

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO  
COMPUESTO (CPC) PARA EL ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL MERCURIO  
Y LA OXIDACIÓN DE CIANURO DEL AGUA DE DESECHO DE UNA MINA DE  
EXTRACCIÓN DE ORO.

MANUEL FERNANDO GEREDA CASTAÑEDA  
BRIAN STEVE PÉREZ QUINTERO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2013

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO  
COMPUESTO (CPC) PARA EL ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL MERCURIO  
Y LA OXIDACIÓN DE CIANURO DEL AGUA DE DESECHO DE UNA MINA DE  
EXTRACCIÓN DE ORO.

MANUEL FERNANDO GEREDA CASTAÑEDA  
BRIAN STEVE PÉREZ QUINTERO

Trabajo de grado para optar por el título de  
Ingeniero Mecánico

Director  
OMAR A. GÉLVEZ AROCHA  
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2013

## DEDICATORIA

*A Dios que todo lo hace posible*

*A mis padres, a mis hermanas por su constante apoyo durante este ciclo.*

*A mi hermano por todas las enseñanzas consejos y ayuda, que fueron de gran ayuda*

*A Yesennia por su amor incondicional.*

*A mis compañeros y amigos por su acompañamiento en este ciclo de mi vida.*

*Manuel Fernando Gereda C.*

## DEDICATORIA

*A mi padre por brindarme los recursos necesarios, y estar a mi lado apoyándome y aconsejándome.*

*A mi madre por su amor, consejos y enseñanzas.*

*A mis hermanas por su compañía.*

*A mis amigos y compañeros por su apoyo y ayuda.*

*Brian Steve Pérez Q.*

## **AGRADECIMIENTOS.**

Al ingeniero Omar Armando Gelvez Arocha por su colaboración y conocimientos brindados en el desarrollo de este proyecto de grado.

A Henry Cruz por sus consejos y por la ayuda brindada en la construcción del concentrador parabólico compuesto.

A nuestros compañeros que siempre nos apoyaron.

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN .....  | 18 |
| 1. CONCEPTOS TEÓRICOS.....  | 23 |
| 1.1 RADIACIÓN SOLAR.....  | 23 |
| 1.1.1 La Constante Solar .....  | 23 |
| 1.1.2 Tipos de Radiación .....  | 23 |
| 1.1.3 Espectro Solar .....  | 24 |
| 1.1.3.1 Radiación ultravioleta.....   | 25 |
| 1.1.3.2 Radiación visible .....   | 26 |
| 1.1.3.3 Radiación infrarroja.....   | 26 |
| 1.2 CALCULO DEL ANGULO DE INCIDENCIA DEL SOL EN UNA SUPERFICIE Y DEL ÁNGULO ACIMUTAL SOLAR.....   | 27 |
| 1.2.1 Factores Dependientes del Posicionamiento Sobre la Tierra y el Movimiento de la Tierra..... | 27 |
| 1.2.1.1 Latitud ( $\varphi$ ) .....   | 27 |
| 1.2.1.2 Declinación ( $\delta$ ).....   | 28 |
| 1.2.1.3 Ángulo horario ( $\omega$ ) .....   | 29 |
| 1.2.2 Factores Dependientes de la Orientación de la Superficie Captadora.....                     | 30 |
| 1.2.2.1 Inclinación de la superficie ( $\beta$ ).....   | 30 |
| 1.2.2.2 Ángulo acimutal de la superficie ( $\gamma_P$ ).....                                      | 30 |
| 1.2.3 Cálculo del Ángulo Acimutal Solar ( $\gamma_S$ ) .....                                      | 31 |
| 1.2.4 Ecuación para el Cálculo del Ángulo de Incidencia .....                                     | 31 |
| 1.2.4.1 Superficies horizontales: cuando $\beta=0$ .....  | 32 |
| 1.2.4.2 Superficies mirando al sur: cuando $\beta \neq 0$ y $\gamma_P=0$ .....                    | 32 |

|   |    |
|---|----|
| 1.2.4.3 Superficie inclinada indirectamente: $\beta \neq 0$ y $\gamma_P \neq 0$ ..... | 32 |
| 1.3 APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR .....  | 33 |
| 1.3.1 Energía Fotovoltaica .....  | 33 |
| 1.3.1.1 Funcionamiento de las células fotovoltaicas .....                             | 34 |
| 1.3.1.2 Componentes de un sistema fotovoltaico .....                                  | 35 |
| 1.3.1.3 Ventajas y Desventajas.....   | 38 |
| 1.3.2 Energía Solar Térmica .....   | 39 |
| 1.3.2.1 Colectores sin concentración .....  | 40 |
| 1.3.2.2 Sistemas con concentración .....  | 42 |
| 1.3.2.2.1 Concentradores Focales por Refracción y Reflexión .....                     | 42 |
| 1.3.2.2.2 Concentradores lineales por reflexión.....                                  | 45 |
| 1.2.2.2.3 Concentradores Lineales por Refracción .....                                | 56 |
| 1.4 FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA .....   | 60 |
| 1.4.1 Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> ) como Fotocatalizador en el Proceso ..... | 60 |
| 1.4.1.1 Método industrial.....  | 61 |
| 1.4.1.2 Método de laboratorio .....   | 62 |
| 1.4.2 Proceso de fotoelectrocatalisis .....   | 64 |
| 2. SISTEMA DE CONCENTRACIÓN SOLAR.....  | 67 |
| 2.1 MATERIALES UTILIZADOS PARA LA SUPERFICIE REFLECTORA.....                          | 67 |
| 2.1.1 Prueba de Degradación de Colorante en el Laboratorio de Guatiguara .....        | 69 |
| 2.2 CONCEPTOS PARA EL DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA SUPERFICIE .....                        | 74 |
| 2.2.1 Características geométricas de las superficies que forman un CPC .....          | 75 |
| 2.2.1.1 Superficie parabólica.....  | 76 |
| 2.2.1.2 Superficie Absorbedora.....   | 77 |

|  |     |
|--|-----|
| 2.2.2 Descripción del Diseño por Medio de Ecuaciones Paramétricas.....   | 79  |
| 2.2.3 Descripción del Diseño de Forma Geométrica.....  | 82  |
| 2.3 PROCESO DE DIMENSIONAMIENTO DE LA SUPERFICIE<br>CONCENTRADORA POR EL MÉTODO DE ECUACIONES PARAMÉTRICAS ... | 86  |
| 2.3.1 Factores para el Dimensionamiento .....  | 86  |
| 2.4 DISEÑO CAD Y CONSTRUCCIÓN .....  | 90  |
| 2.4.1 Diseño CAD .....   | 91  |
| 2.4.2 Selección de Materiales .....  | 91  |
| 2.4.3 Construcción .....   | 92  |
| 3. SISTEMA DE CAPTACIÓN DE RADIACIÓN.....  | 95  |
| 3.1 MATERIALES UTILIZADOS PARA AL TUBO EXTERIOR.....   | 96  |
| 3.1.1 Selección del Mejor Material .....   | 98  |
| 3.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS CABEZALES DE SOPORTE .....  | 99  |
| 3.2.1 Diseño de los Cabezales .....  | 99  |
| 3.2.2 Construcción de los Cabezales.....   | 102 |
| 4. ELEMENTO DE SOPORTE ESTRUCTURAL .....   | 104 |
| 4.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA .....  | 104 |
| 4.2 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....   | 105 |
| 4.3 SISTEMA DE MOVIMIENTO .....  | 106 |
| 4.3.1 Construcción del Sistema de Movimiento .....   | 107 |
| 5. SISTEMA DE TRANSPORTE Y MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....  | 109 |
| 5.1 SELECCIÓN DE LA BOMBA Y TANQUE.....  | 109 |
| 5.2 SISTEMA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA .....   | 112 |
| 5.2.1 Componentes del Sistema de Medición.....   | 112 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.2.2 Montaje del sistema de medición.....        | 115 |
| 6. COSTOS TOTALES DE LA CONSTRUCCIÓN DEL CPC..... | 117 |
| CONCLUSIONES .....                                | 120 |
| RECOMENDACIONES.....                              | 123 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                                 | 124 |
| ANEXOS .....                                      | 126 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Tipos de radiación. ....   | 24 |
| Figura 2: Espectro de radiación solar .....  | 25 |
| Figura 3: Espectro de la radiación visible en longitudes de onda. ....   | 26 |
| Figura 4: Latitud de cualquier punto en la tierra.....   | 28 |
| Figura 5: Fenómeno de oblicuidad elíptica de la tierra. ....   | 28 |
| Figura 6: Variación del ángulo horario ( $\omega$ ).....   | 30 |
| Figura 7: Acimut solar, acimut de pared para una pared inclinada .....   | 31 |
| Figura 8: Esquema de un circuito simple fotovoltaico.....  | 34 |
| Figura 9: Componentes de un sistema fotovoltaico. ....   | 35 |
| Figura 10: Panel fotovoltaico.....   | 36 |
| Figura 11: Colector de placa plana .....   | 41 |
| Figura 12: Esquema de un heliostato. ....  | 43 |
| Figura 13: Disco parabólico .....  | 44 |
| Figura 14: Sistema de Concentración Solar Cilindro Parabólicos (CCP).....  | 46 |
| Figura 15: Esquema básico de un CCP.....   | 46 |
| Figura 16: Planta termo solar nevada solar one (nevada EE UU) .....  | 47 |
| Figura 17: Esquema de un Colector Trapezoidal.....   | 49 |
| Figura 18: Esquema de un Colector de Dos Caras.....  | 50 |
| Figura 19: Esquema de un CPC con semiángulo de aceptación $\theta_c$ .....   | 51 |
| Figura 20: Ángulo de aceptación de un CPC.....   | 52 |
| Figura 21: Influencia del rayo de incidencia.....  | 52 |
| Figura 22: Configuración del eje del CPC paralelo al eje norte-sur. ....   | 54 |
| Figura 23: Representación de los rayos en el alba y ocaso con el eje paralelo a la línea norte-sur.....              | 55 |
| Figura 24: Configuración del eje del CPC paralelo al eje este-oeste .....  | 56 |
| Figura 25: Esquema de los rayos durante el equinoccio y el solsticio para un eje paralelo a la línea este-oeste..... | 56 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 26: Corte transversal de dos lentes equivalentes (1) lente fresnel, (2) lente tradicional .....              | 57 |
| Figura 27: Lente fresnel idealizado .....   | 58 |
| Figura 28: Requisitos de seguimiento de dos ejes para las lentes de fresnel.....                                    | 59 |
| Figura 29: Ejemplo de preparación de sol .....  | 62 |
| Figura 30: Proceso de Sol-Gel.....  | 63 |
| Figura 31: Etapas del proceso dip coating.....  | 64 |
| Figura 32: Esquema de una celda fotoelectroquímica para remover mercurio en soluciones cianuradas. ....             | 65 |
| Figura 33: Reflectancia espectral de diferentes metales, tomado de Diseño de reactores de fotocatalisis .....       | 68 |
| Figura 34: Esquema de la prueba de reflectividad mediante degradación de colorante. ....                            | 69 |
| Figura 35: Montaje prueba en el laboratorio de Guatiguara.....  | 70 |
| Figura 36: Composición de la lámina miro-sun .....  | 72 |
| Figura 37: Porcentaje de radiación en el espectro solar en función de la longitud de onda de las láminas miro ..... | 73 |
| Figura 38: Primer ejemplo desarrollado de un CPC.....   | 75 |
| Figura 39: Fracción de la radiación incidente con un ángulo de aceptación $\theta_a/2$ ..                           | 76 |
| Figura 40: Diseño geométrico de la parábola del CPC para diferentes tipos de absorbedores.....                      | 77 |
| Figura 41: Redirección de los rayos hacia el tubo absorbedor en una involuta .....                                  | 78 |
| Figura 42: Forma de la involuta reflectiva para un absorbedor tubular.....  | 79 |
| Figura 43: Diseño de un CPC .....   | 81 |
| Figura 44: Esquema del CPC con coordenadas polares. ....  | 83 |
| Figura 45: Etapas de diseño de un CPC.....  | 85 |
| Figura 46: Desarrollo de la superficie concentradora del CPC .....  | 89 |
| Figura 47: Diseño CAD de la superficie concentradora del CPC.....   | 90 |
| Figura 48: Estructura de la superficie reflectora del CPC. ....   | 91 |
| Figura 49: Soporte inicial de la curvatura.....   | 92 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 50: Superficie de soporte con estructura .....                             | 93  |
| Figura 51: Montaje de los soportes de la estructura al eje.....                   | 94  |
| Figura 52: Esquema básico del tubo absorbedor.....                                | 95  |
| Figura 53: Máquina para pruebas Shimadzu .....                                    | 97  |
| Figura 54: Grafica de transmisividad de los diferentes materiales usados. ....    | 98  |
| Figura 55: Distribución de los surcos concéntricos .....                          | 100 |
| Figura 56: Sistema de distribución del fluido .....                               | 100 |
| Figura 57: Distribución de las secciones por donde se realizara la conexión. .... | 101 |
| Figura 58: Diseño CAD del cabezal .....   | 101 |
| Figura 59: Presentación de los polímeros como el HMW .....                        | 102 |
| Figura 60: Cabezal elaborado.....   | 103 |
| Figura 61: Tubo absorbedor con sus elementos.....                                 | 103 |
| Figura 62: Diseño CAD del sistema de soporte estructural .....                    | 105 |
| Figura 63: Estructura de soporte.....   | 106 |
| Figura 64: esquema básico de un sistema de reducción corona-tornillo sin fin ...  | 107 |
| Figura 65: Caja Reductora.....  | 108 |
| Figura 66: esquema del sistema de bombeo .....                                    | 110 |
| Figura 67: Bomba Empleada y tanque empleados .....                                | 112 |
| Figura 68: Sensor de temperatura DS18B20.....                                     | 113 |
| Figura 69: Arduino uno .....  | 114 |
| Figura 70: LCD 2x16.....  | 114 |
| Figura 71: Placa pcb agujereada .....   | 115 |
| Figura 72: Esquema eléctrico del sistema de medición.....                         | 116 |
| Figura 73: Esquema electrónico del sistema de medición. ....                      | 116 |
| Figura 74: Fotografía sistema eléctrico.....                                      | 117 |
| Figura 75: Caja de medición .....   | 117 |

## LISTA DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1: Tabla para el cálculo del día del año. ....  | 29  |
| Tabla 2: Eficiencia de los materiales empleados en paneles fotovoltaicos.....                                   | 37  |
| Tabla 3: Resultados de la prueba de degradación.....  | 71  |
| Tabla 4: Datos técnicos de las láminas suministrados por la empresa sobre las láminas. ....                     | 74  |
| Tabla 5: Desarrollo de las ecuaciones paramétricas para el dimensionamiento de la superficie concentradora..... | 88  |
| Tabla 6: Factores de pérdidas y alturas de pérdidas de los accesorios.....                                      | 110 |
| Tabla 7: Comparación entre la bomba requerida y la bomba obtenida.....  | 111 |
| Tabla 8: Características del sensor.....  | 113 |
| Tabla 9: Costo Total.....   | 118 |

## LISTA DE ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| ANEXO A: PLANOS DEL CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO COMPUESTO (CPC).....   | 127 |
| ANEXO B: PROGRAMACIÓN TARJETA ARDUINO MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....   | 138 |
| ANEXO C: GUÍA DE FUNCIONAMIENTO Y OPERACIÓN DEL COLECTOR PARABÓLICO COMPUESTO (CPC).....                                   | 141 |
| ANEXO D: CALCULO DEL SISTEMA DE BOMBEO POR MEDIO DEL SOFTWARE EES .....  | 149 |
| ANEXO E. PROCEDIMIENTO PARA EL MONTAJE DE LA PRUEBA DE DEGRADACIÓN DE NARANJA DE METILO POR MEDIO DE LUZ ULTRAVIOLETA..... | 152 |
| ANEXO F. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE POR MÉTODOS FINITOS EN SOFTWARE CAE .....                                    | 156 |

## RESUMEN

### TITULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO (CPC) PARA EL ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL MERCURIO Y LA OXIDACIÓN DE CIANURO DEL AGUA DE DESECHO DE UNA MINA DE EXTRACCIÓN DE ORO.\*

### AUTORES

Manuel Fernando Gereda Castañeda

Brian Steve Pérez Quintero\*\*

### PALABAS CLAVES:

CPC, fotoelectrocatalisis, degradación, mercurio, cianuro, parabólico, colector solar

### DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es suministrar a la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander un concentrador parabólico compuesto (CPC) enfocado en la captación de radiación ultravioleta, diseñado para la realización de pruebas sobre la degradación de mercurio y cianuro, del agua de desecho de una mina de extracción de oro por medio de fotocatalisis heterogénea.

La fotocatalisis es el proceso en el cual se excita un catalizador por medio de radiación ultravioleta acelerando los procesos de oxidación y reducción. En el proceso fotoelectrocatalítico para el cual se diseño y construyo el concentrador parabólico compuesto se utilizara como catalizador el dióxido de titanio.

El proceso de diseño y construcción del concentrador se realizara siguiendo los sistemas de los que se compone. Presentados a continuación.

- Sistema de Concentración Solar: es la superficie encargada de la realizar la reflexión ultravioleta proveniente del sol, y redirigirla hacia el sistema de captación.
- Sistema de Captación de radiación: su componente principal es el tubo exterior en el cual están contenidos los elementos necesarios para la reacción fotocatalítica.
- Elemento de Soporte Estructural: es el sistema encargado de soportar el peso de concentración y la superficie de captación, además incluye el elemento el cual provee el movimiento angular a la superficie reflector
- Sistema de Transporte y Medición del Flujo: es el encargado de hacer circular el fluido en el cual se hará la reacción.

---

\*Proyecto de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director Omar Armando Gelvez Arocha

## ABSTRACT

### TITLE:

CONSTRUCTION AND DESIGN OF PARABOLIC COMPOUND COLLECTOR (CPC) TO STUDY THE REDUCTION OF MERCURY AND THE OXIDATION OF CYANIDE OF DROSS'S WATER IN A GOLD EXTRACTION MINE\*

### AUTHORS:

Manuel Fernando Gereda Castañeda  
Brian Steve Pérez Quintero\*\*

### KEY WORDS:

CPC, Mercury, cyanide, parabolic, solar collector, fotoelectrocatalisis, degradation.

### DESCRIPTION:

The objective of this project is supply to the Chemical Engineering School of Industrial University of Santander a parabolic compound collector (CPC) focus on captation of ultraviolet radiation, designed to test the over degradation of mercury and cyanide, dross's water of a gold extraction mine across a heterogeneous photocatalysis.

The photocatalysis is process in whose a catalyst is excite it across ultraviolet radiation accelerating the oxidation and reduction process.the photoelectrocatalysis process that was design and built the compound parabolic collector will use like catalyst the titanium dioxide.

The process of design and build the collector will make with the order that is present next.

- Solar collector system: Is the surface in charge of make the ultraviolet reflection that proves by sun, and redirect to captation system.
- Capitation of radiation system: It principal component is an exterior pipe in which are content the necessary elements for photocatalytic reaction
- Structural support element: The system in charge of support the weight of concentration and the capitation surface, also include the element that proves the angular movement to the reflector surface.
- Fluid and measurement and transport system: Is in charge of make flow the fluid that is going to make the reaction.

---

\*Graduation Project

\*\*Faculty of Physics Mechanic-Engineering, School of Mechanic Engineering, Director Omar Armando Gelvez Arocha

## INTRODUCCIÓN

Colombia es un país con riquezas en oro cuya explotación se realiza en gran parte a pequeña escala y de manera artesanal. Durante el proceso de extracción muchas de las minas utilizan procesos de amalgamación y cianuración para la extracción del oro, generando grandes cantidades de aguas residuales con mercurio y cianuro, sustancias muy tóxicas que ocasionan grave daño a la salud y al medio ambiente. Lo anterior ha llevado a desarrollar nuevas técnicas de detoxificación para tratar estos residuos de una forma económica y amigable con el medio ambiente.

Una zona minera importante en Santander se encuentra localizada entre los municipios de Vetás y California, donde aún se trabaja la minería artesanal. Teniendo un fuerte impacto ambiental, debido a los grandes volúmenes de aguas contaminadas con mercurio y cianuro, que son vertidas a fuentes hídricas como el Río Suratá, que abastece una de las plantas del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

Las regulaciones ambientales han sido cada vez más estrictas y la legislación colombiana (Numeral 25 del Artículo 5 de la Ley 99 de 1993) no ha sido ajeno a ello. Según lo estipulado en el artículo 32 del capítulo V de este numeral, los valores permisibles para los vertimientos líquidos son de 1 mg/L para el cianuro y 0,001 mg/L para el mercurio.

Las técnicas convencionales para el tratamiento de aguas residuales para la remoción de estos contaminantes, tales como: precipitación química, adsorción con carbón activado, intercambio iónico, entre otros, son procesos que presentan algunos inconvenientes, como lo son, la eliminación incompleta de mercurio o cianuro, los requerimientos altos de energía, el uso de agentes oxidantes que pueden ser aún más dañinos y la generación de lodos tóxicos. Todo esto, ha

llevado a desarrollar nuevas técnicas de descontaminación que sean económicas y adaptables a la región, para un tratamiento más eficiente de las aguas residuales antes de reutilizarlas o devolverlas al entorno.

Por esto se busca la implementación de un proceso fotoelectroquímico solar para el estudio de la simultánea reducción de mercurio y oxidación de cianuro presentes en los efluentes mineros, para esto se diseñará y construirá un fotorreactor asistido por potencial utilizando  $\text{TiO}_2$  como fotocatalizador soportado, así como el colector parabólico compuesto (CPC) con la finalidad de aprovechar la radiación solar directa y difusa presentes en la zona minera a analizar.

# 1. CONCEPTOS TEÓRICOS

## 1.1 RADIACIÓN SOLAR

La radiación o energía solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol, el cual se comporta según la ley de Planck como un cuerpo negro a una temperatura efectiva de 5777 K.

El sol es una esfera de gas de aproximadamente de  $4.37 \times 10^9$  m diámetro el cual posee un temperatura interna estimada de entre  $8 \times 10^6$  y  $40 \times 10^6$  K una densidad aproximada de  $1.409 \text{ g/cm}^3$ . La energía generada por el sol se produce por medio de fusión nuclear en la cual átomos de hidrogeno son transformados en helio produciendo la energía irradiada.

**1.1.1 La Constante Solar:** La constante solar es la cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie, medida en la parte externa de la atmosfera terrestre. Depende de la combinación de tres factores: la distancia entre la tierra y el sol, el diámetro del sol y la temperatura del sol.

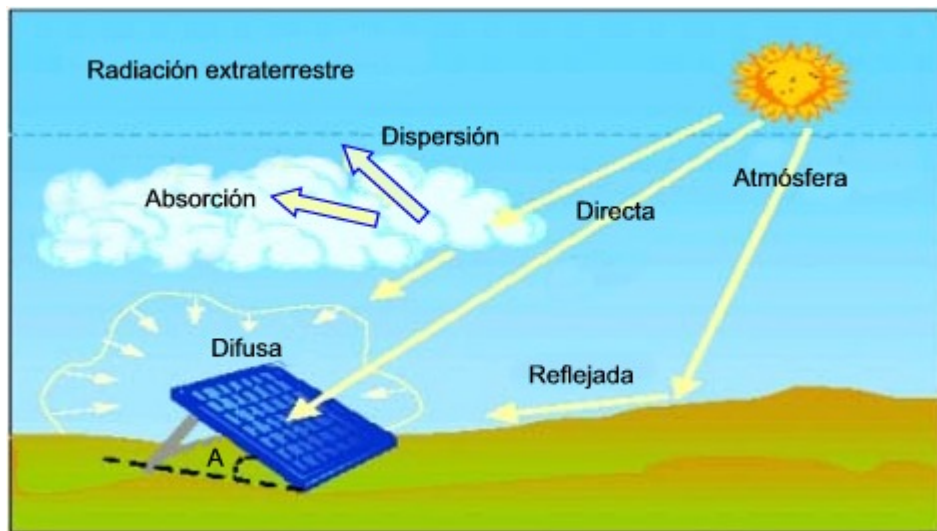
La energía irradiada por el sol es aproximadamente  $4 \times 10^{23}$  KW de lo cual la tierra solo recibe  $1.73 \times 10^{14}$  KW en toda la superficie irradiada, esto corresponde a un valor aproximado de  $1353 \text{ W/m}^2$  siendo esta la irradiancia directa normal a la superficie de la tierra.

**1.1.2 Tipos de Radiación:** La superficie terrestre recibe principalmente 3 tipos de radiación diferentes

- **Radiación directa:** La radiación directa es la que llega a la superficie de la tierra directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias.

- **Radiación difusa:** La radiación difusa es aquella que llega a la superficie de la tierra con un cambio de dirección al pasar por la atmosfera terrestre. Este desvío de rayos solares, se produce por el choque directo con ciertas moléculas (aire y vapor de agua) y partículas contenidas en el aire.
- **Radiación terrestre o albedo:** El albedo es la radiación reflejada de los objetos terrestres, como paredes, lagos, montañas, etc. El albedo medio de la tierra es del 30-32% de la radiación proveniente del sol.

**Figura 1: Tipos de radiación.**

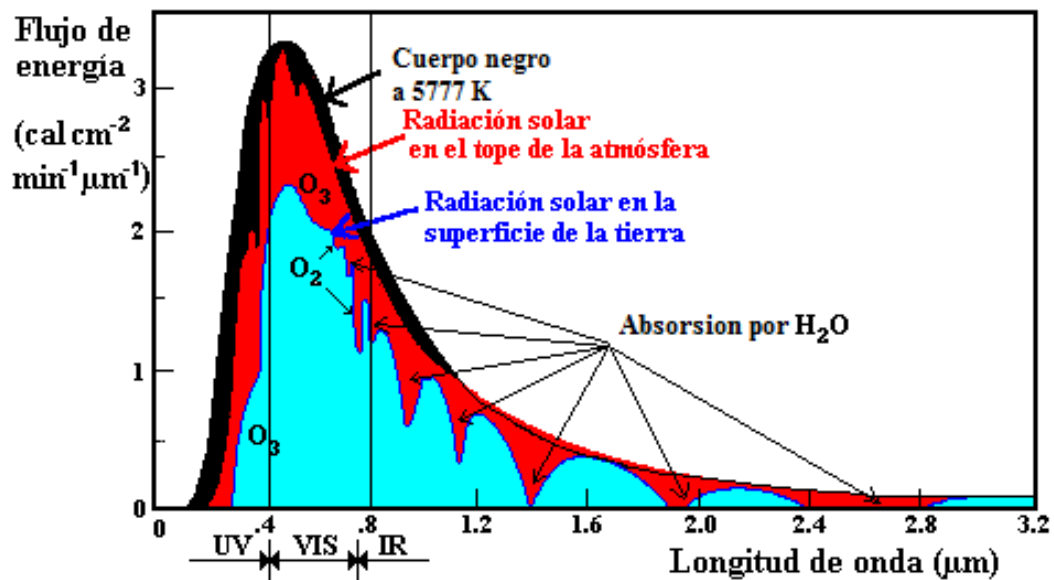


Fuente: <http://www.pce-instruments.com>. Editada por autores

**1.1.3 Espectro Solar:** La energía del sol se propaga hacia la capa más externa de la tierra mediante ondas electromagnéticas de varias longitudes de onda. La longitud de onda determina la naturaleza de esta energía. Las longitudes de onda de la energía del sol en las capas externas atmosféricas varían desde las longitudes de onda de una centésima de micra, a ondas de longitud de alrededor de cien metros. Sin embargo, la energía calorífica está limitada en un espectro muy estrecho que varía desde 0.28 a 4.8 micras.

Cuando la energía proveniente del sol se propaga hacia la atmosfera terrestre, gran parte es rebotada o filtrada y otra parte absorbida. El 98% de la energía que alcanza la superficie terrestre está contenida en un espectro que varía entre 0.29 y 3 micras. El 3% de la energía está en la región ultravioleta cuyo rango varía entre 0.29 y 0.38 micras, el 53% se encuentra en el campo infrarrojo el cual varía desde 0,76 a 3 micras.

**Figura 2: Espectro de radiación solar**

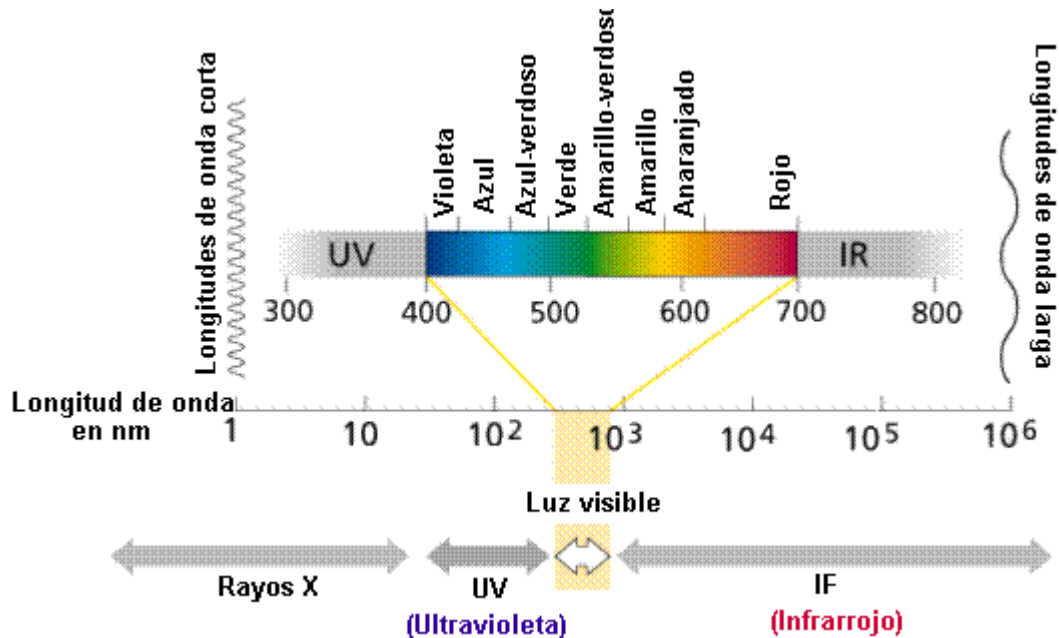


Fuente: <http://www.ujaen.es>. Editada por autores

**1.1.3.1 Radiación ultravioleta:** La radiación ultravioleta comprende longitudes de onda inferiores a los 380 nm, según la longitud de onda se distinguen varios subtipos de rayos ultravioleta: ultravioleta cercano NUV (380 – 200 nm), ultravioleta lejano FUV (200-10 nm) y ultravioleta extremo EUV (91,2 – 1 nm), a su vez el ultravioleta cercano posee tres divisiones dependiendo del tipo de onda: onda larga UVA (380 – 320 nm), onda media UVB (320 – 280 nm), Onda corta UVC (283 – 200 nm) (figura 2).

**1.1.3.2 Radiación visible:** El espectro visible comprende longitudes de onda que va desde los 380 a los 780 nm. Es el espectro en el que los fotones pueden ser detectados por los conos y bastones de la retina y se clasifican en seis tipos de colores con su correspondiente longitud de onda.

**Figura 3: Espectro de la radiación visible en longitudes de onda.**



Fuente: <http://www.etsmre.upv.es>. Editada por autores

**1.1.3.3 Radiación infrarroja:** La radiación infrarroja, o radiación IR es un tipo de radiación electromagnética y térmica, de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que la de las microondas. Su rango de longitudes de onda va desde 0,78 hasta los 1000 micrómetros. La radiación infrarroja es emitida por cualquier cuerpo cuya temperatura sea mayor que 0 Kelvin (cero absoluto). Los infrarrojos son clasificados, de acuerdo a la longitud de onda, de este modo son: infrarrojo cercano (de 800 nm a 2500 nm), infrarrojo medio (de 2.5  $\mu$ m a 50  $\mu$ m), infrarrojo lejano (de 50  $\mu$ m a 1000  $\mu$ m).

## **1.2 CALCULO DEL ANGULO DE INCIDENCIA DE LA LUZ SOLAR EN UNA SUPERFICIE Y DEL ÁNGULO ACIMUTAL SOLAR**

El ángulo de incidencia de los rayos sobre una superficie y el ángulo acimutal solar juegan un rol muy importante en el desempeño de un colector solar, siendo a veces el ángulo de incidencia el principal factor de diseño. Los principales factores que se deben tener en cuenta para el cálculo de estos ángulos son:

- Factores dependientes del posicionamiento sobre la tierra y el movimiento de esta
- Factores dependientes de la orientación de la superficie captadora

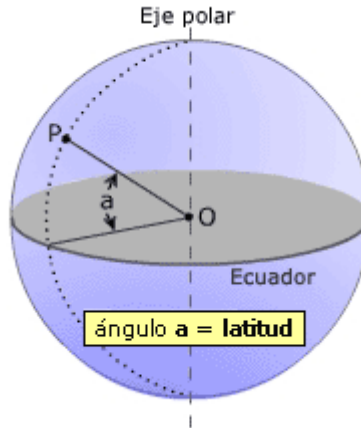
**1.2.1 Factores Dependientes del Posicionamiento Sobre la Tierra y el Movimiento de la Tierra:** Los Factores dependientes del posicionamiento sobre la tierra y el movimiento de la tierra para el cálculo del ángulo de incidencia del sol son:

- Latitud ( $\varphi$ )
- Declinación ( $\delta$ )
- Ángulo horario ( $\omega$ )

**1.2.1.1 Latitud ( $\varphi$ ):** La latitud de un lugar es la distancia angular entre la línea ecuatorial y un punto determinado de la tierra medido a lo largo del meridiano en el que se encuentre el punto.

La latitud se considera positiva al norte del ecuador y negativa si está en el sur del ecuador. En la siguiente figura se muestra gráficamente. La latitud de un punto se expresa en medidas angulares y va desde  $0^\circ$  a  $90^\circ$  pudiendo ser negativa y positiva.

**Figura 4: Latitud de cualquier punto en la tierra**



Fuente: <http://www.manualvuelo.com/NAV/NAV72.html>

**1.2.1.2 Declinación ( $\delta$ ):** El movimiento de traslación de la tierra presenta una oblicuidad elíptica lo que genera un ángulo entre el eje de rotación de la tierra con respecto al plano perpendicular de la órbita elíptica que describe el movimiento de traslación.

**Figura 5: Fenómeno de oblicuidad elíptica de la tierra.**



Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Oblicuidad\\_de\\_la\\_ecl%C3%ADptica](http://es.wikipedia.org/wiki/Oblicuidad_de_la_ecl%C3%ADptica)

Este ángulo de inclinación es conocido como declinación, ya que el eje de rotación de la tierra está inclinado un ángulo de  $23,45^\circ$  respecto al eje del plano que

contiene la órbita que describe alrededor del sol, esto produce que el valor de la declinación varíe entre  $\pm 23,45^\circ$  a lo largo del año. La declinación al norte del ecuador se considera positiva.

Para el cálculo de la declinación se toma de la fórmula propuesta por Cooper (1969).

$$\text{---} \quad [1]$$

Donde  $n$  es el día del año, la tabla mostrada a continuación nos hace más fácil el cálculo de  $n$ .

**Tabla 1: Tabla para el cálculo del día del año.**

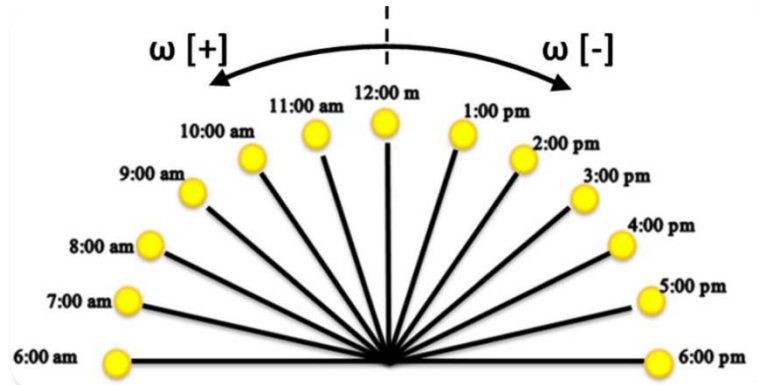
| Meses      | "n" día del Mes |
|------------|-----------------|
| Enero      | $i$             |
| Febrero    | $31+i$          |
| Marzo      | $59+i$          |
| Abril      | $90+i$          |
| Mayo       | $120+i$         |
| Junio      | $151+i$         |
| Julio      | $181+i$         |
| Agosto     | $212+i$         |
| Septiembre | $243+i$         |
| Octubre    | $273+i$         |
| Noviembre  | $304+i$         |
| Diciembre  | $334+i$         |

Fuente: Autores

Donde  $i$  es el día del mes en el cual quiere ser calculado el  $n$

**1.2.1.3 Ángulo horario ( $\omega$ ):** Es el desplazamiento angular del sol (figura 6), al este o al oeste del meridiano local, debido a la rotación de la tierra a la velocidad angular de  $15^\circ$  por hora ( $360^\circ$  en 24 horas). Negativo por la mañana y positivo por la tarde. Existe una fórmula para conocer el ángulo horario ( $\omega$ ) conociendo la hora local (en formato de 24 horas).

**Figura 6: Variación del ángulo horario ( $\omega$ )**



Fuente: Diseño y construcción de un colector de tubos al vacío. N. Jaimes, S. Rivero. 2012

### 1.2.2 Factores Dependientes de la Orientación de la Superficie Captadora:

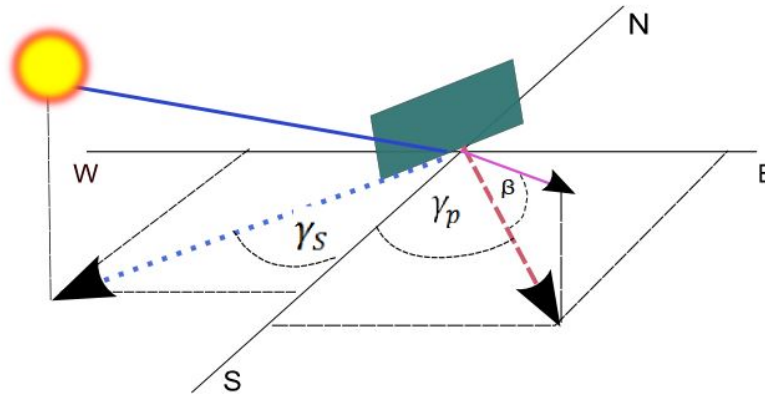
Los factores dependientes de la orientación de la superficie captadora para el cálculo del ángulo de incidencia del sol son:

- Inclinación de la superficie ( $\beta$ )
- Ángulo Acimutal de la Superficie ( $\gamma_P$ )

**1.2.2.1 Inclinación de la superficie ( $\beta$ ):** Es el ángulo del plano sobre el cual incide la radiación, en pocas palabras sería la inclinación con respecto a la horizontal, es media desde  $0^\circ$  a  $180^\circ$  y se toma de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  mirando hacia arriba y de  $90^\circ$  a  $180^\circ$  mirando hacia abajo. (Figura 07).

**1.2.2.2 Ángulo acimutal de la superficie ( $\gamma_P$ ):** Es el ángulo que forma la proyección horizontal de la normal de la superficie y el eje sur ( $\gamma_P=0^\circ$  en el eje sur). Hacia el este se consideran valores negativos y hacia el oeste se consideran valores positivos.  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ . (Figura 07).

**Figura 7: Acimut solar, acimut de pared para una pared inclinada**



Fuente: Autores

**1.2.3 Cálculo del Ángulo Acimutal Solar ( $\gamma_s$ ):** Es el ángulo formado por la proyección del sol sobre el plano del horizonte con la dirección sur. Positivo  $0^\circ$  a  $180^\circ$  hacia el Oeste y negativo hacia el Este  $0^\circ$  a  $-180^\circ$ . Para su cálculo es necesario conocer el ángulo de incidencia del sol sobre una superficie normal al lugar ( $\theta$ ), además de los factores ya conocidos anteriormente.

$$\text{—————} [3]$$

El cálculo del ángulo de incidencia ( $\theta_z$ ) será explicado a continuación.

**1.2.4 Ecuación para el Cálculo del Ángulo de Incidencia:** El ángulo de incidencia del sol  $\theta$ , es el ángulo formado entre la normal del plano y la dirección de la radiación, este planteamiento genera tres situaciones distintas dependiendo de la inclinación de la superficie. Para objeto de este estudio se subdividirá en 3 partes

- Superficies horizontales: cuando  $\beta=0$

- Superficies mirando al sur: cuando  $\beta \neq 0$  y  $\gamma_P = 0$
- Superficie inclinada indirectamente  $\beta \neq 0$  y  $\gamma_P \neq 0$

**1.2.4.1 Superficies horizontales: cuando  $\beta = 0$ :** Para una superficie horizontal se tiene que la normal de la superficie es la misma normal del lugar donde se encuentra esta, entonces se tiene que el ángulo de incidencia del sol es el mismo ángulo cenital del sol por lo que:

[4]

Donde  $\varphi$  es la latitud del lugar.

**1.2.4.2 Superficies mirando al sur: cuando  $\beta \neq 0$  y  $\gamma_P = 0$ :** Para esta situación el ángulo de incidencia se ve influenciado por la declinación, el ángulo horario, el ángulo de inclinación de la superficie y la latitud.

[5]

**1.2.4.3 Superficie inclinada indirectamente:  $\beta \neq 0$  y  $\gamma_P \neq 0$ :** En esta situación no solo se tienen en cuenta los conceptos anteriores si no también influye el azimut de pared y el azimut solar (ecuación 3) lo que hace que esta relación sea un poco más compleja.

[6]

[7]

### **1.3 APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR**

La energía solar se encuentra en nuestro entorno de manera gratuita e ilimitada, pero su aprovechamiento no resulta ser tan sencillo, para la captación de esta energía es necesaria la inversión en sistemas de captación, dependientes del tipo de energía necesitada, pero una vez utilizada, los beneficios que se obtienen a mediano y largo plazo son bastante buenos.

Uno de los mayores obstáculos para la obtención y aprovechamiento de la energía solar es su baja intensidad, incluso para las condiciones de tiempo despejado, además de su variabilidad; estas son desventajas que no se pueden despreciar y deben ser tomados en cuenta para el diseño o selección del tipo de sistema a utilizar.

A continuación se presentaran las distintas tecnologías utilizadas para la captación y aprovechamiento de la energía solar y su posterior transformación en energía eléctrica, térmica o química. La energía eléctrica se produce a través de los llamados paneles fotovoltaicos y al energía térmica se obtiene en los llamados colectores solares, como se mencionó en el objetivo general en este proyecto se busca utilizar la energía solar para un fin ecológico de tratamiento de aguas residuales por medio de sistemas fotocatalíticos.

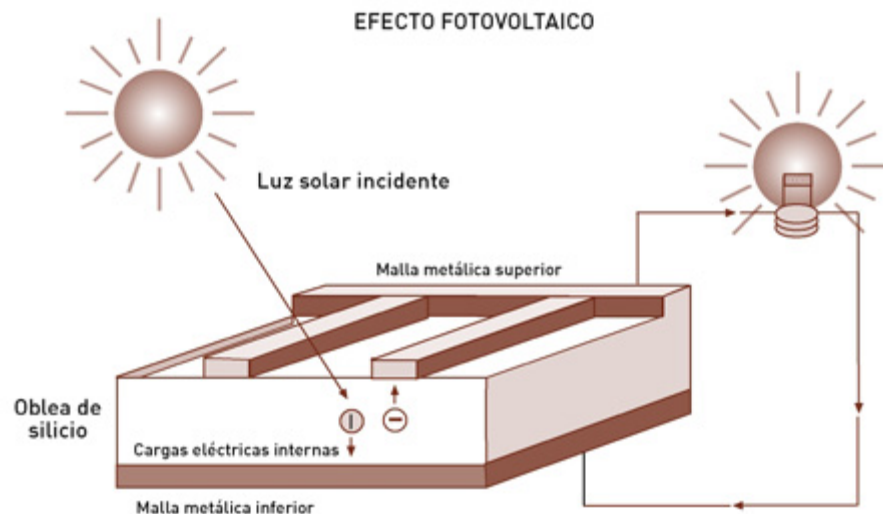
**1.3.1 Energía Fotovoltaica:** La energía solar se caracteriza por presentar densidades realmente bajas, es por esto que se hace necesario el uso de grandes superficies para la captación o concentración de rayos solares, además de esto la intermitencia que esta presenta es elevada, por esto se hace necesario el uso de sistemas de almacenamiento de energía para su total aprovechamiento.

Las células fotovoltaicas se encargan de la transformación de la energía solar en energía eléctrica, para esto se utilizan materiales semiconductores como el silicio. Estas células se unen formando módulos protegidos con una lámina de vidrio.

La energía producida por estos paneles se mide en watts pico (Wp), la cual se mide cuando el sistema es irradiado con luz solar con una potencia de 1000 W/m<sup>2</sup> y a 25°C de temperatura. Así mismo la energía producida se mide en KW/h es decir, la energía que se produciría en condiciones de máxima potencia durante una hora.

**1.3.1.1 Funcionamiento de las células fotovoltaicas:** El proceso de transformación de energía solar en energía eléctrica se produce en un elemento semiconductor denominado célula fotovoltaica, cuando la luz incide sobre esta célula, los fotones de la luz solar transmiten su energía a los electrones de la placa, para que así pueda circular dentro del sólido. Esta tecnología permite que parte de los electrones salgan del exterior del material semiconductor, generándose así una corriente que circula por un circuito externo como se muestra en la figura 08.

**Figura 8: Esquema de un circuito simple fotovoltaico**



Fuente: <http://www.empresaeficiente.com/es/catalogo-de-tecnologias/energias-renovables-aplicadas-a-la-industria-energia-solar-fotovoltaica>

Las principales aplicaciones de esta tecnología son, el funcionamiento de lámparas eléctricas, funcionamiento de aparatos eléctricos o electrodomésticos de bajo consumo energético. A su vez puede ser utilizada en lugares que no poseen acceso a una conexión eléctrica pública.

**1.3.1.2 Componentes de un sistema fotovoltaico:** El conjunto de los componentes de un sistema fotovoltaico están enfocados a cumplir con las siguientes funciones: transformar la energía solar en eléctrica, almacenar adecuadamente la energía captada, proveer esta energía y utilizar eficientemente esta energía. Los elementos que hacen posibles estas funciones son respectivamente el panel fotovoltaico, la batería, el regulador de carga y el inversor.

**Figura 9: Componentes de un sistema fotovoltaico.**



Fuente: <http://www.limpiatumundo.com/generacion-energia-renovable/solar-fotovoltaica/>

Además de estos elementos es común encontrar elementos de medición, protección y control, dependiendo de la complejidad del sistema utilizado.

- **Módulos o Paneles Fotovoltaicos:** Son los encargados de la transformación directa de la energía solar en energía eléctrica, estos módulos son placas formadas por un conjunto de celdas fotovoltaicas, protegidas de la intemperie con un proceso de anodizado y vidrio.

**Figura 10: Panel fotovoltaico.**



Fuente: [www.sitiosolar.com](http://www.sitiosolar.com)

Existen en el mercado gran variedad de fabricantes y modelos de módulos solares, según el tipo de material empleado para su fabricación se clasifican en:

- **Módulos de silicio monocristalino:** son los más utilizados debido a su gran confiabilidad y duración, aunque su precio es mayor que los demás módulos
- **Módulos de silicio policristalino:** son más baratos que los monocristalino, sacrificando la eficiencia.
- **Módulos de silicio amorfo:** el precio es mucho menor que los dos anteriores igual que su eficiencia, además son delgados y ligeros, hechos en forma flexible por que se pueden ajustar en cualquier superficie.

La tabla comparativa de las eficiencias de cada tipo de panel se muestra a continuación:

**Tabla 2: Eficiencia de los materiales empleados en paneles fotovoltaicos**

| <b>Material</b>        | <b>Eficiencia</b> |
|------------------------|-------------------|
| Silicio monocristalino | 13 - 15%          |
| Silicio policristalino | 11%               |
| Silicio amorfo         | 7%                |

- **Baterías:** Debido a la intermitencia la radiación solar es un recurso muy variable, se necesitan equipos apropiados para almacenar energía eléctrica para posteriormente utilizarla cuando se requiera un consumo de energía. El almacenamiento de esta energía recogida de los módulos se hace por medio de baterías, estas baterías son diseñadas especialmente para esta aplicación.

Las baterías realizan tres funciones fundamentales como lo son, almacenar la energía en periodos de abundantes radiación solar y bajo consumo energético, proveer la energía necesaria para abastecer el consumo real en periodos de baja o nula radiación solar, y proveer un suministro de energía estable adecuada para la utilización de aparatos eléctricos.

Las baterías para sistemas fotovoltaicos, generalmente se pueden descargar una cantidad significativa de la energía cargada antes de que se requieran recargar. Al contrario de las baterías de carros que se diseñan para descargas breves pero superficiales durante el momento del arranque. Así mientras una batería de automóvil puede ofrecer sin ningún problema 100 amperios durante 2 segundos, una batería fotovoltaica puede ofrecer 2 amperios durante 100 horas.

La capacidad de la batería se mide en “amperio-hora” una medida comparativa de la capacidad de una batería de producir corriente por unidad de tiempo, dado que la cantidad de energía que una batería puede entregar depende de la razón de descarga de la misma. Estos amperios hora de una batería se deben especificar

para una tasa de descarga en particular, normalmente esta tasa de descarga es de unas 100 horas (c-100).

- **Regulador O Controlador De Carga:** Este es un dispositivo electrónico, que controla tanto el flujo de la corriente de carga proveniente de los módulos hacia la batería, como el flujo de la corriente de descarga que va desde la batería hacia los aparatos que utilizan la electricidad si la batería ya está cargada, el regulador interrumpe el paso de corriente de los módulos hacia ésta y si ha alcanzado su nivel máximo de descarga, el regulador interrumpe el paso de corriente desde la batería hacia las cargas.

Generalmente, el regulador de carga es uno de los elementos más confiables de todo sistema fotovoltaico, siempre y cuando se dimensiona e instale correctamente.

- **Inversor:** Los módulos fotovoltaicos proveen corriente directa a 12 o 24 Voltios por lo que se requiere de un componente adicional, el inversor, el cual transforma a través de dispositivos electrónicos la corriente directa de 12 V de la batería, en corriente alterna a 120 V o 220 V.

**1.3.1.3 Ventajas y Desventajas:** La tecnología fotovoltaica no es siempre la solución más adecuada a todos los problemas de electrificación, antes se debe evaluar si esta es la mejor opción para el caso, para esto se debe tener en cuenta las ventajas y desventajas. A continuación se expondrán algunas ventajas y desventajas de los sistemas fotovoltaicos.

- **Ventajas**
  - La radiación solar es una fuente de energía sin costo
  - La tecnología fotovoltaica permite soluciones modulares y autónomas
  - Es tecnología amigable con el medio ambiente

- Tienen una vida útil mayor a 15 años
  - Tienen una reducción de precio a lo largo de los años haciéndolo más asequible al mercado en general
  - La instalación de estos sistemas es simple y básica; necesita solo equipos de medición básicos
- **Desventajas**
    - La inversión inicial es realmente alta en comparación con uso de otras tecnologías del mercado
    - El usuario de esta tecnología debe conocer la restricción en cuanto a consumo.
    - Es muy variable la energía obtenida, dependiente de las condiciones atmosféricas.
    - Debido a la poca eficiencia de los módulos fotovoltaicos es necesario el uso de bastantes módulos por lo que las áreas de trabajo son realmente grandes, se espera que con el aumento de la eficiencia de los módulos con el paso del tiempo se reduzca el área de paneles

**1.3.2 Energía Solar Térmica:** Esta clase de tecnología se basa en el uso de elementos denominados colectores que tienen como principal característica la conversión de la energía radiante a energía térmica por medio de transferencia de calor radiante. La disminución en las pérdidas de calor y el aumento de la cantidad de energía absorbida son de las principales características para mejorar la eficiencia de estos sistemas.

Se caracterizan por la transferencia de calor de los rayos solares a un fluido, principalmente destinados a abastecer grandes demandas en el sector industrial, y en el caso doméstico para sistemas más simples de calentamiento de agua supliendo la carga del consumidor.

En la actualidad esta tecnología es el medio más económico para la calefacción y producción de agua caliente sanitaria; esto se hace mediante el uso de colectores solares de diferentes formas, los cuales captan el calor radiante del sol que posteriormente es transferido al agua.

Para objeto de estudio se clasificaran los colectores dependiendo del índice de concentración (C), que es la razón entre el área de intercepción o entrada ( $A_{ent}$ ) y el área de absorción o salida ( $A_{sal}$ ) de un colector.

---

Mientras mayor sea el factor de concentración solar de un colector, mayor es la temperatura alcanzable. Los colectores se pueden clasificar de dos tipos según su concentración:

- Colectores sin concentración ( $C=1$ )
- Colectores con concentración ( $C>1$ )

**1.3.2.1 Colectores sin concentración:** La característica principal de estos colectores es el no poseer concentración alguna, en pocas palabras la relación entre la superficie externa del colector y la superficie captadora es prácticamente una unidad. Generalmente este aprovechamiento térmico se realiza a baja temperatura; el principal colector es el de placa plana.

**Figura 11: Colector de placa plana**



Fuente: <http://www.anpasol-energiasolar.com/Tematica/Termica.aspx>

Las principales partes de un colector de placa plana son:

- **Cubierta exterior (en la imagen 2. Acristalamiento):** esta generalmente formada por una lámina de cristal, lo más transparente posible, a veces sustituida por polímeros de alta cristalinidad. Se puede encontrar con una o más capas de este material para así evitar las pérdidas de calor, todo esto sacrifica la economía del colector.
- **Placa absorbedora:** es una placa plana pintada de negro con el objeto de aumentar el poder de absorción y disminuir la reflexión de esta. También se pueden encontrar los tubos para el fluido portador del calor que van soldados a la placa o sencillamente son parte de ella.
- **Aislamiento:** es el recubrimiento en todos los lados del panel, con excepción de la parte del cristal, compuesto por materiales con buenas propiedades de aislamiento (fibra de vidrio, poliuretano, entre otros), el espesor de este aislante dependen de la aplicación, lugar, tipo de aislante.
- **Caja exterior o hermética:** Alberga en su interior todos los componentes anteriormente descritos; generalmente manufacturadas en aluminio, por su poco peso y resistencia a la corrosión.

- **Acumulador:** Es donde se deposita el agua caliente, para almacenarla con la menor pérdida de calor posible.

Estos sistemas de colector de placa plana tienen diferentes aplicaciones como: Calentamiento de agua residencial, Potabilización de agua, Secado solar.

Aparte de estos colectores de placa plana existen otros muy parecidos a estos, conocidos como colectores al vacío, que están compuestos de una doble cubierta cerrada herméticamente, en la cual se ha hecho un previo vacío; con esto se reducen considerablemente las pérdidas por convección; el posible principal problema de estos colectores es su elevado costo y que con el paso del tiempo el vacío puede perderse.

**1.3.2.2 Sistemas con concentración:** Los sistemas solares con concentración pueden ser clasificados de acuerdo con dos criterios, una clasificación describe la geometría del absorbedor (concentración lineal o concentración focal); la segunda manera de clasificación es por el modo de concentración (reflexión o refracción). La mayoría de los sistemas de concentración pueden ser clasificados en una categoría de cada una de estas. A continuación se expondrán las diferentes de combinaciones de la siguiente manera.

- Concentradores focales por refracción y reflexión
- Concentradores lineales por reflexión
- Concentradores lineales por refracción

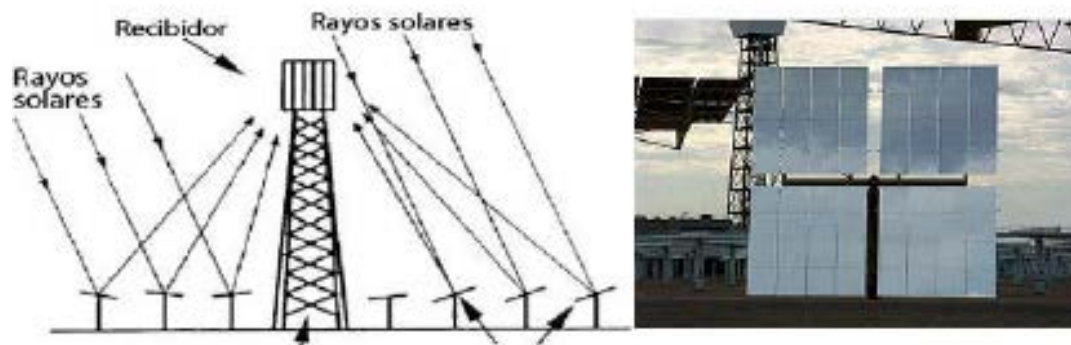
**1.3.2.2.1 Concentradores Focales por Refracción y Reflexión:** Para que en estos colectores se logre tener una concentración focal es necesario un seguimiento del sol en dos ejes. En la práctica el punto de enfoque no es realmente alcanzable (debido al tamaño finito del sol) ni es generalmente

deseable. Temperaturas extremadamente altas son teóricamente alcanzables pero pueden producir daños en el absorbedor.

Todas estas consideraciones ayudan a definir las tolerancias mecánicas en el diseño en la estructura y mecanismo de seguimiento, estos sistemas son pocos comercializados, la mayoría de estos sistemas utilizan un reflector segmentado para facilitar la fabricación, ensamble y transporte. Entre los concentradores de este tipo podemos encontrar los siguientes:

- **Sistemas de receptor central:** Son un conjunto de espejos planos que forman parte de un colector de concentración de gran tamaño, el campo de un sistema de recepción es parecido al de un campo de colectores. Cada sistema consta de varios espejos planos sujetos a un soporte, estos han de orientarse al sol mediante un movimiento de dos direcciones de modo que los rayos reflejados en los espejos incidan en el receptor.

**Figura 12: Esquema de un heliostato.**



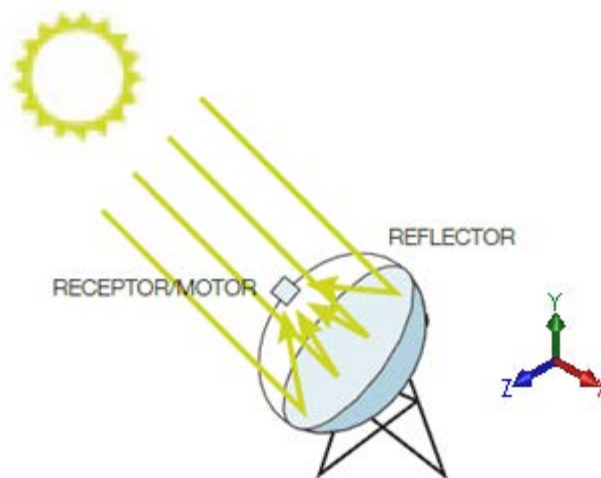
Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Heliostato>

Estos sistemas presentan las siguientes ventajas:

- La energía solar captada por el campo de espejos es transferida a un único receptor minimizando la necesidad de algún sistema de transporte de energía térmica.
- Alcanzan relaciones de áreas (de entrada y salida) elevadas llegando incluso a índices de concentración de 300 a 1500 siendo altamente eficientes, tanto como para la captación de energía térmica como para la generación de la energía eléctrica.
- **Disco parabólico:** La radiación incidente en este colector se concentra en un punto focal como se muestra en la figura 13 por lo tanto debe seguir al sol en sus dos grados de libertad (X y Z).

El receptor es colocado en el foco, este absorbe la radiación solar y la traspasa en forma de calor a un fluido circundante. La energía calorífica presente en el fluido puede ser convertido a electricidad mediante el uso de un motor generador acoplado directamente al receptor central y servir para diversos propósitos.

Figura 13: Disco parabólico



Fuente: <http://www.adrformacion.com/cursos/solarter/leccion1/tutorial5.html>

Los discos parabólicos tienen ventajas importantes con respecto a otros colectores:

- Típicamente alcanzan concentraciones entre 600 y 2000, siendo además eficientes en la absorción de energía térmica y en conversión de energía.
- Pueden ocupar sistemas independientes o estar en un campo de colectores.

**1.3.2.2.2 Concentradores lineales por reflexión:** Los sistemas de concentradores lineales por reflexión redirigen los rayos hacia un objeto lineal a diferencia de los concentradores focales. Para realizar esto, las superficies reflectivas se extienden a lo largo de esta línea de concentración.

Para el objeto de este proyecto se subdividirán esta sección en dos clases.

- Concentradores con seguimiento
- Concentradores sin seguimiento
- **Concentradores con seguimiento:** debido a la forma de que algunos concentradores reciben los rayos de luz es necesario el uso de sistema de seguimiento continuo del sol, para de esta forma concentrar la mayor cantidad de energía en la línea de concentración.

En esta clasificación existen numerosos tipos de colectores resaltando entre estos y siendo el más importante el concentrador solar cilindro parabólico (CCP) (figura 14).

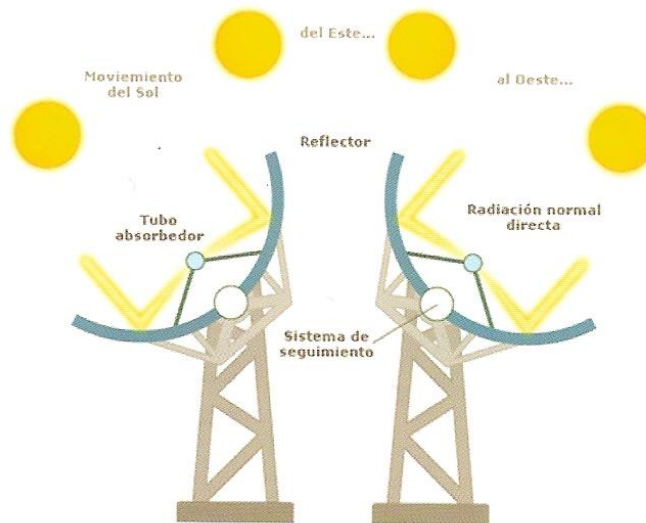
Figura 14: Sistema de Concentración Solar Cilindro Parabólicos (CCP)



Fuente: <http://en.youscribe.com/catalogue/reports-and-theses/knowledge/natural-science/ideal-concentrators-with-polygonal-absorbers-1730545>

El CCP está compuesto básicamente por un espejo cilíndrico parabólico que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo receptor ubicado en el eje focal de la parábola. Por el interior del tubo receptor circula un fluido, el cual recibe la radiación solar produciendo el calentamiento de este.

Figura 15: Esquema básico de un CCP



Fuente: <http://themorningstarg2.wordpress.com/tag/colectores-cilindro-parabolicos/>

Los CCP tienen un factor de concentración de 80 o más en una línea focal, en las plantas grandes estos colectores se ubican formando una línea de unos 200 a 400 metros y a su vez se forman más filas para formar un campo de colectores.

**Figura 16: Planta termo solar nevada solar one (nevada EE UU)**



Fuente: <http://www.acciona.es/lineas-de-negocio/proyectos-emblematicos/planta-termsolar-nevada-solar-one>.

En estas plantas termo solares un aceite térmico, o algún otro fluido circula por el tubo, el fluido se calienta hasta casi 400 °C, un intercambiador de calor trasfiera el calor del aceite a un ciclo de generación de vapor o como es mejor conocido ciclo Rankine.

Una bomba de alimentación pone al agua bajo presión; posteriormente un economizador, un vaporizador y un sobrecalentador producen vapor sobrecalentado. Este vapor se expande en una turbina de dos etapas (etapa de alta y etapa de baja presión), entre la alta presión y la baja presión de esta turbina se encuentra un recalentador que calienta el vapor nuevamente. La turbina conecta a un generador eléctrico que convierte esta energía en eléctrica, el condensador detrás de la turbina condensa el vapor de agua nuevamente para así cerrar el ciclo de la bomba de alimentación.

Los elementos principales de un CCP son: reflector cilindro parabólico, tubo absorbente, sistema de seguimiento del sol y estructura soporte

- **Reflector cilindro parabólico:** como función principal este elemento tiene que reflejar y concentrar la radiación en el tubo absorbedor, la reflexión de esta película se consigue con lamitas de reflexión de plata o de aluminio depositadas en un soporte que le da la rigidez
- **Tubo absorbedor:** Al igual que el anterior es uno de los elementos fundamentales de un CCP ya que de este depende el rendimiento global de un colector. El tubo absorbente de un CCP puede constar de un tubo simple de metal o de dos tubos concéntricos.

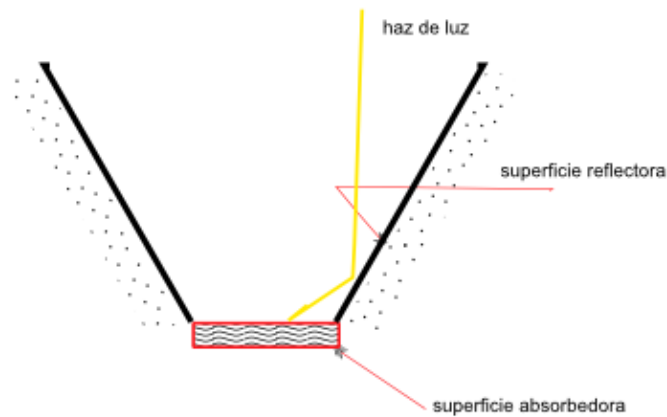
En los casos donde el dispositivo consta de dos tubos concéntricos, el fluido que se calienta circula por el tubo interior, este tubo metálico posee un recubrimiento selectivo para aumentar su absorción (>90%) lo que proporciona un elevado rendimiento térmico; el tubo exterior cristalino tiene la función de reducir las pérdidas por convección y de ofrecer protección al recubrimiento selectivo.

La mayoría de los CCP actuales usan estructuras metálicas, que en algunos casos son de tipo espacial y en otros casos están fabricadas con perfiles estructurales. La eficiencia en estos colectores depende del ángulo de incidencia de luz del sol y de la temperatura del tubo de absorción y en estos casos se puede alcanzar eficiencias de hasta de 75%.

Como la eficiencia depende el ángulo de incidencia de la luz, es necesario el empleo de un sistema de seguimiento en estos colectores, pero esto trae mayores consideraciones a la hora del diseño, como por ejemplo el aumento de cargas en la superficie de soporte, la carga realizada por el viento y el manejo de la potencia del mecanismo de seguimiento.

- **Concentradores sin Seguimiento:** Estos colectores, al no poseer un sistema de seguimiento solar, deben presentar características determinadas para poder alcanzar un rendimiento óptimo en cuanto a concentración se trata; el concentrador más simple que podría encajar en esta categoría es el colector trapezoidal (figura 17), este colector se genera con paredes planas utilizadas como reflector y un absorbedor o receptor en la base.

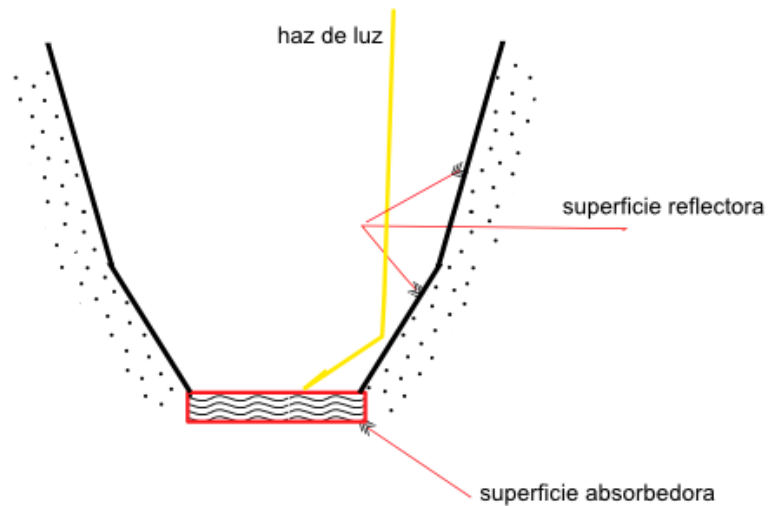
**Figura 17: Esquema de un Colector Trapezoidal**



Fuente: Autores

Para mayores factores de concentración se optó a lo largo de la historia por utilizar múltiples caras planas, reemplazando las paredes rígidas del concentrador trapezoidal con estas, dando como resultado el concentrador de dos caras (figura 18).

**Figura 18: Esquema de un Colector de Dos Caras**

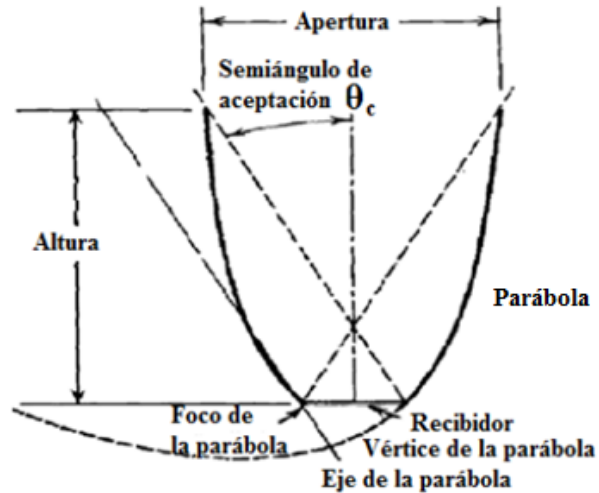


Fuente: Autores

Estas geometrías pronto fueron reemplazadas por cara curvas con formas específicas, dando origen al concentrador parabólico compuesto o mejor conocido por sus siglas en inglés como CPC.

El concentrador parabólico compuesto (CPC) (figura 19) consta de dos segmentos de parábolas posicionadas de formas simétricas e inclinadas formando un ángulo  $\theta_C$  con lo que sería el eje óptico del CPC (ver figura 20). Este ángulo  $\theta_C$  que se forma entre el eje óptico y el eje de la parábola proyectada es lo que se conoce como semiángulo de aceptación ( $\theta_C$ ), el cual es el límite máximo en el que los rayos incidentes llegan a la parte inferior donde se encuentra el absorbedor o receptor.

Figura 19: Esquema de un CPC con semiángulo de aceptación  $\theta_c$

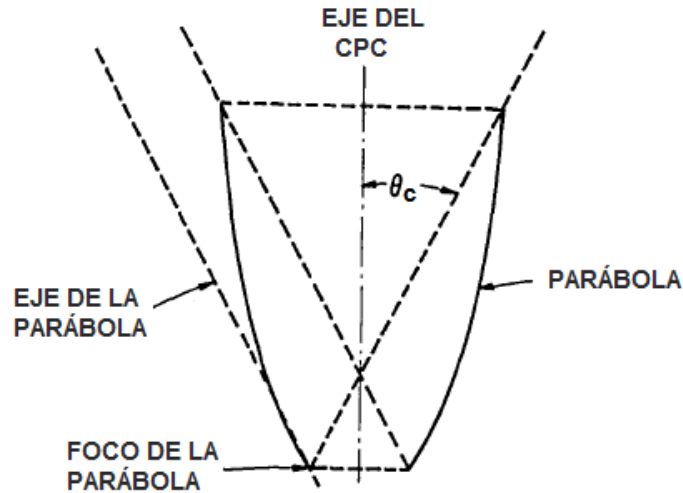


Fuentes: Solar Engineering of Thermal Processes. Third Edition. John A. Duffie and William A. Beckman. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc.

Para entender el funcionamiento de un CPC es necesario conocer algunos términos como.

- Angulo de aceptación
- Factor de concentración
- **Angulo de Aceptación de un CPC:** Como se introdujo anteriormente, en este tipo de colectores se tiene que cada lado del CPC es una sección de parábola; cada una de estas parábolas tiene su foco y su eje, cada parábola se extiende hasta que la superficie sea paralela con el eje del CPC. El ángulo entre la línea que conecta el foco de una de las parábolas con el borde opuesto de la apertura es el ángulo medio de aceptación  $\theta_c$ .

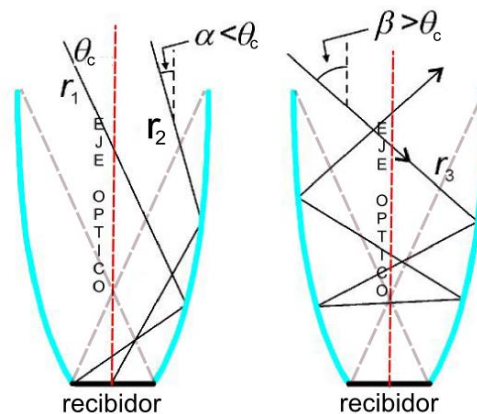
**Figura 20: Ángulo de aceptación de un CPC**



Fuente: Solar concentrators with maximal concentration for cylindrical absorbers. Ari Rabl. Modificado por autores.

Si el reflector es perfecto, cualquier radiación que entre a la apertura con un ángulo menor a  $\theta_c$ , será reflejado hacia el receptor ubicado en la base del concentrador. Por el contrario si el ángulo de incidencia del rayo es mayor que  $\theta_c$  éste no atravesará el receptor o receptor si no que saldrá por donde entro. Este fenómeno será ilustrado en la figura 21:

**Figura 21: Influencia del rayo de incidencia.**



Fuente: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/thumb/d/d9/Nonimaging\\_Optics-CPC\\_Acceptance.png/210px-Nonimaging\\_Optics-CPC\\_Acceptance.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/thumb/d/d9/Nonimaging_Optics-CPC_Acceptance.png/210px-Nonimaging_Optics-CPC_Acceptance.png). Editada por autores

Como se observa en la figura 21, en la imagen izquierda los rayos entran con un ángulo  $\alpha < \theta_c$  con respecto al eje óptico lo que hace que llegue hacia la parte inferior donde se encuentra el receptor. Caso contrario ocurre en la figura de la derecha donde el rayo de luz al poseer un ángulo mayor que  $\theta_c$  ( $\beta > \theta_c$ ) se ve reflejado hacia la parte superior, saliendo por la abertura de entrada.

El hecho de que el ángulo de aceptación sea grande ofrece ventajas importantes. Permite la operación del concentrador por periodos de tiempo extensos sin necesidad de ajustar su orientación, el empleo de superficies reflejantes no muy precisas y permite la concentración de una porción de la radiación difusa

- **Factor De Concentración:** La razón de concentración de los rayos solares en estos colectores es dependiente del ángulo de aceptación y está dada por la siguiente ecuación:

$$[8]$$

Donde  $C$  es factor de concentración y  $\theta_c$  es el semiángulo de aceptación.

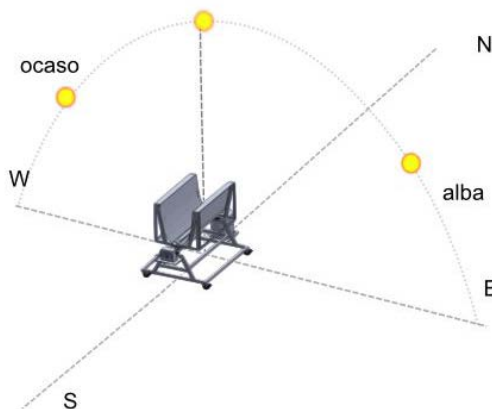
La ecuación de concentración indica simplemente que mientras más pequeño sea el semiángulo de aceptación mayor será la concentración; cuando el concentrador es estacionario los ángulo de aceptación serán grandes, si los ángulos de aceptación son pequeños deberá recurrir a un sistema de seguimiento solar para darle orientación al CPC.

Como ya se expuso la principal característica de un CPC es la posibilidad de utilizarlo sin un seguimiento solar, para esto el ángulo de aceptación mínimo deberá ser aproximadamente de  $47^\circ$ ; este ángulo será capaz de cubrir la declinación total del sol desde el solsticio de verano hasta el solsticio de invierno.

Al no poseer un sistema de seguimiento el CPC, tiene que estar orientado de la forma correcta para aprovechar al máximo sus características. El cpc puede ser orientado de dos maneras:

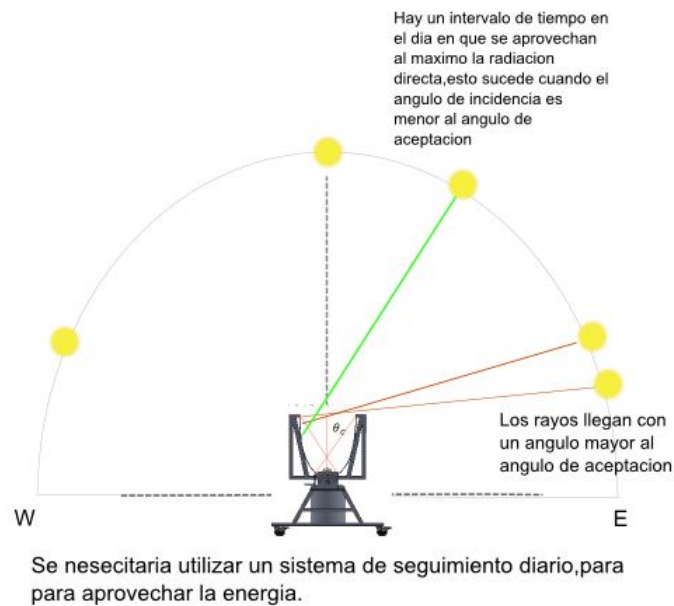
- Con su eje mayor norte-sur
- Con su eje mayor este oeste
- **Orientación norte sur:** Si el CPC es ubicado con el eje de norte a sur es necesario proveer un sistema de manipulación para seguir el sol continuamente; considerando un ángulo de aceptación bastante grande no será necesario ningún ajuste, pero perdería la energía irradiada por el sol durante la alba y el ocaso debido que estos ángulos solares quedarían fuera del ángulo de aceptación del concentrador.

**Figura 22: Configuración del eje del CPC paralelo al eje norte-sur.**



Fuente: Autores

**Figura 23: Representación de los rayos en el alba y ocaso con el eje paralelo a la línea norte-sur.**

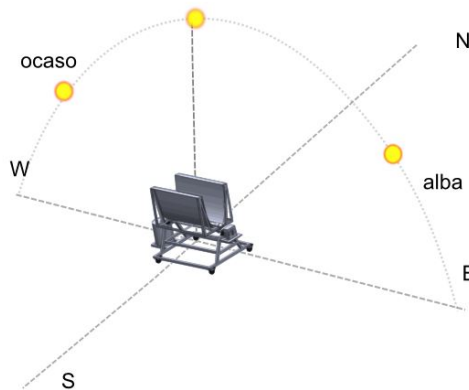


Fuente: Autores

- **Orientación este-oeste**

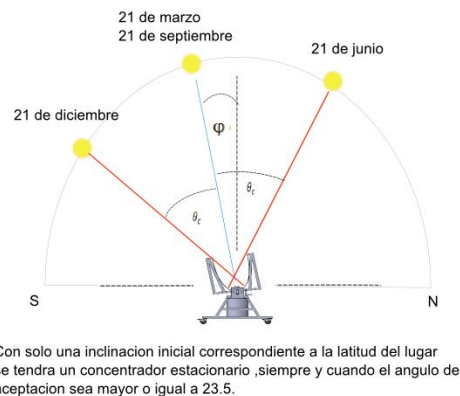
El problema de la orientación mostrada anteriormente se resuelve colocando el concentrador con el eje mayor de este a oeste, de esta forma no será necesario seguir el sol constantemente durante el periodo de la jornada, solo bastará hacer pequeños ajustes estacionales para captar la mayor radiación difusa.

**Figura 24: Configuración del eje del CPC paralelo al eje este-oeste**



Fuente: Autores

**Figura 25: Esquema de los rayos durante el equinoccio y el solsticio para un eje paralelo a la línea este-oeste.**

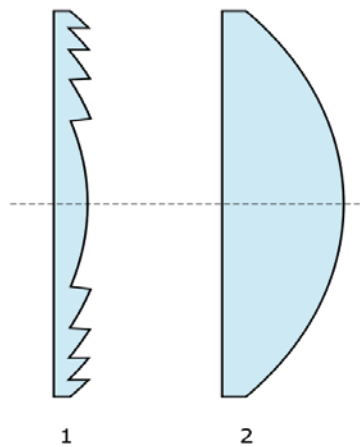


Fuente: Autores

**1.2.2.2.3 Concentradores Lineales por Refracción:** Comparados con los sistemas de concentración por reflexión estos poseen diseños complejos ya que el método de concentración de la energía requiere de lentes que hagan posible la concentración por medio de la refracción de la luz.

Las características de imagen de una lente dependen principalmente de la curvatura de la superficie. Por lo tanto, esencialmente el mismo rendimiento óptico se puede lograr si el centro de la lente se retira, la superficie se divide en pequeños segmentos de pendiente originales que mantienen su original y estos segmentos son desplazados a la línea central de la lente. Una lente de este tipo se llama una lente de Fresnel (Figura 26). Que son de uso común en las aplicaciones donde la energía solar se concentra mediante refracción.

**Figura 26: Corte transversal de dos lentes equivalentes (1) lente Fresnel, (2) lente tradicional**

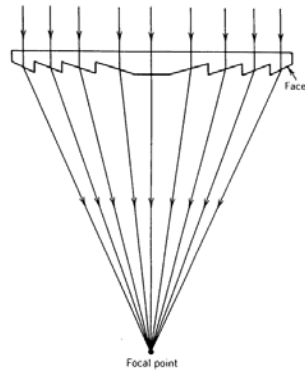


Fuente. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fresnel\\_lens.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fresnel_lens.svg)

Los lentes Fresnel para aplicaciones solares se construyen a menudo de plástico, el plástico tiene un peso ligero y puede ser fácilmente extruido de la forma requerida,

Son muy pocos los colectores lineales que utilizan la técnica de los lentes de Fresnel, un esquema idealizado de este método de refracción se muestra a continuación

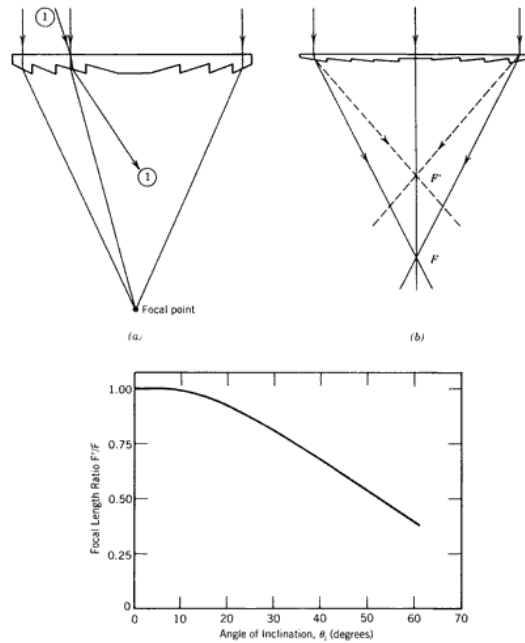
**Figura 27: Lente Fresnel idealizado**



Fuente: <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter08/chapter08.html>

Tal vez el más serio limitante en el comportamiento de un lente Fresnel (u otro tipo de sistema por refracción) es el ángulo de incidencia con que llegan los rayos al lente, por esto es necesario un sistema de seguimiento solar, en la siguiente figura se puede observar la influencia de la inclinación de los rayos en la refracción de los lentes Fresnel.

**Figura 28: Requisitos de seguimiento de dos ejes para las lentes de Fresnel.**



Fuente: <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter08/chapter08.html>

En la figura 28 (a) muestra el efecto sobre el haz refractado inclinado en la apertura de la lente en el plano de curvatura; (b) el efecto de haz refractado inclinada a lo largo de eje lineal de la lente. La línea sólida es en el plano de papel (se centran  $F$ ). La línea segmentada es fuera del plano de papel (foco  $F'$ ), (c) muestra el cambio en la longitud focal de la lente de Fresnel lineal cuando los rayos incidentes inclinadas en un ángulo a lo largo del eje lineal de la lente.

Sin embargo, un efecto algo más sutil debido a la refracción se produce si el rayo incidente se inclina a lo largo del eje lineal de la lente de Fresnel. Esto se ilustra en la Figura 28 (b), como resultado de esto se crea una nueva línea de coordinación de la lente que está por encima de la línea focal normal. Para mantener la imagen refractada centrada en un receptor que está fijo con respecto a la lente se debe realizar un seguimiento de un colector de lente de Fresnel (o cualquier sistema de lentes) para mantener la luz incidente normal a la apertura de la lente. Con todo

esto es necesario el uso de un seguimiento de dos ejes para aumentar el rendimiento de este tipo de concentradores.

#### **1.4 FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA**

La fotocatalisis es una de las diversas tecnologías existentes para el tratamiento de aguas contaminadas que pertenecen a las denominadas tecnologías avanzadas de oxidación. La fotocatalisis heterogénea es un proceso que se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante visible o ultravioleta por un sólido (llamado fotocatalizador heterogéneo) el cual será excitado, esto produce un salto de electrones de la banda de valencia a la de conducción, lo que da inicio al proceso catalítico.

Existen diversos materiales con propiedades idóneas para actuar como catalizadores y llevar a cabo reacciones fotosensibilizadas como, por ejemplo,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CdS}$ , óxidos de hierro,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{ZnS}$ , etc. Estos materiales son asequibles económicamente, e incluso muchos de ellos participan en procesos químicos en la naturaleza, además, la mayoría de estos materiales puede excitarse con luz de no muy alta energía, absorbiendo parte de la radiación del espectro solar que incide sobre la superficie terrestre (longitudes de onda mayores a 310 nm), lo cual incrementa el interés para un posible aprovechamiento de la luz solar.

**1.4.1 Dióxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ ) como Fotocatalizador en el Proceso:** Los fotocatalizadores mas investigados hasta el momento son los óxidos metálicos, semiconductores de banda ancha y, particularmente, el  $\text{TiO}_2$ , el cual tiene la propiedad de formar oxidantes altamente reactivos (radicales hidroxilos  $\text{OH}^\cdot$ ), así mismo presenta una elevada estabilidad química que lo hace apto para trabajar en un amplio intervalo de pH, al mismo tiempo que es capaz de producir transiciones electrónicas por absorción de luz en el ultravioleta cercano (UVA). La obtención de  $\text{TiO}_2$  se puede realizar de dos diferentes maneras:

- Método industrial
- Método de laboratorio (sol-gel)

**1.4.1.1 Método industrial:** El  $\text{TiO}_2$  se puede obtener por diferentes métodos industriales. Éstos son comúnmente conocidos como el proceso sulfato y el proceso cloro. Se estima que industrialmente el 47% de los polvos de  $\text{TiO}_2$  son fabricados siguiendo el proceso sulfato y 53% el proceso cloro.

- **Método sulfato:** Fue el primer proceso comercial para la manufactura del  $\text{TiO}_2$ , el método consiste en utilizar un mineral con grandes concentraciones de  $\text{TiO}_2$ . Este mineral es inicialmente secado, separado y clasificado de modo que se asegure la sulfatación en un baño de ácido sulfúrico concentrado. Se tiene que tratar de convertir la mayor cantidad de  $\text{TiO}_2$  a sulfato de titanilo soluble en agua usando una mínima cantidad de ácido, posteriormente el sulfato de titanilo es evaporado dando como resultado óxido de titanio, estas partículas después de una adecuada calcinación toman la forma cristalina requerida
- **Método Cloro:** También conocido como oxidación en llama, es este caso se parte del mineral o un desarrollo sintético con una alta concentración de  $\text{TiO}_2$ , se procede a mezclar con carbón y reaccionar en una fluyente con cloro a  $900^\circ\text{C}$  hasta obtener  $\text{TiCl}_4$ , posteriormente se realiza una combustión en llama oxigenada de  $\text{TiCl}_4$  produciendo  $\text{TiO}_2$  como resultado.

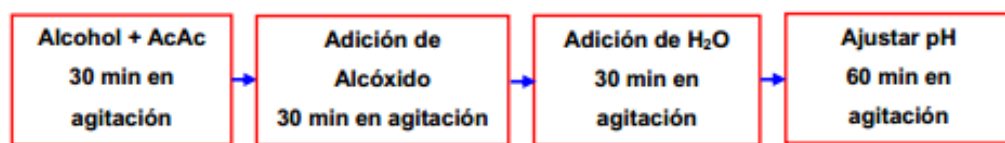
El tiempo en la combustión determina la morfología del grano, tiempos largos de combustión conducen a partículas de mayor diámetro.

El  $\text{TiO}_2$  como catalizador puede ser utilizado en polvo suspendido en el medio a descontaminar, pero sufre problemas de agregación, que pueden con el tiempo afectar negativamente la eficiencia de la reacción, además el uso requiere una posterior etapa de recolección y recuperación del catalizador en el proceso de descontaminación de aguas.

El costo aproximado del mercado local de dióxido de titanio por kilogramo de una pureza de 95% va desde \$8000 a \$20000 Pesos colombianos, las ventajas ofrecidas mencionadas anteriormente y el bajo costo en el mercado local, hacen del TiO<sub>2</sub> un catalizador óptimo.

**1.4.1.2 Método de laboratorio:** Estos métodos se emplean esencialmente para preparar materiales con características definidas a partir de soluciones acuosas o alcohólicas que contienen precursores de TiO<sub>2</sub>, Los precursores usuales son los alcoxidos de titanio (como el isopropoxido de titanio). Mediante la hidrolisis controlada del precursor o empleando una relación precursor-H<sub>2</sub>O se obtienen soles (soluciones de un compuesto) de TiO<sub>2</sub>, el pH del sol juega un rol muy importante al momento de determinar las velocidades de hidrolisis, el pH también influye sobre la estructura cristalina del TiO<sub>2</sub>, por ejemplo, un pH muy acido ayuda a la formación de partículas con contenido de rutilo, y pH básicos de anastasa. En algunos casos la hidrolisis es muy violenta y se emplea agentes como el acetil-acetonato (Ac-Ac).

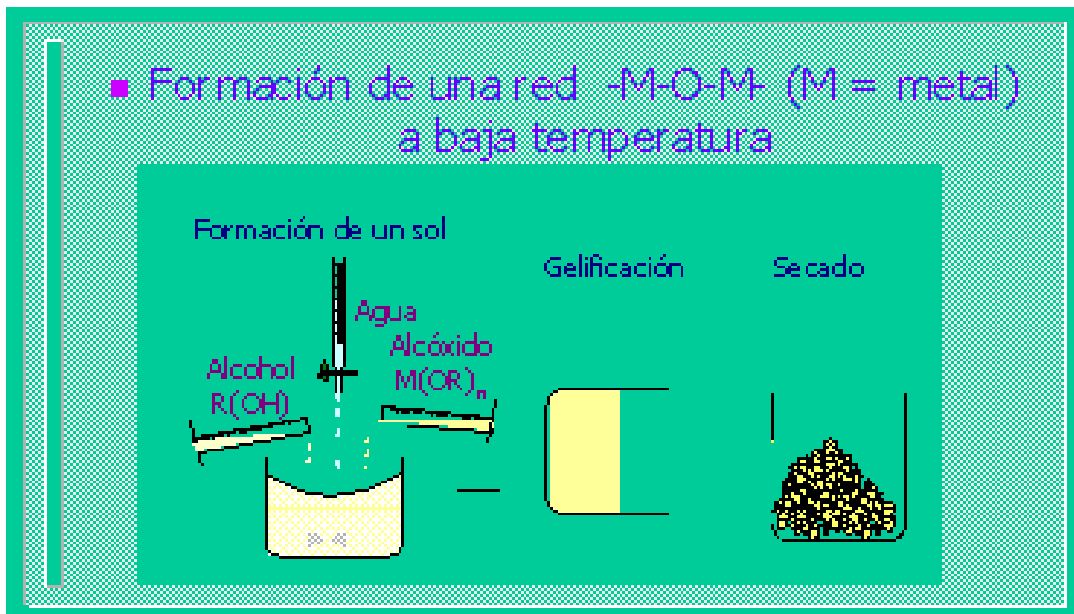
**Figura 29: Ejemplo de preparación de sol**



Fuente: Fuente: Síntesis de fotoanodos de TiO<sub>2</sub> sobre vidrio conductor por el método *dip coating* y su evaluación de la remoción fotoelectroquímica de cobre en soluciones acuosas cianuradas. Alvarado E.Vesga B. Universidad Industrial de Santander.

Por evaporación o desestabilización lo soles puede producir geles y a su vez luego de ser tratados puede producir polvos.

**Figura 30: Proceso de Sol-Gel**



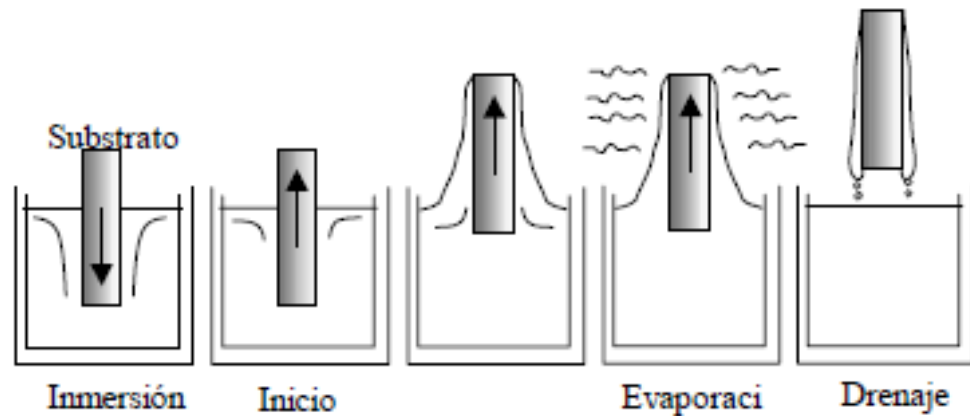
Fuente: <http://www2.uca.es/grup-invest/geles/paginas/intro.html>

El componente precursor (isopropóxido de titanio) tiene un valor en el mercado local de aproximadamente \$180.000 pesos el litro.

**Fotocatalizadores soportados en películas:** Una alternativa al empleo del fotocatalizador suspendido es utilizarlos en depósitos de películas delgadas, el uso de estos substratos debe generar una interacción benéfica con el  $TiO_2$  o por lo menos inocua para no afectar el proceso, En este caso se utilizan como substratos materiales como el vidrio, vidrio recubierto, metales, cerámicos plásticos, etc.

El método más utilizado es el método *dip coating*, el cual consta en sumergir el substrato en un sol (solución de dióxido de titanio), se lo mantiene inmerso durante un tiempo y luego se extrae a la velocidad controlada.

**Figura 31: Etapas del proceso dip coating**



Fuente:

[http://www.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/09\\_Capitulo\\_09.pdf](http://www.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/09_Capitulo_09.pdf)

Al retirar el substrato se forma una capa de líquido asociada a la superficie de este, el espesor de esta película que se queda con el sustrato depende de la velocidad de retiro del material, cuando mayor es la velocidad de extracción mayor es el espesor de la película. Las propiedades finales del recubrimiento se obtienen después de someterlo a tratamientos térmicos, en los cuales se eliminan los residuos de solventes.

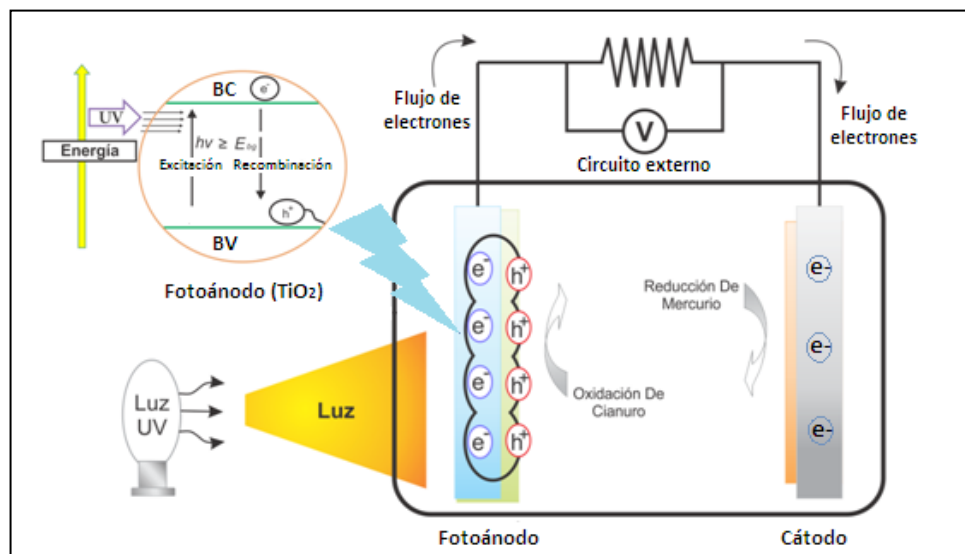
**1.4.2 Proceso de fotoelectrocatalisis:** Para realizar el proceso de fotocatalisis se requieren los siguientes componentes:

- Fotoánodo: elemento metálico recubierto de por  $\text{TiO}_2$  el cual será excitado por la radiación ultravioleta en este se realiza la oxidación del compuesto.
- Cátodo: elemento de acero o grafito en el cual aporta electrones al sistema produciendo la reducción del compuesto.
- Circuito eléctrico externo: es el encargado de inducir un flujo de electrones desde el fotoánodo hacia el cátodo.

La figura 32 Esquematiza los procesos químicos que ocurren en una partícula de semiconductor cuando esta es excitada con luz suficientemente energética. En estas condiciones, se crean pares electrón-hueco (salto del electro desde la banda de valencia) cuya vida media está en el intervalo de los nanosegundos; en este lapso deben migrar a la superficie y reaccionar con especies absorbidas. En este punto transforma el cianuro  $\text{CN}^-$  en productos como el cianato  $\text{OCN}^-$  (1000 veces menos toxico).

Los pares electrón-hueco que no alcanzan a separarse y a reaccionar con especies se recombinan y la energía se disipa en forma de calor. Para la solución de este inconveniente de recombinación se implementó un proceso fotoelectrocatalítico, pues mediante la aplicación de un potencial externo se reduce la recombinación de los portadores de carga (electrones y hueco). La aplicación del potencial externo es un factor clave para aumentar la eficiencia fotocatalítica.

**Figura 32: Esquema de una celda fotoelectroquímica para remover mercurio en soluciones cianuradas.**



Fuente. Estudio de la factibilidad de implementación de un Proceso fotoelectroquímico. Ing. Sandra García

Cuando se aplica un potencial eléctrico al fotoánodo con  $\text{TiO}_2$  soportado, los electrones fotogenerados son transferidos por el circuito externo hacia el electrodo contrario, ocurriendo allí la reducción de  $\text{Hg}^{+2}$  a  $\text{Hg}^0$  el cual tiene posee la presentación líquida y puede ser retirado fácilmente.

Los conceptos teóricos abarcados en el capítulo 1 serán utilizados en los capítulos posteriores, correspondientes al diseño y construcción del concentrador parabólico compuesto CPC. Para el desarrollo de este proyecto se dividirán los capítulos de la siguiente manera:

- Sistema de Concentración Solar.
- Sistema de Captación de Radiación.
- Elemento de Soporte Estructural.
- Sistema de Transporte y Medición del Flujo.

## **2. SISTEMA DE CONCENTRACIÓN SOLAR**

La superficie reflectora del concentrador solar es el componente más importante de un concentrador parabólico compuesto, ya que es el encargado de recolectar la energía y redirigirla hacia el tubo captador para así conseguir el máximo aprovechamiento de esta. Para el diseño del CPC se requiere cumplir con unas condiciones tanto desde el punto de vista de las características reflectivas de los materiales como desde el punto de vista geométrico.

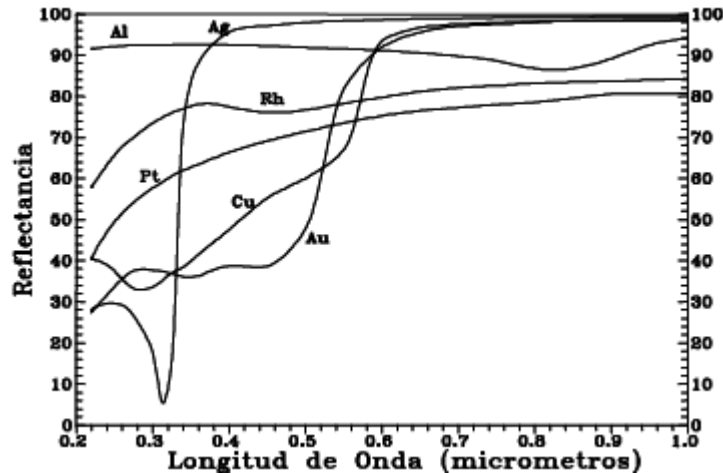
### **2.1 MATERIALES UTILIZADOS PARA LA SUPERFICIE REFLECTORA**

El material utilizado en la superficie reflectora constituye quizás el ítem más importante en la fabricación de esta, es por eso que se analizó cuidadosamente el mejor material para obtener el mejor desempeño del CPC.

Como es conocido para la reacción fotoelectrocatalítica es necesario emplear luz en el espectro ultravioleta, por esto que el principal objetivo es buscar un material que supliera las necesidades de reflexión de este tipo de radiación.

Los espejos tradicionales basados en plata como elemento reflectivo tienen una elevada reflexión de luz en el espectro visible, pero es mínima en el intervalo de onda del espectro ultravioleta, en este caso es mejor utilizar espejos con base aluminio ya que este tiene un buen comportamiento en el espectro de luz ultravioleta. La siguiente gráfica muestra la reflectancia espectral de diferentes metales electro depositados al vacío.

**Figura 33: Reflectancia espectral de diferentes metales, tomado de Diseño de reactores de fotocatalisis**



Fuente: Diseño de reactores para fotocatalisis. Cap. 11, evaluación comparativa de las distintas opciones.

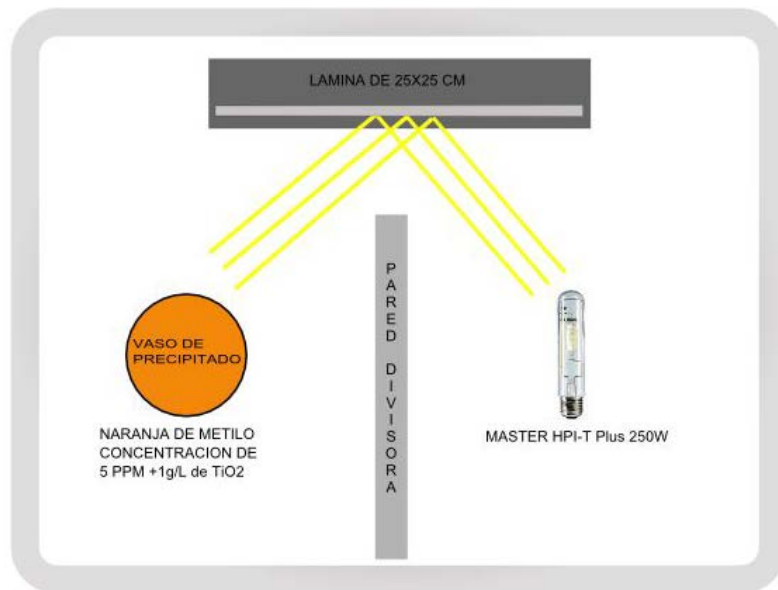
Además de esto el vidrio que acompaña a estos espejos absorbe luz ultravioleta lo que no sería de ayuda para la reflexión en esta longitud, aún más si se tiene en cuenta que los rayos atravesaran dos veces este vidrio.

Para el buen funcionamiento de esta superficie reflectora no solo es necesario asegurar una buena reflexión, sino además, se tiene que asegurar características de durabilidad y de resistencia ya que las pruebas que se realizaran serán al aire libre y el factor corrosivo es alto. La unión de estas características hace más complicada la búsqueda de un material óptimo.

La mejor solución que se puede encontrar es la utilización de láminas tipo sándwich en donde unas capas de plásticos recubren una superficie de aluminio, todo esto para aumentar la durabilidad a la intemperie de la lámina y asegurar una mayor reflexión.

El proceso de selección de la superficie reflectora se basó en una prueba donde se mide la degradación de un colorante mediante la exposición a la radiación reflejada en diferentes materiales, estos materiales fueron escogidos por la facilidad de obtención en el mercado local.

**Figura 34: Esquema de la prueba de reflectividad mediante degradación de colorante.**



Fuente: Autores

### **2.1.1 Prueba de Degradación de Colorante en el Laboratorio de Guatiguará:**

Se decidió hacer una prueba experimental para la elección del material que más se adaptara a las necesidades, estas pruebas fueron realizadas en el laboratorio del grupo de investigación de la escuela de ingeniería química (GIMBA) ubicado en la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander, se hizo reflejar radiación ultravioleta (obtenida por medio de una lámpara phillips MASTER HPI-T Plus 250W) en láminas de 25X25 cm de cada material a estudiar, todo esto en un cuarto cerrado restringiendo la entrada de luz del ambiente, la radiación reflejada de estas laminas fue capturada por un vaso de precipitado el cual contenía

naranja de metilo (colorante) en cantidad de 5PPM (partes por millón) con adición de 1g/l de  $\text{TIO}_2$  para facilitar la reacción.

**Figura 35: Montaje prueba en el laboratorio de Guatiguara**



Fuente: Autores

Lo buscado en esta prueba fue encontrar el material que por medio de una mejor reflexión degradara el colorante contenido en el vaso de precipitado en un tiempo determinado, en este tiempo se sacaron muestras de la sustancia que posteriormente se analizaron en un Espectrofotómetro UV-VIS marca Hewlett Packard, observando la degradación del colorante por cada lamina a estudiar.

Según los criterios mencionados anteriormente (página 59) los materiales seleccionados fueron los siguientes: aluminio (presentación lamina 0.5mm), aluminio pulido(presentación lamina 0,5mm), aluminio anodizado (presentación lamina 0,5mm), acero inoxidable 304 (presentación lamina 0.6mm),, acero inoxidable 403 (presentación lamina 0.6mm)

Los datos de esta prueba evidenciaron verdaderamente el comportamiento de las láminas obteniendo como la mejor opción el aluminio pulido.

**Tabla 3: Resultados de la prueba de degradación.**

| Lámina                      | Absorbancia | Concentración (PPM) |
|-----------------------------|-------------|---------------------|
| Aluminio Pulido             | 0.3635      | 3.5254860           |
| Aluminio Pulido + Anodizado | 0.2780      | 2.5368350           |
| Acero 304                   | 0.2862      | 2.6317418           |
| Aluminio anodizado E.A      | 0.3078      | 2.8812772           |
| Aluminio Intemperie 4 Días  | 0.2817      | 2.5787328           |

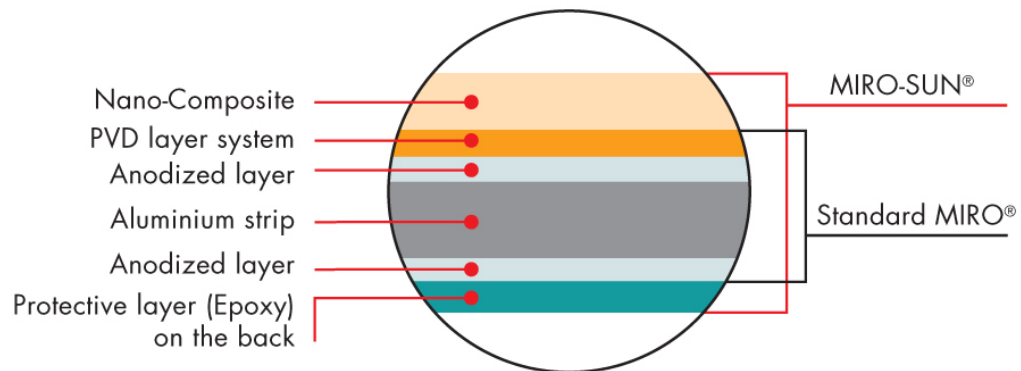
Fuente. Autores

La tabla muestra valores comparativos de concentración en PPM del colorante, se logro obtener una mayor degradación de este colorante cuando se utilizó el material de aluminio pulido (la fue pulida hasta obtener una superficie muy parecida a la de un espejo) como elemento de reflexión. También se observó que al tratar de aplicar un tratamiento anticorrosivo como es el anodizado lo que hace es reducir la reflectividad del material.

Con esta prueba se comprueba que el material que mejor se ajusta a la necesidad para la superficie reflectora, es el material de aluminio, pero se tuvo en cuenta que el aluminio pulido sin ningún tratamiento no soportaría durante largos periodos expuesto a la intemperie, por esto se buscó en el mercado internacional un material que cumpliera a satisfacción esta condición de diseño (buena reflexión de ultravioleta y durabilidad).

Una opción para la superficie reflectora se encontró en el mercado internacional en la presentación de lámina de plástico-aluminio-plástico, esta es suministrada por una empresa ubicada en Alemania la cual tiene un amplio recorrido en el uso de materiales para la reflexión, y para aplicaciones solares especialmente en concentradores solares, entre los productos que manejan se encuentran las láminas conocidas como miro y MIRO-SUN que se adaptan muy bien a las necesidades requeridas en el proyecto.

**Figura 36: Composición de la lámina MIRO-SUN**

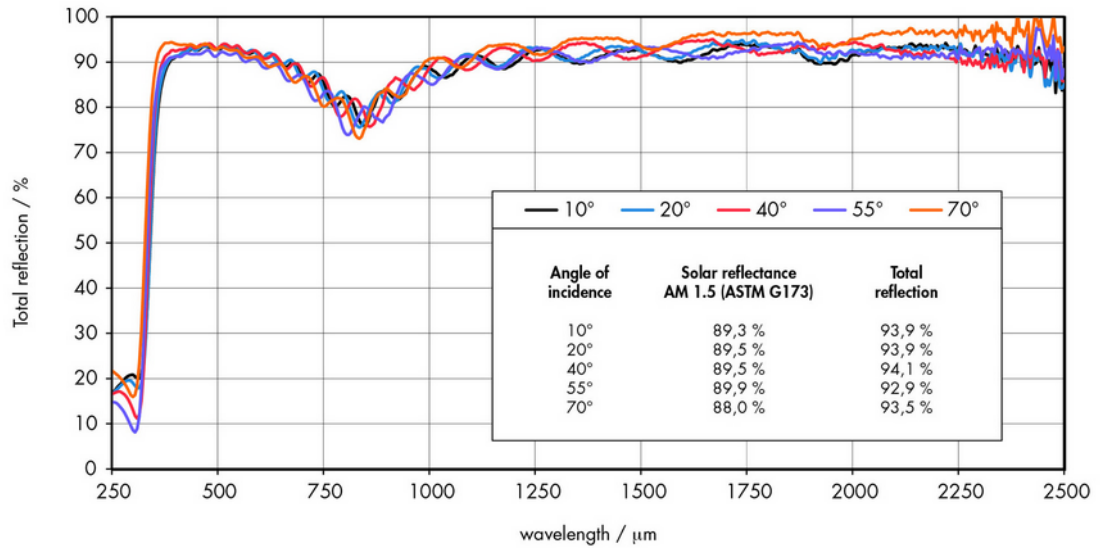


Fuente: <http://alanod-solar.com/opencms/opencms/Reflexion/Produkte.html>

La imagen muestra la composición de este tipo de láminas formada principalmente por una capa de aluminio puro (esencial para la reflexión ultravioleta) seguido de películas de anodizado por ambas superficies (frontal y trasera) la superficie trasera de esta lamina termina con una capa de protección en epoxi, la capa posterior se completan con dos capas para aumentar la durabilidad de estas laminas.

Entre las características principales de estas clases de láminas se encuentra su capacidad de reflexión de hasta un 95 % en gran parte del espectro de radiación solar.

**Figura 37: Porcentaje de radiación en el espectro solar en función de la longitud de onda de las láminas miro**



Fuente: <http://alanod-solar.com/opencms/opencms/Reflexion/Produkte.html>

Todas las pruebas de reflectividad realizadas a la lámina están amparadas bajo normas internacionales especialmente las norma ASTM g173 lo que certifica los valores máximos de reflectividad dados por la empresa.

**Tabla 4: Datos técnicos de las láminas suministrados por la empresa sobre las láminas.**

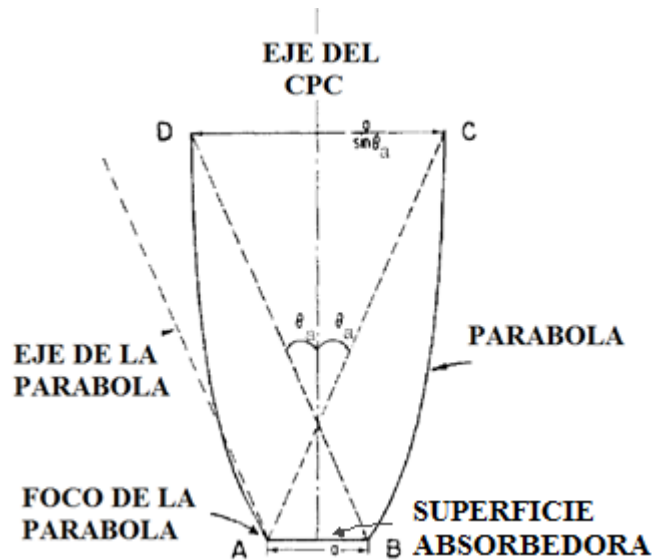
| Properties        | Parameter   | reflective 85           | MIRO reflective 90          | MIRO high reflective 95     | Norm           |
|-------------------|---|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| <b>Mechanical</b> | Tensile Strength (Mpa):   | 160 - 200               | 160 - 200                   | 160 - 200                   | EN 485-2       |
|                   | Yield Strength (Mpa):   | 140 - 190               | 140 - 190                   | 140 - 190                   | EN 485-2       |
|                   | Elongation A 50 %:  | ≥ 2                     | ≥ 2                         | ≥ 2                         | EN 485-2       |
|                   | Bending radius:   | ≥ 1.5 fold thickness    | ≥ 1.5 fold thickness        | ≥ 1.5 fold thickness        |                |
| <b>Optical</b>    | Total solar reflectance %:  | ≥ 85                    | ≥ 90                        | ≥ 95                        | ASTM G 173 • • |
|                   | Solar weighted specular reflectance (R <sub>s, solar</sub> ) %:     | ≥ 72                    | ≥ 85                        | ≥ 92                        | ASTM G 173 • • |
|                   | Solar weighted diffuse reflectance %:                               | ~12 %                   | ~3 %                        | ~2 - 3 %                    | ASTM G 173 • • |
|                   | Total light reflectance %:  | ≥ 86                    | ≥ 95                        | ≥ 98                        | DIN 5036-3     |
|                   | Specular reflectance %:   | 80 / 76                 | 91 / 90                     | 93 / 92                     | ISO 7668 60°   |
|                   | Front side:   | along/across anodised   | along/across PVD - improved | along/across PVD - improved |                |
|                   | Reverse side:   | anodised                | anodised                    | anodised                    |                |
| <b>Physical</b>   | Density, g/cm <sup>3</sup> :  | 2.7                     | 2.7                         | 2.7                         |                |
|                   | Coefficient of heat expansion (10 <sup>-6</sup> /K <sup>-1</sup> ): | 23.5                    | 23.5                        | 23.5                        |                |
|                   | Heat resistance (1000h):  | 250 °C                  | 250 °C                      | 180 °C                      |                |
|                   | Heat conductivity, W/(m·K):   | ≥ 220                   | ≥ 220                       | ≥ 220                       |                |
| <b>Dimensions</b> | Width in mm (inch):   | max. 1250 (49.21)       | max. 1250 (49.21)           | max. 1250 (49.21)           |                |
|                   | Thickness in mm (inch):   | 0.3 - 0.8 (.012 - .031) | 0.3 - 0.8 (.012 - .031)     | 0.2 - 0.5 (.008 - .020)     |                |

Fuente. <http://alanod-solar.com/opencms/opencms/Reflexion/Produkte.html>

## 2.2 CONCEPTOS PARA EL DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA SUPERFICIE

La selección de esta forma particular de concentración viene dada por la aplicación en la que se va a emplear, en este caso fotocatalisis heterogénea. Una forma de concentrador conformado por segmentos de parábolas garantiza una mayor recolección de radiación difusa, la cual a su vez presenta mayor cantidad de radiación en el espectro deseado (ultravioleta), el ultravioleta, necesario para el proceso fotocatalítico.

**Figura 38: Primer ejemplo desarrollado de un CPC**



Fuente: Active Solar Collectors and Their Applications. Oxford University. A. Rabl. 1985

Para el diseño de la superficie concentradora del CPC se deben tener en cuenta las características geométricas presentadas a continuación.

**2.2.1 Características geométricas de las superficies que forman un CPC:** La forma de la superficie reflectiva y la absorbedora de un CPC deben ser la adecuada para capturar la mayor cantidad de energía solar recibida por el área de apertura. La forma de la superficie absorbedora está determinada por la aplicación, diferentes tipos de absorbedores se muestran en la figura 40.

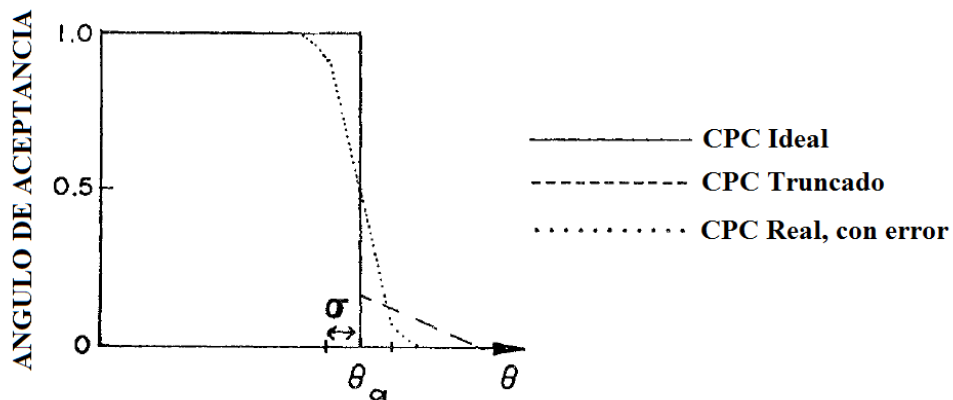
Para la aplicación deseada en este proyecto la superficie absorbedora debe ser la adecuada para la circulación del fluido de trabajo a estudiar. La forma del absorbedor que más se ajusta a las necesidades es la de absorbedor tubular, esta configuración permite teóricamente aprovechar todos los rayos provenientes de la área de apertura del concentrador distribuyéndola en el tubo captador.

A continuación se realizará una breve explicación sobre el funcionamiento de ambas superficies.

**2.2.1.1 Superficie parabólica:** En un concentrador CPC los segmentos de las parábolas se encargan de recolectar la radiación en un mayor ángulo de aceptación y redirigirlas hacia el receptor, ubicado entre estas. En estos las mitades derecha e izquierda pertenecen a diferentes parábolas donde el eje de estas forma el ángulo  $\theta_a$  (o  $-\theta_a$ ) con el plano medio del colector, y en el que el foco de la parábola es el punto A (o B) (según figura 38).

Esta característica se observa esquemáticamente en la figura 39 donde se aprecia la fracción de radiación incidente para cada ángulo en un CPC ideal, un CPC real y un CPC truncado, este último posee una de sus parábolas más corta que la otra lo que ocasiona un aumento en el ángulo de aceptación en ese extremo de la superficie.

**Figura 39: Fracción de la radiación incidente con un ángulo de aceptación  $\theta_a/2$ .**

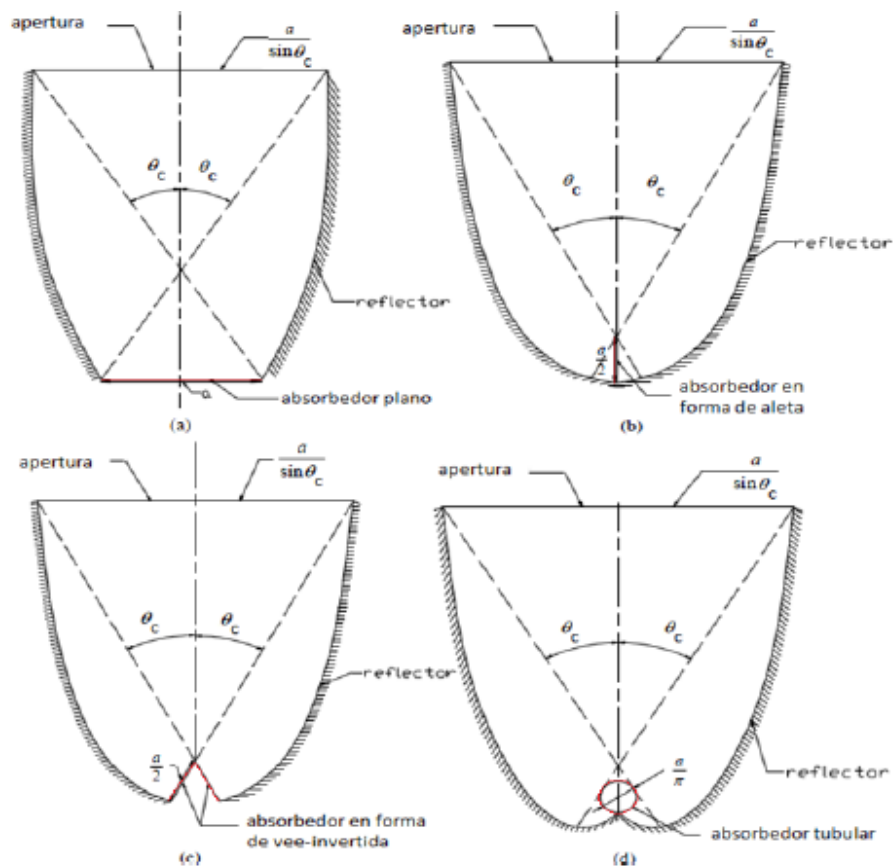


Fuente: Comparison of Solar Concentrators. Rabl, A. 1976.

Por esto, se dice que el CPC es el concentrador más eficiente, ya que toda la radiación que entra al CPC en un cono de luz con apertura  $\theta_{\max}$ , será concentrada.

**2.2.1.2 Superficie Absorbedora:** Un colector CPC puede ser diseñado para diferentes formas de absorbedor, dando lugar a diferentes diseños para diferentes aplicaciones; 4 diferentes formas de absorbedores con sus respectivos reflectores parabólicos son mostradas a continuación en la figura 40; cada una está posee el mismo perímetro de absorbedor “a” y mismo ángulo de aceptación “ $\theta_c$ ”:

**Figura 40: Diseño geométrico de la parábola del CPC para diferentes tipos de absorbedores**



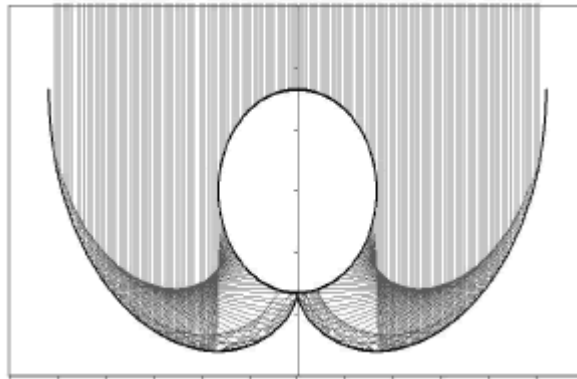
Fuente: Active Solar Collectors and Their Applications. A. Rabl. 1985.

Como se observa en la figura 40 la forma en la que se diseña y dimensiona las superficies reflectoras cambia dependiendo de la forma y el tamaño que posee el

absorbedor (absorbedor plano, absorbedor en forma de aleta, absorbedor en forma de v-invertida, absorbedor tubular).

El trabajar con un absorbedor requiere de una forma de involuta la cual debido a sus características geométricas permite redirigir todos los rayos entrantes hacia la zona tubular central. Esta forma logra el máximo de concentración de la radiación incidente sobre el tubo interno sin ninguna pérdida óptica.

**Figura 41: Redirección de los rayos hacia el tubo absorbedor en una involuta**



Fuente: <http://www.scielo.org.co/img/revistas/dyna/v77n163/a14fig05.gif>

En la literatura se encuentra que para el diseño de la superficie concentradora se han desarrollado diferentes métodos que permiten generar una superficie de alta eficiencia para la concentración de energía solar, los métodos principales para este proceso son:

- Diseño por medio de ecuaciones paramétricas.
- Diseño de forma geométrica

A continuación se describirá el análisis más reciente de cada método para el diseño de la superficie concentradora del CPC.

**2.2.2 Descripción del Diseño por Medio de Ecuaciones Paramétricas:** El desarrollo de la superficie reflectora inicia con las ecuaciones paramétricas de las coordenadas X y Y, para cada punto de está.

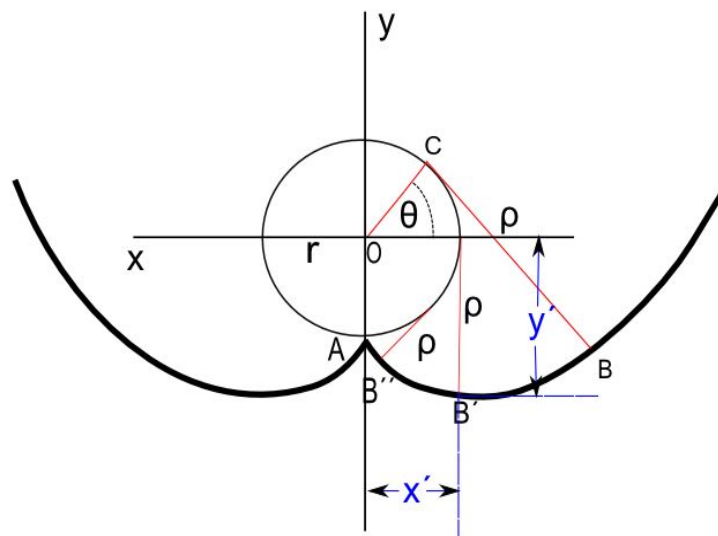
[9]

[10]

Donde  $r$  es el radio del absorbedor  $\rho$  es la variación de la longitud CB Y  $\theta$  es la variación del ángulo (figura 42).

La descripción del absorbedor con coordenadas polares posee condiciones que separan la geometría de la parábola y la involuta. El punto B el cual se observa en la figura 42 pertenece al punto de cambio de forma entre la involuta y la parábola para este tipo de desarrollo.

**Figura 42: Forma de la involuta reflectiva para un absorbedor tubular**



Fuente: Autores.

En este diseño para el desarrollo de la involuta cualquier punto B en el reflector está a una distancia  $\rho=BC$  al punto C en donde BC es tangente al absorbedor. Y BC es igual a la longitud de arco AC a lo largo de la circunferencia del absorbedor. La explicación de la forma del reflector (parábola e involuta) se fijan por las siguientes condiciones, teniendo en cuenta el semiángulo de aceptación  $\theta_A$

Para  $\theta < \theta_A$ , cualquier rayo emitido tangencialmente por un punto C del absorbedor hacia el reflector deberá ser reflejado de vuelta sobre sí mismo.

Para  $\theta > \theta_A$ , cualquier rayo emitido tangencialmente por un punto C del absorbedor hacia el reflector debe ser reflejada a fin de hacer un ángulo  $\theta_A$  con el eje Y. las ecuaciones que definen el valor de  $\rho$  para cada parte de la superficie son:

$$[11]$$

Y

$$[12]$$

Donde r es el radio del absorbedor,  $\theta$  es la variación del ángulo hasta un límite de  $3\pi/2 - \theta_A$  y  $\theta_A$  es el ángulo de aceptación del CPC.  $\rho$  es la distancia desde el absorbedor hasta la superficie reflectora e irá variando dependiendo del ángulo.

Sin embargo este método de diseño no es eficiente ya que se elabora suponiendo que la superficie del absorbedor (la cual se profundizara en el siguiente capítulo) se encuentra en el diámetro establecido, pero esto no se cumple ya que normalmente el absorbedor se encuentra dentro de un tubo por el cual se



Con el punto O como centro de coordenadas, las secciones DC y CF corresponden a las curvas de la involuta y la parábola del reflector respectivamente. Las ecuaciones paramétricas del reflector están representadas por las ecuaciones [9] y [10] pero a diferencia del método anterior el valor de  $\rho$  está representado de la siguiente manera

Donde para un rango de  $\theta$  de C a D

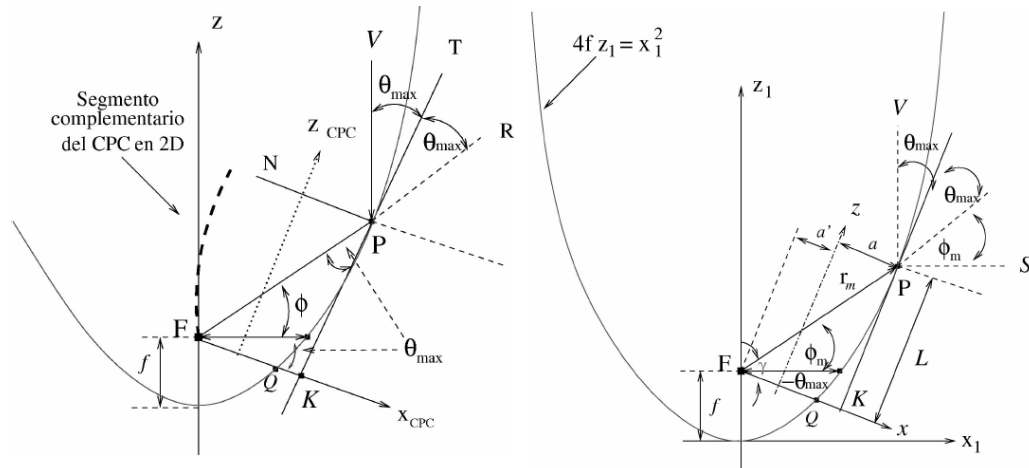
[13]

Y Para un rango de C a F.

[14]

**2.2.3 Descripción del Diseño de Forma Geométrica:** El estudio realizado en el año 2008 describe el diseño de la superficie reflectora del CPC por medio de una descripción geométrica usando tanto coordenadas polares como cartesianas. El concentrador CPC (independientemente del sistema de coordenadas que se utilice) se construye como se vio anteriormente a partir de un segmento de parábola, el cual posee un punto de foco F (figura 44).

**Figura 44: Esquema del CPC con coordenadas polares.**



Fuente: Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica. S. Tapia S. y J.A. del Río P. 2008-2009

Como ya se ha observado anteriormente, el segmento de parábola PQ es el encargado de concentrar los rayos, entre un intervalo en el a ángulo de y su respectiva proyección por el eje  $Z_{CPC}$ . Para desarrollar el CPC, desde el punto de vista geométrico se requiere:

- Generar un eje  $Z_{CPC}$  perpendicular a  $X_{CPC}$ , que tenga el origen en el punto medio del segmento FQ.
- Realizar la curva simétrica del segmento de parábola PQ con respecto al eje  $Z_{CPC}$ , que generara el CPC como se muestra en la figura 44.
- La tangente T es paralela al eje  $Z_{CPC}$ , y la recta normal N es paralela al eje  $X_{CPC}$ , con lo cual  $\theta_{max}$  es lo mismo entre:
  - El eje  $X_{CPC}$  con respecto al lado recto de la parábola.
  - La recta vertical V con respecto a la recta tangencial T.
  - La recta tangente T con respecto a la recta R.

Con esto se puede observar las longitudes correspondientes a la entrada y salida de los rayos incidentes y la altura del CPC, la cual corresponde la distancia entre el origen de los ejes del CPC hasta la proyección de P en el eje  $Z_{CPC}$ .

La descripción de la parábola en coordenadas polares se realiza teniendo en cuenta el punto focal F y la convención del ángulo  $\Phi$ , con una distancia focal f, la parábola en coordenadas polares se puede describir por la relación.

$$\text{---} \quad [15]$$

Teniendo en cuenta que el valor  $a'$  se obtiene mediante por el análisis de un CPC con absorbedor tubular de Winston y Hinterberger en 1975, se llega a la conclusión de que cuando . Por lo cual.

$$)) \quad [16]$$

El valor L se evalúa observando el triángulo PFK donde se ve que mantiene la relación.

$$\text{---} \quad - \quad \text{---} \quad [17]$$

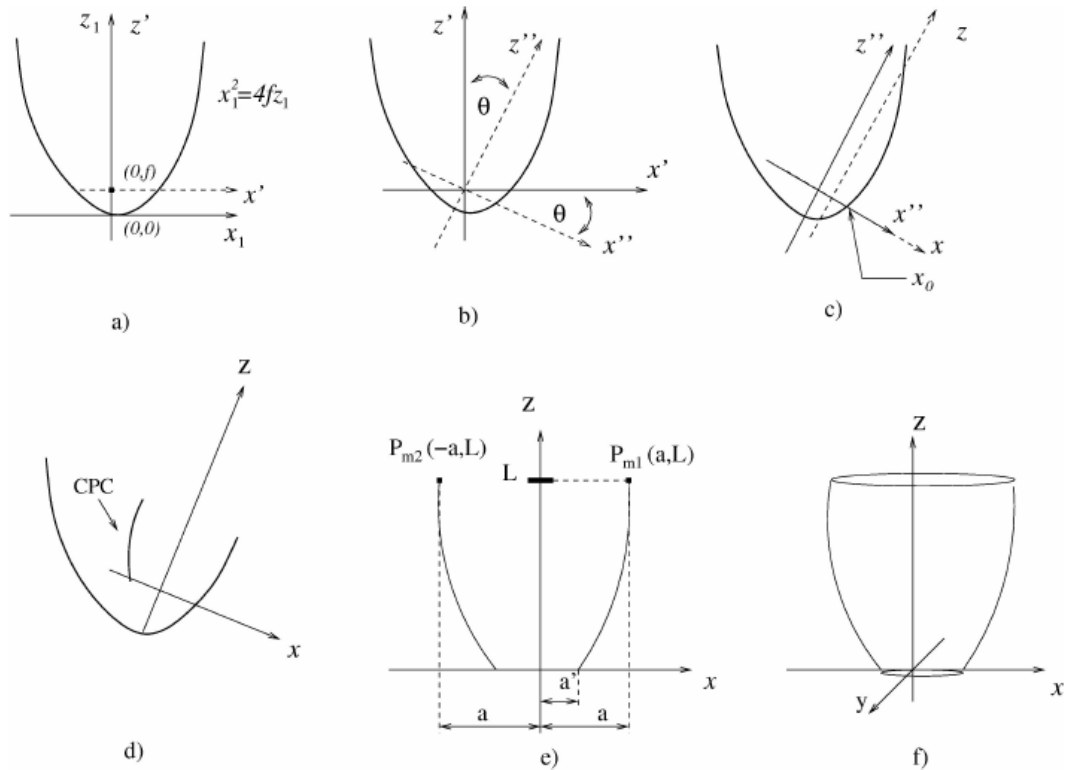
$$) \quad [18]$$

De esta forma se encuentran los valores para el diseño de la superficie concentradora el CPC.

Para el desarrollo del CPC por medio de coordenadas cartesianas se parte de una parábola vertical con origen ubicado en su vértice, sobre los ejes  $x_1$  y  $z_1$ , luego, por medio de transformaciones de coordenadas se obtendrá la expresión de la parábola

en los ejes finales  $x$  y  $z$  los cuales trazaran los segmentos de parábolas. Las etapas para el desarrollo se presentan a continuación.

**Figura 45: Etapas de diseño de un CPC**



Fuente: Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica. S. Tapia S. y J.A. del Río P. 2008-2009.

- Se considera una parábola vertical formada por la ecuación:  $x_1^2 = 4fz_1$  la cual tiene origen en el foco.
- Se describe la parábola en el sistema coordenado con ejes  $x''$  y  $z''$  por medio de transformaciones de los ejes  $x'$  y  $z'$  con respecto a los ejes  $x''$  y  $z''$  que tienen una rotación de un ángulo  $\theta$ .
- Se encuentra el valor del punto  $x_0''$ , de curva por cero de la ecuación de la parábola en los ejes  $x''$  y  $z''$ , una vez obtenido el valor de  $x_0''$  se procede a fijar el origen de los ejes  $x$  y  $z$  en el punto  $(x_0''/2, 0)$ .

- Se obtiene la descripción de la parábola dentro del sistema de coordenadas  $x$  y  $z$ , usando para esto, la relación de transformación de la traslación de los ejes bprimados  $x$  y  $z$  con respecto a  $x''$  y  $z''$ . luego se sustituye los valores de  $x''$  y  $z''$  en la relación de la parábola para obtener la expresión de la parábola en el sistema de coordenadas de los ejes  $x$  y  $z$ . con esto se encuentra la función que describe el CPC en 2D.

### **2.3 PROCESO DE DIMENSIONAMIENTO DE LA SUPERFICIE CONCENTRADORA POR EL MÉTODO DE ECUACIONES PARAMÉTRICAS**

Para el proceso de dimensionar la superficie concentradora del CPC se seleccionó el método de diseño del CPC por medio de coordenadas paramétricas, en este caso solo se implementara el método simple, ya que el método de sobredimensionamiento presenta varios problema en la etapa de diseño y construcción. Además, pese a no ser tan efectivo como el segundo método, el método básico es suficiente para el proyecto, teniendo en cuenta también que en la industria local no se logra reproducir la superficie de involuta y parábola que tenga la exactitud como la descrita por el segundo método.

Basándose en el método de diseño mencionado anteriormente, se tiene que las ecuaciones paramétricas que satisfacen la curvatura de la superficie de concentración de un CPC son las ecuaciones [9], [10], [11] y [12]

En este los factores influyentes en el diseño son el radio del tubo ( $r$ ) por el cual será trasportado el fluido y el ángulo de aceptación  $\theta_A$ , y donde  $\theta$  es la variable independiente. Estos factores para el diseño de la superficie reflectora serán detallados a continuación.

**2.3.1 Factores para el Dimensionamiento:** Para el dimensionamiento del concentrador se parte de la selección de un ángulo de aceptación de los rayos, en

este caso se escogió un ángulo de  $\theta_A$ , para cumplir el con el seguimiento del sol por medio de su declinación sin tener que realizar movimientos de la superficie constantemente (como ya se explicó en el capítulo anterior). Utilizando la ecuación  $\theta_A = \delta$ , y por medio de un semiángulo de aceptación  $\theta_A$  de  $23,57^\circ$  se logra un factor de concentración de los rayos de luz de 2.5.

El diámetro del tubo por el que se transportara el fluido debe ser lo suficientemente grande para contener todo el sistema absorbedor el cual está compuesto por el fotoánodo, cátodo y la membrana de separación, pero a su vez estas deben estar separadas a una distancia mínima para que el intercambio químico se lleve a cabo. Por estas razones se seleccionó un diámetro de tubo de 75 mm. Es análisis completo sobre la selección del tubo se desarrollara en el siguiente capítulo.

Con estos datos básicos ( $r$  y  $\theta_A$ ) y utilizando las ecuaciones [9], [10] descritas anteriormente se logra una proyección de la curvatura de la superficie concentradora del CPC. El proceso para la tabulación de las variables dependiente X y Y, inicia con variación de  $\theta$  y la separación de las dos curvaturas (involuta y parábola) dependiendo de las restricciones impuestas por la ecuaciones [11] y [12] para el cálculo del valor de  $p$ . Con estos valores se procede a la realización de la tabla donde se muestran las X y Y de la trayectoria de la superficie reflectora.

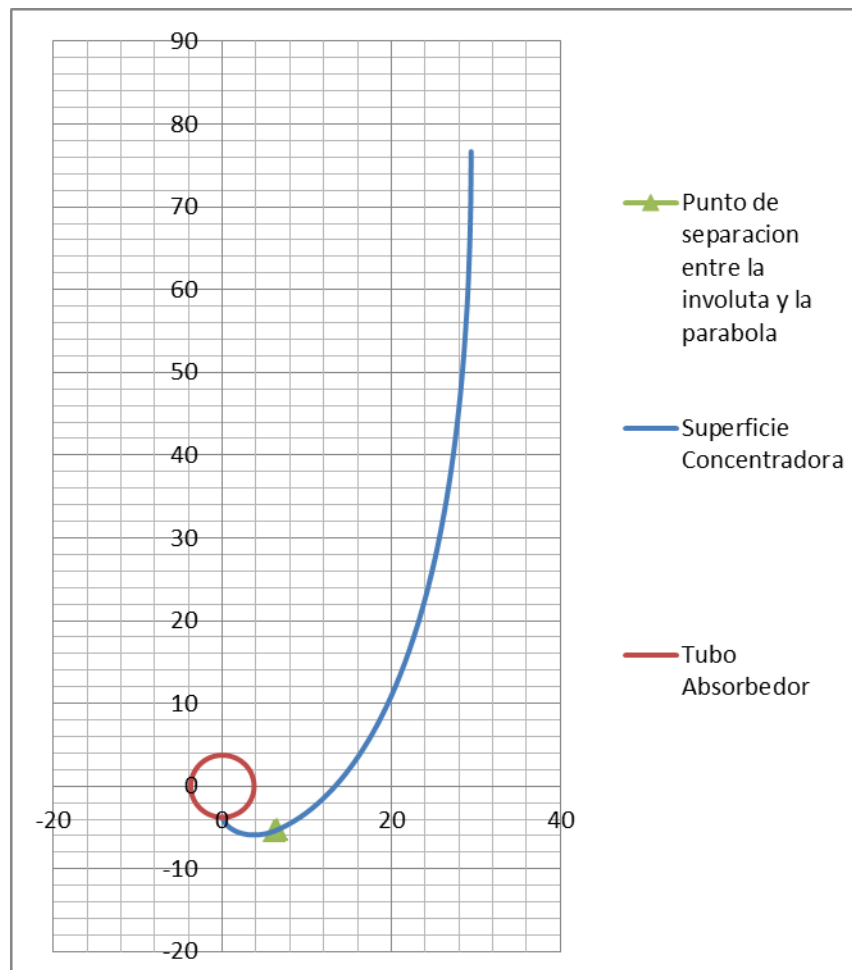
**Tabla 5: Desarrollo de las ecuaciones paramétricas para el dimensionamiento de la superficie concentradora.**

| Generacion de la Involuta |             |              |                               | Generacion de la parábola |             |              |                                     |
|---------------------------|-------------|--------------|-------------------------------|---------------------------|-------------|--------------|-------------------------------------|
| Ángulo $\theta$           | Valor X     | Valor Y      | $\rho$ para $\theta < 1.9823$ | Ángulo $\theta$           | Valor X     | Valor Y      | $\rho$ para $1.9823 < \theta < 4.3$ |
| 0                         | 0           | -3,5         | 0                             | 1,998                     | 6,083012817 | -4,914759769 | 6,993418943                         |
| 0,04343                   | 9,55508E-05 | -3,503299232 | 0,152005                      | 2,041                     | 6,359414556 | -4,787948571 | 7,149587752                         |
| 0,08687                   | 0,000764238 | -3,51318129  | 0,304045                      | 2,085                     | 6,645931076 | -4,648874789 | 7,316449732                         |
| 0,1303                    | 0,002576573 | -3,529585665 | 0,45605                       | 2,128                     | 6,929686557 | -4,503432932 | 7,486752564                         |
| 0,1737                    | 0,006095865 | -3,552402855 | 0,60795                       | 2,172                     | 7,22403352  | -4,344384427 | 7,668789758                         |
| 0,2172                    | 0,011898057 | -3,581586586 | 0,7602                        | 2,215                     | 7,515745038 | -4,178464128 | 7,854679239                         |
| 0,2606                    | 0,020507738 | -3,616836441 | 0,9121                        | 2,259                     | 7,81854924  | -3,997405624 | 8,053506313                         |
| 0,304                     | 0,032474962 | -3,658010576 | 1,064                         | 2,302                     | 8,118840711 | -3,808865054 | 8,256695918                         |
| 0,3475                    | 0,048367959 | -3,704986451 | 1,21625                       | 2,345                     | 8,423611026 | -3,60824957  | 8,469160978                         |
| 0,3909                    | 0,068626699 | -3,757276247 | 1,36815                       | 2,389                     | 8,740274474 | -3,389786694 | 8,696726494                         |
| 0,4343                    | 0,093778347 | -3,814676608 | 1,52005                       | 2,432                     | 9,054606336 | -3,16268671  | 8,929640705                         |
| 0,4778                    | 0,124376416 | -3,876998555 | 1,6723                        | 2,476                     | 9,381405125 | -2,915584688 | 9,179400645                         |
| 0,5212                    | 0,160737152 | -3,943585831 | 1,8242                        | 2,519                     | 9,705993511 | -2,658871015 | 9,435354                            |
| 0,5646                    | 0,203358168 | -4,01417696  | 1,9761                        | 2,563                     | 10,04365567 | -2,379665833 | 9,710192005                         |
| 0,6081                    | 0,252770528 | -4,088518165 | 2,12835                       | 2,606                     | 10,37922905 | -2,089672256 | 9,992253292                         |
| 0,6515                    | 0,3091314   | -4,165810586 | 2,28025                       | 2,649                     | 10,72051144 | -1,781681955 | 10,28852546                         |
| 0,6949                    | 0,372902656 | -4,245738715 | 2,43215                       | 2,693                     | 11,07583918 | -1,446707387 | 10,60741136                         |
| 0,7384                    | 0,444585341 | -4,32798651  | 2,5844                        | 2,736                     | 11,42925953 | -1,098707012 | 10,93549864                         |
| 0,7818                    | 0,524147058 | -4,41164454  | 2,7363                        | 2,78                      | 11,79741942 | -0,72006998  | 11,28926949                         |
| 0,8253                    | 0,612220506 | -4,496543912 | 2,88855                       | 2,823                     | 12,16379044 | -0,326498623 | 11,6539435                          |
| 0,8687                    | 0,708632766 | -4,581721926 | 3,04045                       | 2,867                     | 12,54562892 | 0,102013429  | 12,04795467                         |
| 0,9121                    | 0,813773879 | -4,666783753 | 3,19235                       | 2,91                      | 12,92579042 | 0,547794848  | 12,45496436                         |
| 0,9556                    | 0,928078797 | -4,751317597 | 3,3446                        | 2,954                     | 13,32217703 | 1,033623428  | 12,89568836                         |
| 0,999                     | 1,051147646 | -4,834314934 | 3,4965                        | 2,997                     | 13,71698524 | 1,539594727  | 13,35200494                         |
| 1,042                     | 1,182061084 | -4,914604826 | 3,647                         | 3,04                      | 14,11934913 | 2,078762343  | 13,83572451                         |
| 1,086                     | 1,325321541 | -4,994108911 | 3,801                         | 3,084                     | 14,53910694 | 2,667539852  | 14,36145534                         |
| 1,129                     | 1,474428599 | -5,068571057 | 3,9515                        | 3,127                     | 14,95738412 | 3,282089268  | 14,90789891                         |
| 1,173                     | 1,636289053 | -5,140786748 | 4,1055                        | 3,171                     | 15,39383892 | 3,954336425  | 15,50345295                         |
| 1,216                     | 1,803478644 | -5,206822522 | 4,256                         | 3,214                     | 15,82881811 | 4,657324926  | 16,1247233                          |
| 1,26                      | 1,98366363  | -5,269077586 | 4,41                          | 3,258                     | 16,28272781 | 5,427885549  | 16,80295113                         |
| 1,303                     | 2,16850719  | -5,324071451 | 4,5605                        | 3,301                     | 16,73508292 | 6,235467693  | 17,51268277                         |
| 1,346                     | 2,361819616 | -5,372646378 | 4,711                         | 3,344                     | 17,1962155  | 7,101904777  | 18,2728454                          |
| 1,39                      | 2,568162715 | -5,415049886 | 4,865                         | 3,388                     | 17,67723967 | 8,055163287  | 19,10812544                         |
| 1,433                     | 2,777891431 | -5,4487209   | 5,0155                        | 3,431                     | 18,15632113 | 9,058231483  | 19,9863342                          |
| 1,477                     | 3,000445772 | -5,474582671 | 5,1695                        | 3,475                     | 18,65570861 | 10,16511906  | 20,95507359                         |
| 1,52                      | 3,225365244 | -5,490848663 | 5,32                          | 3,518                     | 19,15258845 | 11,33359213  | 21,97776046                         |
| 1,564                     | 3,462716361 | -5,497660539 | 5,474                         | 3,562                     | 19,66984707 | 12,62746598  | 23,1107287                          |
| 1,607                     | 3,701289595 | -5,494129192 | 5,6245                        | 3,605                     | 20,1836242  | 13,99840016  | 24,31221694                         |
| 1,651                     | 3,951709143 | -5,479512487 | 5,7785                        | 3,648                     | 20,70507291 | 15,4864185   | 25,61794688                         |
| 1,694                     | 4,202098064 | -5,453935539 | 5,929                         | 3,692                     | 21,24584879 | 17,1443309   | 27,07515786                         |
| 1,737                     | 4,457559437 | -5,416685713 | 6,0795                        | 3,735                     | 21,78038192 | 18,91265708  | 28,63256249                         |
| 1,781                     | 4,723635992 | -5,365984091 | 6,2335                        | 3,779                     | 22,33216497 | 20,89262915  | 30,3805455                          |
| 1,824                     | 4,987637149 | -5,303671528 | 6,384                         | 3,822                     | 22,8743577  | 23,01569593  | 32,26001394                         |
| 1,868                     | 5,261194685 | -5,226401677 | 6,538                         | 3,866                     | 23,42979621 | 25,4064998   | 34,38307116                         |
| 1,911                     | 5,531216187 | -5,137283304 | 6,6885                        | 3,909                     | 23,97021706 | 27,98593126  | 36,68151653                         |
| 1,955                     | 5,809552801 | -5,031789194 | 6,8425                        | 3,953                     | 24,51670823 | 30,9100605   | 39,29695692                         |
|                           |             |              |                               | 3,996                     | 25,03932741 | 34,08768035  | 42,15077543                         |
|                           |             |              |                               | 4,039                     | 25,54408009 | 37,63096816  | 45,34688294                         |
|                           |             |              |                               | 4,083                     | 26,03325117 | 41,69695388  | 49,03178693                         |
|                           |             |              |                               | 4,126                     | 26,47335555 | 46,17423615  | 53,10977912                         |
|                           |             |              |                               | 4,17                      | 26,8696429  | 51,3640084   | 57,86181011                         |
|                           |             |              |                               | 4,213                     | 27,1846289  | 57,14205621  | 63,18202779                         |
|                           |             |              |                               | 4,257                     | 27,40629389 | 63,92126412  | 69,46065758                         |
|                           |             |              |                               | 4,3                       | 27,4899313  | 71,57035409  | 76,5882622                          |

Fuente. Autores

Con estos valores se obtiene el diseño de lo que sería la superficie concentradora del CPC. En la figura 46 se puede apreciar la forma que tendrá la superficie de concentración y el punto de separación el cual diferencia la involuta de la parábola.

**Figura 46: Desarrollo de la superficie concentradora del CPC**

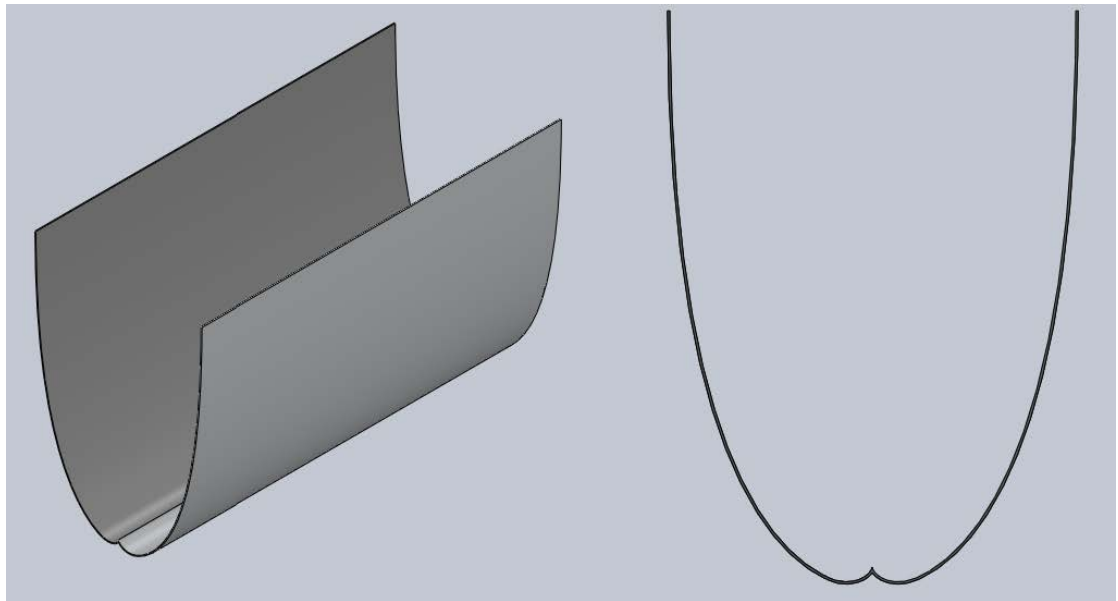


Fuente: Autores

Con los datos calculados de por las ecuaciones paramétricas se procede a continuación a realizar un diseño previo en CAD donde se puede apreciar las dimensiones completas de toda la superficie concentradora del CPC. Para la

longitud del concentrador se optó por una de 1.2 m ya que como el concentrador será usado para pruebas no se dispone de mucho espacio para su ubicación, cabe destacar de que a mayor tamaño, mayor eficiencia pero a su vez trae problemas con el montaje del sistema absorbedor interno, y mayor gasto en materiales para el proceso fotocatalítico.

**Figura 47: Diseño CAD de la superficie concentradora del CPC.**



Fuente: Autores.

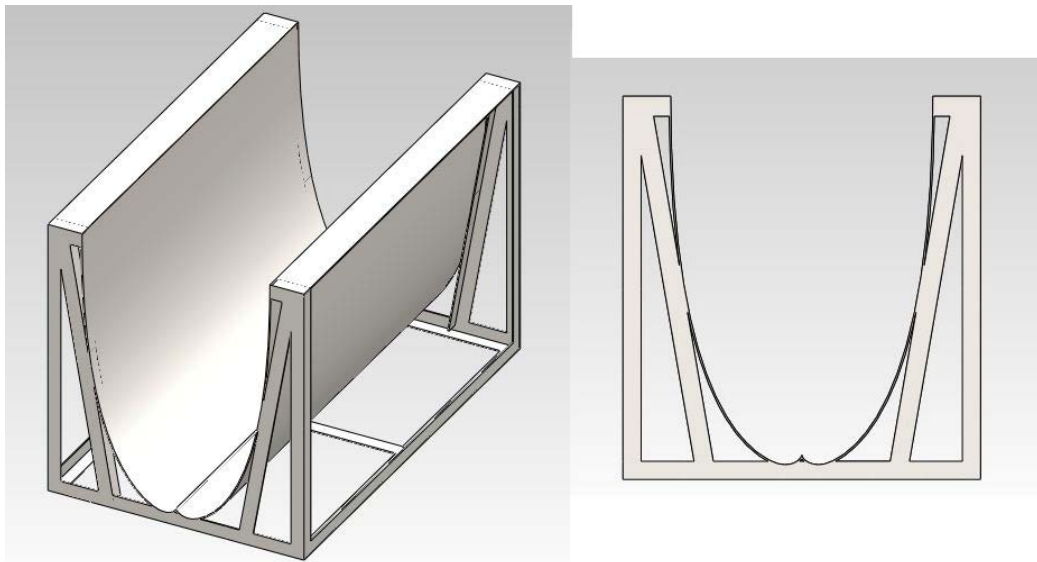
## **2.4 DISEÑO CAD Y CONSTRUCCIÓN**

Como la superficie reflectora es muy delicada, pueden presentarse abolladuras en el montaje ya que la disposición de esta en la estructura la dejaría muy vulnerable a cualquier ente externo. Otro problema que presenta la superficie es por su falta de rigidez ya que no logra mantener la forma necesaria para la concentración. Por estas razones se optó por la realización de una superficie de soporte la cual se encargara por medio de su rigidez de darle la forma a la lámina reflectora

Una vez definido las bases del diseño se procedió a la etapa de construcción la cual se centró en la forma de construir las parábolas y mantenerlas en su posición, para esto se dispuso la separación de cada una de las secciones que componen la superficie y luego una posterior unión.

**2.4.1 Diseño CAD:** Una vez obtenida la forma de la superficie concentradora de CPC se procede a realizar en una simulación CAD de la estructura de soporte la cual se encarga de mantener la forma parabólica y sirve como base para el movimiento. Las dimensiones de la estructura serán descritas en el anexo A.

**Figura 48:** Estructura de la superficie reflectora del CPC.



Fuente: Autores

**2.4.2 Selección de Materiales:** Para la construcción de la superficie de soporte se seleccionó una lámina de acero laminada en caliente de 2.5 mm el espesor se decidió para evitar que las láminas después de dobladas perdieran su forma. Para los perfiles se utilizó ángulo en L, debido a su bajo costo, peso y su buena resistencia, con un espesor de 1/4 de pulgada los cuales se encargaran de soportar la superficie de soporte de la lámina reflectora.

**2.4.3 Construcción:** Como primera medida se realizó en una platina la superficie parabólica para así tener un guía en la cual se realizara los dobleces de las láminas.

**Figura 49: Soporte inicial de la curvatura.**



Fuente: Autores

Las superficies parabólicas de soporte se realizaron en una dobladora computarizada en una empresa de la región de Bucaramanga, ajustando al perfil ya presentado.

A continuación se procedió a unir ambas superficies y reforzarlas por medio de perfiles en L para asegurar la posición de las láminas. Todo esto por medio de soldadura por arco.

**Figura 50: Superficie de soporte con estructura**



Fuente: Autores

Ya con la estructura realizada, se procedió a diseñar la unión entre este sistema y el eje, el eje facilitara la tarea de inclinación de la superficie reflectora, se diseñaron unos elementos de sujeción en acero de un espesor de  $\frac{1}{2}$  "pulgada que irán soldados al eje y al sistema de concentración.

**Figura 51: Montaje de los soportes de la estructura al eje**



Fuente: Autores

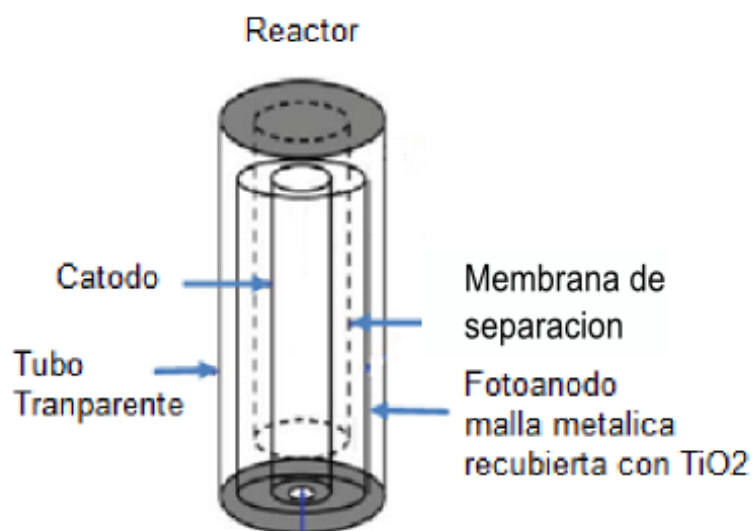
### 3. SISTEMA DE CAPTACIÓN DE RADIACIÓN

El sistema de captación se encuentra principalmente conformado por un tubo el cual tendrá como función transportar el fluido tratado; dentro de este tubo se encuentran los componentes necesarios para la reacción fotoelectrocatalítica, conformado por el fotoánodo, una membrana de separación y el cátodo.

Este debe poseer entre sus características una alta transmisividad óptica en la longitud de onda correspondiente a la ultravioleta, ya que esto permite un mayor flujo de radiación hacia el interior, mejorando la eficiencia del sistema.

El otro componente del sistema de captación de radiación es el elemento encargado del soporte de tubo y sus elementos internos así como la distribución del flujo.

**Figura 52: Esquema básico del tubo absorbedor.**



Fuente: Autores

Como se mencionó en la sección del capítulo 1 correspondiente a la catálisis heterogénea, los elementos necesarios para la reacción son el fotoánodo, el cátodo y la membrana de separación. Estos componentes serán instalados posteriormente por investigadores de la escuela de ingeniería química, por esta razón no se tuvieron en cuenta en el desarrollo de este capítulo

### **3.1 MATERIALES UTILIZADOS PARA AL TUBO EXTERIOR**

Como se mencionó en el capítulo correspondiente al dimensionamiento de la superficie reflectora el factor principal de diseño es el diámetro exterior del tubo, se decidió que un diámetro de 75mm sería óptimo para dar el espaciamiento necesarios para que ocurra la reacción fotoelectrocatalítica.

Otros criterios para la selección del material del tubo fueron que soporte ambientes agresivos, que posea cierta resistencia mecánica para su manipulación manual y que posea disponibilidad en el mercado local.

Con todas estas condiciones y teniendo como principal objeto de estudio la transmisibilidad del material, se realizaron pruebas de transmisibilidad de algunos materiales encontrados en la industria.

Estas pruebas fueron realizadas en el laboratorio de instrumentación de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander. Las pruebas se realizaron con el analizador de espectroscopia uv-2041pc, entre las características de esta máquina se encuentran:

- Rango de longitud de onda: 190 - 900 nm
- Amplitud de banda: 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 y 6 nm
- Fuentes de radiación: Lámpara halógena (290 - 900 nm) Lámpara de deuterio (190 - 370 nm) Selección cambio de lámpara entre 282 - 393 nm

- Detector: Fotomultiplicador R 928 (doble haz)
- Exactitud (longitud de onda):  $\pm 0.3$  nm
- Precisión (longitud de onda):  $\pm 0.1$  nm
- Repetitividad:  $\pm 0.1$  nm (I)  $\pm 0.001$  Abs (entre 0 y 0.5)  $\pm 1\%$  T.
- Velocidad de barrido: 4 velocidades seleccionables
- Lectura: Absorbancia, transmitancia (%), reflectancia (%) y energía

**Figura 53: Máquina para pruebas Shimadzu**



Fuente: Autores

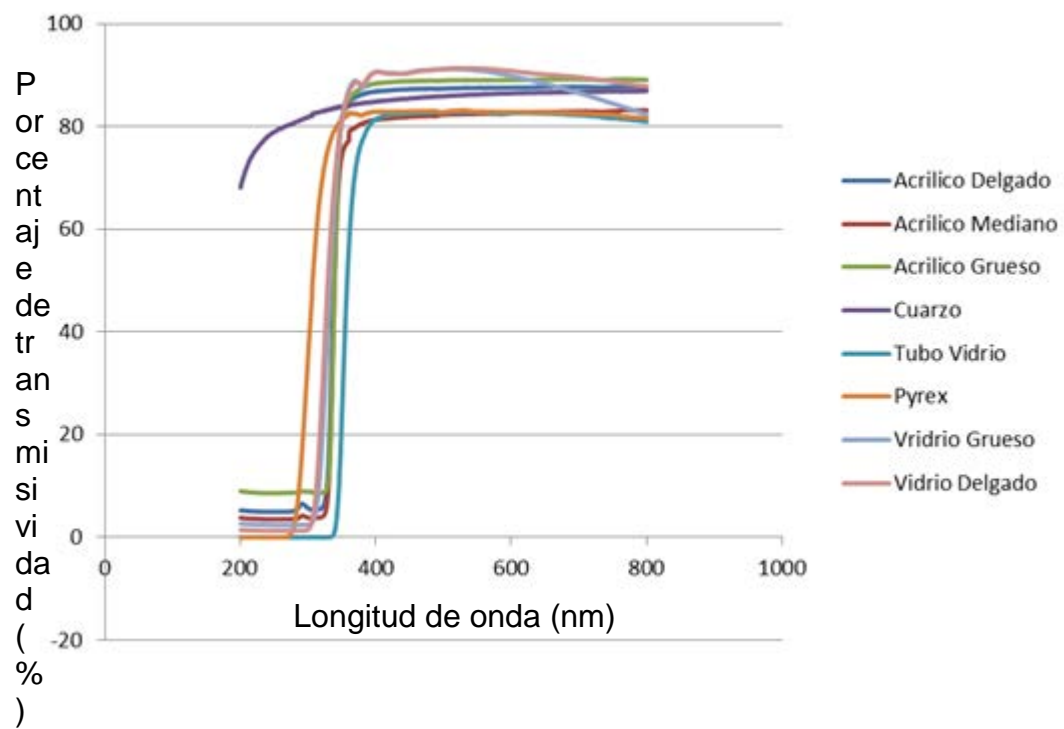
Los materiales de las pruebas fueron:

- acrílico delgado (1.5 mm)
- acrílico mediano (2.2 mm)
- acrílico grueso (3 mm)
- cuarzo
- tubo de vidrio
- vidrio pyrex(borosilicato)

- vidrio grueso (2.2 mm)
- vidrio delgado (1.5 mm).

Las pruebas realizadas a los materiales dieron los siguientes resultados en cuanto a porcentaje de transmisividad para el espectro de longitud de onda entre 200 y 800 nm.

**Figura 54: Grafica de transmisividad de los diferentes materiales usados.**



Fuente: Autores

**3.1.1 Selección del Mejor Material:** Como se puede observar en la gráfica, el cuarzo presenta la mejor transmisividad en la longitud de onda ultravioleta (200 a 400 nm), pero debido a su alto costo y dificultad para encontrarlo en la dimensión necesaria en el mercado nacional se descarta inmediatamente como material para el tubo. La primera opción viable es el uso de vidrio de borosilicato (pyrex) ya que posee las características necesarias para el sistema lo que lo hace una alternativa

viable, además del hecho de ser asequible, pero debido a su fragilidad a la hora de trabajarlo y manipularlo lo hacen poco recomendable para el proyecto.

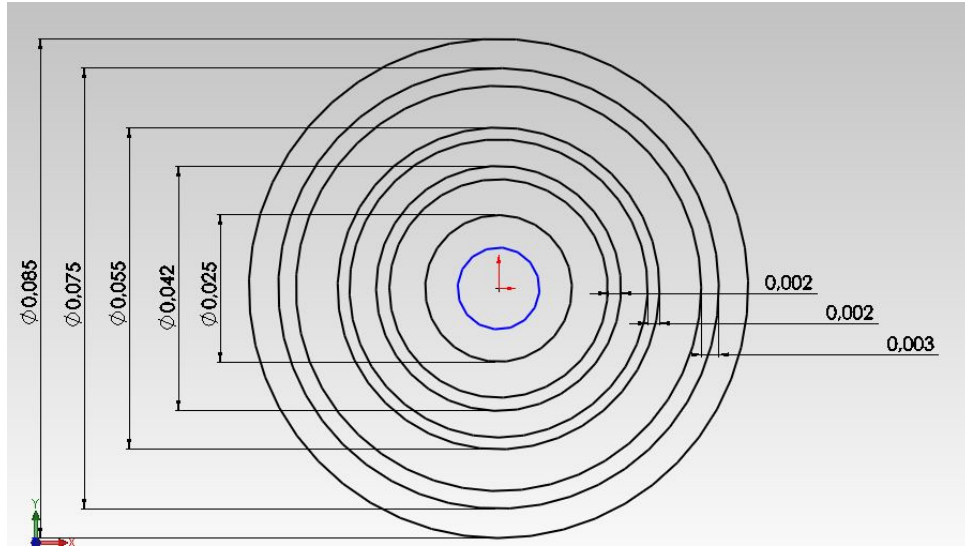
Por este problema con el vidrio de borosilicato se decidió la implementación de un tubo de acrílico, ya que ofrecía características de transmisividad y resistencia aceptables, además de poderse encontrar fácilmente y de forma rápida en el mercado local.

### **3.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS CABEZALES DE SOPORTE**

Los componentes ubicados dentro del tubo seleccionado para el proceso fotoelectrocatalítico serán suministrados por la escuela de ingeniería química de la Universidad Industrial de Santander. Estos serán ubicados de forma concéntrica según las especificaciones dadas por la escuela. Para lograr esto se diseñó un solo sistema de soporte del tubo y separación de los componentes que a su vez servirán como boquillas de entrada y salida del fluido.

**3.2.1 Diseño de los Cabezales:** El diseño de los cabezales giro en torno al posicionamiento de los elementos internos y el tubo, para esto se acordó el uso de surcos concéntricos de dimensiones necesarias para cada material, donde permanecerán fijos. El dimensionamiento de los surcos se hizo de la siguiente manera dependiendo del material, para el cátodo un diámetro de 25 mm para la membrana de separación una ranura de 42 mm de diámetro externo con 2 mm de espesor, el fotoánodo un diámetro externo de 55 mm con 2 mm de espesor, y para el tubo un diámetro externo de 74 mm con espesor de 3 mm.

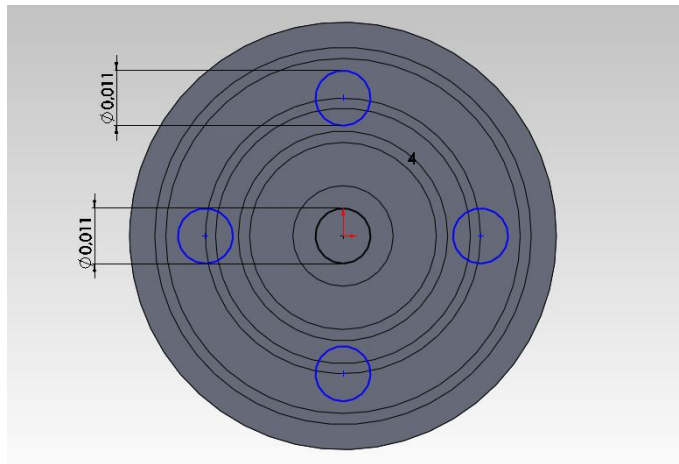
**Figura 55: Distribución de los surcos concéntricos**



Fuente: Autores

Para el suministro del fluido se diseñó el cabezal en dos partes, la primera parte se encarga de la entrada y salida del fluido en el tubo, esto se hace por medio de orificios ubicados en el surco donde se encuentra el fotoánodo. La segunda parte será la encargada de la conexión entre la manguera y los orificios ya mencionados anteriormente, esto se hace por medio de una sección cónica.

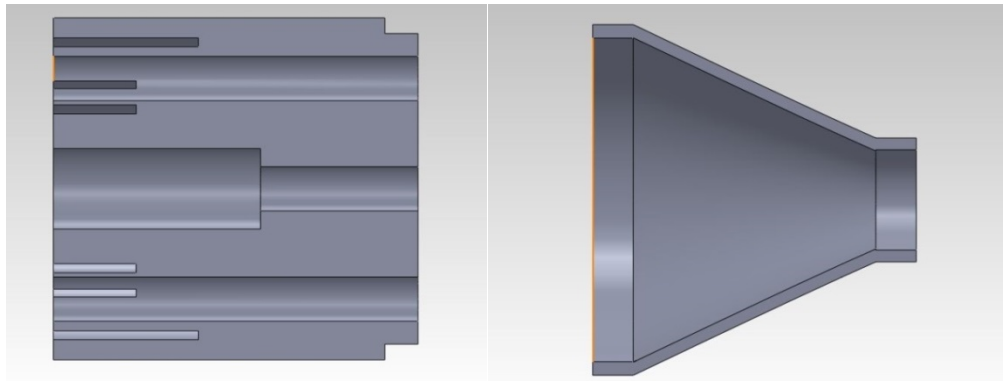
**Figura 56: Sistema de distribución del fluido**



Fuente: Autores

Para instalar las conexiones eléctricas que se encargaran del finalizar el proceso fotoelectrocatalitico se decidió realizar unas perforaciones en los puntos donde se ubicara el fotoánodo y el cátodo, de forma que se incluyan cables eléctricos para realizar la conexión hacia el exterior.

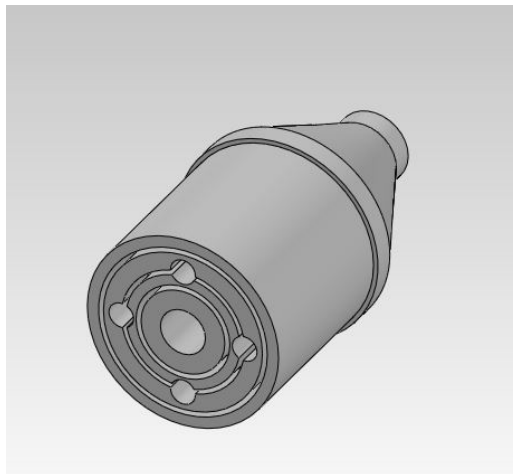
**Figura 57: Distribución de las secciones por donde se realizara la conexión.**



Fuente: Autores

Con base a esto se realizó un diseño CAD donde se incluye todo lo necesario para el cabezal.

**Figura 58: Diseño CAD del cabezal**



Fuente. Autores

**3.2.2 Construcción de los Cabezales:** Para la construcción del cabezal se decidió utilizar un material que fuera fácil de maquinar, que soporte altas temperaturas y que no presente corrosión química. El material escogido para este fin fue el HMW, el cual cumple con las características necesitadas.

**Figura 59: Presentación de los polímeros como el HMW**



Fuente: [http://giacavattu.com/uploads/products/5714/images%20\(23\).jpg](http://giacavattu.com/uploads/products/5714/images%20(23).jpg)

El proceso de fabricación del cabezal fue realizado por medio de torneado, siendo esta la forma más rápida y accesible localmente.

**Figura 60: Cabezal elaborado**



Fuente: Autores

Para el sellado del tubo de acrílico y el cabezal y asegurar su hermeticidad se utilizó silicona anti hongos de secado rápido, especial para superficies acrílicas. La unión entre el cabezal de distribución, las mangueras se hizo por medio de un racor de 1 pulgada rosca unificada

**Figura 61: Tubo absorbedor con sus elementos**



Fuente: Autores

## **4. ELEMENTO DE SOPORTE ESTRUCTURAL**

Es la estructura encargada de soportar el peso de la superficie reflectora y elementos del sistema de flujo tales como el tanque y la bomba, además del sistema de movimiento de la superficie reflectora. El diseño y construcción del elemento estructural se dividirá en:

- Diseño y construcción de la estructura
- Diseño y construcción del sistema de movimiento

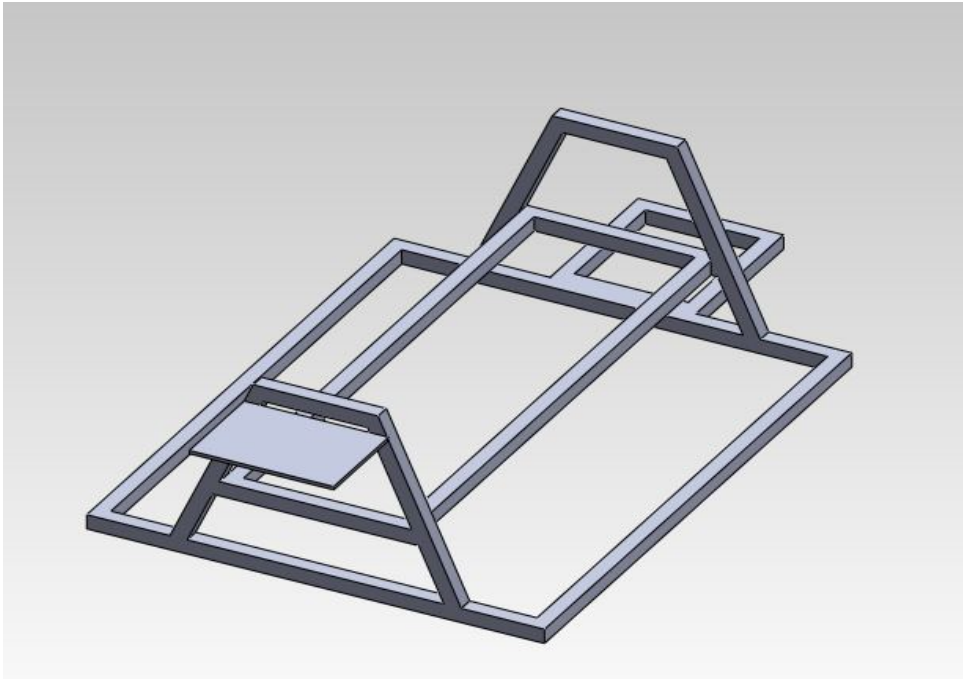
### **4.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA**

La superficie concentradora pesa aproximadamente 90 kg, si a esto se le suma el peso del sistema de captación, el peso total que tendrá que soportar la estructura será aproximadamente de 115 kg, esta condición junto con el área de la superficie donde se ubicará son los limitantes en el diseño de la estructura soporte

El diseño de la estructura soporte, consta de un rectángulo base de dimensiones 1.4 m de largo por 1.1 m de ancho, medidas que cumplen con los requisitos dados por la Escuela de Ingeniería Química, ya que las pruebas se realizarán en una azotea de un edificio en donde el área de piso es restringida, sobre este rectángulo base irán soportados dos soportes trapezoidales que serán los encargados de sostener la superficie reflectora y la superficie captadora, que irá unida a esta superficie por medio de dos chumaceras en cada soporte. La generación de esfuerzos (flexión) sobre estos parales hizo indispensable el uso de refuerzos para evitar daños posteriores en la estructura, se decidió reforzar cada trapecio con una viga en la mitad y la unión de los dos parales trapezoidales con unas vigas para evitar las deformaciones y poder resistir mejor el peso de la superficie reflectante y captadora.

La ubicación del tanque será lo más próxima a la salida de un cabezal para no ocupar tanto espacio de piso y la ubicación de la bomba será lo más cercana al tanque, con todas estas especificaciones se generó el respectivo diseño CAD.

**Figura 62: Diseño CAD del sistema de soporte estructural**



Fuente: Autores

El análisis CAE de la estructura se desarrolla en el anexo F, este análisis se desarrolla por medio de elementos finitos y demuestra el sobredimensionamiento de la estructura evidenciado por el factor de seguridad (FDS).

#### **4.2 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA**

Para la construcción de la estructura se emplearon tubos de perfil cuadrado de 1½" de calibre 18, los cuales se soldaron por medio de soldadura por arco.

**Figura 63: Estructura de soporte**



Fuente: Autores

Para facilitar el transporte de la estructura se instaló un set de ruedas con sus respectivos frenos.

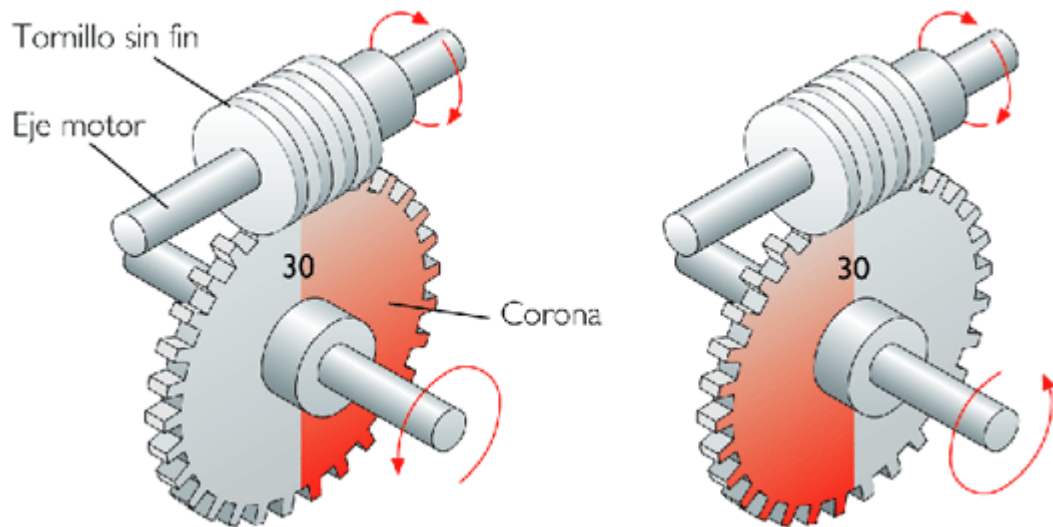
### **4.3 SISTEMA DE MOVIMIENTO**

El sistema de movimiento es el encargado de darle a la superficie reflectora el ángulo de inclinación inicial ya mencionado en el capítulo 1.

Se adaptó un sistema de movimiento se realizó por medio de un sistema tornillo sin fin corona (ver figura 64) accionado por una manivela de forma manual.

Este sistema tiene la característica de ser auto bloqueante, es decir la superficie de reflexión no se desbocara por efecto de la gravedad, ya que el eje de rotación de la superficie reflectora se encuentra solidario al sistema tornillo sin fin –corona.

**Figura 64: esquema básico de un sistema de reducción corona-tornillo sin fin**



Fuente: [http://co.kalipedia.com/tecnologia/tema/mecanismos-motores-energia/tornillo-fin.html?x=20070822klpington\\_57.Kes&ap=5](http://co.kalipedia.com/tecnologia/tema/mecanismos-motores-energia/tornillo-fin.html?x=20070822klpington_57.Kes&ap=5)

**4.3.1 Construcción del Sistema de Movimiento:** El sistema de seguimiento consta de tres partes fundamentales el tornillo sin fin, la corona y la estructura que soportara las dos anteriores. Se decidió comprar el tornillo sin fin y la corona ya prefabricados por el costo que traería la manufactura de cada una de las piezas, El sistema encontrado en el mercado tiene una relación de 40:1 es decir por cada 40 vueltas realizadas en el tornillo sin fin, el engranaje realizara un solo giro.

La caja que soportará esta estructura está compuesta de lámina de acero de espesor  $\frac{1}{4}$  de pulgada, posteriormente se añadió al eje del tornillo sin fin, la manivela para poder girarla manualmente. Estos sistemas se consiguen en el mercado local con un precio elevado, por esto se decidió la construcción del sistema de movimiento.

**Figura 65: Caja Reductora**



Fuente: Autores

## **5. SISTEMA DE TRANSPORTE Y MEDICIÓN DE TEMPERATURA**

El sistema de almacenamiento y circulación es el encargado de transportar el fluido tratado por el tubo de captación, para esto se dispondrá de un tanque, una bomba y una válvula para controlar de forma manual el flujo.

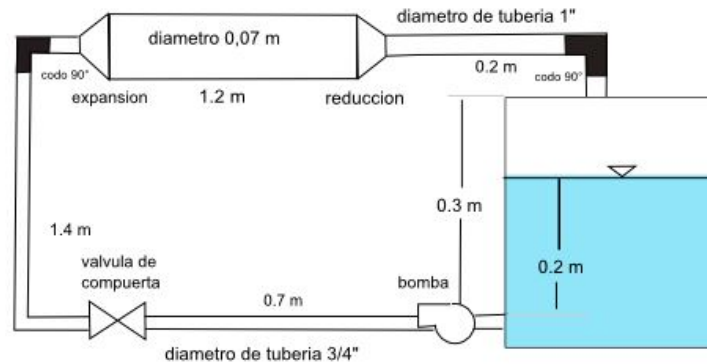
Para el respectivo análisis de resultados es importante el conocimiento de las temperaturas de entrada y salida del fluido en el tubo de captación, para esto se diseñara un sistema de medición de estos datos por medio de la tarjeta Arduino.

### **5.1 SELECCIÓN DE LA BOMBA Y TANQUE**

De acuerdo con las especificaciones dadas por los investigadores de la escuela de ingeniería química las pruebas posteriores se realizarán para diferentes caudales, teniendo un flujo medio aproximado en el sistema de 10 L/min.

Teniendo como parámetro este caudal se realizó el cálculo, para saber la altura de presión que la bomba tenía que brindar. Este cálculo se realizó por el método de pérdidas menores, teniendo en cuenta cada elemento en el sistema de bombeo. Un esquema del sistema de bombeo con sus respectivas cotas se muestra a continuación.

**Figura 66: esquema del sistema de bombeo**



Fuente: Autores

Con el sistema acotado y con los elementos seleccionados se procedió a realizar el estudio de pérdidas por accesorios y por tuberías, la tabla 06 muestra los accesorios del sistema, sus factores de pérdida (K) y las alturas de pérdidas, para el objeto de estudio, se decidió simular los cabezales multifuncionales como accesorios de expansión y reducción.

Los cálculos de pérdidas en las tuberías se realizaron mediante la ecuación de Darcy-Weisbach. Una lista de los accesorios utilizados con su respectivo factor de pérdida y posterior altura de pérdida se muestra a continuación (coeficiente de resistencia K para válvulas y accesorios. Crane. Apéndice A).

**Tabla 6: Factores de pérdidas y alturas de pérdidas de los accesorios**

| Accesorios                                   | K    | H[m]     |
|--|------|----------|
| Codo 90° 3/4"                                | 0,75 | 0,05227  |
| Codo 90° 1"                                  | 0,69 | 0,01522  |
| válvula de compuerta 3/4" abierta totalmente | 0,2  | 0,01394  |
| expansión                                    | 1    | 0,06969  |
| estrechamiento                               | 1    | 0,003823 |
| salida del tanque                            | 1    | 0,02205  |

Fuente: Autores

Con los resultados obtenidos (tabla 6) se pudo realizar el cálculo por medio de la ecuación de energía de Bernoulli dando como resultado, que para el caudal deseado se necesita una bomba que tenga una altura de 0,57 m de altura (el desarrollo del proceso en EES se encuentra en el anexo D).

Con este valor de altura se propuso encontrar en el mercado una bomba de bajo precio que supliera las necesidades planteadas, sin embargo, esta altura es muy baja para una bomba que deba suministrar el caudal requerido, por esto se utilizó una bomba que cumpliera con el caudal necesario aunque tuviera una altura mucho mayor, de esta forma se seleccionó una bomba de desagüe de lavadora de 30 W la cual genera un caudal de 20 Lt/min, y se ajusta a las características requeridas a un bajo costo. (Figura 67).

**Tabla 7: Comparación entre la bomba requerida y la bomba obtenida**

| Características de la bomba | Real | Teórica |
|-----------------------------|------|---------|
| Potencia [W]                | 30   | 1,87    |
| Altura de trabajo [m]       | 2,5  | 0,57    |
| Caudal [Lt/min]             | 20   | 20      |

Fuente: Autores

Con lo información dada se procedió a la obtención de un tanque de almacenamiento de 40 L, el cual es suficiente para mantener una cantidad fluido en reposo. En cuanto al material de tanque se escogió acero galvanizado debido al gran uso en sistema con circulación de agua como las tuberías domésticas recubierto de una pintura anticorrosiva.

**Figura 67: Bomba Empleada y tanque empleados**



Fuente. Autores

Para controlar el flujo del líquido a ser tratado se dispuso en la línea de salida de la bomba una válvula de compuerta, esta se encargara de asegurar el caudal para las diferentes pruebas.

## **5.2 SISTEMA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA**

Para la medición de la temperatura del sistema se dispuso de un montaje de sensores, la recepción de los datos se realizara por medio de una tarjeta Arduino para posteriormente se mostrada en una LCD.

**5.2.1 Componentes del Sistema de Medición:** Los elementos utilizados para la medición de estos datos se presentan a continuación:

- Para la medición de temperatura se instaló un sensor de temperatura digital DS18B20 el cual viene sellado a prueba de agua. La ventaja principal en estos

sensores es que se pueden conectar hasta 100 dispositivos en un solo pin y hasta una distancia de 200 m del dispositivo de adquisición, dichos sensores emplean la comunicación en serie 1-wire.

**Tabla 8: Características del sensor.**

|                       |                                |
|-----------------------|--------------------------------|
| Alimentación          | 3.0 - 5.5 V                    |
| Rango de temperatura  | -55°C a 125°C                  |
| Exactitud de medición | 0.5°C en rango de -10°C a 85°C |

**Figura 68: Sensor de temperatura DS18B20**

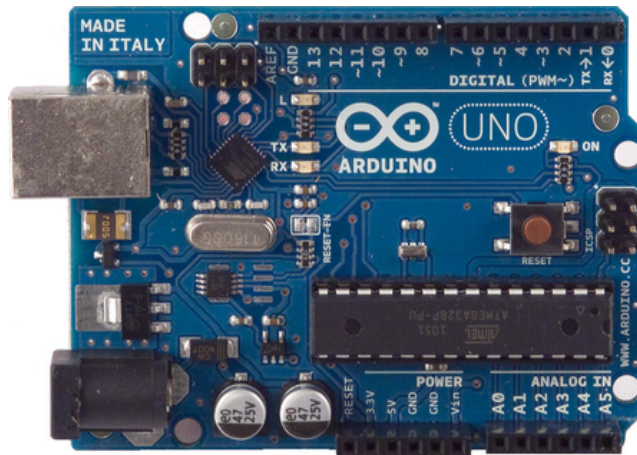


Fuente:

[http://www.triquitraqueando.com/tiendita/Sensor\\_temperatura\\_a\\_prueba\\_de\\_agua](http://www.triquitraqueando.com/tiendita/Sensor_temperatura_a_prueba_de_agua).

- Para la adquisición de los datos se utilizará una tarjeta Arduino uno; esta es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un micro controlador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

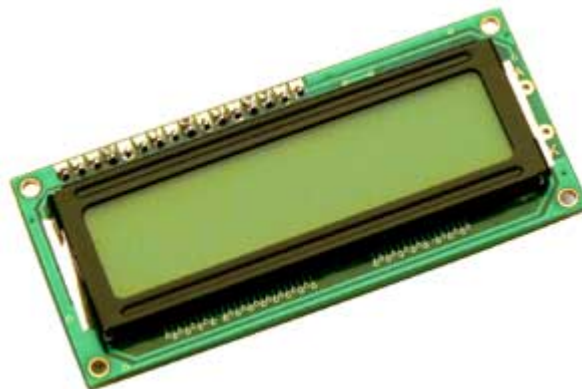
**Figura 69: Tarjeta Arduino uno**



Fuente: <http://Arduino.cc/>

- Para la visualización de los datos de temperatura y flujo se instaló una LCD HD44780 la cual dispone de 2 filas de 16 caracteres cada una y cada carácter dispone de una matriz de 5x7 puntos (pixels). Este dispositivo está gobernado internamente por un micro controlador Hitachi 44780.

**Figura 70: Visor LCD 2x16**

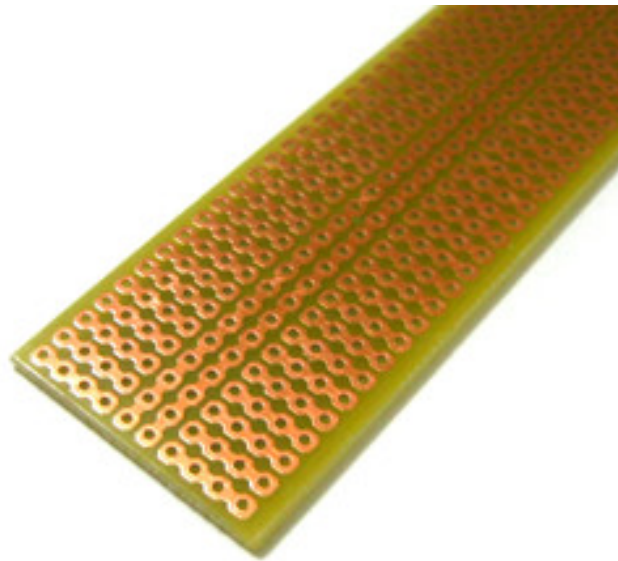


Fuente:

[http://www.kamami.com/published/publicdata/BTC10/attachments/SC/products\\_pictures/lcd\\_1602.jpg](http://www.kamami.com/published/publicdata/BTC10/attachments/SC/products_pictures/lcd_1602.jpg)

**5.2.2 Montaje del sistema de medición:** El montaje de todo el sistema se realizó por medio de una placa pcb agujereada. En esta se instalaron las conexiones para la tarjeta Arduino, los sensores, y la LCD 16x2. el sistema se montó en una caja sellada herméticamente ubicada al lado de la lámina que sostiene el mecanismo auto bloqueante.

**Figura 71: Placa pcb agujereada**



mauebia.com

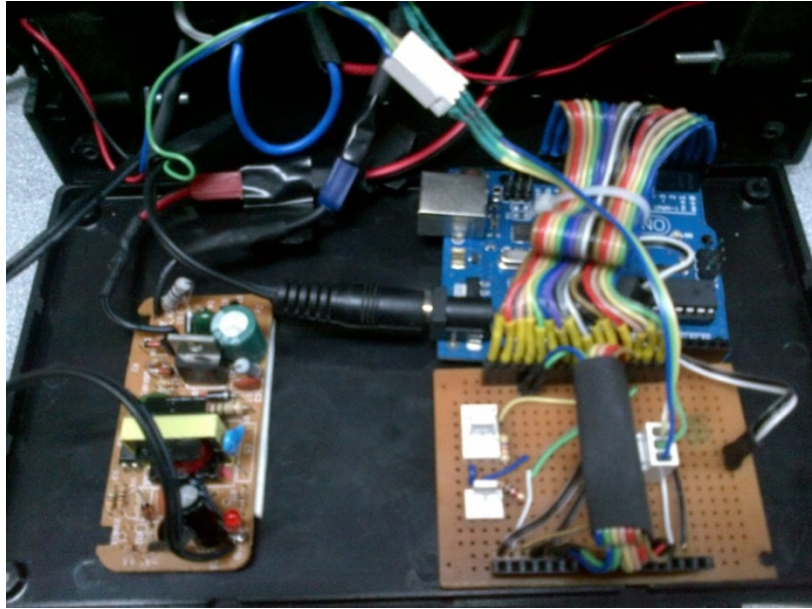
Fuente: mauebia.com

El esquema eléctrico y electrónico utilizado en este proyecto se muestra en las imágenes posteriores.



sistema de soporte. El sistema completo de medición completo montado sobre la estructura se puede apreciar en la siguiente fotografía.

**Figura 74: Fotografía sistema eléctrico**



Fuente: Autores

**Figura 75: Caja de medición**



Fuente. Autores

## **6. COSTOS TOTALES DE LA CONSTRUCCIÓN DEL CPC**

A continuación se presentara la tabla de costos correspondientes a la construcción del colector compuesto parabólico

**Tabla 9: Costo Total**

| DESCRIPCIÓN   | UND    | CANTIDAD | VALOR UNITARIO | VALOR TOTAL  |
|---|--------|----------|----------------|--------------|
| PLATINA ACERO ESTRUCTURAL 1/8 DE ESPESOR POR 1 1/2 DE ANCHO X 6 METROS      | UNIDAD | 3        | \$12,400.00    | \$37,200.00  |
| LAMINA ACERO TRABAJADO EN CALIENTE 2.8 MM DE ESPESOR DE DIMENSIONES 2.4*1.2 | UNIDAD | 1        | \$154,700.00   | \$154,700.00 |
| PERFIL EN L ACERO ESTRUCTURAL 1/8 DE ESPESOR POR 1 1/2 DE ANCHO             | UNIDAD | 2        | \$23,400.00    | \$46,800.00  |
| EJE DE ACERO 1045 1 " DE DIAMETRO   | METROS | 1.5      | \$20,000.00    | \$30,000.00  |
| CHUMACERAS FS PARA EJE DE 1 "   | UNIDAD | 2        | \$12,000.00    | \$24,000.00  |
| KILO DE SOLDADURA WEST ARCO   | UNIDAD | 2        | \$8,200.00     | \$16,400.00  |
| PERFIL CUADRADO CALIBRE 18 X 6 METROS                                       | UNIDAD | 3        | \$23,000.00    | \$69,000.00  |
| PLATINA ACERO ESTRUCTURAL 1/4 DE ESPESOR POR 1 1/2 X 1 METRO                | UNIDAD | 1        | \$5,000.00     | \$5,000.00   |
| SOPORTES DE ACERO DE 1/2 " DE ESPESOR                                       | UNIDAD | 3        | \$5,000.00     | \$15,000.00  |
| RUEDAS DE 70 KG SIN FRENO   | UNIDAD | 2        | \$11,000.00    | \$22,000.00  |
| RUEDAS DE 70 KG CON FRENO   | UNIDAD | 2        | \$15,000.00    | \$30,000.00  |
| ACOPLE ENTRE EJE Y CAJA MECANICA  | UNIDAD | 1        | \$26,000.00    | \$26,000.00  |
| JUEGO SIN-FIN CORONA REDUCCION 40 A 1                                       | UNIDAD | 1        | \$157,000.00   | \$157,000.00 |
| POLIMERO HWM DE DIAMETRO 3 1/2 " X 20 CM                                    | UNIDAD | 3        | \$13,000.00    | \$39,000.00  |
| MACILLA PARA METAL x 1 GALON  | UNIDAD | 1        | \$13,000.00    | \$13,000.00  |
| CAJA DE REDUCCION AUTOBLOQUEANTE  | UNIDAD | 1        | \$92,000.00    | \$92,000.00  |
| PINTURA Y ANTICORROSIVOS  | UNIDAD | 1        | \$85,000.00    | \$85,000.00  |
| TANQUE DE ALMACENAMINETO 40 LITROS  | UNIDAD | 1        | \$20,000.00    | \$20,000.00  |
| POLIMERO HWM DE DIAMETRO 4 " X 20 CM  | UNIDAD | 2        | \$22,000.00    | \$44,000.00  |
| RACOR 1 PULG ROSCA UN   | UNIDAD | 2        | \$5,000.00     | \$10,000.00  |

|   |        |   |              |                |
|---|--------|---|--------------|----------------|
| MANGUERAS 3/4"<br>TRANSPARENTES   | METROS | 4 | \$10,000.00  | \$40,000.00    |
| BOMBA DE DESAGUE DE<br>LAVADORA   | UNIDAD | 1 | \$20,000.00  | \$20,000.00    |
| SENSORES DS18B20  | UNIDAD | 3 | \$25,000.00  | \$75,000.00    |
| VENTILADOR DE 12 VOLTIOS<br>DC  | UNIDAD | 2 | \$3,000.00   | \$6,000.00     |
| TARJETA ARDUINO UNO   | UNIDAD | 1 | \$55,000.00  | \$55,000.00    |
| TUBO CONCENTRICO DE<br>ACRILICO DE DIAMETRO<br>EXTERIOR 75 MM x 1.2 METROS<br>DE LONGITUD | UNIDAD | 1 | \$140,000.00 | \$140,000.00   |
| LCD 16 X2 COLOR AZUL  | UNIDAD | 1 | \$15,000.00  | \$15,000.00    |
| ACOPLE ENTRE EJE Y CAJA<br>MECANICA   | UNIDAD | 1 | \$8,000.00   | \$8,000.00     |
| VALVULA DE COMPUERTA DE<br>3/4 "  | UNIDAD | 1 | \$15,000.00  | \$15,000.00    |
| NIPLA 3/4 "   | UNIDAD | 2 | \$2,500.00   | \$5,000.00     |
| LAMINA ALUMINIO<br>ELECTRODEPOSITADO AL VACIO<br>.5 MM DE ESPESOR                         | UNIDAD | 1 | \$600,000.00 | \$600,000.00   |
| MANO DE OBRA  | UNIDAD | 1 | \$550,000.00 | \$550,000.00   |
| ABRAZADERAS 3/4 "   | UNIDAD | 6 | \$1,000.00   | \$6,000.00     |
| TOTAL+IVA   |        |   |              | \$2,471,100.00 |

## CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un colector solar de concentración para ser aplicado en el proceso de reducción del mercurio y la oxidación del cianuro presente en el agua usada para la extracción de oro, el cual será realizado por el Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgica y ambiente GIMBA y el centro de Investigaciones en Catálisis de la escuela de ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander. Del análisis de diferentes opciones se establecieron las características geométricas y operativas del concentrador.
  - **Tipo:** Concentrador parabólico compuesto (CPC).
  - **Superficie reflectora:** formada por dos geometrías (parábola e involuta) con un factor de concentración de 2,5 para asegurar la mayor cantidad de radiación ultravioleta en un sistema sin seguimiento solar.
  - **Material de la superficie reflectora:** aluminio anodizado con recubrimiento plástico para mayor durabilidad, el cual posee reflexión especular de 95% en el intervalo de radiación ultravioleta (200 a 380 nm).
  - **Dimensión de la superficie reflectora:** 1,20 m (a lo largo del eje focal) x 0,87 (perímetro de la curvatura).
  - **Material del tubo absorbedor:** Acrílico, el cual posee una alta transmisividad en el espectro ultravioleta.
  - **Dimensiones del tubo absorbedor:** 74 mm (diámetro exterior), 1,20 m (longitud).
  - Cabezales multifuncionales encargados de soportar el tubo absorbedor, los elementos internos para la fotocatalisis (fotoánodo, cátodo, membrana de separación) y la distribución del flujo.
  - **Material de los cabezales:** polímero HMW.
  - **Material de la estructura de soporte:** acero estructural, perfil cuadrado calibre 18.

- **Mecanismo de movimiento manual de la superficie reflectora:** caja de reductora tornillo sin fin corona, autobloqueante, relación de reducción 40:1.
  - **Tanque de almacenamiento:** capacidad 40 Lt, material de construcción acero galvanizado.
  - **Bomba de suministro de flujo:** bomba centrifuga de 35 W, caudal de 10 L/min.
  - **Sistema de medición de temperatura:** adquisición de datos por medio del sistema Arduino y sensores ds18b20 digitales.
  - **Sistema de control de flujo:** válvula de compuerta manual.
- La elaboración del proyecto genero lazos interdisciplinarios entre la Escuela de Ingeniería Química, el Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgica y ambiente GIMBA y el Centro de Investigaciones en Catálisis, con la Escuela de ingeniería Mecánica dejando abiertas posibilidades de generación de proyectos futuros.
  - En el desarrollo del proyecto se profundizó en el análisis de los diferentes colectores solares con concentración los cuales complementaron los conocimientos adquiridos durante la carrera.
  - Se adquirieron conocimientos en técnicas alternativas para el tratamiento de aguas residuales por medio de sistemas solares, como el uso de reacciones fotocatalíticas para la eliminación de compuestos químicos.
  - Se realizaron pruebas de reflexión y transmisibilidad de diferentes materiales para el espectro de luz ultravioleta (200 a 380 nm) obteniendo como resultados que el mejor material en reflexión ultravioleta es el aluminio pulido 1060, y el cuarzo para la transmisibilidad de esta.

- Se conocieron técnicas de medición cualitativa de la radiación ultravioleta por medio de los experimentos basados en la medición de la degradación del colorante naranja de metilo reaccionando con  $\text{TiO}_2$  al ser expuestos a rayos UV en un periodo de tiempo.
- La construcción de concentrador solar generó competencias prácticas relacionadas con los procesos de manufactura de diferentes componentes mecánicos, abordados durante la carrera de forma teórica.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda profundizar en el estudio de concentradores solares sin seguimiento los cuales se plantean como una buena alternativa para el aprovechamiento de la energía solar
- Para posteriores construcciones de concentradores solares que requieren de transportar un fluido se recomienda instalar sistemas de purga de aire, para asegurar la uniformidad del fluido a lo largo del recorrido.
- Para la construcción de concentradores solares que tengan movimiento y que necesiten de transporte, se recomienda el uso de materiales ligeros.
- Se recomienda instalar un sistema de medición del flujo de agua para tener un control del caudal que circula por el sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

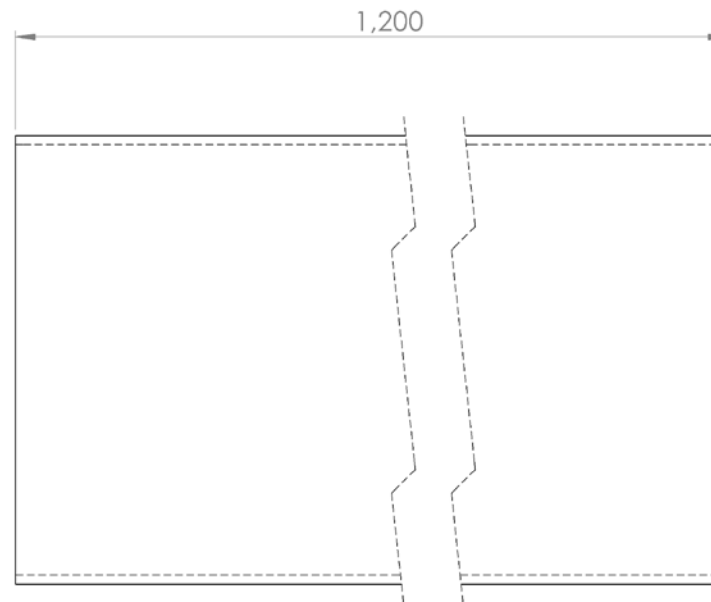
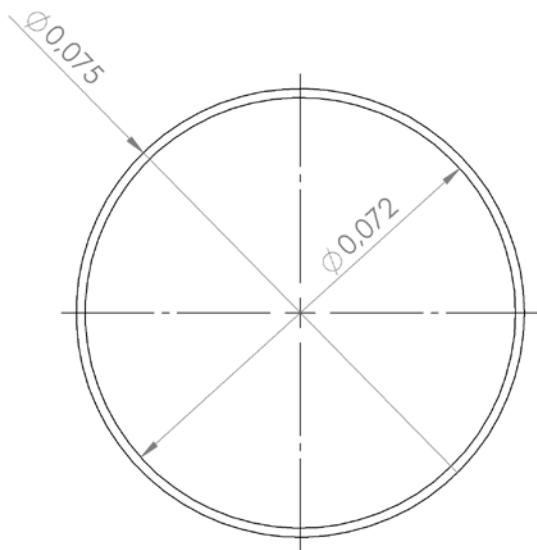
- BAZAN, Jorge. Diseño de sistema concentrador solar cilindro parabólico para proceso de deshidratación de alimentos. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico-Eléctrico. Piura: Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Área Departamental de Ingeniería Mecánico-Eléctrica, 2009. 169 p.
- BLANCO, Julián, et al. Diseño de reactores para fotocatalisis: evaluación comparativa de las distintas opciones. En: Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea. Madrid: CIEMAT, 2004. P. 243-266.
- CAMARGO, Diego A. Diseño y evaluación económica de un sistema de reacción fotocatalítico para la descontaminación de aguas residuales. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química, 2005. 87 p.
- CASSANO, Alberto E., et al. Diseño de reactores para fotocatalisis: conceptos fundamentales. En: Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea. Madrid: CIEMAT, 2004. P. 201-241.
- COLLARES, Manuel. Energía solar y óptica sin imágenes para la producción de agua limpia [online]. [citado en 15 julio de 2013]. Disponible en internet: [http://www.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/08\\_Capitulo\\_08.pdf](http://www.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/08_Capitulo_08.pdf). 16 p.
- DUFFIE, John A. y BECKMAN, William. Solar engineering of thermal processes. 2 Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. s.f. p. 1-379.
- ECHEVERRIA, Cesar. Diseño de un colector cilindro parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico- Eléctrico. Piura: Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Área Departamental de Ingeniería Mecánico-Eléctrica, 2011. 152 p.
- JAIMES, Nelson y RIVERO Sergio. Diseño y construcción de un colector solar de tubos al vacío. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga:

Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2012. 233 p.

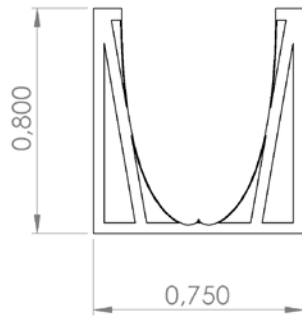
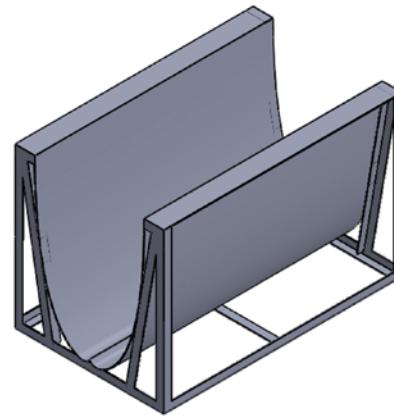
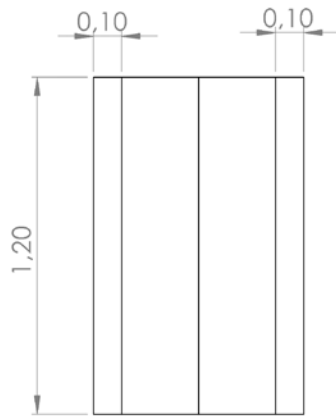
- OOMMEN, R. y JAYARAMAN, S. Development and performance analysis of compound parabolic solar concentrators with reduce gap losses-oversized reflector. En: Energy conversion and management. 2001. Vol 42 no, p 1379-1399.
- RABL, Ari. Active solar collector and their applications. New York: Oxford University Press, Inc., 1985. 524 p.
- RABL, Ari. Solar concentrator with maximal concentration for cylindrical absorbers. En: Applied Optics. Julio, 1976. Vol 15 no 7, p. 1871-1873.
- RODRIGUEZ, Juan, et al. El fotocatalizador: síntesis, propiedades y limitaciones [online]. [citado en 15 julio de 2013]. Disponible en internet: [http://www.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/089\\_Capitulo\\_09.pdf](http://www.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/089_Capitulo_09.pdf). 18 p.
- TAPIA S., S. y DEL RIO P., J.A. Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica. En: Revista mexicana de física. 2009. Vol 55 no 2, p 141-153.

## **ANEXOS**

**ANEXO A: PLANOS DEL CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO  
COMPUESTO (CPC)**



|  |  |  |             |
|--|--|--|-------------|
| UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER                  |  | ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA   |             |
| A menos que se mencione las cotas son el m           |  | Título del proyecto<br><b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO (CPC) PARA EL ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL MERCURIO Y LA OXIDACIÓN DE CIANURO DEL AGUA DE DESECHO DE UNA MINA DE EXTRACCIÓN DE ORO.</b> |             |
| Autores:<br>Manuel F. Gereda C.<br>Brian S. Perez Q. |  | Nombre de la pieza   |             |
| Director:<br>Ing. Omar A. Gelvez                     |  | <b>tubo exterior sistema de cap.</b>   |             |
|  |  | ESCALA:1:20  | HOJA 1 DE 1 |



estructura  
realizada en perfil  
en L de 1/4 de  
espesor por 1 1/2  
de ancho (pulg)

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE  
SANTANDER

ESCUELA DE INGENIERIA  
MECANICA

A menos que se  
mencione las  
cotas son el m

Título del proyecto  
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN  
CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO  
(CPC) PARA EL ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN  
DEL MERCURIO Y LA OXIDACIÓN DE CIANURO  
DEL AGUA DE DESECHO DE UNA MINA DE  
EXTRACCIÓN DE ORO.

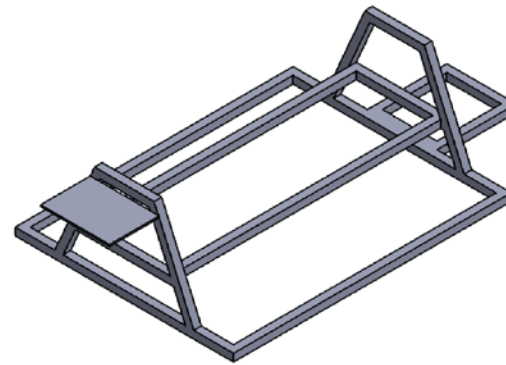
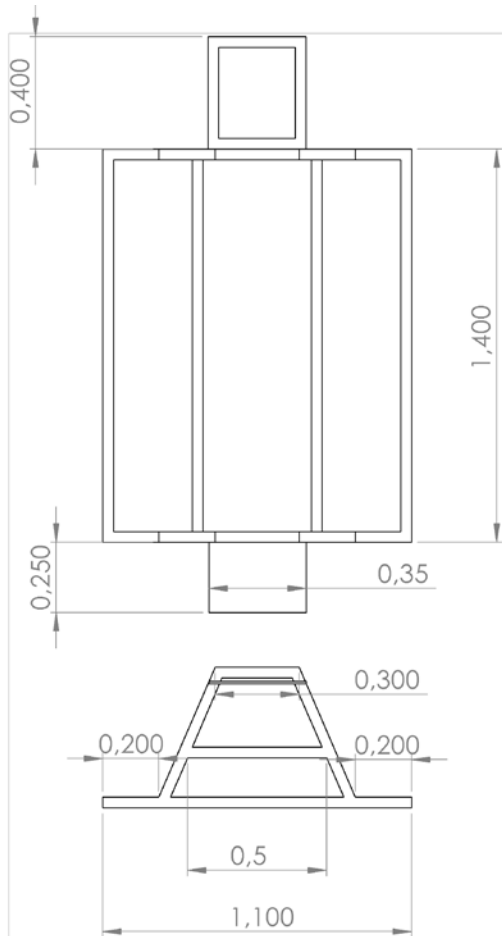
Autores:  
Manuel F. Gereda C.  
Brian S. Perez Q.

Nombre de la pieza  
sistema de reflexion

Director:  
Ing. Omar A. Gelvez

ESCALA:1:20

HOJA 1 DE 1



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE  
SANTANDER

ESCUELA DE INGENIERIA  
MECANICA

A menos que se  
mencione las  
cotas son el m

Autores:  
Manuel F. Gereda C.  
Brian S. Perez Q.

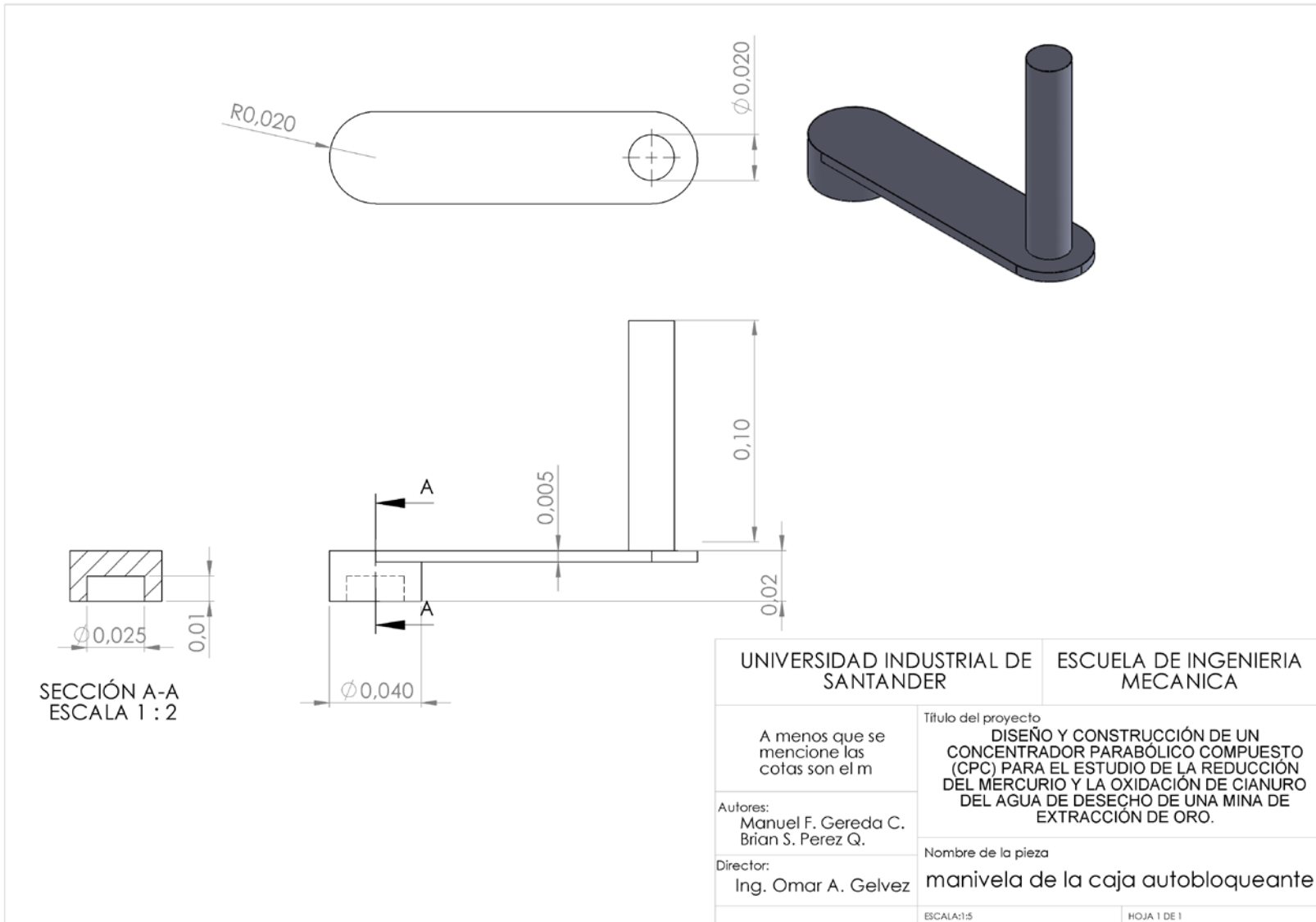
Director:  
Ing. Omar A. Gelvez

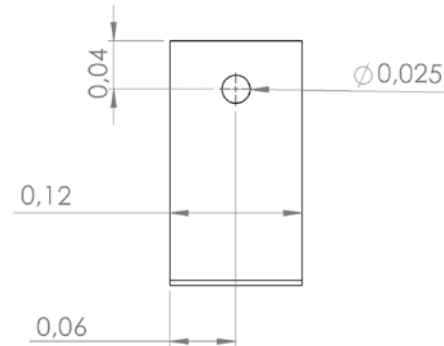
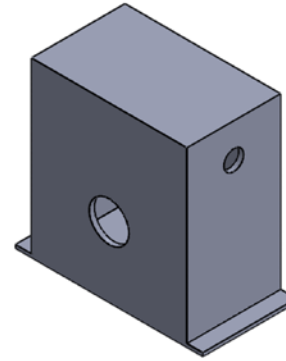
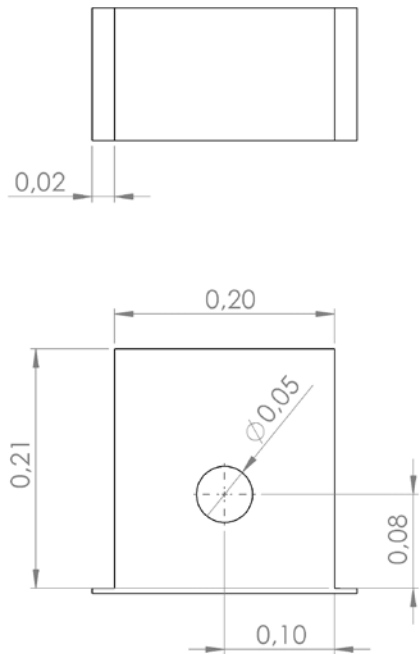
Título del proyecto  
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN  
CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO  
(CPC) PARA EL ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN  
DEL MERCURIO Y LA OXIDACIÓN DE CIANURO  
DEL AGUA DE DESECHO DE UNA MINA DE  
EXTRACCIÓN DE ORO.

Nombre de la pieza  
elemento de soporte estructural

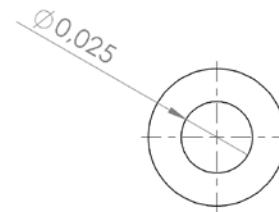
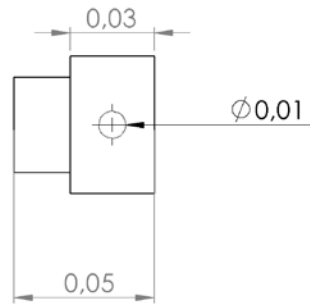
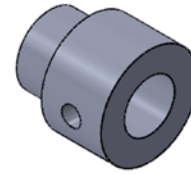
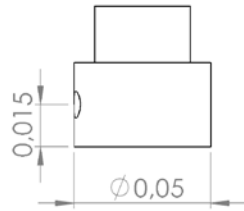
ESCALA:1:50

HOJA 1 DE 1

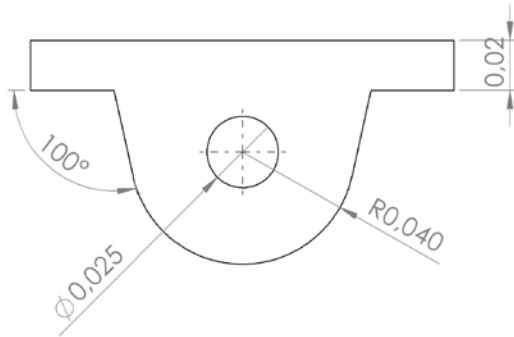
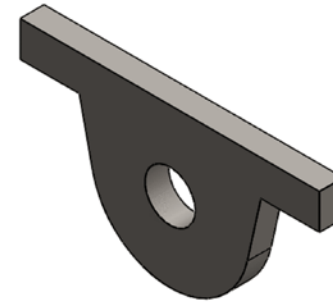




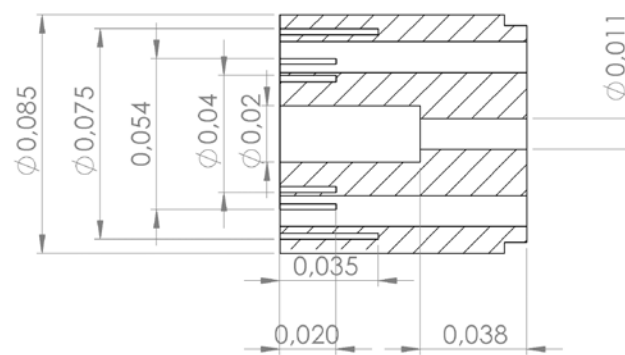
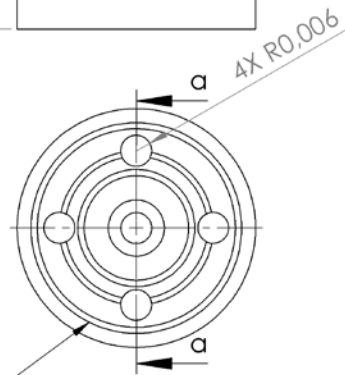
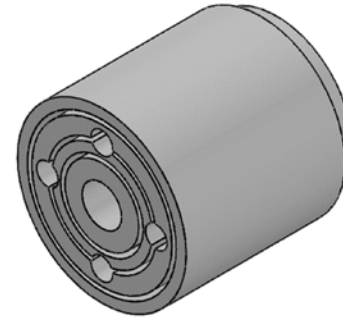
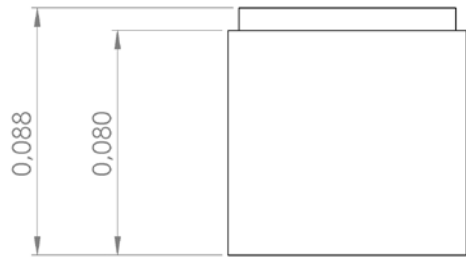
|  |  |                                |
|--|--|--------------------------------|
| UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER                  |  | ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA |
| A menos que se mencione las cotas son el m           | Título del proyecto<br><b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO (CPC) PARA EL ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL MERCURIO Y LA OXIDACIÓN DE CIANURO DEL AGUA DE DESECHO DE UNA MINA DE EXTRACCIÓN DE ORO.</b> |                                |
| Autores:<br>Manuel F. Gereda C.<br>Brian S. Perez Q. | Nombre de la pieza<br><b>caja de mecanismo autobloqueante</b>  |                                |
| Director:<br>Ing. Omar A. Gelvez                     | ESCALA:1:5   | HOJA 1 DE 1                    |



|  |  |   |  |
|--|--|---|--|
| UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER                  |  | ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  |  |
| A menos que se mencione las cotas son el m           |  | Título del proyecto<br>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO (CPC) PARA EL ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL MERCURIO Y LA OXIDACIÓN DE CIANURO DEL AGUA DE DESECHO DE UNA MINA DE EXTRACCIÓN DE ORO. |  |
| Autores:<br>Manuel F. Gereda C.<br>Brian S. Perez Q. |  | Nombre de la pieza:<br>acople eje-caja autobloqueante   |  |
| Director:<br>Ing. Omar A. Gelvez                     |  | ESCALA:1:2  |  |
|  |  | HOJA 1 DE 1   |  |



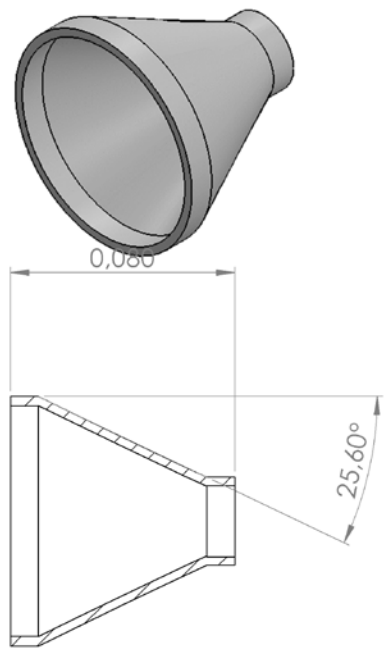
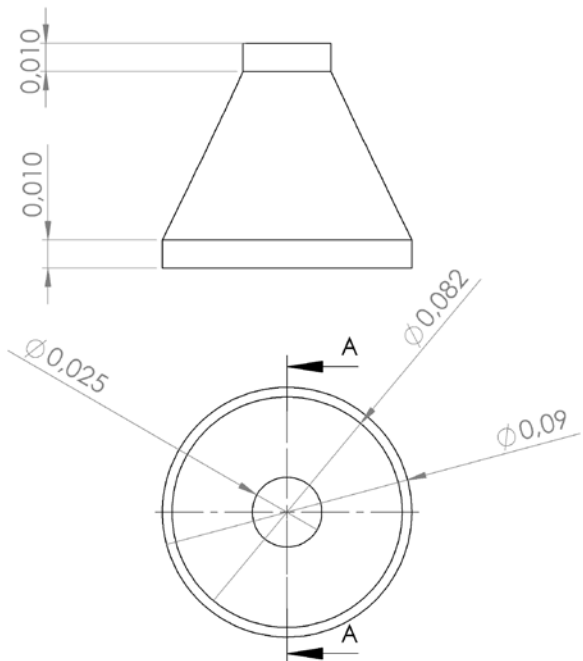
|  |  |                                |
|--|--|--------------------------------|
| UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER                  |  | ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA |
| A menos que se mencione las cotas son el m           | Título del proyecto<br><b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO (CPC) PARA EL ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL MERCURIO Y LA OXIDACIÓN DE CIANURO DEL AGUA DE DESECHO DE UNA MINA DE EXTRACCIÓN DE ORO.</b> |                                |
| Autores:<br>Manuel F. Gereda C.<br>Brian S. Perez Q. | Nombre de la pieza<br><b>acople eje-sistema reflexion</b>  |                                |
| Director:<br>Ing. Omar A. Gelvez                     | ESCALA:1:1   | HOJA 1 DE 1                    |



SECCIÓN a-a

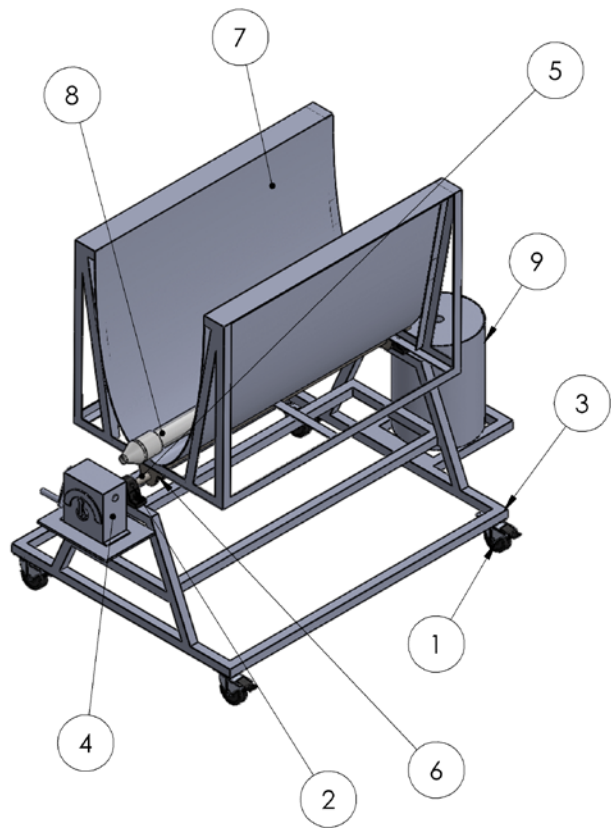
las ranuras de dos mm de espesor excepto la ranura exterior que tiene una magnitud de 3 mm de espesor

|  |  |   |  |
|--|--|---|--|
| UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER                  |  | ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  |  |
| A menos que se mencione las cotas son el m           |  | Título del proyecto<br>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO (CPC) PARA EL ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL MERCURIO Y LA OXIDACIÓN DE CIANURO DEL AGUA DE DESECHO DE UNA MINA DE EXTRACCIÓN DE ORO. |  |
| Autores:<br>Manuel F. Gereda C.<br>Brian S. Perez Q. |  | Nombre de la pieza<br>cabezales parte 1   |  |
| Director:<br>Ing. Omar A. Gelvez                     |  | ESCALA:1:2  |  |
|  |  | HOJA 1 DE 1   |  |



SECCIÓN A-A

|  |  |                                |
|--|--|--------------------------------|
| UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER                  |  | ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA |
| A menos que se mencione las cotas son el m           | Título del proyecto<br><b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO (CPC) PARA EL ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL MERCURIO Y LA OXIDACIÓN DE CIANURO DEL AGUA DE DESECHO DE UNA MINA DE EXTRACCIÓN DE ORO.</b> |                                |
| Autores:<br>Manuel F. Gereda C.<br>Brian S. Perez Q. | Nombre de la pieza<br><b>cabezales parte 2</b>   |                                |
| Director:<br>Ing. Omar A. Gelvez                     | ESCALA:1:2   | HOJA 1 DE 1                    |



| N.º DE ELEMENTO | N.º DE PIEZA                                 | CANTIDAD |
|-----------------|--|----------|
| 1               | ruedas 70 kg                                 | 4        |
| 2               | chumaceras FS p250                           | 2        |
| 3               | sistema de soporte                           | 1        |
| 4               | sistema de movimiento                        | 1        |
| 5               | eje de movimiento                            | 1        |
| 6               | sistema de union eje-estructura de reflexion | 3        |
| 7               | sistema de reflexion                         | 1        |
| 8               | sistema de captacion                         | 1        |
| 9               | tanque de almacenamiento 40 litros           | 1        |

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

A menos que se mencione las cotas son el m

Título del proyecto

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO (CPC) PARA EL ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL MERCURIO Y LA OXIDACIÓN DE CIANURO DEL AGUA DE DESECHO DE UNA MINA DE EXTRACCIÓN DE ORO.

Autores:  
Manuel F. Gereda C.  
Brian S. Perez Q.

Nombre de la pieza

Director:  
Ing. Omar A. Gelvez

concentrador parabolico compuesto

ESCALA:1:50

HOJA 1 DE 1

**ANEXO B: PROGRAMACIÓN TARJETA ARDUINO MEDICIÓN DE  
TEMPERATURA**

```

//programa de medición de temperatura y posterior visualización en una LCD 16X2
//programa creado como desarrollo del proyecto titulado
//DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR PARABÓLICO
COMPUESTO (CPC) PARA EL
//ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL MERCURIO Y LA OXIDACIÓN DE
CIANURO DEL AGUA DE
//DESECHO DE UNA MINA DE EXTRACCIÓN DE ORO.
//-----
//incluimos las bibliotecas,
//la biblioteca one wire y dallas temperature son las
//encargadas de suministrar lo necesario para el funcionamiento
// de los sensores ds18b20 digitales
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(12, 11, 7, 6, 5, 4);
//Cable de datos está enchufado en el pin 3 en el Arduino
#define ONE_WIRE_BUS 3
// Configuración de una instancia OneWire para comunicarse con cualquier
dispositivo OneWire
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
// Pasar nuestra referencia OneWire a Dallas temperatura.
DallasTemperature sensors(&oneWire);
//iniciamos el programa
void setup(void)
{
  // Iniciar puerto serial
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Dallas Temperature IC Control Library Demo");
}

```

```

// Poner en marcha la biblioteca
  sensors.begin();
  lcd.begin(16, 2);
}
void loop(void)
{
  // Sensors.requestTemperatures call () para emitir una temperatura global
  // petición a todos los dispositivos en el bus
  Serial.print(" ");
  sensors.requestTemperatures(); // enviar el comando para obtener temperaturas
  Serial.println("");
  Serial.print("Temperatura para el sensor 1 es:");
  Serial.print(sensors.getTempCByIndex(0));
  Serial.print("Temperatura para el sensor 2 es:");
  Serial.print(sensors.getTempCByIndex(1));
  // Se puede tener más de un IC en el mismo bus.
  // 0 se refiere a la primera IC en el alambre
  float t1=sensors.getTempCByIndex(0);
  float t2=sensors.getTempCByIndex(1);
  // imprimimos en la lcd
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);//se selecciona la primera fila
  lcd.print("t1=");//se imprime t1
  lcd.print(t1);
  lcd.print("°C");
  lcd.setCursor(0,1);//selecciona la segunda fila
  lcd.print("t2=");//se imprime t2
  lcd.print(t2);
  lcd.print("°C");
  delay(500);//se coloca un delay para mostrar datos

```

**ANEXO C: GUÍA DE FUNCIONAMIENTO Y OPERACIÓN DEL COLECTOR  
PARABÓLICO COMPUESTO (CPC)**

## Guía para empezar a trabajar en el concentrador

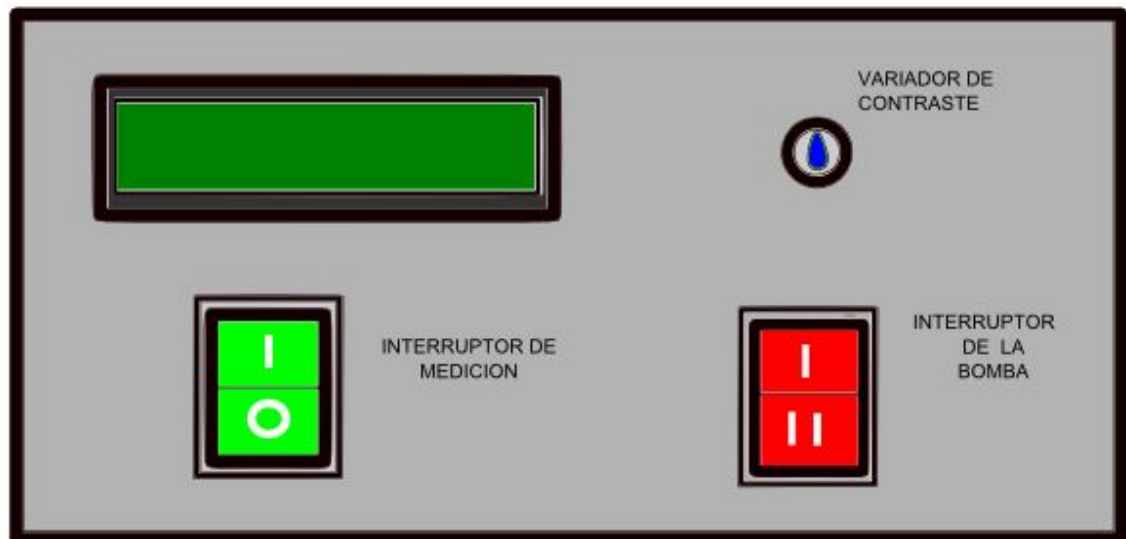
1. Ubicar el concentrador en una superficie preferiblemente plana y abierta sin ninguna obstrucción que impida el paso de los rayos del sol
2. Posicionar el concentrador por medio de la brújula instalada, orientándolo de tal forma que el eje del concentrador coincida con el eje de este a oeste.



3. Por medio de transportador instalado, inclinar el concentrador teniendo en cuenta la latitud del lugar en el que se ubicara (para ubicaciones en el hemisferio norte se debe inclinar el concentrador hacia el sur, para ubicaciones en el hemisferio sur se debe inclinar el concentrador hacia el norte).
4. Revisar todas las conexiones tanto eléctricas como de los sensores para evitar averías en el sistema.

## Guía de operación para la toma de datos

1. Energizar la caja de interruptores por medio de una toma eléctrica de 110v
2. Cerciorarse que la válvula de flujo de agua se encuentre totalmente abierta
3. Activar el interruptor de la bomba para iniciar la circulación del fluido por el concentrador.
4. Activar el interruptor de medición para iniciar la toma y visualización de los datos de temperatura y caudal en la pantalla de visualización. (Por medio de la perilla se puede ajustar el contraste de la pantalla de visualización)



## Guía para el desmontaje del tubo absorbedor

1. Desconectar las mangueras de flujo de agua de los cabezales, teniendo cuidado con la unión del sensor, asegurándose antes de que no halla líquido alguno en el tubo (si es necesario abrir válvula de desagüe del tanque ubicada en el fondo de este).
2. Retirar los tornillos que ajustan las abrazaderas que cubren los cabezales del tubo.



3. Retirar el tubo del concentrador solar
4. Retirar la silicona de manera cuidadosa para así evitar daños en el tubo de acrílico.
5. Remover el cabezal y limpiar los excedentes de silicona de las partes.

## Guía para el montaje del tubo absorbedor

1. Encajar el cabezal en el tubo (asegurándose de que no se encuentre ninguna suciedad entre estos)
2. Aplicar silicona por el borde de la unión, asegurándose de esparcirla de forma uniforme en un ángulo de 45° sin dejar espacios sin silicona (para evitar fugas en el funcionamiento).

### Montaje de los cabezales

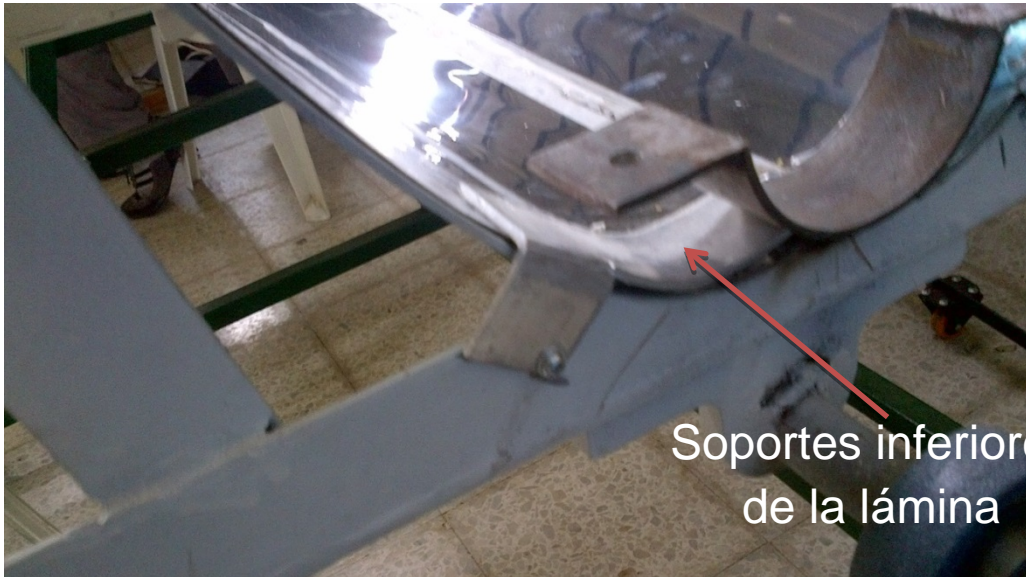


3. Ubicar el tubo absorbedor sobre los soportes y asegurarlos por medio de las abrazaderas metálicas (ajustar las abrazaderas por medio de los tornillos de una forma moderada para así evitar daños en los cabezales).
4. Unir las mangueras a los racores de los cabezales asegurándolas firmemente por medio de las abrazaderas.

## Guía montaje y desmontaje de la lámina reflectora

1. Retirar los soportes inferiores de la lámina (ubicados debajo de los soportes del cabezal) por medio de un destornillador.

### Soportes inferiores



2. Retirar los ganchos de sujeción laterales distribuidos por toda la lámina

### Gachos de sujeción de la lámina



3. Retirar los tornillos superiores, y retirar la lámina con cuidado.



Nota: la lámina debe poseer en la parte superior uno dobles de 90 ° a 12 cm del borde para la sujeción en la parte superior.

4. Para la instalación de una nueva lámina se debe asegurar que disponga de los orificios superiores para sujeción respectiva

5. una vez ubicada y asegurada la lámina se debe realizar una presión desde la parte superior para que esta adopte la forma correspondiente, y asegurarla mediante los ganchos de sujeción.

6. Finalmente, colocar y asegurar los soportes inferiores sobre la lámina para así asegurar la curvatura en la parte inferior.

**ANEXO D: CALCULO DEL SISTEMA DE BOMBEO POR MEDIO DEL  
SOFTWARE EES**

"DATOS"

$$D_1=3[\text{in}]/4*\text{CONVERT}(\text{in};\text{m})$$

$$D_2=0,07 [\text{m}]$$

$$D_3=1[\text{in}]*\text{CONVERT}(\text{in};\text{m})$$

$$l_1=2,1$$

$$l_2=1,2$$

$$l_3=0,2$$

$$z_1=0,2$$

$$z_3=0,3$$

$$g=9,81[\text{m}/\text{s}^2]$$

$$\rho=997,1[\text{kg}/\text{m}^3]$$

$$e=0,00005$$

$$Q=20[\text{l}/\text{min}]*\text{convert}(\text{l}/\text{min};\text{m}^3/\text{s})$$

"bernoulli"

$$z_1+h_{\text{bomba}}-h_{\text{sistema}}=v_3^2/(2*g)+z_3$$

$$h_{\text{sistema}}=h_{\text{tubtotal}}+h_{\text{exp}}+h_{\text{red}}+h_{\text{cod1}}+h_{\text{cod2}}+h_{\text{val}}+h_{\text{ent}}+h_{\text{sal}}$$

$$h_{\text{tubtotal}}=h_{\text{tub1}}+h_{\text{tub2}}+h_{\text{tub3}}$$

$$h_{\text{tub1}}=f_1*(l_1/D_1)*(v_1^2/(2*g))$$

$$h_{\text{tub2}}=f_2*(l_2/D_2)*(v_2^2/(2*g))$$

$$h_{\text{tub3}}=f_3*(l_3/D_3)*(v_3^2/(2*g))$$

$$a_1=((D_1^2)*3,142)/4$$

$$a_2=((D_2^2)*3,142)/4$$

$$a_3=((D_3^2)*3,142)/4$$

$$v_1=Q/a_1$$

$$v_2=Q/a_2$$

$$v_3=Q/a_3$$

$$f_1=(0,25)/((\log_{10}((e/(3,7*D_1)))+(5,74/\text{re}_1^{0,9})))^2$$

$$f_2=(0,25)/((\log_{10}((e/(3,7*D_2)))+(5,74/\text{re}_2^{0,9})))^2$$

$$f_3=(0,25)/((\log_{10}((e/(3,7*D_3)))+(5,74/\text{re}_3^{0,9})))^2$$

$$\text{re}_1=\rho*v_1*D_1/\text{miu}$$

$$\text{miu}=0,001$$

$$\text{re}_2=\rho*v_2*D_2/\text{miu}$$

$$\text{re}_3=\rho*v_3*D_3/\text{miu}$$

$$h_{\text{exp}}=1*v_1^2/(2*g)$$

$$h_{red}=1*v_2^2/(2*g)$$

$$h_{cod1}=0,75*v_1^2/(2*g)$$

$$h_{cod2}=0,69*v_3^2/(2*g)$$

$$h_{val}=0,2*v_1^2/(2*g)$$

$$h_{ent}=0,5*v_1^2/(2*g)$$

$$h_{sal}=v_3^2/(2*g)$$

"POTENCIA"

$$pot=h_{bomba}*Q*rho*g$$

Los resultados el cálculo son los siguientes:

|                                 |                                 |
|---------------------------------|---------------------------------|
| a_1=0,0002851 [m <sup>2</sup> ] | h_tub3=0,005379 [m]             |
| a_2=0,003849 [m <sup>2</sup> ]  | h_tubtotal=0,2421 [m]           |
| a_3=0,0005068 [m <sup>2</sup> ] | h_val=0,01394 [m]               |
| D_1=0,01905 [m]                 | l_1=2,1 [m]                     |
| D_2=0,07 [m]                    | l_2=1,2 [m]                     |
| D_3=0,0254 [m]                  | l_3=0,2 [m]                     |
| e=0,00005 [m]                   | miu=0,001 [pa*s]                |
| f_1=0,03078                     | pot=1,867 [W]                   |
| f_2=0,03673                     | Q=0,0003333 [m <sup>3</sup> /s] |
| f_3=0,03098                     | re_1=22211                      |
| g=9,81 [m/s <sup>2</sup> ]      | re_2=6045                       |
| h_bomba=0,5725 [m]              | re_3=16659                      |
| h_cod1=0,05227 [m]              | rho=997,1 [kg/m <sup>3</sup> ]  |
| h_cod2=0,01522 [m]              | v_1=1,169 [m/s]                 |
| h_ent=0,03485 [m]               | v_2=0,0866 [m/s]                |
| h_exp=0,06969 [m]               | v_3=0,6578 [m/s]                |
| h_red=0,0003823 [m]             | z_1=0,2 [m]                     |
| h_sal=0,02205 [m]               | z_3=0,                          |
| h_sistema=0,4505 [m]            |                                 |
| h_tub1=0,2365 [m]               |                                 |
| h_tub2=0,0002407 [m]            |                                 |

**ANEXO E. PROCEDIMIENTO PARA EL MONTAJE DE LA PRUEBA DE  
DEGRADACIÓN DE NARANJA DE METILO POR MEDIO DE LUZ  
ULTRAVIOLETA.**

## PROCEDIMIENTO PARA EL MONTAJE DE LA PRUEBA DE DEGRADACIÓN DE NARANJA DE METILO POR MEDIO DE LUZ ULTRAVIOLETA.

### Lista De Materiales

- Naranja de metilo ( $C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$ )
- Agua destilada
- Dióxido de titanio ( $tiO_2$ )
- Vaso de precipitado
- Papel filtro
- Lámpara UV (phillips master HPI-T plus 250w )
- Agitador magnético fm-008
- Espectrofotómetro uv-vis marca hewlett pakard (agilent 8453)
- Lamina de separación (de preferencia opaca)
- Probetas necesarias

### PREPARACIÓN DE LA PRUEBA

1. Crear una solución líquida de naranja de metilo de 5PPM en el vaso de precipitado mezclando correctamente hasta conseguir una solución homogénea.

Figura 1. Naranja de metilo



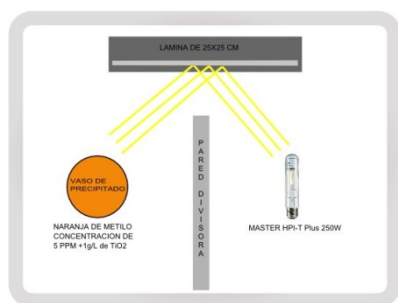
2. Mezclar la solución de naranja de metilo con 0,1 mg/L de  $TiO_2$  (manteniéndolo en un lugar oscuro para evitar reacciones)

Figura 2. Dióxido de Titanio



3. Realizar el montaje correspondiente (figura 3) con la lámpara ultravioleta, las probetas y el agitador magnético utilizando una lámina opaca como separación entre la lámpara y el agitador, todo esto en un recinto cerrado.

Figura 3. Montaje para el procedimiento.



- Colocar el vaso de precipitado con la solución obtenida en el agitador magnético durante 15 min para su homogenización (manteniendo a oscuras la sustancia)

Figura 4. Vaso de precipitado con agitador.



## PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

- Con el montaje realizado (figura 3), sin apagar el agitador (para garantizar la homogeneidad de la solución), se procede a encender

- la lámpara para la primera probeta.
- Definir un tiempo de exposición a la radiación de la lámpara contado a partir del encendido de esta.
- Con el tiempo cumplido se apaga la lámpara y se procede a retirar el vaso de precipitado
- Sacar muestras del vaso de precipitado y filtrarla para eliminar el resto de  $TiO_2$ .

Figura 5. Muestras de naranja de metilo.



- Llevar cada muestra a la medición en la máquina de espectrofotometría UV.

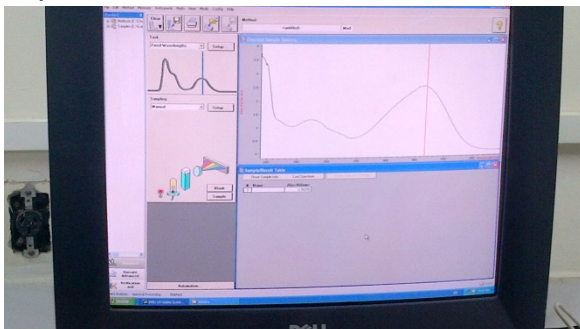
Figura 6. Máquina de espectrofotometría.



- Registrar los datos de absorbancia y reducción de concentración en el rango de

longitud de onda deseado de cada una de las muestras y promediar

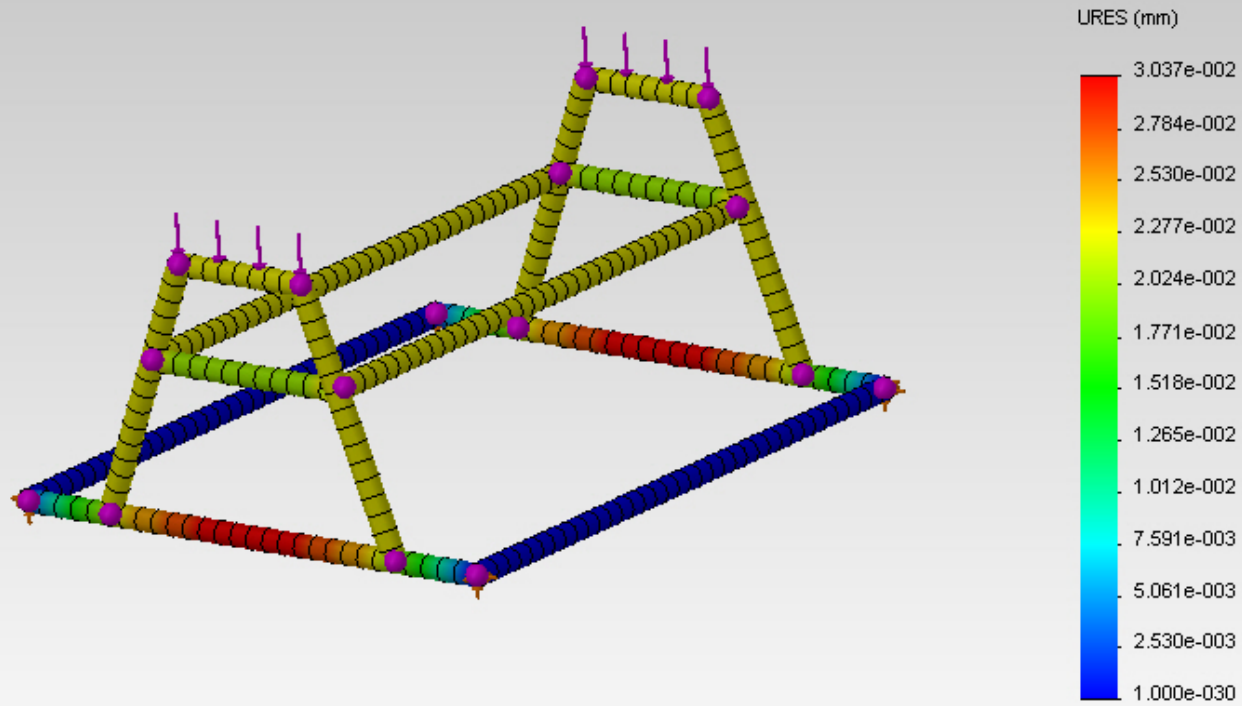
Figura 7. Interfaz gráfica del espectrofotómetro



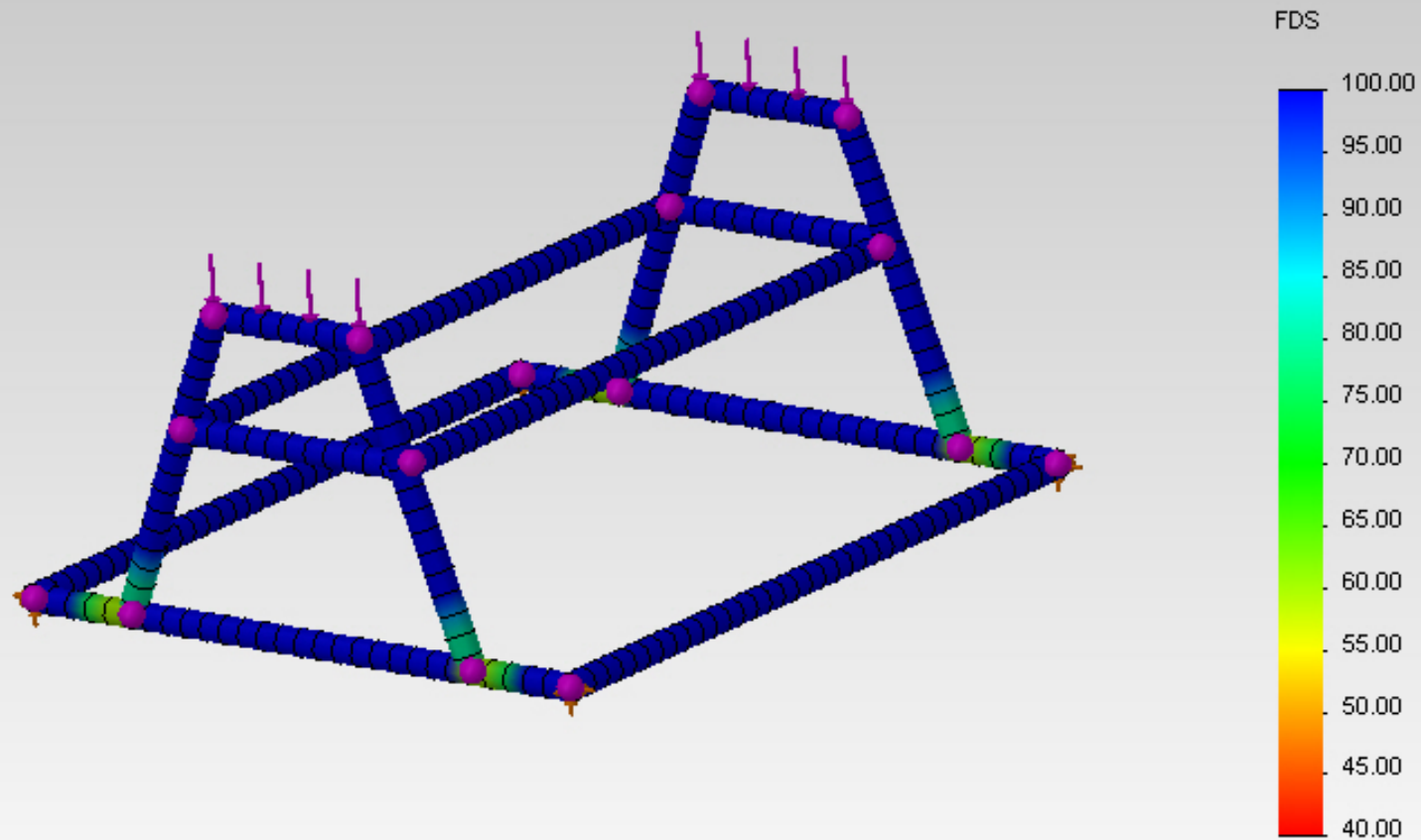
7. Realizar los pasos 1 a 6 para cada una de las probetas.

**ANEXO F. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE POR MÉTODOS  
FINITOS EN SOFTWARE CAE**

Nombre de modelo: soporte estructural calibre 12  
Nombre de estudio: Estudio 2  
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1



Nombre de modelo: soporte estructural calibre 12  
Nombre de estudio: Estudio 2  
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1  
Criterio: Automático  
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 62



Nombre de modelo: soporte estructural calibre 12  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de resultado: Pandeo Desplazamientos1  
Forma modal: 1 Factor de carga = 2113.1

