



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería
campus Zacatecas**

***“CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR CILÍNDRICO
PARABÓLICO (CCP) PARA EL APROVECHAMIENTO
DE LA ENERGÍA SOLAR EN LA
FOTODEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES
EMERGENTES”***

**Avances del informe final de Investigación de la Unidad de
Aprendizaje de Estancia de Titulación**

Proyecto de investigación

Nombre del (los) Alumno(s):

Jesús Joaquín Chacón Aguilar

Asesor del proyecto:

Dr. en C. Luis Mario González Rodríguez

Revisores del proyecto:

Dr. en C. Horacio Incháurregui Méndez

M. en C. Rosendo del Rio Murillo

Folio
UPIIZ/ESA/277/2022

2022 Año de Ricardo Flores Magón
100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
50 Aniversario de la UPIICSA
50 Aniversario del CECyT 10 "Carlos Vallejo Márquez"
25 Aniversario del CIEGAS, CIITEC y del CIIDIR, Unidad Sinaloa

Asunto
DESIGNACIÓN DE ASESORES

Zacatecas, Zac., a 24 de agosto de 2022

C. JESÚS JOAQUÍN CHACÓN AGUILAR
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOLETA: 201767021198
GENERACIÓN: 2016-2021
PRESENTE

Mediante el presente se hace de su conocimiento que este Departamento acepta que el **Dr. en C. Luis Mario González Rodríguez** sea **Asesor**, en el tema que propone usted a desarrollar como prueba escrita de la opción de titulación Curricular, con el título y contenido siguiente:

"Construcción de un reactor cilíndrico parabólico (CCP) para el aprovechamiento de la energía solar en la fotodegradación de contaminantes emergentes".

Se concede un plazo de máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el jurado asignado.



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
DE INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS
DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN
SIGUIIMIENTO ACADÉMICO

L.C. María Monserrat Saldaña Noriega
Jefa del Departamento de Evaluación
y Seguimiento Académico

ATENTAMENTE
"La Técnica al Servicio de la Patria"



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
DE INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS

DR. Fernando Flores Mejía
Director de la UPIIZ



Folio

UPIIZ/ESA/283/2022

2022, Año de Ricardo Flores Magón

100 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

50 Aniversario de la UPIICSA

50 Aniversario del CECyT 10 "Carlos Vallejo Márquez"

25 Aniversario del CIECAS, CIITEC y del CIIDIR, Unidad Sinaloa

Asunto

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

C. JESÚS JOAQUÍN CHACÓN AGUILAR

INGENIERÍA AMBIENTAL

BOLETA: 201767021198

GENERACIÓN: 2016-2021

PRESENTE

Zacatecas, Zac., a 25 de agosto de 2022

El suscrito tengo el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el trabajo de titulación que presenta con fines de titulación denominada:

"Construcción de un reactor cilíndrico parabólico (CCP) para el aprovechamiento de la energía solar en la fotodegradación de contaminantes emergentes".

Se determinó que el citado **Trabajo de Titulación**, reúne los requisitos para **autorizar** la impresión y proceder a la presentación del Examen Profesional debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se hicieron.

DR. EN C. LUIS MARIO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ



Autorización de uso de obra
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Presente

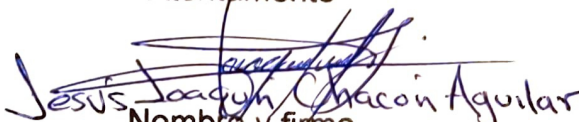
Bajo protesta de decir verdad el que suscribe Jesús Joaquín Chacón Aguilar, estudiante del programa académico de Ingeniería Ambiental, con número de boleta 2017670211, adscrito a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas; manifiesto ser autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO (CCP) PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR EN LA FOTODEGRADACIÓN DE CONTAMINATES EMERGENTES, en adelante "El Trabajo de Titulación" y de la cual se adjunta copia para efecto de consulta bibliográfica en investigaciones donde se realicen experimentos de fotocatalisis con aprovechamiento de energía solar, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor, se prohíbe el uso y/o explotación de "El Trabajo de Titulación" en las formas y medios descritos en el fundamento legal citado, en virtud de que cualquier utilización por una persona física o moral distinta del autor puede afectar o violar derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros distintos al autor de "El Trabajo de Titulación".

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "El Trabajo de Titulación".

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "El Trabajo de Titulación", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene a ninguna otra otorgada por el suscrito respecto de "El Trabajo de Titulación", por lo que deslindo de toda responsabilidad a "El IPN" en caso de que el contenido de "El Trabajo de Titulación" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Zacatecas, Zac., a 05 de septiembre del 2022.

Atentamente


Nombre y firma

Índice general

Índice general	2
i. Resumen	6
ii. Abstract	7
iii. Simbología y/o nomenclatura	7
1. Introducción	9
2. Revisión de la literatura	10
2.1 Contaminantes emergentes en el agua y fuentes de generación	10
2.2 Degradación de contaminantes emergentes en el agua por FHS.	11
2.3 Los reactores solares fotocatalíticos	13
2.4 Tipos de reactores de acuerdo a la clasificación de con concentración o sin concentración solar.	13
2.5 Características del reactor CCP-1 eje a construir incluyendo ventajas y desventajas.	16
2.6 Efectos a considerar para la construcción del reactor CCP	17
2.6.1 Efecto de la concentración del catalizador	17
2.6.2 Efecto del pH	17
2.6.3 Efecto de la temperatura	18
2.6.4 Efecto del oxígeno disuelto	18
2.6.5 Efecto de la adición de especies oxidantes	18
2.6.6 Efecto del flujo másico	19
2.6.7 Efecto del diámetro del tubo absorbedor	20
2.7 Materiales para la construcción del reactor CCP	20
2.8 Catalizador a emplear	22
2.9 El colorante naranja de metilo	22
3. Justificación	23
4. Hipótesis	24
5. Objetivos	24
5.1 Objetivo general	24
5.2 Objetivos específicos	24

6. Metodología	25
6.1 Diseño y materiales del reactor cilíndrico parabólico	25
6.2 Construcción del reactor cilíndrico parabólico	26
6.3 Preparación de soluciones	27
6.4 Medición de la radiación	27
6.6 Operación del reactor	28
6.7 Evaluación del flujo para encontrar las condiciones óptimas de operación del Reactor CCP y obtención del volumen iluminado y del área de captación.	29
6.8 Evaluación de la degradación del contaminante modelo mediante espectrofotometría	30
7. Resultados y discusión de resultados	30
7.1 Diseño, materiales, construcción y puesta en marcha del reactor cilíndrico parabólico.	30
7.2 Medición de la radiación	35
7.3 Operación del reactor	35
7.4 Efecto del flujo de operación en la degradación del contaminante modelo haciendo hincapié en la radiación UV acumulada.	36
8. Conclusiones	41
9. Recomendaciones o Prospectivas	43
10. Literatura citada	43
11. Anexos	47

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama teórico del CCP (Blanco J., y otros, 1999).	17
Figura 2. Variación de la degradación fotocatalítica de 25 mg/l de colorante en función del número de Reynolds (Re).	19
Figura 3. Estructura molecular del NM.	23
Figura 4. Parábola con vértice en el origen.	33
Figura 5. Boceto del reactor CCP a construir (elaboración propia: AutoCAD).	33
Figura 6. Puesta en marcha del reactor CCP.	34
Figura 7. Conexión del sensor al microcontrolador.	35

Figura 8. Degradación del NM operando el reactor CCP en un ángulo de 22° respecto a la horizontal y a un flujo de 6 L/min.	37
Figura 9. Degradación del NM operando el reactor CCP en un ángulo de 22° respecto a la horizontal y a un flujo de 9 L/min.	38
Figura 10. Degradación del NM operando el reactor CCP en un ángulo de 22° respecto a la horizontal y a un flujo de 14 L/min.	38
Figura 11. Degradación fotocatalítica del NM (C/Co) en función del tiempo de exposición a la radiación utilizando el reactor CCP.	39
Figura 12. Comparación de los distintos flujos de operación en el proceso de degradación fotocatalítica del NM operando el reactor a 22° respecto a la horizontal.	40
Figura 13. Comparación de la velocidad de degradación para cada uno de los flujos en el proceso fotocatalítico del NM, operando el reactor a 22° respecto a la horizontal.	41
Figura 14. Corte de la lámina de acero 430 calibre 22 para la construcción del marco y la superficie reflectora.	48
Figura 15. Reactor CCP, arreglo de 6 parábolas.	48
Figura 16. Boceto de la superficie reflectante (parábola y eje focal).	49
Figura 17. Preparación de soluciones de NM a 20 ppm.	49
Figura 18. Puesta en marcha del reactor CCP.	50
Figura 19. Cálculo para obtener el volumen iluminado dentro del reactor.	50
Figura 20. Cálculo para obtener el área de captación.	51
Figura 21. Código utilizado para medir la radiación solar y su posterior acumulación.	52

Índice de tablas

Tabla 1. Reactores fotocatalíticos que operan con radiación solar como fuente de excitación (Blanco Gálvez, El reactor solar fotocatalítico, 2005).	15
Tabla 2. Materiales a emplear para la construcción de un CCP.	25
Tabla 3. Parámetros operacionales del reactor fotocatalítico.	28
Tabla 4. Radiaciones solares UV promedios en cada experimento.	36
Tabla 5. Radiaciones solares UV promedios en cada experimento obtenido en el Valle de Aburrá (Granda, Marín, Ríos, & Restrepo, 2007).	36

i. Resumen

En México, la cantidad de contaminantes persistentes a los métodos convencionales de tratamiento van en aumento, esto ha obligado a desarrollar nuevas técnicas de tratamiento para combatir el problema creciente de la contaminación del agua (Salgado Tránsito, 2011). Una de las alternativas más novedosas para el tratamiento de la contaminación del agua son los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) los cuales consisten en la producción de especies de alto poder oxidante los cuales son capaces de degradar la materia orgánica. Durante este proyecto se presentará el desarrollo, diseño, fabricación y puesta en marcha de un CCP para el aprovechamiento de la radiación solar en la fotodegradación de contaminantes emergentes por fotocátalisis heterogénea solar mediada con TiO_2 (Degussa P25).

Dicho reactor CCP se construyó a escala piloto cuya área irradiada es de 0.69 m^2 y cuyo volumen iluminado del reactor es equivalente a 3.42L; así mismo está integrado por seis colectores solares de acero inoxidable calibre 22 con acabado espejo y seis tubos absorbedores de cuarzo de 93 cm de longitud; finalmente las dimensiones del reactor sin contar la estructura que soporta al mismo son de 120 x 80 x 8.5cm.

Con el propósito de evaluar el desempeño del reactor CCP, se realizó el proceso de degradación fotocatalítica heterogénea solar (FHS) mediada con $\text{TiO}_2 \text{ P}_{25}$ para lo cual se utilizó el naranja de metilo (NM) como contaminante modelo a una concentración de 20 ppm y para medir la degradación de éste se utilizó un espectrofotómetro a 465 nm; el reactor se operó en un horario de 9:00 am a 15:00 pm a 22° respecto a la horizontal con orientación al Sur.

Finalmente, para enriquecer aún más el proyecto, se llevó a cabo un estudio de la degradación por medio del cual se analizó el comportamiento de la velocidad de degradación del NM a flujos de 6, 9 y 14 L/min en función del tiempo de exposición y la radiación solar acumulada; obteniendo como resultado que en cuanto al tiempo de degradación valores de 6, 9 y 14 L/min degradan 98, 94 y 88% del contaminante modelo en 4, 5 y 5.3 h respectivamente. Mientras que, desde el punto de vista energético, el comportamiento de la tendencia es igual en cada uno de los flujos utilizados destacando que para un flujo de 6, 9 y 14 L/min se necesita una radiación acumulada de 672.15, 890.12 y 969.10 KJ/m^2 para degradar el NM en un 98, 94 y 88 % respectivamente.

ii. Palabras clave: *Naranja de metilo (NM), fotocátalisis heterogénea solar (FHS), radiación acumulada.*

iii. Abstract

In Mexico, the amount of persistent pollutants to conventional treatment methods is increasing, this has forced the development of new treatment techniques to combat the growing problem of water pollution (Salgado Tránsito, 2011). One of the most innovative alternatives for the treatment of water pollution are the Advanced Oxidation Processes (POA) which consist of the production of species with high oxidizing power which are capable of degrading organic matter. During this project, the development, design, manufacture and commissioning of a CCP will be presented for the use of solar radiation in the photodegradation of emerging pollutants by heterogeneous photocatalysis mediated with TiO_2 (Degussa P25).

The CCP reactor was built on a pilot scale, whose irradiated area is 0.69 m^2 and whose illuminated volume of the reactor is equivalent to 3.42 L ; likewise, it is made up of six 22 gauge stainless steel solar collectors with a mirror finish and six 93 cm long quartz absorber tubes; finally the dimensions of the reactor without counting the structure that supports it are $120 \times 80 \times 8.5 \text{ cm}$.

In order to evaluate the performance of the CCP reactor, the solar heterogeneous photocatalytic degradation process (FHS) mediated with $\text{TiO}_2 \text{ P}_{25}$ was carried out, for which methyl orange (NM) was used as a model pollutant at a concentration of 20 ppm and to measure the degradation of this was used a spectrophotometer at 465 nm; The reactor was operated from 9:00 am to 3:00 pm at 22° from the horizontal with orientation to the South.

Finally, to complement the project, a degradation study was carried out by means of which the behavior of the degradation rate of the NM was analyzed at flows of 6, 9 and 14 L / min as a function of the exposure time and accumulated solar radiation; Obtaining as a result that regarding the degradation time values of 6, 9 and 14 L / min degrade 98, 94 and 88% of the model pollutant in 4, 5 and 5.3 h respectively. While from the energy point of view, the behavior of the trend is the same in each of the flows used, highlighting that for a flow of 6, 9 and 14 L / min a cumulative radiation of 672.15, 890.12 and 969.10 KJ / min is needed. m^2 to degrade the NM by 98, 94 and 88% respectively.

iv. Key words: Methyl orange (NM), solar heterogeneous photocatalytic degradation process (FHS), cumulative radiation.

v. Simbología y/o nomenclatura

hP Caballos de fuerza (potencia)

Cm Centímetros

CE Contaminantes Emergentes

CCP Concentrador Cilíndrico Parabólico/ Reactor Cilíndrico Parabólico

TiO₂ Dióxido de Titanio

FFS Foto Fenton Solar

FHS Fotocatálisis Heterogénea Solar

°C Grados Celsius

° Grados respecto a la horizontal

KJ Kilojoule

L Litros

λ Longitud de onda

' Minutos en coordenadas

min Minutos en tiempo

nm Nano metros

NM Naranja de Metilo

ppm Partes por millón

in Pulgadas

pH Potencial de hidrógeno

% Por ciento

POA Procesos de Oxidación Avanzada

\cdot OH Radicales hidroxilo

\cdot O₂ Radicales superóxido

" Segundos en coordenadas

tR Tiempo de retención

UV Ultravioleta

W/m² Watts por metro cuadrado

1. Introducción

El agua es fundamental para la existencia de la vida en nuestro planeta, y es por ello que se debe asegurar su saneamiento al momento de ser devuelta al medio ambiente. La explotación del recurso hídrico ha puesto en riesgo dicho recurso, por lo tanto es prioridad combatir su desabasto, desperdicio y contaminación de manera efectiva, teniendo especial cuidado en darle un uso racional y sustentable (Salgado Tránsito, 2011).

Los efluentes de la industria textil presentan gran impacto en el medio ambiente, debido a los grandes volúmenes de agua residual generados con un alto contenido de materia orgánica y colorante, destacando la gran estabilidad de estos últimos (azocompuestos). Los procesos convencionales para el tratamiento de aguas residuales tales como adsorción, floculación y procesos de lodos activados no son eficientes para la decoloración de tales efluentes, ya que no pueden remover eficientemente los compuestos orgánicos (Besson & Gallezot, 2001). La naturaleza no biodegradable, tóxica e inhibitoria de los procesos anteriores tienen un efecto nocivo considerable en la matriz ambiental (agua y suelo) y se informa que algunos colorantes causan alergia, dermatitis, irritación de la piel, cáncer y mutaciones en humanos (Bhatnagar, 2005).

Los últimos avances en el tratamiento de aguas, en específico de la oxidación de compuestos orgánicos, utilizan POA dentro de los que destaca la fotocatalisis heterogénea solar (FHS) la cual consiste en la degradación del contaminante a través de la utilización de catalizadores (óxidos semiconductores), radiación ultravioleta y/o solar, generando con ello radicales los cuales son responsables de la oxidación de dichos contaminantes (Su, y otros, 2008).

El TiO_2 es el semiconductor más usado en fotocatalisis y el catalizador a utilizar en el presente proyecto, tiene como características ser un compuesto química y biológicamente inerte, no ser tóxico, ser estable a corrosión fotoquímica, ser abundante y barato, además de poseer un gap de energía de 3.2 eV que puede ser excitado con luz ultravioleta (UV) de $\lambda < 387 \text{ nm}$, la cual puede ser aportada por la luz solar.

Para este proyecto se desarrollará un reactor CCP con el fin de aprovechar directamente la energía solar que llega a la superficie de la Tierra. En el año 2012, en el Estado de Zacatecas se evaluó el potencial de radiación solar en la Estación Solarimétrica del edificio 6 del Campus de la UAZ Siglo XXI, midiendo la irradiancia global y difusa, obteniendo que para el periodo de evaluación, la irradiancia por día promedio anual fue de 544.99 W/m^2 y la energía disponible de 6.8 MJ/m^2 , por lo cual es ideal para aprovechar esta energía y provocar una serie de reacciones químicas que dan lugar a la eliminación de diversos compuestos; en lugar de lámparas UV/visible que comúnmente se utilizan en los laboratorios de manera experimental.

Dentro de las limitantes que poseen dichas lámparas se tiene que la vida útil de los bulbos lumínicos emisores es corta, que poseen una baja eficiencia, que emanan alta temperatura en su funcionamiento, y que poseen un costo elevado de operación (Garcés, Mejía, & Santamaría, 2004)

El empleo de radiación solar en POA como fuente primaria de energía le otorga el título de tecnología sostenible (Carvajal, Jiménez, Ramírez, & Albeiro, 2013). Aunando que al hacer uso de esta energía, la cual se clasifica como renovable e inagotable, se estaría reduciendo el calentamiento global al disminuir o anular las importaciones energéticas al sistema y con ello los costos de operación en el tratamiento de agua, por lo anterior, se puede decir que el desarrollo de los CCP para aprovechar la radiación solar como alternativa tecnológica sustentable para degradar contaminantes emergentes en el agua por POA es una opción viable para que éstos puedan ser aplicados a una escala industrial (Garcés, Mejía, & Santamaría, 2004).

Por ende, la factibilidad en el uso de la FHS redundando en el uso y optimización de los reactores fotocatalíticos que consideran la radiación solar como fuente de energía, ya que ésta es de fácil acceso, reduce costos y reduce los residuos peligrosos de las lámparas (Blanco, Malato, Estrada, Erick, & Gelover, 2014).

Finalmente, para evaluar la eficiencia del reactor CCP a desarrollar, se utilizará el naranja de metilo (NM), el cual es una sustancia orgánica utilizada como colorante en la industria textil y como indicador ácido-base. Se ha demostrado que esta sustancia no es biodegradable cuando está presente en aguas y es por esta razón que la fotocatalisis heterogénea se propone como alternativa para su eliminación (Monsalve, y otros, 2007).

2. Revisión de la literatura

2.1 Contaminantes emergentes en el agua y fuentes de generación

La contaminación del agua consiste en una modificación química, física y/o biológica, provocada al introducir materiales o formas de energía que implica una alteración perjudicial a la calidad del agua, en relación con los usos posteriores o con su función ecológica (Martínez Hernández, 2010). Sobre la contaminación a la cual se pretende precisar en el presente proyecto es sobre la contaminación causada por los contaminantes emergentes (CE), estos contaminantes son sustancias que actualmente no se incluyen en los programas de vigilancia rutinaria y los cuales pueden ser candidatos para su futura regulación, dependiendo de estudios de su toxicidad, efectos potenciales para la salud, percepción pública y datos que revelen su presencia en diversos campos en el medio ambiente (Bandala & Goonetilleke, 2016), así mismo los contaminantes emergentes generalmente se utilizan para referirse a

compuestos de distinto origen y naturaleza, entre los que destacan los productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, surfactantes, aditivos industriales, colorantes de la industria textil, plastificantes, plaguicidas y una gran variedad de compuestos químicos (García Gómez, Gortáres Moroyoqui, & Drogui, 2011).

En la actualidad existe un creciente interés por los CE, ya que son compuestos de distinta naturaleza química, cuya presencia en el medio ambiente ha pasado inadvertida, causando problemas ambientales y de riesgo para la salud (Gil, Soto, Usma, & Gutiérrez, 2012). De este modo, diversos autores destacan que estos CE se encuentran dispersos en el ambiente y se han detectado en fuentes de abastecimiento de agua tanto superficial como subterránea.

Dentro de las fuentes más importantes que originan estos CE, resaltan las aguas residuales de tipo doméstico e industrial, los residuos de las plantas de tratamiento, los efluentes hospitalarios, las actividades agrícolas y las actividades ganaderas (Monsalve, y otros, 2007). Sin embargo, de la lista de CE que actualmente han obtenido notoriedad son los colorantes, tintes y pigmentos, los cuales constituyen un grupo de sustancias orgánicas resultado de operaciones industriales como la textil, alimenticia, cosmética, del papel, del plástico y farmacéutica, etc. Y estos son liberados a cuerpos de agua sin tratamiento alguno (Almomani, Touraud, Degorce-Dumas, Roussy, & Thomas, 2002).

Finalmente, la preocupación de los CE reside en que la mayoría de estos son tóxicos y persistentes en el medio ambiente, y en el agua en específico afecta las características organolépticas, la reducción de la penetración de la luz solar y la eutrofización (Ehrampoush, Moussavi, Ghaneian, Rahimi, & Ahmadian, 2010); aunado a lo anterior los efectos significativos sobre la salud es la alteración del sistema endócrino, bloqueando y perturbando las funciones hormonales afectando la salud aún y cuando se encuentran en bajas concentraciones (García Gómez, Gortáres Moroyoqui, & Drogui, 2011).

2.2 Degradación de contaminantes emergentes en el agua por FHS.

Entre todos los procesos existentes que se han empleado para eliminar los CE, se encuentran los POA, los cuales generan radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) los cuales son capaces de oxidar la mayoría de los compuestos químicos presentes en las aguas residuales. Dentro de los POA, se encuentra la cavitación, la química de Fenton y por último la oxidación fotocatalítica (Gil, Soto, Usma, & Gutiérrez, 2012). Esta última técnica y en específico la FHS mediada por TiO_2 es la que se llevará a cabo en el presente proyecto para poner en marcha el reactor fotocatalítico CCP.

La FHS para el tratamiento y/o purificación de agua, es hoy por hoy, una de las aplicaciones fotoquímicas que más interés ha despertado entre la comunidad científica

(Blanco, Malato, Estrada, Erick, & Gelover, 2014). Desde entonces, un análisis histórico de la evolución del desarrollo del proceso fotocatalítico para la purificación de aguas permite identificar cuatro etapas claramente diferentes. En una primera etapa con escasas publicaciones en donde aún no se percibía una aplicación concreta de dichos procesos de oxidación. La segunda etapa, la cual engloba una creciente preocupación e inquietud sobre temas medioambientales; en ella se plantea la posibilidad de aplicar este proceso al tratamiento de contaminantes en agua. La tercera etapa, en donde los estudios de investigación básica y de sus aplicaciones generaron un debate sobre las posibilidades reales de su aplicación. Y finalmente la cuarta etapa, en la que se caracteriza por una visión más conservadora y realista de las posibilidades de la tecnología asociada, con ello se han identificado aplicaciones específicas y concretas en las que la tecnología, desarrollada adecuadamente, puede resultar viable y competitiva (Blanco, Malato, Estrada, Erick, & Gelover, 2014).

La FHS consiste básicamente en la aceleración de una reacción química mediada por la radiación UV o luz solar en presencia de un catalizador fotosensible, este proceso se caracteriza por la producción de especies de alto poder oxidante, principalmente $\cdot\text{OH}$, los cuales poseen la capacidad de atacar a los CE y degradarlos (Mills & Hunte, 1997).

De una manera más amplia, en un proceso de FHS, el catalizador es un material semiconductor que cuando es expuesto a la radiación electromagnética los electrones en la banda de valencia absorben aquellos fotones con energía mayor o igual a su banda de energía prohibida del semiconductor, con lo que se induce una transición electrónica de la banda de valencia a la banda de conducción, generándose un hueco en la banda de valencia y un electrón en la banda de conducción (par electrón-hueco) (Hammond & Turro, 1963). Consecuentemente, 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, principalmente radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), y superóxido ($\cdot\text{O}_2$), llevando a cabo el proceso de oxidación de las moléculas del contaminante (Masakazu, Takahito, & Yutaka, 1985).

En síntesis, la reacción fotocatalítica mediada por TiO_2 se fundamenta en la interacción de la radiación con el material semiconductor, durante este proceso de excitación, un electrón de la banda de valencia del TiO_2 absorbe un fotón cuya energía sea mayor o igual al valor de la banda de energía prohibida, con lo que ocurre una transición electrónica de la banda de valencia a la banda de conducción generando así un par electrón-hueco. En seguida de la excitación, ambos portadores migran rápidamente hacia la superficie donde el hueco es capturado por trampas de energía superficial y el electrón por trampas superficiales, o bien por trampas externas mediante donadores de electrones y receptores de electrones respectivamente (Salgado Tránsito, 2011).

No obstante, es posible que los electrones y huecos atrapados puedan recombinarse en la superficie de la partícula y para evitar esto, el electrón debe de ser capturado por oxígeno molecular previamente absorbido formando el $\cdot\text{O}_2$, actuando como elemento reductor, es decir, donador de electrones (Salgado Tránsito, 2011).

Para incrementar la eficiencia de un proceso fotocatalítico se deben evitar las reacciones parásitas y fomentar las reacciones favorables, principalmente las de generación de radicales libres, como es el caso de los $\cdot\text{OH}$.

Algo importante a mencionar es que en la literatura se ha reportado la descomposición total de compuestos orgánicos simples y complejos como alifáticos, aromáticos, colorantes, surfactantes, plaguicidas y herbicidas por la acción del $\cdot\text{OH}$ (García Gómez, Gortáres Moroyoqui, & Drogui, 2011).

2.3 Los reactores solares fotocatalíticos

Los reactores solares fotocatalíticos en pocas palabras son dispositivos que concentran la radiación solar para transformar la energía solar en energía química; sin embargo, existen varios factores a la hora de diseñar un reactor fotocatalítico como es el conseguir una correcta interacción entre las moléculas del contaminante, el fotocatalizador y las especies oxidantes; el flujo de operación, la exposición del catalizador a la luz UV, entre otros (Blanco Gálvez, Malato Rodríguez, & Peral, 2005). De modo que la reacción se lleve a velocidad y forma deseada.

Algo relevante a destacar de los reactores fotocatalíticos es la dificultad para poder compararlos entre sí; lo que complica tanto su diseño como optimización. Esto último influye directamente en los parámetros que intervienen en el proceso, tales como la geometría; el flujo; el catalizador; el contaminante a tratar; las escalas en las que se fabrican y la radiación en la que se operan (ya que la radiación cambia continuamente y es diferente según la temporada, el clima, la hora y el lugar) (Salgado Tránsito, 2011).

Considerando estos aspectos de diseño antes mencionados, los reactores fotocatalíticos se pueden clasificar como se presentan a continuación.

2.4 Tipos de reactores de acuerdo a la clasificación de con concentración o sin concentración solar.

Los reactores fotocatalíticos, se pueden dividir en dos grandes grupos, los reactores con concentración solar y los reactores sin concentración solar.

Dentro de los reactores fotocatalíticos con concentración solar destacan los captadores cilíndricos parabólicos y los captadores holográficos, resaltando que los primeros consisten en una estructura (con uno o dos motores controlados por un sistema de seguimiento solar en uno o dos ejes respectivamente) que soporta una

superficie altamente reflectante y concentradora de la luz UV con forma de parábola. En este reactor toda la radiación solar disponible sobre el plano de apertura será reflejada y concentrada sobre un tubo absorbedor que se encuentra situado en el foco geométrico de la parábola (Blanco Gálvez, El reactor solar fotocatalítico, 2005).

Mientras que los captadores holográficos consisten en un haz objeto situado en la región focal y un haz de referencia del sol como fuente; una vez creado el elemento óptico holográfico, la luz incidente sobre este elemento reproducirá la región focal que sirvió para crear el holograma, ya sea por transmisión o por reflexión dependiendo del haz de referencia utilizado para la creación del holograma (Quintana, Boj, Crespo, Pardo, & Satorre, 1997).

Por otro lado, los reactores fotocatalíticos sin concentración, también denominados no concentradores son sistemas estáticos orientados hacia el Ecuador con una inclinación específica, dependiendo de la latitud del lugar (Dillert, Cassano, Goslich, & Bahnemann, 1999). Dentro de esta clasificación podemos encontrar a los reactores planos y a los concentradores parabólicos compuestos. Destacando que los captadores solares planos son más económicos que los captadores cilíndricos parabólicos, ya que no tienen partes móviles o mecanismos de seguimiento solar; sin embargo, son dispositivos menos eficientes a la hora de captar la luz solar.



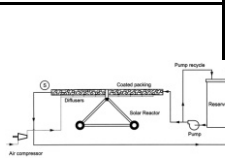
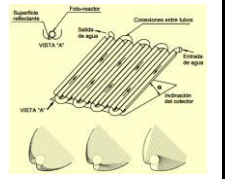
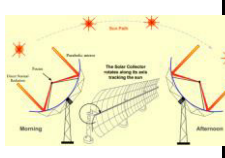

Así mismo, dentro de la categoría de los reactores planos no concentradores destacan (Blanco Gálvez, El reactor solar fotocatalítico, 2005):

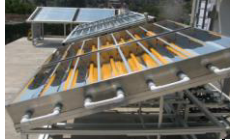
- Los reactores de flujo de película, los cuales están basados en una placa inclinada sobre la que cae lentamente el agua de proceso y el catalizador se encuentra sobre la superficie inclinada.
- Los reactores de placa cerrada, los cuales consisten en dos placas entre las cuales circula el flujo utilizando una pared de separación.
- Los reactores tubulares, los cuales consisten en una serie de tubos de tamaño variable conectados en paralelo para hacer circular al flujo más rápido que en los reactores de superficie plana.
- Los reactores de estanque solar, los cuales consisten en una especie de piscina con poca profundidad donde el agua que se quiere tratar es expuesta a la radiación solar.

Y finalmente los captadores cilíndricos parabólicos compuestos, los cuales pertenecen al grupo de reactores fotocatalíticos no concentradores, y son una combinación interesante entre concentradores parabólicos y sistemas planos estáticos constituyendo una buena opción para aplicaciones de fotocátalisis solar y esto anterior debido a que estos son captadores estáticos con una superficie reflectante que sigue una involuta alrededor de un reactor cilíndrico consiguiendo concentrar sobre el receptor toda aquella radiación que llega dentro del ángulo de aceptación del captador

teniendo así las ventajas tanto de los captadores cilíndricos parabólicos como de los sistemas estáticos (May, Gee, Wickham, Laftloon, & Wright, 1991). A continuación, en la Tabla 1, se muestra de manera sistemática la clasificación de los reactores fotocatalíticos en relación con el tipo de radiación solar que reciben.

Tabla 1. Reactores fotocatalíticos que operan con radiación solar como fuente de excitación (Blanco Gálvez, El reactor solar fotocatalítico, 2005).

Reactores fotocatalíticos que operan con radiación solar				
	Catalizador	Tipo	Descripción	Imagen ilustrativa
Sin concentración	Suspensión	Placa plana (FP)	Formado por una placa rectangular de acero inoxidable con acabado espejo, algunos de estos equipos trabajan a presión y otros forman canaletas interconectadas.	
		TFFBR	Cama fija cubierta semejanza a una cascada.	
	Inmovilizado	FBR	Dispositivo donde el catalizador se encuentra inmovilizado sobre pequeñas estructuras cilíndricas, granulares o esféricas permitiendo el paso tortuoso del fluido	
		CPC	Concentrador parabólico compuesto, surge de la combinación del concentrador CCP y los sistemas sin concentración solar.	
Con concentración	Suspensión	CCP-1 eje	Cilíndrico parabólico con seguimiento en 1 eje	
		CCP-2 ejes	Cilíndrico parabólico con seguimiento en 2 ejes	

	Inmovilizado	CPC	Concentrador parabólico compuesto donde el catalizador está inmovilizado.	
--	--------------	-----	---	---

2.5 Características del reactor CCP-1 eje a construir incluyendo ventajas y desventajas.

En el presente trabajo se pretende realizar un reactor fotocatalítico de tipo Cilíndrico Parabólico sin seguimiento solar, por lo que estará orientado al Sur con una inclinación de 22° respecto a la horizontal, debido a la latitud del lugar. En la Tabla 1, el tipo de reactor a construir se puede visualizar en los reactores fotocatalíticos con concentración solar y con uso de catalizador en suspensión.

Un reactor CCP posee algunos elementos básicos, tales como una superficie reflectora concentradora, el sistema de seguimiento solar, el tubo absorbedor, y la estructura de soporte. Dentro de las características principales de un CCP se destaca el uso eficaz de la luz solar directa y por ende una simplicidad en el manejo y control del agua a tratar.

Debido a que el reactor CCP a construir no llevará seguimiento solar es relevante mencionar que conlleva un menor costo de fabricación dado que sus componentes son sencillos al igual que su instalación, lo que se traduce también en un bajo costo de mantenimiento (Dillert, Cassano, Goslich, & Bahnemann, 1999). Aunado a esto, es relevante mencionar que el tamaño y longitud del reactor es pequeño, lo que significa una superficie menor de uso (Mehos & Turchi, 1992).

Dentro de las desventajas de un CCP, destaca su alto costo comparado con un tratamiento biológico y el bajo rendimiento óptico, ya que solo utiliza la radiación directa.

En cuanto al tiempo de residencia, diversos autores mencionan que cuando se realizan ensayos de degradación fotocatalítica de diferentes sustancias el parámetro más comúnmente utilizado para referir los resultados y la evolución del proceso es el tiempo de residencia (tR), que indica el tiempo de exposición a la luz de la mezcla acuosa que está pasando por el reactor. Por lo tanto, la utilización del tiempo de residencia no permite comparar experiencias realizadas en sistemas diferentes ni extraer conclusiones sobre la eficiencia comparativa de los mismos. Este problema puede evitarse representando la evolución del proceso fotocatalítico en función de la energía útil o radiación solar que ha ido acumulando el reactor a lo largo del tiempo, en vez del tiempo de residencia (Blanco J. , y otros, 1999).

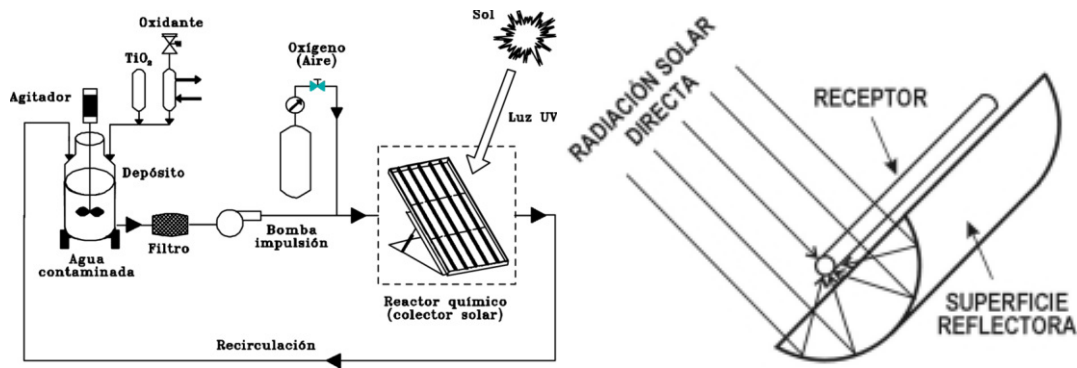


Figura 1. Diagrama teórico del CCP (Blanco J., y otros, 1999).

2.6 Efectos a considerar para la construcción del reactor CCP

2.6.1 Efecto de la concentración del catalizador

El efecto del catalizador respecto a la velocidad de degradación fotocatalítica es lineal a bajas concentraciones, este comportamiento continúa hasta un punto de saturación después del cual la velocidad permanece constante a pesar de incrementar la cantidad de catalizador (Salgado Tránsito, 2011). Este comportamiento se puede deber a dos causas, la primera se atribuye a una mayor agregación de partículas del fotocatalizador en altas concentraciones lo que ocasiona una disminución en el número de sitios activos en la superficie del catalizador; y la segunda se atribuye a que un incremento en la concentración del fotocatalizador origina una disminución de la transmitancia de la solución, impidiendo el paso de la luz a las regiones interiores del reactor (Herrmann, 2010).

2.6.2 Efecto del pH

El pH de la solución de trabajo influye en la forma en que se carga la superficie del fotocatalizador, la cual a su vez afecta la transferencia electrónica en la interfaz líquido-semiconductor y por lo tanto el procesos de óxido-reducción.

Un pH muy básico ($\text{pH} > 10$) ocasiona que la superficie del fotocatalizador adquiera una carga negativa, lo cual puede favorecer la formación de radicales hidroxilo debido a una mejor transferencia de huecos a especies adsorbidas en la superficie y a la atracción electrostática entre la superficie negativa y contaminantes cargados positivamente. En pH muy ácidos ($\text{pH} < 3$) la superficie del catalizador se carga positivamente, lo cual dificulta la transferencia de huecos. No obstante, se encuentra que la velocidad de la degradación fotocatalítica no es alterada significativamente por el pH en el intervalo de 4-10, destacando que este intervalo puede variar y verse afectado por punto de carga cero o punto isoeléctrico del catalizador (Salgado Tránsito, 2011).

2.6.3 Efecto de la temperatura

El efecto de la temperatura sobre la variación de la velocidad de degradación fotocatalítica, corresponde a una función de la inversa de la temperatura, esto quiere decir que a bajas temperaturas ($T < 20^{\circ}\text{C}$) la velocidad de la degradación es pequeña y se incrementa al aumentar la temperatura; en esta región la energía de activación es grande y la reacción ocurre lentamente. Por otro lado, en el intervalo de $20\text{-}80^{\circ}\text{C}$ la velocidad de la degradación fotocatalítica no sufre afectaciones significativas; esto se debe a que la energía de activación térmica a temperatura ambiente es muy baja comparada con la energía de activación necesaria para generar un par electrón-hueco en el TiO_2 . Y en temperaturas por arriba de 80°C existe un drástico decaimiento de la velocidad de la degradación fotocatalítica, ya que a esta temperatura el proceso de desorción del contaminante se incrementa convirtiéndose en un proceso desfavorable que limita la reacción fotocatalítica (Herrmann, Heterogeneous photocatalysis: state of the art and present applications, 2005)

2.6.4 Efecto del oxígeno disuelto

En cuanto al efecto del oxígeno disuelto. La velocidad y eficiencia de un proceso de degradación fotocatalítica se incrementan de forma significativa con la adición de oxígeno molecular a la solución. Esto se debe a que el oxígeno es isoenergético con la banda de conducción del TiO_2 , por lo que el oxígeno adsorbido en la superficie funciona como una trampa eficiente de electrones fotogenerados, y contrarresta el efecto de la recombinación de los pares electrón-hueco. Adicionalmente, el oxígeno molecular puede generar otros radicales libres como es el caso del $\cdot\text{O}_2$, los cuales también participan activamente en el proceso de degradación fotocatalítica del contaminante (Salgado Tránsito, 2011).

2.6.5 Efecto de la adición de especies oxidantes

Este efecto recae en la necesidad de aumentar la eficiencia de degradación en un proceso fotocatalítico por lo que se suelen añadir especies oxidantes inorgánicas como el peróxido de hidrógeno, iones persulfato y periodato; capaces de aumentar la velocidad de reacción fotocatalítica, ya que son capaces de reaccionar tanto con los huecos como con los electrones foto-generados produciendo en ambos casos $\cdot\text{OH}$; y reducen la probabilidad de recombinación de los pares electrón-hueco (Román Rodríguez, 2001).

Una de las ventajas del uso de estas especies oxidantes es que generan radicales que oxidan de manera directa al contaminante y a sus subproductos. Sin embargo, una de las desventajas es que un alto contenido de especies oxidantes y un bajo contenido de contaminantes disminuyen la velocidad de la degradación, este efecto desfavorable

se debe a que el agente oxidante satura la superficie del catalizador evitando la adsorción de otras especies químicas (Salgado Tránsito, 2011).

Es por esto que se debe de encontrar una relación óptima entre la concentración del contaminante y la concentración del agente oxidante (Malato, Fernández-Ibañez, Maldonado, Blanco, & Gernjak, 2009).

2.6.6 Efecto del flujo másico

En FHS mediada por TiO_2 , el proceso más lento, y por lo tanto, el que determina la velocidad de la reacción, es un proceso de transferencia de masa. Por esta razón, la velocidad del fluido en el interior del reactor fotocatalítico es un parámetro fundamental porque determina el fenómeno de transporte de masa (Salgado Tránsito, 2011).

Un flujo laminar permite que haya regiones con diferentes concentraciones de reactantes y disminuye el contacto entre estos y el catalizador, mientras que un flujo turbulento favorece la transferencia de masa entre la solución y el catalizador y asegura una mejor dispersión de los reactantes en la solución. Adicionalmente, un flujo turbulento incrementa la concentración de oxígeno disuelto, otro reactivo fundamental en una reacción fotocatalítica (Ehrampoush, Moussavi, Ghaneian, Rahimi, & Ahmadian, 2010).

En la Figura 2 se muestra la variación de la razón de la degradación en función del número de Reynolds (Re) de 25 ppm del colorante en función del tiempo (Salgado Tránsito, 2011).

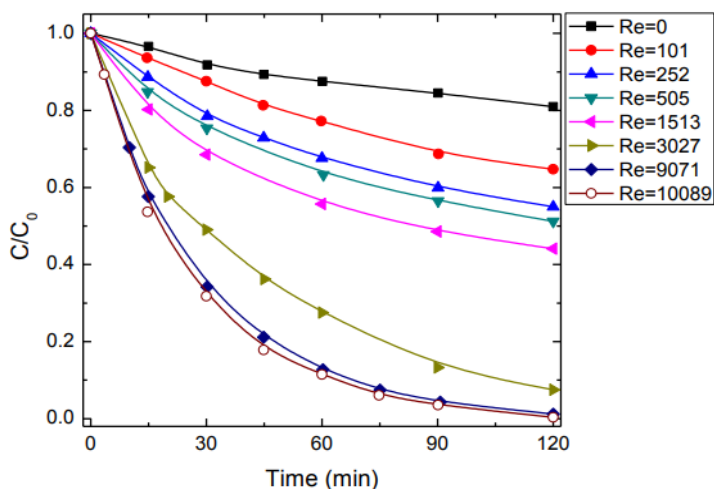


Figura 2. Variación de la degradación fotocatalítica de 25 mg/l de colorante en función del número de Reynolds (Re).

Finalmente, en cuanto al efecto del flujo másico, si bien ya se mencionó que favorece el fenómeno de transporte entre el catalizador y el contaminante, es relevante mencionar que en el caso de utilizar un catalizador en suspensión, como es el caso del TiO_2 , un flujo turbulento ayuda a evitar su precipitación en las paredes del tubo (Salgado Tránsito, 2011).

2.6.7 Efecto del diámetro del tubo absorbedor

Dentro de las configuraciones más comunes se encuentra la forma tubular, y la cual es usada en los CCP. Esta forma le confiere un sencillo manejo del fluido, y garantiza una adecuada relación entre la distribución del fluido y la iluminación. Cuanto menor es la concentración de TiO_2 , menos opaca es la suspensión y mayor va a ser la penetración de la luz; una concentración de 1 g/L de TiO_2 reduce la iluminación a cero después de sólo 10 mm de trayectoria óptica, por lo que si el diámetro del tubo es superior solo la parte exterior estará iluminada (Blanco Gálvez, Malato Rodríguez, & Peral, DISEÑO DE REACTORES PARA FOTOCATÁLISIS: EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS DISTINTAS OPCIONES, 2005).

De acuerdo a diversos autores, los valores prácticos para reactores fotocatalíticos tubulares van a estar entre 20 y 50 mm; diámetros menores van a suponer unas elevadas pérdidas de carga y valores mayores un excesivo volumen sin iluminar.

2.7 Materiales para la construcción del reactor CCP

Si bien ya se mencionó anteriormente los componentes básicos de un CCP, el diseño de éste no debe de ser trivial debido a los requerimientos de inerticidad química y resistencia tanto a la intemperie como a la luz ultravioleta (Bahnmann, 2000). Estos reactores, además requieren de un diseño tal que puedan soportar cierta presión de operación para poder bombear el fluido a través de los captadores (Enzweiler, 1994). Por ese motivo la utilización de reactores fotocatalíticos con una forma diferente a la tubular puede representar ciertos inconvenientes a la hora de su escalado. Una ventaja de la configuración tubular en reactores fotocatalíticos es el rendimiento estructural y una gran versatilidad de materiales y tamaños (Blanco Gálvez, El reactor solar fotocatalítico, 2005).

Retomando los elementos que componen al CCP, está la superficie reflectora, el tubo absorbedor y la estructura. A continuación se destacan algunos casos reales de éxito en el desarrollo de reactores fotocatalíticos, mencionando los materiales utilizados en cada uno de ellos.

De acuerdo al autor (Blanco J., y otros, 1999), menciona que los reactores fotocatalíticos generalmente están fabricados con una superficie reflectora de aluminio y un tubo absorbedor de vidrio a manera de fotorreactor.

De la misma manera, en la Tabla 1, el autor (Salgado Tránsito, 2011) señala los materiales más utilizados para fabricar los reactores fotocatalíticos. Este mismo autor realizó un reactor fotocatalítico con lámina de aluminio como superficie reflectante; acero inoxidable T-304 calibre 22 a manera de estructura y vidrio de borosilicato como tubo absorbedor.

Por otro lado, los autores (Granda, Marín, Ríos, & Restrepo, 2007), construyeron un reactor fotocatalítico de acero inoxidable 316, debido al fácil acceso y la gran estabilidad mecánica que requiere el proceso fotocatalítico, cabe mencionar que la superficie reflectante se recubrió con aluminio.

Por el contrario, los autores (Saettone, Paredes, Quino, Ponce, Eyzaguirre, 2016), fabricaron un reactor fotocatalítico con una estructura de PVC y una superficie reflectora de aluminio anodizado de alta reflectancia.

Finalmente, las autoras (Mercado & Lam, 2015) se enfocaron en diseñar y construir un reactor CCP de acero inoxidable a manera de desalinizador y aunque el fin de este reactor no era la utilización de la radiación UV para llevar a cabo una reacción cabe destacar que dicho reactor fue diseñado para la intemperie.

Si bien el aluminio predominó en la mayoría de los casos de éxito como material reflectante, de acuerdo con los autores (Blanco Gálvez, Malato Rodríguez, & Peral, DISEÑO DE REACTORES PARA FOTOCATÁLISIS: EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS DISTINTAS OPCIONES, 2005), este material se va a oxidar y a degradar rápidamente con lo que perderá sus características.

No obstante, se debe de tener en cuenta que el problema de la superficie reflectante no ha sido completamente resuelto por el momento, ya que ninguna de las utilizadas hasta ahora cumple con la característica de poseer un precio razonable y unas condiciones de eficiencia y durabilidad aceptables (Blanco Gálvez, El reactor solar fotocatalítico, 2005).

Por otro lado, en cuanto al fotorreactor o tubo absorbedor, la necesidad de tener una elevada transmisividad en el UV y una elevada resistencia a la degradación, así como una cierta resistencia mecánica hace que las posibilidades de su elección sean limitadas.

Los autores (Flores Espinosa, y otros, 2015) recomiendan que para el tubo absorbedor los materiales deben de ser inertes químicamente, de adecuada transividad, buenos difusores de radiación UV y resistentes a la presión y a la temperatura destacando al cuarzo sobre todos los materiales, seguido del Pyrex, del Duran, de los fluoropolímeros y del vidrio común en ese orden. Así mismo destaca al acero inoxidable como material adecuado por ser químicamente inerte.

Profundizando un poco más en las alternativas para el fotorreactor, las autoras (Mercado & Lam, 2015) mencionan que el cuarzo es un material con una alta transmitancia, pero muy costoso lo que lo invalida desde el punto de vista práctico; que los fluoropolímeros son materiales químicamente inertes con buena transmitancia, resistencia mecánica y buenos difusores de la radiación UV; que es posible utilizar materiales acrílicos y varios tipos de vidrio bajo la condición de que estos sean de bajo contenido de hierro, ya que éste absorbe la radiación UV; de la misma manera, las mismas autoras mencionan que es posible utilizar materiales plásticos tales como politetrafluoretileno, etileno-tetrafluoretileno, etilpropileno fluorado o materiales acrílicos, ya poseen las necesarias características de transmisividad y resistencia térmica, así como el mantenimiento de sus propiedades durante su uso a la intemperie, sin embargo, una de sus principales desventajas es la necesidad de incrementar el espesor del material cuando se desea que el reactor soporte condiciones de presión media o elevada comprometiendo así su eficiencia de transmisividad; finalmente sugiere que el vidrio común es otro material que se utiliza a manera de fotorreactor, más sin embargo este no es el adecuado, ya que absorbe parte de la radiación UV debido al contenido de hierro, por lo que se debe de optar por vidrios con bajo contenido de hierro como es el caso del borosilicato.

2.8 Catalizador a emplear

A pesar de que hasta ahora ya se sabe que en el presente proyecto se llevará a cabo una FHS mediada por TiO_2 , es sin lugar a dudas necesario redundar en por qué se empleó este catalizador.

El TiO_2 es el fotocatalizador más empleado en procesos de fotocatalisis y esto debido a que este material posee una buena actividad fotocatalítica, baja toxicidad, alta absorbancia de la radiación UV, alta disponibilidad comercial, buena estabilidad en medios ácidos y acuosos y un bajo costo (Salgado Tránsito, 2011). Sin embargo, en definitiva, la principal ventaja que posee el TiO_2 como fotocatalizador respecto a otros semiconductores es el potencial de oxidación de los huecos fotogenerados tales que al reaccionar con las moléculas de agua, estos huecos son capaces de producir $\cdot\text{OH}$, dando como resultado que cualquier especie con potencial de oxidación menos positivo que la banda de valencia pueda ser oxidada en la superficie del semiconductor (Gil, Soto, Usma, & Gutiérrez, 2012).

2.9 El colorante naranja de metilo

Mediante la fotocatalisis pueden degradarse gran cantidad de compuestos entre los que destacan los productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, surfactantes, aditivos industriales, colorantes de la industria textil, plastificantes, plaguicidas, etc.

Para el presente proyecto, el contaminante modelo a emplear para realizar las pruebas de degradación será el naranja de metilo (NM), también conocido como naranja ácido 52 y cuya fórmula química es $C_{14}H_{14}N_3O_3SN_a$ (Guetta & Amar, 2005). Este contaminante es una sustancia orgánica utilizada como colorante en la industria textil y como indicador ácido-base. Se ha demostrado que esta sustancia no es biodegradable cuando está presente en el agua y es por esta razón que la FHS se propone como alternativa para su eliminación de efluentes; por otro lado el NM es un colorante común y fácil de monitorear sus procesos de degradación mediante un espectro UV-visible.

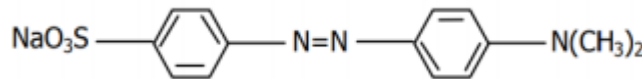


Figura 3. Estructura molecular del NM.

En la Figura 3 se muestra la estructura molecular del NM y se logra apreciar un azo-compuesto, el cual se caracteriza por la presencia de uno o más azo enlaces (-N=N-) en asociación con uno o más sistemas aromáticos, los cuales también pueden contener grupos ácido sulfónicos (Hernández, García, García, Cueto, & Carmona, 2012).

3. Justificación

El tratamiento de los residuos líquidos puede ser un problema muy complejo debido a la gran variedad de químicos y sus niveles de concentración, pero gracias a las investigaciones realizadas acerca de los efectos de ciertos contaminantes, se han generado nuevas tecnologías de oxidación fotocatalítica. La FHS mediada por TiO_2 es una alternativa atractiva para el tratamiento de aguas (Garcés, Mejía, Santamaría, 2004).

Para el periodo del 2012, la Estación Solarimétrica del edificio 6 del campus de la UAZ Siglo XXI, en el Estado de Zacatecas, registró el potencial de radiación solar; obteniendo que la irradiancia global y difusa por día promedio anual fue de 544.99 W/m^2 . Por lo anterior, para el presente proyecto, se desarrollará un reactor CCP con el fin de aprovechar directamente la energía solar que llega a la superficie de la Tierra en el Estado de Zacatecas y con ello provocar una serie de reacciones químicas que den lugar a la degradación de contaminantes emergentes, tales como el NM; en lugar de lámparas UV/Visible que comúnmente se utilizan en los laboratorios de manera experimental.

Dentro de las limitantes que poseen dichas lámparas se tiene que la vida útil de los bulbos lumínicos emisores es corta, que poseen una baja eficiencia, otras de las

desventajas que tienen estas lámparas es que emanan alta temperatura en su funcionamiento, y que poseen un costo elevado de operación (Garcés, Mejía, & Santamaría, 2004). Finalmente, ya que la lámpara emana calor, se debe contemplar un sistema de refrigeración el cual aumenta los costos de operación (Rebagliato Torregrosa, 2015).

A pesar de lo anterior, el hecho de que las fuentes artificiales de luz proporcionen radiación continuamente en las longitudes de onda deseadas, hace que se prefiera esta fuente de luz a la solar (Garcés, Mejía, Santamaría, 2004). Sin embargo, el empleo de radiación solar en POA como fuente primaria de energía le otorga el título de tecnología sostenible (Carvajal, Jiménez, Ramírez, Albeiro, 2013). Aunado que al hacer uso de esta energía, la cual se clasifica como renovable e inagotable, se estaría reduciendo el calentamiento global al disminuir o anular las importaciones energéticas al sistema y con ello los costos de operación en el tratamiento de agua, por lo anterior, se puede decir que el desarrollo de un CCP en el Estado de Zacatecas para aprovechar la radiación solar como alternativa tecnológica a las lámparas UV-visible para degradar CE en el agua por POA es una opción viable para que éstos puedan ser aplicados a una escala industrial (Garcés, Mejía, & Santamaría, 2004).

4. Hipótesis

Será posible demostrar la factibilidad de la FHS en el Estado de Zacatecas diseñando y desarrollando un CCP escala piloto capaz de degradar contaminantes emergentes disueltos en medios acuosos utilizando como contaminante modelo NM.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

- Desarrollar un CCP como alternativa tecnológica de bajo impacto ambiental, para el tratamiento de aguas residuales, utilizando la radiación solar como fuente de excitación para la degradación de CE en el agua por FHS.

5.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir un reactor cilíndrico parabólico (CCP).
- Probar la lámina de acero inoxidable 30 calibre 22 con acabado espejo a manera de superficie reflectante para concentrar la radiación solar.

- Poner en marcha el CCP y determinar las condiciones de flujo óptimas de degradación con una bomba de 0.5 Hp a 22° respecto a la horizontal empleando NM como contaminante modelo.
- Llevar a cabo el proceso de degradación fotocatalítica del NM a nivel planta piloto utilizando un CCP y TiO₂ (Degussa P25) suspendido en la solución.
- Realizar un estudio de degradación del contaminante en función de la radiación UV acumulada.

6. Metodología

6.1 Diseño y materiales del reactor cilíndrico parabólico

A través de la maquinaria disponible en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas, UPIIZ-IPN y con el conocimiento previo adquirido sobre geometría analítica (Anexo A), se diseñó un reactor CCP capaz de concentrar la radiación solar a un punto focal y para ello es necesario el material que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Materiales a emplear para la construcción de un CCP.

CANTIDAD	MATERIAL	COSTO POR UNIDAD MXN	COSTO SUBTOTAL MXN
1	Lámina de acero inoxidable 430 C22 4x10 2B	1220	1220
6	Tubos de cuarzo	650	3900
4	Perfil ángulo ranurado	110	440
1	Broca tipo tambor p/acero	200	200
1	Válvula de esfera 1"	158	158
4	Manguera industrial 1"	23	92
1	Cinta de teflón ½"x 260	10	10
3	Niple galvanizado 1" x 2"	10	30
2	Adaptador campana inserción 1"	7	14
3	Discos de corte p/metal	26	78

2	Plastiacero	105	210
1	Juego de piedras abrasivas	62	62
1	Tornillería (tornillos, tuercas y rondanas)	30	30
15	Electrodos E-308	15	225
1	Remaches	20	20
1.5	Tubo de PVC	15	22.5
8	Codos de PVC	5	40
22	Abrazaderas	9	198
Total			6,949.5

6.2 Construcción del reactor cilíndrico parabólico

El proceso de manufactura y ensamble del CCP se llevó a cabo en el edificio de Pesados de la UPIIZ-IPN. En este edificio de la unidad se cortó, se dobló, se ensambló y se soldó cada una de las piezas que componen al reactor CCP.

En resumen, el reactor realizado tiene una longitud de 120 cm, una anchura de 80 cm y una altura de 8.5 cm; la superficie reflectante es de lámina de acero 430 calibre 22 con acabado espejo, con la cual se realizó un arreglo de 6 parábolas de 23 cm de longitud; el tubo concentrador o fotorreactor es de cuarzo y tiene un diámetro interior de 20mm y un diámetro exterior de 23 mm, ya que de acuerdo a diversos autores este material es el que tiene una mejor eficiencia en los procesos de fotocatalisis (Flores Espinosa, y otros, 2015). Finalmente, la estructura del reactor se construyó a partir de un perfil ángulo ranurado de acero, ya que este material posee una gran estabilidad mecánica y por la característica que posee es posible ajustar el ángulo de inclinación del reactor en caso de ser necesario (Granda, Marín, Ríos, Restrepo, 2007).

En cuanto a la construcción, empezando por el marco del reactor CCP para montar los colectores, éste se fabricó de lámina de acero inoxidable 430 calibre 22 con acabado espejo y para ello se cortaron cuatro franjas de acero inoxidable con dimensiones de 8.5 x 120 cm y 8.5 x 80 cm (dos de cada una), así como la placa de 80 x 120 cm en la cual se colocarían las superficies reflectoras, finalmente se cortaron cuatro pestañas que fungirán como soporte adicional a las superficies reflectoras. En esta parte del proceso, con ayuda de una sierra de tipo tambor, se ranuraron 4 orificios de aproximadamente 1" en las franjas de 8.5 x 120 cm en las que se colocarían los tubos absorbedores de la radiación solar (las ranuras estarán equidistantes una de otra de

acuerdo al diseño del reactor). Una vez obtenida la franja posterior, anterior y las dos laterales, éstas se soldaron a la placa de 80 x 120 cm y para asegurar aún más el marco, las cuatro pestañas previamente cortadas se remacharon a este. (Anexo B).

Para la superficie reflectora, ésta se fabricó, al igual que el marco, en lámina de acero inoxidable 430 con acabado espejo calibre 22. Para dicho proceso de manufactura se cortó la lámina de acero en seis secciones de 23 x 80 cm, para posteriormente doblar las láminas resultante con ayuda de la roladora de aproximadamente 3 in con el fin de rectificar las parábolas (Salgado Tránsito, 2011). Una vez obtenidas las parábolas rectificadas, se pegaron provisionalmente con pegamento especial para acero, para después soldarlas en el marco con electrodo E-308. Cabe destacar que se cortaron en seis secciones debido a que el reactor CCP está diseñado para un arreglo en serie de 6 colectores (Anexo C y D).

Para el tubo concentrador o fotorreactor, se optó por el cuarzo con diámetro interior de 20mm y diámetro exterior de 23 mm, ya que de acuerdo a diversos autores este material es el que tiene una mejor eficiencia en los procesos de fotocátalisis. Para el montaje de los tubos absorbedores en el reactor CCP, estos se cortaron a una longitud de 93 cm (más grandes que la anchura del reactor) con el fin de poder colocar los accesorios correspondientes a cada sección del fotorreactor.

Ya que la tubería de cuarzo no es compatible con los accesorios convencionales del mercado, se tuvo que hacer uso de empaques de hule (O'rings), codos y tubería de PVC de 1 in y manguera de 1 in.

Finalmente la estructura del reactor se construyó a partir de perfil ángulo ranurado de 220 cm, para esta parte del reactor, simplemente se cortó con el disco de corte para metal ad hoc a las medidas del reactor y se ensambló con tornillería convencional.

6.3 Preparación de soluciones

Para la preparación de las soluciones se utilizó como contaminante modelo el NM a una concentración de 20 ppm, para ello en dos vasos de precipitado de 4 litros se añadieron 4 litros de agua destilada para después añadir a cada uno de los vasos 0.08 g de NM (Anexo E). Posteriormente se agitó y aún en agitación, se añadieron 2 g de TiO₂ Degussa P25; finalmente se ajustó el pH a 4, ya que en la bibliografía menciona que a este pH se obtiene una mejor degradación del NM (González, 2018).

6.4 Medición de la radiación

Para medir la intensidad de radiación ultravioleta incidente sobre la superficie del reactor fotocatalítico, y por cuestiones de accesibilidad a un radiómetro; se utilizó un sensor de radiación UV (ML8511 Sensor) y un microcontrolador (arduino). Se

programó el sensor para registrar minuto a minuto la radiación UV y posteriormente acumular dicha radiación, el sensor se ubicó con dirección al Sur y con un ángulo de 22° respecto a la horizontal, igual que la orientación e inclinación del reactor (Monsalve, y otros, 2007). Cabe destacar que la toma de muestra fue en base a la radiación acumulada y el tiempo.

6.6 Operación del reactor

El modo de operación básicamente consiste en un circuito constituido por seis fotoreactores (tubos de cuarzo de 23 mm de diámetro exterior) conectados en serie situados en la línea focal de cada superficie reflectora.

Para el circuito hidráulico se utilizará manguera de 1 in, coples de 1 in, abrazaderas de 1 ½ in y un contenedor de polietileno negro de 20 L, donde se depositará la solución.

Para la recirculación del fluido se utilizará una bomba periférica de 0.5 hp marca Múnich, la cual con ayuda de una válvula de esfera mantendrá el flujo constante en cada corrida (Anexo F).

La solución de 8 L de NM a 20 ppm previamente preparada se vertió en el contenedor de 20 L; la solución se hizo recircular a flujos de 6, 9 y 14 L/min (dependiendo de la prueba) entre el contenedor y el reactor CCP, conectado a través de mangueras, conexiones y válvulas. Los experimentos se realizaron en la UPIIZ-IPN (latitud 22°46'58.80" norte, longitud 102°36'52.74" oeste), en los meses de noviembre y diciembre del 2020 durante la época de otoño-invierno en el hemisferio norte, por lo cual el sistema fue orientado en dirección al sur a 22° respecto a la horizontal, de tal manera que el reactor CCP recibiera la mayor radiación UV durante el mayor tiempo posible. Cada minuto se registró la intensidad de radiación UV y se tomó 10 mL de muestra cada 20 minutos; posteriormente se centrifugó la muestra para retirar el TiO₂ y se midió en el espectrofotómetro en un barrido de onda de 200 a 650 nm teniendo en cuenta que el pico característico del NM está en 465 nm, es decir donde el NM presenta la mayor absorbancia (Monsalve, y otros, 2007). El sistema permaneció en recirculación hasta alcanzar el nivel deseado de degradación.

Tabla 3. Parámetros operacionales del reactor fotocatalítico.

COMPONENTE	
Catalizador	FHS mediada con TiO ₂ P25 suspendido
Contaminante	Naranja de metilo
Volumen a tratar	8 L

Fuente UV	Radiación solar
pH inicial de la solución	4
Flujo másico	6, 9, 14 L/min
Sistema de concentración	CCP
Receptor/Tubo absorbedor/fotorreactor	Tubo de cuarzo
Superficie reflectante	Acero inoxidable 430 C22
Bomba de recirculación	0.5 hP
Ubicación	22°46'58.80"
Cantidad de tubos	6
Longitud total del tubo	93 cm
Longitud del tubo irradiada	80 cm
Diámetro externo del tubo	23 mm
Diámetro interno del tubo	20 mm
Área total irradiada del módulo	0.96 m ²
Concentración del TiO ₂	0.5 g/L
Concentración del NM	≈ 20 mg/L

6.7 Evaluación del flujo para encontrar las condiciones óptimas de operación del Reactor CCP y obtención del volumen iluminado y del área de captación.

Para la evaluación del flujo, se cargó agua potable al depósito de polietileno y se accionó la bomba para que el agua recorriera todo el reactor, con ayuda de una probeta se midió el caudal mínimo que arroja la bomba y a partir de ese caudal se determinarán los flujos a evaluar, en el caso de la bomba a utilizar los flujos fueron de 6, 9 y 14 L/min.

Al mismo tiempo se debe lograr que la mayor cantidad de agua a tratar esté irradiada, y para ello se debe de calcular el volumen iluminado mediante la Ecuación 1, la cual relaciona el diámetro, la longitud y el espesor del fotorreactor; así como el número de estos (Salgado Tránsito, 2011):

$$V_{iluminado} = \frac{\pi \cdot (D - 2\delta)^2}{4} L_{tub} \cdot N_{tub} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$V_{\text{iluminado}}$: Volumen iluminado (m^3)

D : Diámetro exterior del tubo (m)

L_{tub} : Longitud del tubo (m)

N_{tub} : Número de tubos

δ : Espesor del tubo (m)

Para obtener el área de captación se hace uso de la Ecuación 2, la cual relaciona el diámetro y longitud de los tubos, así como el número de estos.

$$A_C = (2 \cdot \pi \cdot D) \cdot N_{\text{tub}} \cdot L_{\text{tub}} \quad \text{Ec. 2}$$

6.8 Evaluación de la degradación del contaminante modelo mediante espectrofotometría

Para la evaluación de la degradación del NM y cuantificar la concentración en la solución acuosa, primero se determinó la absorbancia óptica de la molécula del NM para lo cual se utilizó un espectrofotómetro marca Perkin Elmer. El rango elegido de medición se realizará de 200 nm a 600 nm, ya que la absorbancia máxima y pico característico del NM se encuentra a 465 nm lo que daría pie a una observación amplia de su degradación (Monsalve, y otros, 2007).

7. Resultados y discusión de resultados

7.1 Diseño, materiales, construcción y puesta en marcha del reactor cilíndrico parabólico.

Con relación al diseño del reactor CCP para la degradación de CE y en específico del contaminante modelo utilizado, el cual es el NM; es necesario considerar cuestiones tales como la geometría del reactor, concentración del catalizador, temperatura, pH, área de captación solar, grado de inclinación respecto a la horizontal, etc., los cuales son parámetros que deben de ser optimizados para aumentar la eficiencia.

En cuanto a los parámetros operacionales del reactor CCP, mostrados en la Tabla 3, el sistema de concentración es de forma tubular, la cual es una de las configuraciones más comunes y sencillas en cuanto a su manejo del fluido garantizando una adecuada relación entre iluminación y distribución del fluido. (Blanco Gálvez, Malato Rodríguez, & Peral, DISEÑO DE REACTORES PARA FOTOCATÁLISIS: EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS DISTINTAS OPCIONES, 2005).

Para esta parte de resultados es importante destacar que se utilizó la Ec 1 (Anexo G) para obtener el volumen iluminado en el reactor fotocatalítico, el cual dio un valor de 3.42L, por lo que en cada corrida se está iluminando el 42.75% de la solución total, el cual puede verse afectado por el flujo tal y como se verá más adelante.

Así mismo, en la Tabla 3 se observa que se utilizó la fotocatalisis heterogénea solar con $\text{TiO}_2 \text{ P}_{25}$, esto quiere decir, más allá del uso de radiación solar como fuente primaria de excitación de la molécula para degradar los CE, da pie al análisis del catalizador de forma suspendida en una proporción de 0.5 g/L y poder relacionar este valor con el diámetro de la tubería seleccionado. De acuerdo a la bibliografía cuanto menor es la concentración de TiO_2 , menos opaca es la suspensión y mayor va a ser la penetración de la luz; del mismo modo una concentración de 1 g/L de TiO_2 reduce la iluminación a cero después de sólo 10 mm de trayectoria óptica, por lo que si el diámetro del tubo es superior solo la parte exterior estará iluminada (Bhatnagar, 2005). Para el caso del reactor CCP desarrollado en el presente trabajo el diámetro externo del fotorreactor es de 23mm y la concentración del catalizador es de 0.5 g/L por lo que haciendo una suposición en la cual la opacidad de la solución y la concentración del catalizador tiene un comportamiento lineal se puede aseverar que la solución en cada punto del fotorreactor de extremo a extremo estará iluminada. Además, lo anterior se complementa con el hecho de que diversos autores recomiendan valores entre 20 y 50 mm para reactores fotocatalíticos tubulares, destacando que diámetros menores van a suponer unas elevadas pérdidas de carga y valores mayores un excesivo volumen sin iluminar (Salgado Tránsito, 2011).

Por otro lado, de acuerdo a la bibliografía, el efecto del catalizador respecto a la velocidad de degradación fotocatalítica es lineal a bajas concentraciones, continuando así hasta un punto de saturación después del cual la velocidad permanece constante a pesar de incrementar la cantidad de catalizador (Salgado Tránsito, 2011). Este comportamiento se atribuye a una mayor agregación de partículas del fotocatalizador en altas concentraciones lo que ocasiona una disminución en el número de sitios activos en la superficie del catalizador; y a que un incremento en la concentración del fotocatalizador origina una disminución de la transmitancia de la solución, impidiendo el paso de la luz a las regiones interiores del reactor (Herrmann, 2010). Si bien, en el presente trabajo no se varió la concentración del catalizador, si es importante mencionar que es un parámetro importante a tomar en cuenta en prospectiva.

Por otra parte, otro de los parámetros importantes es el pH, en los experimentos realizados se ajustó este parámetro a un valor de 4, esto debido a que este es el pH al cual se obtiene una mayor degradación del NM (González, 2018). Del mismo modo esto anterior tiene razón de ser debido a que la solución de trabajo influye en la forma en la que se carga la superficie del fotocatalizador, la cual a su vez afecta la transferencia electrónica en la interfaz líquido-semiconductor y por lo tanto el procesos

de óxido-reducción. En teoría un pH muy básico ($\text{pH} > 10$) ocasiona que la superficie del fotocatalizador adquiera una carga negativa, lo cual puede favorecer la formación de radicales hidroxilo debido a una mejor transferencia de huecos a especies adsorbidas en la superficie y a la atracción electrostática entre la superficie negativa y contaminantes cargados positivamente. En pH muy ácidos ($\text{pH} < 3$) la superficie del catalizador se carga positivamente, lo cual dificulta la transferencia de huecos; y para $4 < \text{pH} < 10$ la carga de la superficie del fotocatalizador es neutra. No obstante, se encuentra que la velocidad de la degradación fotocatalítica no es alterada significativamente por el pH en el intervalo de 4-10 (Salgado Tránsito, 2011). A excepción de un pH de 6.5, que es cuando la molécula del TiO_2 llega al punto isoeléctrico y la molécula adquiere una carga igual a cero (Valencia, Marín, & Restr, 2011).

En cuanto a la orientación del reactor, dado que nuestro país se encuentra en el hemisferio norte del planeta, de acuerdo a diversos autores de posicionamiento solar tanto en reactores fotocatalíticos como sistemas fotovoltaicos mencionan que la mejor orientación es el Sur y esto es debido a que en esta orientación se garantiza que los sistemas apunten al sol justo cuando éste emana su máximo de radiación durante el mayor tiempo del día.

De la misma forma, el grado de inclinación del reactor respecto a la horizontal en los experimentos fue de 22° , lo que coincide con la latitud del lugar en el que se realizaron los experimentos; se seleccionó este grado de inclinación con el fin de compensar los grados y obtener un aprovechamiento óptimo de la radiación solar tal y como se obtendría en el ecuador, ya que la latitud es la distancia angular que existe entre un punto cualquiera de la superficie terrestre y la el ecuador (Adler, 2013).

Para continuar con el área irradiada o área de captación, esta consta de 6 parábolas de lámina de acero inoxidable 430 calibre 22 y para construir las superficies reflectoras se utilizó la Ecuación 3, la cual describe matemáticamente una parábola con vértice en el origen (0,0), tal y como se muestra en la Figura 4.

$$x^2 = (4P)y = (LR)y \dots \quad \text{Ec.3}$$

Donde:

LR= Lado recto de la parábola (4P)

P= Distancia de un extremo de la parábola al otro extremo pasando por el foco

y= Distancia del origen de la parábola al punto focal

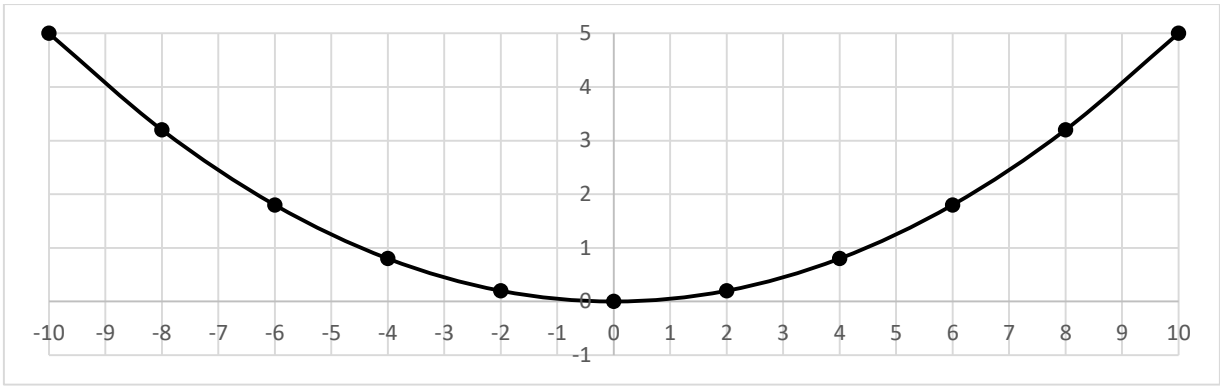


Figura 4. Parábola con vértice en el origen.

Para la construcción del resto del reactor CCP, se procedió tal y como se describió en la sección de metodología, obteniendo como resultado un reactor con una longitud de 120 cm, una anchura de 80 cm y una altura de 8.5 cm. Así mismo, dicho reactor posee un arreglo de 6 parábolas de 23 cm de longitud a manera de superficie reflectante construidas a partir de una lámina de acero 430 calibre 22 con acabado espejo. Para el tubo concentrador o fotorreactor posee un diámetro interior de 20 mm y un diámetro exterior de 23 mm cuyo material es de cuarzo. Finalmente, la estructura que soporta al reactor se construyó a partir de un perfil ángulo ranurado de acero; todo lo anterior se puede observar en la Figura 5 y 6.

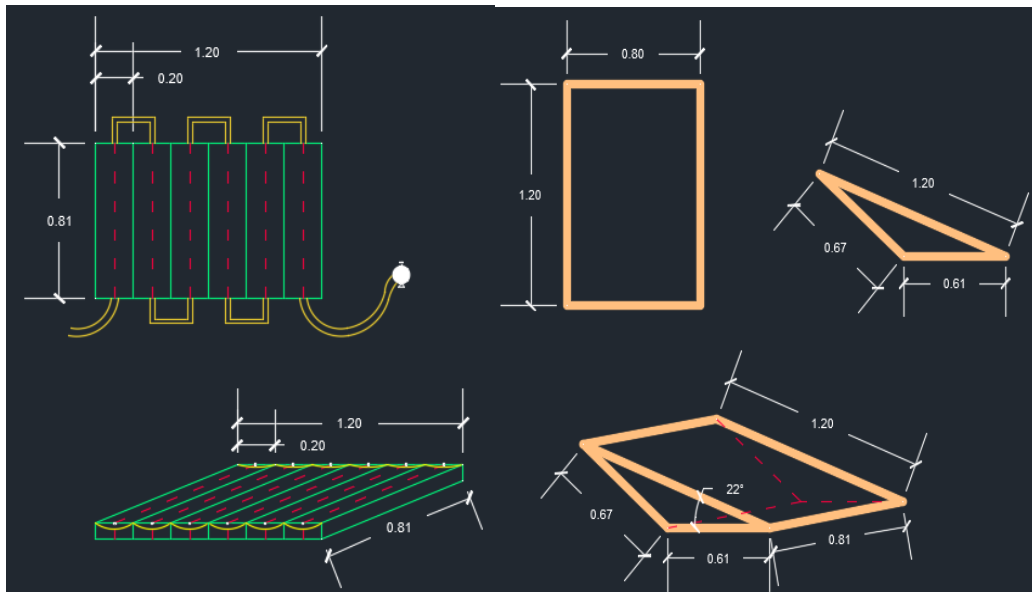


Figura 5. Boceto del reactor CCP a construir (elaboración propia: AutoCAD).



Figura 6. Puesta en marcha del reactor CCP.

Por otra parte el área de captación solar es otro de los parámetros importantes a destacar en el reactor CCP, dicha área iluminada o área de captación se estimó con la Ecuación 2 (Anexo H), obteniendo un valor de 0.69 m^2 , el cual puede ser un parámetro importante en el escalamiento del reactor e incluso poder hacer una comparación con el proceso de degradación fotocatalítica en reactores CPC de 1 sol cuya área iluminada sea igual o similar a 0.69 m^2 .

Algo importante a mencionar del reactor CCP es la utilización de la lámina de acero inoxidable 430 calibre 22 con acabado espejo como superficie reflectante para concentrar la radiación solar, la cual es la aleación más comúnmente utilizada de los aceros inoxidables, ya que presenta una buena resistencia a la corrosión en ambientes medianamente agresivos y es resistente a la oxidación sin contar que es de fácil acceso; más sin embargo no ha sido utilizada en los trabajos citados ni en ningún otro documento revisado en el presente trabajo. No obstante, se debe de tener en cuenta que el problema de la superficie reflectante no ha sido completamente resuelto por el momento, ya que ninguna de las utilizadas hasta ahora cumple con la características de poseer un precio razonable y unas condiciones de eficiencia y durabilidad aceptables (Blanco Gálvez, El reactor solar fotocatalítico, 2005), por lo que observar el comportamiento de este material a lo largo del tiempo podría ser de gran aporte en cuanto a las superficies reflectantes de los reactores fotocatalíticos.

7.2 Medición de la radiación

En cuanto a la medición de la intensidad de radiación y radiación acumulada, se utilizó un microcontrolador (Arduino) y un sensor de luz ultravioleta (ML8511 Sensor) el cual emite una señal analógica que está relacionada linealmente con la intensidad UV medida en (mW/cm^2); para que el sensor cumpliera dicho proceso se programó un código tal y como se muestra en el (Anexo I) y se conectó tal y como se muestra en la Figura 7.

Algo importante a mencionar del sensor ML8511, es que detecta la luz en el rango de 280 a 390 nm, donde es clasificado como parte del espectro UVB y la mayor parte del espectro UVA.

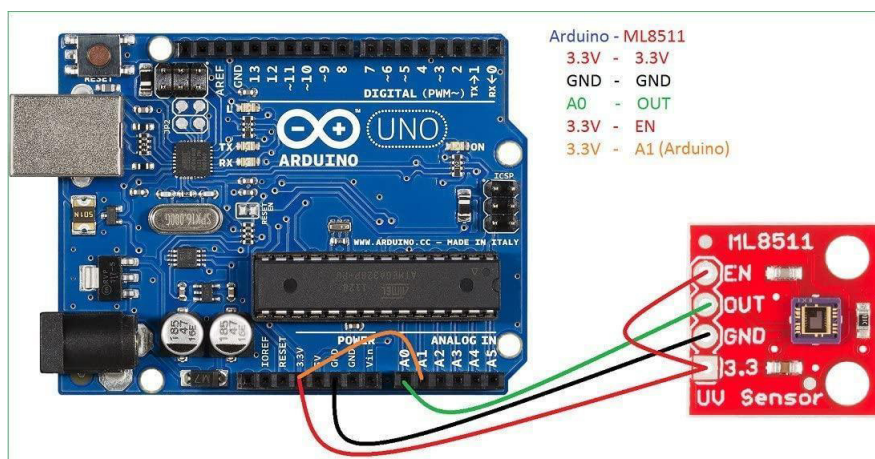


Figura 7. Conexión del sensor al microcontrolador.

Una vez programado y conectado el sensor al microcontrolador, como resultado se obtuvo la intensidad de radiación medida minuto a minuto en cada una de las corridas de degradación obteniendo las gráficas que se mostrarán a continuación.

7.3 Operación del reactor

Para estandarizar el procedimiento de análisis de las muestras se realizó una curva de calibración la cual presentó un $R^2 = 0.999$. El agua a tratar fue preparada siempre con el mismo procedimiento y dispuesta en el mismo reservorio mientras que el fotorreactor fue ubicado en el mismo lugar y la misma dirección Sur para todos los experimentos tal y como se muestra en (Anexo F).

Todos los experimentos se desarrollaron en días soleados o parcialmente soleados entre las 9 a.m. y las 3 p.m.; las intensidades de radiación solar UV recibidas por el fotorreactor en cada uno de los experimentos realizados se muestran en las gráficas siguientes. Por otro lado en la Tabla 4, muestran que la región de Zacatecas en la que se operó el reactor CCP recibe una alta radiación UV comparada con el Valle de Aburrá

en donde se colocó un reactor de placa plana corrugada en la mismas estaciones del año invierno (Tabla 5) (Granda, Marín, Rios, & Restrepo, 2007).

Tabla 4. Radiaciones solares UV promedios en cada experimento.

Experimento	Flujo (L/min)	Día	Intensidad UV promedio (W/m ²)	Valor de radiación de acuerdo con <i>The Weather Chanel</i>
1	6	nov-19	46.48	6, Alto
2	9	nov-25	49.28	6, Alto
3	14	dic-02	50.31	6, Alto

Tabla 5. Radiaciones solares UV promedios en cada experimento obtenido en el Valle de Aburrá (Granda, Marín, Rios, & Restrepo, 2007).

Experimento	Día	Intensidad UV promedio (W/m ²)
1	Ene-17	54
2	Mar-7	59
3	Ene-24	54

7.4 Efecto del flujo de operación en la degradación del contaminante modelo haciendo hincapié en la radiación UV acumulada.

Resultados de degradación a 22° respecto a la horizontal variando el flujo en 6, 9 y 14

En la Figura 8 se muestra el proceso de degradación fotocatalítica mediada por TiO₂ llevado a cabo en un tiempo de 4 horas en el reactor CCP a un ángulo de 22° y un flujo de 6 l/min, destacando una concentración inicial de 18.24 ppm y una concentración final de 0.36 ppm; acumulando una radiación de 672.15 KJ/m² a lo largo de todo el experimento. Así mismo se puede observar que a los 100 minutos ya se había degradado el 50% del NM con una radiación acumulada de 261.8 KJ/m²; y que para los 240 minutos el NM ya se había degradado en un 98% con una radiación acumulada de 672.15 KJ/m².

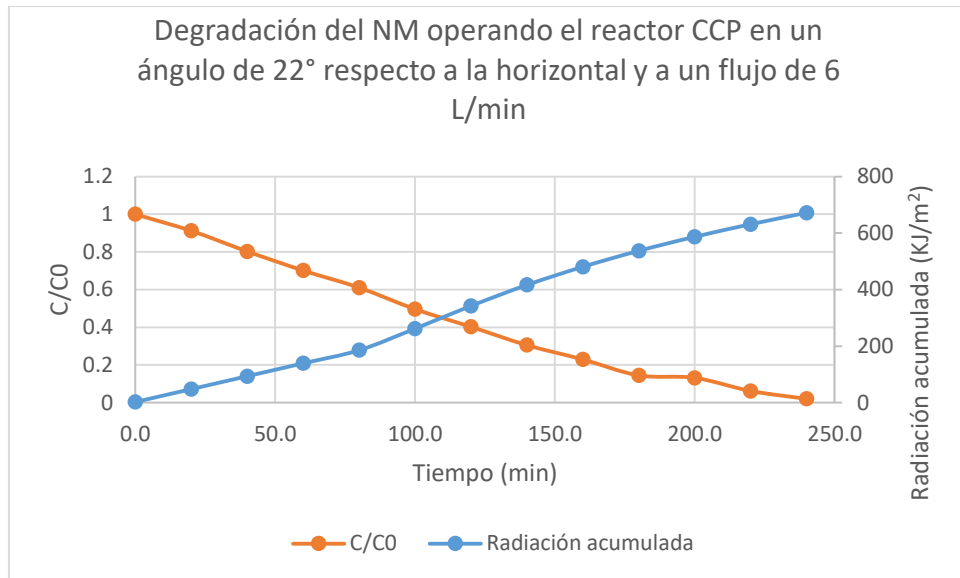


Figura 8. Degradación del NM operando el reactor CCP en un ángulo de 22° respecto a la horizontal y a un flujo de 6 L/min.

En la Figura 9 se muestra el proceso de degradación fotocatalítica mediada por TiO_2 llevado a cabo en un tiempo de 5 horas en el reactor CCP a un ángulo de 22° y un flujo de 9 L/min, destacando una concentración inicial de 18.12 ppm y una concentración final de 1.23 ppm; acumulando una radiación de 890.12 KJ/m² a lo largo de todo el experimento. Así mismo se puede observar que a los 100 minutos ya se había degradado el 36% del NM con una radiación acumulada de 304.24 KJ/m²; y que para los 300 minutos el NM ya se había degradado en un 94% con una radiación acumulada de 890.12 KJ/m².

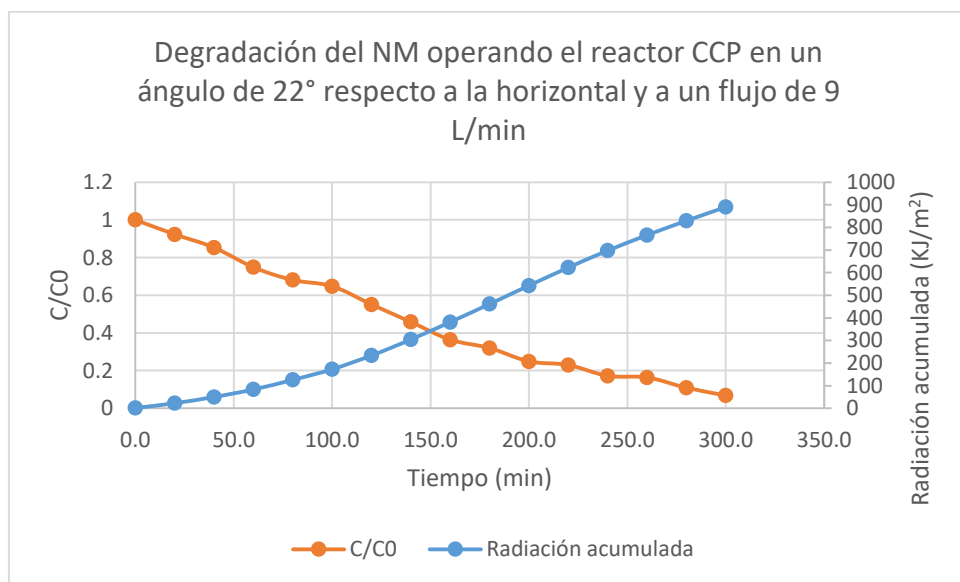


Figura 9. Degradación del NM operando el reactor CCP en un ángulo de 22° respecto a la horizontal y a un flujo de 9 L/min.

En la Figura 10 se muestra el proceso de degradación fotocatalítica mediada por TiO₂ llevado a cabo en un tiempo de 5.3 horas en el reactor CCP a un ángulo de 22° y un flujo de 14 L/min, destacando una concentración inicial de 18.58 ppm y una concentración final de 2.32 ppm. Acumulando una radiación de 969.10 KJ/m² a lo largo de todo el experimento. Así mismo se puede observar que a los 100 minutos ya se había degradado el 35% del NM con una radiación acumulada de 170.80 KJ/m²; y que para los 320 minutos el NM ya se había degradado en un 88% con una radiación acumulada de 969.10 KJ/m².

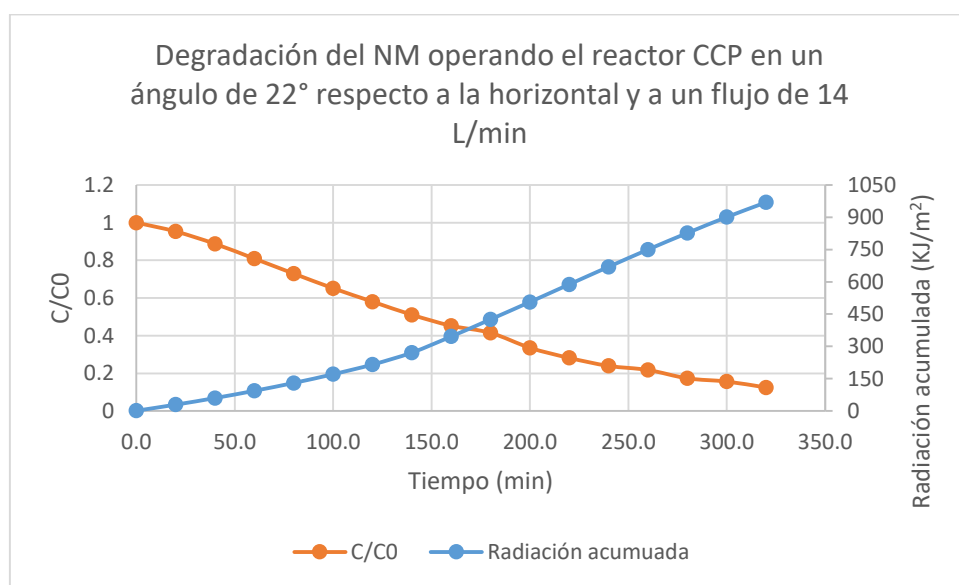


Figura 10. Degradación del NM operando el reactor CCP en un ángulo de 22° respecto a la horizontal y a un flujo de 14 L/min.

A continuación, en la Figura 11 se muestra la curva de degradación fotocatalítica del NM (C/C0) en función del tiempo de exposición a la radiación de cada uno de los flujos de operación 6 (azul), 9 (naranja) y 14 (gris) L/min a 22° respecto a la horizontal utilizando el reactor CCP. En todos los experimentos se utilizó una concentración ≈ 20 mg/L de NM y una concentración de ≈ 5 g/L de TiO₂ P₂₅; y se manejó un volumen total de solución de 8L dentro del depósito de almacenamiento. Así mismo, se muestra la disminución de la concentración del NM (C/C0) en función del tiempo de iluminación. Esto anterior se atribuye a que al haber menos flujo, las moléculas del catalizador es expuesto por mayor a la radiación electromagnética por mayor tiempo induciendo una transición electrónica de la banda de valencia a la banda de conducción, generándose

un hueco en la banda de valencia y un electrón en la banda de conducción (par electrón-hueco) y con ello generando mayor cantidad de $\cdot\text{OH}$, logrando así una degradación más rápida.

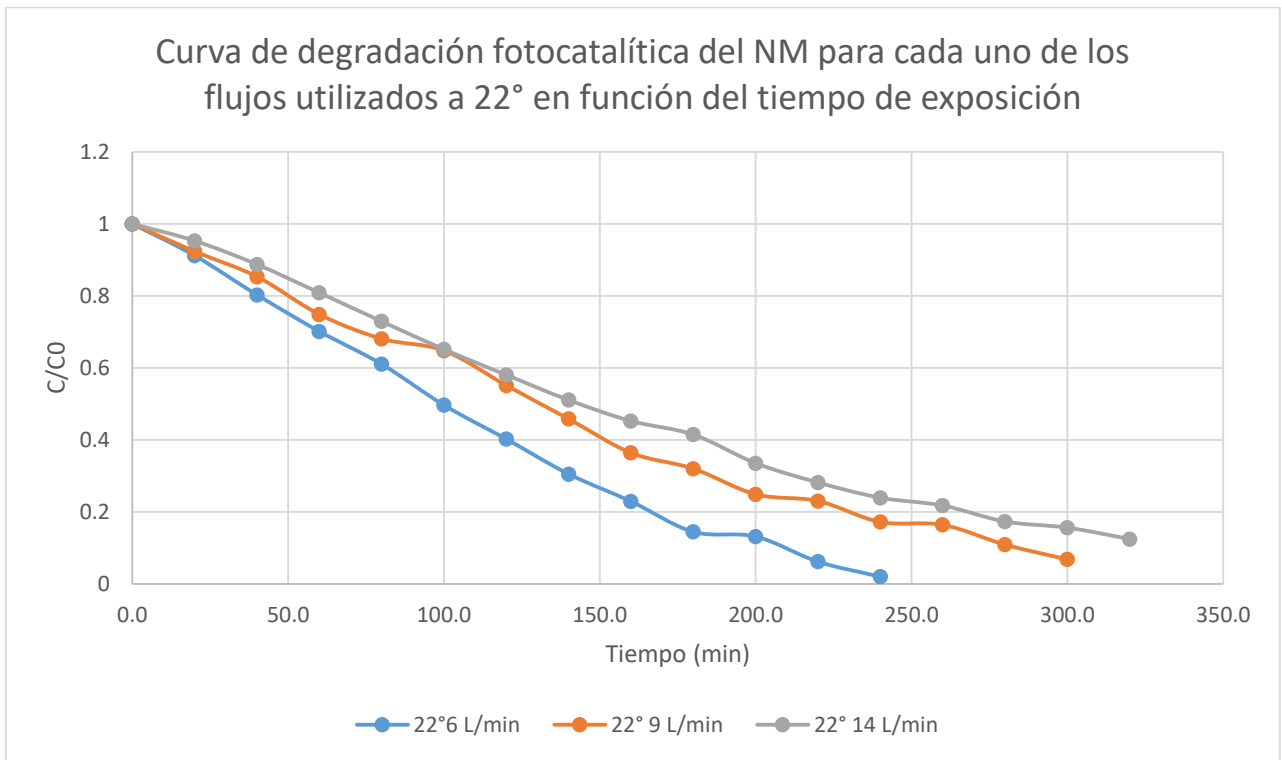


Figura 11. Degradación fotocatalítica del NM (C/Co) en función del tiempo de exposición a la radiación utilizando el reactor CCP.

A continuación, en la Figura 12 se muestra la comparación de los distintos flujos de operación a 22° respecto a la horizontal en función de la radiación acumulada. De acuerdo a (Blanco Gálvez, El reactor solar fotocatalítico, 2005) en un proceso fotocatalítico, especialmente cuando se utiliza una fuente de radiación variable como la energía solar, resulta más eficiente evaluar la razón de degradación en función de la energía UV acumulada.

En la Figura 12 se muestra la degradación del NM en función de la energía UV acumulada, cuyo comportamiento es decreciente a medida que se le suministra radiación al sistema, sin embargo si se logra apreciar una notable diferencia después de los 400 KJ/m² en donde al aumentar el flujo másico requiere una mayor cantidad de radiación para llevar a cabo la degradación fotocatalítica. Por lo que se puede aseverar que con un flujo de 6 L/min requiere una menor radiación acumulada para degradar el contaminante que a un flujo de 9 y 14 L/min respectivamente.

Así mismo en la Figura 12 se observa que para cada experimento la energía proporcionada en cada uno de los experimentos es aprovechada por el catalizador para degradar el NM, con la diferencia que a mayor flujo se requiere mayor radiación para degradar la misma concentración del contaminante modelo.

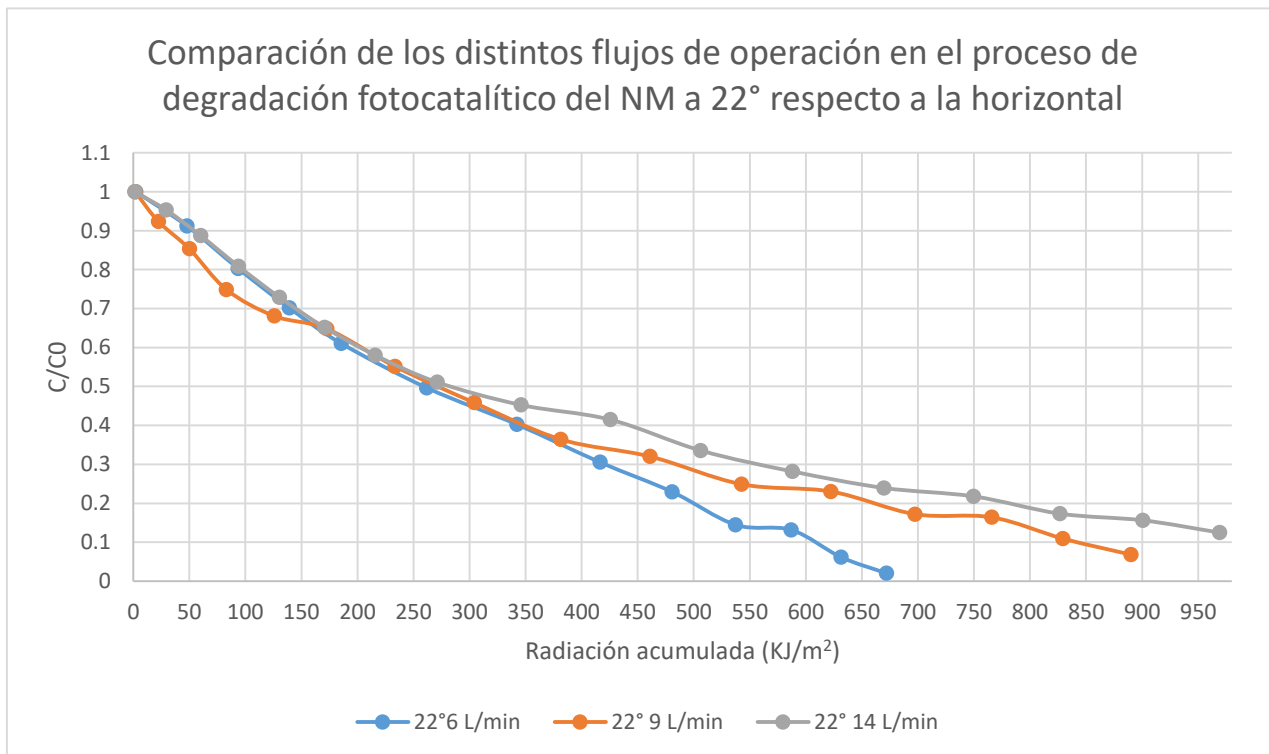


Figura 12. Comparación de los distintos flujos de operación en el proceso de degradación fotocatalítica del NM operando el reactor a 22° respecto a la horizontal.

Finalmente, en la Figura 13 se muestra la velocidad de degradación al utilizar cada uno de los flujos al operar el reactor CCP a 22° respecto a la horizontal, calculando la velocidad de pseudo-primer orden k_0 (min^{-1}) a partir de la pendiente de la ecuación del $\ln C_0/C$ respecto al tiempo. Se puede observar claramente que la velocidad de degradación aumenta en cada uno de los experimentos al disminuir el flujo másico.

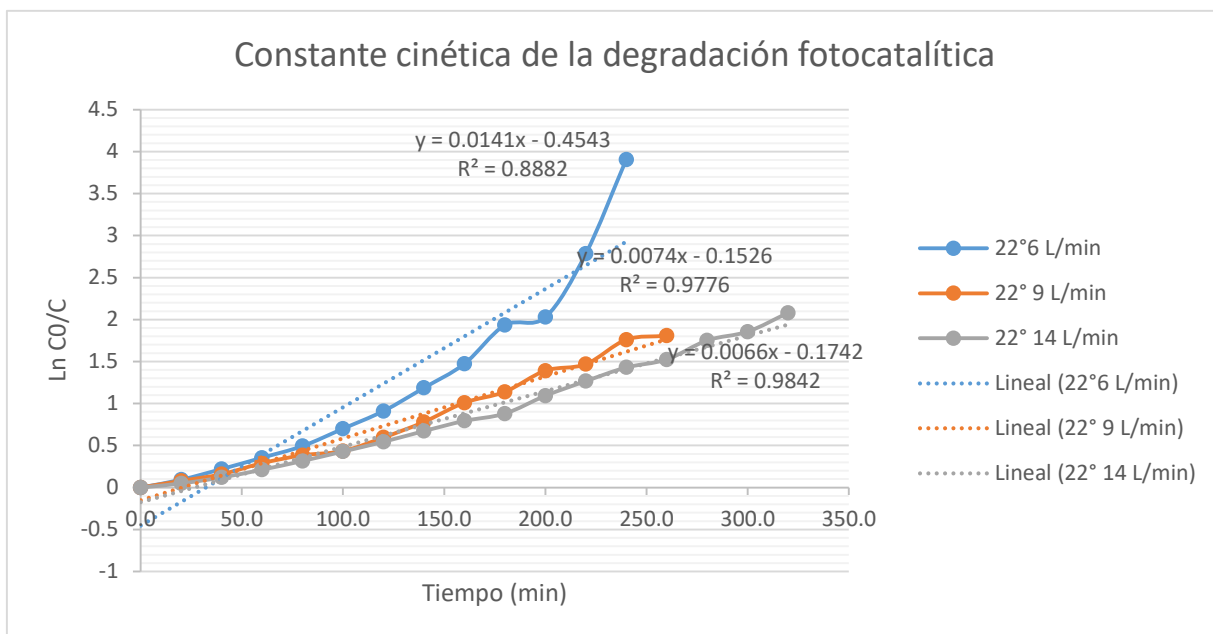


Figura 13. Comparación de la velocidad de degradación para cada uno de los flujos en el proceso fotocatalítico del NM, operando el reactor a 22° respecto a la horizontal.

8. Conclusiones

- Se considera que a lo largo de este proyecto se logró el objetivo general de desarrollar un CCP como alternativa tecnológica de bajo impacto ambiental, para el tratamiento de aguas residuales, como lo es la FHS consiguiendo degradar exitosamente el contaminante NM al utilizar TiO₂ P₂₅ suspendido y radiación solar como fuente de excitación.
- El presente trabajo dio como resultado un reactor CCP con dimensiones de 120 x 80 x 8.5 cm; comprendiendo un arreglo de 6 parábolas de 20 cm de lado recto a manera de superficie reflectante construidas a partir de una lámina de acero 430 calibre 22 con acabado espejo; 6 tubos de cuarzo a manera de fotoreactores con medidas de 80 cm de largo y diámetro externo de 23 mm ;y una estructura con la finalidad de ajuste y soporte construida a partir de un perfil ángulo ranurado de acero con medidas ad hoc al reactor.
- El volumen iluminado en el reactor fotocatalítico CCP es de 3.42L, por lo que en cada corrida se estaría iluminando el 42.75% de la solución total, por otro lado es importante destacar que por el diámetro que posee el reactor CCP (23

mm) y la concentración utilizada del catalizador (0.5 g/L), se puede aseverar que la solución en cada punto del fotorreactor estará iluminada.

- Se concluye en el presente trabajo sobre la contribución de una metodología de fabricación de reactores fotocatalíticos CCP integrados con 6 superficies reflectantes de acero inoxidable 430 calibre 22 la cual presenta una buena resistencia a la corrosión, durabilidad a la intemperie, robustez y alta reflectancia hacia el tubo absorbedor; sin embargo no ha sido utilizada en los trabajos citados ni en ningún otro documento revisado en el presente trabajo, por lo que observar el comportamiento de este material a lo largo del tiempo podría ser de gran aporte en cuanto a las superficies reflectantes de los reactores fotocatalíticos.
- Comparando los flujos de 6, 9 y 14 L/min de la degradación del NM respecto al tiempo se obtuvo que en el flujo de 14 L/min se requiere mayor tiempo para degradar el naranja de metilo seguido del flujo de 9 L/min y del flujo de 6 L/min respectivamente. Obteniendo que, para un flujo de 6, 9 y 14 L/min en 4, 5 y 5.3 h ya se había degradado el 98, 94 y 88% del colorante respectivamente, esto anterior atribuido a que las moléculas del catalizador son expuestas por mayor tiempo a la radiación electromagnética induciendo una transición electrónica de la banda de valencia a la banda de conducción y con ello generando mayor cantidad de $\cdot\text{OH}$.
- Desde el punto de vista de eficiencia energética, la degradación fotocatalítica en función de la radiación acumulada mostró un comportamiento similar en cada uno de los flujos empleados, sin embargo, se logra apreciar una diferencia en cuanto a la energía acumulada que se necesita para degradar el NM; concluyendo que para un flujo de 6, 9 y 14 L/min se necesita una radiación acumulada de 672.15, 890.12 y 969.10 KJ/m² para degradar el NM en un 98, 94 y 88 % respectivamente. Dando cabida a concluir que al utilizar un flujo menor hay un mejor aprovechamiento de la capacidad del catalizador TiO₂ P₂₅ para generar radicales hidroxilo y menores costos en el empleo de bombas de mayor capacidad.
- Mediante el cálculo de la constante cinética de pseudo-primer orden k_0 para saber el comportamiento de la velocidad de degradación en cada uno de los flujos empleados en función del tiempo de exposición, se obtiene que la velocidad de degradación aumenta en cada uno de los experimentos al disminuir el flujo másico siendo estas constantes k_0 de 0.0141, 0.0074 y 0.0066 min⁻¹ para los flujos de 6, 9 y 14 L/min; esto anterior atribuido a la exposición del contaminante y del catalizador a la radiación solar.

- Por último, a manera de conclusión final, se puede mencionar el hecho de que durante el presente trabajo se ha llevado a cabo un importante esfuerzo para desarrollar un reactor fotocatalítico económico y eficiente que permite la ejecución de procesos de degradación de contaminantes emergentes, tales como el NM. Así mismo es importante mencionar que la configuración, los materiales y el modo de operación han sido desarrollados a partir de dos importantes reactores fotocatalíticos, el Captador Parabólico Compuesto (CPC) y el Captador Cilíndrico Parabólico de 1 eje (CCP-1 eje).

9. Recomendaciones o Prospectivas

- A manera de prospectiva, sería necesario colocar un sensor de flujo a la salida de la válvula/entrada del reactor CCP, así como colocar un sensor de PH dentro del tanque de alimentación para observar las fluctuaciones de este parámetro a lo largo del proceso fotocatalítico.
- De igual manera, sería conveniente implementar una bomba de agua con una capacidad de potencia más baja a la utilizada en el presente trabajo (0.5 Hp) con el fin de observar si el comportamiento del flujo respecto al tiempo y la radiación acumulada se sigue cumpliendo y hasta que flujo es conveniente llevar a cabo una degradación más eficiente.
- Como prospectiva se debería de evaluar las condiciones de la lámina de acero 430 calibre 22 y medir la reflectancia respecto a la irradiancia UV a lo largo del tiempo con el fin de saber si pierde eficiencia.
- Se recomienda evaluar el proceso de degradación fotocatalítica con otros contaminantes en solución acuosa preparada a nivel laboratorio con el fin de validar la eficiencia del reactor fotocatalítico y ampliar el número de contaminantes a degradar.
- Una vez que se tenga más experiencia en el manejo de las variables operacionales del reactor CCP, se esperaría realizar estudios de degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos en aguas residuales procedentes de un efluente real.

10. Literatura citada

Guettai, N., & Amar, H. (2005). Photocatalytic oxidation of methyl orange in presence of titanium dioxide in aqueous suspension. *Sciencedirect*, 427-437.

- Almomani, F., Touraud, E., Degorce-Dumas, J., Roussy, J., & Thomas, O. (2002). biodegradability enhancement of textile dyes and textile wastewater by uv photolysis. *Elsevier*, 191-197.
- Bahnemann, D. (2000). Current Challenges in Photocatalysis: Improved Photocatalysis and Appropriate Photoreactor Engineering. *Res. Chem. Intermed*, 207-220.
- Bandala, E., & Goonetilleke, A. (2016). Emerging Contaminants in urban stormwater: challenges and perspectives for sustainable water use . *Brief for GSDR*, 1-4.
- Besson, M., & Gallezot, P. (2001). Catalytic wet air oxidation of Kraft bleaching plant effluents in the persistence of titania and zirconia supported ruthenium. *Applied Catalysis Environmental*, 123-139.
- Bhatnagar, A. (2005). A comparative adsorption study with different industrial wastes as adsorbents for the removal of cationic dyes from water. *ELSEVIER Journal of Colloid and Interface Science*, 49-55.
- Blanco Gálvez, J. (2005). El reactor solar fotocatalítico. *SOLAR SAFE WATER*, 277-302.
- Blanco Gálvez, J., Malato Rodríguez, S., & Peral, J. (2005). DISEÑO DE REACTORES PARA FOTOCATÁLISIS: EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS DISTINTAS OPCIONES. *Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*, 243-266.
- Blanco, J., Malato, S., Estrada, C., Erick, B., & Gelover, S. (2014). PURIFICACIÓN DE AGUAS POR FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA. *ESTADO DEL ARTE*, 51-76.
- Blanco, J., Malato, S., Milow, B., Maldnado, M., Fallmann, H., Krutzler, T., & Bauer, R. (1999). Techno-economical assessment of solar detoxification systems with compound parabolic collectors. *CIEMAT Spain*, 259-264.
- Carvajal, Á., Jiménez, L., Ramírez, V., & Albeiro, H. (2013). Evaluación de la degradación por fotocatalisis heterogénea del ácido 3,5-dinitrosalicílico. *Redalyc Scientia Et Technica*, 206-212.
- Dillert, R., Cassano, A. E., Goslich, R., & Bahnemann, D. (1999). Large scale studies in solar catalytic wastewater treatment. *Chemical Engineering and Materials Research Information Center*, 267-282.
- Ehrampoush, M., Moussavi, G., Ghaneian, M., Rahimi, S., & Ahmadian, M. (2010). Removal of Methylene Blue (MB) Dye from Textile Synthetic Wastewater Using TiO₂/UV-C Photocatalytic Process. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4279-4285.
- Enzweilwe, R. (1994). A Pilot Scale Investigation of Photocatalysis Detoxification of BETX Water. *ASME*.

- Flores Espinosa, R., Hernández Hernández, M., Perusquía del Cueto, M., Bonifacio Martínez, J., Jiménez Becerril, J., Huemantzin balan, G., & Lugo Hernández Martín. (2015). Diseño de Micro-reactores y Prototipos Fotocatalíticos Solares. *ININ*, 1-5.
- Garcés, L. F., Mejía, E. A., & Santamaría, J. J. (2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento. *Lasallista de investigación*, 83-92.
- García Gómez, C., Gortáres Moroyoqui, P., & Drogui, P. (2011). Contaminantes emergentes: efectos y tratamientos de remoción. *Redalyc*, 96-105.
- Gil, M., Soto, A., Usma, J., & Gutiérrez, O. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*, 52-73.
- González, D. (01 de Octubre de 2018). EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA (TiO₂/UV) Y HOMOGÉNEA (FOTO-FENTON) PARA LA DEGRADACIÓN DEL NARANJA DE METILO COMO CONTAMINANTE MODELO. (*Tesis de licenciatura*). Instituto Politécnico Nacional, Zacatecas, Zacatecas, México.
- Granda, F., Marín, J., Rios, L., & Restrepo, G. (2007). TiO₂ SOPORTADO SOBRE RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS: EVALUACIÓN EN UN SISTEMA FOTORREACCIONANTE ACTIVADO CON RADIACIÓN SOLAR . *Scientia et Technica Año XIII*, 411-416.
- Hammond, G., Turro, N. (1963). Science. En *Ciencias* (págs. 1542-1608). American Association for the Advancement of Science.
- Hernández, J., García, L., García, R., Cueto, A., & Carmona, J. (2012). ESTUDIO CINÉTICO DE LA FOTODEGRADACIÓN DEL NARANJA DE METILO EN PRESENCIA DE TiO₂: EFECTO DE LA FUENTE DE RADIACIÓN U.V., CONCENTRACIÓN DEL AZO-COLORANTE Y DEL CATALIZADOR. *Redalyc*, 25-34.
- Herrmann, J. (2005). Heterogeneous photocatalysis: state of the art and present applications. *Springer Link*, 49-65.
- Herrmann, J. (2010). Fundamentals and misconceptions in photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A Chemistry*, 85-93.
- Malato, S., Fernández-Ibañez, P., Maldonado, M., Blanco, J., & Gernjak, W. (2009). Descontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. *Catalysis today*, 1-59.
- Martínez Hernández, A. (2010). "DEGRADACIÓN DE AZUL DE METILENO Y 4-CLOROFENOL POR FOTOCATÁLISIS CON LUZ ULTRAVIOLETA, UTILIZANDO TiO₂ COMO CATALIZADOR" . *INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA*.

- Masakazu, A., Takahito, S., & Yutaka, K. (1985). ESR AND PHOTOLUMINESCENCE EVIDENCE FOR THE PHOTOCATALYTIC FORMATION OF HYDROXYL RADICALS ON SMALL TiO₂ PARTICLES. *CSJ Journals*, 1799-1802.
- May, E., Gee, R., Wickham, D., Laftloon, L., & Wright, J. (1991). Design and Fabrication of a Prototype Solar Receiver/Reactors for the Solar Detoxification of Contaminated Water. *NREL*, 1-19.
- Mehos, M., & Turchi, C. (1992). The solar Detoxification Field Experiment: A Pilot-Scale Investigation of the Solar Detoxification Technology. *CIEMAT Spain*, 1107-1122.
- Mercado, C., & Lam, E. (2015). EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE DESALINIZACIÓN SOLAR, TIPO CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO DE AGUA DE MAR. *Redalyc*, 19-28.
- Mills, A., & Hunte, S. (1997). An overview of semiconductor photocatalysis. *Elsevier*, 1-35.
- Monsalve, E., Marín, J., Montoya, J., Rios, L., Grandia, C., & Restrepo, G. (2007). DEGRADACION DE NARANJA DE METILO EN UN NUEVO FOTORREACTOR SOLAR. *Scientia et Technica Año XIII*, 435-440.
- Quintana, J., Boj, P., Crespo, J., Pardo, M., & Satorre, M. (1997). Line-focusing holographic mirrors for solar ultraviolet energy concentration. *OSA Publishing*, 3689-3693.
- Rebagliato Torregrosa, S. (2015). OPTIMIZACIÓN DE UN PROCESO DE DEGRADACIÓN DE AGUA PROCEDENTE DE LA INDUSTRIA DEL COCIDO DEL CORCHO MEDIANTE UN TRATAMIENTO COMBINADO DE OZONO Y LUZ UV-VISIBLE. *Universidad Politécnica de Valencia*, 1-107.
- Román Rodríguez, A. (2001). Estudios de fotocatalisis en los compuestos orgánicos tóxicos DBSNA y carbarilo. *DEPFI-UNAM*.
- Saettone, E., Paredes, L., Quino, F., Ponce, Á., Eyzaguirre, P. (2016). MEDIDAS DE RADIACIÓN UV EN UN CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO TRUNCADO Y CÁLCULO DEL PODER ÓPTICO DE CONCENTRACIÓN BAJO DISTINTAS CONDICIONES CLIMÁTICAS PARA SU APLICACIÓN EN UN REACTOR DE FOTOCATÁLISIS. *Instituto de Investigación Científica (IDIC)*, 1-8.
- Salgado Tránsito, I. (2011). Diseño, construcción y puesta en marcha de una planta solar de degradación fotocatalítica de aguas contaminadas. *CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA*, 1-100.
- Su, W., Chen, J., Wu, L., Wang, X., Wang, X., & Fu, X. (2008). Visible light photocatalysis on praseodymium (III)-nitrate-modified TiO₂ prepared by an ultrasound method. *Applied Catalysis Environmental*, 264-271.

11. Anexos

Anexo A.

Para los tubos en los que fluirá el agua se realizará un corte en el tubo de cuarzo con el fin de que queden de 96 cm.

Para la longitud de las parábolas se utilizó la siguiente fórmula:

$$y=x^2/4a$$

Donde:

$$p = 5 \text{ cm}$$

$$4p = LR = 20$$

LR = Lado recto

∴ la longitud de arco es igual a 22.95 cm ≈ 23 cm

Para la base, ésta debe de estar orientada al Sur con una inclinación de 22° y para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Sen}\alpha = \text{Co}/\text{Hip}$$

Donde:

$$\alpha = 22^\circ$$

$$\text{Hip} = 80 \text{ cm}$$

∴ se realiza un despeje del cateto opuesto con el fin de obtener la altura correspondiente al ángulo, dicha altura es de 52 cm.

Anexo B.



Figura 14. Corte de la lámina de acero 430 calibre 22 para la construcción del marco y la superficie reflectora.

Anexo C.



Figura 15. Reactor CCP, arreglo de 6 parábolas.

Anexo D.

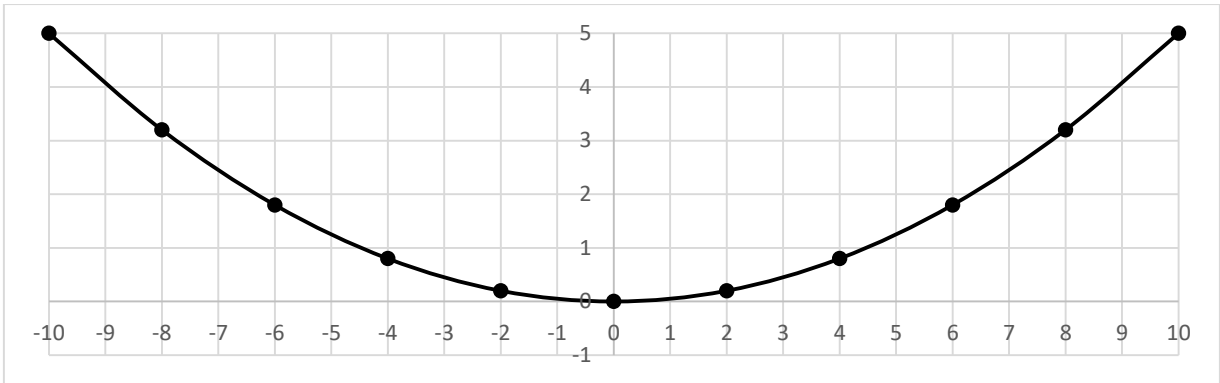


Figura 16. Boceto de la superficie reflectante (parábola y eje focal).

Anexo E.



Figura 17. Preparación de soluciones de NM a 20 ppm.

Anexo F.



Figura 18. Puesta en marcha del reactor CCP.

Anexo G.

$$V_{ilum} = \frac{\pi \cdot (D - 2\delta)^2}{4} L_{tub} \times N_{tub}$$

Donde:

V_{ilum} – Volumen iluminado [m³]

D – Diámetro exterior del tubo [m]

L_{tub} – Longitud de cada tubo [m]

N_{tub} – Numero de tubos

δ – Espesor del tubo [m]

V iluminado L	3.4227948		
Diam exterior (m)	0.023		
Long del tubo (m)	0.8		
Numero de tubos	6		
Espesor del tubo	0.003		

Figura 19. Cálculo para obtener el volumen iluminado dentro del reactor.

Anexo H.

$$A_c = (2 \cdot \pi \cdot D) \cdot N_{\text{tubo}} \times L_{\text{tubo}}$$

Ac	0.69366528	m2
Diam exterior (m)	0.023	
Long del tubo (m)	0.8	
Numero de tubos	6	
Espesor del tubo	0.003	

Figura 20. Cálculo para obtener el área de captación.

Anexo I.

```

#include <ML0511.h>

int UV00T = A5; //Output from the sensor
int REF_3V3 = A4; //3.3V power on the Arduino board
float aux=0, promedio=0;
int i=0;

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(UV00T, INPUT);
  pinMode(REF_3V3, INPUT);
}

void loop(){
  if(i<1000){ //limite de muestras
    int uvLevel = averageAnalogRead(UV00T);
    int refLevel = averageAnalogRead(REF_3V3);
    //Use the 3.3V power pin as a reference to get a very accurate output value from sensor
    float outputVoltage = 3.3 / refLevel * uvLevel;
    float uvIntensity = mapfloat(outputVoltage, 0.99, 2.9, 0.0, 15.0);
    aux=aux+uvIntensity*10;
    Serial.print(" Intensidad UV (W/m^2): ");
    Serial.print(uvIntensity*10);
    Serial.print("      Valor acumulado: ");
    Serial.print(aux);
    Serial.println();
    i++;
    delay(1000); //Tiempo en que captura la radiación cada m.in
  }
  else if(i==1000){
    promedio=aux/1000; //promedio
    Serial.print("Promedio de UV: ");
    Serial.print(promedio);
    Serial.println();
    i++;
  }
}

int averageAnalogRead(int pinToRead)
{
  byte numberOfReadings = 1;
  unsigned int runningValue = 0;
  for(int x = 0 ; x < numberOfReadings ; x++)
    runningValue += analogRead(pinToRead);
  runningValue /= numberOfReadings;
  return(runningValue);
}

//The Arduino Map function but for floats
float mapfloat(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float out_max)
{
  return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min;
}

```

Figura 21. Código utilizado para medir la radiación solar y su posterior acumulación.