



**CENTRO DE ESTUDIOS
E INVESTIGACIONES AMBIENTALES DE LA
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**



**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE DESINFECCIÓN DE AGUA CRUDA
MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR A TRAVÉS DE
UN COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO**

**MÓNICA ANDREA GUALDRÓN MENDOZA
SLENDY PÁEZ MACAREO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2006



**CENTRO DE ESTUDIOS
E INVESTIGACIONES AMBIENTALES DE LA
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**



**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE DESINFECCIÓN DE AGUA CRUDA
MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR A TRAVÉS DE
UN COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO**

**MÓNICA ANDREA GUALDRÓN MENDOZA
SLENDY PÁEZ MACAREO**

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Químico**

Director

**EDGAR FERNANDO CASTILLO MONROY
Ingeniero Químico, PhD.**

Codirector

**JULIO ANDRÉS PEDRAZA AVELLA
Ingeniero Químico, Msc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2006

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Edgar Castillo por su confianza, apoyo y motivación durante el desarrollo del proyecto.

A Julio Andrés Pedraza por su gran colaboración, dedicación y entusiasmo.

Al Ing José Gregorio Ardila, por su compañía y alegría en los momentos más difíciles.

A la Doctora Gloria Restrepo y al Grupo de Procesos Físicoquímicos Aplicados de la Universidad de Antioquia, por su colaboración.

A Carlos Fidel Granda, por sus enseñanzas y paciencia.

A Anderson Quiroga por su colaboración.

A Doris Obando por su compañerismo y apoyo.

A Jaime por su disposición a ayudarnos.

Al Ing Luis Carlos Rodríguez por brindarnos un lugar para el desarrollo de las pruebas.

Al Profesor José Alejandro Amaya por su apoyo.

*A Dios, que me dio la fuerza, el valor y sobre todo la sabiduría,
para hacer posible esta etapa de mi vida*

*A mis padres, que con sus grandes esfuerzos y sacrificios lograron
hacer de mí una persona de bien, y de los cuales siempre seré
orgullosa de ser su hija, y a quienes debo infinita gratitud*

A mi hermana Tita por su apoyo incondicional

A Jairo, mi novio, por su amor, comprensión y constantes palabras de ánimo

*A mis amigos, Slendy, Andrea, Carolina y Javier por brindarme su
amistad y por todos los momentos compartidos*

*A todos aquellos que han estado conmigo durante
esta larga trayectoria.*

Mónica Andrea...

*A Dios por ser la luz y el motor que guía mi vida,
y por darme la sabiduría para alcanzar esta meta,
A Vicente y Leticia, mis Padres, por su apoyo incondicional, sus oraciones, su dedicación y
esfuerzo, sus consejos, por enseñarme a no limitar los sueños por realizar, y porque además
de ser mis padres son mis amigos...gracias a ellos hoy soy quién soy,
A Mauricio, mi hermano, por su alegría, su comprensión y por su compañía,
A Mario, mi novio, por su amor y por ser el soporte durante toda mi carrera,
A mis abuelos, por todas sus enseñanzas y por todo el cariño que me han dado
A mis amigos y confidentes, Mónica, Andrea, Jairo, Javier y Carolina por todas esas
aventuras que han llenado mi vida de bellos momentos,
Y a todas aquellas personas que han sido parte importante en mi vida...*

Slendy...

*“Nunca andes por el camino trazado...
Pues él conduce únicamente hacia donde otros fueron”*

Anónimo

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 RADIACIÓN SOLAR	3
1.1.1 Posición del Sol	4
1.1.2 La Trayectoria Solar	4
1.2 DESINFECCIÓN DEL AGUA	5
1.2.1 Métodos de desinfección	6
1.2.2 Técnicas de Análisis Microbiológico del Agua	9
1.3 COLECTORES SOLARES	9
1.3.1 Colectores Cilindro-Parabólicos (CCP)	10
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO	12
2.1 Concentrador	14
2.2 Base del concentrador	16
2.3 Armazón	16
2.4 Tubo receptor	17
2.5 Intercambiador de calor	18
2.6 Filtro de arena	18
2.7 Tanque de almacenamiento	19
2.8 Seguidor solar	19
2.9 Sistema de control térmico	20
3. EVALUCIÓN TÉRMICA Y TÉRMICA-FOTOCATALÍTICA DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO	22
3.1 PRUEBAS DE DESINFECCIÓN	22
3.1.1 Pruebas térmicas	23
3.1.2 Pruebas térmico-fotocatalíticas	24

3.2 PRUEBAS DE OPERABILIDAD	25
3.2.1 Pruebas térmicas	25
3.2.2 Pruebas térmico-fotocatalíticas	26
3.3 EFICIENCIA TÉRMICA DEL CCP	29
3.4 CÁLCULO DEL ÁREA DE UN COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO CON UNA CAPACIDAD DE DESINFECCIÓN DE 1 M ³ /DÍA.	31
3.5 COMPARACIÓN DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO DE ESTE TRABAJO CON RESPECTO A LOS DOS COLECTORES CONSTRUIDOS ANTERIORMENTE	32
CONCLUSIONES	34
RECOMENDACIONES	35
BIBLIOGRAFÍA	36
ANEXOS	40

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Pruebas de brillo	15
Tabla 2: Análisis microbiológico del agua - Proceso térmico	23
Tabla 3: Análisis microbiológico del agua - Proceso térmico- Fotocatalítico	24
Tabla 4: Comparación de los colectores estudiados	32

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Movimientos del sol respecto al horizonte	4
Figura 2: Representación del proceso fotocatalítico en una partícula de TiO ₂	8
Figura 3: Colector Cilindro Parabólico	10
Figura 4: Diagrama de bloques del desarrollo experimental	12
Figura 5: Sistema de desinfección	13
Figura 6: Concentrador	14
Figura 7: Pruebas de brillo	15
Figura 8: Esquema del armazón del colector parabólico	17
Figura 9: Tubo receptor de vidrio Pyrex	17
Figura 10: Intercambiador de Calor	18
Figura 11: Filtro de Arena y tanque de polietileno	19
Figura 12: Sistema de reducción de potencia	20
Figura 13: Sistema de Control	21
Figura 14: Porcentaje de remoción de coliformes - Proceso térmico	23
Figura 15: Porcentaje de remoción de coliformes - Proceso térmico-fotocatalítico.	24
Figura 16: Resultados del proceso térmico a 60°C (20 de marzo de 2006)	25
Figura 17: Resultados del proceso térmico a 70°C (19 de marzo de 2006)	26
Figura 18: Resultados del proceso térmico-fotocatalítico a 60°C (30 de marzo de 2006)	26
Figura 19: Resultados del proceso térmico-fotocatalítico a 70°C (29 de marzo de 2006)	27
Figura 20: Influencia de la radiación solar y la temperatura en el	

volumen de agua tratada	28
Figura 21: Eficiencia térmica del CCP (Proceso Térmico a 70°C)	30
Figura 22: Eficiencia térmica CCP (Proceso Térmico-Fotocatalítico a 60°C)	30

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. CONCEPTOS TEÓRICOS	40
ANEXO B. ANÁLISIS DE COSTOS DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO	53
ANEXO C. TÉCNICA DEL NÚMERO MÁS PROBABLE (NMP)	54
ANEXO D. PREPARACIÓN DE LA PELÍCULA DE TiO ₂	59
ANEXO E. BALANCE ENERGÉTICO DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO	61
ANEXO F. ANÁLISIS POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA REGIÓN	75
ANEXO G. DATOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS	80
ANEXO H. PLANOS Y FOTOGRAFÍAS DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO	93

RESUMEN

Título: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE DESINFECCIÓN DE AGUA CRUDA MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR A TRAVÉS DE UN COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO*

Autores: Mónica Andrea Gualdrón Mendoza, Slendy Páez Macareo**

Palabras Claves: Agua, desinfección, fotocátalisis, colector cilindro parabólico, energía solar.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo surge de la necesidad que tienen las poblaciones rurales por desinfectar el agua proveniente de sus fuentes naturales de abastecimiento. Con este propósito se pretende aprovechar el potencial energético solar con el que cuenta nuestro país, mediante la aplicación combinada de procesos térmicos y fotocatalíticos que hacen uso de la radiación solar.

Para cumplir tal objetivo se diseñó y construyó un colector solar de tipo cilindro parabólico (CCP) a pequeña escala de concentración media de energía, que puede ser transportado e instalado con facilidad en regiones que carecen de los servicios básicos y es de fácil operación.

Mediante la aplicación de los métodos térmico y térmico-fotocatalítico (TiO_2 Degussa P25) se realizaron pruebas de desinfección con muestras de agua del Río de Oro tomadas a la altura del municipio de Piedecuesta (Santander), para cada método fue necesario encontrar una temperatura a la cual fuera posible la disminución en la concentración de coliformes presentes en el agua, de tal forma que su calidad mejorara microbiológicamente para ser destinada para consumo humano.

Los resultados obtenidos permiten concluir que aunque la luz solar por sí sola tiene un efecto bactericida, el TiO_2 en presencia de radiación solar inactiva los coliformes más rápidamente, lo que hace de este un método efectivo para el tratamiento del agua para consumo humano. Se comprobó que una desinfección fotocatalítica con TiO_2 es efectiva aún a menores temperaturas comparada con la desinfección térmica.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Ph.D Edgar Fernando Castillo Monroy

ABSTRACT

Title: EVALUATION OF THE POTENTIAL OF DISINFECTION OF WATER BY MEANS OF THE UTILIZATION OF THE SOLAR POWER ACROSS A COLLECTOR PARABOLIC CYLINDER*

Authors: Mónica Andrea Gualdrón Mendoza, Slendy Páez Macareo**

Keywords: Water, disinfection, photocatalysis, collector parabolic cylinder, solar power.

DESCRIPTION:

This work arises from the need that some rural populations have for disinfecting the water proveniente of their natural sources of supply. With this intention it is looked for to take utility of the energetic solar potential that our country have, by means of combined application of thermal and thermal-photocatalytic processes that use the solar radiation.

To reach such target a kind of parabolic cylinder solar collector (CCP) was designed and constructed on a small scale of average concentration energy, which can be transported, installed and operated with facility in regions that lack the basic services

By means of the application of thermal and thermal photocatalytic methods (TiO₂ Degussa P25) they were carried out tests of disinfection with water samples of the Gold river taken at a height of Piedecuesta's municipality (Santander), for every method it was necessary to find a temperature to which the decrease in the concentration of coliformes presents in the water was possible, in such a way that its quality was improving microbiologically to be destined for human consumption.

The obtained results allow to conclude that though the solar light for itself has a bactericidal effect, the TiO₂ in presence of solar radiation unactivates the coliformes more rapidly, which does of this one an effective method for the treatment of the water for human consumption. There was verified that a thermal photocatalytic disinfection with TiO₂ is effective still in lower temperatures compared with the thermal disinfection.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineerings. School of Chemical Engineering. Ph.D Edgar Fernando Castillo Monroy

INTRODUCCIÓN

Este trabajo surge de la necesidad que tienen las poblaciones rurales por desinfectar el agua proveniente de sus fuentes naturales de abastecimiento. La falta de acceso al agua de consumo de buena calidad constituye un riesgo elevado de transmisión de enfermedades como diarreas, cólera, fiebre tifoidea, hepatitis A y disentería. En países en vía de desarrollo, más de un tercio de la población no tiene acceso al agua de consumo segura, siendo la población rural el sector más afectado. En Colombia el 97% de la población urbana y sólo el 56% de la población rural tienen acceso al servicio de agua potable.¹

Con este propósito se pretende aprovechar el potencial energético solar con el que cuenta nuestro país, mediante la aplicación combinada de procesos térmicos y fotocatalíticos que hacen uso de la radiación solar.

Para cumplir tal objetivo se diseñó y construyó un Colector solar de tipo Cilindro Parabólico (CCP) a pequeña escala de concentración media de energía, que puede ser transportado e instalado con facilidad en regiones que carecen de los servicios básicos (electricidad, gas doméstico y agua potable) y es de fácil operación.

El presente documento describe el desarrollo del trabajo y muestra los resultados obtenidos.

¹ FERNÁNDEZ C., Alicia. Cobertura de Agua Potable para América Latina y el Caribe. Universidad de Buenos Aires.

www.cnea.gov.ar/./Present%20Dra%20Fernandez%20Cirelli%20Situacion%20Agua%20Potable.pdf

El primer capítulo presenta los fundamentos teóricos que se tuvieron en cuenta durante el desarrollo de este proyecto.

El segundo capítulo describe el proceso de construcción de cada una de las partes que conforman el colector cilindro parabólico.

En el tercer capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas con su respectivo análisis y discusión.

Finalmente, se presentan las conclusiones de este trabajo y algunas recomendaciones.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos para el diseño y desarrollo experimental de un colector cilindro parabólico, que aprovecha el potencial energético solar para la desinfección de aguas crudas provenientes de fuentes naturales y que son empleadas en comunidades rurales.

En la primera parte se enuncian los conceptos básicos de la radiación solar y los fundamentos de la desinfección microbiológica de aguas por los métodos térmico y fotocatalítico con dióxido de titanio. Y seguidamente se presentan las generalidades de los colectores solares. En el Anexo A se presenta información adicional sobre estos temas.

1.1 RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar desde el punto de vista de la distribución espectral se divide en tres regiones: la región ultravioleta (UV) ($\lambda < 400$ nm), la región visible ($400 < \lambda < 750$ nm) y la región infrarroja (IR) ($\lambda > 750$ nm).

Por su parte, la radiación UV se divide en tipo A (315-400 nm), tipo B (280-315 nm) y tipo C (100-280 nm). La radiación ultravioleta C tiene gran poder bactericida, pero no está presente en cantidad apreciable en la radiación solar que llega a la tierra.

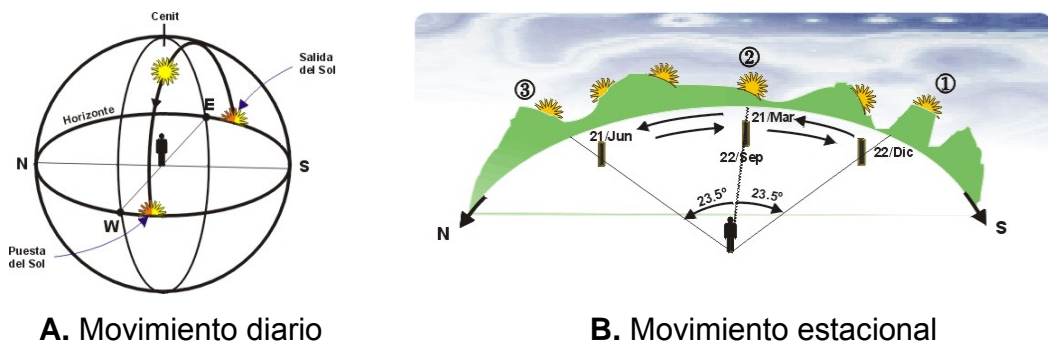
La radiación global que llega a la superficie terrestre puede ser expresada como la suma de tres componentes: radiación directa, difusa y reflejada. La radiación directa tiene interés práctico cuando se quiere concentrar la luz solar, siendo importante su componente direccional. La radiación difusa puede ser aprovechada

en algunos sistemas fotocatalíticos como el colector Cilindro Parabólico Compuesto (CPC).

La cantidad de radiación puede ser expresada en W/m^2 o erg/cm^2 , cal/cm^2 , o el Einstein (1 mol de fotones: $6,023 \times 10^{23}$ fotones).

1.1.1 Posición del Sol: El sol presenta básicamente dos movimientos con relación a la tierra. El primero es el movimiento diario del sol respecto al horizonte. Este consiste en la aparición del sol por el lado Este del horizonte, posteriormente el sol se levanta y alcanza una altura máxima, atraviesa el cielo y se oculta por el lado Oeste del horizonte. El segundo movimiento es el que realiza el sol anualmente respecto al horizonte (movimiento estacional).

Figura 1: Movimientos del sol respecto al horizonte.



Fuente: DUARTE, Esteve. Astronomía de posición. <http://www.astrogea.org>

1.1.2 La Trayectoria Solar: La localización aparente del sol² depende de una serie de parámetros de los cuales los más importantes son:

- La *latitud*, que puede variar en un rango de $\pm 90^\circ$ entre los polos geográficos norte y sur.

² El término localización aparente hace referencia a la situación del sol en un sistema de coordenadas local, centrado en un punto problema con una referenciación geográfica concreta.

- La declinación solar, variable según la época del año en un rango de $\pm 23,5^\circ$ entre los solsticios de verano e invierno.
- El ángulo horario, dependiente de la hora del día y variable en un círculo de 360° centrado en el punto analizado.

La localización del sol se suele expresar en coordenadas esféricas: azimut (φ) y elevación angular sobre el horizonte (θ), cuyas expresiones están dadas por:

$$\begin{aligned} \text{sen}\theta &= (\text{sen}D * \cos L) + (\cos D * \text{sen}L * \cos H) \\ \cos\varphi &= \frac{(\cos L * \text{sen}D) - (\cos D * \text{sen}L * \cos H)}{\cos\theta} \end{aligned} \quad (1)$$

donde D representa la declinación solar, L la latitud geográfica del punto (positiva en el hemisferio Norte y negativa en el Sur) y H el ángulo horario.

La declinación solar (D) para una determinada época del año se expresa en grados sexagesimales y puede estimarse a partir de tablas o aproximadamente mediante expresiones empíricas. La expresión más simple se presenta en la ecuación 2, donde d es el ordinal del día del año, siendo 1 el primero de enero.

$$D = 23.5 * \text{sen}[0.986 * (284 + d)] \quad (2)$$

El ángulo horario suele tomarse como cero en el mediodía, negativo hacia el Este y positivo hacia el Oeste, con intervalos de 15° por hora: por ejemplo, a las 10 a.m. el ángulo horario es de -30° .

1.2 DESINFECCIÓN DEL AGUA

El agua, alimento esencial para los animales incluido el hombre, frecuentemente actúa como vehículo de transmisión de microorganismos entéricos. La norma

colombiana (Decreto 475 de 1998) establece que el agua es apta bacteriológicamente para consumo si se encuentra exenta de microorganismos patógenos de origen entérico y parasitario intestinal. Ellos transmiten enfermedades tales como colera (*Vibrio Cholerae*), amebiasis (*Entamoeba histolytica*), alteraciones gastrointestinales (*Aeromonas mesófilas*, *Helicobacter pylori*), giardiasis (*Giardia Lamblia*), etc.

La evaluación de la calidad microbiológica del agua de abastecimiento humano se basa en la determinación de indicadores bacterianos, coliformes totales y coliformes fecales, siendo la *Escherichia Coli* el indicador universal de contaminación fecal.

La *Escherichia Coli* (*E. Coli*) es un bacilo gram-negativo que no produce esporas, pertenece a la familia de los enterobacteriaceas. Se desarrolla a 44,5°C en medios complejos, fermenta la lactosa liberando ácido y gas, produce indol a partir del triptófano y no produce oxidasa.

1.2.1 Métodos de desinfección

Particularmente en pequeñas comunidades y áreas rurales, la desinfección de agua con cloro es el único procedimiento disponible para obtener agua potable. Se han detectado en el agua potable clorada la existencia de subproductos generados por reacción del cloro con la materia orgánica natural (NOM), estos subproductos de la desinfección, llamados DBP (Desinfection By Products), son principalmente trihalometanos (THM), ácidos haloacéticos y haloacetonitrilos. Los THM son potencialmente dañinos para la salud humana (mutaciones, cánceres, disfunción hormonal). Es por esto que se plantean nuevas alternativas de bajo costo para la desinfección del agua mediante el uso de energía solar, en aquellas comunidades rurales que cuentan con un buen potencial energético.

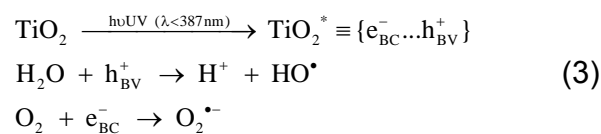
Entre las nuevas alternativas para la desinfección de agua cabe destacar:

♦ *Desinfección del agua por el método térmico:* Las altas temperaturas tienen un marcado efecto sobre todos los microorganismos; las células vegetativas mueren debido a la desnaturalización de las proteínas y la hidrólisis de otros componentes. En general puede afirmarse que la mayoría de las bacterias mueren entre los 40 y los 100 °C, mientras que las algas, protozoarios y hongos lo hacen entre los 40 y los 60 °C.

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

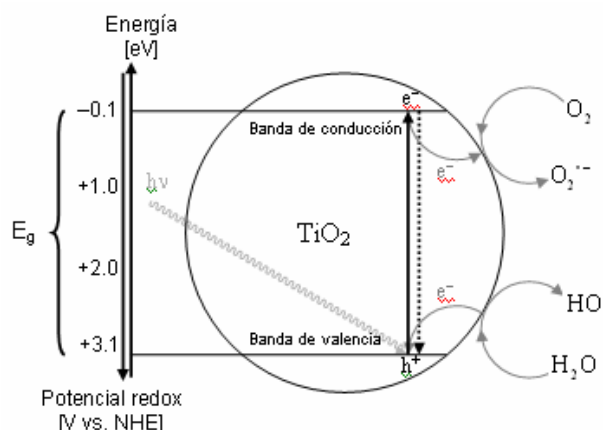
♦ *Desinfección del agua por fotocatalisis con TiO₂:* Se define la *fotocatálisis* como la aceleración de una reacción mediante la presencia de un catalizador activado con la luz. La *fotocatálisis heterogénea* emplea materiales semiconductores (TiO₂, ZnO, etc.) como fotocatalizadores y promueve reacciones en medio líquido o gaseoso.

Una radiación con mayor energía (i.e. menor longitud de onda) que el ancho de banda del TiO₂ ($E_g \approx 3,2$ eV, $\lambda < 387$ nm) promueve el paso de un electrón desde la banda de valencia (BV) hasta la banda de conducción (BC) generando, pares electrón hueco (electrón en BC y fotohueco en BV).



En presencia de agua se generan especies reactivas de oxígeno activo como el anión radical superóxido $O_2^{\bullet-}$ y el radical hidroxilo ($\bullet OH$). Este último es una especie muy oxidante ($E^\circ=2,80$ V vs. ENH a $25^\circ C$), que virtualmente puede atacar a todos los compuestos orgánicos y reacciona 10^6 - 10^{12} veces más rápido que oxidantes alternativos como el ozono.

Figura 2: Representación del proceso fotocatalítico en una partícula de TiO_2 .



Fuente: BLANCO, Julián. Desarrollo de colectores solares CPC para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes persistentes en agua. Madrid, España: CIEMAT, 2003

Los radicales hidroxilos son los responsables de la alta eficiencia de las técnicas avanzadas de oxidación (TAOs). Estos radicales interaccionan con la pared externa de los microorganismos causándoles su destrucción.

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

1.2.2 Técnicas de Análisis Microbiológico del Agua

Los métodos para la detección de bacterias patógenas en el agua son costosos y demandan mucho tiempo. La búsqueda de indicadores bacterianos se realiza a través de los métodos como el de filtración y el de Número Más Probable (NMP) en tubos múltiples. Este último ha sido empleado en el desarrollo de este trabajo.

La determinación del NMP se realiza mediante el cálculo de la densidad probable de bacterias coliformes por la combinación de resultados positivos y negativos a través de diluciones en tubos múltiples. La precisión de cada prueba depende del número de tubos utilizados. Son necesarias tres diluciones para la obtención del código del NMP. Las tablas de NMP, como la que se presenta en el Anexo C, se basan en la hipótesis de una dispersión de Poisson.

1.3 COLECTORES SOLARES

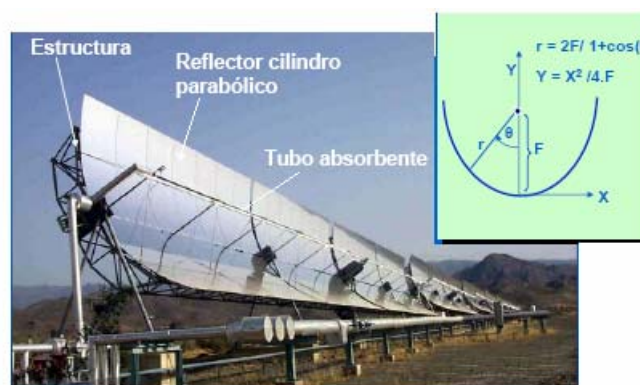
El colector solar tiene como función captar y concentrar la radiación solar sobre el receptor, el cual la convierte en energía térmica. Los sistemas de colectores solares han sido clasificados, según el nivel de concentración que pueden alcanzar, en:

- Sistemas no concentradores o de baja temperatura (hasta 150°C): Son estáticos y no tienen seguimiento solar. En este grupo se encuentran los colectores de placa plana.
- Sistemas de media concentración o de media temperatura (desde 150°C a 400°C): Concentran la luz solar entre 5 y 50 veces, por lo que requieren un sistema de seguimiento solar. Los colectores cilindro-parabólicos y los colectores holográficos (lentes de Fresnel) pertenecen este grupo.

- Sistemas de alta concentración o de alta temperatura (por encima de 400°C): Tienen un punto focal en lugar de un foco lineal y están basados en un paraboloide con seguimiento solar. En este grupo se incluyen discos parabólicos, los sistemas de torre central y los hornos solares, que se usan fundamentalmente para la producción de energía a partir de la radiación solar concentrada.

1.3.1 Colectores Cilindro-Parabólicos (CCP): Consisten en una estructura en forma de parábola que soporta una superficie altamente reflectante y concentradora de la luz. Esta estructura tiene uno o dos motores controlados por un sistema de seguimiento solar en un eje, ya sea seguimiento azimutal (movimiento este-oeste alrededor de un eje orientado norte-sur) o seguimiento de elevación (movimiento norte-sur alrededor de un eje orientado este-oeste), o con seguimiento de dos ejes (azimut + elevación); de esta manera se logra que el plano de apertura del colector sea siempre perpendicular a los rayos solares. En esta situación toda la radiación solar disponible sobre dicho plano de apertura va a ser reflejada y concentrada sobre el tubo absorbente que se encuentra situado en el foco geométrico de la parábola (curva que refleja sobre su foco todo rayo de luz paralelo a su eje geométrico).

Figura 3: Colector Cilindro Parabólico



Fuente: SILVA, Manuel. Sistemas termosolares de concentración. DIEMF, 2005.

Los componentes básicos de un CCP son la superficie reflectora concentradora, el tubo absorbedor (el fotorreactor en el caso de aplicaciones fotoquímicas), el sistema de seguimiento solar y la estructura soporte.

- **Superficie reflectora:** Las condiciones ideales de una superficie reflectiva son: Alta reflectancia (en el rango VIS-IR para aplicaciones térmicas, en el rango UV para aplicaciones fotocatalíticas), durabilidad aceptable bajo condiciones de intemperie y bajo costo con objeto de que la tecnología pueda ser competitiva.

- **Tubo receptor:** Es la sección del colector por donde circula el agua a tratar. El material del reactor debe ser inerte con respecto a productos químicos agresivos que puedan circular por su interior, no generando ningún tipo de residuo por abrasión o corrosión. El vidrio resulta la alternativa natural para los fotorreactores. El vidrio normal no resulta satisfactorio ya que, debido a su alto contenido de hierro, absorbe una parte importante de la luz UV. Sólo los vidrios con bajo contenido en hierro (vidrios borosilicatados tipo Pyrex® o Duran®) resultan adecuados para reactores fotocatalíticos.

El tubo receptor debe asegurar siempre una distribución uniforme de flujo. Se considera que los diámetros óptimos del fotorreactor para la utilización de luz solar deben estar en el rango entre 25 y 50 mm. Diámetros menores no son adecuados debido a la elevada pérdida de carga que involucran; diámetros mayores implican un elevado volumen no iluminado, lo cual reduce la eficiencia global del sistema.

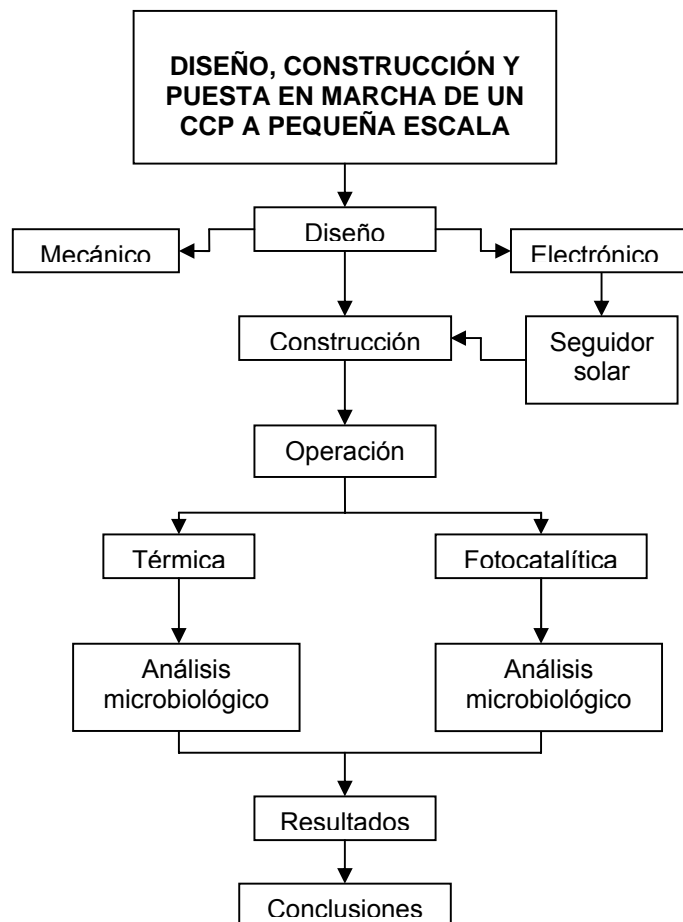
- **Estructura metálica:** La función de la estructura es dar rigidez al conjunto de elementos que componen el colector y estabilidad al ensamblaje.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO

En este capítulo se describe la metodología empleada para el desarrollo del presente trabajo.

En el siguiente diagrama de bloques se muestran las etapas seguidas en el diseño, construcción y evaluación del colector cilindro parabólico empleado.

Figura 4: Diagrama de bloques del desarrollo experimental

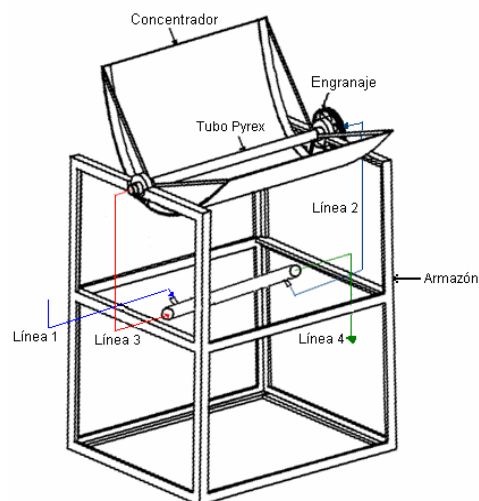


Fuente: Autores.

Con el propósito de mejorar el sistema de desinfección antes construido por Cuestas y Rincón³, en este trabajo se diseñó y construyó un colector solar de tipo cilindro parabólico (CCP) de concentración media de energía a pequeña escala que puede ser transportado e instalado con facilidad en regiones que carecen de los servicios básicos (electricidad, gas doméstico y agua potable) y es de fácil operación.

El sistema para la desinfección de agua esta constituido por un tanque de almacenamiento fabricado en polietileno (resistente a la exposición solar y al impacto), un filtro de arena, un intercambiador de calor autónomo, una superficie concentradora o reflectora, un seguidor solar electrónico acoplado a una caja reductora de potencia que consta de un engrane y un tornillo sin fin, un tubo receptor en vidrio Pyrex, un sistema de control térmico, y por último un tanque recolector. En la Figura 5 se muestran las principales partes que conforman este sistema de desinfección solar.

Figura 5: Sistema de desinfección



Fuente: Autores.

³ Cuestas, René y Rincón, Iván. Diseño, construcción y evaluación operacional a pequeña escala de un potabilizador solar parabólico para agua. Bucaramanga, Colombia, 2004. Trabajo de Grado.

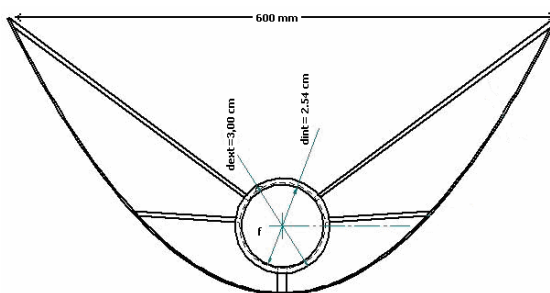
La descripción del proceso de diseño y construcción de cada una de las partes modulares que conforman el colector se presenta a continuación:

2.1 Concentrador: Después de determinar las dimensiones de la parábola, se realizó el diseño de la superficie reflectora con el programa Solid Edge 12, teniendo en cuenta colocar el eje de giro del colector en su centro de masa buscando que el torque ejercido por la inercia del mismo permanezca constante durante el recorrido del seguidor. Los planos del concentrador se adjuntan en el Anexo H.

Las dimensiones del colector son:

- Área de apertura del colector: $0,36 \text{ m}^2$
- Longitud de apertura del colector: $0,6 \text{ m}$
- Longitud del colector: $0,6 \text{ m}$
- Distancia focal: $0,075 \text{ m}$
- Altura de la parábola: $0,3 \text{ m}$

Figura 6: Concentrador



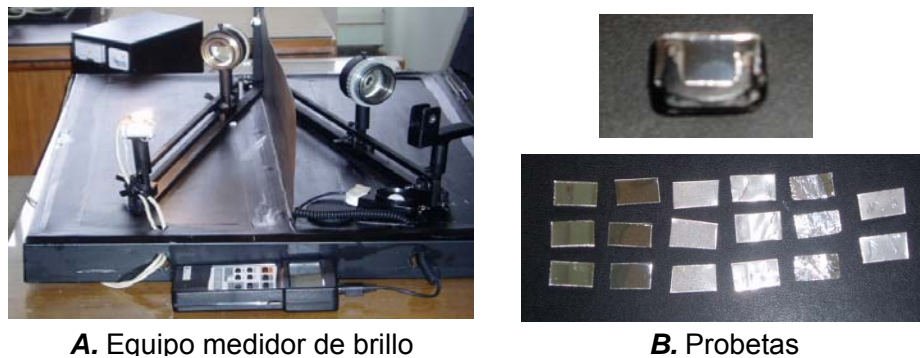
Fuente: Autores.

Se decidió fabricar el soporte en fibra de vidrio buscando un sistema rígido, ligero y de fácil transporte, que permitiese además evitar pérdidas de calor por la parte posterior del concentrador. Tal soporte permitió utilizar un motor de baja potencia

(motor paso a paso), de fácil consecución y de bajo costo, para el sistema de seguimiento solar.

La elección de la superficie reflectora se realizó a partir de medidas experimentales del brillo (i.e. reflexión) de diferentes materiales seleccionados, utilizando un equipo medidor de brillo que cuenta con un luxómetro para la medición de luz reflejada.

Figura 7: Pruebas de brillo



Fuente: Autores

Se compararon cuatro tipos de materiales: espejo común de 3 mm, *foil* de aluminio, acero inoxidable 430 y papel aluminio de cocina, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 1: Pruebas de brillo

Material	Brillo (luxes) ⁴
Espejo de vidrio	1.277
Acero inoxidable 430	1.072
Papel Aluminio	1.020
Foil de Aluminio	479

Fuente: Autores

⁴ El lux es la unidad del SI para la iluminancia o nivel de iluminación y es igual a un lumen/m².

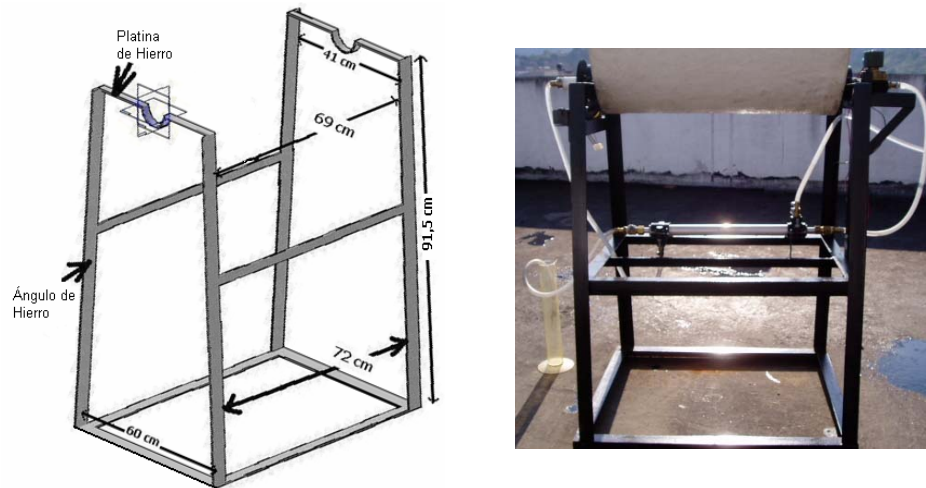
Como se observa en los anteriores resultados, el mejor material reflector es el espejo de vidrio, en segundo lugar se encontró el acero inoxidable 430, seguido del papel de aluminio de cocina y por último estuvo el foil de aluminio, material empleado por el colector elaborado por Cuestas y Rincón.

Para tomar la decisión se tuvieron en cuenta parámetros como fácil consecución, manejo, costos y mantenimiento, por lo cual se descartó el espejo de vidrio debido a su fragilidad y alto costo de mantenimiento. Al exponer el espejo de vidrio a la intemperie se forma una capa sobre su superficie generando opacidad y su reflectividad baja considerablemente. El acero inoxidable 430 aunque implica un mayor costo inicial que el espejo de vidrio, presenta un brillo adecuado y una mayor resistencia a la intemperie, garantizando una mayor durabilidad; por esta razón fue escogido como el material adecuado para el sistema en cuestión.

2.2 Base del concentrador: A partir de las dimensiones estimadas para el concentrador, se diseñó el esqueleto que serviría de soporte, buscando un material que no representara altos costos y ofreciera un alto grado de confiabilidad en cuanto a resistencia y durabilidad; por lo cual se fabricó en fibra de vidrio con un espesor de 4 mm.

2.3 Armazón: Se construyó de manera modular en ángulo y platinas de hierro, al cual se le aplicó una pintura anticorrosiva previa a la pintura final de color negro. El armazón consta de secciones de soporte sobre el cual se localizaron el sistema de control, el intercambiador de calor y recipientes para la recolección del agua tratada (ver Figura 8).

Figura 8: Esquema del armazón del colector parabólico.



Fuente: Autores

2.4 Tubo receptor: Para las pruebas térmicas se utilizó un tubo de vidrio Pyrex (L: 70 cm, D_e : 3 cm, D_i : 2.54 cm) posicionado en el foco de la superficie reflectora y para las pruebas térmicas-fotocatalíticas se empleó un tubo con las mismas características al cual se le depositó en el interior una película de TiO_2 (Degussa P25), para lo cual se contó con la asesoría del Grupo de procesos Físicoquímicos Aplicados-PFA de la Universidad de Antioquia-UDEA, ver Anexo D.

El vidrio Pyrex fue elegido debido a su alta transmitancia de radiación UV; el diámetro de 3 cm, sobre el límite inferior del rango óptimo, se escogió buscando lograr una desinfección más eficiente.

Figura 9: Tubo receptor de vidrio Pyrex

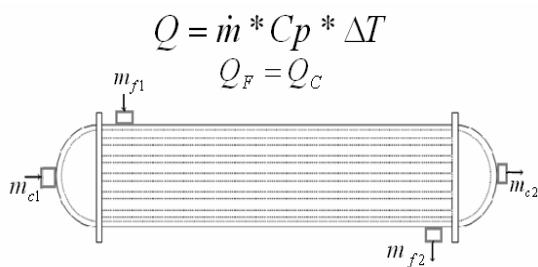


Fuente: Autores.

2.5 Intercambiador de calor: Se diseñó un intercambiador de calor autónomo con el fin de precalentar el agua que entra al sistema, utilizando el agua caliente (60-70°C) ya tratada. Este fue dispuesto antes del tubo receptor y permitió alcanzar la temperatura del *set point* en un menor tiempo.

El intercambiador fue diseñado, utilizando la correspondiente ecuación de diseño, para elevar la temperatura un $\Delta T \leq 30^\circ\text{C}$. Éste fue elaborado en tubos de aluminio concéntricos de un solo paso con diámetros diferentes (D_{ext} : 3,2 cm, D_{int} : 1,6 cm) y con una longitud de 50 cm, el fluido caliente circula por el tubo interno, mientras el fluido frío circula por la coraza del intercambiador. Se eligió aluminio para minimizar la contaminación del agua con especies metálicas.

Figura 10: Intercambiador de Calor



Ecuación de diseño

Fuente: Autores

2.6 Filtro de arena: Se adaptó un filtro sencillo y de bajo costo, el cual consiste en tres capas de arena con 20 cm de grosor y con una granulometría diferente, sobre ella una capa de grava de 10 cm de altura y una capa de carbón activado. La importancia de este filtro radica en la reducción de los sólidos suspendidos en el agua a tratar, además de tener la posibilidad de remover malos olores, sabores o color desagradable del agua gracias a que el carbón activado tiene una gran área superficial y por lo tanto alta capacidad de adsorción de compuestos, los cuales quedan adheridos a la superficie del mismo.

Figura 11: Filtro de Arena y tanque de polietileno.



A. Filtro de arena



B. Tanque de almacenamiento

Fuente: Autores

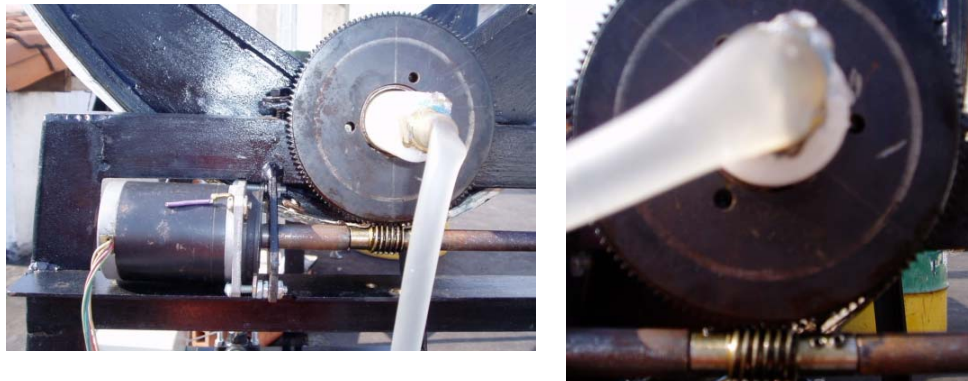
2.7 Tanque de almacenamiento: Fabricado en polietileno (resistente a la exposición solar y al impacto) donde se almacena el agua a tratar. Está ubicado a una altura de 1,50 m a nivel del suelo y tiene una capacidad de 235 L (D: 58 cm; L: 90 cm).

2.8 Seguidor solar: Se implementó un sistema de seguimiento solar electrónico que con ayuda de un motor paso a paso se encarga de posicionar al colector para que este reciba siempre los rayos solares de manera perpendicular. El movimiento del giro se hace en un sólo eje (de oriente a occidente) pues debido a la posición geográfica de Colombia los ligeros desplazamientos norte-sur del sol resultan poco significativos y pueden corregirse manualmente.

El sistema de rotación consta de un par de chumaceras que soportan los ejes del concentrador, un piñón de 120 dientes y un tornillo sin fin los cuales, acoplados forman una caja de reducción de potencia que permite utilizar un motor de bajo costo como un paso a paso, el cual requiere un mínimo de energía permitiendo

que el movimiento se realice cada 13 segundos, logrando un desplazamiento de 15 por hora.

Figura 12: Sistema de reducción de potencia



Fuente: Autores.

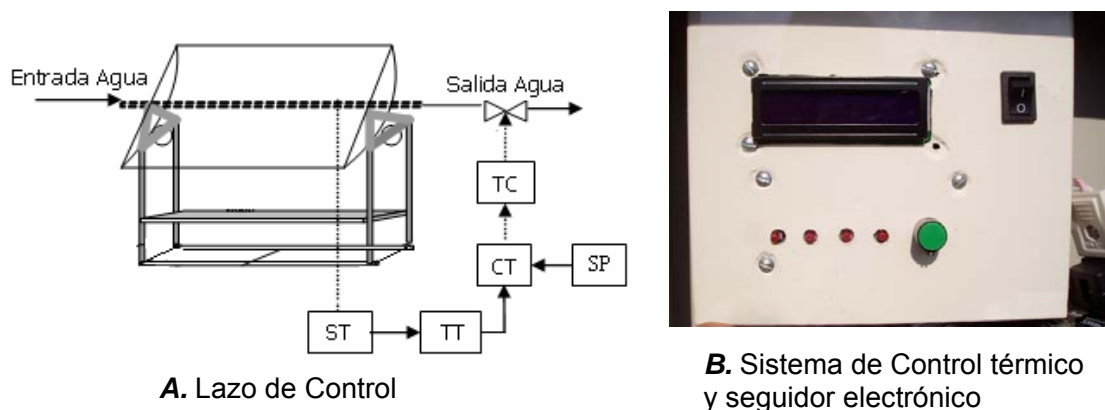
2.9 Sistema de control térmico: Este sistema tiene una estrategia de control de retroalimentación o *feedback*, conformado por cuatro sensores de temperatura (termocuplas tipo K), un controlador electrónico y una válvula solenoide. El objetivo del sistema de control es no permitir la salida del agua del colector hasta que esta no haya alcanzado una temperatura pre-establecida o de *set point* (SP) para las pruebas de desinfección.

Cada termocupla se colocó dentro de un termopozo elaborado en bronce, con el propósito de sensar la temperatura real del agua en los cuatro puntos de interés: entre el filtro y la entrada del intercambiador (T_1), entre el intercambiador y el tubo absorbedor (T_2), a la salida del tubo absorbedor y entrada del intercambiador (T_3 , temperatura de control), y por último a la salida del agua tratada (T_4).

La termocupla 3 sensa la temperatura (ST) a la salida del tubo absorbedor y envía una señal eléctrica (---) al transmisor de señal de temperatura (TT) que en este caso es la misma termocupla. La señal llega hasta el controlador (CT) donde se encuentra el valor de referencia pre-establecido (SP); el controlador compara la

señal recibida con el set point y toma una acción de control que es llevada por el transmisor de la señal de control (TC) hasta el elemento de ejecución de la orden, que en este caso es la válvula solenoide, tal como se muestra en el siguiente esquema:

Figura 13: Sistema de Control.



Fuente: Autores.

Para la circulación del agua entre las partes del colector se utilizó manguera de látex, puesto que este material no altera las propiedades organolépticas del agua tratada.

Los volúmenes de agua tratada en cada una de las pruebas fueron medidos con una probeta y las muestras para el análisis microbiológico fueron tomadas en frascos esterilizados.

Los costos del sistema diseñado se presentan en el Anexo B.

3. EVALUCIÓN TÉRMICA Y TÉRMICA-FOTOCATALÍTICA DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO

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

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

Los experimentos se realizaron en el barrio El Poblado de Girón (Santander) durante los meses de marzo-abril de 2006. Los datos fueron registrados a partir de las 8 de la mañana hasta las 4 de la tarde. Aunque el volumen de agua tratada estuvo influenciado por las condiciones climáticas, el comportamiento general fue similar en todas las pruebas. Por cuestiones prácticas aquí se mostraran y analizarán los resultados correspondientes a la evaluación operacional en días promedio.

3.1 PRUEBAS DE DESINFECCIÓN

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

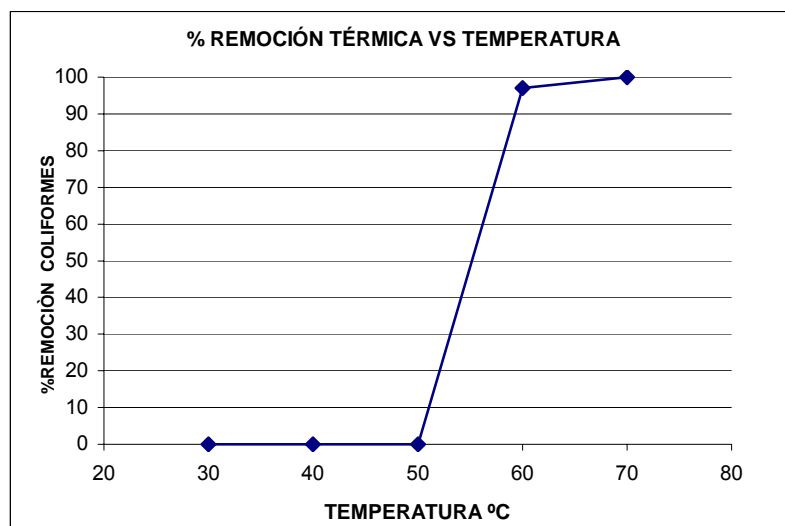
3.1.1 Pruebas térmicas

Tabla 2: Análisis microbiológico del agua - Proceso térmico.

PUNTO/TEMPERATURA (°C)	COLIFORMES FECALES (NMP/100 mL)	COLIFORMES TOTALES (NMP/100 mL)
Salida del tanque	11.000.000	24.000.000
Salida del Filtro	4.600.000	14.700.000
40°C	4.600.000	14.700.000
50°C	4.600.000	14.700.000
60°C	30	90
70°C	<3	<3

Fuente: Autores.

Figura 14: Porcentaje de remoción de coliformes - Proceso térmico.



Fuente: Autores.

Se pudo establecer que mediante el proceso térmico es necesaria una temperatura superior a 50°C para lograr al menos una desinfección parcial del agua tratada. A 60°C se logra una remoción del 98,99% de los coliformes fecales mientras que a 70° se alcanza una desinfección del 99,99% de *E. Coli*, garantizando que el agua es apta para consumo humano. Esta última fue tomada como temperatura de control para el proceso térmico.

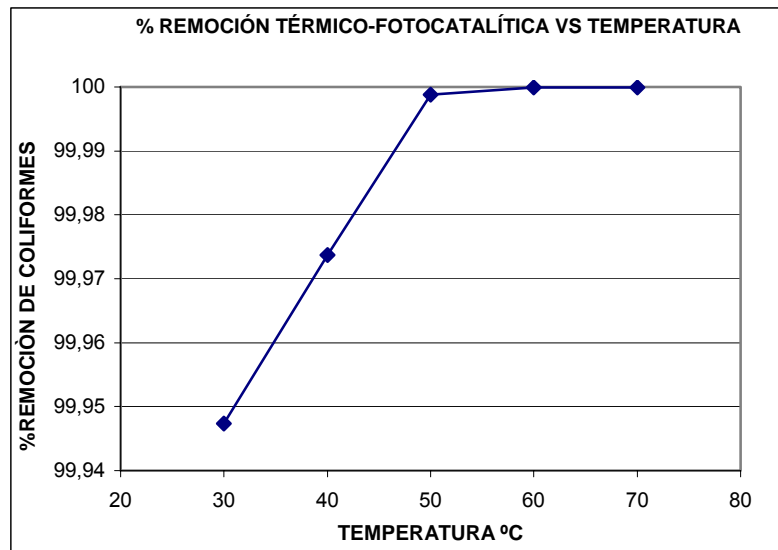
3.1.2 Pruebas térmico-fotocatalíticas

Tabla 3: Análisis microbiológico del agua - Proceso térmico-fotocatalítico.

PUNTO/TEMPERATURA (°C)	COLIFORMES FECALES (NMP/100 mL)	COLIFORMES TOTALES (NMP/100 mL)
Salida del tanque	8.700.000	19.000.000
Salida del Filtro	5.700.000	12.000.000
30°C	3.000	7.000
40°C	1.500	4.300
50°C	70	430
60°C	<3	<3
70°C	<3	<3

Fuente: Autores

Figura 15: Porcentaje de remoción de coliformes - Proceso térmico-fotocatalítico.



Fuente: Autores

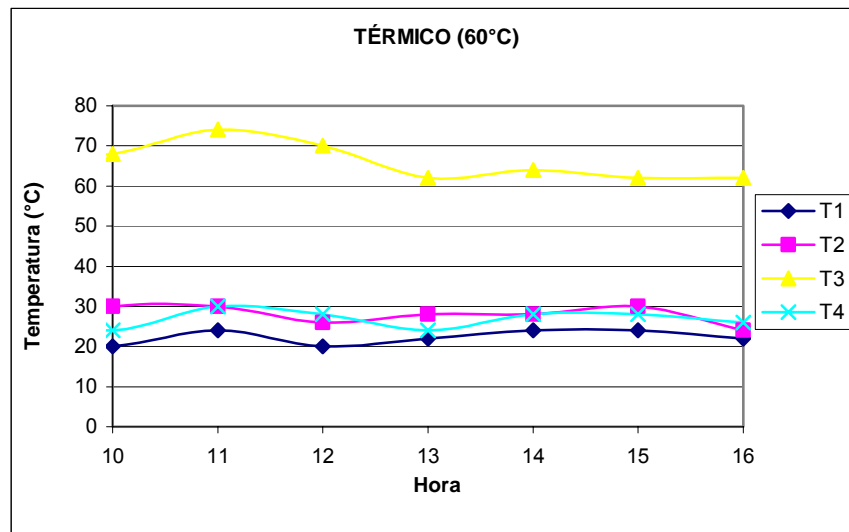
Se pudo establecer que utilizando el tubo recubierto con TiO_2 la concentración de coliformes disminuye drásticamente desde los 30°C alcanzándose una remoción del 99,945%. A partir de 60°C se logra la desinfección en cumplimiento con la norma colombiana de calidad del agua (Decreto 475 de 1998).

3.2 PRUEBAS DE OPERABILIDAD

Con el fin de comprobar el funcionamiento normal del colector en operación, se registraron cuatro temperaturas de interés en intervalos de tiempo de 10 minutos. Dichas temperaturas se registraron entre el filtro y el intercambiador (T_1), entre la salida del intercambiador y la entrada del agua al colector (T_2), entre la salida del colector y la entrada del agua al intercambiador (T_3 , temperatura de control), a la salida del intercambiador (T_4 , agua tratada). Los resultados se presentan a continuación, las tablas de datos se encuentran en el Anexo G.

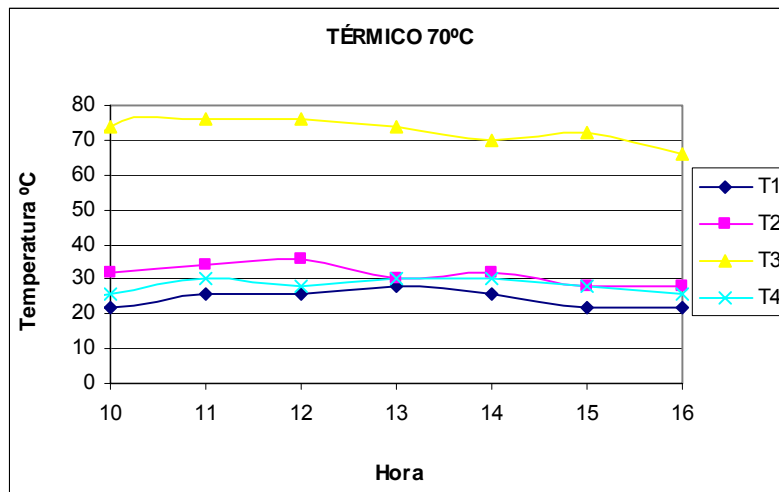
3.2.1 Pruebas térmicas

Figura 16: Resultados del proceso térmico a 60°C (20 de marzo de 2006).



Fuente: Autores.

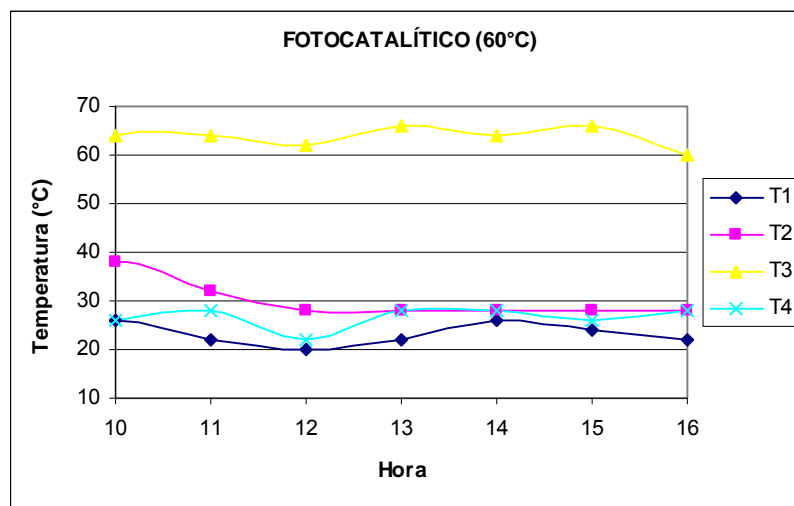
Figura 17: Resultados del proceso térmico a 70°C (19 de marzo de 2006).



Fuente: Autores

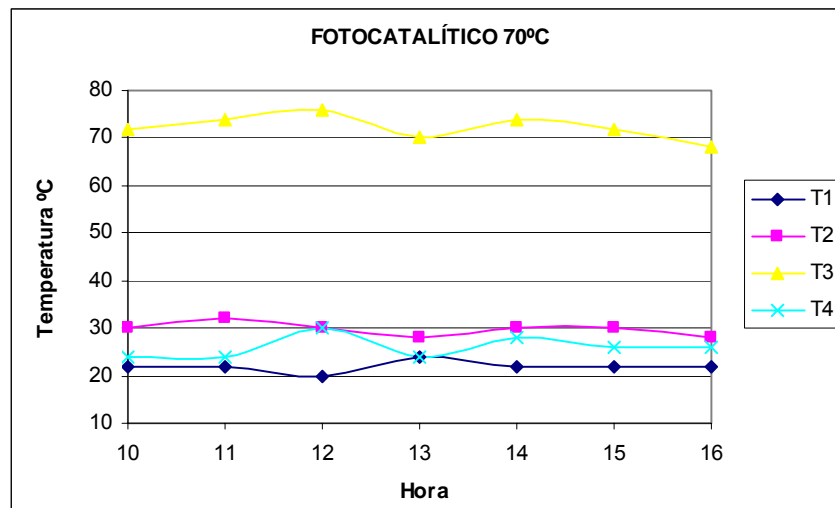
3.2.2 Pruebas térmico-fotocatalíticas

Figura 18: Resultados del proceso térmico-fotocatalítico a 60°C (30 de marzo de 2006).



Fuente: Autores

Figura 19: Resultados del proceso térmico-fotocatalítico a 70°C (29 de marzo de 2006).

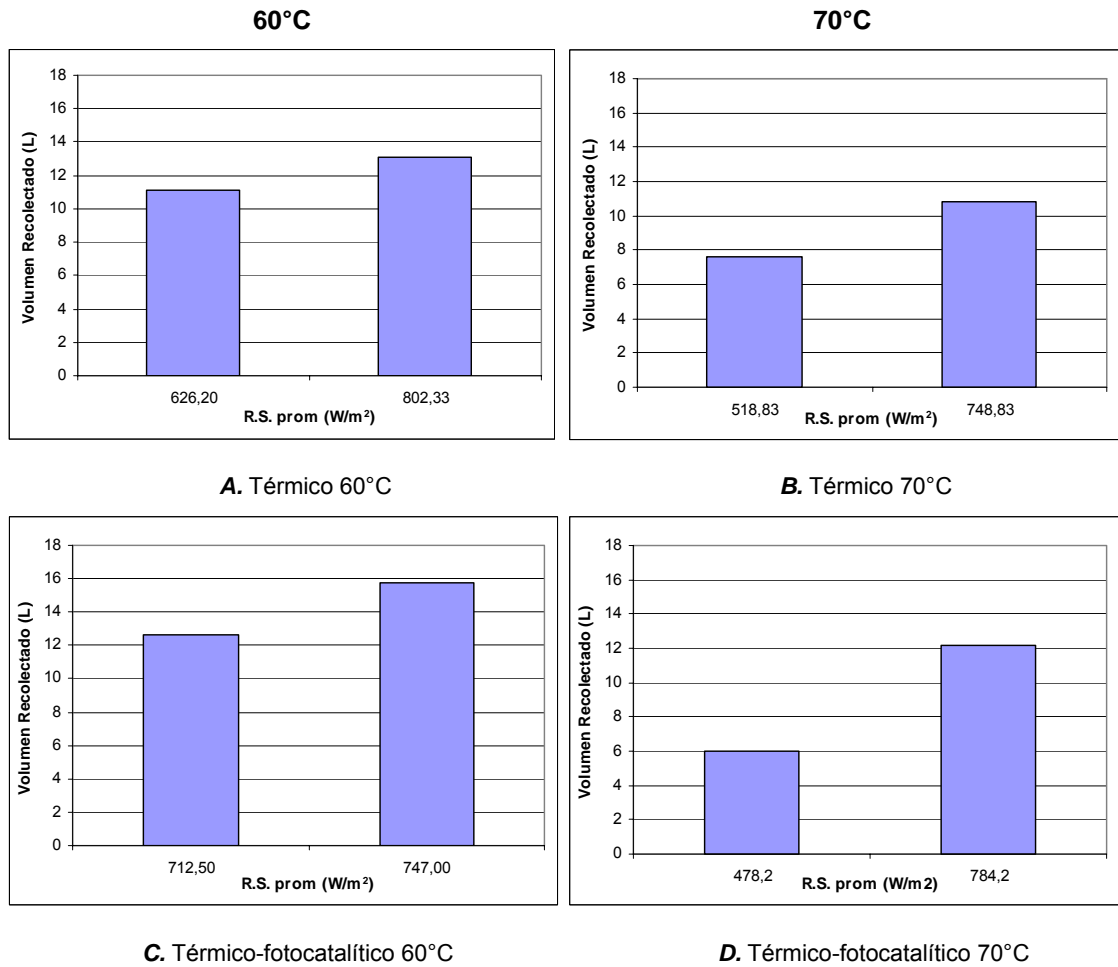


Fuente: Autores

Las anteriores figuras permiten concluir que el sistema de control de temperatura resulta adecuado y el colector opera en estado pseudo-estable en las horas efectivas de trabajo. Cabe resaltar que el intercambiador empleado permitió aumentar la temperatura del agua a la entrada del colector en aproximadamente 8°C, lo cual implicó un menor tiempo para alcanzar el *set point* y por tanto un mayor volumen de agua tratada por día.

Para establecer las condiciones más adecuadas para la operación del colector, se evaluaron 5 diferentes temperaturas de *set point* en el rango entre 60 y 70°C (60, 64, 66, 68 y 70°C) con el fin de determinar la influencia de éste sobre el volumen de agua tratada. Igualmente se estudió el efecto de la intensidad de radiación incidente sobre dicho volumen, utilizando los datos suministrados por la CDMB para la zona donde se realizó el estudio. Un análisis de estos resultados permitió comparar los métodos térmico y térmico-fotocatalítico.

Figura 20: Influencia de la radiación solar y la temperatura en el volumen de agua tratada.



Fuente: Autores

Como se puede observar en la Figura 20, el volumen de agua tratada tiene una relación directa con la cantidad de radiación incidente y con el valor de *set point* tomado para la prueba. A medida que se incrementa la radiación aumenta el volumen de agua tratada y a un mayor valor de *set point* es menor la cantidad de agua tratada (se necesita más tiempo para alcanzarlo).

Al analizar la segunda columna de las figuras 20.b y 20.c, las cuales corresponden a pruebas realizadas en condiciones muy similares de radiación incidente ($I \approx 747\text{-}748 \text{ W/m}^2$) y donde se alcanza una desinfección equivalente ($< 3 \text{ NMP/100 mL}$ de coliformes fecales), se puede concluir que mediante el método térmico-fotocatalítico pueden alcanzarse mayores volúmenes de agua tratada que por el método térmico.

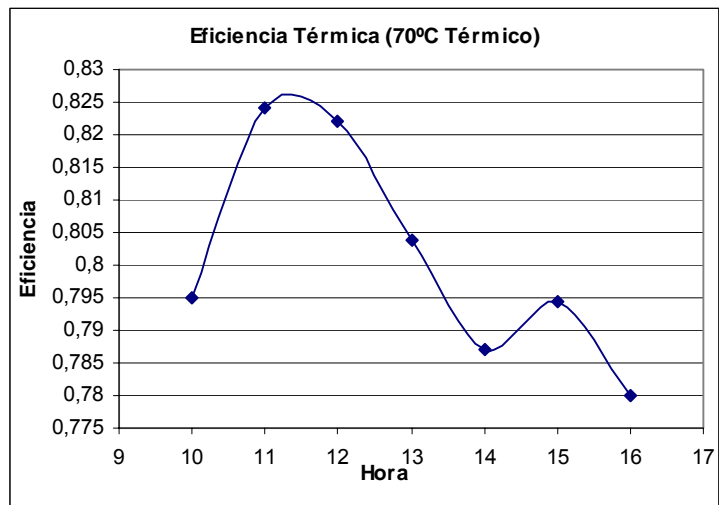
El acoplamiento del proceso fotocatalítico (recubrimiento interior del tubo receptor con TiO_2) conlleva a un mejoramiento significativo del proceso térmico pues implica menores temperaturas y por tanto menores tiempos de operación para conseguir la desinfección del agua tratada.

Las bacterias coliformes por no ser esporuladas no tienen la capacidad de reproducirse una vez han sido eliminadas; sin embargo, es recomendable el consumo del agua tratada en el menor tiempo posible, con el fin de evitar su contaminación posterior debido a los agentes patógenos del ambiente.

3.3 EFICIENCIA TÉRMICA DEL CCP

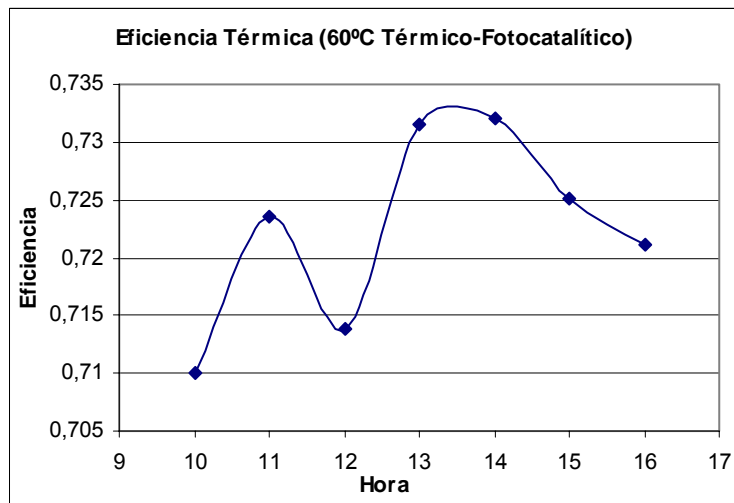
A partir de los datos de radiación solar suministrados por la CDMB, se calculó la eficiencia térmica del colector. El procedimiento utilizado se presenta en el Anexo E. Por cuestiones prácticas se presentan las gráficas de la eficiencia térmica del colector para el proceso térmico y el térmico-fotocatalítico operando con *set point* de 70 y 60°C respectivamente.

Figura 21: Eficiencia térmica del CCP (Proceso Térmico a 70°C)



Fuente: Autores

Figura 22: Eficiencia térmica CCP (Proceso Térmico-Fotocatalítico a 60°C)



Fuente: Autores

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

3.4 CÁLCULO DEL ÁREA DE UN COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO CON UNA CAPACIDAD DE DESINFECCIÓN DE 1 M³/DÍA.

Los cálculos para dimensionar el área necesaria para la desinfección de 1 m³ de agua/día estarán basados en el colector de experimentación CCP, para lo cual se tomará un promedio diario de operación de 8 horas.

Se calcula la carga térmica obtenida experimentalmente por día:

$$Q_{U-ex} = mC_p\Delta T \quad (4)$$

donde:

m : Representa la masa de agua que circula por el tubo = 28,47 Kg

C_p : Calor específico del agua = 4.186 J/(kg.K)

ΔT : Incremento de la temperatura experimentado por el volumen de agua = 45 K

$$Q_{U-ex} = 28,47 * 4.186 * 45$$

$$Q_{U-ex} = 5,36E6J$$

De igual manera se calcula la carga térmica requerida para obtener 1 m³ de agua tratada.

$$Q_{U-Re q} = mC_p\Delta T \quad (5)$$

donde:

m : Representa la masa de agua que se calienta = 991,4 Kg

C_p : Calor específico del agua = 4.186 J/(kg.K)

ΔT : Incremento de la temperatura experimentado por el volumen de agua = 35 K

$$Q_{U-Re q} = 991,4 * 4.186 * 35$$

$$Q_{U-Re q} = 1,45E8J$$

Finalmente se obtiene el área necesaria para el sistema propuesto

$$A_{a,m^3} = \frac{Q_{u-Req}}{Q_{u-ex}} * A_{ex} = \frac{1,45E8J}{5,36E6J} * 0,36m^2 = 9,73m^2 \quad (6)$$

3.5 COMPARACIÓN DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO DE ESTE TRABAJO CON RESPECTO A LOS DOS COLECTORES CONSTRUIDOS ANTERIORMENTE

Tomando como base los parámetros térmicos, y el grado de desinfección del colector expuesto en este trabajo, se hará un análisis comparativo con los estudios realizados con el colector de placa plana (2002)⁵ y el colector parabólico CCP (2004)⁶.

Tabla 4: Comparación de los colectores estudiados.

Indicador	Colector Parabólico (CCP) 2006		Colector Parabólico (CCP) 2004	Colector Placa Plana 2002
	Térmico	Térmico-Fotocatalítico		
Temperatura de Operación	70 °C	60 °C	70 °C	50 °C
Área de la superficie concentradora	0,36 m ²	0,36 m ²	3,75 m ²	1,00 m ²
Capacidad de producción (agua tratada por día)	0 – 11 L	0 – 14 L	0 – 25 L	0 – 10 L
Producción promedio de agua tratada por día	5,5 L	5,5 L	15 L	5 L
Horas efectivas de operación en el sitio de pruebas	5 Horas	5 Horas	5 Horas	5 Horas
Producción de agua tratada por m ² de colector	6 L/m ² h	6 L/m ² h	1,6 L/m ² h	2 L/m ² h
Área necesaria para un sistema de 1 m ³ /día en el sitio de posible ejecución	9,7 m ²	9,7 m ²	16 m ²	28 m ²
Horas promedio en el sitio de posible ejecución	8 Horas	8 Horas	8 Horas	8 Horas
Eficiencia térmica	81,3%	63,22%	66,11%	50,04%

Fuente: Autores

⁵ BARRIOS, Marlon. Bucaramanga, Colombia, 2002. Trabajo de Grado.

⁶ CUESTAS, René y RINCÓN, Iván. Bucaramanga, Colombia, 2004. Trabajo de Grado.

Observando estos resultados se aprecian claramente las ventajas que ofrece el colector cilindro parabólico, con respecto al colector de placa plana; es importante resaltar que los datos mostrados en esta tabla son los reportados por los autores en sus libros de proyecto de grado y los datos obtenidos en este proyecto (CCP-2006).

Quizá los tres indicadores más importantes, son las áreas necesarias de exposición, las temperaturas de operación y, la capacidad de agua tratada por día; estos indicadores permiten observar la gran ventaja y con esto, el gran avance de la investigación no sólo en esta rama sino también los primeros pasos en la parte fotocatalítica.

De los indicadores se puede destacar para el colector CCP-2006: experimentalmente obtiene volúmenes de agua tratada más altos en comparación con los otros colectores los cuales tienen una mayor dimensión, la temperatura de operación más baja es la del colector CCP (2006) por el método fotocatalítico, pues a 10°C menos que por el método térmico se garantiza un alto grado de confiabilidad en la desinfección de agua; la temperatura del colector de placa plana no se tomó en cuenta para esta comparación puesto que no garantiza que el agua tratada cumpla con los parámetros de calidad.

En cuanto al área de exposición para la producción de 1 m³ de agua se encuentra que es más baja para el CCP-2006 en comparación con los dos colectores anteriormente construidos, lo que hace viable su reproducción a una mayor escala. A partir del análisis de resultados se puede observar que un área de 0,36 m² tiene la capacidad de desinfectar hasta 11 L por día, mientras 3,75 m² desinfecta 25 L de agua por día.

CONCLUSIONES

El colector cilindro parabólico construido en este proyecto posee un factor de eficiencia de 0,94, el cual fue mayor en un 10% al factor de eficiencia de los colectores anteriormente construidos, en virtud de la adecuada selección de los materiales y los componentes del sistema.

El método térmico permitió a 70°C una remoción del 99,99% y la obtención de un volumen de 10,85 L por día. El acoplamiento de la tecnología fotocatalítica permitió mejorar la efectividad del proceso, recolectando mayores volúmenes de agua (15,72 L por día), logrando la desinfección (99,99%) a una menor temperatura (60°C).

Al comparar el alto grado de contaminación de las aguas utilizadas en este colector (1×10^7 NMP/100mL) con la carga patógena del agua de los anteriores proyectos, se observa que el colector cilindro parabólico (CCP) desarrollado en este trabajo a pesar de contar con un área 9,6 veces menor a los anteriores, presenta un alto desempeño en la desinfección microbiológica de aguas altamente contaminadas, obteniéndose además volúmenes de agua de 11 L/día.

La reproducción a una escala mayor de un colector cilindro parabólico con características similares al construido en este trabajo es viable, ya que para la producción de 1 m³ de agua se requiere un área 39,4% menor respecto al colector construido anteriormente.

RECOMENDACIONES

Se plantea el empleo de un tubo de vidrio con una superficie corrugada de manera que permita una mejor adherencia de la película.

Se debe contemplar también la utilización del cuarzo como material para el tubo absorbedor, ya que permite una mayor transmisión de la radiación UV; sin embargo, debe evaluarse su factibilidad técnico-económica.

Se propone realizar estudios con un tubo absorbedor concéntrico el cual permitirá mejorar la eficiencia térmica, ya que se creará interiormente un pequeño efecto invernadero que permitirá concentrar mayor energía y de esta manera mejorar la productividad del sistema de desinfección.

Se sugiere realizar la recirculación del agua tratada con el propósito de alcanzar la temperatura de control en menor tiempo, además de lograr una desinfección más efectiva, generando a su vez un mayor volumen de agua tratada en días de baja intensidad de radiación.

Se aconseja el empleo de un radiómetro para realizar la medición de la radiación solar en el sitio de pruebas, obteniendo de esta forma el dato preciso correspondiente al intervalo de tiempo de operación.

Es importante anotar que los métodos utilizados presentan una deficiencia y es su falta de efecto residual, por lo que el agua tratada debe ser consumida en el menor tiempo posible.

BIBLIOGRAFÍA

BARRIOS, Marlon. Desarrollo de un sistema prototipo para potabilización de agua mediante energía solar en comunidades rurales del Magdalena Medio. Bucaramanga, Colombia, 2002. Trabajo de Grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

BLANCO, Julián. Desarrollo de colectores solares CPC para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes persistentes en agua. Madrid, España: CIEMAT, 2003.

BLANCO, Julián y BLESÁ, Miguel. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua. Buenos Aires, Argentina: Editorial Escuela de Posgrado UNSAM, 2005.

www.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/13_Capitulo_13.pdf

BLANCO, J.; MALATO, S.; FERNÁNDEZ, P. y VIDAL, A. Compound parabolic concentrator technology development to commercial solar detoxification applications. En Solar energy, Vol. 67, No. 4-6, págs. 317-330. España: Elsevier Science Ltda., 1999.

BLESÁ, Miguel. Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea. Buenos Aires, Argentina: Red CYTED VIII-G, 2001.

<http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/CYTED/default.htm>

BOLTON, James R. Desintoxicación Solar. En Solar Energy, Vol. 56, No. 5, pág. 375. Londres: Elsevier Science Ltda., 1996.

CASSANO, Alberto y ALFANO, Orlando. Reaction engineering of suspended solid heterogeneous photocatalytic reactors. En Catalysis Today, No. 58, págs. 167–197. Argentina: Elsevier Science Ltda., 2000.

CASSANO, Alberto; MARTIN, Carlos A; BRANDI, Rodolfo J. y ALFANO, Orlando. Análisis y diseño de un fotoreactor: Fundamentos y Usos. En Ind. Eng. Chem. Res. 1996, 34, págs. 2155-2170. Argentina: America Chemical Society, 1995.

CUESTAS, René y RINCÓN, Iván. Diseño, construcción y evaluación operacional a pequeña escala de un potabilizador solar parabólico para agua. Bucaramanga, Colombia, 2004. Trabajo de Grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

DIJKSTRA, M. F. J.; KOERTS, E. C. B.; BEENACKERS, A. C. M y WESSELING, J. A. Performance of immobilized photocatalytic reactors in continuous mode. En AIChE Journal, Vol. 49, No. 3. Netherlands: 2003.

FELICÍSIMO, Ángel M. Estimación de la insolación potencial a partir del modelo digital de elevaciones. Universidad de Extremadura.

FERNANDEZ, D, Pedro. Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. Universidad de Cantabria, España: Departamento de ingeniería eléctrica y energética.

<http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/EnergiasAlternativas/solar/PDFs/Solar1.pdf>

FERNÁNDEZ, Pilar; MALATO, Sixto y ENEA, Octav. Photoelectrochemical reactors for the solar decontamination of water. En Catalysis Today, No. 54, págs.329–339. España: Elsevier Science Ltda., 1999.

GRZECHULSKA, Joanna y WALDEMAR, Antoni. Photocatalytic labyrinth flow reactor with immobilized p25 TiO₂ bed for removal of phenol from water. En Applied Catalysis B: Environmental, No. 46, págs. 415–419. Polonia: Elsevier Science Ltda., 2003.

KERN Q, Donald. Procesos de transferencia de calor. México: Compañía editorial continental, 2001.

MALATO, Sixto; BLANCO, Julián; VIDAL, Alfonso y RICHTER, Christoph. Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale: an overview. En Applied Catalysis B: Environmental, No. 37, págs. 1–15. España: Elsevier Science Ltda., 2002.

MALATO, Sixto R.; RICHTER, Christoph; BLANCO, Julián y VINCENT, Martin. Degradación fotocatalítica de aguas industriales residuales. En Solar Energy, Vol. 56, No. 5, págs 401-410. España: Elsevier Science Ltda., 1996.

Manual de medios de cultivo. Merck, 1994. Pág. 276

MINERO, C.; PELIZZETTI, Fe.; MALATO, S. y BLANCO, J. Gran planta solar de descontaminación fotocatalítica de agua: Efecto de los parámetros operacionales. En Solar Energy, Vol. 56, No. 5, págs. 421 428. España: Elsevier Science Ltda., 1996.

NOGUEIRA, Raquel F. y JARDIM, Wilson. Reactor con una película de TiO₂ para la descontaminación de agua mediante luz solar. En Solar Energy, Vol. 56, No. 5, págs. 471-477. Brasil: Elsevier Science Ltda., 1996.

SILVA P., Manuel. Sistemas termosolares de concentración. DIEMF, Curso 2004/2005. www.esi.us.es/php/infgen/aulav/energrenov/EERR-STC-04-05.pdf

YVES, Parent; BLAKE, Daniel; LYONS, Carol y WATT, Andy. Procesos solares fotocatalíticos para la purificación del agua: Estado de desarrollo y barreras a su comercialización. En Solar Energy, Vol. 56, No. 5, págs. 429-437. Estados Unidos: Elsevier Science Ltda., 1996.

ANEXOS

ANEXO A. CONCEPTOS TEÓRICOS

♦ RADIACIÓN SOLAR

En términos de energía radiante emitida, el Sol puede considerarse como un cuerpo negro de temperatura 5.762 K, que es la temperatura efectiva que se obtiene a partir de la ley de Stefan-Boltzmann, que indica que la energía radiada por un cuerpo es función de la cuarta potencia de la temperatura del mismo.

$$E = \sigma * T^4$$

Ese flujo de la energía radiante que el Sol emite en todas las direcciones llega al límite superior de la atmósfera terrestre con un valor prácticamente constante. Como consecuencia, se define la **constante solar (I_0)** como la potencia recibida por unidad de superficie normal a la dirección de propagación de la radiación, para una distancia media entre el Sol a la tierra (en realidad esta distancia no es constante y tiene un rango de variación anual próximo al 3%), siendo **$I_0 = 1,367 \text{ W/m}^2$** .

Como consecuencia de las regiones de la atmósfera, la radiación solar global que llega a la superficie de la tierra ha modificado su naturaleza y, sobre todo, su componente direccional. Esta radiación global es la suma de tres componentes: radiación directa, difusa y reflejada.

La *radiación directa (I)*: Es la aportación de la radiación que viene “directamente” del disco solar sin sufrir alteraciones y, por tener carácter vectorial, puede ser concentrada por lentes y reflectores. Puede significar el 90% de la radiación global en días muy soleados (cielo claro), siendo nula en días completamente cubiertos por nubes.

La *radiación difusa (D)*: Parte de la radiación solar a su paso por la atmósfera es reflejada por los componentes atmosféricos, provocando múltiples cambios de dirección y una considerable disminución de energía.

La *radiación reflejada (R)*: También denominada albedo, es la radiación que llega a una superficie determinada como consecuencia de la reflexión de la radiación solar en el suelo o en superficies verticales.

- **Posición del Sol:** La tierra se encuentra en su posición más próxima al Sol (perihelio) aproximadamente el día 3 de Enero, y en el punto más lejano (afelio) aproximadamente el día 4 de Julio.

El plano en que se encuentra la órbita de la tierra en su movimiento alrededor del Sol se denomina eclíptica. Esta órbita está inclinada con respecto al plano del Ecuador un ángulo de $23^{\circ}45'$ y ello hace que sobre un punto determinado de la tierra los rayos del Sol caigan unas veces más perpendicularmente que en otros y, por lo tanto, que la radiación incidente sobre la misma sea diferente. Por otra parte, la tierra tiene un movimiento de rotación alrededor de su eje en el que emplea 24 horas. Ahora bien, debido a la inclinación del eje de rotación y del movimiento orbital de la tierra, la duración del día y de la noche varía según la latitud (L) del lugar. Disminuyendo el número de horas del ecuador hacia los polos.

♦ **DESINFECCIÓN DEL AGUA**

Los agentes patógenos involucrados en la transmisión hídrica son las bacterias, virus y protozoos, helmintos y cyanobacterias. Ellos pueden causar enfermedades con diferentes niveles de gravedad, desde una gastroenteritis simple hasta severos y a veces fatales cuadros de diarrea, hepatitis o fiebre tifoidea.

Tabla: Patógenos presentes en aguas superficiales.

Grupo	Agentes Patógenos
Bacterias	Escherichia Coli, Salmonella, Shigella, Vibrio Cholerae, Yersinia enterocolitica, Campylobacter jejuni.
Virus	Enterovirus, rotavirus, adenovirus.
Protozoos	Giardia, Cryptosporidium, Entamoeba histolytica, Balantidium coli.
Helmintos	Ascaris, Trichuris, Taenia.
Cyanobacterias	Anabaena, Microcystis.

Fuente: Aspectos Biológicos de la calidad del agua. Capítulo 6. <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/operacion/cap6.pdf>

Los parámetros más importantes de la radiación UV relacionados con la desinfección del agua son:

- *Longitud de onda:* El rango germicida se encuentra entre 240 y 280 nm, el cual corresponde al *ultravioleta - C* (100-280 nm).
- *Turbiedad:* La energía ultravioleta es absorbida por el agua, pero en mucho mayor grado es absorbida por los sólidos en suspensión o disueltos, turbiedad y color, por tanto deben evitarse turbiedades mayores de 5 UNT*.
- *Intensidad de la radiación:* A menor distancia del agua respecto al punto de emisión de los rayos, mayor será la intensidad de los mismos y por tanto la desinfección será más eficiente. Con respecto a esta condición no debe haber más de 75 mm de profundidad de agua para asegurar que cada porción de la misma sea alcanzada por los rayos adecuadamente.
- *Tiempo de exposición:* El tiempo requerido de exposición del agua a la luz ultravioleta es inversamente proporcional a la intensidad de la luz que penetra el

* Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT)

agua, teniendo en cuenta la capacidad de absorción del agua y la dispersión de la luz debido a la distancia.

- *Tipo de microorganismos:* La dosificación de luz ultravioleta requerida para destruir los microorganismos más comunes (coliformes, pseudomonas, etc.) varía entre 60 y 100 W/m².

En la tabla se presentan las ventajas y desventajas de la desinfección de agua mediante cloración, luz ultravioleta y fotocátalisis solar.

Tabla: Ventajas y desventajas de tratar el agua con luz UV, cloro y fotocátalisis.

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Cloración con hipoclorito de sodio o de calcio	Requiere 20 min. Producto comercial de fácil localización. Desinfección total. Queda residual para desinfección posterior.	Manejo peligroso. Forma organoclorados en presencia de materia orgánica. Deja mal sabor.
Luz ultravioleta	No produce cambios físicos o químicos en el agua. Una sobredosis en el agua no tiene ningún efecto nocivo sobre la salud. No se requieren productos químicos. Tiempo de exposición requerido es muy corto respecto a los desinfectantes químicos. El agua no requiere tratamiento previo, salvo filtración en caso de aguas turbias.	Menor eficiencia cuando aumenta la turbiedad o el color del agua. Requiere de un análisis microbiológico para medir la eficacia de la desinfección, lo que resulta difícil en áreas rurales muy alejadas. No proporciona residuales para desinfección posterior.
Fotocátalisis Solar	Manejo seguro. Puede oxidar compuestos aromáticos cíclicos, sin formar complejos tóxicos como los halógenos. No deja mal sabor. El agua permanece desinfectada por lo menos	Requiere de análisis microbiológicos para demostrar que logra desinfección total. No queda residual para desinfección posterior.

	24 horas después del tratamiento.	
--	-----------------------------------	--

Fuente: GUAGNELLI, Mónica. Tecnologías de tratamiento de aguas en Latinoamérica: oferta disponible y diagnóstico de demanda. En BLANCO, Julián y BLESA, Miguel. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua. Buenos Aires: UNSAM, 2005.

♦ FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA MEDIANTE TiO_2 PARA LA DESINFECCIÓN DE AGUAS

La posibilidad de la utilización de la radiación solar como fuente primaria de energía, le otorga un importante y significativo valor medioambiental al proceso de tratamiento y/o purificación de aguas mediante fotocátalisis heterogénea con dióxido de titanio como catalizador. La fotocátalisis heterogénea a diferencia de la mayoría de los procesos fotoquímicos, no es selectiva y puede emplearse para tratar mezclas complejas de contaminantes.

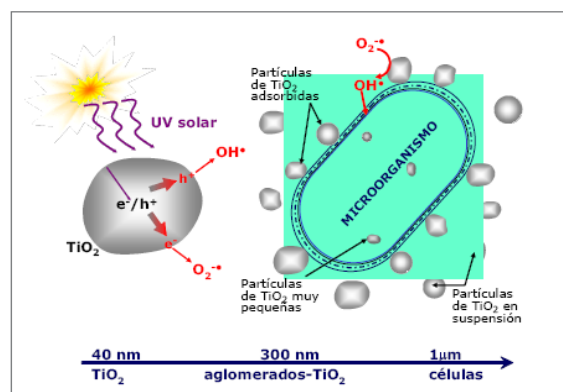
♦ *Acción bactericida de la fotocátalisis*

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

La fotocátalisis heterogénea a temperatura ambiente ofrece ventajas interesantes como son la estabilidad química del TiO_2 en medios acuosos y en un amplio rango de pH, el bajo costo del dióxido de titanio, la no utilización de aditivos (sólo el oxígeno del aire), el ser posible aplicar el sistema a concentraciones bajas, además de lograr la mineralización total de muchos contaminantes orgánicos y de su posible combinación con otros métodos de descontaminación (en particular biológicos).

El proceso fotocatalítico consta de distintas fases de reacciones químicas que generan especies reactivas (radical hidroxilo, peróxido de hidrógeno, superóxido, electrón de la banda de conducción y hueco de la banda de valencia) que pueden provocar daños mortales sobre diversos organismos. Las especies reactivas con el oxígeno son capaces de romper o dañar células provocando así la inactivación de numerosos microorganismos.

Figura: Diagrama del proceso de fotocátalisis con microorganismos



Fuente: FERNÁNDEZ, Pilar. Desinfección con reactores solares: experiencia operativa. En BLANCO, Julián y BLESA, Miguel. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua. Buenos Aires: UNSAM, 2005.

Los radicales hidroxilos formados en presencia de agua a partir de los huecos fotogenerados no pueden difundir desde la superficie del TiO₂ hasta el seno de la disolución. Para una célula o virus en contacto con la superficie del TiO₂ puede darse la transferencia directa de un electrón o un hueco al microorganismo o a alguno de sus componentes. Si las partículas de dióxido de titanio son suficientemente pequeñas, éstas pueden penetrar en la célula y los mecanismos del proceso fotocatalítico darse en su interior.

Los dos inconvenientes principales de esta técnica son su falta de efecto residual y su lento comportamiento cinético si se compara con otras tecnologías

convencionales. Aunque como ventajas destacan el aprovechamiento de una fuente de energía renovable, el uso de materiales e instalaciones que pueden llegar a ser muy baratos y la no producción de subproductos de desinfección nocivos.

♦ **Fotocatalizadores soportados como películas**

Los fotocatalizadores en polvo suspendidos en el medio a descontaminar sufren procesos de agregación que pueden afectar negativamente la eficiencia, por la disminución del área superficial disponible definida por el tamaño de las partículas.

Tabla: Óxidos de titanio en polvo disponible comercialmente.

Proveedor	Diámetro de Partícula (nm)	Diámetro de los agregados (nm)	Área superficial por unidad de masa (m ² /g)
Aldrich	150-200	300	9,6
Merck	100-200	300	10
Fisher	100-300	400	8,8
Fluka	100-400	370	9,2
Degussa	30-90	700	48
Hombikat	80-100	900	352

Fuente: RODRÍGUEZ, Juan. El fotocatalizador: síntesis, propiedades y limitaciones. En BLANCO, Julián y BLESA, Miguel. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua. Buenos Aires: UNSAM, 2005.

Su uso requiere además la necesaria incorporación de una etapa de separación y recuperación del catalizador en el proceso de descontaminación de aguas. Una alternativa al fotocatalizador suspendido es usarlo en forma de depósitos de película delgada sobre un sustrato fijo. Sin embargo, surgen problemas adicionales como por ejemplo la reducción del área superficial expuesta a la solución en comparación con las suspensiones. Por otro lado problemas de adherencia y de envenenamiento del fotocatalizador son también comunes. Adicionalmente, se debe realizar una adecuada selección del sustrato para que su interacción con el fotocatalizador sea, si no benéfica, por lo menos inocua. En este caso se utiliza como sustrato vidrio, vidrio recubierto con TiO₂ o con SnO₂;

metales, cerámicos, plásticos, etc. Se ha informado que durante el tratamiento térmico del proceso del depósito, algunos iones del sustrato migran hacia el fotocatalizador como es el caso del Na^+ en sustratos de vidrio.

Preparación de películas

Dependiendo de la aplicación y del tipo de sustrato, se utilizan distintos métodos para preparar las películas. Los métodos se pueden clasificar en dos grandes grupos, los que usan suspensiones en fase líquida (acuosa o alcohólicas), y los que usan una fase vapor para el transporte de material a depositar.

Suspensiones preparadas por Método Sol-Gel: En este caso las partículas de TiO_2 se generan en el mismo medio dispersante. Como precursores se utilizan principalmente alcóxidos de titanio, o en menor medida, TiCl_4 . El proceso de formación de la película involucra los siguientes pasos:

- Hidrólisis del precursor con formación de grupos OH terminales
- Condensación por formación de uniones $\equiv\text{Ti-O-Ti}\equiv$ con pérdida de agua.
- Condensación cruzada con formación de polímeros o partículas submicrométricas.
- Gelificación con formación de una estructura tridimensional
- Deshidratación y densificación por calentamiento.

El tamaño de partícula y las características de las películas depende de las condiciones de síntesis del sol. Los soles poliméricos producen películas más compactas debido a la interpenetración de las unidades poliméricas durante la gelificación y secado. A partir de soles particulados se obtienen películas cuya porosidad depende del grado de agregación de las partículas del sol. Cuanto mayor es la repulsión entre las partículas, menor es la agregación, y durante el secado se empaquetan en forma compacta, generando películas microporosas;

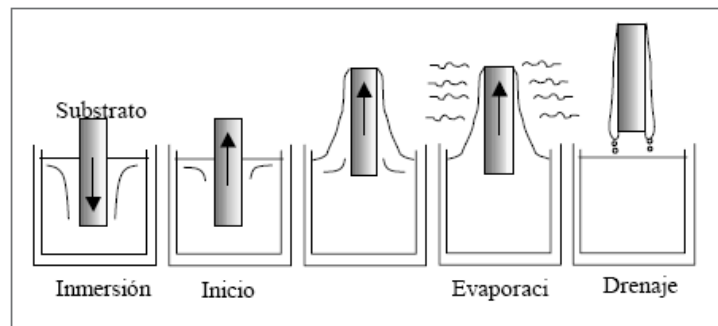
cuando hay poca repulsión entre las partículas, el empaquetamiento en las películas es menos compacto y son más porosas.

- Métodos de depósito que utilizan suspensiones en fase líquida.

Se ha llegado a depositar películas basadas en nanopartículas de TiO_2 con incrementos en áreas superficiales de ~ 300 veces en película de $3\ \mu\text{m}$ y un factor de rugosidad como de hasta 1.100 para el caso de películas de entre 7 y $12\ \mu\text{m}$ de espesor. Los métodos especiales de fijación son el *dip-coating*, *spin-coating* y sus variantes.

Dip-coating: Se sumerge el sustrato en el sol, se lo mantiene inmerso durante un tiempo, y luego se lo extrae a velocidad controlada.

Figura: Etapas del proceso de dip-coating



Fuente: RODRÍGUEZ, Juan. El fotocatalizador: síntesis, propiedades y limitaciones. En BLANCO, Julián y BLESA, Miguel. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua. Buenos Aires: UNSAM, 2005.

La figura muestra los procesos que tienen lugar cuando comienza a retirarse un sustrato no poroso. Se forma una capa de líquido asociada a la superficie que, cuando emerge a la superficie del baño, se separa en dos corrientes: una que sigue al sustrato y otra que vuelve al baño. El espesor de la película depende de

la altura a la cual se dividen las dos corrientes; esta altura depende a su vez del balance de por lo menos tres fuerzas, la viscosa de arrastre, la de gravedad y la debida a la tensión superficial en el menisco cóncavo.

Cuando la velocidad con la que se retira el sustrato U y la viscosidad del líquido η son suficientemente grandes como para hacer despreciables el efecto de la tensión superficial, el espesor h resulta de la fuerza viscosa de arrastre del líquido de densidad ρ y del drenaje producido por la fuerza de gravedad g , como se muestra en la ecuación, donde $c=0,8$ para líquidos newtonianos:

$$h = c(\eta U / \rho g)^{1/2}$$

En los procesos sol-gel, η y U no son generalmente suficientemente grandes, y debe considerarse el efecto de la tensión superficial, que adelgaza la película al incorporar la componente vertical de la tensión superficial γ , paralela a la de gravedad:

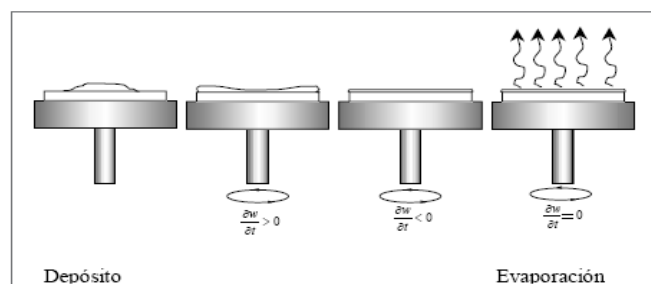
$$h = 0.94(\eta U / \gamma)^{1/6} (\eta U / \rho g)^{1/2}$$

Un resultado importante es que cuanto mayor es la velocidad de extracción U , mayor es el espesor de la película h . Estas películas no tiene un espesor constante, sino que el mismo es mayor en la región extraída del baño al final. La incorporación de agentes tensoactivos adecuados a la suspensión permite evitar esta falta de homogeneidad.

Cuando se realiza el depósito sobre sustratos porosos, el depósito recibe el nombre de Slip-coating. El líquido ingresa al soporte por capilaridad, y las partículas suspendidas van generando una capa de gel sobre las superficies en que entra en contacto.

Spin-coating: El proceso consiste en colocar un exceso de la solución a depositar sobre el substrato en reposo adherido a una plataforma giratoria; se aplica una velocidad angular al substrato y el líquido fluye radialmente hacia fuera. Luego, el líquido que llega al borde se elimina en forma de gotas; a medida que el film se adelgaza, la velocidad de eliminación del exceso de líquido disminuye porque cuando más delgada es la película mayor es su resistencia a fluir, y porque aumenta la concentración de partículas no volátiles, aumentando la viscosidad. Finalmente se completa el proceso de evaporación del solvente, dando lugar a la formación de la película.

Figura: Etapas del proceso de spin-coating



Fuente: RODRÍGUEZ, Juan. El fotocatalizador: síntesis, propiedades y limitaciones. En BLANCO, Julián y BLESA, Miguel. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua. Buenos Aires: UNSAM, 2005.

En los dos procesos anteriores, es necesario un tratamiento térmico para evaporar el solvente que contiene el fotocatalizador. Asimismo, la adición de polietilenglicol a la solución evita aglomerados e incrementa la porosidad en las películas. A diferencia del dip-coating, el spin-coating produce películas que tienden a uniformizar su espesor durante el spin off, mientras la velocidad no dependa de la fuerza de deslizamiento y sea homogénea sobre todo el substrato.

- Métodos de depósito en fase gaseosa o fase vapor

Se pueden citar: evaporación, bombardeo (sputtering), depósito químico por vapor (CVD) y rociado pirolítico. Los depósitos por evaporación y bombardeo se realizan evaporando un blanco metálico el cual se va a oxidar en una atmósfera de oxígeno o evaporando directamente los semiconductores, para lo cual se necesitan evaporadores de alta energía como por ejemplo láseres pulsantes de CO₂, haces de electrones, etc. El control estequiométrico de las películas en estos métodos es reducido, pero sus propiedades mecánicas son buenas.

♦ COLECTORES SOLARES

Un colector solar es un dispositivo que aprovecha la energía de la radiación solar, transformándola en energía térmica. Hay dos tipos básicos de colectores: sin concentración y de concentración.

Las principales ventajas e inconvenientes de los colectores cilindro parabólico (de concentración) y los colectores sin concentración, se presentan a continuación.

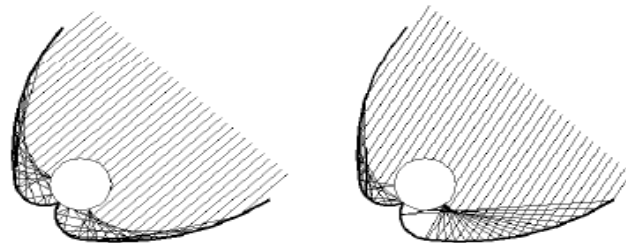
Tabla: Comparación cualitativa entre reactores CCP y reactores sin concentración para aplicaciones fotocatalíticas, usando TiO₂ y luz solar.

<i>Reactores Cilindro-Parabólicos</i>		<i>Reactores sin concentración</i>	
<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>
- Flujo turbulento (favorece la transferencia de materia). - Ausencia de vaporización de compuestos volátiles.	Sólo aprovechan la radiación directa. Alto coste. Baja eficiencia óptica Baja eficiencia cuántica Sobrecalentamiento del agua a tratar	Aprovechamiento de la radiación directa y difusa No se produce sobrecalentamiento del agua a tratar. Bajo coste. Alta eficiencia óptica y cuántica.	Flujo laminar (baja transferencia de materia). Vaporización de compuestos volátiles.

Fuente: BLANCO, Julián; MALATO, Sixto; PERAL, José. Diseño de reactores para fotocatalisis: evaluación comparativa de las distintas opciones. En Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea. 2 ed. Madrid: CIEMAT, 2004.

Los reactores tipo CPC (Cilindro Parabólico Compuesto) son unos sistemas estáticos con una superficie reflectante enfocada hacia un fotorreactor cilíndrico siguiendo una involuta. Estos dispositivos proporcionan una de las mejores ópticas para los sistemas de baja concentración, pudiendo además ser diseñados con una $RC = 1$, con lo que se consiguen simultáneamente las ventajas de los CCP y de los reactores sin concentración.

Figura: Radiación solar reflejada en un colector CPC.



Fuente: BLANCO, Julián; MALATO, Sixto; PERAL, José. Diseño de reactores para fotocatalisis: evaluación comparativa de las distintas opciones. En Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea. 2 ed. Madrid: CIEMAT, 2004.

Gracias al diseño de su superficie reflectante, casi toda la radiación que llega al área de apertura del colector (no sólo la directa, también la difusa) puede ser recogida y estar disponible para el proceso fotocatalítico en el reactor. La radiación UV reflejada por el CPC es además distribuida alrededor de la parte trasera del tubo fotorreactor y como resultado la mayoría de la circunferencia del tubo fotorreactor se encuentra iluminada. Además, como en un CCP, el agua es más fácilmente conducida y distribuida que en los diseños de los colectores sin concentración. A diferencia de las instalaciones de CCPs, no se necesitan equipos de refrigeración (que aumentan el coste de la instalación) porque no existe un sobrecalentamiento del agua.

ANEXO B. ANÁLISIS DE COSTOS DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO

En esta sección se expone los costos que se asumieron para el diseño y construcción del sistema de desinfección planteado en este proyecto. Este análisis económico sirve como parámetro de decisión a la hora de pensar en su reproducción a una escala mayor.

Tabla: Costos del colector cilindro parabólico

Descripción	Valor (\$ pesos)
Esqueleto	190.000
Tubo receptor	52.000
Sistema de control térmico y Seguidor solar	450.000
Intercambiador	80.000
Filtro de arena	30.000
Armazón	123.000
Unidades complementarias	150.000
Total	1'075.000

Fuente: Autores.

Como se observa en la tabla, el mayor costo del colector en mención es el sistema de control térmico y seguidor solar, ya que el controlador y la válvula solenoide constituyen el rubro de mayor valor, sin embargo se debe resaltar que este sistema es totalmente electrónico y que se puede adaptar a cualquier sistema sin importar sus dimensiones. Otras unidades que hacen parte del colector como el filtro y el intercambiador, siendo unas de las más importantes presentan comparativamente el menor costo del equipo. El costo de este equipo en comparación con los precios de equipos similares ofrecidos en el mercado internacional resulta muy económico, lo que permite un fácil acceso por parte de la población de escasos recursos, pudiendo convertirse en una solución viable para las comunidades rurales de nuestro país que poseen una buena intensidad de luz solar.

ANEXO C. TÉCNICA DEL NÚMERO MÁS PROBABLE (NMP)

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

Se empleó como medio de cultivo un caldo de enriquecimiento selectivo (*Fluorocult[®] Caldo LMX modificado*), para la identificación simultánea de coliformes totales y *Escherichia Coli* en la investigación bacteriológica de aguas. A continuación se describe el empleo de dicho caldo según el Manual de Medios de Cultivo de la Merck, 1994.

Forma de actuación:

Gracias a la modificación del Caldo LMX por Manafi y Kneifel se pudo aumentar la conversión de sustrato. Esto, además de una sensibilidad mejorada, lleva sobretodo a una reducción del tiempo de identificación, 24 horas generalmente.

Debido a la alta calidad alimenticia y al tampón de fosfatos contenido se garantiza un rápido crecimiento de coliformes. El contenido en laurilsulfato inhibe en gran medida el crecimiento de bacterias gram-positivas. La identificación simultánea de coliformes totales y *E. Coli* se hace posible por la adición del sustrato cromógeno 5-bromo-4-cloro-3-indolil- β -D-galactopiranosido (X-GAL), el cual es escindido por coliformes y produce un viraje de color del Caldo de cultivo a verde azulado. La coloración verde azulada indica la presencia de bacterias coliformes totales. El 1-

isopropil- β -D-1-tiogalactopiranosido (IPTG) actúa como sustancia intensificadora en la síntesis enzimática y aumenta el contenido de la actividad de β -D-galactosidasa. El sustrato fluorógeno 4-metilumbeliferil- β -D-glucuronido (MUG) es escindido por el enzima β -D-glucuronidasa altamente específico para E. Coli, y se comprueba a la luz UV de onda larga mediante fluorescencia. Con ello se da simultáneamente una indicación de la presencia de E. Coli. El contenido en triptófano mejora la reacción del Indol para la confirmación adicional de E. Coli y aumenta con ello la sensibilidad de identificación en combinación con la reacción X-GAL y la reacción MUG.

Composición (g/L): Triptosa 5,0; cloruro sódico 5,0; sorbita 1,0; triptófano 1,0; hidrógenofosfato dipotásico 2,7; dihidrógenofosfato potásico 2,0; laurilsulfato, sal sódica 0,1; 5-bromo-4-cloro-3-indolil- β -D-galactopiranosido (X-GAL) 0,08; 4-metilumbeliferil- β -D-glucuronido (MUG) 0,05; 1-isopropil- β -D-1-tiogalactopiranosido 0,1.

Preparación: Disolver 17 g/L en agua desmineralizada, introducir en un tubo de ensayo, tratar en la autoclave (15 min. a 21°C). En el análisis de muestras de agua la concentración de la cantidad de medios de cultivo depende de la cantidad de muestra de agua, por ejemplo, añadir 100 mL de muestra de agua a 100 mL de Caldo LMX de doble concentración (34 g/L). pH: 6,8 \pm 0,1 a 25°C.

El caldo llenado es límpido, incoloro a ligeramente amarillento, y para un almacenamiento a temperatura ambiente tiene una estabilidad de 6 meses. En caso de almacenamiento en el refrigerador pueden introducirse precipitaciones, las cuales no influyen en la eficacia microbiológica.

Empleo: El empleo se rige según los correspondientes métodos de investigación para agua. Incubación: 24 horas, eventualmente hasta 48 horas a 35-37°C.

Interpretación: *Coliformes Totales:* El caldo vira a verde azulado (reacción X-GAL)

Figura: Identificación de coliformes totales.

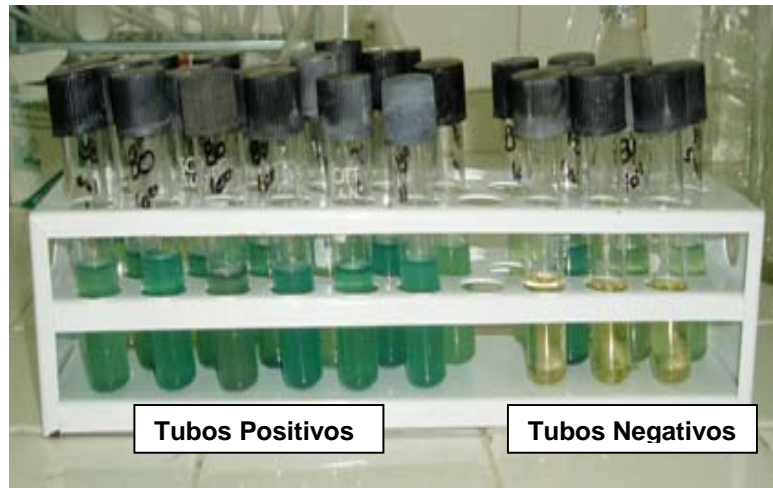
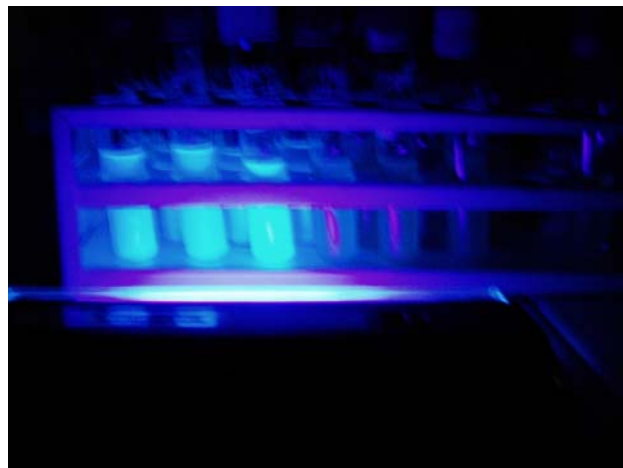


Figura: Autores

E. Coli: La lectura de la fluorescencia tiene lugar mediante una lámpara UV. Una fluorescencia azul clara en el cultivo indica *E. Coli* (reacción MUG).

Figura: Identificación de coliformes fecales mediante luz UV de onda larga.

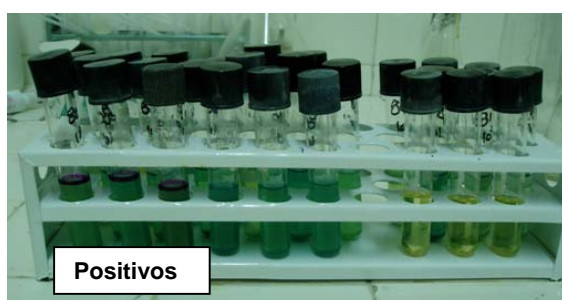


Fuente: Autores

Nota: La fluorescencia disminuye en el intervalo ácido. Por adición de unas gotas de solución 1 N de NaOH puede intensificarse la fluorescencia. Si se continúa trabajando con los cultivos, debe utilizarse una parte de la muestra para realizar el aumento del pH.

Para confirmación del hallazgo se tapa el cultivo con una capa de aprox. 5 mm del reactivo del Indol según KOVÁCS: una coloración rojo cereza de la capa del reactivo al cabo de aprox. 1-2 min confirma la presencia de E. Coli.

Figura: Identificación de coliformes fecales mediante adición de Indol.



Fuente: Autores

En base al número de tubos que después de la incubación dan resultado positivo, se deduce el NMP de coliformes mediante la consulta de la siguiente tabla.

Tabla: Selección del NMP con un límite de confianza de 95% para la prueba de fermentación utilizando 3 tubos: con porciones de 0,1; 0,01 y 0,001 g/(ml) de muestra.

No. de Tubos Positivos			95% de límite de confianza		
0,1	0,01	0,001	NMP/100mL	Inferior	Superior
0	0	0	<3	-	-
0	1	0	3+	<1	17
1	0	0	4	<1	21

1	0	1	7+	2	27
1	1	0	7	2	28
1	2	0	11+	4	35
2	0	0	9	2	38
2	0	1	14+	5	48
2	1	0	15	5	50
2	1	1	20+	7	60
2	2	0	21	8	62
3	0	0	23	9	130
3	0	1	39	10	180
3	1	0	43	10	210
3	1	1	75	20	280
3	2	0	93	30	380
3	2	1	150	50	500
3	2	2	210+	80	640
3	3	0	240	90	1400
3	3	1	460	100	2400
3	3	2	1100	300	4800
3	3	3	>1100	-	-

Fuente: Fundamentos para la caracterización de las aguas. Capítulo 7.

<http://www.cepis.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/operacion/cap07.pdf>

ANEXO D. PREPARACIÓN DE LA PELÍCULA DE TiO₂

Los reactivos utilizados fueron los siguientes:

- Alcóxido de Silicio: TEOS (Tetraetilortosilicato)
- Agua
- Ácido Clorhídrico
- Isopropanol

Relaciones molares empleadas:

$$\frac{TEOS}{H_2O} = \frac{1}{2} \qquad \frac{ISOPROPANOL}{H_2O} = 2$$

En este caso se utilizaron las siguientes cantidades:

TEOS: 21,1 g

Isopropanol: 24,3 g

H₂O: 3,65 g

TiO₂: 1 g

Procedimiento:

Se tomó un vaso de precipitados donde se mezcló Isopropanol, TEOS y H₂O en las proporciones estequiométricas anteriormente citadas. Luego se añadió una gota de HCl 3M, para iniciar la reacción y romper los enlaces. Se dejó en agitación durante 15 minutos y se tapó con papel aluminio para evitar que el TEOS reaccionara con el aire. Se dejó en reposo por un día. Luego se agregó un gramo de TiO₂ y se agitó nuevamente durante 20 minutos.

Figura: Preparación de la película de TiO_2



Fuente: Autores

Para lograr una mayor efectividad del catalizador se le dio un tratamiento al tubo absorbedor (substrato) con el fin de eliminar los iones que podrían influir en la eficiencia esperada de la película de catalizador (TiO_2), por lo que el tubo fue dejado con H_2SO_4 3M durante un día para eliminar la grasa, el sodio y el potasio que contiene el vidrio, luego se dejó con NaOH durante un día más, finalmente se lavó con agua y se colocó en la mufla para secarlo bien.

Aplicación de la película de TiO_2

Debido a la geometría del tubo absorbedor ($L=70$ cm y $D_{\text{int}} = 2,54$ cm), no se pudo utilizar ninguna de los métodos anteriormente planteados, ya que en el *Dip-coating* se obtiene el depósito de la película por ambas caras del substrato, lo cual no era necesario en este caso pues el líquido circula por el interior del tubo absorbedor.

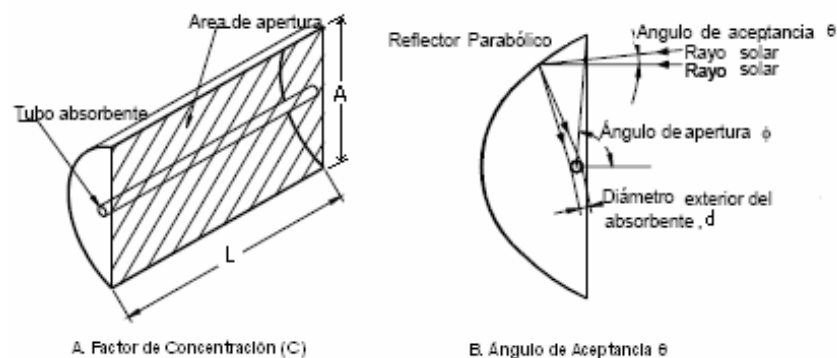
Luego de analizar las alternativas planteadas, se llegó a la conclusión de depositar la película de TiO_2 de la siguiente forma: Se inclinó el tubo, y se agregó la solución a depositar por un extremo de este, mientras se giraba lentamente de manera que la solución se dispersara sobre toda la superficie del tubo; la solución llevaba dos direcciones una axial y una radial. Cuando el líquido llegó al otro extremo del tubo, se eliminó el exceso en forma de gotas. Finalmente el proceso se completó realizando una evaporación del solvente, a una temperatura de 100°C por 4 horas, dando lugar a la formación de la película.

ANEXO E. BALANCE ENERGÉTICO DEL COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO

En esta sección se presentan los cálculos necesarios para obtener el rendimiento del colector cilindro parabólico planteado. Los datos están basados en propiedades meteorológicas de la zona industrial de Chimitá, sitio cercano al barrio El Poblado, el cual fue escogido para la realización de las pruebas de desinfección.

Dos parámetros básicos de un colector cilindro parabólico son el factor de concentración y el ángulo de aceptación. El *factor de concentración* (C) se define como la relación entre el área de apertura del colector y el área del absorbente (en sistemas térmicos) o reactor (en sistemas fotoquímicos). El área de apertura es el área que intercepta la radiación, y el área del absorbente, el área del componente que recibe la radiación solar (ya sea completamente iluminada o no).

Figura: Parámetros básicos del CCP



Fuente: SILVA, Manuel. Sistemas termosolares de concentración. DIEMF, 2005.

El ángulo de aceptación, θ , es el ángulo máximo que pueden formar dos rayos en un plano transversal de la apertura del colector de manera que, una vez reflejados dichos rayos intercepten el tubo absorbente. Los CCP actuales tienen un ángulo

de aceptación inferior a 1° y necesitan un sistema de seguimiento preciso, de lo contrario solamente captarían una pequeña fracción de la radiación solar directa disponible en cada momento. La precisión que tienen los sistemas de posicionamiento usados actualmente suele ser del orden de 0,25°.

El factor de concentración para el colector planteado se puede calcular de la siguiente manera:

$$C = \frac{A * L}{\pi * d * L} = \frac{A}{\pi * d}$$

Siendo: A: Longitud de apertura del concentrador= 0,6 m

d: Diámetro del tubo receptor = 0,03 m

L: Longitud del concentrador = 0,6 m

$$C = \frac{A}{\pi * d} = \frac{0.6}{\pi * 0.03} = 6.37$$

♦ PÉRDIDAS EN UN CCP

Cuando la radiación solar alcanza la superficie de un colector parabólico, se pierde una cantidad importante de ella debido a diferentes factores. El total de las pérdidas se puede dividir en tres grupos:

- Pérdidas geométricas
- Pérdidas térmicas desde el tubo absorbedor al ambiente
- Pérdidas ópticas

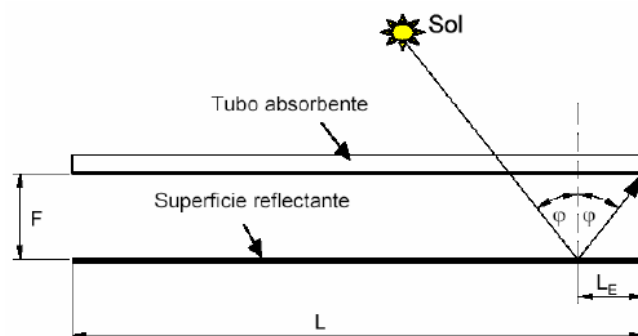
- **Pérdidas geométricas:** Provocan una disminución del área efectiva de captación de los colectores. Las pérdidas geométricas en un CCP pueden ser inherentes a cada colector o debidas a la posición relativa de los colectores entre

sí. Estas últimas son llamadas “pérdidas por sombras” y son causadas por la sombra parcial que algunos colectores pueden proyectar en los colectores adyacentes. Obviamente, cuanta mayor distancia exista entre las filas paralelas de colectores, menor es el sombreado que unos pueden provocar sobre otros.

Las pérdidas geométricas inherentes a cada CCP están causadas por el hecho de que estos colectores están provistos de un sistema de seguimiento solar en un solo eje, y, por lo tanto, sólo pueden girar alrededor de este eje, lo que da lugar a la existencia del llamado ángulo de incidencia, ϕ , que es el ángulo formado por la radiación solar directa que incide sobre el plano de apertura del colector y la normal a dicho plano de apertura. Este ángulo de incidencia depende de la hora y el día del año, y provoca que en los extremos del colector haya una pérdida de superficie reflexiva útil.

La siguiente figura muestra un corte longitudinal de un CCP. Nótese que la radiación reflejada por el tramo de superficie reflexiva de longitud L_E no puede interceptar el tubo absorbente.

Figura: Corte longitudinal de un CCP, mostrando el ángulo de incidencia ϕ



Fuente: SILVA, Manuel. Sistemas termosolares de concentración. DIEMF, 2005.

El área de colector que se pierde por este hecho, S_E , viene dado por las siguientes ecuaciones:

$$S_E = A * L_E = A * F_m * \tan \varphi$$

$$F_m = f + \left(\frac{f * A^2}{48 * f^2} \right) = f + \left(\frac{A^2}{48 * f} \right)$$

donde A es el ancho del concentrador cilindro parabólico [m], L la longitud del concentrador [m], f la distancia focal de la parábola [m], F_m la distancia media entre la superficie de la parábola y el absorbente dentro de una misma sección transversal del colector [m], y φ el ángulo de incidencia de la radiación solar directa.

Reemplazando en la ecuación, se halla el área que se pierde por final del colector.

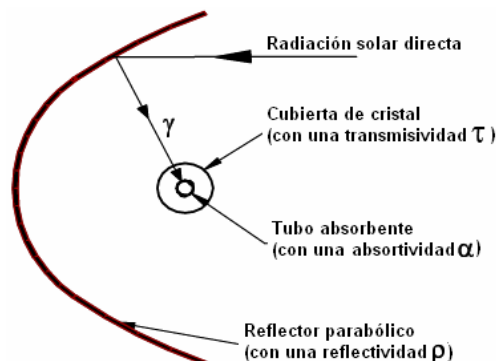
$$F_m = f + \left(\frac{A^2}{48 * f} \right) = 0,075 + \left(\frac{0,6^2}{48 * 0,075} \right) = 0,175m$$

$$S_E = A * F_m * \tan \varphi = 0,6 * 0,175 * \tan(0^\circ) = 0m$$

Los valores de la reflectividad, absorptividad y transmisividad presentan su valor máximo cuando el ángulo de incidencia es igual a 0° (φ = 0°).

- **Pérdidas ópticas:** Son debidas a que ni la superficie reflexiva del concentrador es un reflector perfecto, ni el tubo receptor es un absorbente perfecto, ni la geometría del concentrador parabólico es perfecta. Estas imperfecciones provocan que solo una parte de la radiación solar directa que incide sobre la superficie del concentrador parabólico llegue al fluido que circula por el interior del tubo absorbente. La siguiente figura muestra los cuatro parámetros que intervienen en las pérdidas ópticas de un CCP.

Figura: Pérdidas ópticas en un CCP



Fuente: SILVA, Manuel. Sistemas termosolares de concentración. DIEMF, 2005

- **Reflectividad, δ :** Se refiere al valor porcentual de la energía radiante que es reflejada del total de energía incidente que golpea la superficie del concentrador parabólico. El acero inoxidable posee un índice de emitancia de 0,12 (12%), lo cual indica que su reflectancia es de 0,88 (88%).

- **Factor de interceptación, γ :** Los posibles errores de seguimiento solar provocan que algunos rayos no intercepten al tubo absorbente durante su trayectoria después de ser reflejados. Estas pérdidas se cuantifican con el llamado factor de interceptación.

$$\gamma = 1 - e^{-\left(\frac{hf}{R}\right)^2}$$

Siendo f distancia focal y R el radio de la superficie de abertura del concentrador en metros. A continuación se presentan los pasos seguidos para este cálculo.

Sabiendo que la longitud de apertura del concentrador es 0,6 m directamente se asume que $x = 0,3m$. De la ecuación de la parábola del CCP, se halla la altura máxima:

$$y = \frac{x^2}{4f} = \frac{0,3^2}{4 * 0,075} = 0,3m$$

Luego se obtiene el radio de la parábola R en metros:

$$\begin{aligned}R^2 &= (y - f)^2 + x^2 \\R^2 &= (0,3 - 0,075)^2 + 0,3^2 = 0,141m^2 \\R &= 0,375m\end{aligned}$$

Siguiendo, se calcula la densidad máxima de flujo de radiación, $I_{m\acute{a}x}$:

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{I * \delta}{\pi} = \frac{636 * 0,88}{\pi} = 178,15W / m^2$$

Con los anteriores parámetros se obtiene h (W/m):

$$\begin{aligned}h &= I_{m\acute{a}x} * R * \sqrt{\pi} \\h &= 178,15 * 0,375 * \sqrt{\pi} = 118,41W / m\end{aligned}$$

Finalmente, se obtiene el factor de interceptación:

$$\begin{aligned}\gamma &= 1 - e^{-\left(\frac{hf}{R}\right)^2} \\ \gamma &= 1 - e^{-\left(\frac{118,41 * 0,075}{0,375}\right)^2} = 1\end{aligned}$$

Lo cual indica que la radiación es interceptada en su totalidad por el tubo absorbedor.

- *Transmisividad* de la cubierta de cristal, τ . El tubo absorbedor puede estar situado dentro de una cubierta de cristal para disminuir las pérdidas térmicas y proteger a la superficie selectiva. La razón entre la radiación que pasa a través de la cubierta de cristal y la radiación total incidente sobre ella da la transmisividad de dicha cubierta de vidrio. En el caso de no existir cubiertas, $\tau = 1$.

- *Absortividad* (α) de la superficie selectiva. Este parámetro cuantifica la cantidad de radiación incidente sobre la superficie selectiva que ésta puede absorber. El vidrio Pyrex posee una absortividad de 0,13.

Al producto de los cuatro parámetros descritos anteriormente se le denomina Rendimiento Óptico Pico del CCP, el cual tiene en cuenta todas las pérdidas ópticas que tienen lugar en el colector con un ángulo de incidencia de 0° .

$$\eta_{opt,0^\circ} = \delta * \alpha * \tau * \gamma$$

$$\eta_{opt,0^\circ} = 0,88 * 0,13 * 1 * 1$$

$$\eta_{opt,0^\circ} = 0,114$$

- **Pérdidas térmicas:** Se producen principalmente en el tubo absorbedor y en las tuberías de fluido térmico, siendo más importantes las del tubo absorbente.

Las pérdidas térmicas asociadas al tubo absorbente están formadas por: pérdidas de calor por conducción a través de los soportes del tubo absorbente, pérdidas por radiación, convección y conducción desde el tubo absorbente hacia la cubierta de cristal, y pérdidas por convección y radiación desde el tubo de cristal al ambiente.

Aunque cada una de las pérdidas térmicas anteriormente mencionadas podría calcularse analíticamente, aplicando las bien conocidas ecuaciones que rigen los procesos de transferencia de calor por radiación, convección y conducción, en la práctica las pérdidas térmicas globales, Q_L , en un CCP se calculan mediante un coeficiente global de pérdidas térmicas desde el tubo absorbente al ambiente, U_L :

$$Q_L = Q_{abs,rad} + Q_{abs,cond/conv} = U_L * \pi * d_e * L * (T_{abs} - T_{amb})$$

donde: T_{abs} es la temperatura media del tubo absorbente (K)

T_{amb} es la temperatura ambiente (K)

d_e es el diámetro exterior del tubo absorbedor (m)

L es la longitud de dicho tubo (que coincide con la longitud del CCP) [m]

U_L está dado por unidad de área del tubo absorbente ($W/m^2.K$)

De la siguiente ecuación se halla el coeficiente de pérdida por radiación, h_r

$$h_r = 4 * \sigma * \varepsilon_r * \hat{T}^3$$

donde:

$$\hat{T}: \text{Temperatura media de radiación} = \frac{T_m + T_a}{2} = 38,75^\circ\text{C} \text{ (311,9 K)}$$

$$T_a: \text{Temperatura ambiente promedio en Chimitá} = 30^\circ\text{C} \text{ (303,15 K)}$$

$$T_{fi}: \text{Temperatura de entrada del fluido al colector} = 25^\circ\text{C} \text{ (298,15 K)}$$

$$T_{fo}: \text{Temperatura de salida del fluido del colector} = 70^\circ\text{C} \text{ (343,15 K)}$$

$$T_m: \text{Temperatura promedio del fluido} = \frac{T_{fi} + T_{fo}}{2} = 47,5^\circ\text{C} \text{ (320,65 K)}$$

$$\varepsilon_r: \text{Emitancia del absorbedor} = 0,85 \text{ (Vidrio Pyrex)}$$

$$\sigma: \text{Constante de Stefan-Boltzman} = 5,67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

Reemplazando

$$h_r = 4 * 5,67 * 10^{-8} * 0,85 * (311,9)^3 = 5,85 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Teniendo en cuenta que la velocidad promedio del viento en Chimitá es: $V=2,57$ m/s, se halla el coeficiente de pérdida por convección debido al viento, h_{Viento}

$$h_{Viento} = 5.7 + 3.8V$$

$$h_{Viento} = 5.7 + 3.8 * 2,57 = 15,47 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

El coeficiente global de pérdidas al exterior U_L , está dado por:

$$\frac{1}{U_L} = \frac{1}{h_{viento}} + \frac{1}{h_r}$$

$$\frac{1}{U_L} = \frac{1}{15,47} + \frac{1}{5,85}$$

$$U_L = 4,245W / m^2 K$$

Finalmente se obtiene las pérdidas térmicas globales

$$Q_L = Q_{abs,rad} + Q_{abs,cond/conv} = U_L * \pi * d_e * L * (T_{abs} - T_{amb})$$

donde: T_{abs} es la temperatura media del tubo absorbente = 70°C (343,15 K)

T_{amb} es la temperatura ambiente = 30°C (303,15 K)

d_e es el diámetro exterior del tubo absorbedor = 0,03 m

L es la longitud del tubo = 0,6 m

Reemplazando

$$Q_L = 4,245 * \pi * 0,03 * 0,6 * (343,15 - 303,15)$$

$$Q_L = 9,602W$$

- *Cálculo del factor de eficiencia*

Como el flujo de calor es elevado, hay que tener en cuenta el coeficiente de transferencia de calor por conducción k , desde la superficie exterior del tubo absorbedor a la interior, por lo que el coeficiente global de transmisión de calor U basado en el diámetro exterior del tubo, desde la superficie exterior al fluido, es:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_L} + \frac{d_e}{h_{CF} d_i} + \frac{d_e}{2K} \ln \frac{d_e}{d_i}$$

Donde:

d_e : Diámetro exterior del tubo = 0,03 m

d_i : Diámetro interior del tubo absorbedor = 0,0254 m

h_{CF} : Coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior del tubo ($W/m^2.K$)

K : Conductividad térmica del tubo = 1,1 $W/m.K$

De la siguiente ecuación se obtiene h_{CF} :

$$h_{CF} = \left(\frac{k}{d_e} \right) * N_{UDC}$$

siendo k la conductividad térmica del agua evaluada a $T_m = 0,642$ $W/m.K$

Para obtener N_{UDC} (Correlación para flujos en tubos):

$$N_{UDC} = \left[\frac{\mu_s}{\mu_b} \right]^n * N_{UD}$$

Donde:

n : Factor adimensional para fluidos que se calientan = -0.11

μ_s : Viscosidad dinámica evaluada a temperatura de superficie, $\frac{T_m + T_a}{2} = 311,9$ K,

$\mu_s = 6,75 * 10^{-4}$ kg/m.s

μ_b : Viscosidad dinámica evaluada a temperatura promedio de fluido, T_m

$\mu_b = 6,08 * 10^{-4}$ kg/m.s

El número de Nusselt para flujos laminares en tubos cilíndricos, N_{UD} :

$$N_{UD} = 3.66 + \frac{0.065 \left(\frac{d_e}{L} \right) Re * Pr}{1 + 0.04 \left[\left(\frac{d_e}{L} \right) Re * Pr \right]^{2/3}}$$

Donde:

$$\text{Re: Número de Reynolds} = \text{Re} = \frac{\rho * V * d_i}{\mu}$$

P_r : Número de Prandtl a $T_m = 3,84$

μ : Viscosidad del agua evaluada a $T_m = 6,08 * 10^{-4} \text{ kg/m.s}$

ρ : Densidad del agua evaluada a $T_m = 988,9 \text{ kg/m}^3$

\dot{Q} : Flujo volumétrico a través del tubo $= 1,0 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

V : Velocidad del flujo del agua dentro del tubo (m/s)

$$V = \frac{\dot{Q}}{A_f} = \frac{1 * 10^{-6}}{5,067 * 10^{-4}} = 1,97 * 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$A_f: \text{Área de flujo del tubo} = \frac{\pi * d_i^2}{4} = \frac{\pi * (0,0254)^2}{4} = 5,067 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Calculando el número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{988,9 * 1,97 * 10^{-3} * 0,0254}{6,08 * 10^{-4}} = 81,39$$

De la ecuación del número de Nusselt:

$$N_{UD} = 3,66 + \frac{0,065 \left(\frac{0,03}{0,6} \right) * 81,39 * 3,84}{1 + 0,04 \left[\left(\frac{0,03}{0,6} \right) * 81,39 * 3,84 \right]^{2/3}}$$

$$N_{UD} = 4,47$$

Y la correlación para flujo en tubos es:

$$N_{UDC} = \left[\frac{6,75 * 10^{-4}}{6,08 * 10^{-4}} \right]^{-0,11} * 4,47 = 4,42$$

Reemplazando términos, se obtiene h_{CF}

$$h_{CF} = \left(\frac{0,642}{0,03} \right) * 4,42 = 94,59 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Finalmente se obtiene el coeficiente de transmisión de calor U

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{4,245} + \frac{0,03}{94,59 * 0,0254} + \frac{0,03}{2 * 1,1} \ln \frac{0,03}{0,0254}$$

$$U = 3,99 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

El factor de eficiencia (F') del colector se calcula como

$$F' = \frac{U}{U_L} = \frac{3,99}{4,245} = 0,94$$

- *Cálculo de la energía solar incidente:* La energía solar incidente sobre un colector cilindro parabólico viene dada por:

$$Q_{sol} = A_a * I * \text{Cos}(\varphi)$$

siendo:

A_a = Área de apertura del concentrador = 0,36 m²

I = Densidad de flujo de radiación = 636 W/m²

φ = ángulo de incidencia = 0°

Q_{sol} = Energía solar incidente sobre el colector (W)

Reemplazando $Q_{sol} = 0,36 * 636 * \text{Cos}(0^\circ)$

$$Q_{sol} = 228,96 \text{ W}$$

- *Cálculo de la energía térmica útil [W], suministrada por el colector:* Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q_{\text{útil}} = \dot{m} * C_p * (T_{fo} - T_{fi})$$

Donde: \dot{m} es el flujo másico de agua que circula por el tubo

El rendimiento térmico del colector viene dado como el cociente entre la energía térmica útil y la energía solar incidente sobre el colector:

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{sol}}}$$

Por último, el rendimiento global considera todas las pérdidas, tanto ópticas como geométricas y térmicas, que tienen lugar en el colector.

$$\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{opt},0^\circ} \cdot K \cdot \eta_{\text{térmico}}$$

El modificador por ángulo de incidencia, K , depende directamente del ángulo de incidencia, siendo $K=1$ para $\varphi=0^\circ$, y $K=0$ para $\varphi=90^\circ$. El valor de K se da como una función $K=K(\varphi)$ que se determina experimentalmente.

Los cálculos de la eficiencia térmica y la eficiencia global, se realizan para los métodos térmico y térmico-fotocatalítico, utilizados en el desarrollo de este trabajo.

- **Método Térmico:** El aprovechamiento de la energía se da hasta llevar el fluido a 70°C , temperatura a la cual se logra la remoción completa de la *Escherichia Coli*.

$$Q_{\text{útil}} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{fo} - T_{fi})$$

$$Q_{\text{útil}} = 9,88E-4 \cdot 4186 \cdot (343,15 - 298,15)$$

$$Q_{\text{útil}} = 186,18W$$

Donde: \dot{m} es el flujo másico de agua que circula por el tubo = $1,87E-3$ kg/s

Finalmente se obtiene el rendimiento térmico y global del colector:

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{sol}}} = \frac{186,18}{228,96} = 0,813$$

$$\eta_{global} = \eta_{opt,0^\circ} \cdot K \cdot \eta_{térmico}$$

$$\eta_{global} = 0,114 * 1 * 0,813 = 0,0927$$

- **Método Térmico-Fotocatalítico:** La energía se aprovecha hasta alcanzar una temperatura en el fluido de 60°C, temperatura a la cual se logra la remoción completa de la *Escherichia Coli*.

$$Q_{útil} = \dot{m} * Cp * (T_{fo} - T_{fi})$$

$$Q_{útil} = 9,88E - 4 * 4186 * (333,15 - 298,15)$$

$$Q_{útil} = 144,75W$$

Donde: \dot{m} es el flujo másico de agua que circula por el tubo = 1,87E-3 kg/s

Finalmente se obtiene el rendimiento térmico del colector:

$$\eta_{Fotocatalítica} = \frac{Q_{útil}}{Q_{sol}} = \frac{144,75}{228,96} = 0,6322$$

$$\eta_{global} = \eta_{opt,0^\circ} \cdot K \cdot \eta_{fotocatalítica}$$

$$\eta_{global} = 0,114 * 1 * 0,6322 = 0,0721$$

A continuación se presentan los valores obtenidos del factor de eficiencia, el rendimiento térmico, óptico y global correspondientes al colector de experimentación.

Tabla: Parámetros del colector cilindro parabólico planteado

Parámetros del CCP	Térmico	Térmico-Fotocatalítico
Rendimiento Térmico ($\eta_{térmico}$)	0,813	0,632
Rendimiento Óptico ($\eta_{opt,0^\circ}$)	0,114	0,114
Rendimiento Global (η_{global})	0,0927	0,0721
Factor de Eficiencia	0,94	0,938

Fuente: Autores

ANEXO F. ANÁLISIS POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA REGIÓN

En esta sección se realiza la evaluación del potencial energético solar disponible en la ciudad de Bucaramanga y la zona industrial de Chimitá, ubicada en el municipio de Girón; la información fue suministrada por la Corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB) a través de las estaciones de monitoreo ambiental, la primera ubicada en el centro de la ciudad y la segunda en la zona industrial de Chimitá. Cabe notar que la radiación reportada es la radiación total (Directa más difusa).

La información analizada es la correspondiente desde el mes de enero de 2005 hasta marzo de 2006. Los registros fueron llevados a promedios mensuales y anuales haciendo la comparación entre las ciudades analizadas; además, mediante el cálculo del área bajo la curva media anual de radiación se obtuvo el potencial energético en KW-h disponible. Estos datos son importantes para el funcionamiento de cualquier sistema que requiera de la energía solar.

♦ ANÁLISIS MENSUAL DE LA RADIACIÓN

Los datos diarios se llevaron a promedios mensuales, a los cuales se les evaluó las horas de radiación registrable (HRR); es decir aquella radiación que supera la unidad (1 W/m^2), se evaluaron las horas de radiación efectiva (HRE) que es aquella radiación que supera los 100 W/m^2 , se registra además el pico máximo alcanzado durante el mes y el pico promedio.

Tabla: Registros mensuales años 2005 y 2006 en Bucaramanga

Mes	HRR	HRE	Pico (W/m ²)	Pico Promedio (W/m ²)
Enero-05	6 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	936	773
Febrero-05	6 a.m – 5 p.m	8 a.m – 4 p.m	993	747
Marzo-05	6 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	1149	987
Abril-05	5 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	1248	878
Mayo-05	5 a.m – 6 p.m	7 a.m – 4 p.m	1255	952
Junio-05	5 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	1104	836
Julio-05	5 a.m – 6 p.m	7 a.m – 5 p.m	1103	794
Agosto-05	5 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	1110	842
Septiembre-05	5 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	1153	831
Octubre-05	5 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	1149	880
Noviembre-05	5 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	991	755
Diciembre-05	6 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	935	804
Enero-06	6 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	919	741
Febrero-06	6 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	985	849
Marzo-06	6 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	1147	865

Fuente: Autores

Tabla: Registros mensuales años 2005 y 2006 en Chimitá

Mes	HRR	HRE	Pico (W/m ²)	Pico Promedio (W/m ²)
Enero-05	6 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	1047	838
Febrero-05	6 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	1155	851
Marzo-05	6 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	1163	971
Abril-05	5 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	1249	954
Mayo-05	5 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	1244	1044
Junio-05	5 a.m – 6 p.m	7 a.m – 4 p.m	1159	960
Julio-05	5 a.m – 6 p.m	7 a.m – 4 p.m	1162	986
Agosto-05	5 a.m – 6 p.m	7 a.m – 4 p.m	1173	940
Septiembre-05	5 a.m – 5 p.m	6 a.m – 4 p.m	1115	991
Octubre-05	5 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	1164	891
Noviembre-05	6 a.m – 5 p.m	7 a.m – 3 p.m	1134	882
Diciembre-05	6 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	989	854
Enero-06	6 a.m – 5 p.m	7 a.m – 4 p.m	1084	804
Febrero-06	6 a.m – 7 p.m	7 a.m – 4 p.m	1095	908
Marzo-06	6 a.m – 6 p.m	7 a.m – 4 p.m	1238	916

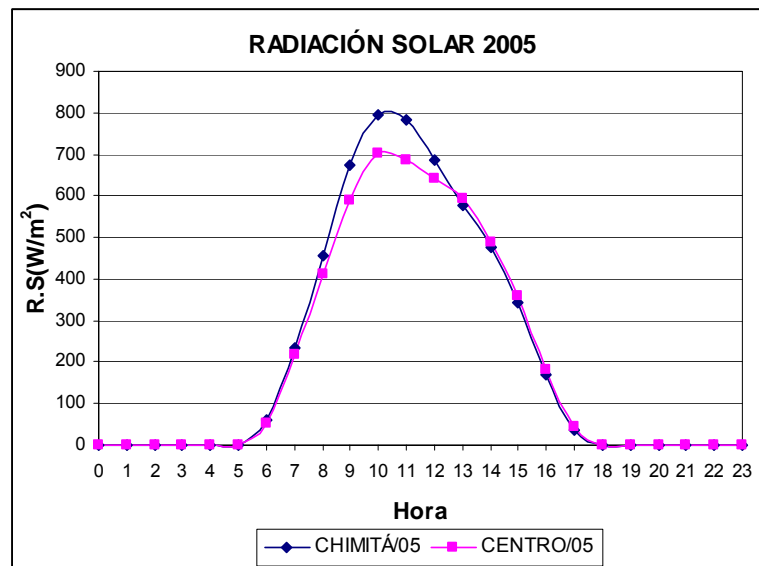
Fuente: Autores

Después del análisis de los datos anteriormente expuestos se concluyó que el mejor lugar para la realización de las pruebas de desinfección es la zona Industrial Chimitá, ya que como se observa en las anteriores tablas, este sitio cuenta con mejor potencial energético comparado con la ciudad de Bucaramanga, además se puede concluir que el rango promedio de radiación efectiva estuvo entre las 7 a.m. y las 4 p.m. lo que significa que en promedio hubo durante el día 9 horas efectivas o aprovechables de sol.

♦ ANÁLISIS ANUAL DE LA RADIACIÓN

Para este análisis se tomó la información disponible y se realizó un promedio anual a partir de los registros diarios. Estos promedios son un índice aproximado del comportamiento de la radiación durante el año en cuestión. La radiación anual disponible en la región por metro cuadrado se obtiene de evaluar el área bajo la curva en las horas de radiación efectivas para cada lugar analizado.

Figura: Gráfica comparativa de la radiación anual en el año 2005



Fuente: Autores

Al realizar el ajuste de datos se buscó la mejor correlación y se obtuvo para cada lugar un polinomio de la siguiente forma:

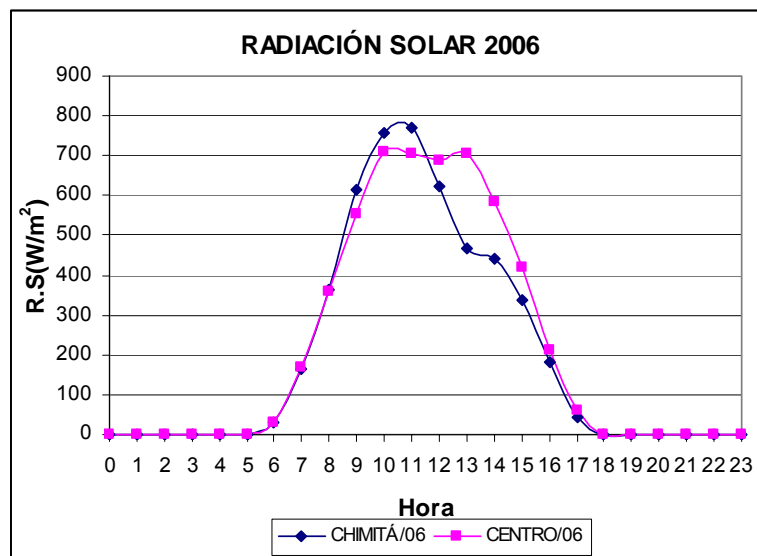
Centro 2005:

$$f(x) = -0,0015x^6 + 0,0995x^5 - 2,4436x^4 + 25,575x^3 - 102,28x^2 + 125,31x - 11,199$$

Chimitá 2005:

$$f(x) = -0,0016x^6 + 0,1101x^5 - 2,6673x^4 + 27,386x^3 - 105,79x^2 + 120,05x - 5,6849$$

Figura: Gráfica comparativa de la radiación anual en el año 2006



Fuente: Autores

Centro 2006:

$$f(x) = -0,0016x^6 + 0,1124x^5 - 2,8382x^4 + 31,028x^3 - 134,93x^2 + 190,63x - 28,378$$

Chimitá 2006:

$$f(x) = -0,0016x^6 + 0,1056x^5 - 2,5839x^4 + 26,983x^3 - 108,03x^2 + 130,11x - 9,0746$$

Integrando desde las siete de la mañana hasta las cuatro de la tarde cada una de las funciones anteriores, se obtiene el área bajo la curva:

$$\text{Centro 2005: } \int_7^{16} f(x) = 3.265 \frac{\text{W.h}}{\text{m}^2} = 3,3 \frac{\text{kW.h}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Chimitá 2005: } \int_7^{16} f(x) = 6.412 \frac{\text{W.h}}{\text{m}^2} = 6,4 \frac{\text{kW.h}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Centro 2006: } \int_7^{16} f(x) = 5.663 \frac{\text{W.h}}{\text{m}^2} = 5,7 \frac{\text{kW.h}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Chimitá 2006: } \int_7^{16} f(x) = 2.974 \frac{\text{W.h}}{\text{m}^2} = 3,0 \frac{\text{kW.h}}{\text{m}^2}$$

Realizando un promedio ponderado teniendo en cuenta que un año tiene mayor número de registros que el otro, se obtiene la radiación media de cada lugar:

$$\text{Centro: } 3,3 * (0,8) + 5,7 * (0,2) = 3,78 \frac{\text{kW.h}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Chimitá: } 6,4 * (0,8) + 3,0 * (0,2) = 5,72 \frac{\text{kW.h}}{\text{m}^2}$$

En conclusión, la radiación solar disponible en el centro de Bucaramanga se considera como buena, sin llegar al nivel de la zona industrial de Chimitá, la cual se presenta como mejor alternativa para llevar a cabo las pruebas de desinfección.

ANEXO G. DATOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

Los datos registrados correspondientes a las pruebas realizadas mediante el proceso térmico y el fotocatalítico se presentan en las siguientes tablas.

Tabla: Registros proceso térmico a 60°C. 20 de marzo de 2006.

FECHA: 20 de Marzo de 2006				SET POINT: 60 °C TÉRMICO		
HORA	T1	T2	T3	T4	V (ml)	NOTA
08:00	20	22	28	22	0	S
08:10	22	24	34	22	0	S
08:20	20	26	42	24	0	S
08:30	24	26	50	22	0	S
08:40	22	24	58	24	0	S
08:50	20	22	64	26	65	PN
09:00	20	24	66	28	185	S
09:10	18	22	62	24	140	S
09:20	20	24	68	24	360	S
09:30	18	24	64	26	295	S
09:40	22	28	66	30	175	S
09:50	18	30	62	28	420	S
10:00	20	30	68	24	335	S
10:10	20	30	70	28	185	S
10:20	18	28	64	26	215	S
10:30	22	28	68	28	395	S
10:40	20	26	66	24	185	S
10:50	20	28	70	30	360	S
11:00	24	30	74	30	385	S
11:10	22	30	64	26	230	S
11:20	24	30	68	24	450	S
11:30	20	26	62	26	395	S
11:40	20	28	66	26	235	S
11:50	18	28	66	26	320	S
12:00	20	26	70	28	275	S
12:10	20	24	64	26	480	S
12:20	20	26	68	24	380	PN
12:30	22	28	66	24	200	S
12:40	24	28	72	26	530	S
12:50	22	28	64	26	345	S
01:00	22	28	62	24	495	S
01:10	22	26	64	24	220	S
01:20	22	28	62	26	195	S

01:30	20	26	58	24	295	S
01:40	20	28	62	28	265	S
01:50	22	26	62	28	530	S
02:00	24	28	64	28	220	S
02:10	24	28	60	32	265	S
02:20	22	28	68	26	350	S
02:30	22	28	72	24	475	S
02:40	24	28	64	28	240	S
02:50	22	28	66	24	185	S
03:00	24	30	62	28	390	S
03:10	26	30	64	30	205	S
03:20	26	28	60	28	450	S
03:30	26	28	58	28	150	S
03:40	26	26	64	26	215	PN
03:50	24	26	66	24	275	S
04:00	22	24	62	26	100	S

Fuente: Autores

Tabla: Registros proceso térmico a 64°C. 24 de marzo de 2006.

FECHA: 24 de Marzo de 2006				SET POINT:64 °C TÉRMICO		
HORA	T1	T2	T3	T4	V (ml)	NOTA
08:00	18	20	28	18	0	PN
08:10	18	20	28	20	0	PN
08:20	20	22	32	20	0	PN
08:30	20	22	36	20	0	S
08:40	20	22	42	22	0	S
08:50	18	20	38	22	0	PN
09:00	18	22	40	20	0	PN
09:10	22	24	48	22	0	PN
09:20	20	24	54	22	0	PN
09:30	22	24	56	20	0	PN
09:40	18	24	56	22	0	PN
09:50	20	22	60	22	0	PN
10:00	20	24	60	20	0	PN
10:10	20	24	62	20	0	PN
10:20	20	24	62	22	0	PN
10:30	22	26	60	20	0	PN
10:40	22	26	64	22	35	PN
10:50	20	26	62	22	0	PN
11:00	20	28	64	24	45	S
11:10	22	28	66	22	90	S
11:20	24	28	64	24	120	S
11:30	24	32	68	26	410	S
11:40	24	32	66	24	270	S

11:50	24	34	66	24	310	S
12:00	22	30	66	26	350	S
12:10	22	32	66	24	270	S
12:20	24	30	64	24	165	S
12:30	22	26	60	24	45	S
12:40	24	30	58	22	140	S
12:50	24	30	66	24	160	S
01:00	24	32	64	24	355	S
01:10	24	30	64	26	435	S
01:20	26	32	68	28	400	S
01:30	26	36	68	28	450	S
01:40	22	36	66	30	520	S
01:50	28	30	68	28	605	S
02:00	26	32	70	26	425	S
02:10	26	32	70	28	525	S
02:20	26	30	68	28	325	S
02:30	24	30	64	26	275	S
02:40	26	30	66	26	275	S
02:50	24	30	64	26	225	S
03:00	24	30	66	30	255	S
03:10	24	32	68	26	200	S
03:20	26	32	68	28	215	S
03:30	26	30	68	28	260	S
03:40	24	30	68	26	130	S
03:50	22	28	66	24	205	S
04:00	20	26	64	24	40	S

Fuente: Autores

Tabla: Registros proceso térmico a 66°C. 25 de marzo de 2006.

FECHA: 25 de Marzo de 2006				SET POINT:66 °C TÉRMICO		
HORA	T1	T2	T3	T4	V (ml)	NOTA
08:00	20	22	26	22	0	PN
08:10	20	22	28	24	0	PN
08:20	22	24	34	22	0	PN
08:30	22	24	46	24	0	S
08:40	22	22	54	22	0	S
08:50	20	22	62	22	0	S
09:00	20	24	68	26	145	S
09:10	22	26	66	26	205	S
09:20	20	24	68	24	175	S
09:30	24	26	72	28	380	PN
09:40	22	26	70	30	290	S
09:50	20	24	74	28	405	S
10:00	22	28	76	32	215	S

10:10	24	24	68	34	385	S
10:20	20	30	72	28	170	S
10:30	22	26	70	26	530	S
10:40	22	26	72	32	380	S
10:50	24	26	74	26	275	S
11:00	26	28	70	28	450	S
11:10	22	30	72	28	190	S
11:20	24	28	68	30	270	S
11:30	22	32	70	32	410	S
11:40	24	28	74	28	270	S
11:50	24	32	72	26	310	S
12:00	22	30	70	32	280	S
12:10	22	32	74	32	270	S
12:20	24	30	76	28	165	S
12:30	22	28	70	30	245	S
12:40	24	30	74	26	140	S
12:50	26	30	66	28	160	S
01:00	24	32	70	28	355	S
01:10	24	32	76	26	435	S
01:20	26	32	74	28	295	S
01:30	26	36	70	28	450	S
01:40	26	36	74	30	520	S
01:50	24	34	70	28	405	S
02:00	26	32	72	26	325	S
02:10	24	28	70	32	525	S
02:20	26	30	72	34	320	PN
02:30	24	32	76	28	275	S
02:40	26	28	76	36	185	S
02:50	24	30	72	26	225	PN
03:00	24	32	68	30	195	S
03:10	24	32	66	24	200	PN
03:20	24	28	70	30	215	S
03:30	24	30	70	28	250	S
03:40	22	26	64	26	130	S
03:50	22	28	68	26	205	S
04:00	24	28	66	28	180	S

Fuente: Autores

Tabla: Registros proceso térmico a 68°C. 17 de marzo de 2006.

FECHA: 17 de Marzo de 2006				SET POINT: 68°C TÉRMICO		
HORA	T1	T2	T3	T4	V (ml)	NOTA
08:00	18	20	22	20	0	PN
08:10	18	20	22	22	0	PN
08:20	16	22	22	20	0	N

08:30	18	20	24	18	0	N
08:40	16	20	24	20	0	N
08:50	16	20	22	20	0	PN
09:00	16	20	20	18	0	PN
09:10	18	20	22	20	0	PN
09:20	18	22	24	20	0	N
09:30	18	22	22	20	0	N
09:40	18	24	24	22	0	PN
09:50	18	24	26	22	0	PN
10:00	18	24	26	22	0	PN
10:10	18	24	28	22	0	PN
10:20	20	24	28	20	0	PN
10:30	22	26	30	22	0	PN
10:40	22	28	52	24	0	PN
10:50	22	28	68	26	50	S
11:00	22	28	68	26	170	S
11:10	24	30	68	26	25	S
11:20	26	30	68	26	125	S
11:30	26	30	70	30	480	S
11:40	26	30	68	26	255	S
11:50	24	28	68	26	325	S
12:00	26	34	70	26	415	PN
12:10	28	34	68	28	460	S
12:20	28	34	72	32	535	S
12:30	24	30	70	30	550	S
12:40	20	26	68	26	105	S
12:50	20	28	60	26	0	S
01:00	24	30	68	24	35	S
01:10	22	28	68	24	125	S
01:20	24	28	70	28	270	PN
01:30	24	28	68	28	295	S
01:40	20	28	64	24	205	S
01:50	22	28	60	24	65	PN
02:00	22	28	62	24	45	PN
02:10	24	28	68	26	105	S
02:20	22	30	64	26	220	S
02:30	24	30	56	24	15	PN
02:40	24	30	58	24	25	PN
02:50	22	30	60	24	35	PN
03:00	20	28	64	20	50	PN
03:10	22	26	70	24	115	S
03:20	24	28	68	24	55	S
03:30	24	26	66	26	30	PN
03:40	24	26	66	26	0	PN
03:50	22	28	64	24	0	N
04:00	22	26	62	26	0	PN

Fuente: Autores

Tabla: Registros proceso térmico a 70°C. 19 de marzo de 2006.

FECHA: 19 de Marzo de 2006				SET POINT:70 °C TÉRMICO		
HORA	T1	T2	T3	T4	V (ml)	NOTA
08:00	22	24	28	20	0	S
08:10	24	26	28	22	0	PN
08:20	22	26	30	22	0	PN
08:30	24	28	36	24	0	S
08:40	24	28	38	22	0	S
08:50	22	28	40	22	0	PN
09:00	24	28	44	22	0	PN
09:10	22	26	56	22	0	S
09:20	24	30	66	24	0	S
09:30	22	28	72	24	120	S
09:40	20	28	74	28	160	S
09:50	24	28	74	30	145	S
10:00	22	32	74	26	85	S
10:10	24	30	70	24	150	S
10:20	22	32	72	26	475	S
10:30	24	32	74	30	250	S
10:40	24	28	74	24	170	S
10:50	20	28	72	24	285	S
11:00	26	34	76	30	195	S
11:10	22	30	72	24	270	S
11:20	20	30	74	30	600	S
11:30	24	32	74	24	125	S
11:40	24	32	74	28	255	S
11:50	22	28	76	26	545	S
12:00	26	36	76	28	275	S
12:10	20	32	70	28	180	S
12:20	20	36	72	26	260	S
12:30	24	32	74	24	355	S
12:40	26	34	74	26	280	S
12:50	24	30	76	22	195	S
01:00	28	30	74	30	305	S
01:10	20	28	78	24	210	S
01:20	22	30	74	26	285	S
01:30	26	28	74	28	315	S
01:40	24	32	76	24	250	S
01:50	20	26	74	30	170	S
02:00	26	32	70	30	385	S
02:10	24	24	76	26	215	S
02:20	20	28	78	24	420	S

02:30	22	30	76	30	295	S
02:40	22	32	74	24	190	S
02:50	24	28	70	26	95	S
03:00	22	28	72	28	130	S
03:10	24	30	74	24	255	S
03:20	22	32	72	28	150	S
03:30	22	32	76	30	280	S
03:40	24	28	70	26	265	PN
03:50	24	30	72	28	290	S
04:00	22	28	66	26	170	S

Fuente: Autores

Tabla: Registros proceso térmico-fotocatalítico a 60°C. 30 de marzo de 2006.

FECHA: 30 de Marzo de 2006				SET POINT:60°C TÉRMICO-CATALIZADOR		
HORA	T1	T2	T3	T4	V (ml)	NOTA
08:00	22	24	28	24	0	S
08:10	24	26	28	22	0	S
08:20	22	24	30	24	0	S
08:30	22	26	34	24	0	S
08:40	20	28	38	24	0	S
08:50	20	28	44	24	0	S
09:00	22	28	52	22	0	S
09:10	22	26	58	24	0	S
09:20	24	30	62	26	155	S
09:30	20	28	68	28	180	S
09:40	24	30	66	24	265	S
09:50	24	34	62	26	195	S
10:00	26	38	64	26	190	S
10:10	22	34	70	28	305	S
10:20	26	32	68	24	270	S
10:30	24	28	66	28	300	S
10:40	22	28	66	26	290	S
10:50	24	30	68	26	245	S
11:00	22	32	64	28	180	S
11:10	20	30	66	26	325	S
11:20	20	28	62	24	295	PN
11:30	20	32	66	24	275	S
11:40	20	28	64	24	290	S
11:50	22	26	58	24	155	S
12:00	20	28	62	22	115	S
12:10	22	26	66	26	330	S
12:20	22	26	66	24	950	S
12:30	22	28	62	26	700	S
12:40	24	26	66	24	575	S

12:50	22	28	64	26	750	S
01:00	22	28	66	28	650	S
01:10	24	30	68	26	875	S
01:20	24	28	64	26	850	S
01:30	22	28	62	28	375	S
01:40	24	30	64	26	600	S
01:50	28	30	68	26	500	S
02:00	26	28	64	28	565	S
02:10	24	28	60	28	675	S
02:20	26	30	58	26	525	S
02:30	22	30	68	26	500	S
02:40	22	28	64	26	450	S
02:50	22	26	62	24	400	S
03:00	24	28	66	26	400	S
03:10	22	26	62	26	275	S
03:20	24	28	64	26	350	S
03:30	24	28	58	26	530	S
03:40	24	28	62	28	550	S
03:50	24	28	58	26	475	S
04:00	22	28	60	28	475	S

Fuente: Autores

Tabla: Registros proceso térmico-fotocatalítico a 64°C. 23 de marzo de 2006.

FECHA:23 de Marzo de 2006				SET POINT:64 °C TÉRMICO-CATALIZADOR		
HORA	T1	T2	T3	T4	V (ml)	Nota
08:00	22	22	30	24	0	S
08:10	20	22	28	24	0	S
08:20	22	24	30	22	0	S
08:30	22	24	30	24	0	S
08:40	22	24	32	24	0	S
08:50	24	26	32	24	0	S
09:00	22	26	36	22	0	S
09:10	22	26	40	22	0	S
09:20	22	24	48	24	0	S
09:30	22	28	52	24	0	S
09:40	24	28	54	22	0	S
09:50	24	28	56	22	0	S
10:00	22	26	60	24	0	S
10:10	24	28	64	26	40	S
10:20	24	28	68	26	105	S
10:30	24	30	66	24	340	S
10:40	24	30	68	26	300	S
10:50	22	28	64	26	170	S
11:00	24	32	70	28	455	S

11:10	22	30	66	28	530	S
11:20	24	30	64	26	135	S
11:30	26	30	62	28	295	PN
11:40	24	28	66	24	180	S
11:50	24	28	68	26	350	S
12:00	26	30	64	26	250	S
12:10	26	30	66	26	300	PN
12:20	24	30	70	28	360	S
12:30	26	30	70	28	405	S
12:40	26	28	68	28	505	S
12:50	24	28	68	28	180	S
01:00	24	26	66	28	360	S
01:10	22	28	64	26	500	S
01:20	22	30	64	28	140	S
01:30	24	30	66	26	455	PN
01:40	22	30	66	26	385	S
01:50	24	28	68	28	250	S
02:00	24	28	66	26	280	S
02:10	22	26	64	30	360	S
02:20	24	28	68	28	480	S
02:30	24	28	68	28	230	S
02:40	22	30	66	26	315	S
02:50	22	28	64	24	420	S
03:00	22	30	56	26	250	PN
03:10	24	30	64	26	200	S
03:20	24	26	66	26	265	S
03:30	22	28	66	28	340	S
03:40	22	28	64	26	200	S
03:50	22	26	68	28	80	S
04:00	24	28	64	24	150	S

Fuente: Autores

Tabla: Registros proceso térmico-fotocatalítico a 66°C. 03 de abril de 2006.

FECHA: 03 de Abril de 2006				SET POINT:66 °C TÉRMICO-CATALIZADOR		
HORA	T1	T2	T3	T4	V (ml)	NOTA
08:00	20	22	28	20	0	S
08:10	24	26	32	20	0	S
08:20	22	28	34	22	0	S
08:30	20	26	40	18	0	S
08:40	24	28	46	22	0	S
08:50	22	28	52	20	0	S
09:00	22	30	62	18	0	S
09:10	20	30	64	18	0	PN
09:20	20	32	68	24	180	S

09:30	20	28	70	28	255	S
09:40	22	26	68	24	165	S
09:50	22	30	72	26	560	S
10:00	22	26	70	26	370	S
10:10	20	32	74	26	740	S
10:20	24	28	72	28	630	S
10:30	24	28	70	24	275	S
10:40	22	26	68	30	485	S
10:50	24	30	70	28	130	S
11:00	24	30	66	26	265	S
11:10	22	30	68	24	350	S
11:20	22	28	74	28	685	S
11:30	22	28	76	32	490	S
11:40	24	30	72	26	510	S
11:50	26	30	70	28	160	PN
12:00	26	30	74	28	345	S
12:10	28	30	68	28	550	S
12:20	26	30	72	28	450	S
12:30	32	30	66	30	300	S
12:40	26	30	68	28	520	S
12:50	22	30	74	28	580	S
01:00	26	36	70	26	315	S
01:10	24	38	66	26	460	S
01:20	28	40	72	28	250	S
01:30	24	36	76	28	625	S
01:40	20	28	74	26	530	S
01:50	26	46	70	26	240	S
02:00	28	36	70	30	175	S
02:10	28	34	74	30	350	S
02:20	28	32	68	38	220	S
02:30	26	34	70	32	205	S
02:40	26	30	72	28	340	S
02:50	24	34	70	26	285	S
03:00	24	32	68	28	390	S
03:10	26	32	70	24	295	N
03:20						N

Fuente: Autores

Tabla: Registros proceso térmico-fotocatalítico a 68°C. 27 de marzo de 2006.

FECHA: 27 de Marzo de 2006				SET POINT:68 °C TÉRMICO-CATALIZADOR		
HORA	T1	T2	T3	T4	V (ml)	NOTA
08:00	22	22	26	22	0	S
08:10	20	22	28	24	0	S
08:20	20	22	28	24	0	S

08:30	20	24	32	24	0	S
08:40	22	26	38	24	0	S
08:50	22	24	46	22	0	S
09:00	20	28	52	24	0	S
09:10	22	26	64	22	0	S
09:20	22	26	70	26	85	S
09:30	22	28	72	24	40	S
09:40	20	28	74	22	260	S
09:50	24	28	74	24	345	S
10:00	22	30	72	24	290	S
10:10	24	30	70	24	150	S
10:20	22	32	72	26	285	S
10:30	24	32	74	24	425	S
10:40	22	28	74	24	370	S
10:50	20	28	72	24	185	S
11:00	22	32	72	24	335	S
11:10	22	30	72	24	410	S
11:20	20	30	74	24	480	S
11:30	24	32	72	24	575	S
11:40	24	32	74	26	255	S
11:50	22	28	76	26	325	S
12:00	20	30	76	24	275	S
12:10	24	32	70	24	370	S
12:20	24	30	72	26	330	S
12:30	22	28	74	28	440	S
12:40	24	32	68	24	215	S
12:50	24	34	72	26	620	S
01:00	22	28	70	28	295	S
01:10	22	32	72	26	450	S
01:20	20	36	72	26	175	PN
01:30	20	32	64	22	50	PN
01:40	22	34	62	22	10	PN
01:50	24	30	60	22	0	PN
02:00	20	32	56	22	0	PN
02:10	24	28	56	24	0	PN
02:20	22	28	54	24	0	N
02:30	20	28	54	24	0	PN
02:40	22	28	52	24	0	PN
02:50	20	26	52	20	0	PN
03:00	20	24	54	20	0	PN
03:10	22	24	50	20	0	N
03:20	20	22	52	20	0	N
03:30	18	22	52	22	0	N
03:40	18	24	48	22	0	N
03:50						

Fuente: Autores

Tabla: Registros proceso térmico-fotocatalítico a 70°C. 29 de marzo de 2006.

FECHA: 29 de Marzo de 2006				SET POINT:70 °C TÉRMICO-CATALIZADOR		
HORA	T1	T2	T3	T4	V (ml)	Nota
08:00	20	22	36	22	0	S
08:10	22	24	45	20	0	S
08:20	24	24	52	24	0	S
08:30	22	26	58	26	0	S
08:40	22	26	62	26	285	S
08:50	24	28	66	24	310	S
09:00	24	28	70	24	190	S
09:10	24	30	68	24	135	S
09:20	24	32	70	26	250	S
09:30	22	28	72	24	40	S
09:40	20	28	74	22	160	S
09:50	24	28	74	24	145	S
10:00	22	30	72	24	90	S
10:10	24	30	70	24	150	S
10:20	22	32	72	26	85	S
10:30	24	32	74	24	125	S
10:40	22	28	74	24	70	S
10:50	20	28	72	24	185	S
11:00	22	32	72	24	135	S
11:10	22	30	72	24	110	S
11:20	20	30	74	24	180	S
11:30	24	32	74	24	125	S
11:40	24	32	74	26	155	S
11:50	22	28	76	26	225	S
12:00	20	30	76	24	275	S
12:10	20	32	70	24	70	S
12:20	20	36	72	26	20	S
12:30	20	32	68	22	50	S
12:40	22	30	70	26	275	S
12:50	24	30	72	28	750	S
01:00	24	28	70	28	650	S
01:10	24	28	70	28	450	S
01:20	24	30	72	26	400	S
01:30	26	28	74	28	350	S
01:40	22	28	68	26	400	S
01:50	24	28	70	28	525	S
02:00	22	30	74	26	350	S
02:10	24	30	72	30	400	S
02:20	24	30	74	28	500	S
02:30	24	30	70	28	375	S
02:40	22	30	68	28	350	S
02:50	24	30	72	28	485	S

03:00	22	30	72	28	450	S
03:10	22	30	68	28	220	S
03:20	22	28	64	28	300	S
03:30	24	30	66	28	450	S
03:40	22	28	70	26	400	S
03:50	22	26	68	26	200	S
04:00	22	28	68	26	305	S

Fuente: Autores

**ANEXO H. PLANOS Y FOTOGRAFÍAS DEL COLECTOR
CILINDRO PARABÓLICO**

Figura: Vista frontal y lateral del Concentrador

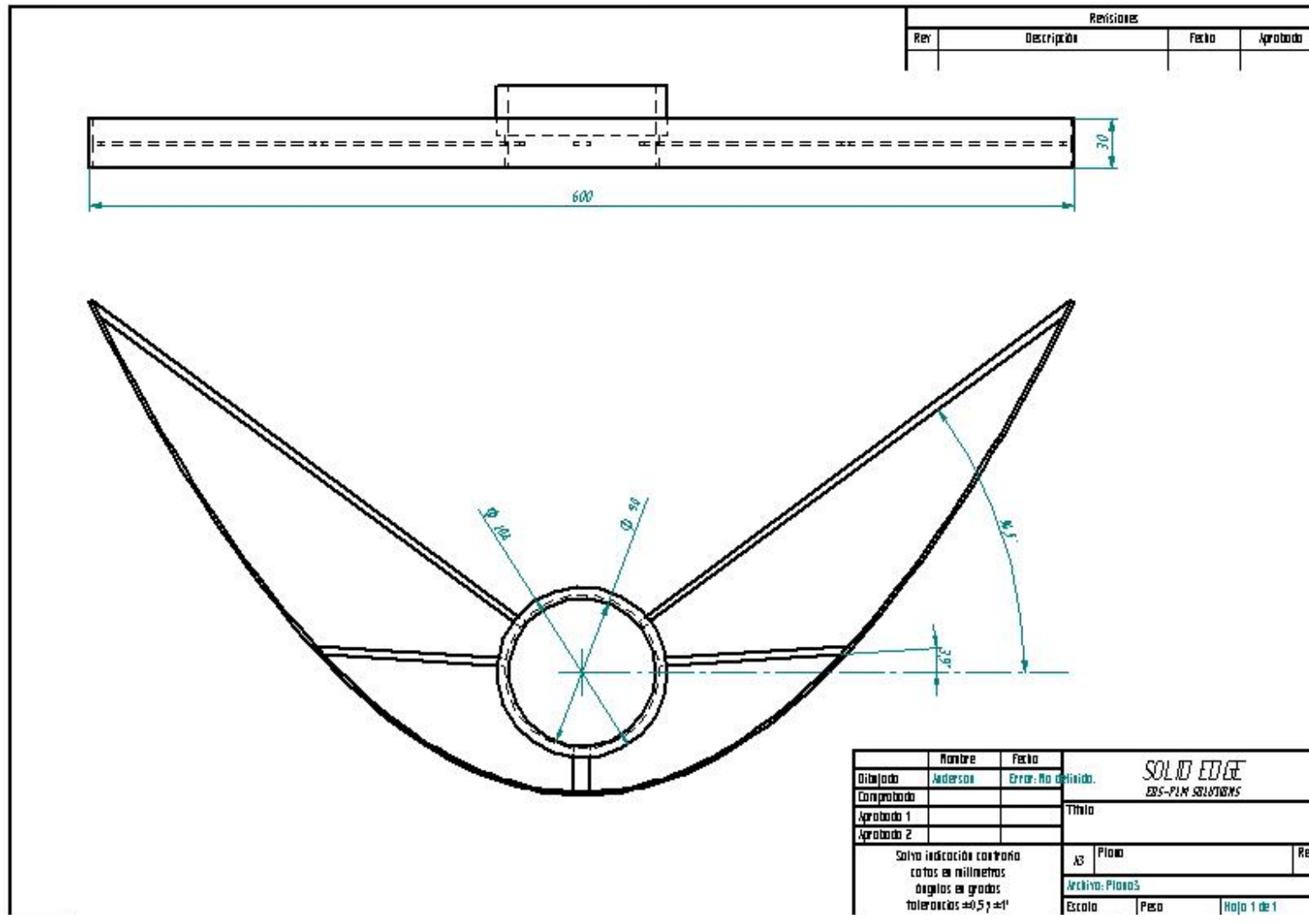


Figura: Vista frontal y lateral del Tubo Absorbedor

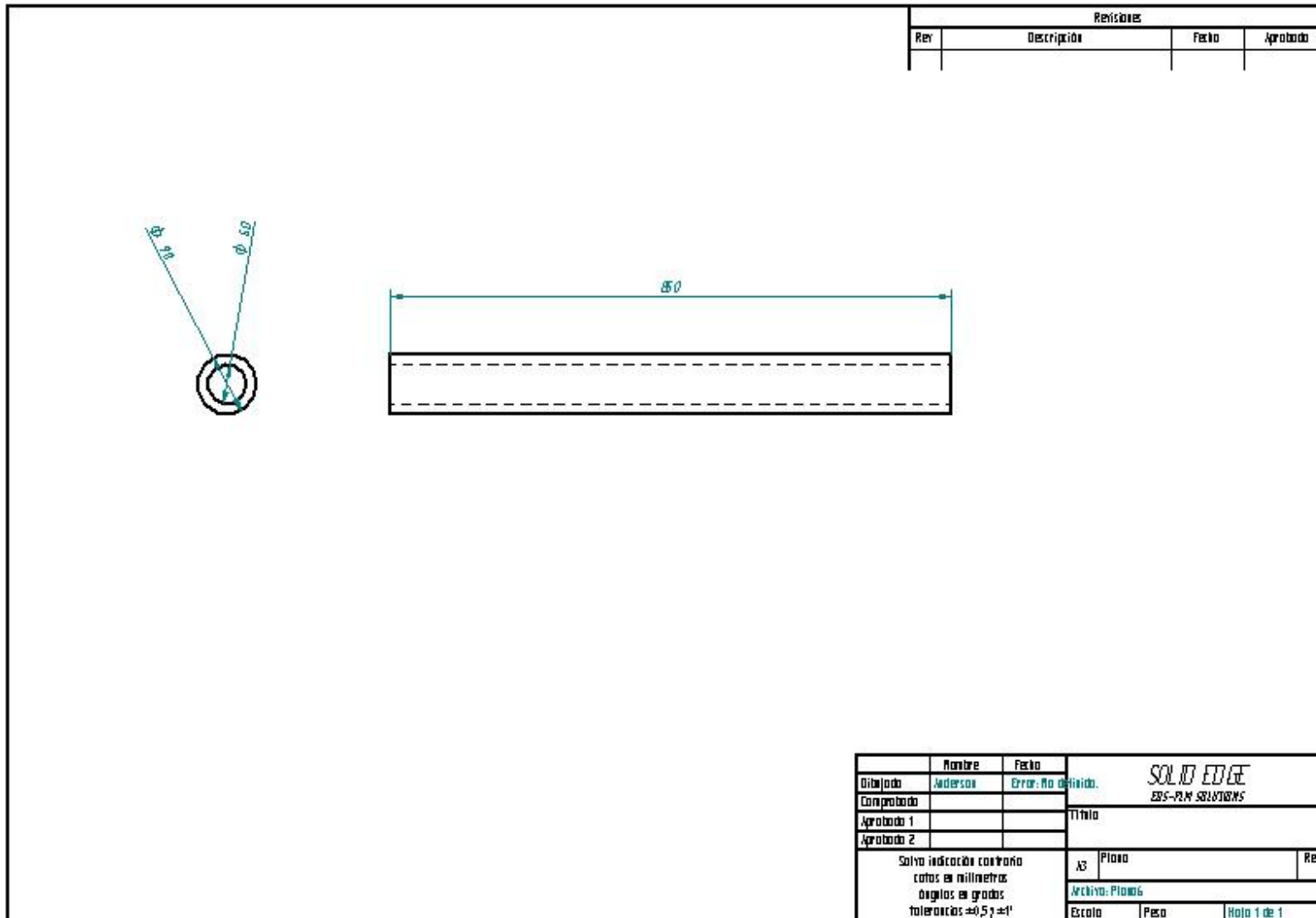


Figura: Engrane de 120 dientes en Acero

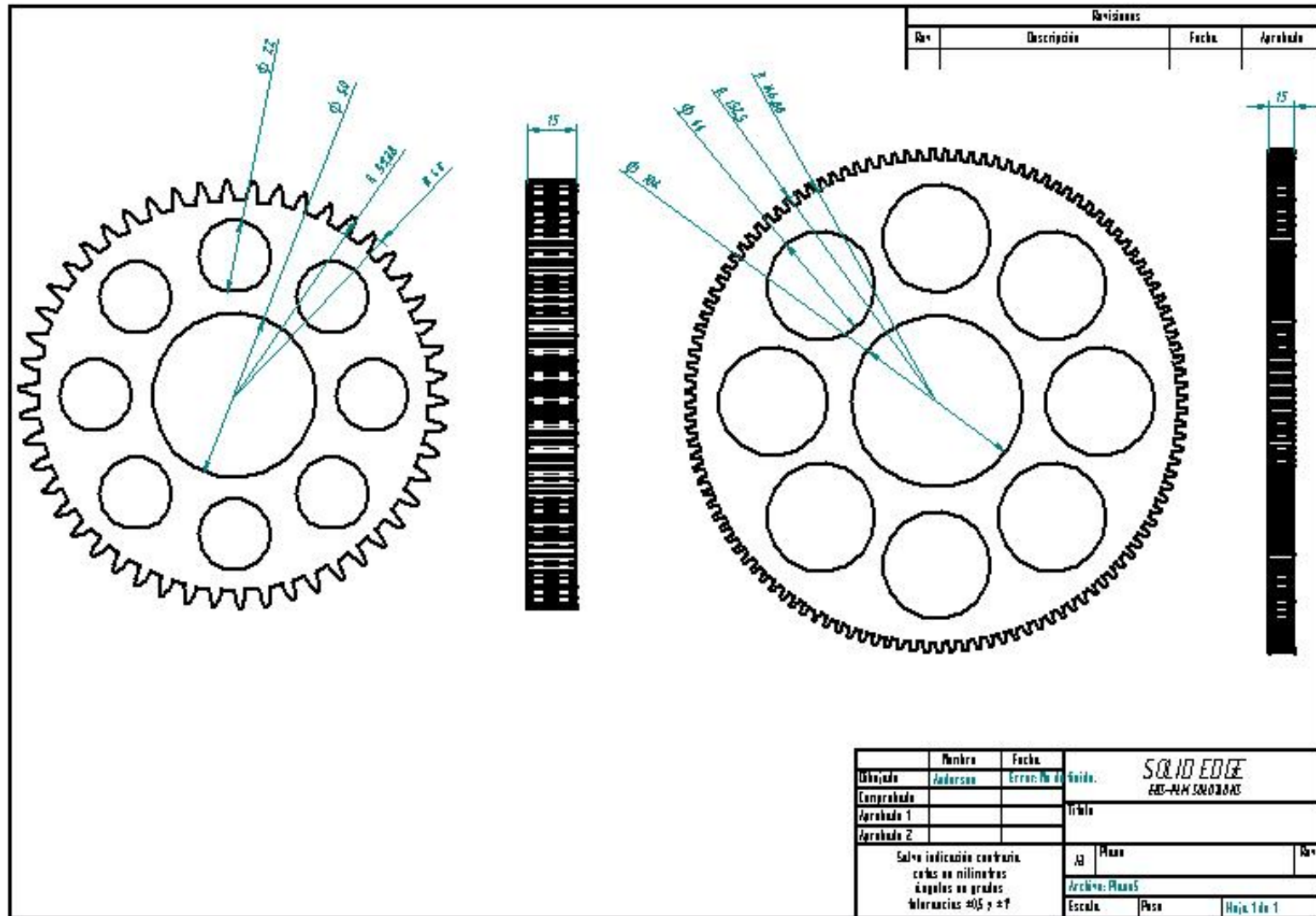


Figura: Diseño del concentrador en Solid Edge 12

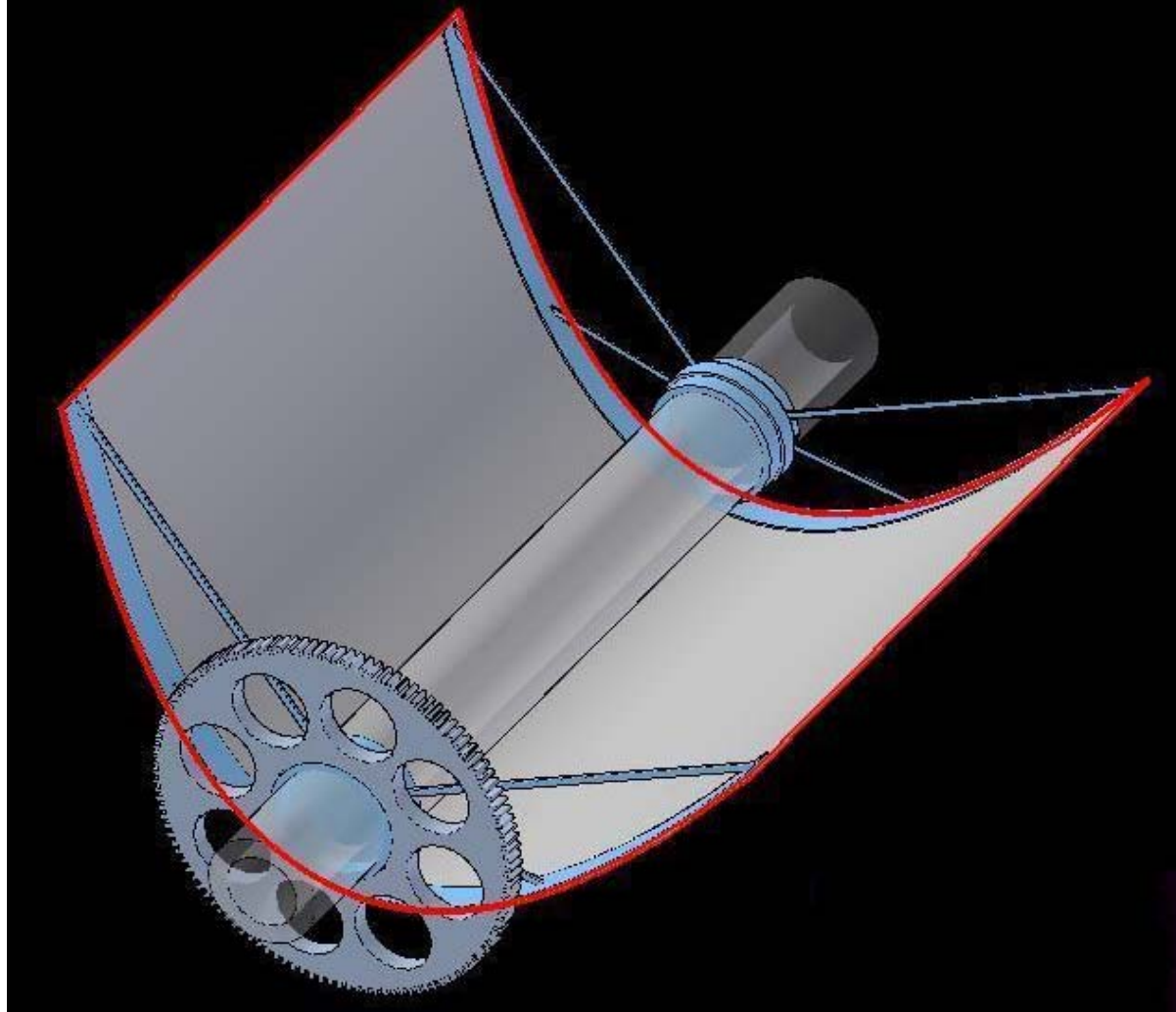


Figura: Diseño del engranaje y el tornillo sin fin en Solid Edge 12

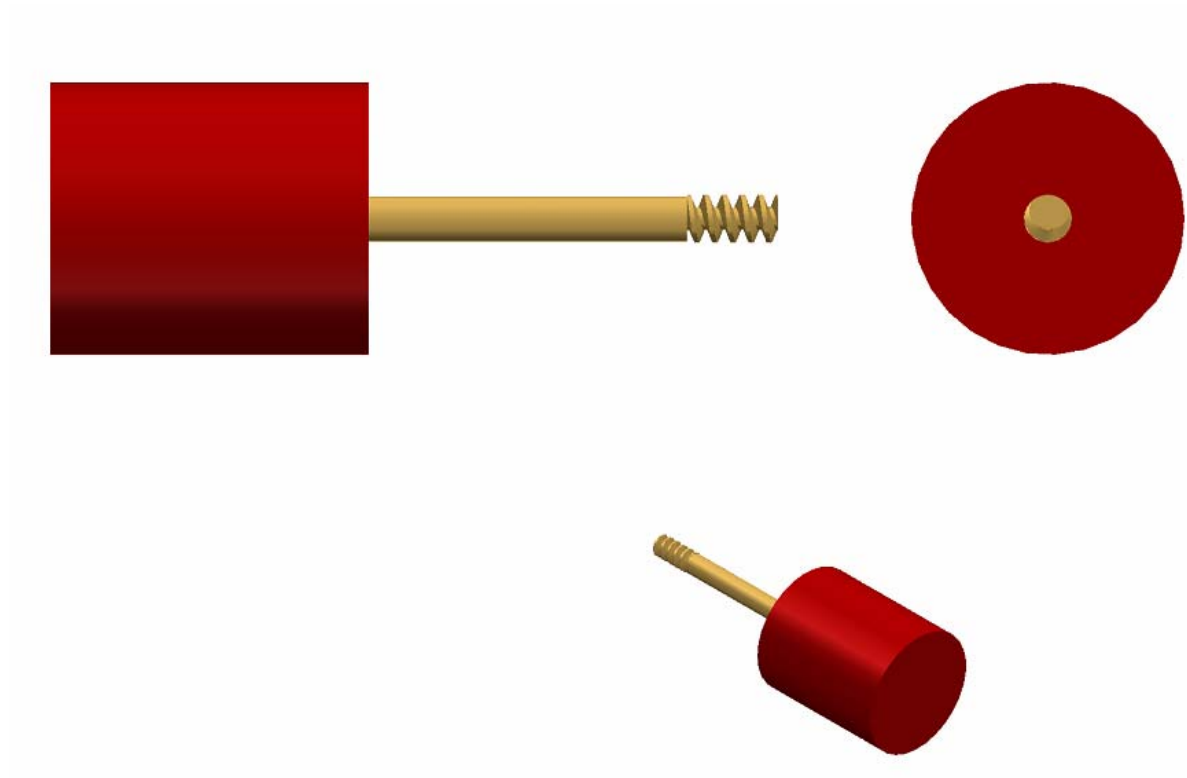


Figura: Vista frontal del colector cilindro parabólico.



Figura: Colector cilindro parabólico

