular termosifónicamente 100 L de agua. Por lo que se tienen dos factores (posición del CAS y volumen total) y se realizó un ANOVA de dos vías con ayuda de Origin pro 8.0.

Anexo IV

Reactor fotocatalítico de tipo colector de parábola compuesta (CPC) con circulación termosifónica.



Planta Solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM.



REFERENCIAS.

1. A.G. David (2011) Thermosiphon heat-pipe evacuated tube solar water heaters for northern maritime climates. Elsevier. Solar energy, 86, 705-715.
2. Amestoy. J, (2010). El planeta tierra en peligro, calentamiento global, cambio climático, solución. España, Editorial club universitario.
3. Ayala. N, (2011). Propuesta para el tratamiento de medicamentos caducos que se acumulan en casa habitación. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
4. Becerril (2009). Contaminantes emergentes del agua, revista UNAM. Recuperado el día 2 de mayo de 2016 de: <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art54/int54-2.htm>
5. Benítez. F, Acero. J, Real. F, Roldan. G, Casas. F (2010). Comparison of different Chemical oxidation treatments for the removal of selected pharmaceuticals in water matrices. Chemical Engineering journal, Elsevier.
6. Blanco, J (2002) Desarrollo de colectores solares CPC para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes persistentes en agua, Colección de documentos Ciemat Plataforma solar de Almería, España.
7. Blanco, J. (2005) Argentina. Solar Safe Water. Cap. 17, El reactor fotocatalítico. 283. Recuperado el día 17 de julio de 2015 de:
https://www.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/17_Capitulo_17.pdf
8. Blanco, J, Malato. S, Estrada. C, Bandala. E, Gelover. S, Leal. T. (2005). Argentina. Cap 8. Purificación del agua por fotocatalisis heterogénea. Recuperado el día 03 de Agosto de 2015 de: <https://www.psa.es/webeng/solwater/files/CYTED01/08cap03.pdf>
9. Blanco, J, Malato. S, Peral. J, Sánchez. B, Cardona. A (2005) Argentina. Solar Safe Water. Cap. 11. Diseño de reactores para fotocatalisis evaluación comparativa de las distintas opciones. Recuperado el día 27 de Julio de 2015 de:
<https://www.psa.es/webeng/solwater/files/CYTED01/17cap11.pdf>
10. Bracamonte. J, Parada. J, Dimas. J, Baritt. M (2015). Effect of the collector angle on thermal efficiency and stratification of passive water in glass evacuated tube solar water heater. Venezuela, Applied energy, Elsevier.
11. Calderón, C (2009). Identificación y descripción de sistemas primarios para tratamiento de aguas residuales. México, CONAGUA. Recuperado el día 4 de mayo de 2016 de:
http://www.conagua.gob.mx/conagua07/noticias/sistemas_primarios.pdf
12. Calderón, C (2009). Identificación y descripción de sistemas secundarios para tratamiento de aguas residuales. México, CONAGUA. Recuperado el día 4 de mayo de 2016 de:
http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Sistemas_secundarios.pdf
13. Candal. R, Rodríguez. J, Colón. G, Gelover. S, Vigil. E, Jiménez. A, Blesa. M. (2005), Materiales para fotocatalisis y electrofotocatalisis, Argentina, Solar Safe Water.
14. CEDMA (2006). El agua en México, lo que todas y todos debemos saber. Recuperado el día 26 de abril de 2016 de: http://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2011/12/agua-mexico_001.pdf
15. CONAGUA (2012). Plantas de tratamiento de aguas residuales en México. Recuperado el día 3 de Mayo de 2016 de: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/usosdelagua31.html>

16. CONAGUA (2013). Estadísticas del agua en México, edición 2013. Recuperado el día 25 de abril de 2016 de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-2-14Web.pdf>
17. Chuawittayawuth. K. , Kumar. S. (2001). Experimental investigation of temperature and flow distribution in a thermosiphon solar water heating system. Elsevier. Renewable Energy 26. 431–448
18. Chipugsi, F. (2014) Ecuador. Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de energía producida por un colector solar. Recuperado el día 30 de junio de 2015 de: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8819/1/T-ESPEL-EMI-0262.pdf>
19. Crane (1987) Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, México. Mc Graw Hill Co.
20. Duffie. J, Beckman. W. (2013). Solar engineering thermal processes. 4ª. Edición, USA, Wiley.
21. Esconda. S (2011) Manual técnico de energía solar térmica. Recuperado el día 21 de julio de 2015 de:
http://www.salvadorescoda.com/tecnico/solar/Manual_Energia_Solar_4a_ed_Salvador_Escoda.pdf
22. Faurox. L, Jagër. M (2013). Diseño y análisis de colectores solares planos. Instituto del medio ambiente, Universidad Nacional de La Matanza. Buenos Aires Argentina. Recuperado el día 26 de septiembre de 2016 de:
http://www.edutecne.utn.edu.ar/coini_2013/trabajos/COA05_TC.pdf
23. Fernández, L (2012). Fotodegradación oxidativa del fenol con catalizadores TiO-C. Tesis de Doctorado. Universidad de Oviedo.
24. Garcés. L, Mejía. E, Santamaría. J (2007). La fotocatalisis como alternativa para tratamiento de aguas residuales. México. Revista lasallista de investigación vol1. Recuperado el día 12 de mayo de 2016 de: <http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/Vol1n1/083-92%20La%20fotocat%C3%A1lisis%20como%20alternativa%20para%20el%20tratamiento.pdf>
25. Garnica. J, Barral. J, Lucchini. J, Stoll. R. (2012). Colector de placa plana con absorbedor de perfiles de aluminio, diseño construcción, ensayos y aplicaciones prácticas. Argentina, Universidad del río cuarto.
26. Ghauch. A, Tuqan. A, Kibbi. N. (2012). Ibuprofen removal by heated persulfate in aqueous solution: A kinetics study. Chemical Engineering journal, Elsevier.
27. Ghauch. A, Tuqan. A, Kibbi. N. (2015). Naproxen abatement by thermally activated persulfate in aqueous. Chemical Engineering journal, Elsevier.
28. Gil.M, Soto. A, Usma. J, Gutierrez. O. (012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. Recuperado el día 02 de Mayo de 2016 de:
<http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>
29. Greenpeace, México (2006). Calentadores solares energía para tu hogar. Campaña de energía cambio climático. Recuperado el día 26 de septiembre de 2016 de:
<http://ecotec.unam.mx/Ecotec//wp-content/uploads/calentadores-solares-energ-a.pdf>
30. Herrmann. J.M (2005) Argentina. Solar safe water. Cap. 10, Destrucción de contaminantes orgánicos por fotocatalisis heterogénea. Recuperado el día 23 de Julio de 2015 de:
https://www.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/10_Capitulo_10.pdf

31. Herrmann. J. M. (2010). Fundamentals and misconceptions in photocatalysis. France. Elsevier. Journal of photochemistry and photobiology A Chemistry 216.
32. INEGI (2015). Población. Recuperado el día 10 de Mayo de 2016 de:
<http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P>
33. Iqbal. M (1985) An introduction to solar radiation. Elsevier.
34. Jiménez, B (2001). La contaminación ambiental en México. México, Limusa.
35. Jutglar. L. (2014). Energía solar. CEAC, España. Recuperado el día 5 de Mayo de 2016 de:
https://books.google.com.mx/books?id=30etGjzPXyWC&printsec=frontcover&source=gb_s_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
36. Kern. D (2006) Procesos de transferencia de calor, México, Compañía editorial continental.
37. Koffi. P, Andoh. H, Gbaha. P, Touré. S, Ado. G (2008). Theoretical and experimental study of solar water heater with internal exchanger using thermosiphon system. Energy conversion and management 49, Elsevier.
38. Kreyszig. E. (1978) Introducción a la estadística matemática, principios y métodos. Editorial Limusa, México.
39. Lloyd. C, Kerr. A (2008). Performance of commercially available solar and heat pump water heaters, Energy policy, Science direct, University of Otago, Nueva Zelanda.
40. Malato. S, Blanco. J, Vidal. A, Richter. C. (2002) Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale. Elsevier. Applied Catalysis B: Environmental 37, 1–15.
41. Marotta. R, Spasiano. D, Di Somna. I, Adreozzi. R (2012). Photodegradation of naproxen and its photoproducts in aqueous solution at 254nm: A kinetic investigation. Water se search. Science direct.
42. Metcalf & Eddie, Inc. (2002). Wastewater engineering treatment and reuse. España, 4a Edición, Mc Graw Hill Book Co.
43. Morales. J (2014). Uso de colectores solares para la remoción fotocatalítica de disruptores endócrinos presentes en agua contaminada. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
44. Pinto, S (2015). Eliminación de naproxeno en agua mediante fotocatalisis heterogénea. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
45. Placco. C, Saravia. L, Cadena. C (2009). Colectores solares para agua caliente, INENCO, CONICET, Argentina. Recuperado el día 26 de septiembre de 2016 de:
http://www.inti.gob.ar/e-renova/pdf/colectores_solares_aguacaliente.pdf
46. RAE (2015). Definiciones. Recuperado el día 29 de abril de 2016 de:
<http://dle.rae.es/?id=AU1m1dd>
47. Ramalho. R, Jiménez. D, Lora. F (1990) Tratamiento de aguas residuales, España. Reverté.
48. Reséndiz. R (2012). Diseño de un sistema de captación y purificación de agua de lluvia mediante fotocatalisis solar. Tesis maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
49. Romero. M (2009). Energía solar térmica, España, CEAC. Recuperado el día 12 de Mayo de 2016 de:
https://books.google.com.mx/books?id=K6Z_xtq9J0cC&printsec=frontcover&dq=energia+solar&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjs_MX-rrDMAhUmnIMKHxzBGEQ6AEIQTAD#v=onepage&q&f=false

50. Salgado, I (2007). Diseño de colectores solares parabólico compuesto para estudios de fotocatalisis heterogénea. Tesis maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
51. Salgado, I (2011). Diseño, construcción y puesta en marcha de una planta solar de degradación fotocatalítica de aguas contaminadas. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
52. SEMARNAT (2011). Agua. Recuperado el día 28 de abril de 2016 de:
http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/05_serie/yelmedioambiente/4_agua_v08.pdf
53. SEMARNAT (2012). Agua. Recuperado el día 27 de abril de 2016 de:
http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap6_agua.pdf
54. Silva, V (2008). Evaluación de contaminantes emergentes en fusentes de abastecimiento en Tula. Tesis maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
55. Spaciano. D, Marrotta. R, Malato.S, Fernández.P, Di Somna.I. (2015). Solar photocatalysis: Materials, reactors, some commercial, and pre-industrialized applications. Elsevier. Applied Catalysis B: Environmental 170-171.
56. Sopyan. A, Watanabe. M, Murasawa. S, Hashimoto. K, Fujishima. A (1996). An efficient TiO₂ thin-film photocatalyst: photocatalytic properties in gas-phase acetaldehyde degradation. Elsevier. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 79-86.
57. Tamayo, I. (2000) Análisis de varianza con SPSS 8.0. Universidad de Granada. España. Recuperado el día 23 de septiembre de 2016 de:
http://www.ugr.es/%7Eimartin/TEMA5_ANOVA.pdf
58. Vargas. Y, Obaya. A (2005). Cálculo de parámetros de rapidez en cinética química y enzimática. UNAM, México.
59. Winston. R, Miñano. J, Benítez. P, Shatz. N, Bortz. J (2005). Nonimaging optics. USA, Elsevier Academic Press.