 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

# **DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR TIPO CANAL PARABÓLICO.**

Esteban Andrés Ramírez Ríos

Tecnología electromecánica.

Asesor:

Juan Gonzalo Ardila Marín

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**Marzo 2 del 2017**

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## RESUMEN

---

En este proyecto se desarrolló un colector solar de canal parabólico buscando que sirva como una herramienta de bajo costo y de fácil manufactura, útil para la investigación de energías renovables. Para este fin se partió por diseñar el colector solar con la ayuda de un software CAD, analizando geometrías y dimensiones para tener exactitud en el tamaño y los materiales a usar.

Teniendo el diseño se procedió con la fabricación del colector haciendo uso de herramientas que la institución posee, apoyados en el diseño previo. Algunos elementos se fabricaron, otros se compraron y al tener todos los elementos se procedió con el ensamble hasta obtener el colector diseñado. Por último se logró poner en marcha el colector verificando su funcionalidad y comprobando que sirviera como banco de pruebas para la investigación de energías alternativas, los resultados obtenidos se plasman mediante tablas, imágenes y gráficos a lo largo del trabajo.

Gracias a la ayuda del software Autodesk Inventor®, la fabricación del colector se simplificó considerablemente, además ayudó a identificar falencias que se observaron mientras hacíamos el ensamble virtual, disminuyendo los errores de diseño. Al usar herramientas avanzadas de manufactura, como el corte laser, se pueden crear formas y geometrías complejas que sin la ayuda de estas herramientas serían difíciles de fabricar, tomarían mucho tiempo y no tendrían la precisión que se obtuvo.

Este colector se quedará en las instalaciones del ITM con la intención de que sea usado por otros estudiantes para la realización de investigaciones y pruebas que ayuden al mejor entendimiento de los diferentes fenómenos físicos que están alrededor de un colector solar.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## RECONOCIMIENTOS

---

A mi familia que sin la ayuda de ellos no hubiera sido posible mi formación académica, que me alentaron y apoyaron en todo momento. A mi hermano Sebastián, persona que admiro y siempre me acompañó y me aconsejó durante mi proceso universitario.

Al docente a Juan Ardila que me apoyo y acompañó durante este proceso, fue paciente y me aportó conocimientos valiosos para la realización del trabajo.

Agradecimientos al grupo de profesores que durante la tecnología me entregaron con el mayor de los gustos conocimientos y experiencias que son y serán de gran utilidad. Y al ITM que me abrió las puertas y me permitió realizar la tecnología en electromecánica, título que me servirá para mi formación laboral abriéndome las puertas a nuevos retos.

A los encargados del laboratorio mecánico y de diseño industrial que nos facilitaron el uso de herramientas y máquinas que ayudaron y simplificaron la manufactura del colector.

Al software de diseño que Autodesk que permite usar de forma gratuita los diferentes paquetes de diseño para fines académicos, fue de gran ayuda y utilidad para el diseño y la fabricación.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Generalidades.....	6
1.2. Objetivos .....	6
General .....	6
Específicos .....	7
1.3. Organización de la tesis.....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Antecedentes .....	8
2.2 Estado del arte .....	8
2.3 Normatividad técnica.....	10
2.4 Colector solar concentrador cilíndrico-parabólico (CCP).....	11
3. METODOLOGÍA .....	12
3.1 Diseño conceptual.....	12
3.2 Diseño de detalle .....	13
3.3 Costos, presupuesto y compras .....	14
3.4 Fabricación .....	15
3.5 Puesta a punto.....	19
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	21
4.1 Diseño conceptual y de detalle.....	21
4.2 Fabricación .....	21
4.3 Puesta a punto .....	22
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	26
5.1 Conclusiones .....	26
5.2 Recomendaciones .....	26
5.3 Futuro trabajo .....	26
REFERENCIAS .....	27

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Generalidades.

Por medio de este trabajo de grado se desea mostrar una forma fácil de desarrollar un colector solar parabólico, buscando masificar el uso de este tipo de artefactos como una solución para la obtención de agua caliente para ser usada en diferentes aplicaciones, haciendo uso de una fuente energética inagotable que no produce material particulado ni gases nocivos. El sol es una fuente energética que no se le ha dado la importancia ni el uso suficiente, esto principalmente por el descubrimiento de los combustibles fósiles que son relativamente fáciles de explotar, lo cual se traduce en bajos costo de producción opacando los avances de las energías renovables que en la actualidad siguen siendo costosas en su implementación. La sociedad ha generado una dependencia a los combustibles fósiles, por lo que se han negado a conocer e implementar nuevas tecnologías que estén a favor del medio ambiente. Potencias mundiales están haciendo esfuerzos para reducir la huella de carbono, acuerdos como el tratado de Kyoto, protocolo de Montreal y el acuerdo de Paris, dan cuenta del cambio climático que se está viviendo por la producción de carbono, principalmente por la quema de combustibles fósiles. Por tal motivo, se debe investigar, desarrollar y llevar a cabo la implementación de energías limpias que disminuyan la generación de gases de efecto invernadero ayudando a mejorar la calidad del aire. Además, siendo Colombia un país rico en recursos naturales, es necesario cuidar y preservar los ecosistemas implementando proyectos que estén en pro del cuidado de éstos y los compromisos de la actual presidencia ante el COP 21 "Colombia se comprometió a reducir el 20% de sus emisiones de gases de efecto invernadero para 2030, con base en un escenario proyectado" (MINAMBIENTE, 2015). Para ello el ministerio de medio ambiente trabaja en la implementación de proyectos de energías renovables y desde la universidad se debe aportar al desarrollo e implantación de proyectos que ayuden a ese cambio.

## 1.2. Objetivos

### General

Desarrollar un colector solar que funcione como herramienta eficiente y de bajo costo para la investigación de energías renovables.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## Específicos

- Diseñar el colector solar con la ayuda de un software CAD, analizando geometrías y dimensiones para tener exactitud en el tamaño y los materiales a usar.
- Fabricar el colector solar con la ayuda de herramientas que posee la institución apoyados en el diseño previo.
- Poner en marcha el colector verificando su funcionalidad y que sirva como banco de pruebas para la investigación de energías alternativas.

### 1.3. Organización de la tesis.

Inicialmente se comienza con el marco teórico donde se orienta al lector y se coloca un poco en contexto del desarrollo de los colectores solares en la historia y su desarrollo en el mundo, se referencian, además, varias investigaciones de colectores solares realizadas por diferentes estudiosos del tema. En el marco teórico se mencionan además las normas técnicas que rigen para Colombia acerca de la fabricación y utilización de equipos que utilizan el sol como fuente energética.

En la sección de la metodología se presenta cómo se dieron el diseño, la fabricación, las compras, el ensamble y la puesta en marcha del colector. Acompañado de imágenes y gráficos se explican paso a paso el desarrollo del colector desde que era una idea conceptual hasta que se realizaron las pruebas de puesta en marcha.

Posteriormente se muestran los resultados obtenidos del proyecto: El diseño CAD final, el costo de los materiales, y los resultados de las pruebas son mostrados con imágenes, gráficos y tablas que ilustran de una mejor manera los resultados obtenidos.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## 2. MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 Antecedentes

Los colectores solares son una herramienta de la cual se tiene conocimiento de existencia desde el año 3 a.C., cuando Arquímedes de Siracusa utilizó un concentrador parabólico hecho con espejos repartidos geoméricamente de forma que concentraban los rayos del sol en un punto y a una distancia específica para quemar las velas de embarcaciones romanas y así evitar un ataque marítimo. En la actualidad existen múltiples aplicaciones que usan los rayos del sol para diferentes objetivos; transformación de la energía mediante paneles fotovoltaicos, calentamiento de agua, limpieza del agua, y en Colombia es muy usado para el secado de café. En zonas frías es común el uso de colectores solares para tener una reserva de agua cálida, por lo cual los colectores se han ido popularizando por todo el mundo, pero no con la rapidez suficiente para generar un cambio ambiental significativo. Gracias a los estudios y avances que se han realizado, en el mundo existen plantas de generación eléctrica que usan el sol como fuente energética con una capacidad superior a los 300MW, una cifra comparable con grandes generadores que usan combustibles fósiles. Una de estas plantas está ubicada en California, es la planta Ivanpah Solar (Imagen 1). Entró en operación en 2014 y tiene una capacidad de 395MW, utiliza 300.000 espejos que reflejan la luz solar a 3 focos instalados en la cima de 3 torres a una altura de 459 pies (140 m), un proyecto colosal que unió esfuerzos de Google, NRG Energy, y BrightSource Energy, para realizar la planta solar más grande del mundo.



Imagen 1. Ivanpah Solar (BBC, 2016).

### 2.2 Estado del arte

Actualmente existen múltiples maneras de crear y desarrollar un colector solar. El autor Javier Cañada Rivera, en compañía del Departamento de Termodinámica Aplicada de la Universidad Politécnica de Valencia, escribió y publicó el libro titulado "Manual de energía solar térmica: Diseño y cálculo de instalaciones". En este libro el autor dedica un capítulo a los componentes de una instalación solar: "En una instalación de energía solar térmica, el agua proveniente de la red

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

de distribución se calienta a su paso por los colectores solares, se almacena en un depósito y de allí se distribuye para el consumo. De forma simplificada, existen 2 configuraciones básicas para producir agua caliente sanitaria: a) circulación directa sin bomba (termosifón) y b) circulación indirecta con bomba" (Cañada Rivera, 2008). En este caso, Cañada se refiere a los colectores solares de placa plana, principalmente para el calentamiento de agua residencial, este tipo de colectores permiten optimizar el proceso de recolección de energía solar, reduciendo al máximo posible la pérdida de calor.

Por otro lado, Alexander Pineda Ríos, realizó su tesis de grado en Ingeniería Mecánica sobre la creación de un concentrador solar cilíndrico parabólico. Pineda propuso "diseñar y construir un colector solar concentrador cilíndrico-parabólico (CCP) con el fin de analizar el comportamiento de éste en las condiciones geográficas del lugar y poder determinar variables termodinámicas y de flujo" (Pineda Rios, 2001). Para cumplir con ello, se realizó un estudio sobre las generalidades de este tipo de colectores que transforman la radiación solar en energía térmica para después, con la energía térmica así producida, generar electricidad. Pineda concluyó que "el CCP está compuesto básicamente por un espejo cilindro parabólico que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo absorbedor colocado en la línea focal de la parábola. Esta radiación concentrada sobre el absorbedor hace que el fluido que circula por el interior del tubo se caliente, transformando de esta forma la radiación solar en energía térmica en forma de calor sensible del fluido" (Pineda Rios, 2001).

Finalmente, Luis Guillermo Vidriales Escobar, como tesis para optar por el título de Maestro en ingeniería (Energía, procesos y uso eficiente de la energía) de la Universidad Nacional Autónoma de México, diseñó un colector cilíndrico parabólico que contribuyera a la investigación, desarrollo e implementación de energías limpias buscando disminuir el consumo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica. Luis Guillermo expone en su trabajo: "los colectores solares de energía son un tipo especial de intercambiadores de calor que transforman la energía de la radiación solar en energía térmica que es transportada mediante un fluido de trabajo. En los concentradores solares, la energía proveniente del sol se concentra en un dispositivo receptor donde dicha energía se absorbe en la superficie y se transforma en calor por conducción. Este calor es removido por un fluido (normalmente aire, agua o aceite) que fluye a través del receptor" (Vidriales Escobar, 2007). Este es un conocimiento básico, pero de vital importancia al momento de realizar cualquier sistema térmico solar.

Algo que cabe resaltar de las conclusiones de Vidriales es: "En general se observa una buena correlación entre las pruebas experimentales y el análisis teórico, de esta manera se validan las variables más importantes que afectan al sistema. Como parte del desarrollo de este proyecto, se sugiere poner especial atención al método de construcción del colector parabólico; los errores por manufactura pueden ser más costosos que una inversión adicional para la mejora en este aspecto. La estructura también es parte importante del colector, pues bajo cargas de viento, seguimiento solar o por el propio peso del colector, puede afectarse su vida útil, haciendo este colector menos

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

competitivo ante las alternativas comerciales" (Vidriales Escobar, 2007). Ésta y las otras conclusiones se tuvieron en cuenta para el desarrollo del colector del presente proyecto, haciendo uso de la experiencia de personas que ya han fabricado este tipo de dispositivos.

## 2.3 Normatividad técnica

En Colombia la entidad encargada de hacer el control y las normas para este tipo de dispositivos y equipos es el ICONTEC, el cual regula la construcción manipulación y uso de elementos que utilicen la energía solar térmica y fotovoltaica. Esta normatividad es más estricta con la energía fotovoltaica que con los colectores solares lo cual nos deja a disposición muchas decisiones de fabricación. Normas como la NTC 1736, NTC 2775, NTC 5513, NTC 5678, NTC 5512, NTC 5509; Hablan de la energía fotovoltaica respecto a la nomenclatura, terminología, la tensión en los módulos fotovoltaicos y sus materiales para la fabricación, ensayos de corrosión y ultravioleta.

Respecto a los colectores solares existe la NTC 2774 (Icontec, 1990) que hace referencia a los materiales aislantes térmicos empleados en los colectores solares y está apoyada en las siguientes normas internacionales ASTM (American Society for Testing and Materials);

- Ignición de superficie: ASTM E84
- Absorción de humedad: ASTM C553
- Absorción de agua: ASTM C209 y ASTM D2842
- Resistencia térmica: ASTM C518, ASTM C177 y ASTM C687
- Contracción lineal: ASTM C356
- Rendimiento con superficie caliente: ASTM C411

La Norma NTC 3507 hace referencia a la instalación de sistemas de agua caliente para uso doméstico que funcionan con energía solar, la cual establece los requisitos mínimos para su buen funcionamiento (Icontec, 1993). La Norma NTC 5291 trata sobre el desempeño, durabilidad y seguridad de los sistemas integrados de calentamiento solar domestico de agua, diseñados para uso en edificaciones pequeñas (Icontec, 2004). La Norma NTC 5434 especifica los requisitos de durabilidad (incluyendo resistencia mecánica), confiabilidad y seguridad de los colectores solares para calentamiento de líquidos; además, incluye las disposiciones para la evaluación de conformidad de dichos requisitos (Icontec, 2011). La NTC 4368: eficiencia energética, habla de los sistemas de calentamiento de agua con energía solar y sus componentes, y de los métodos para obtener la eficiencia térmica (Icontec, 1997). Varias de las normas anteriormente mencionadas han sido tomadas en referencia a normas europeas de la International Electrotechnical Commission – IEC, los cuales se dedican a trabajar en temas de energía solar.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## 2.4 Colector solar concentrador cilíndrico-parabólico (CCP)

El colector solar consta de 3 elementos principales (Imagen 2):

- Parábola reflectora**  
 Es la parte más importante y crítica del colector; su función es recibir de forma directa la energía emitida por el sol. La precisión en la fabricación de este elemento es de vital importancia para el buen funcionamiento del sistema.
- Tubo absorbente**  
 Ubicado en el foco de la parábola, es la pieza que recibe con mayor intensidad los rayos del sol una vez son reflejados. Dado que la parábola permite que por medio de la refracción se dé una mayor concentración de la energía en un punto exacto, la ubicación del tubo es clave para tener el mayor aprovechamiento de la radiación solar. Por esta tubería se transporta el fluido de trabajo y su eficiencia depende directamente del material y el espesor del cual está fabricado, los metales son ideales para esta tarea ya que poseen una alta transferencia de calor en especial el cobre y el aluminio.
- Estructura de soporte**  
 Es el soporte de la parábola reflectora, el tubo absorbente y los demás accesorios. En el actual proyecto se fabricó con MDF por ser un material de bajo costo y peso, y fácil manufactura que permitió ser manipulado por la cortadora laser disponible.

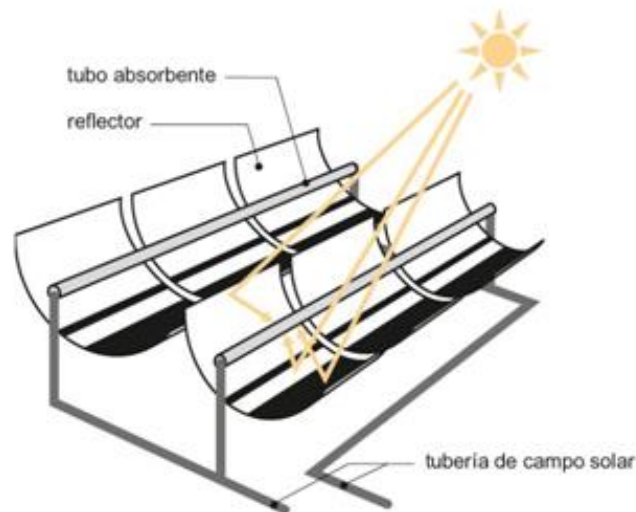


Imagen 2. Esquema básico colector solar parabólico (Vidriales Escobar, 2007).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Diseño conceptual

Para el desarrollo del colector se tuvieron en cuenta diferentes parámetros, buscando disminuir el costo, aumentar su eficiencia y facilitar su fabricación. Inicialmente se hicieron diseños conceptuales y esquemas para llegar a un diseño definitivo donde se pudiera tener mayor claridad del colector. En una primera instancia se realizó un diseño conceptual en el cual, por medio de una lluvia de idea, se fue plasmando poco a poco el concepto que se buscaba para el colector, pensando y decidiendo cosas como elementos, materiales, formas, entre otros. Inicialmente se eligió la parábola como perfil de trabajo por su simplicidad de funcionamiento, los rayos del sol inieren en la lámina reflectora y esta gracias a su geometría refleja los rayos en el tubo absorbente mejorando su capacidad térmica, como se muestra en la Imagen 3. La parábola se obtiene fácilmente usando una ecuación de grado 2 presentada en la Imagen, a la cual se le halla su foco para saber la ubicación del tubo absorbente.

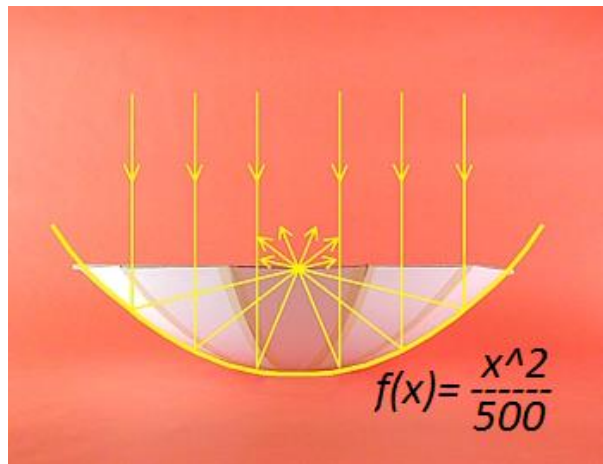


Imagen 3. Parábola. Fuente propia.

Para el tamaño, fue necesario decidir la ecuación de curva que se deseaba usar, y en base a esta hacer las piezas que soportarían la lámina reflectora. Teniendo esta curva seleccionada se decidió la geometría. La ecuación seleccionada fue:  $y = \frac{x^2}{500}$  [mm]. Se escogió esta ecuación ya que se adapta a las dimensiones que se estipularon para el colector. Su foco se ubica a una altura de **12.5 cm** lo cual es una altura que nos permite tener una separación adecuada entre el tubo absorbente y la lámina reflectora.

Se propusieron varias formas de sostener la lámina reflectora y el tubo, dependiendo de las características del material que se proponía para usar. Después de analizar varias propuestas, se

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

decidió hacer la estructura con piezas encajables entre sí para facilitar su ensamble. Inicialmente se pensó en una estructura metálica para sostener la lámina reflectora pero rápidamente fue descartada por su alto peso. Se pensaron en otras opciones como acrílico o madera, pero al final se decidió por el MDF ya que cumplía con las exigencias.

### 3.2 Diseño de detalle

Para el diseño CAD se usó el software Autodesk Inventor®. Software que trabaja bajo un sistema de modelado paramétrico de sólidos en 3d. Se inició haciendo el sketch en 2 dimensiones ingresando al software la ecuación de la curva seleccionada, obteniendo el perfil de las 5 costillas del cuerpo principal como se muestra en la Imagen 4. Estas piezas poseen pestañas para facilitar el ensamble con los tablonces laterales que sirven de soporte para obtener una estructura rígida y alineada. Posteriormente se realizó la extrusión a 5.5mm del plano de referencia que es la medida del tablón de aglomerado.

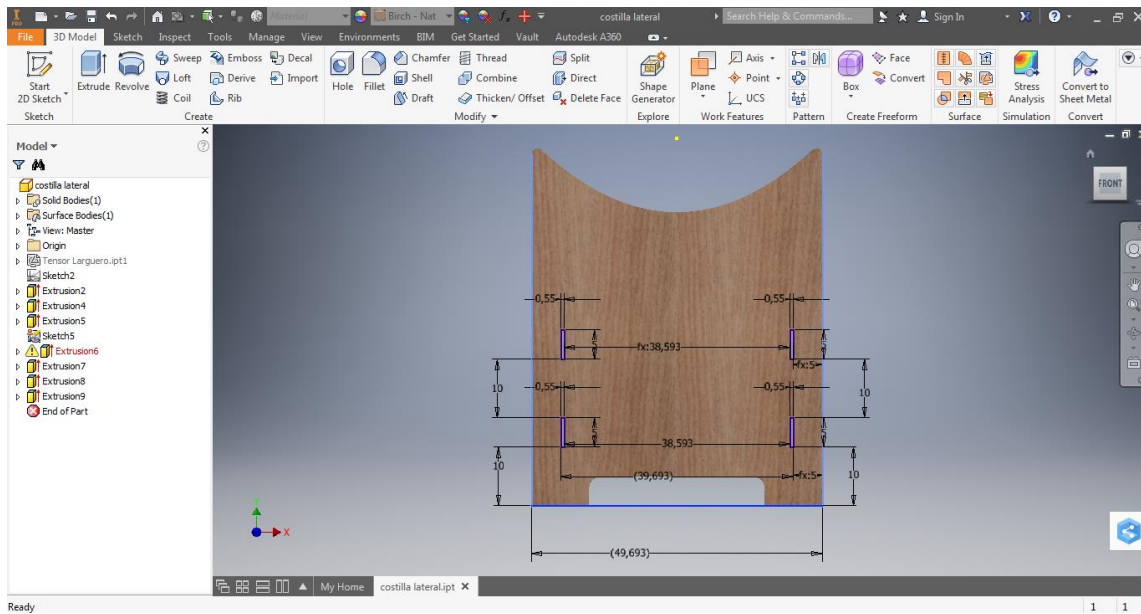
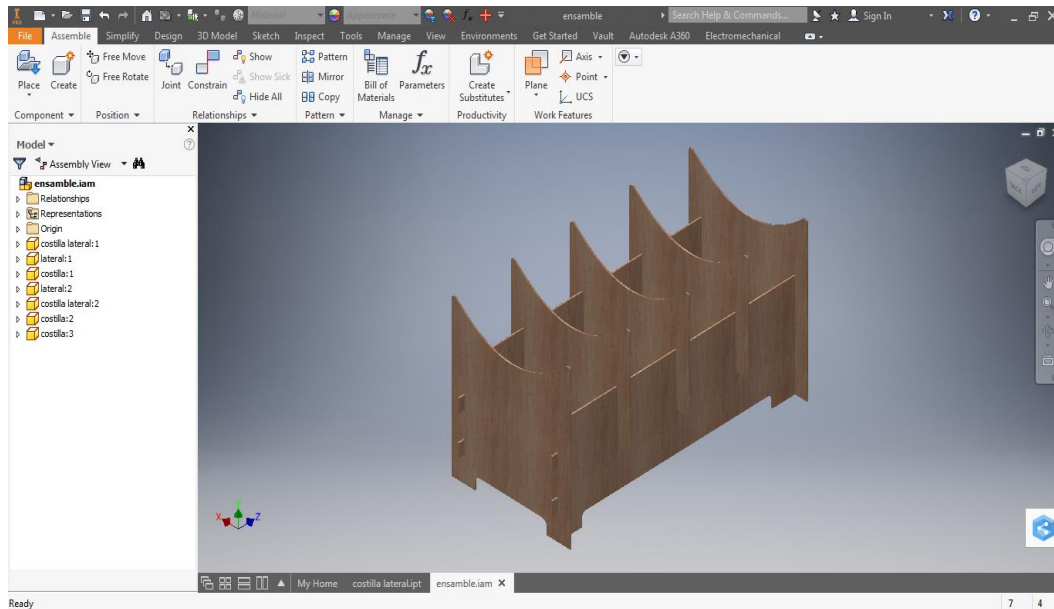


Imagen 4. Diseño de costilla del colector. Fuente propia.

El cuerpo del colector se compone de 7 elementos básicos todos fabricados en aglomerado de madera MDF cortados con láser. Son 5 las costillas que soportan la lámina reflectora y 2 tablonces laterales que ayudan a sostener y mantener alineadas las costillas para que todas estén a la misma altura y no se afecte la geometría de la curva a lo largo del colector. Las 7 piezas del colector se diseñaron para que encajaran unas con otras de tal modo que se pudiera armar y desarmar con la mano y así evitar usar elementos de sujeción como tornillos, clavos o adhesivos. Teniendo las partes modeladas, se hizo el ensamble como se muestra en la Imagen 5. Usando la herramienta de ensamble se pudo verificar que todas las piezas encajaran entre ellas evitando problemas después del corte del MDF al momento de hacer el ensamble real.

 <b>Institución Universitaria</b>	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27



**Imagen 5. Cuerpo ensamblado. Fuente propia.**

Mientras se hacía el diseño, se decidió usar una lámina de polipropileno para la superficie reflectora, este polímero al tener una alta resiliencia, hace que la lámina no se apoye sobre la curva de la costilla solo por la acción de la gravedad, sino que en todo momento va a querer retomar su forma plana original. Esto nos obligó a implementar un accesorio extra en cada costilla para así evitar que la lámina retomara su forma plana. Esta pieza se unió a la costilla con un tornillo y una tuerca pasante y así lograr la rigidez suficiente para evitar que la lámina retomara su forma plana. Este accesorio se diseñó y se cortó de igual manera con láser.

Se diseñaron los soportes para el tubo absorbente de tal forma que el centro del tubo estuviera a 12.5 cm de la superficie de la curva ya que ahí se encuentra el foco. La precisión en esa pieza, fue crucial para obtener un buen funcionamiento ya que tener bien posicionado el foco, los rayos inciden en el lugar exacto donde está la tubería aprovechando al máximo la radiación reflejada por la lámina. Piezas como la tubería, tanque, tornillos y tuercas se tomaron de medidas estándar y algunas se obtuvieron de la librería del software lo cual facilitó el ensamble evitando hacer toda la pieza desde cero.

### **3.3 Costos, presupuesto y compras**

La lista de los materiales, elementos y/o componentes requeridos para el desarrollo del prototipo de colector es la siguiente, ella fue elaborada a partir del diseño conceptual y definida en el diseño de detalle, así: Tablón aglomerado 1.53 x 2.44, Bomba de agua, Lámina polipropileno, Plástico lámina, Tubería cobre ½ in 1.2m, Tubería flexible ½ in 3m, 2 tes de cobre ½ in, Abrazaderas para manguera, Caneca plástica, Tornillos + tuerca + arandela, Válvula de bola ½ in metálica.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

La primera compra que se realizó fue el tablón de aglomerado (MDF), el cual se cotizó inicialmente por internet y posteriormente en almacenes de la zona aledaña a la estación Cisneros del metro. En estos almacenes se hizo la cotización del tablón completo de 5.5mm de espesor, pero en las tiendas se ofrecían tablonces de diferentes tamaños a diferentes precios, lo cual no permitía saber con claridad cuál era el más económico, con ayuda de Excel se realizó la Tabla 1, en la cual se relaciona el precio y el área del tablón para tener certeza de cuál era el almacén indicado.

**Tabla 1.** Relación precio / área de tablón de aglomerado según proveedor. Fuente propia.

	A	B	C	D	E	F	G
1	empresa	medidas (cm)	area (cm2)	espesor (mm)	precio		relacion area precio(\$/cm2)
2							
3	tm codemaco	153x244	37332	5,5	36000		0,964320154
4	tm codemaco	183x244	44652	5,5	43100		0,965242318
5	la tienda del triplex	215x244	52460	5,5	52000		0,991231414
6	FyC	183x244	44652	5,5	55240		1,237122637
7	districondor	183x244	44652	5,5	63000		1,410911045

La bomba seleccionada fue una Resun CS-1000 usada comúnmente para pequeñas peceras. Esta bomba posee un caudal máximo de 1000 litros/hora de agua bajo condiciones ideales, caudal suficiente para la necesidad del proyecto y para futuras aplicaciones. La boquilla de salida tiene un diámetro fácilmente adaptable a la tubería flexible de ½ in con que fue diseñado. Esta bomba de igual modo se cotizó por internet con diferentes almacenes y proveedores de artículos para peceras, pero el mejor precio se encontró en la carrera Sucre cerca al parque Bolívar donde hay una alta densidad de almacenes para peces y mascotas.

Accesorios como Tes, válvula, tubería de cobre, entre otros, se cotizaron y compraron cerca de la estación alpujarra del metro. En esta zona hay una alta comercialización de artículos para sistemas hidráulicos y de gas domiciliario, se cotizó en almacenes como El Distrito Ferretero, Ferro Válvulas, Racores S.A., Gas y Agua, Mundial de Gas y Agua, J.A. Grifos y Enchapes. Después de recorrer la zona, se realizó la compra el almacén “Pal Hogar” el cual nos ofreció los mejores precios en la mayoría de los accesorios que se necesitaban.

### 3.4 Fabricación

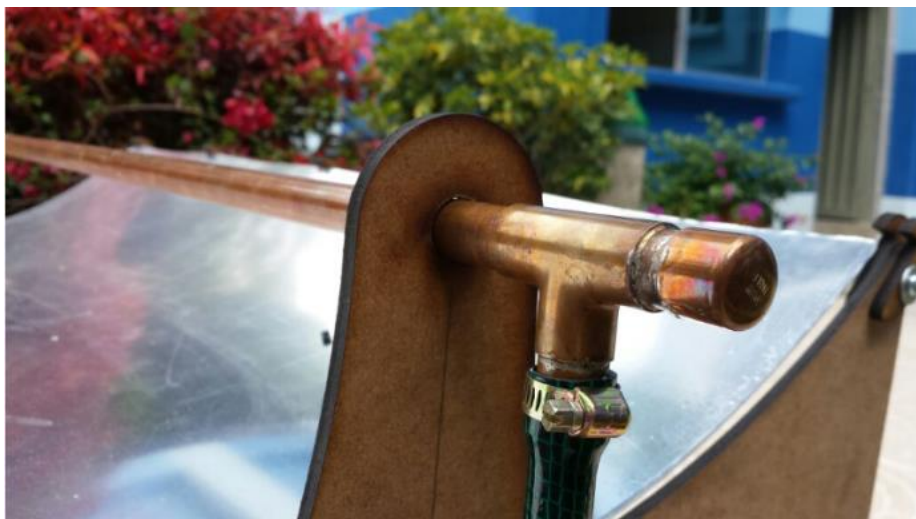
Antes de comprar el MDF se tomó la precaución de saber si la cortadora laser del ITM tuviera la capacidad suficiente para cortar la lámina con espesor de 5.5mm, al comprobarlo se realizó la compra y se empezó el proceso de fabricación del cuerpo del colector. Teniendo el MDF, se realizaron los cortes básicos ofrecidos por el almacén con herramienta de corte giratoria y se obtuvieron las secciones rectangulares. Como se muestra en la Imagen 6, estas secciones son ingresadas posteriormente a la cortadora SENFENG 1390 y allí se hacen los cortes diseñados anteriormente en el software, obteniendo la geometría con las tolerancias adecuadas para realizar el ensamble y obtener la estructura rígida que ayude a soportar los elementos del colector.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27



**Imagen 6. Corte laser de costilla. Fuente propia.**

En el cortador láser se hizo el corte de las 5 costillas, 2 tabloncillos laterales, 2 soportes para el tubo absorbente y los 20 retenedores que ayudaron a mantener la lámina en su lugar. Una vez listas las costillas y los laterales, comprobamos que encajaran unas con otras obteniendo la estructura rígida que se había deseado. Una vez encajadas las piezas notamos que era estético y los cortes con láser le daban un aspecto rústico agradable a la vista. La tubería absorbente se encuentra acoplada en cada extremo a una Te para unir de esta la tubería flexible como se muestra en la Imagen 7. Ambas piezas se unieron con soldadura de estaño asegurándonos de tener los soportes de MDF insertados en la tubería, ya que al estar soldadas las Tes, no sería posible introducirlos. A cada Te se le adaptaron unos tapones en los extremos para que en futuros trabajos se le adapten instrumentos de medición como termómetros, estos tapones fueron también soldados con estaño.



**Imagen 7. Tubería absorbente soldada y acoplada. Fuente propia.**

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

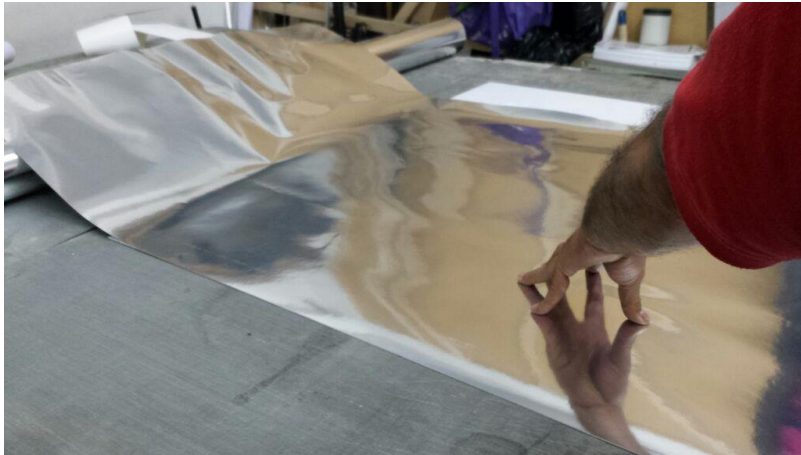
Antes de la compra de la bomba, se verificó que el diámetro del tubo salida fuera de fácil acople con la tubería flexible de ½ in que se estaba usando. Esta tubería se aseguró con abrazadera metálica para tener un buen ajuste y evitar fugas como se ve en la Imagen 8.



**Imagen 8. Bomba acoplada. Fuente propia.**

La lámina reflectora se debía seleccionar de un material que tuviese la reflectancia suficiente para transferir los fotones emitidos por el sol al tubo absorbente, además debía poseer la flexibilidad adecuada para adaptarse a la curva. Sería ideal hacerlo con un espejo, el cual es económico y con una alta reflectancia, pero éste es de un material con alta rigidez, la cual no serviría para adaptarse a la curva. Se consideró usar una lámina de aluminio, la cual posee ambas características, pero su elevado costo hizo descartar dicha opción. Se optó por usar una lámina de polipropileno blanca de un espesor de 0.8mm la cual tiene una flexibilidad alta que permite adaptarse sin ningún problema a la curva del cuerpo. Esta lámina se plastificó posteriormente con un adhesivo metálico color plata como se muestra en la Imagen 9, dando una apariencia de espejo cumpliendo con ambas características solicitadas inicialmente. Esta lámina posee una reflectancia de entre 66 y 75.2% en un rango de radiación UV de 300 a 540 nm. (Red iberoamericana de potabilización y depuración del agua, 2001)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27



**Imagen 9. Lámina reflectora. Fuente propia.**

El cobre (copper) posee una alta transferencia de calor, solo superado por el oro y la plata, debido a esto se selecciona cobre para la tubería absorbente; es un metal fácil de conseguir, fácil de trabajar y de un costo aceptable. La tubería de cobre tiene la característica de que es comúnmente usada para gas domiciliario y transporte de agua, por tal motivo existen diferentes accesorios estándar que simplifican el trabajo de manufactura. Se seleccionó una tubería con un diámetro de ½ pulgada, diámetro suficiente para recibir los rayos reflejados por la lámina y los que recibe de forma directa. Para acoplar la tubería al cuerpo, se diseñaron y fabricaron unos soportes que al ensamblarlos quedan exactamente a la altura donde se encuentra el foco (12.5 cm), estos se unieron de igual forma con tornillos tuercas y arandelas como se muestra en la Imagen 10.



**Imagen 10. Tubería y láminas acopladas. Fuente propia.**

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

### 3.5 Puesta a punto.

Una vez ensamblado el colector, se empezó la fase de ensayos. El principal objetivo del colector era aumentar la temperatura del agua, para lograrlo era necesario hacer los ensayos en días soleados con cielo despejado. Se hicieron las pruebas a finales del mes de enero y principios de febrero, fechas en las cuales se esperaba un clima favorable, pero fue difícil tener certeza del clima en Medellín. Por tal motivo se cancelaron varias de las pruebas programadas por las abundantes nubes que obstaculizaban el ingreso del sol. Las pruebas se realizaron durante el cenit de medio día entre las 10:00 am y las 2:00 pm. Como se observa en la Imagen 11, se alineó el tubo con la dirección del sol de modo que la sombra formara un ángulo de 90° sobre la lámina reflectora asegurando que los rayos incidieran de forma perpendicular a lo largo de todo el colector, así se logró un mejor aprovechamiento de la radiación solar.



**Imagen 11. Colector en funcionamiento. Fuente propia.**

Para las pruebas fue necesario usar elementos de medición para la temperatura del agua, se usaron 2 termómetros de mercurio que fueron prestados del Laboratorio de Metrología. Al usar ambos termómetros se buscaba tener un poco más de precisión al momento de tomar las temperaturas, ambos resultados en todo momento fueron iguales lo que nos da indicios de que ambos termómetros contaban con una buena calibración. Como se muestra en la Imagen 12, en el tanque se dispuso de 5 litros de agua tomados de la red de agua de EPM, esta agua posee una temperatura de aproximadamente 23 °C al salir del grifo. En el tanque se colocó la bomba sumergible de tal modo que el impeler estuviera totalmente sumergido para evitar burbujas de aire que generan cavitación, esta cavitación produce daños en las tuberías y en la misma bomba por lo cual se debe evitar en todo momento. El agua al salir de la bomba es obligada a circular inicialmente por la tubería flexible y posteriormente por el tubo absorbente donde obtiene el gradiente de temperatura, continúa su trayectoria por tubería flexible donde tiene acoplada la

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

válvula esférica abierta al 30% para tener una circulación lenta haciendo que el agua esté por más tiempo en el tubo absorbente para tener un mejor intercambio de calor. El agua regresa al tanque e inicia de nuevo el ciclo.

Se posicionó el colector en una zona donde estuviera despejado de árboles, edificios y otros elementos que interfirieran en la trayectoria del sol. Se conectó la bomba a la red eléctrica y se dio inicio a las pruebas.



Imagen 12. Tanque y colector durante la prueba. Fuente propia.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Diseño conceptual y de detalle

Las piezas del colector se fueron modelando una por una en el software hasta tener cada una de las piezas que lo componían, estas se acoplaron formando un ensamble que permitió ver con más detalle el colector completo como se muestra en la Imagen 13.

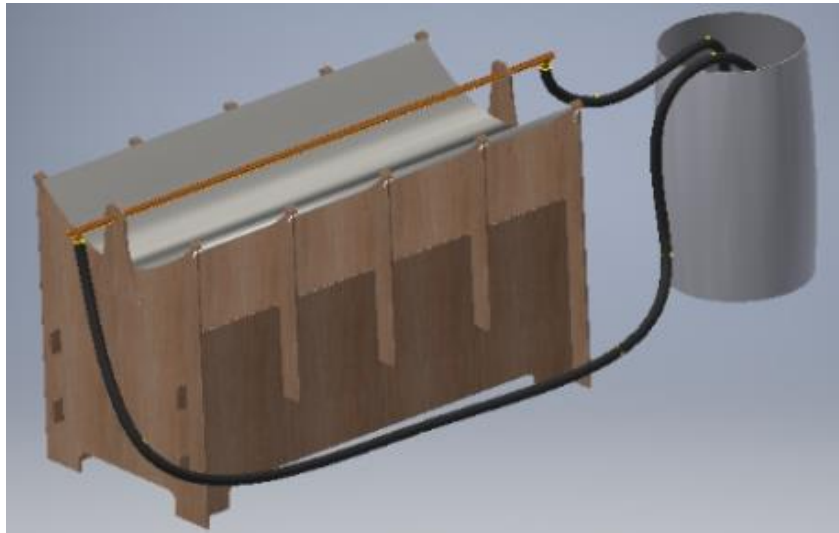


Imagen 13. Diseño final CAD. Fuente propia.

Este diseño fue de gran importancia para el proyecto porque permitió tomar decisiones importantes para la fabricación. En él se observaron las posibles falencias que podría tener el colector y se lograron corregir antes de fabricar piezas y comprar accesorios innecesarios o de diferentes especificaciones.

### 4.2 Fabricación

Para la fabricación fue necesario realizar la compra de todos los elementos, los cuales se presentan en la Tabla 2 con sus costos y proveedores.

Tabla 2. Elementos proveedores y costos. Fuente propia.

Elemento	Almacén	Costo
Tablón aglomerado 1.53 x 2.44	Tm Codemaco	36.000
Bomba de agua	El Acuarista	86.000
Lámina polipropileno	Innova	25.000
Plastificado lámina	Innova	20.000

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Elemento	Almacén	Costo
Tubería cobre ½ in 1.2m	Pal hogar	9.400
Tubería flexible ½ in 3m	Pal hogar	2.400
2 tes de cobre ½ in	Pal hogar	2.800
Abrazaderas para manguera	Pal hogar	600
Válvula de bola ½ in metálica	Pal hogar	7.500
Tornillos + tuercas + arandelas	Pal hogar	2.000
Caneca plástica.	Plásticos de Medellín	15.000
	<b>Total:</b>	204.300

Se considera que el colector tuvo un bajo costo en relación al beneficio que se puede obtener de él, es un equipo que, siempre y cuando las condiciones climáticas lo permitan, puede ser usado a diario evitando el uso de energía eléctrica o gas natural para el calentamiento del agua, los cuales son cobrados en la factura de servicios públicos. La vida útil del colector será definida por el MDF ya que es la pieza que más desgaste puede sufrir en especial si sufre contacto constante con el agua, pero, siempre y cuando se tenga un buen cuidado, se le puede dar uso por un largo tiempo.

La manufactura fue realizada por el integrante del proyecto en los talleres del ITM, por lo cual no se contemplan en los costos del proyecto. Después de tener todos los materiales, elementos y accesorios, se dio inicio a la fabricación. Haciendo uso de las herramientas que el ITM posee, se facilitó el trabajo y se obtuvo una alta precisión en los elementos fabricados. Una por una, estas piezas se fueron acoplando hasta obtener el colector solar. El primer elemento fabricado fue la estructura de MDF que es la base para el soporte de los accesorios. Como se muestra en la Imagen 14, esta estructura encajó sin problemas y poseía la rigidez necesaria para el ensamble del resto de componentes. A medida que se iban fabricando el resto de componentes se fueron acoplando a esta estructura por medio de tuercas y tornillos. Los otros accesorios se fueron adicionando a medida que se avanzaba en la fabricación hasta obtener el colector completo como se muestra en la Imagen 15.

### 4.3 Puesta a punto

Como se mencionaba en el capítulo anterior, las pruebas se realizaron en días soleados, sin embargo, hubo que cancelar algunas pruebas, y otras contaron con nubes durante lapsos de tiempo que entorpecieron el buen funcionamiento del colector. Se realizaron 4 pruebas buscando recolectar la mayor cantidad de datos posible. La primera se llevó a cabo el día 23 de enero las otras el 24 y 27 de enero y una última el 2 de febrero. Todas con las mismas condiciones: 5 litros de agua tomadas de la red de acueducto de EPM y en todo momento los termómetros sumergidos por completo en el agua para tomar datos de temperatura cada 10 minutos durante toda la

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

prueba. Los resultados son los mostrados en la Imagen 16, donde se presenta el gráfico de la temperatura del agua vs la hora a la que se tomaron los datos de temperatura.



**Imagen 14. Estructura ensamblada. Fuente propia.**



**Imagen 15. Colector completo en funcionamiento. Fuente propia.**

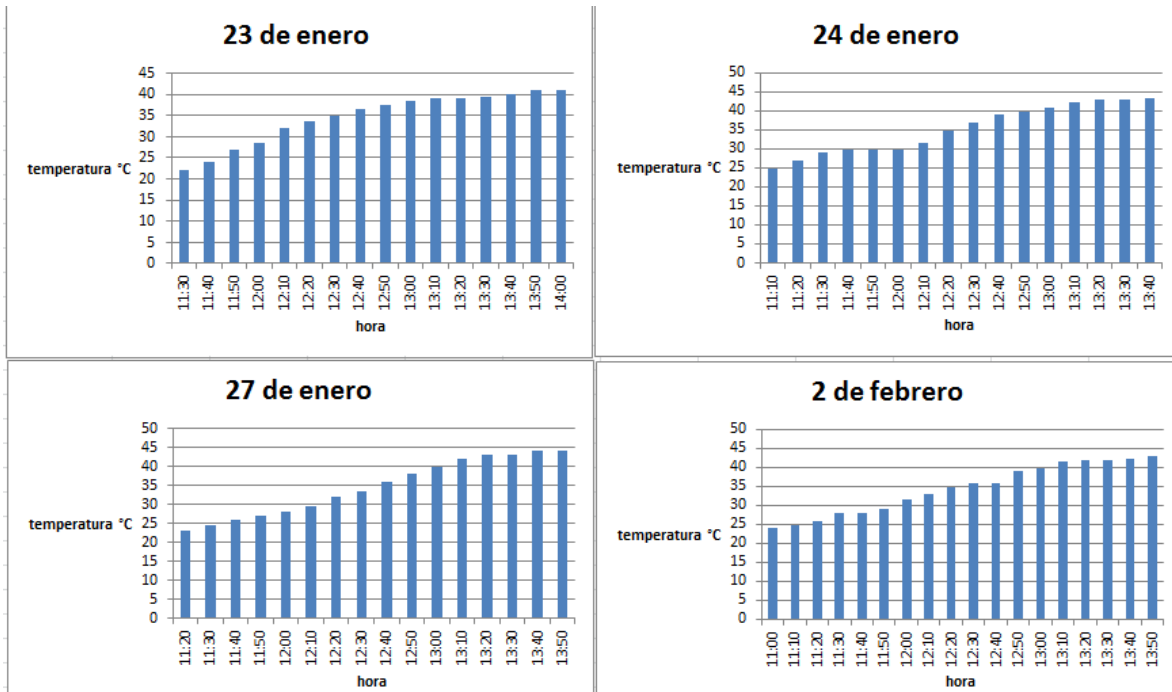


Imagen 16. Resultados pruebas. Fuente propia.

El día que tuvo las mejores condiciones climáticas fue el 23 de enero, ese día el sol fue constante y fuerte permitiendo que el incremento de la temperatura fuera constante, mientras que, en las pruebas del 24 de enero y 2 de febrero, hubo algo de nubes que por momentos se interponían entre el sol y el colector afectando el normal incremento de la temperatura, pero a pesar de esas nubes, el cambio de temperatura fue constante en casi todas las pruebas.

Para obtener el calor específico  $C_p$  y la densidad del agua, se utilizó el polinomio propuesto por Zachár en su artículo "Analysis of coiled-tube heat exchangers to improve heat transfer rate with spirally corrugated Wall" (Zachár, 2010) donde el autor utiliza polinomios para tener un valor más certero de la densidad y el calor específico para el agua a diferentes temperaturas. Las formulas presentadas por Zachár son:

$$\rho(T) = 998.25 - 0.123261T - 0.00131119T^2 - 0.0000121406T^3 \quad (1)$$

$$C_p(T) = 4222.62 - 0.694932T + 0.00624126T^2 + 8.29448 \times 10^{-6}T^3 \quad (2)$$

Son ecuaciones de grado 3 para hallar la densidad y el  $C_p$  del agua en función de su temperatura de un modo más preciso. Usando la ecuación  $\rho = \frac{m}{v}$  se halló la masa de agua usada en nuestras pruebas, ya que la masa de agua es función de la densidad  $\rho$  la cual a su vez es función de la temperatura que durante las pruebas aumento su valor.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

El volumen de agua es conocido, para cada prueba se tomaron 5 litros de agua lo que es equivalente a  $v = 0.005m^3$ . Con este valor y el obtenido de la ecuación 1, se obtiene la masa de agua:

$$m = \rho * v \quad (3)$$

Con la ayuda de Microsoft Excel, se introdujo la ecuación (1), (2) y (3) y se tabularon en base a las temperaturas obtenidas en cada una de las pruebas calculando la densidad y masa iniciales, y el Cp promedio del agua. Estos resultados se promediaron y se plasman en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Datos pruebas. Fuente propia.

Prueba	T1 (°C)	T2 (°C)	Tiempo (seg)	Cp (promedio)
1 (enero 23)	22	41	5400	4207,41537
2 (enero 24)	25	43.5	5400	4206,6527
3 (enero 27)	23	44	5400	4206,94063
4 (febrero 2)	24	43	6600	4206,89111

Usando la ecuación:

$$Q = mC_p(T_2 - T_1) \quad (4)$$

Se obtiene la energía en forma de calor absorbida por el agua este día.

Teniendo el calor Q, dividimos por el tiempo que duró la prueba y obtenemos la potencia.

$$P(kW) = Q(kJ)/t(seg) \quad (5)$$

Con los datos obtenidos en la Tabla 3 y usando las ecuaciones (4) y (5) se obtienen los resultados reportados en la Tabla 4 donde se muestran para cada una de las pruebas.

La bomba utilizada (Resun CS1000) tiene un consumo de 15W, por lo tanto, la potencia neta obtenida será:

$$potencia\ neta = potencia\ sola\ recolectada - potencia\ de\ bombeo.$$

**Tabla 4.** Resultados pruebas. Fuente propia.

Prueba	T2 - T1 (°C)	Q (KJ)	Potencia (W)	potencia neta (W)
1 (enero 23)	19	395.7486617	73.287	58.287
2 (enero 24)	17.5	365.0861548	67.609	52.609
3 (enero 27)	19	396.4984372	73.426	58.426
4 (febrero 2)	19	396.5008511	60.076	45.076

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

### 5.1 Conclusiones

En este trabajo se plasma el trabajo y los resultados obtenidos por un modelo de un colector solar de canal parabólico, varios de estos resultados fueron obtenidos mediante ensayos experimentales los cuales son plasmados en el trabajo. Este trabajo llegó hasta la fabricación y puesta en marcha, nuestro objetivo de aquí en adelante seguir trabajando en este colector u otros, realizando mejoras y haciéndolo cada vez más instrumentados y automatizado.

Gracias a la ayuda del software Autodesk Inventor, la fabricación del colector se simplifica considerablemente. El software permite obtener bocetos en el formato indicado para hacer los cortes laser, haciendo que se reduzcan los errores cometidos durante esta fase. Se puede obtener con mayor certeza la cantidad de material a usar, reduciendo su costo.

Al usarse herramientas avanzadas de manufactura como el corte laser, complementado con un buen software de diseño. Se pueden crear formas y geometrías complejas que simplifican la fabricación de las diferentes piezas que sin la ayuda de estas herramientas serían difíciles de fabricar y tomarían mucho tiempo.

Este colector se quedará en las instalaciones del ITM buscando que sea usado por otros estudiantes para la realización de investigaciones y pruebas que ayuden al mejor entendimiento de diferentes fenómenos físicos que ocurren alrededor de un colector solar.

### 5.2 Recomendaciones

Existe una estrecha relación entre el diámetro del tubo absorbente y la lámina reflectora, usando esta relación se puede desarrollar un colector con mejores características mejorando su desempeño.

### 5.3 Futuro trabajo

Si se va a usar polipropileno para la lámina, procurar que la curva de la costilla lleve pestañas para evitar que la lámina retome su forma. Esto evita colocar elementos de sujeción para la lámina facilitando la fabricación y el ensamble.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

## REFERENCIAS

---

- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica*. Ciudad de México: Mc Graw Hill.
- Escobar, L. G. (2007). *Colector de canal parabólico para la generación directa de vapor para calor de proceso*. Ciudad de México: Universidad Autónoma de México.
- Icontec. (1990). *Energía solar. Evaluación de materiales aislantes térmicos empleados en colectores solares*. Bogotá: Instituto colombiano de normas técnicas y certificación.
- Icontec. (1993). *Energía solar. Instalación de sistemas domésticos de agua caliente que funciona con energía solar*. Bogotá: Instituto colombiano de normas técnicas y certificación.
- Icontec. (1997). *Eficiencia energética. Sistemas de calentamiento de agua con energía solar y componentes*. Bogotá: Instituto colombiano de normas técnicas y certificación.
- Icontec. (2004). *Sistema de calentamiento solar doméstico de agua*. Bogotá: Instituto colombiano de normas técnicas y certificación.
- Icontec. (2011). *Sistemas solares térmicos y componentes. colectores solares, parte 2: Métodos de ensayos*. Bogotá: Instituto colombiano de normas técnicas y certificación.
- MINAMBIENTE. (15 de 07 de 2015). *Ministerio de medio ambiente Colombia*. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=1913:colombia-se-compromete-a-reducir-el-20-de-sus-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-para-el-ano-2030>
- Rios, A. P. (2001). *Diseño y Construcción de un colector cilíndrico parabólico*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Rivera, L. J. (2008). *Manual de energía solar térmica*. Valencia: Universidad Politécnica del Valle.
- Zachár, A. (2010). Analysis of coiled-tube heat exchangers to improve heat transfer rate with spirally corrugated wall. *Elsevier*, 3.

