

**PROPUESTA DE UN PROTOTIPO TERMOSOLAR BASADO EN RESIDUOS DE
APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS PARA ZONAS RURALES EN
VALLES INTERANDINOS DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA**

**GUSTAVO ADOLFO MINA MERA
JULIAN ANDRES VIVAS PEREIRA**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
2016**

**PROPUESTA DE UN PROTOTIPO TERMOSOLAR BASADO EN RESIDUOS DE
APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS PARA ZONAS RURALES EN
VALLES INTERANDINOS DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA**

**GUSTAVO ADOLFO MINA MERA
JULIAN ANDRES VIVAS PEREIRA**

**Trabajo de grado en la modalidad de proyecto de investigación para optar al
título de Ingeniero Ambiental**

Director: Mg. Juan Fernando Flórez Marulanda

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
2016**

NOTA DE ACEPTACIÓN

El director y los respectivos jurados han leído este documento escuchando la sustentación del mismo por su autor y lo encuentran satisfactorio

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, febrero de 2016

DEDICATORIA

Gustavo Adolfo Mina Mera

A Dios por las cosas increíbles que nos regala, por guiar mis pasos, por brindarme oportunidades impensables, por permitirme conocer personas maravillosas y por estar conmigo en todo momento.

A mi mamá Yadira Mera Castillo por el amor infinito que me brinda, por el apoyo incondicional, por escucharme y aconsejarme, por los esfuerzos sobrehumanos que hace día a día en pro del bienestar de sus hijos, y porque debió sacrificar su futuro por el de su familia, sencillamente todo mi cosmos gira entorno a mi “negra hermosa” y este logro es totalmente de ella.

A mis tías Victoria Mera y Martha Mera y a mis tíos que me apoyaron de todas las formas posible. A mi padre Jesús Mina por sus consejos y en general a mi familia que siempre está en las buenas y en las malas.

A mis amigos y profesores por ser fundamentales en cada etapa de mi vida.

Julián Andrés Vivas Pereira

A mi madre por hacer de la realización de mis sueños y metas, su objetivo principal en la vida y este es su resultado.

A mi esposa por enseñarme que las pequeñas cosas y los pequeños momentos son los elementos fundamentales en la construcción de nuestro camino.

A mi hijo por despertar en mí responsabilidad y perseverancia.

A mis suegros por apoyarme en este largo camino.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la UNIVERSIDAD DEL CAUCA y a cada una de las personas que integran esta institución por brindar una formación académica de calidad y por instruirnos como seres de bien y positivamente útiles para la sociedad.

A las RESIDENCIAS UNIVERSITARIAS MASCULINAS 4 DE MARZO por ser parte fundamental en el desarrollo de la mejor etapa de nuestras vidas al brindarnos condiciones óptimas para el crecimiento intelectual, social y personal, además de ser un espacio que posibilita el alcanzar metas que de otra forma sería imposible lograr.

Al Mg. JUAN FERNANDO FLÓREZ MARULANDA, por asesorarnos, guiarnos, por compartir sus conocimientos y por ser nuestro “polo a tierra” durante el desarrollo de esta idea.

Al PhD. JAVIER FERNANDEZ que nos aconsejó para no abandonar nuestras ideas y trabajar en ellas.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	9
1.1	MARCO TEÓRICO EN SISTEMAS TERMOSOLARES.....	10
1.1.1	Energía solar.....	10
1.1.2	Aprovechamiento de la energía solar.....	10
1.1.3	Energía solar concentrada.....	11
1.1.4	Composición de los sistemas termosolares.....	12
1.2	ESTADO DEL ARTE EN SISTEMAS TERMOSOLARES DE APLICACIÓN DOMÉSTICA.....	12
1.2.1	Sistemas de calentamiento solar de agua.....	13
1.2.2	Secadores solares.....	13
1.2.3	Aire acondicionado solar.....	14
1.2.4	Chimeneas solares.....	15
1.2.5	Arquitectura solar.....	15
1.2.6	Cocinas solares.....	16
1.3	PROBLEMÁTICA DE LOS RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE)	17
1.3.1	Clasificación de los RAEE.....	18
1.3.2	Composición de los RAEE.....	18
1.3.3	Estado de la recuperación de RAEE.....	18
1.4	CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	19
1.4.1	Recurso solar en el Departamento del Cauca.....	20
1.4.2	Requerimiento energético de los hogares rurales en la zona de estudio.....	20
1.5	REQUERIMIENTOS DEL PROTOTIPO TERMOSOLAR.....	21
1.5.1	Requerimientos funcionales.....	21
1.5.2	Requerimientos mecánicos.....	22
2	DISEÑO DEL PROTOTIPO TERMOSOLAR.....	24
2.1	DISEÑO FÍSICO-MATEMÁTICO DEL PROTOTIPO TERMOSOLAR.....	25
2.1.2	Materiales incluidos en el cálculo.....	25
2.1.3	Cálculos de las unidades del prototipo.....	26
2.2	DISEÑO MECÁNICO DEL PROTOTIPO TERMOSOLAR.....	31
2.2.1	Diseño CAD de las unidades del prototipo termosolar.....	32
2.2.2	Descripción de equipos, instrumentos y accesorios.....	32
3	IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO TERMOSOLAR.....	34
3.1	DISEÑO FÍSICO-MATEMÁTICO DEL PROTOTIPO TERMOSOLAR 2.....	34
3.1.1	Cálculos de las unidades del prototipo termosolar 2.....	34
3.1.2	Diseño mecánico por unidades del prototipo termosolar 2.....	35
3.2	ÉTAPAS DE CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO TERMOSOLAR 2.....	36
3.2.1	Construcción de la UAS.....	36
3.2.2	Construcción de la UTT.....	37
3.2.3	Construcción de la UAA.....	38
3.2.4	HTF y PCM.....	39
3.2.5	Prototipo 2 finalizado.....	40
3.3	COSTOS DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO TERMOSOLAR 2.....	40
3.3.1	Porcentaje de RAEE en el prototipo termosolar 2.....	41
3.4	COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE LOS PROTOTIPOS DISEÑADOS.....	42

4	COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO TERMOSOLAR	43
4.1	METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y LA CAPACIDAD ENERGÉTICA DEL PROTOTIPO TERMOSOLAR 2	44
4.1.1	Pruebas individuales.....	44
4.1.2	Pruebas colectivas.....	46
4.2	DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y CAPACIDAD ENERGÉTICA DEL PROTOTIPO TERMOSOLAR 2	47
4.2.1	Prueba 1: UCS-UTT	47
4.2.2	Cálculos y Análisis de datos	52
	CONCLUSIONES	56
	RECOMENDACIONES	58
	TRABAJOS FUTUROS.....	60
	BIBLIOGRAFIA.....	61

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2-1: Escenarios de aplicación	28
Tabla 2-2: Valores finales para el diseño del prototipo termosolar	28
Tabla 2-3: Valores del volumen de HTF del prototipo termosolar	29
Tabla 3-1: Valores de diseño de la UAA y UCS del prototipo 2	34
Tabla 3-2: Valores de diseño de la UTT del prototipo 2	34
Tabla 3-3: Especificaciones de los materiales usados en la construcción del prototipo termosolar 2	40
Tabla 3-4: Costo total de las unidades del prototipo termosolar 2	41
Tabla 3-5: Comparación de valores entre el prototipo termosolar 2 diseñado y el ideal.	42
Tabla 4-1: Modelo experimental para evaluar el comportamiento y funcionalidad del prototipo termosolar	43
Tabla 4-2: Instrumentos usados en la determinación del comportamiento térmico del prototipo termosolar 2	44
Tabla 4-3: Alimentos evaluados en la prueba de cocción.	47
Tabla 4-5: implementaciones que se realizaron a cada unidad del prototipo termosolar	55

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1: Vías de aprovechamiento de la energía solar. _____	10
Figura 1-2: Sistemas de calentamiento solar de agua _____	13
Figura 1-3: Forma y funcionamiento de los secadores solares _____	14
Figura 1-4: Esquema de aire acondicionado solar _____	14
Figura 1-5: Chimenea solar _____	15
Figura 1-6: Arquitectura solar _____	16
Figura 1-7: Cocina solar de aplicación directa _____	16
Figura 2-1: Unidades y subdivisiones del prototipo termosolar _____	24
Figura 2-2: Organización modular del prototipo termosolar _____	24
Figura 2-3: Esquema de forma y variables de cálculo de la longitud de tubo en el receptor cónico. _____	30
Figura 2-4: Prototipo termosolar terminado _____	32
Figura 3-1: Diseño CAD del prototipo termosolar 2 terminado _____	36
Figura 3-2: Estructura final ensamblada del soporte del UAS _____	37
Figura 3-3: RAEE para recubrimiento de la UAS del prototipo termosolar 2. _____	37
Figura 3-4: Fases de desarrollo del UTT del prototipo termosolar 2 _____	38
Figura 3-5: Componentes estructurales de la UAA del prototipo termosolar 2 _____	39
Figura 3-6: Material de aislamiento térmico de la UAA y UTT del prototipo termosolar 2 _____	39
Figura 3-7: Aceite lubricante usado (HTF) en el prototipo termosolar 2 _____	39
Figura 3-8: Prototipo termosolar 2 ensamblado en su totalidad _____	40
Figura 4-1 : Zonas donde se toman las mediciones de temperatura en la UTT _____	45
Figura 4-2: Zonas donde se toman las mediciones de temperatura en la UAA _____	45
Figura 4-3: UTT del prototipo termosolar 2 modificada _____	47

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas termosolares a pequeña y gran escala han demostrado ser tecnologías viables y cuyos impactos negativos al ambiente son mínimos, puesto que usan la radiación solar concentrada como fuente de energía para ser transformada en calor, razón por la cual las intervenciones que mitiguen la combustión de biomasa con fines domésticos y que reutilicen RAEE, reducirían emisiones y exposición a contaminantes tóxicos. Esta situación estimulo desarrollar una solución basada en tecnologías termosolares utilizando RAEE. Se tomaron lentes Fresnel de retroproyectores en desuso para concentrar la radiación solar y aprovechar el calor que se genera. Lo anterior se pensó con el propósito de sustituir la combustión de biomasa como fuente de calor en la cocción de alimentos en municipios de los valles interandinos del departamento del Cauca, disminuyendo la tala de bosques, producción de GEI, la contaminación ambiental y las afecciones a la salud.

A continuación, se presenta una propuesta de diseño, implementación y evaluación de un prototipo termosolar de media temperatura y que se fundamenta en el uso de elementos reciclado y RAEE con el propósito de permitir el satisfacer las necesidades energéticas para los procesos de cocción de alimentos en un núcleo familiar de las zonas rurales de los valles interandinos del departamento del cauca de forma ambientalmente sustentable y de bajo costo económica.

El diseño del prototipo se llevó a cabo mediante el uso del software *Solid Edge* de donde se obtuvieron planos para proceder con la construcción del sistema termosolar. Fue necesario modificar zonas del prototipo para adecuarlas a los elementos disponibles y para mejorar características. La evaluación se desarrolló en la ciudad de Santander de Quilichao en el Departamento del cauca. Durante tres días se recolectaron datos de radiación, tiempo y temperatura. El análisis de dichos datos permitió concluir acerca de la funcionalidad y viabilidad del prototipo construido, al tiempo que se plantearon recomendaciones para mejorar el sistema. se plasmaron ideas para la elaboración de trabajos futuros relacionados con el aprovechamiento de la energía solar concentrada.

En los ítems siguientes correspondientes al capítulo 1 se desarrolla un marco teórico, un estado del arte, se muestra la problemática ocasionada por los RAEE, se dan a conocer las características de la zona de estudio y se plasman los requerimientos mínimos que debe cumplir el sistema termosolar. Posteriormente se desarrolla 3 capítulos para dar cumplimiento a los objetivos del proyecto y finalmente se concluye acerca de los resultados de la investigación.

1.1 Marco teórico en sistemas termosolares

1.1.1 Energía solar

La Radiación Solar es la energía producida por el sol, se propaga en el espacio mediante ondas electromagnéticas emitidas por la fusión nuclear del hidrógeno en su núcleo a razón de $3,8 \cdot 10^{26}$ W, de ésta, $1,7 \cdot 10^{17}$ W choca contra la tierra. A la atmósfera terrestre llega un valor constante de 1373 W/m^2 . Cerca del 53% de la radiación es reflejada y absorbida por el N_2 , O_2 , O_3 , CO_2 , vapor de agua, polvo y nubes, determinando el clima. La superficie recibe en promedio $3 \cdot 10^{17}$ kWh/año, 4000 veces el consumo energético mundial anual ($7 \cdot 10^{13}$ kWh/año), indicando el gran potencial aprovechable del Sol (Nandwani, 2005). Finalmente a nivel del mar, la constante solar es 950 W/m^2 en un día claro y al mediodía solar (Çengel, 2007).

1.1.2 Aprovechamiento de la energía solar

La radiación solar es captada naturalmente por la atmósfera, los océanos y plantas, produciendo todas las fuentes de energía terrestres no nucleares conocidas. Artificialmente la energía solar se capta directa o indirectamente por elementos tecnológicos creados por los seres humanos, el aprovechamiento de la energía solar se representa en el **Figura 1-1**.

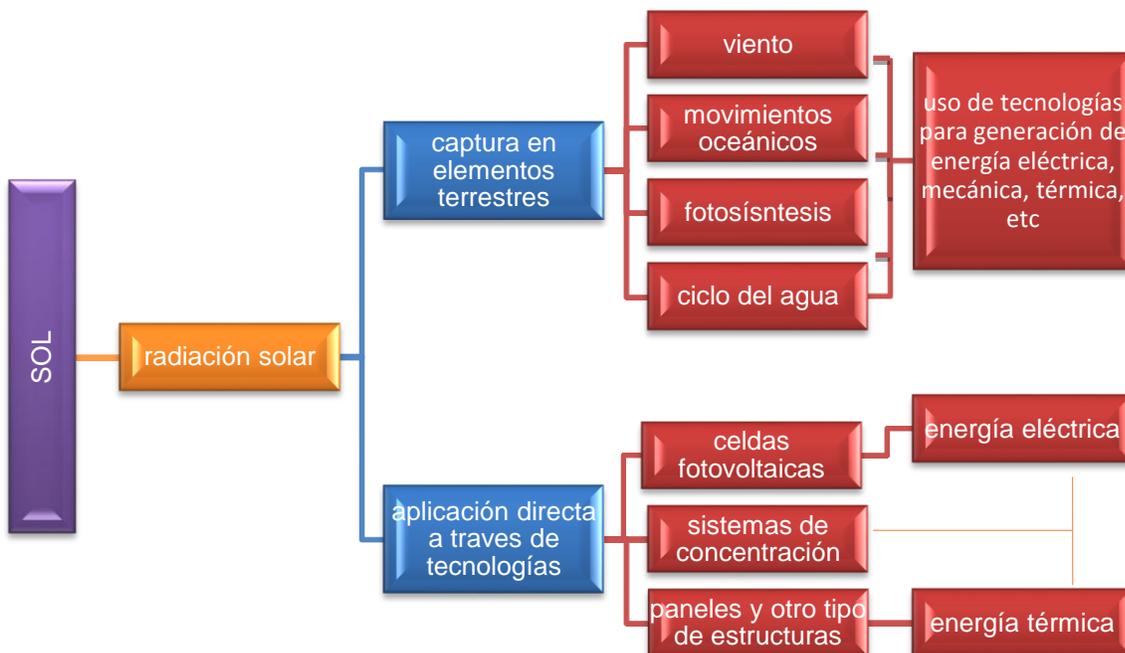


Figura 1-1: Vías de aprovechamiento de la energía solar.

Fuente: adaptado de (Pavez, 2007).

El sol es la fuente esencial de la mayoría de los tipos de energía aprovechada por la humanidad. La radiación solar que llega al planeta es transformada por factores físicos, químicos y biológicos, formando directa o indirectamente combustibles (los más usados son el petróleo, gas natural, carbón y madera), viento, el ciclo hidrológico, mareas y calor. La producción de energía eólica, mareomotriz, fotovoltaica y termosolar, adquiere importancia actual debido al bajo impacto negativo ambiental, representando una ventaja importante sobre fuentes convencionales de energía (petróleo, carbón, nuclear, hidroeléctrica), que causan enfermedades, cambio climático, modificación del pasaje, destrucción de ecosistemas y entre otras consecuencias.

1.1.3 Energía solar concentrada

La concentración de energía solar permite aprovechar la mayor cantidad posible de radiación solar para lograr mejores rendimientos. Las tecnologías de concentración solar hacen uso de espejos o lentes para concentrar la luz solar en pequeñas áreas.

Los sistemas de energía solar térmica de concentración (ESTC) producen calor o electricidad mediante el uso de espejos o lentes que concentran la radiación, alcanzando temperaturas que oscilan entre 400 y 1.000° C. Existe una gran variedad de sistemas basados en la energía solar que se componen por espejos, mecanismos de seguimiento solar, entre otros, y que se rigen bajo los mismos principios termodinámicos (Greenpeace, 2009). Las tecnologías que aprovechan la energía solar de concentración se basan en sistemas fotovoltaicos de concentración y sistemas termosolares.

Energía fotovoltaica de concentración

La tecnología de concentración fotovoltaica (por sus siglas en inglés HCPV) plantea una ingeniosa estrategia para disminuir el área y los materiales de las celdas fotovoltaicas y reducir el precio de la electricidad fotovoltaica. Así, en vez de disponer el caro material fotovoltaico en toda la superficie del panel, se utilizan elementos económicos como espejos y lentes, los cuales concentran y redirigen la luz solar hasta un panel fotovoltaico de menor tamaño, con ello se consigue emplear menor cantidad de material fotovoltaico y reducir los costes. El material fotovoltaico transforma parte de la energía contenida en los fotones de la luz solar en impulsos eléctricos.

Energía Termosolar

Esta tecnología se basa en el concepto de concentración de los rayos solares para alcanzar altas temperaturas. Entre sus principales aplicaciones se encuentran: Producir calor para procesos industriales, cogeneración de calor, frío y

electricidad, desalinizar agua y cocinas solares entre otras. Una de las prácticas que se están investigando es su contribución a la producción de combustibles solares. Por procesos termoquímicos es posible producir hidrógeno utilizando como fuente de calor la radiación solar, incursionando en la denominada *economía del hidrógeno*. Actualmente, requiere solventar algunos retos tecnológicos, económicos y sociales (Botas, Calles, Dufour, & Miguel, 2004).

Las tecnologías solar-térmicas se clasifican según el rango de temperatura de trabajo en alta, media y baja temperatura: Las de *baja temperatura* se aplican en colectores solares familiares y en actividades recreativas, trabajan a temperaturas inferiores a 60°C. Las de *temperatura media* son aquellas que no superan los 100 °C específicamente algunas cocinas solares y algunos sistemas de destilación. Las de *alta temperatura* son más usadas en aplicaciones industriales, en investigación y en producción de electricidad, superando los 100°C hasta 3500°C (Ver anexo A). Existen tecnologías que alcanzan rangos de alta temperatura en aplicación doméstica siendo el caso de algunas cocinas solares (López-Cózar, 2006). Una de las ventajas de este tipo de energía además de la baja huella de carbono y bajo impacto negativo ambiental respecto a las otras fuentes de energía, es que puede ser almacenada para uso posterior.

1.1.4 Composición de los sistemas termosolares

De forma general los sistemas termosolares se componen de: cimentación y estructura, colector solar, tubo receptor, sistema de transferencia térmica, sistema de seguimiento, sistema de almacenamiento térmico, bloque de potencia, sistema de tubería, tanque de expansión, sistema de bombeo y un conjunto de sistemas auxiliares (ver anexo B) estos componentes son utilizados en mayor medida en plantas termosolares de producción eléctrica (García, 2012).

1.2 Estado del arte en sistemas termosolares de aplicación doméstica

Las tecnologías en energías renovables se han desarrollado rápidamente en la última década, debido a la inestabilidad en el precio del petróleo como principal fuente energética de la sociedad, a la escasez de otros combustibles y a las ventajas costo-ambientales que representan. Como parte de estas, las tecnologías termosolares en aplicaciones domésticas son viables y requieren unos pocos Kilo vatios-hora (KWh) de energía. Las investigaciones recientes sobre sistemas termosolares de aplicación doméstica se enfocan en 6 campos estratégicos: 1- estructura integrada y diseño de componentes individuales, tamaño y optimización, 2-simulación y predicción del rendimiento térmico, 3-comparación entre modelo de predicción y pruebas de laboratorio, 4-valoración dinámica de rendimiento en tiempo real y en campo, 5-ahorro de energía, desempeño económico-ambiental y aceptación social, 6-diseminación, mercadeo y estrategias

de explotación. A continuación, se describen las principales tecnologías termosolares.

1.2.1 Sistemas de calentamiento solar de agua

Consisten en un colector que está diseñado para maximizar la absorción solar y reducir las pérdidas de calor. El colector solar puede ser de placa plana, pintada de negro, unido a tuberías de cobre y cubierto con vidrio transparente (colector plano) o de cobre rodeado de tubos de vidrio al vacío y con recubrimiento selectivo (colectores de tubo de vacío) (ver **Figura 1-2**). Cuando la radiación solar incide sobre la superficie del colector de alta absorción, gran parte de la energía es adquirida y luego se transfiere al fluido para ser transportado, almacenado y usado, el almacenamiento se hace en un tanque que puede contener un calentador auxiliar (resistencia eléctrica, caldera convencional) y está aislado para facilitar el almacenamiento (Wang *et al.*, 2015).

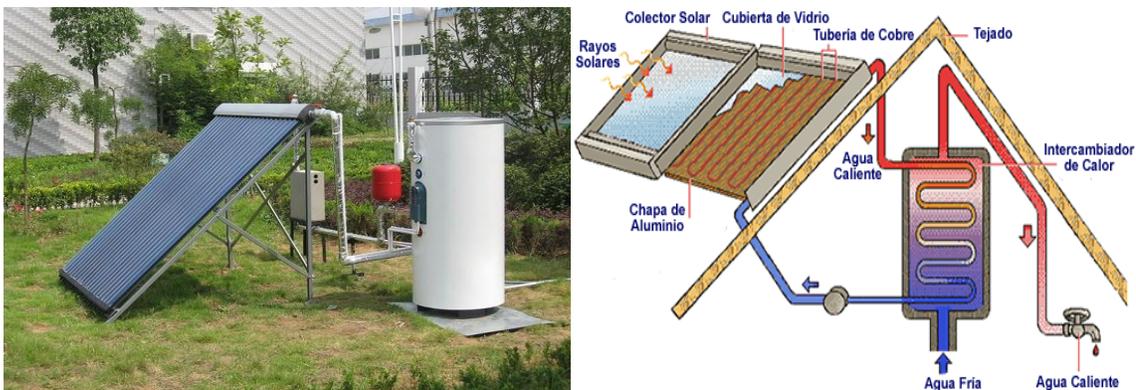


Figura 1-2: Sistemas de calentamiento solar de agua

Actualmente las investigaciones se concentran en crear un sistema de calentamiento de agua de energía solar eficiente, rentable, estructuralmente óptimo y respetuoso del ambiente (Shukla *et al.*, 2013), (Ibrahim *et al.*, 2014), (Sadhishkumar *et al.*, 2014).

1.2.2 Secadores solares

El secado se define como el proceso de eliminación de la humedad de un producto y puede ser implementado en dos etapas, en la primera etapa, la humedad en el interior del producto se lleva al exterior y se seca a una tasa constante en el aire, como vapor de agua. La segunda etapa consiste en una fase de secado lento, y su proceso está relacionado con las propiedades del material a secar (Pirasteh, *et al.*, 2014). Los secadores con calentamiento solar convencional de aire, tienen al menos una vida útil de 10 años, son más eficientes y económicos

que los que consumen combustibles convencionales (petróleo o madera) o electricidad (**Figura 1-3**). Los secador pasivo y activos son estudiados en Sharma, *et al.*, (2009). En VijayaVenkataRaman *et al.*, (2012) se presenta los diferentes diseños de secadores solares.

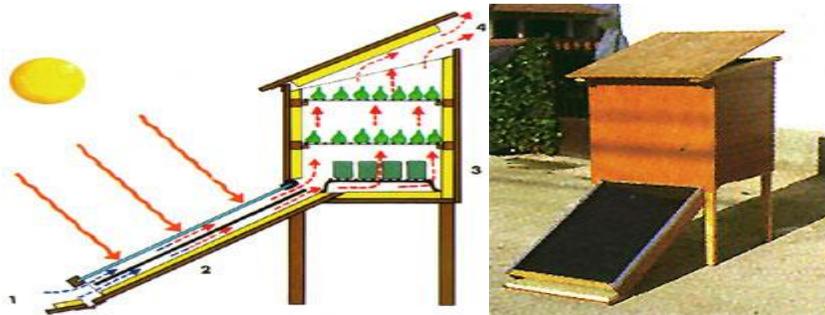


Figura 1-3: Forma y funcionamiento de los secadores solares

1.2.3 Aire acondicionado solar

Es una alternativa para reducir el consumo de electricidad usando el calor residual para ejecutar máquinas de refrigeración movidas térmicamente en lugar de utilizar las máquinas de compresión de vapor (Kalkan *et al.*, 2012). En este caso la fuente de calor son diversos tipos de colectores solares térmicos, junto con una unidad de calefacción auxiliar (caldera de respaldo durante la noche) para entregar energía a las máquinas de refrigeración y producir agua fría utilizada con propósitos de climatización de los edificios. Las tecnologías impulsadas térmicamente se clasifican en dos categorías principales: Los ciclos cerrados (sistemas de agua helada, destacándose máquina de absorción y máquina de adsorción) y Los ciclos abiertos (tratamiento directo de aire para control de temperatura y humedad), resaltando los sistemas desecantes sólidos, ciclo de refrigeración con eyector y sistema de refrigeración solar eléctrico (FV) (Ghafoor & Munir, 2015).

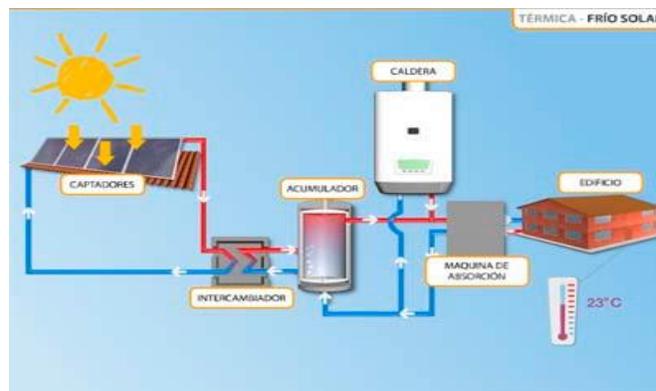


Figura 1-4: Esquema de aire acondicionado solar

1.2.4 Chimeneas solares

La chimenea solar es un excelente sistema de ventilación pasiva, que se basa en la fuerza motriz natural proporcionada por la energía del sol (**Figura 1-5**). Se utiliza la radiación solar para mejorar la ventilación natural en los edificios, que se consigue por el aumento de la temperatura, así como una caída de la densidad en el aire dentro de la chimenea solar, provocando que el aire se eleve y sea expulsado por la parte superior (Khanal & Lei, 2011).

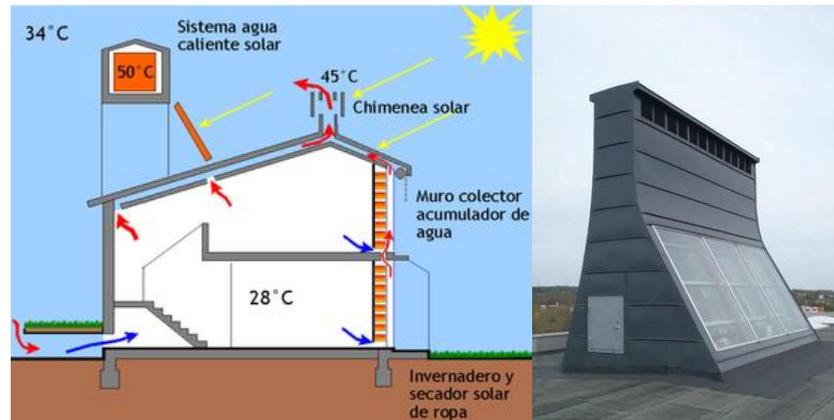


Figura 1-5: Chimenea solar

Los parámetros en los que se enfocan los estudios de las chimeneas son; la relación de aspecto de la chimenea (anchura-altura de la rendija), la altura de ventilación (altura entre las aberturas de entrada y salida), las áreas de abertura, las características térmicas del material absorbente y el ángulo de inclinación de la chimenea tienen efecto predominante sobre el rendimiento de la ventilación (Khanal & Lei, 2011). La aplicación dependiendo la ubicación de las chimeneas se estudian en Zhai *et al.*, (2011).

1.2.5 Arquitectura solar

También llamada arquitectura sensible al clima, se tienen en cuenta aspectos de construcción como: paredes, puertas, ventanas, ventiladores y techos, además del entorno natural (energía ambiental) y la integración de diversas tecnologías solares (**Figura 1-6**). El diseño de los edificios se agrupa en categorías según aspectos climáticos (calor, luz, aire y humedad). Los criterios de diseño se han estudiado con la ayuda de parámetros como la ubicación geográfica y las condiciones climáticas, la forma de construcción, orientación, selección de materiales de construcción, y la construcción de aberturas (Ralegaonkar & Gupta, 2010). Kischkoweit-Lopin (2002) estudió un gran número de diferentes sistemas de iluminación natural.



Figura 1-6: Arquitectura solar

1.2.6 Cocinas solares

Convierten la energía solar en calor para preparar alimentos contenidos en un recipiente. También permiten procesos importantes como la pasteurización y esterilización (Cuce & Cuce, 2013). Yettou *et al.*, (2014) clasifica las cocinas solares según tipo de colector y rango de temperatura en tres categorías principales: cocinas de tipo caja, cocinas de tipo concentración y no concentración. Dentro de estas categorías se incluyen las cocinas de aplicación directa o indirecta, cocinas con o sin almacenamiento térmico y cocinas con o sin sistemas de seguimiento solar. Las cocinas solares de tipo directo utilizan la radiación solar directa en el proceso de cocción, mientras que las cocinas indirectas utilizan un fluido de transferencia de calor para llevarlo desde el colector a la unidad de cocina (Muthusivagami *et al.*, 2010). El almacenamiento de energía térmica permite cocinar durante las horas sin sol o cuando hay poca radiación (días nubados, atardecer, noche) y superar la principal limitación de las cocinas solares.



Figura 1-7: Cocina solar de aplicación directa

1.3 Problemática de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)

Los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) son aquellos que precisan de corriente eléctrica para su funcionamiento (con una tensión nominal no superior a 1.000V en corriente alterna y 1.500V en corriente continua) y los dispositivos necesarios para generar, transmitir y medir dichas corrientes y campos. Los nuevos diseños, aplicaciones, innovaciones y ventajas de financiamiento, hacen que la tasa de recambio se acelere. Además, la industria de la electrónica ha decidido “diseñar para el basurero”, es decir, los nuevos dispositivos se producen con la finalidad de durar menos y convertirse en residuo lo más rápido posible, para iniciar nuevamente la cadena de producción y descarte, también llamado “obsolescencia programada”. Por ejemplo, un celular tiene una vida útil de 2 años, mientras que en el caso de una computadora, es de 4 años (Greenpeace, 2012).

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), son a aquellos AEE que ya han alcanzado su vida útil, como computadoras, televisores, refrigeradores, teléfonos móviles, etc. Éste tipo de residuo es el de más rápido crecimiento en la UE, con unos 9 millones de toneladas generadas en 2005, y se espera que crezca a más de 12 millones de toneladas para el año 2020 (UE, 2014). Son una mezcla compleja de materiales y componentes, que, por su contenido peligroso, pueden causar graves problemas ambientales y de salud, sí no se gestionan adecuadamente. Por otra parte, la producción de la electrónica moderna requiere el uso de escasos y costosos recursos naturales (por ejemplo, requieren alrededor del 10% del total de oro en todo el mundo en su producción) (UNEP, 2005).

De todos los aparatos de las TIC que entran al sistema de reciclaje colombiano cada año, tan solo se recicla el 0.5% de los materiales peligrosos, magnitud similar estipulada para los componentes de mayor valor, debido a que estos materiales se encuentran especialmente en los cables y en pequeñas fracciones en las tarjetas de circuito impreso, lo que dificulta su reciclado. Uno de los problemas del manejo de los RAEE es su tratamiento, algunos autores opinan que por la composición y por los riesgos ambientales de algunos componentes de dichos residuos estos se deben catalogar y manejar como residuos peligrosos, mientras que otros autores plantean que no es posible o es actualmente inviable incluir estos residuos en la categoría de peligrosos por cuestiones de manejo, económica, legislativas y por la baja concentración de elementos tóxicos, no obstante una cantidad baja de éstos elementos en rellenos sanitarios o dispuestos de forma inadecuada en suelos, ocasionaran problemas de contaminación por presencia de metales pesados o compuestos orgánicos (Ott, 2008).

Ciertos procesos de recuperación, principalmente en países en desarrollo (disposición en rellenos sanitarios junto a residuos urbanos, sometimiento a altas temperaturas sin control o uso de tecnologías de aprovechamiento de RAEE), liberan sustancias que afectan la salud humana y el ambiente. Por tanto, estos

materiales deben ser extraídos de los equipos electrónicos una vez se han desechado, y deben ser tratados de manera especial (Villegas & Cramer, 2007).

En términos generales se estima que en el 2006, 230 millones de computadores y mil millones de teléfonos celulares se vendieron en todo el mundo, lo que corresponde a 5'848.000 toneladas (greenpeace, 2008). Como consecuencia, los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos son, por mucho, el componente de los residuos de más rápido crecimiento. En Asia y en África existe un gran problema que involucra los RAEE puesto que algunos países de estos continentes son vertederos de muchos de estos residuos que son producido en Europa y en USA. Según el PNUMA, la generación de RAEE está creciendo a un ritmo vertiginoso. Sólo en USA en el 2006, se pusieron en el mercado más de 34 millones de TV, 24 millones de PC y 139 millones de dispositivos móviles. Con el apagón analógico se vendieron 32 millones de TV (EMPA & UNU, 2009). Se calcula que en los países de América Latina se están generando aproximadamente 360.000 toneladas al año de RAEE (Boeni, Silva, & Ott, 2008). La producción de RAEE (sin tener en cuenta los celulares y los computadores) en Colombia está en continuo aumento debido al poder de adquisición de la creciente clase media, en el 2008 se producían cerca de 0,7 kg de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos por habitante, cifra que se triplicara para el año 2018 para el cual se estima un volumen de 2 kg de tales residuos por habitante (RAEE, 2014) (ver anexo C).

1.3.1 Clasificación de los RAEE

En la actualidad existe tres formas de clasificar los RAEE: la primera y más usada es la realizada por la Unión Europea, subdividiendo los residuos en 10 categorías, la segunda clasificación consiste en tres categorías, línea blanca, línea marrón y línea gris, los nombres resultaron de los colores de los aparatos que pertenecían a cada línea, aunque por el diseño de nuevos productos, en ocasiones no es posible clasificarlos por su color. Y la tercera forma de clasificación consiste en tres subdivisiones relacionadas con el reciclaje de tales residuos (ver anexo D).

1.3.2 Composición de los RAEE

Los AEE están compuestos de cientos de materiales diferentes, tanto valiosos como potencialmente peligrosos. Oro, plata, paladio, cobre, plomo, cadmio, mercurio, arsénico, entre otros, son algunos de los elementos presentes en los RAEE (ver anexo E).

1.3.3 Estado de la recuperación de RAEE

Estudios realizados en la Unión Europea afirman que, en promedio, los aparatos eléctricos y electrónicos están compuestos por un 25% de componentes

reutilizables, un 72% de materiales reciclables (plásticos, metales ferrosos, aluminio, cobre, oro, níquel, estaño de las placas, etc.) y un 3% de elementos potencialmente tóxicos: plomo, mercurio, berilio, selenio, cadmio, cromo, sustancias halogenadas, clorofluocarbonos, bifenilos policlorados, policloruro de vinilo, ignífugos como el arsénico y el amianto, entre otros (greenpeace, 2012).

Una de las formas más eficaces de lograr un tratamiento adecuado de estos residuos es hacer uso de los instrumentos legales tradicionales, leyes para gestión de residuos peligrosos o para gestión de los residuos sólidos. Sin embargo, si son tratados como residuos peligrosos, los altos estándares de exigencia que requieren estos desechos dificultan y encarecen la gestión y se corre el riesgo de perder materiales de valor, al tratarlos como residuos sólidos, puede haber un alto impacto negativo en el ambiente. En Latinoamérica, solamente Costa Rica y Colombia tienen normas específicas para los residuos eléctricos y electrónicos. En Colombia se desarrollaron tres resoluciones que reglamentan la gestión postconsumo de las computadoras y periféricos, las pilas y baterías, y las bombillas. Otros países, como México y Brasil, han optado por incluir los RAEE de manera específica en sus leyes generales de residuos, pero sin mucho detalle sobre las características particulares de los estos desechos (Silva & Uribe, 2013),

1.4 Características energéticas de la zona de estudio

Los valles interandinos son depresiones tectónicas que separan los Andes. Estas depresiones suelen estar acompañadas de cauces que las recorren y en algunos casos, pueden generarlas o modificarlas; ofreciendo diversidad climática, atmosférica y natural. En Colombia, los valles interandinos son cuencas estructurales entre las cordilleras y no simplemente el producto de la erosión fluvial. Estas cuencas han sido llenadas por capas de ceniza y polvo volcánico de varios metros de grosor, lo que ha producido terrenos muy fértiles. Este hecho, sumado al de la altitud sobre el nivel del mar, ha contribuido a formar un ambiente agradable y tierras tropicales productivas. En el departamento del Cauca, existen 3 valles interandinos, todos ubicados entre las cordilleras central y occidental:

El **Valle del río Cauca**, ubicado en la zona norte del departamento. Cuenta con una extensión aproximada de 85.000 km² creando una de las regiones más fértiles del país. Recorre de sur a norte, regiones de praderas y de ricos cultivos, en su parte media, así como, zonas de escasa fertilidad y pantanosas, en su parte alta. Culmina al norte del país, en el lugar donde se une al río Magdalena (“EL RELIEVE COLOMBIANO: VALLES INTERANDINOS,” n.d.).

El **Valle del Patía**, Ubicado en los departamentos de Cauca y Nariño, es un valle corrugado, bañado por el río Patía. La región es semiárida, de lluvias escasas, por lo cual solo se ha desarrollado una agricultura de subsistencia. La principal población del valle del Patía es El Bordo, cabecera municipal del municipio del Patía.

El **Valle del Pubenza** o Valle del Alto Cauca, es un valle alto (altitud promedio: 1.600 msnm), de terreno ondulado, tierras húmedas, pero de baja fertilidad, cubiertas por pastos nativos. La principal ciudad es Popayán, capital del departamento del Cauca.

1.4.1 Recurso solar en el Departamento del Cauca

La radiación solar media en Colombia es de 4.5 kWh/m², el pico con mayor recurso solar se encuentra el área correspondiente al departamento de la Guajira con 6 kWh/m², el de menor recurso se ubica en diversas zonas siendo inferior a 3 kWh/m². La radiación que reciben algunas zonas del territorio llegan a durar 12 h/día, registrando incluso los índices más altos a nivel mundial junto con los registrados en África (MinAmbiente, 2011).

El Departamento del Cauca cuenta en promedio con 4 horas de sol al día, valor que varía notablemente en las diferentes zonas biogeográficas (IDEAM & UPME, 2005), las zonas de los valles del río Patía y río Cauca cuentan con los niveles de radiación anual y brillo solar más altos del departamento, de 4 a 5 kWh/m² y de 5 a 6 h/día respectivamente. Por lo anterior, este trabajo no toma como zona de estudio el valle del Pubenza.

1.4.2 Requerimiento energético de los hogares rurales en la zona de estudio

La población en los valles interandinos del departamento del Cauca es muy diversa culturalmente. Un punto de encuentro es la gastronomía, de la que se tomará parte para establecer los requerimientos energéticos, enfocados precisamente en suplir necesidades de calor en la preparación de alimentos diarios en un hogar rural compuesto por una cantidad de personas adultas, al medio día y al atardecer o en la noche, además, de un excedente de calor para cualquier otro requerimiento de calentamiento.

Para establecer la cantidad de energía a satisfacer, se ha propuesto el siguiente método, basado en datos de la FAO y estudios energéticos de dispositivos con características similares, las variables, datos y fuentes en el son presentados a detalle en el capítulo 2.

Energía útil: es la energía a satisfacer para la cocción de los alimentos diarios de un determinado número de personas adultas más un excedente.

$$E_u = A_p * E_p * N * (1 + E_x), (KJ) \quad (1)$$

Donde, E_u es la energía útil en KJ, A_p es la cantidad de alimentos ingeridos por persona en un día ($Kg/dia/persona$), E_p es la energía usada en la cocción de un

Kg de alimentos (KJ), N es el número de personas y E_x es un porcentaje excedente (fracción decimal).

1.5 Requerimientos del prototipo termosolar

La transferencia tecnológica es la parte fundamental en cualquier tipo de desarrollo tecnológico con fines sociales, entonces, la aceptación de dispositivos que modifiquen las costumbres de la población objetivo, depende de la forma en la que se incluyan las prácticas, tradiciones y seguridad en el momento de uso.

Buscando también que a partir de la fuente se encuentre una solución a los problemas, se debe implementar procedimiento acorde a la situación, en este caso, se implementó una metodología de proyectos desarrollada en el programa de Ingeniería en Automática Industrial de la Universidad del Cauca, ajustada a los requerimientos específicos de este proyecto. Para determinar las características del diseño del prototipo termosolar, se estudiaron los tres objetivos específicos propuestos en el anteproyecto (primero, diseñar un prototipo termosolar usando RAEE. Segundo, implementar un prototipo termosolar a partir de RAEE. Tercero, determinar el comportamiento térmico del prototipo termosolar y su capacidad de producción energética), a partir de ello se describió las expectativas mínimas que se tenían sobre su uso en campo y de cómo debía ser el funcionamiento (activo o pasivo, directo o indirecto). Posteriormente, se procedió a elaborar los requerimientos del sistema: requerimientos funcionales y mecánicos.

A continuación, se presentan cada uno de los requerimientos funcionales, y mecánicos que se deben cumplir durante el desarrollo del prototipo termosolar.

1.5.1 Requerimientos funcionales

Estos requerimientos funcionales del prototipo a desarrollar se dividen en dos categorías, requerimientos funcionales de índole doméstico y los de índole ambiental.

- **Requerimientos funcionales (RF) de ámbito doméstico del prototipo termosolar:**

RF1: Capacidad energética: el prototipo debe tener la capacidad de satisfacer las necesidades de energía en procesos de cocción de alimentos de mínimo una persona.

RF2: Seguridad del usuario: se debe asegurar que el usuario no esté expuesto a radiación solar concentrada, ni intensidad de luz y temperaturas altas.

RF3: Funcionalidad: el prototipo debe ser sencillo, de fácil manejo, con pocas partes móviles, muy resistente y de buena calidad para evitar el mantenimiento constante.

RF4: Almacenamiento térmico: el prototipo debe ser capaz de superar la limitación típica de las cocinas solares como lo es la utilización al atardecer o en la noche dando una autonomía de almacenamiento térmico por lo menos 6 horas en ausencia de radiación solar, es por esto que el prototipo termosolar debe alcanzar como mínimo 220°C para permitir el cambio de fase de una mezcla eutéctica.

RF5: Bajo costo: el prototipo debe estar en un rango de precios de entre 1'000.000 de pesos a 10'000.000 de pesos.

- **Requerimientos funcionales de ámbito técnico ambiental.**

RF6: Seguimiento solar: el prototipo debe integrar un sistema de seguimiento solar manual móvil de un eje, haciendo posible el manejo de la unidad de seguimiento del sistema por parte de cualquier individuo.

RF7: Captación solar: se debe implementar un panel que capte los rayos solares que permita usar el calor. Si es concentrado, éste debe ser transportado eficazmente, dado que se pueden alcanzar temperaturas cercanas al punto de fusión del material que compone el punto focal.

RF8: Transferencia de calor y unidad de aplicación: el prototipo debe contar con zonas de transferencia de calor eficientes basados en factores como las características fisicoquímicas de los materiales usados, su disposición o ubicación y el aislamiento térmico, garantizando un máximo o mínimo intercambio de calor de acuerdo a las especificaciones de cada unidad.

RF9: Uso de materiales obtenidos de RAEE: el prototipo debe estar compuesto mínimo por un 20% (porcentaje peso) de materiales reciclados y RAEE.

RF10: Fácil construcción: el prototipo termosolar debe ser construido con elementos comunes, fáciles de adquirir, y disponibles en los municipios que hacen parte de los valles interandinos del departamento del Cauca

1.5.2 Requerimientos mecánicos

Estructuras convencionales de soportes en sistemas termosolares.

La estructura de soporte se encarga de dar rigidez y servir de apoyo para todo el conjunto de componentes del sistema termosolar, permitiendo en algunos casos

movimientos. Tales estructuras son un conjunto de componentes metálicos, plásticos, madera o de vidrio.

Estos soportes pueden ser clasificados en dos grandes grupos, fijas y móviles, siendo las fijas aquellas que no presentan movimiento alguno y en donde solo se aprovecha al máximo la radiación solar cuando la estructura y sus componentes de hallan perpendiculares al sol, mientras que las móviles aprovechan la radiación solar al máximo al garantizar que el sistema esté siempre perpendicular al sol, tales estructuras móviles pueden ser de movimiento en uno o en dos ejes.

El prototipo termosolar estará compuesto por una estructura metálica que permita que algunas de las unidades del sistema se muevan a lo largo de un solo eje, es por ello que el eje del colector se sitúa a lo largo de la línea Norte-Sur, realizando su movimiento de Este a Oeste basados en que para lugares situados entre las latitudes de 30° y 45° , se emplean sistemas de seguimiento Este-Oeste.

2 DISEÑO DEL PROTOTIPO TERMOSOLAR

Dados los requerimientos funcionales, mecánicos y automáticos, el diseño es de tipo indirecto, es decir, se concentra la radiación solar, se transporta a zonas diferentes a la de concentración para luego ser aprovechada. El prototipo termosolar está dispuesto en 4 unidades; la unidad de colector solar (UCS), la unidad de transporte térmico (UTT), la unidad de almacenamiento y aplicación (UAA) y la unidad auxiliar de soportes (UAS), algunas de las unidades están compuestas por subsistemas que son presentados en la **Figura 2-1**.

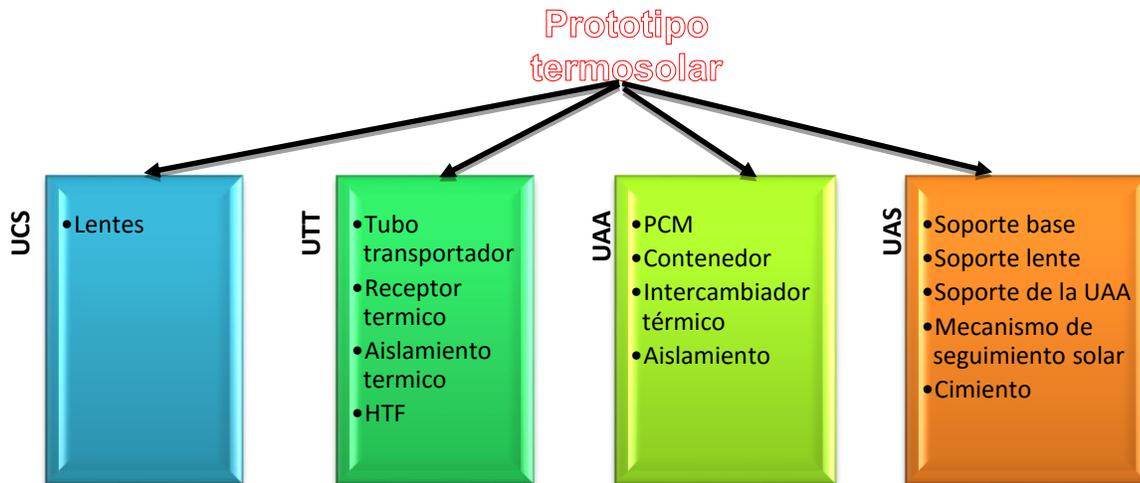


Figura 2-1: Unidades y subdivisiones del prototipo termosolar

La organización modular del prototipo en sus diferentes unidades se muestra en la **Figura 2-2**.

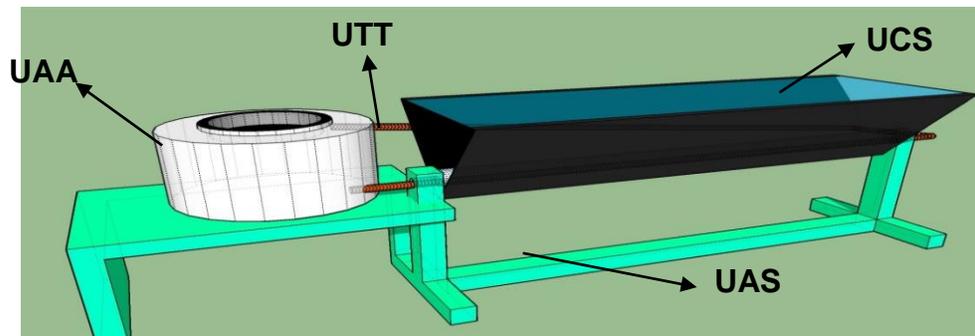


Figura 2-2: Organización modular del prototipo termosolar

Las especificaciones o características de estas unidades fueron resultado del desarrollo de un método de diseño físico matemático, que implica identificar variables físicas y datos demográficos. Posteriormente, se realiza el diseño

mecánico de cada unidad. Los materiales de construcción se seleccionaron de acuerdo a la pertinencia técnica, económica y ambiental.

2.1 Diseño físico-matemático del prototipo termosolar

En esta sección se presentará el procedimiento para obtener las dimensiones del prototipo termosolar, dividiendo este proceso en las diferentes unidades ya mencionadas, en primer lugar, se describen las propiedades físicas de algunos materiales incluidas en los cálculos, posteriormente se plantea y desarrolla una metodología para hallar la capacidad energética, el área receptora del colector, la cantidad de material de almacenamiento térmico y los tiempos de aplicación.

2.1.2 Materiales incluidos en el cálculo

Los materiales que influyen en el diseño de cada unidad se seleccionan teniendo en cuenta factores como las características físicas y químicas, el bajo costo, la facilidad para adquirirlos y fácil construcción.

Unidad de colector solar

Lentes fresnel: Se va a utilizar lentes fresnel extraídos de retroproyectors de acetatos. Estos lentes tienen un área de $0,09m^2$, de acuerdo con las ecuaciones publicadas por Xie, Dai, & Wang (2011), este tipo de lente tiene una relación de concentración geométrica de 280, con lo que es útil para este tipo de aplicaciones, además se conoce que estos alcanza temperaturas superiores a los $300^{\circ}C$ en el punto de concentración, esta es esencial para elegir el material de cambio de fase o PCM (phase change material por sus siglas en ingles) que se debe implementar.

Unidad del transporte térmico

Por ser un material sintético y diseñado para trabajar a altas temperaturas se elige el aceite de motor de los automóviles, además se da uso a un residuo peligroso que es causante de graves problemas ambientales.

Aceite usado de automóvil: Su composición varía de acuerdo a tiempo de uso y tipo de automóvil, es un residuo peligroso, aunque es común encontrar mezclas de todos los tipos, una ventaja de usar esta sustancia es que al estar contaminado por metales su conductividad térmica es superior. Entonces el aceite usado es el fluido de transferencia de calor o **HTF** (Heat Fluid Transfer, por sus siglas en ingles).

Unidad de almacenamiento y aplicación

De acuerdo con los rangos de temperatura alcanzados por el lente fresnel y basados en la eficiencia que pueda tener el prototipo se seleccionó como material de almacenamiento térmico un PCM compuesto por sales de nitrato de sodio y nitrato de potasio $\text{NaNO}_3 - \text{KNO}_3$ respectivamente, son una mezcla eutéctica de sales que alcanza punto de fusión entre 210-220 °C, están mezclados en una relación 60/40 con una densidad de 2.013 Kg/L. Mussard (2013) ha investigado estos valores además de la conductividad térmica y capacidad calorífica en la ecuación 2, que son usados para determinar el tamaño de las unidades. En adelante se las nombrará como “PCM-sales”.

Unidad auxiliar

Esta unidad al estar integrada por los diferentes soportes y por el mecanismo de seguimiento solar, debe ser muy fuerte estructuralmente, resistente a los diferentes factores ambientales, además de usar poco material, se desarrolla un estudio técnico para determinar las características del sistema de seguimiento y fijación solar concluyendo que la estructura debe ser construida con tubo estructural metálico rociado con pintura anticorrosiva.

2.1.3 Cálculos de las unidades del prototipo

Se presentan los cálculos realizados para diseñar las unidades principales del prototipo dando cumplimiento a los requerimientos funcionales y mecánicos, las variables y los valores usados en los cálculos se presentan en el anexo F. La unidad almacenamiento y la de colector solar están relacionadas por ser las zonas principales de entrada y salida de energía, por ello son desarrolladas en conjunto.

Cálculos para las UAA y UCS

La determinación de la energía y el área necesaria del prototipo, se realizó con una metodología sencilla, en aras de validarla o corregirla en el capítulo 4 con balances de energía y cinética de flujo que, además, interpreten y predigan el comportamiento del sistema, comenzando por las ecuaciones involucradas en los cálculos, los escenarios de aplicación y los valores de diseño seleccionados.

Ecuaciones de diseño

Energía útil: retomando la ecuación 1 se tiene que:

Cantidad de PCM-sales: de acuerdo a lo descrito para la unidad de almacenamiento y aplicación (UAA), $\text{KNO}_3 - \text{NaNO}_3$ 40/60 molar (Mussard 2013):

$$C_{ps} = \begin{cases} 1 & \text{si } T < 383 \text{ K} \\ 4,128 & \text{si } 383 \leq T \leq 393 \text{ K} \\ 1,4 & \text{si } 393 < T < 483 \text{ K} \\ 12,463 & \text{si } 483 \leq T \leq 493 \text{ K} \\ 1,6 & \text{si } T > 493 \text{ K} \end{cases}, \quad \text{KJ}/\text{Kg} * \text{K} \quad (2)$$

donde, C_{ps} es la capacidad calorífica específica sales-PCM, T es la temperatura absoluta.

$$M_s = \frac{E_u}{C_{ps} * (\Delta T_u)}, \quad \text{Kg} \quad (3)$$

donde, M_s es la masa de sales, ΔT_u es el rango de temperatura útil de 180 a 240 °C

$$V_s = M_s / \rho_s, \quad \text{L} \quad (4)$$

donde, V_s es el volumen sales y ρ_s es la densidad de las sales (2,013 $\frac{\text{Kg}}{\text{L}}$)

Cálculo Área de colector: El área de colector depende fuertemente del tiempo necesario para alcanzar la E_u . Es condicionante según disponibilidad de lentes, radiación solar, M_s o tiempo estimado para alcanzar ΔT_u .

$$A_u = \frac{E_u}{t} / (I_s * \eta_g), \quad \text{m}^2 \quad (5)$$

donde, A_u es el área del colector, t es el tiempo en segundos necesario para alcanzar el ΔT_u , I_s es la radiación solar directa instantánea estimada en 1 KW/m², η_g eficiencia general del sistema que según los resultados en las investigaciones de Mussard (2013) es del 23%.

Escenarios de aplicación

Se plantearon escenarios, variando N de 1 a 3, y t de 2 a 3 horas. El objetivo es visualizar la cantidad de área, masa y volumen de PCM y número de lentes fresnel necesarios (área 0,09 m² c/u), los resultados de estos cálculos se muestran en la **Tabla 2-1**.

Tabla 2-1:
Escenarios de aplicación

<i>N</i>	<i>t</i> (s)	<i>M_s</i> (Kg)	<i>V_s</i> (L)	<i>E_u</i> (KJ)	<i>A_u</i> (m ²)	# LENTES
1	7200	9,80	4,75	2057,0	1,31	14,51
1	9000	9,80	4,75	2057,0	1,05	11,61
1	10800	9,80	4,75	2057,0	0,87	9,67
2	7200	19,59	9,50	4114,0	2,62	29,01
2	9000	19,59	9,50	4114,0	2,09	23,21
2	10800	19,59	9,50	4114,0	1,74	19,34
3	7200	29,39	14,25	6171,0	3,92	43,52

Valores finales de diseño

Teniendo en cuenta la funcionalidad del prototipo (momento y tiempo de cocción), tiempo total de funcionamiento (horas de sol diarias), disponibilidad de lentes y observando los resultados de los escenarios, se concluye que los valores óptimos del área, cantidad de lentes, volumen y masa de PCM son los obtenidos con *N* = 1 y *t* = 2,5 h.

Los valores finales de diseño son presentados en la

Tabla 2-2

Tabla 2-2:
Valores finales para el diseño del prototipo termosolar

<i>M_s</i> (Kg)	<i>V_s</i> (L)	<i>E_u</i> (KJ)	<i>A_u</i> (m ²)	# LENTES	<i>N</i>	<i>t</i> (s)
9,80	4,75	2057	1,08	12	1	9000

- **Cálculos para la UTT**

La cantidad del fluido de transferencia térmica (HTF por sus siglas en inglés) está ligado al volumen de la tubería de cobre y al volumen de la unidad de expansión de aceite, es por ello que se determinan estos valores, la tubería estará completamente llena por el HTF y por propósitos prácticos en el tanque de expansión el 40% de su volumen estará ocupado por aceite y el espacio restante contendrá aire.

Volumen de la tubería de cobre:

$$V_T = \pi * R_T^2 * L_T, \quad L \tag{6}$$

donde, V_T es el Volumen útil de la tubería de cobre, R_T es el Radio interno de la tubería de cobre en cm y L_T es la Longitud total de la tubería de cobre en cm.

Volumen de la unidad de expansión de aceite:

$$V_A = X * Y * Z, \quad L \quad (7)$$

dónde: V_A es el Volumen interno de la unidad de expansión de aceite, X , Y y Z Longitud, Altura y Ancho interno del tanque en cm.

Volumen total de aceite:

$$V_{HTF} = (V_A * 0.40) + V_T, \quad L \quad (8)$$

Los valores de las dimensiones de la tubería de cobre, el tanque de expansión y el volumen necesario de aceite se presentan en la **Tabla 2-3**. De estos valores se concluye que el sistema requiere de aproximadamente 1.726 litros de aceite para motor, aunque sin considerar el volumen que ocupara el HTF que circulara por los receptores cónicos.

Tabla 2-3:

Valores del volumen de HTF del prototipo termosolar

Volumen total de HTF					
	Tubería circular de cobre		Tanque rectangular de expansión		
Dimensiones (cm)	Radio interno	Longitud	Longitud	Altura	Ancho
		0.635	900	13	8
Volumen (L)	1.139		0.832		
Volumen de HTF (L)	1.726				

Receptor térmico cónico: Se calcula para un cono de 8 cm de diámetro en la base con un ángulo de apertura de 60° y para el tubo de cobre de diámetro externo de ½ pulgadas (ver anexo G). La ilustración para identificar las variables del receptor se presenta en la **Figura 2-3**.

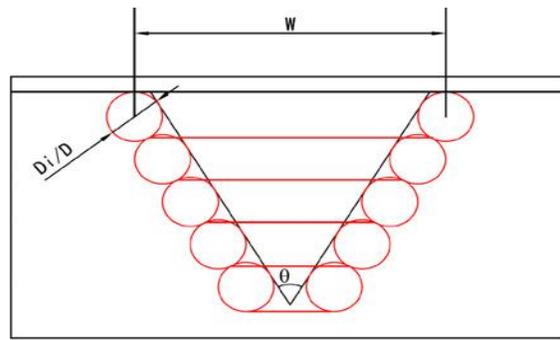


Figura 2-3: Esquema de forma y variables de cálculo de la longitud de tubo en el receptor cónico.

Tomado de: W.T. Xie et al. / Solar Energy 86 (2012)

$$L'' = \frac{\pi W (D + W)}{4D \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}, \quad m \quad (9)$$

Donde, D_i es el diámetro interno del tubo de cobre en m, D es el diámetro externo del tubo de cobre en m, W es el diámetro de la base del cono en m y L'' es la longitud de tubo de cobre que forma el cono en m.

Para nuestro caso con $W = 0.1\text{m}$, $D = 0.0127\text{m}$, y $\theta = 60^\circ$ se obtiene una $L'' = 1.39\text{m}$. Por tanto, al multiplicar este valor por el total de receptores se tiene que la longitud total de tubo del receptor es de 16,68 m que sumado a los 9 m de la tubería sin conos daría un total de 25,68 m de tubería por lo que el volumen total de HTF a usar sería en de 3,585 L.

Presión de trabajo: el sistema cuenta con dos zonas principales herméticamente cerradas donde las presiones varían constantemente, una es el sistema de tubería más el tanque de expansión y la otra es la unidad de almacenamiento térmico, en estas se ubican sistemas de alivio de presión pasivos por lo que se trabaja con tanques de expansión.

La presión del HTF a la temperatura máxima de trabajo debe ser determinada para garantizar que no exceda la presión que soporta la tubería de cobre y la presión en la unidad de almacenamiento térmico debe determinarse experimentalmente antes de implementar el sistema, puesto que esta es quizás las zonas más críticas por estar en contacto constante con las personas.

- **Cálculos para la UAS**

Los valores de diseño de esta unidad son seleccionados de tal forma que coincida con muchas de las características de las estufas convencionales, tales como la

altura, el largo, el ancho, entre otros. Como se mencionó al inicio del presente capítulo, esta unidad se subdivide en cuatro estructuras;

Soporte base, es fuerte y liviano con una altura de entre 120 cm a 130 cm, se instala fuera de la casa, por lo que está constantemente expuestos a los diferentes factores ambientales y de acuerdo a las especificaciones del siguiente soporte, esta debe tener 3 o 4 m de longitud, en el ítem 2.2.1 se detallan las especificaciones de este soporte.

Soporte lentes, es la estructura que contiene los lentes y en conjunto con otros elementos proporciona aislamiento, se debe construir con tubo estructural rectangular de 2 cm * 2 cm, como ya se determinó el número de lentes y se conocen sus características, entonces se dimensiona este soporte, el ancho de la unidad debe ser de entre 32 cm a 34 cm, el largo debe ser de mínimo 2.4 m y la altura debe ser de entre 15 a 20 cm, además debe ser una estructura triangular para minimizar el área de contacto ambiente-prototipo con ángulo de apertura de 60° y el soporte en su totalidad debe ser pintado de negro mate.

Soporte almacenamiento, esta es la que soporta el peso de la UAA, está básicamente es una mesa que debe tener una altura de entre 120 cm a 130 cm.

Cimientos, son una obra civil para asegurar que el sistema este nivelado, es principalmente para soportar las unidades o zonas del prototipo que estén fuera de la cocina o de la casa en cuyo caso debe tener forma similar al soporte base, pero con entre 3 cm a 10 cm más ancho que la base de tal soporte puesto que esta es la superficie que está en contacto directo con el concreto del cimiento.

Mecanismo de seguimiento solar, este será manual y de un solo eje (este-oeste), se construye con tubo estructural y con una placa metálica de 2 mm a 4 mm, debe permitir que los lentes capten la mayor cantidad de luz directa todo el tiempo de funcionamiento, se decide que el seguimiento de los lentes en conjunto con su estructura se realizó cada 15 minutos, es por esto que la placa debe tener mínimo 24 aberturas donde se fija una palanca cada 15 minutos dependiendo la hora y posición del sol, tal calibración se determina experimentalmente.

2.2 Diseño mecánico del prototipo termosolar

El diseño del prototipo termosolar debe cumplir criterios de replicabilidad, bajo impacto negativo al ambiente, viabilidad, seguridad y funcionalidad. Mediante los cálculos presentados anteriormente se determinan los valores óptimos que permiten un adecuado diseño y funcionamiento del sistema. El área de colección, el número de individuos, el volumen de las diferentes partes del sistema, la cantidad de cada uno de los materiales, al igual que el tipo de material a usar y las obras civiles que se desarrollen en la vivienda por comodidad, son algunas de las bases para comenzar el diseño mecánico del prototipo.

2.2.1 Diseño CAD de las unidades del prototipo termosolar

El diseño, construcción y visualización CAD de una estructura es esencial y hace posible modelar y predecir el comportamiento de un sistema antes de ser implementado, permitiendo realizar modificaciones que de otro modo serían inviables, por esto, mediante el uso del paquete de software “Solid EdgeST7” (versión académica) se modelan las partes del prototipo incluyendo las modificaciones que se realizan a los RAEE, con la intención de visualizar la estructura del sistema, la cantidad y el tipo de material a usar y eventualmente se modifican los parámetros para permitir un correcto funcionamiento del sistema, obteniéndose la disposición más adecuada del prototipo y los planos necesarios para su construcción física.

Las etapas del diseño mecánico por unidades, de los planos y de los puntos de recolección de datos del prototipo termosolar se detallan en el anexo H. A continuación, se presenta la estructura y la composición final del prototipo ensamblado (ver **Figura 2-4**), después se procede con la descripción de los materiales e instrumentos que se emplean en la construcción y evaluación del prototipo en cuestión.

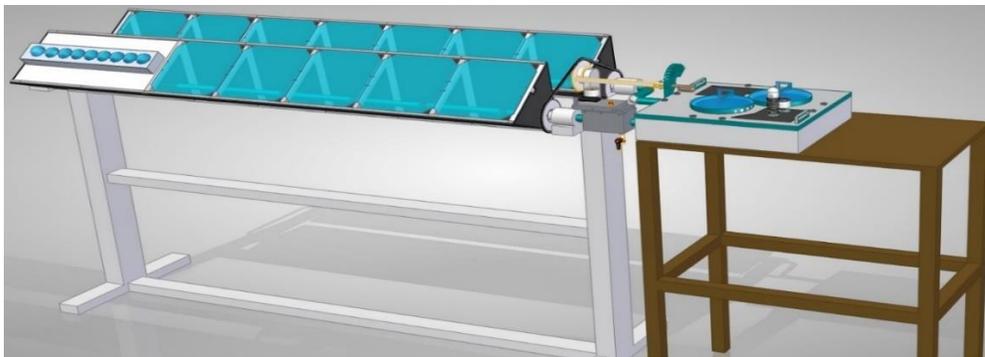


Figura 2-4: Prototipo termosolar terminado

2.2.2 Descripción de equipos, instrumentos y accesorios.

Los materiales e instrumentos necesarios para el desarrollo del prototipo termosolar, comenzando por los componentes de los cimientos y terminando en la balanza que se usará para pesar la cantidad aproximada de alimentos se detallan en el anexo I.

El Porcentaje de RAEE se determinó basados en la clasificación de los elementos a usar, que se presentó en el anexo I, en donde se muestran 21 elementos de los cuales 6 son RAEE y elementos reciclados. Comparando el número total de

elementos usados en la fabricación del prototipo frente a los elementos derivados de RAEE y materiales reciclados se obtiene el porcentaje aproximado, una vez realizados los cálculos se determina que los RAEE y elementos reciclados representan aproximadamente el 30 % de los componentes del sistema, sin tener en cuenta el HTF que se reutiliza y la modificaciones que surjan durante la construcción del sistema, tal porcentaje se calcula nuevamente al término de la construcción del sistema.

Existen diversas formas de determinar el porcentaje de RAEE, quizás la más adecuada para este caso sería comparar el peso de los RAEE con el peso total de la estructura construida, pero esto solo es posible cuando se esté construyendo e implementando el prototipo.

Los valores y diseños presentados en el desarrollo del capítulo 2 son la base para la construcción del prototipo, estos presentan una metodología para la adecuada ejecución del mismo dando cumplimiento a los requerimientos funcionales, mecánicos, de automatización presentados al final del capítulo 1.

3 IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO TERMOSOLAR

En este capítulo se detalla el proceso de construcción de un prototipo termosolar a escala 1:10 y se ilustra paso a paso cada avance de su fabricación, se presentan nuevos cálculos físicos y el diseño mecánico, se detalla el proceso construcción del prototipo a escala, se muestran los costos de fabricación del prototipo termosolar, el porcentaje de RAEE usado y se finaliza con las diferencias entre el prototipo ideal y el implementado.

El nuevo diseño denominado prototipo termosolar 2, se basa en el diseño planteado en el capítulo previo, ya que, por razones económicas, de disponibilidad de materiales y de equipos, no fue posible construir del prototipo del capítulo 2. Se sigue la metodología usada para modelar el prototipo anterior, las principales diferencias entre los dos diseños son: área del colector, energía colectada, dimensiones de las estructuras y cantidad de materiales. Esta nueva estructura es más compacta y se modela para que cumpla los requerimientos energéticos de 0,1 personas determinando así la posible viabilidad del sistema de mayor tamaño.

A continuación, se presenta el proceso de diseño y construcción del prototipo termosolar 2, este proceso se divide en dos fases, la primera abarca las variables de diseño del prototipo a escala y la segunda presenta las etapas de construcción del sistema.

3.1 Diseño físico-matemático del prototipo termosolar 2

Las variables de diseño, requerimientos energéticos, diseño mecánico del prototipo termosolar 2 se resumen en las **tablas 3.1** y **3.2**, para más detalles ver anexo J. El diseño CAD que da cumplimiento a la fase del diseño mecánico y permite obtener los planos para la posterior construcción del prototipo termosolar 2 se consignan en la sección 3.1.2.

3.1.1 Cálculos de las unidades del prototipo termosolar 2

Cálculos de las UAA y UCS

Los resultados obtenidos en los cálculos de la UAA y la UCS son presentados en la **Tabla 3-1**.

Tabla 3-1:
Valores de diseño de la UAA y UCS del prototipo 2

$M_s(Kg)$	$V_s(L)$	$E_u(KJ)$	$A_u(m^2)$	# LENTES	N	t (s)
0,98	0,48	205,7	0,18	2,05	0,1	7200

Cálculos de la UTT

Los resultados de los cálculos correspondientes a la unidad de transporte térmico se muestran en la **Tabla 3-2**.

Tabla 3-2:
Valores de diseño de la UTT del prototipo 2

Volumen total de HTF			Unidad de intercambio			
	Tubería circular de cobre		V cilindro aceite		V cilindro sales	
Dimensiones (cm)	Radio interno	Longitud	Altura	Diámetro	Altura	Diámetro
		0,79375	240	7	15	6
Volumen (L)	0,47497		1,237		0,923	
Volumen de HTF (L)	0,78834					

Para el funcionamiento del prototipo termosolar 2 se calcula que se necesitarán aproximadamente 0,79 L de aceite de motor usado.

El diámetro de la tubería se modificó debido a que no fue posible construir los receptores cónicos con el tubo de cobre, es por ello que el nuevo diámetro de la tubería es de 5/8 de pulgada con la intención de incrementar la superficie de intercambio térmico, también se plantea el construir un cono metálico con las mismas características del diseñado inicialmente para disminuir pérdidas térmicas al aislar la zona del receptor.

Cálculo de la UAS

Soporte base: cuenta con una altura de 25 cm, ancho de 20 cm y 85 cm de largo.

Soporte lentes: fabricado con tubo estructural rectangular de 2cm*2cm, el ancho está entre 32cm y 34cm, largo 80cm y altura máxima 24cm, es una estructura triangular, para minimizar el área de contacto ambiente-prototipo, tiene un ángulo de apertura de 60°. El soporte en su totalidad se pinta negro mate.

Soporte almacenamiento: esta estructura es la que soporta el peso de la UAA, es una mesa que tiene una altura entre 20 a 25 cm.

Cimientos: obra civil para asegurar que el sistema este nivelado, soporta las unidades o zonas del prototipo que estén fuera de la cocina o de la casa, en cuyo caso, debe tener forma similar al soporte base, pero entre 3 cm a 10 cm más ancho que la base de tal soporte, puesto que es la superficie que está en contacto directo con el concreto del cimiento.

Mecanismo de seguimiento solar: de operación manual y un solo eje (este-oeste).

3.1.2 Diseño mecánico por unidades del prototipo termosolar 2

Al igual que el sistema planteado en el capítulo 2, este prototipo incluye la unidad auxiliar de soportes (soporte base, soporte lentes, mecanismo de seguimiento),

unidad de transporte térmico, unidad de almacenamiento y aplicación, y unidad de concentración solar, debido a las dimensiones del prototipo 2 se omite la construcción de cimientos. También se usa el software “Solid Edge ST7” (versión académica) para el diseño CAD y para ilustrar cada una de las etapas del diseño. Se omiten las explicaciones del diseño por guardar semejanzas con el planteado en el capítulo anterior. Las imágenes del diseño CAD del prototipo termosolar 2 se presentan en el anexo K. A continuación, se presenta el diseño CAD del prototipo 2 ensamblado en su totalidad, ver **Figura 3-1**.

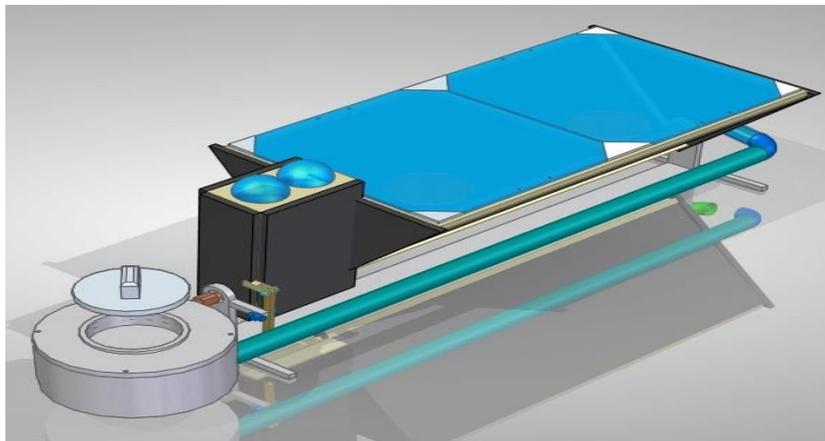


Figura 3-1: Diseño CAD del prototipo termosolar 2 terminado

3.2 Etapas de construcción del prototipo termosolar 2

Junto con las especificaciones técnicas del prototipo termosolar 2 y los planos producidos en el software mencionado, se procede con su construcción, teniendo en cuenta que maximizar el uso de RAEE y disminuir los costos de fabricación son prioritarios para la replicabilidad del producto. La construcción se desarrolla por unidades, partiendo de la UAS, luego la UTT y finalmente la UAA.

3.2.1 Construcción de la UAS

Esta etapa incluye el seguimiento solar, el soporte base, el soporte para lentes, y el recubrimiento de este último, los dos soportes se construyeron con tubo estructural reciclado, fue necesario modificar algunas dimensiones, puesto que los materiales no eran exactamente del mismo tamaño del diseño CAD, tales modificaciones fueron principalmente en la altura entre la posición de los lentes y el punto focal, en el largo, ancho y alto de las secciones metálicas y en el mecanismo de fijación del soporte para lentes.

La **Figura 3-2** se subdivide en 4; (a) se muestran los soportes ya unidos y el mecanismo de seguimiento y fijación solar, (b) presenta la UAS con el recubrimiento de RAEE, en la (c) se ilustran algunos de los recubrimientos de

madera y RAEE que cumple la función de disminuir la conductividad térmica de la UAS, y la forma final de esta unidad se presenta en la (d).



Figura 3-2: Estructura final ensamblada del soporte del UAS

La **Figura 3-3** ilustra los materiales RAEE empleados para el recubrimiento de la UAS y que fueron obtenidos de una chatarrería de Santander de Quilichao, básicamente son laminas metálicas de torres de computador y de un reproductor de DVD, estos fueron adecuados y recortados de acuerdo a los diseños realizados en el software usado.



Figura 3-3: RAEE para recubrimiento de la UAS del prototipo termosolar 2

3.2.2 Construcción de la UTT

La unidad de transporte térmico se compone de: un tubo de cobre flexible de 5/8 pulgada de diámetro interno y 2,40 m de largo, los receptores cónicos fabricados en hierro (que se hallan unidos al soporte de los lentes para que estos giren a medida que gira dicho soporte), la tela de vidrio y dos círculos de vidrio de 10 cm de diámetro, ubicados sobre la base del cono. Los extremos del tubo se unen en partes diferentes del cilindro intermedio de la unidad de almacenamiento. La **Figura 3-4(a)** muestra la UAS, el tubo de cobre usado y los receptores, la **Figura 3-4(b)** ilustra el sistema de tubería con el aislamiento junto a la UAA.

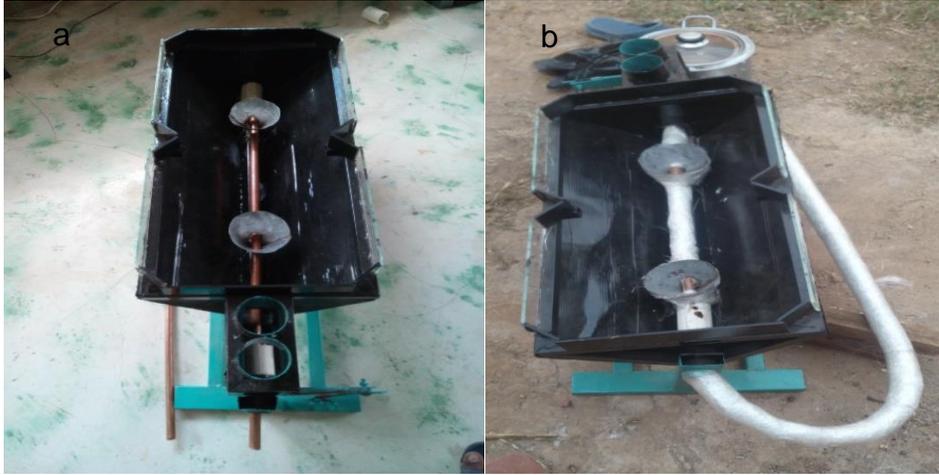


Figura 3-4: Fases de desarrollo del UTT del prototipo termosolar 2

3.2.3 Construcción de la UAA

La unidad de almacenamiento y aplicación la componen tres cilindros metálicos de tamaños distintos, un aislamiento con vidrio y fibra de vidrio, además de una placa de intercambio térmico.

El primer cilindro, el de mayor tamaño, es una olla de aluminio reciclada, este contiene el resto de los elementos que componen la unidad de almacenamiento, el segundo cilindro es el que contiene el HTF y está unido a los tubos que direccionan dicho fluido, este cilindro también se fabricó usando una segunda olla de aluminio de 16 cm de diámetro y 8 cm de profundidad, el espacio entre la primera y la segunda olla se rellena con fibra de vidrio reciclada, aislando de esta forma el sistema en la base y el costado. El tercer cilindro es contenedor del PCM, debido a las altas temperaturas y a la naturaleza del material que contiene, se decidió fabricar en acero inoxidable, este cilindro tiene un diámetro de 15 cm y una profundidad de 6 cm, de los cuales 4 serán ocupados por la mezcla eutéctica y los 2 restantes servirán como unidad de expansión. El PCM debe estar confinado, se instala una placa extruida de acero que servirá como zona de intercambio final, esta se aísla con una tapa de vidrio.

Los recipientes metálicos de menor e intermedio diámetro usados para la UAA se presentan en la **Figura 3-5(a)**; él recipiente de mayor diámetro contiene la fibra de vidrio y el recipiente de diámetro intermedio, que a su vez contendrá el tercer recipiente de la HTF. Ver **Figura 3-5(b)** y **3-5 (c)** de la UAA terminada.



Figura 3-5: Componentes estructurales de la UAA del prototipo termosolar 2

Se hace uso de lana de vidrio RAEE como material de aislamiento de la UAA, la **Figura 3-6(a)** y (b) presenta la fibra de vidrio que se usa para terminar de aislar la UAA y con la que se recubre la UTT.



Figura 3-6: Material de aislamiento térmico de la UAA y UTT del prototipo termosolar 2

3.2.4 HTF y PCM

El HTF es aceite usado reciclado para motor, ver **Figura 3-7**. El PCM es una mezcla eutéctica de sales $KNO_3 - NaNO_3$ 40:60 molar, que tiene punto de fusión entre $210^{\circ}C$ y $220^{\circ}C$.



Figura 3-7: Aceite lubricante usado (HTF) en el prototipo termosolar 2

3.2.5 Prototipo 2 finalizado

El prototipo 2 terminado y en funcionamiento se presenta en la **Figura 3-8**.



Figura 3-8: Prototipo termosolar 2 ensamblado en su totalidad

3.3 Costos de fabricación del prototipo termosolar 2

El desarrollo de un prototipo de bajo costo que permita evaluar el comportamiento del sistema es esencial, a continuación, se presenta el monto económico necesario para la construcción del prototipo termosolar 2. El costo total del prototipo termosolar por unidad se presenta en la **Tabla 3-3**. Cabe mencionar que cuando un material se usó en dos o más unidades, el costo de dicho material es incluido en una unidad. Los materiales que se implementan en la construcción de cada una de las unidades del prototipo 2, sus respectivos costos (a septiembre de 2015), su clasificación de acuerdo a su condición (RAEE o no RAEE y nuevo) se muestran en la **Tabla 3-4**. El costo del tubo estructural incluye la mano de obra, puesto que para la fabricación se necesitó de un técnico, al cual se le suministraron los planos del soporte base y del soporte para lentes. El costo total del prototipo termosolar es de \$ 171.500 pesos; todos los materiales usados se adquirieron en Santander de Quilichao, cabe resaltar que esta tabla no incluye el costo asociado a la aplicación del conocimiento y del tiempo de los autores.

Tabla 3-3: Costo total de las unidades del prototipo termosolar 2

UNIDADES	COSTOS \$ (pesos) m.c
UAS	105500
UCS	10000
UTT	31000
UAA	25000
Costo total	171500

Tabla 3-4: Especificaciones de los materiales usados en la construcción del prototipo termosolar 2

MATERIALES	UNIDAD	COSTOS \$ (pesos) m.c	CLASIFICACIÓN
Tubo estructural	UAS	60000	No RAEE
Vidrio	UAS	7000	Nuevo
Madera	UAS	6000	Nuevo
Pintura	UAS	12000	Nuevo
Pegante	UAA, UAS	16500	Nuevo
Receptor	UCS	10000	No RAEE
Fibra de vidrio	UTT, UAA	10500	Nueva
Lana de vidrio	UAA	0	RAEE
Lija	UAS, UAA	3000	Nuevo
Cinta	UTT	2500	Nuevo
Tubo de cobre	UTT	18000	Nuevo
Lente fresnel	UCS	0	RAEE
Lente convexo	UCS	0	RAEE
Plástico	UAS	0	RAEE
Placas de aluminio	UAS	1000	RAEE
Silicona	UAA	5000	Nuevo
Sales	UAA	20000	Nuevo
Aceite	UTT	0	RAEE

3.3.1 Porcentaje de RAEE en el prototipo termosolar 2

La cantidad de RAEE usados en el prototipo termosolar 2 se calcula relacionando el número de materiales RAEE que se usan respecto al total de elementos que la componen ya que la comparación por pesos no fue posible realizarla.

$$\%RAEE = \frac{\# RAEE}{total} * 100$$

$$\%RAEE = 33,3$$

El porcentaje de los elementos reciclados que hacen parte del prototipo termosolar 2 se determina de la siguiente manera:

$$\% reciclado = \frac{\# (RAEE + No RAEE)}{total} * 100$$

$$\% reciclado = 44,4$$

3.4 Comparación de características de los prototipos diseñados.

El escalamiento es un proceso complejo y que requiere de nuevos cálculos y de nuevos estudios ya que el comportamiento de un sistema a escala no siempre será exactamente el mismo de un sistema en tamaño real, es por ello que en la **Tabla 3-5** se presenta una comparación, de las principales características del prototipo termosolar 1 inicial, del prototipo termosolar 2 ideal (0.1 persona) y el prototipo termosolar 2 finalmente diseñado y construido.

Tabla 3-5: Comparación de valores entre el prototipo termosolar 2 diseñado y el ideal.

	Prototipo termosolar para 1 persona diseñado	Prototipo termosolar 2 para 0,1 personas ideal	Prototipo termosolar 2 para 0,1 persona implementado
$A_u(m^2)$	1,08	0,108	0,18
Volumen de HTF (L)	3,585	0,359	0,788
$M_s(Kg)$	9,81	0,981	0,98
$V_s(L)$	4,75	0,475	0,48
$E_u(KJ)$	2057	205,7	205,7
$t(s)$	9000	9000	7200

En la anterior tabla se observó cómo los diseños difieren uno del otro especialmente los dos prototipos para 0,1 persona. Las principales diferencias radican en el área de concentración (energía que ingresa al sistema), el tiempo en el que se calcula tener la energía útil para el funcionamiento del prototipo y en el volumen de HTF. Hablando en términos porcentuales el prototipo construido supera en un 40% el área de concentración solar ideal para el diseño de 0,1 personal e igualmente supera en un 55% la cantidad de HTF ideal y se espera que en 20% menos del tiempo planteado para el diseño ideal, se alcance la energía útil. Los otros valores son similares o proporcionales entre un diseño y otro.

Una vez concluida las etapas de diseño y fabricación del prototipo termosolar 2 se procede con la determinación del comportamiento térmico del mismo.

4 COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO TERMOSOLAR

En este capítulo se presenta la metodología de evaluación y se detallan las pruebas realizadas en el prototipo termosolar 2 construido. Se realizaron pruebas individuales de funcionamiento de la unidad auxiliar de soporte, unidad de colector solar, unidad de transporte térmico y unidad de almacenamiento y aplicación, además de pruebas colectivas de funcionamiento final (Water Boil Test (WBT) y cocción) para determinar el comportamiento, las restricciones y recomendaciones del sistema planteado. El modelo cronología implementada se presenta en la **Tabla 4-1**.

Tabla 4-1: Modelo experimental para evaluar el comportamiento y funcionalidad del prototipo termosolar

Cronología experimental			
Unidad	Prueba por unidad	Fecha	Hora
UAS	Nivelación y ubicación óptima de los soportes. Calibración del mecanismo de seguimiento solar	27 de septiembre del 2015	De 9 am a 2 pm
UCS	Determinación de zona de contacto del punto de concentración.	27 de septiembre del 2015	De 9 am a 2 pm
UTT	Evaluación del comportamiento térmico del HTF	Del 28 al 30 de septiembre del 2015	De 9 am a 4 pm
UAA	Determinación del comportamiento térmico del PCM y de la zona de aplicación.	Del 2 al 4 de octubre	De 9 am Hasta alcanzar 220°C y hasta que disminuya a 100°C
Pruebas colectivas			
WBT	Ebullición de agua en diferentes condiciones	Del 6 de 8 de octubre	De 11 am a 1 pm
Cocción	Análisis de energía útil en condiciones reales		De 11 am a 2 pm

Para realizar las pruebas y toma de datos, se cuenta con los instrumentos presentes en la **Tabla 4-2**.

Tabla 4-2: Instrumentos usados en la determinación del comportamiento térmico del prototipo termosolar 2

Instrumentos	Especificaciones	Cantidad
Termopar tipo k	De 5 metros	4
Termómetro	NOVUS Digital Thermometer – N305	2
Termómetro	NOVUS SmartMeter Doble Canal	1
Computador	Sony Vaio SVE14A25CLW	1
Microsoft office Profesional Plus 2016	Excel 2016	1
Calculadora	Casio fx-570ES PLUS	1

4.1 Metodología para determinar el comportamiento térmico y la capacidad energética del prototipo termosolar 2

La evaluación del prototipo se llevó a cabo por unidades y en serie, es decir, se estudia una unidad, se determina su comportamiento y los resultados de la unidad se usan para dar inicio a la evaluación de la siguiente unidad, esto debido a la limitación en la cantidad de termopares. Aquí se detallan cada una de las pruebas necesarias para conocer el comportamiento térmico y la capacidad energética del prototipo termosolar 2, estas fueron seleccionadas partiendo de un estudio técnico de sistemas termosolares de este tipo (Pirohit, 2010), (Xie, 2013), (Gujrathi, 2014).

4.1.1 Pruebas individuales

Pruebas de la UCS y UTT

Tres de los termopares se ubican en los puntos especificados en la **Figura 4-1**. En el exterior del tubo de cobre y al interior de los receptores se ubican los termopares T_{c2} y T_{c3} , mientras que T_{c1} se coloca al interior de la UAA, en la zona donde se une la tubería con el recipiente intermedio que contiene el HTF. Un cuarto termopar T_{c4} mide la temperatura ambiente. Los datos de radiación solar son obtenidos de la página web de Cenicaña en radiación horaria.

Las pruebas inician en horas de la mañana (9:15 am) y termina en horas de la tarde (4:00pm). Se toman datos de temperatura en intervalos de 15 minutos y datos de radiación cada hora durante los tres días que dura esta prueba. Con este ensayo se determina el comportamiento térmico de la UTT y de la UCS, planteando así una ecuación que permita determinar la temperatura del HTF en función de la radiación solar directa.

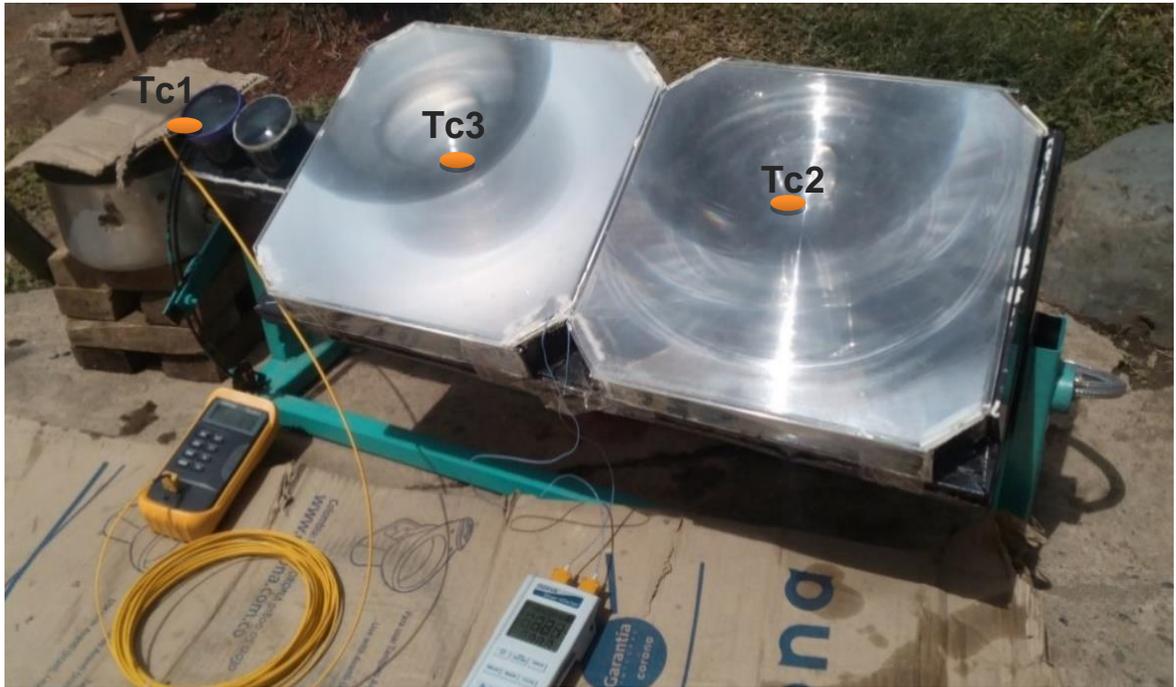


Figura 4-1: Zonas donde se toman las mediciones de temperatura en la UTT

Pruebas de la UAA

Los termopares se ubican en los puntos especificados en la **Figura 4-2**. En el interior de los tubos de entrada y salida (T_{a1} , T_{a3}), así como en el interior del contenedor de las sales (T_{a2} , T_{a4}), T_{a2} se ubica en la mitad de las sales y T_{a4} se localiza a 1 cm de la pared del recipiente que contiene las sales. Esta prueba dura tres días. El día 1 las pruebas comienzan a las 9:15 am, los días 2 y 3 la primera lectura se toma a las 6 am y la segunda se hace a las 9:30 am, esto con la intención de conocer el comportamiento térmico del prototipo y las pérdidas térmicas que ocurren en horas de la noche.

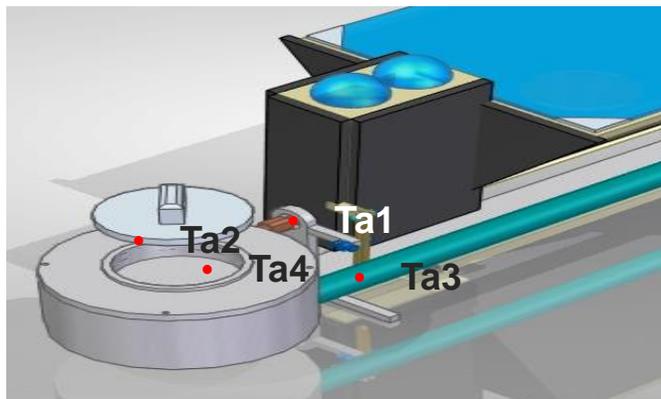


Figura 4-2: Zonas donde se toman las mediciones de temperatura en la UAA

Las pruebas se realizan de dos formas a lo largo de cada día, primero se lleva a cabo la prueba de carga y posteriormente la de descarga, dichas pruebas consisten en:

Carga: Inicia en horas de la mañana en las que el cielo se encuentre totalmente despejado y termina cuando la T_{a2} supere los 220°C, dicho valor es la temperatura aproximada a la que se da el cambio de fase de las sales. Durante este tiempo se monitorea la radiación solar y la temperatura en los 4 puntos especificados, en intervalos de tiempo de 15 minutos. Con esta información se obtiene una ecuación que permite conocer el tiempo que tarda en fundirse las sales en función de la radiación solar y también se determina la eficiencia de transferencia térmica entre HTF-PCM.

Descarga: Inicia inmediatamente después que termina la prueba de carga y termina cuando la T_{a2} sea inferior a 100°C. Las temperaturas se miden cada 15 minutos: Tres horas después de que se termine esta prueba, se toma un último dato de temperatura. Esto para tener conocimiento de la usabilidad del prototipo en la noche y/o momentos de poca radiación, también, es útil para establecer la temperatura de arranque de carga al día siguiente.

4.1.2 Pruebas colectivas

Water Boil Test (WBT) y Cocción

La prueba de agua en ebullición WBT (*wáter boil test*) es una prueba estándar, en la que se mide el tiempo y la temperatura que tarda una cantidad determinada de agua en alcanzar el punto de ebullición permitiendo evaluar el desempeño de la estufa al completar una tarea estándar (ebullición y el agua hirviendo a fuego lento) en un ambiente controlado. Es útil investigar la transferencia de calor y eficiencia térmica de la estufa.

Estas pruebas se dividen en tres partes: calentamiento con UAA fría (agua a temperatura ambiente), calentamiento con UAA caliente (agua a 60°C) y agua hirviendo a calor controlado. Se toman los tiempos que tarda en llegar a temperatura de ebullición, la cantidad de agua, las temperaturas en el interior de las sales y en la zona de aplicación, y la radiación acumulada.

Posteriormente se realiza la prueba de cocción, en la que se evalúa la capacidad del prototipo para freír carne, como se muestra en la

Tabla 4-3. Esto con el fin de determinar qué cantidad de carne puede cocinar, el tiempo de cocción y si ésta puede consumirse. Los termopares se ubican en la superficie de contacto entre el recipiente y la UAA, en el interior de la carne, en el aceite de cocción y al interior de la UAA.

Tabla 4-3: Alimentos a evaluar en la prueba de cocción

Alimento	Masa en gramos
Carne	200
Carne	100
Carne	50
Aceite de girasol	50

4.2 Determinación del comportamiento térmico y capacidad energética del prototipo termosolar 2

Se realizaron medidas de temperatura y radiación a las UCS, UTT y UAA por separado en el prototipo termosolar 2 armado completamente. La zona de estudio fue en el barrio Nariño en el municipio de Santander de Quilichao y se utilizaron 4 termopares tipo K por unidad/ensayo. Los datos arrojados por los termopares son digitalizados en una hoja de Excel.

Durante la puesta a punto del prototipo hubo dos modificaciones en la UTT. La primera fue la sustitución de 1.15 m de tubería de cobre por una manguera termo resistente, y la segunda fue un cambio de diámetro, se pasó de 5/8 de pulgada del tubo a 3/8 de pulgada de la manguera. Se optó por dejar 85cm de tubo como receptor térmico, estas variaciones fueron con el fin de disminuir el HTF en la tubería de 0,45 L a 0,25 L, ver **Figura 4-3**.



Figura 4-3: UTT del prototipo termosolar 2 modificada

4.2.1 Prueba 1: UCS-UTT

El proceso de toma de datos inicia a las 9:15 am y termina a las 4 pm. Cada 15 minutos se toman los datos de temperatura y se reenfozan los lentes: Los datos de radiación se toman cada hora (las tablas con los datos tomados, cada uno de los tres días se presenta en el anexo L), de esta forma se obtiene la **gráfica 4-1** (a), donde se relacionan los valores de temperatura observados y la hora en que se tomaron los datos en el día 1, la **gráfica 4-1** (b) muestra la variación de la radiación solar y las temperaturas registradas por los termopares desde las 9:15 am hasta las 3 pm del día 1, de igual forma se hace para los días 2 y 3 aunque en estos días las mediciones si terminaron a las 4 pm. La **gráfica 4.2** (a) y la **gráfica 4-3** (a) muestran la relación entre temperaturas y tiempo, mientras que las **gráficas 4-2** (b) y **4-3** (b) ilustran la relación entre radiación solar y temperatura. Los detalles de los puntos donde se ubicaron los termopares se presentan en el anexo M.

T horario = es la temperatura leída en los termopares cada hora.

Rs horario = es la radiación solar cada hora.

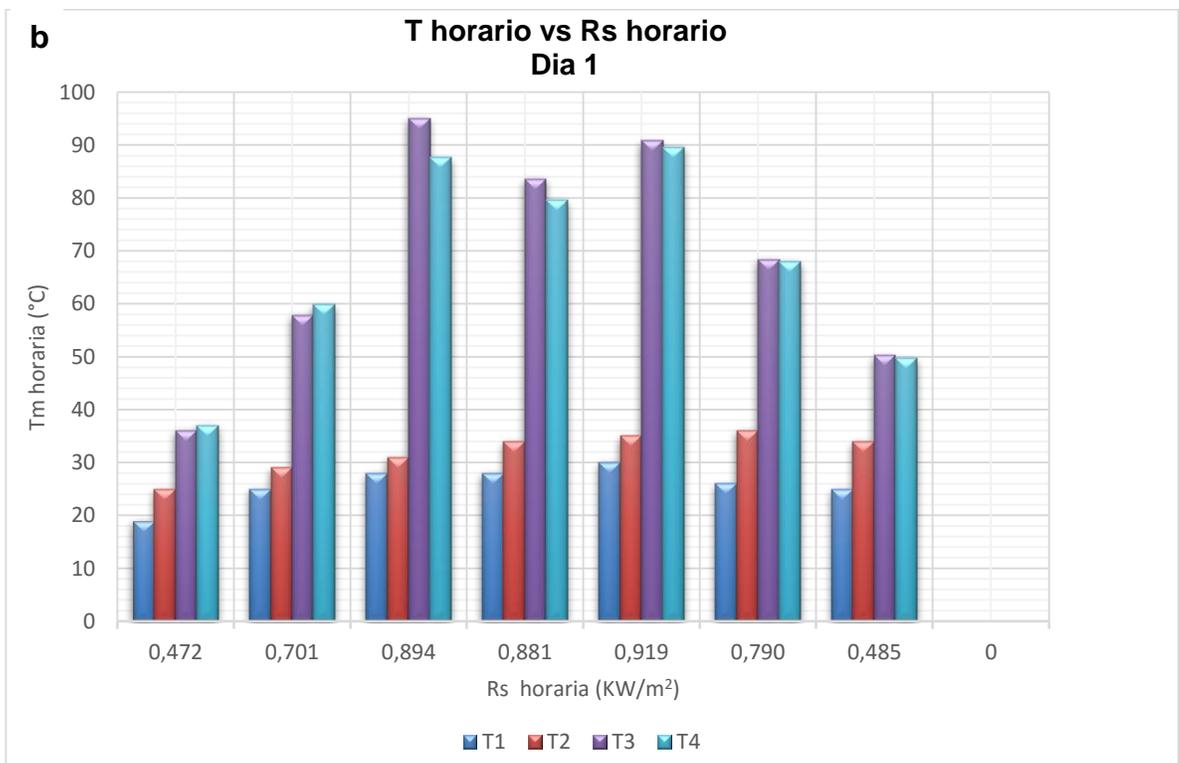
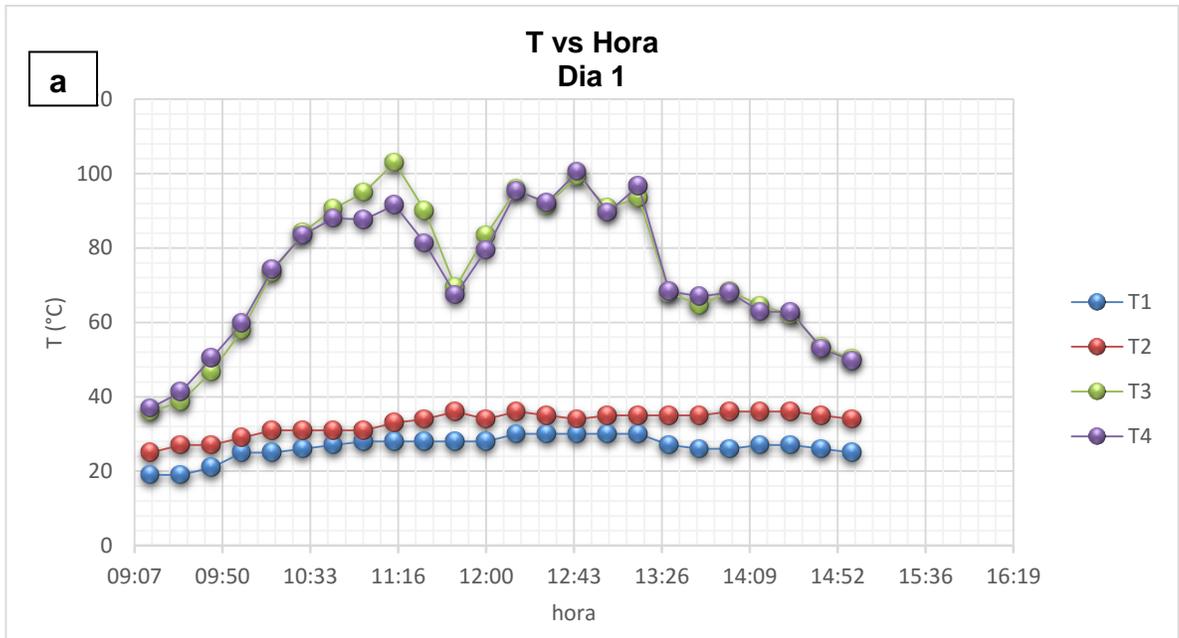
T1 = temperatura ambiente.

T2 = ubicado en el aceite que sale de la tubería y entra a la UAA.

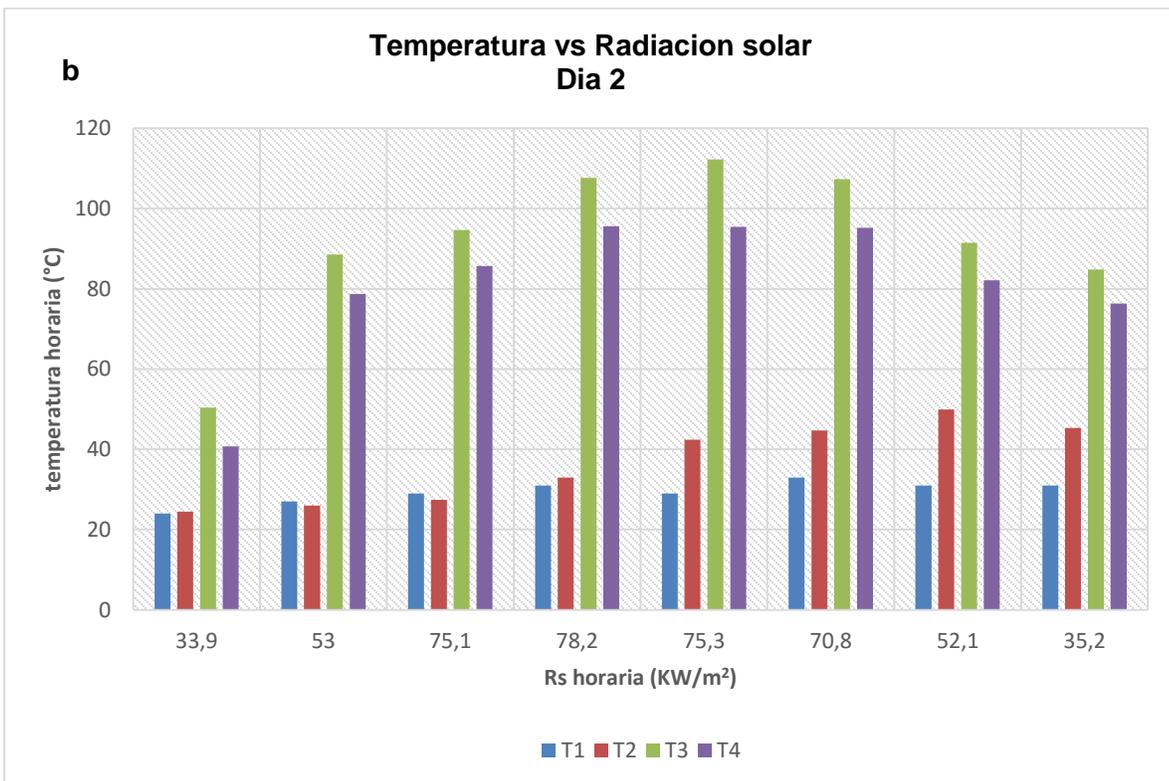
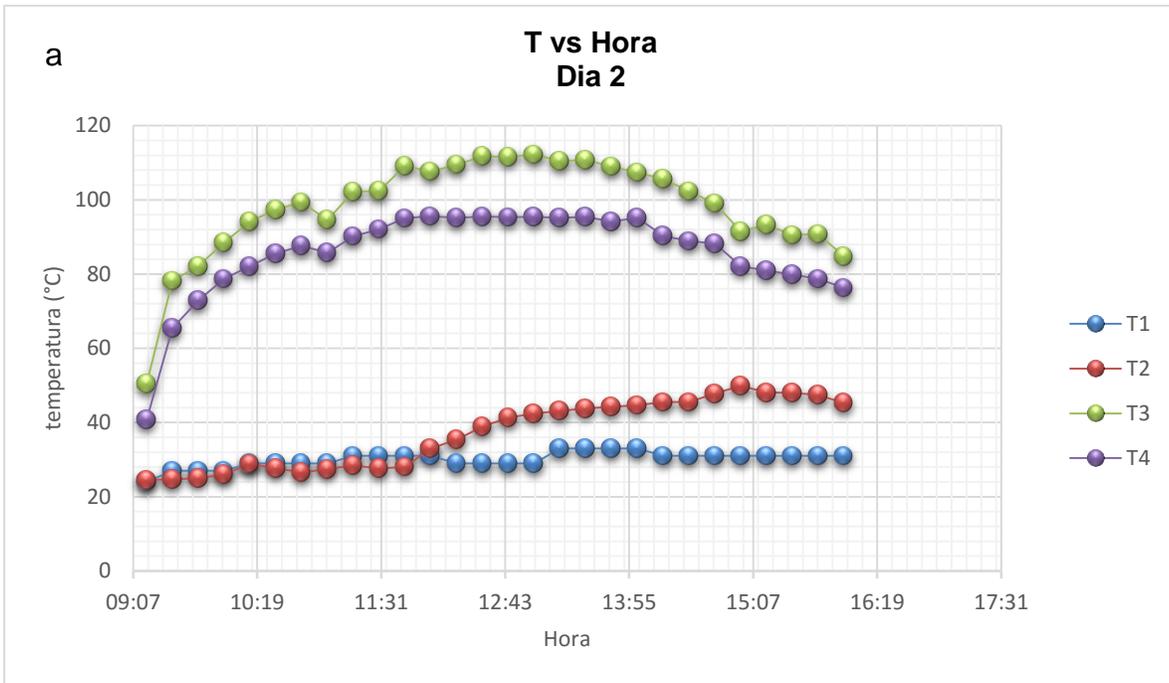
T3 =temperatura de la sección del tubo que atraviesa el cono o receptor 1.

T4 =temperatura de la sección del tubo que atraviesa el cono o receptor 2.

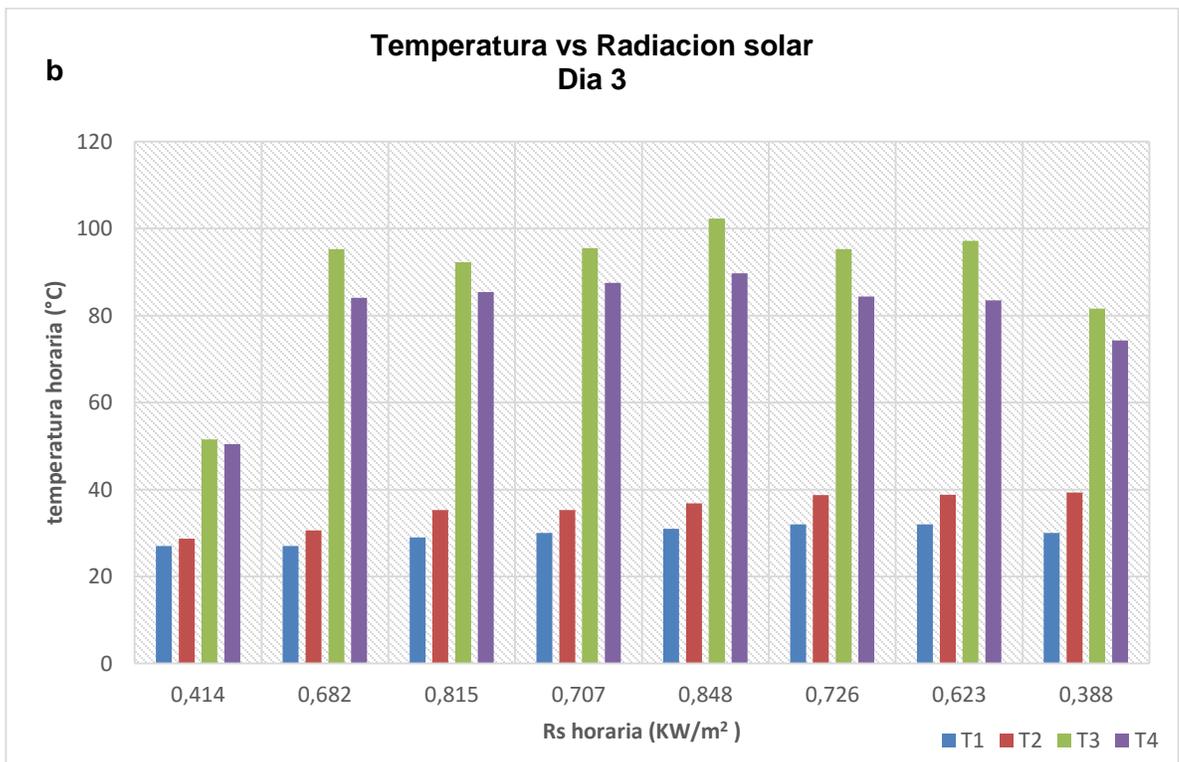
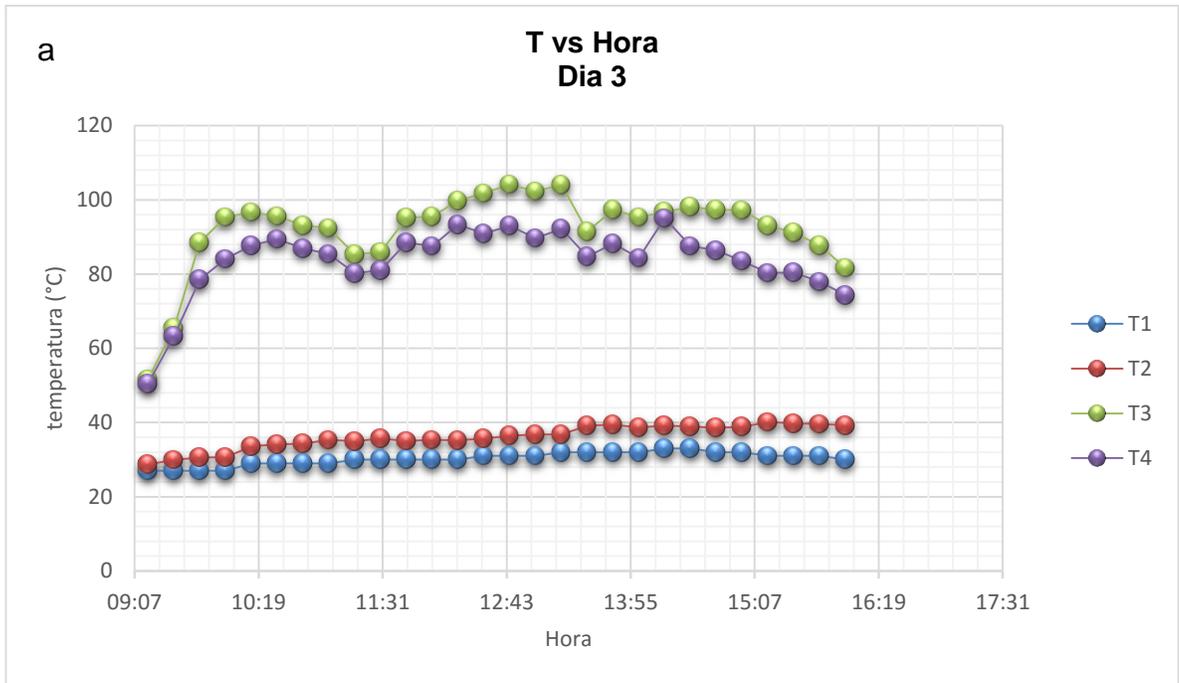
Durante el desarrollo de la prueba del día 1 se tomaron datos hasta las 3 pm, puesto que las condiciones meteorológicas se modificaron y la nubosidad bloqueo la radiación solar directa, este mismo fenómeno ocurrió en el dato tomado a las 11:45 am de este mismo día, es por ello que la temperatura cayó drásticamente en este punto.



Grafica 4-1: Relación de datos obtenidos el día 1 en los ensayos de la UCS y UTT



Grafica 4-2: Relación de datos obtenidos el día 2 en los ensayos de la UCS y UTT del prototipo termosolar 2



Grafica 4-3: Relación de datos obtenidos el día 3 en los ensayos de la UCS y UTT del prototipo termosolar 2

Se observa en las **gráficas 4-2 y 4-3** que, alrededor de las 11 am se presentó disminución en la temperatura de los receptores (T3 y T4), aunque en ningún momento hubiese nubosidad, por lo que es deducible que empieza a actuar el efecto termosifón como resultado de la variación de densidades, es decir, existe flujo del HTF. Éste flujo puede calcularse a través de la ecuación de flujo másico en comportamiento laminar, dicha ecuación se muestra a continuación:

$$M_v = \frac{gh\pi(\Delta\rho)}{128\mu \sum L/D^4} \quad (10)$$

Uno de los motivos por los que se realizó esta prueba era determinar la temperatura del HTF en el termopar 3 basados en el hecho que tal valor debería superar los 220°C para poder continuar con la elaboración de las pruebas y dar cumplimiento al propósito inicial del proyecto. El resultado obtenido no cumple el requerimiento de los sistemas termosolares de media temperatura, por lo que se decide no llevar a cabo las pruebas de la UAA y WBT.

4.2.2 Cálculos y Análisis de datos

Ecuaciones de tendencia de la UCS y UTT

Para determinar el funcionamiento térmico de cada unidad del prototipo termosolar 2 se hace uso de la **Grafica 4-4** que ilustra el promedio de los datos de radiación solar y de temperatura durante los tres días haciendo posible el trazar líneas de tendencia polinómica para obtener ecuaciones que modelan la UCS y UTT del prototipo en cuestión. La tabla con los datos se presenta en el anexo M.

Las ecuaciones que obtenidas y que modelan el comportamiento térmico de la UCS y UTT del prototipo termosolar 2 en función de la radiación solar (R_s) son:

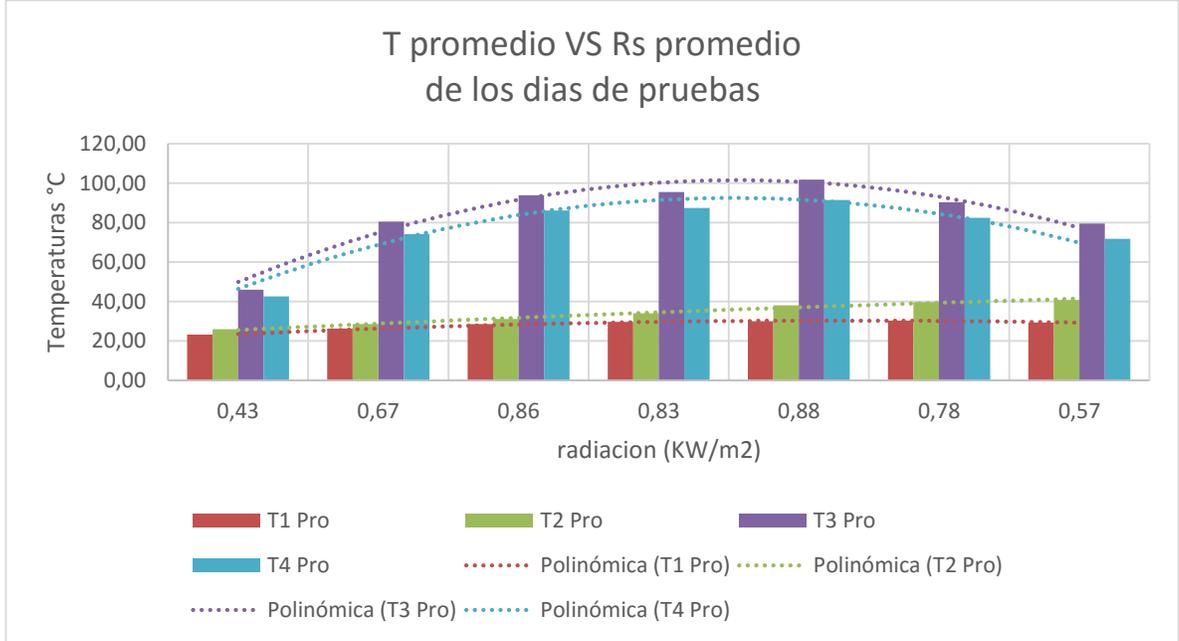
$$\begin{aligned} T1 &= -0,373R_s^2 + 3,9603R_s + 19,857 \\ R^2 &= 0,994 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} T2 &= -0,1127R_s^2 + 3,5397R_s + 22,195 \\ R^2 &= 0,9885 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} T3 &= -3,7048R_s^2 + 33,538R_s + 16,59 \\ R^2 &= 0,9569 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} T4 &= -4,0635R_s^2 + 37,091R_s + 16,871 \\ R^2 &= 0,9563 \end{aligned} \quad (14)$$

La ecuación 12, correspondiente a T2, permite determinar la temperatura que alcanzará el HTF al interior de la UAA. Esta será la temperatura que se tiene en cuenta para el posterior análisis de dicha unidad.



Grafica 4-4: Relación de radiación solar y temperatura promedio de los días de ensayos de la UCS y UTT del prototipo termosolar 2

Eficiencia térmica de la UCS y UTT

La eficiencia general de esta unidad del prototipo termosolar 2 se determina en tramos, siendo el tramo 1 el que parte de la T4 hasta la T3, el tramo 2 es el que va del T3 al T2 y el tramo 3 es el que va de T2 a T4.

a. tramo 1:
$$\eta = \left(1 - \frac{|T3 - T4|}{T3}\right) * 100$$

b. tramo 2:
$$\eta = \left(1 - \frac{|T3 - T2|}{T3}\right) * 100$$

c. tramo 3:
$$\eta = \left(1 - \frac{|T4 - T2|}{T4}\right) * 100$$

Las tablas con los datos de los cálculos de eficiencia térmica (°C) y de eficiencia energética (KW/m²) de la UTT y UCS del prototipo termosolar 2 se presentan en el anexo N.

El análisis de las unidades estudiadas, parte de que la eficiencia promedio de un lente de fresnel es cercana al 92%.

Al observar la eficiencia promedio en cada tramo de la UTT y UCS se determina que la zona donde se presentan la mayor cantidad de pérdidas térmicas es la que corresponde al tramo 2. Esta zona presenta una eficiencia térmica de 40,61%. En dicho tramo se hallan los lentes convexos donde la zona de recepción es el tubo sin receptores cónicos. En este tramo hay cerca de 38 cm de longitud entre tubo de cobre y manguera, de los cuales aproximadamente 11 cm se hallan sin aislamiento ya que es la zona de influencia de los puntos de concentración de los dos lentes convexos, ocasionando que se pierda la mayor parte de los 0,36 KW/m² que se desperdician en promedio en el tramo 2. La manguera de mayor longitud, que se halla por fuera de la UAS y que hace parte del tramo 3, presenta una eficiencia del 44,49%. Esta parte del sistema se debe evaluar más intensamente para determinar de forma precisa su comportamiento. El tramo 1 es el que mejor comportamiento presento, este contaba con los receptores cónicos, el aislamiento térmico de 2 cm de grosor en 30 cm de los 34 cm de longitud de tubería que lo componen, y con un ingreso mayor de energía. La eficiencia promedio de esta zona es del 91,28%.

Las unidades evaluadas (UTT y UCS) tienen una eficiencia energética (KW/m²) de aproximadamente 16,86%, imposibilitando el dar cumplimiento a los requerimientos funcionales.

Al iniciar el análisis del comportamiento térmico del prototipo termosolar 2 se realizó una prueba de puesta a punto donde se sometió el sistema a las condiciones reales. El propósito de esta prueba era determinar la ubicación adecuada de la unidad auxiliar respecto al sol y precisar la zona de influencia del punto de concentración. En el periodo de puesta a punto se llenó la UTT con agua, la UAA no tenía instalado el recipiente contenedor de las sales por lo que incluso dicho volumen estaba ocupado por agua. En el tiempo en que se realizó esto no se contaba con instrumentos de medición de temperatura, puesto que esa no era la intención en ese momento. Después de 4 horas y una vez calibrado el sistema respecto a la posición del sol entre las 12 pm y la 1 pm se daba por terminada la prueba, fue entonces cuando se estimó que la temperatura del agua estaba por encima de los 60°C, el cual es un valor insuficiente para dar cumplimiento a los objetivos y requerimientos planteados. Fue entonces que se decidió disminuir el volumen de la UTT, añadiendo la manguera termo resistente de diámetro 3/8 de pulgada, permitiendo una reducción de fluido de 200 ml con la intención de alcanzar temperaturas mayores. Es posible que el cambio del tubo de cobre aislado por la manguera termo resistente no haya sido una decisión acertada, ya que, al observar los cálculos, es evidente que la eficiencia en la sección de la UTT, compuesta por la tubería de cobre más el aislamiento de fibra de vidrio de 2 cm de grosor, es superior a la de las secciones compuestas por la manguera, aunque cabe resaltar que las características de los fluidos usados son muy diferentes. Por limitaciones técnicas, económicas, logísticas, se debió llevar a cabo ciertas implementaciones, las cuales se detallan en la **Tabla 4-4.g**

Tabla 4-4:
Implementaciones que se realizaron a cada unidad del prototipo termosolar 2

Unidad	Implementaciones
UCS	<p>Los lentes al ser el objeto inicial de diseño del prototipo, fue la parte del sistema que menos problemas trajo. Tal vez el inconveniente mayor fue el no conocer la eficiencia real de los lentes fresnel ni de los lentes convexos junto a el hecho de que requieren limpieza constante puesto que era muy recurrente hallar polvo en su superficie. En esos momentos de limpieza disminuía la energía que concentraba a causa de la sombra del objeto para limpiar. La superficie de los lentes fresnel se rayaba con facilidad.</p>
UTT	<p>Fue la unidad con mayores modificaciones, comenzando por los receptores que no fue posible construir con el tubo de cobre, esto a causa de las limitaciones técnicas del personal que debía fabricarlo. En la mayoría de las empresas los técnicos no tenían los conocimientos adecuados ni el equipo necesario para dar la forma cónica deseada al tubo de cobre. Esto llevó a improvisar y a construir un cono en metal y aislado en la base con vidrio para evitar pérdidas térmicas. Tal cono siempre se encontraba con una temperatura mayor a la del tubo en su interior.</p> <p>Otro inconveniente fue el diámetro del tubo que, aunque daba mayor superficie de contacto y teóricamente permite un mejor flujo, ocasionaba que el volumen de HTF aumentara. La elección del tubo con el diámetro de 5/8 de pulgada fue resultado de los cálculos del receptor.</p> <p>La elección de la manguera permitió reducir el volumen del fluido, pero el no contar con aislamiento adecuado daba origen a pérdidas por conducción. La manguera tenía un diámetro interno aproximado de 3/8 de pulgada por lo que para unir esta y el tubo de 5/8 de pulgada se hizo una reducción que muy probablemente dificultó el flujo del HTF.</p>
UAA	<p>Los requerimientos para comenzar con las pruebas en esta unidad no se cumplieron por lo que no se conocen los problemas que presenta. Durante la construcción de esta unidad es indispensable el hacer una soldadura adecuada para unir el tubo de cobre con el recipiente medio donde ingresa el HTF con la intención de evitar fugas de fluido. En caso de usar sales de nitratos, el recipiente que las contiene deber ser de material resistente a la oxidación.</p>
UAS	<p>Fue necesario modificarlo una vez construido debido a que la persona encargada de hacerlo no tomo correctamente los ángulos y algunas dimensiones ocasionando que la distancia entre lente y tubo fuera menor a los 15 cm determinados. Al elevar la altura de los lentes y al recubrir estas partes, no fue posible asegurar un recubrimiento adecuado, incumpliendo parcialmente la función que se le asignó a tal recubrimiento.</p> <p>Durante el desarrollo de las pruebas se observó que la UAS no debía estar totalmente horizontal. Se elevó la parte de la UAS más alejada de la UAA. Este cambio dio origen al incremento de la temperatura medida en los termopares ubicados en las zonas de los receptores. La inclinación debe ser de aproximadamente 20°</p>
Otras	<p>El clima y las condiciones meteorológicas son factores de suma importancia durante el funcionamiento del prototipo termosolar, es por ello que para aumentar las probabilidades de días despejados o con baja nubosidad, las pruebas deben realizarse en los meses con mayor índice de radiación solar (junio, julio, agosto), en el caso del actual proyecto no se inició el proceso de pruebas en dicha época por no contar con los instrumentos de medición los cuales fueron adquiridos en los últimos días del mes de septiembre.</p>

CONCLUSIONES

El estudio – revisión de tecnologías termosolares, permitió desarrollar una metodología de diseño y evaluación de una cocina solar de forma sistemática, que incluye el diseño fisicomatemático (identificación de variables, materiales incluidos en las deducciones y en los cálculos de cada unidad), el diseño mecánico de cada unidad y la determinación del comportamiento térmico del sistema termosolar por unidades y el general.

La aplicación y desarrollo de esta metodología permite diseñar un prototipo para una persona con el software *Solid Edge* el cual tiene 12 lentes fresnel que suman un A_u de 1,08 m² y se estima necesitara 9,8 Kg de sales que ocupan un volumen de 4,75 L. Además, se calcula que el prototipo tendrá 2057 KJ de energía útil en aproximadamente 9000 s, el desarrollo de prototipo considera en todo momento los RAEE que representa más del 30 % de los elementos de construcción y el que los materiales necesarios sean económicos y fáciles de conseguir en los municipios de los valles interandinos del departamento del Cauca.

A parte del diseño para una persona se realiza el diseño para 0,1 personas que cuenta con A_u de 0,18 m², volumen de HTF de 0,788 L y con valores de M_s, V_s, E_u , que representan el 10% de los calculado para el diseño de 1 persona. Finalmente se implementa el diseño de 0,1 personas y se obtienen ciertas restricciones tales como el diámetro de la tubería de cobre que debe ser menor a 5/8 de pulgada, preferiblemente de 1/2 pulgada, el uso de manguera termo resistente sin aislamiento que da origen a perdidas térmicas y dificulta el flujo del HTF, el fabricar los conos receptores con materiales diferentes a la tubería de cobre que probablemente aumentando las perdidas térmica y disminuye la superficie de absorción e intercambio térmico, la inclinación de la UAS que debe ser de aproximadamente 20° al orientarse de norte a sur para que en las horas de mayor radiación solar sea más eficiente la concentración de la energía solar, el grosor de la capa aislante que debe ser mayor de 2 cm y el dejar sin aislamiento las zonas entre los puntos de concentración de los lentes convexos que representa la zona de más perdidas térmicas en la UTT.

El desarrollo de las pruebas de comportamiento térmico del diseño para 0,1 personas se ve significativamente afectadas por pequeñas variaciones en la radiación solar incidente causadas por la nubosidad. El sistema de seguimiento de un solo eje permite mantener totalmente perpendicular los lentes respeto al sol durante un periodo de tiempo corto y específico determinado en la calibración inicial de la UAS, esto se determina al observar la trayectoria del punto focal durante el día. La toma de datos y el análisis de éstos es imprecisa al no conocer la temperatura real del fluido en cada punto, al no saber exactamente los valores reales de radiación solar y al desconocer la eficiencia real de cada lente fresnel.

Concebir el diseño de un prototipo termosolar a partir de RAEE y el limitar su fabricación a una zona específica es técnicamente muy complejo, evidencia de esto es la imposibilidad de construir los receptores cónicos con tubos de cobre, el aislar adecuadamente la UAS y la UTT, y el no contar con elementos de características específicas para la construcción de los recipientes de la UAA.

Las gráficas presentadas en el capítulo 4 muestra que el diseño del prototipo termosolar construido presenta falencias en el sistema de aislamiento puesto que en el tramo 2 la temperatura cae rápidamente en una longitud de tubería de 11 cm. esta sección presento una eficiencia del 40,61% lo que equivale a que se perdieron 0,36 KW/m² de los 0,66 KW/m² que ingresaron en promedio al sistema.

RECOMENDACIONES

UCS

El uso de los lentes fresnel reciclados es una alternativa ambientalmente viable pero su factor de concentración 288, su eficiencia y el hecho de que solo trabaje con radiación directa reducen la posibilidad de ser usado en sistemas reales, por tal motivo se recomienda el uso de instrumentos de concentración más eficientes, de materiales de mayor durabilidad y de bajos impactos negativos al ambiente.

UTT

En necesario maximizar la superficie de contacto entre el tubo de cobre y los rayos concentrados, es decir, el receptor debe tener una forma cónica y ser el mismo tubo transportador ya que no toda la energía está presente en el punto de concentración.

El tramo 2 especialmente en la zona de los lentes convexos arrojo un funcionamiento inverso al planteado inicialmente en donde se suponía que la energía que entraría mediante la concentración realizada por los lentes convexos sería una energía extra, en cambio se convirtió en la parte de mayor intercambio entres sistema y ambiente, es posible que si en futuros diseños se omite esta sección del sistema, se de una eficiencia mayor, no solo porque se disminuyen las perdidas, sino también porque se reduce cerca de 30 cm de tubería y la cantidad de HTF a calentar que normalmente ocuparía un volumen en ese tramo de tubería

Las perdidas térmicas obtenidas en el sistema de tubería son considerablemente grandes, la eficiencia de esta zona del prototipo es del 18,32%, estas pérdidas son principalmente por conducción, razón por la cual se recomienda el uso de tubos de vacío y la evaluación de costos del sistema al introducir este elemento.

La longitud del tubo afecta la transferencia de calor por lo que se recomienda el disminuir tal distancia y en lo posible diseñar un sistema de transferencia térmica en donde el tubo se halle en su totalidad al interior del soporte para lentes.

UAA

Esta unidad no se evaluó en el prototipo termosolar 2, pero es necesario cuando se usen sales como PCM que son altamente corrosivas, se usen materiales resistentes a la oxidación y con un valor de conductividad térmica alto, el acero inoxidable es una opción viable.

UAS

Es necesario automatizar el sistema de seguimiento solar, al tiempo que se hace indispensable el contar con un mecanismo de posicionamiento de dos ejes (azimut y altitud).

En general, se plantean dos modelos que probablemente mejoren el rendimiento térmico del sistema teniendo en cuenta los resultados obtenidos al estudiar la UTT y la UCS del prototipo termosolar 2, a continuación, se presentan modificaciones de cada modelo, conservando en ambos modelos los lentes fresnel de RAEE, las sales y el aceite usado para motor:

- Modelo 1: La principal diferencia respecto a los diseños presente en este documento son el uso de tubos de vacío, es decir, la UTT en su totalidad sería con dicho elemento, así se eliminan en un alto porcentaje las pérdidas térmicas por convección y por conducción, y no sería necesario eliminar los lentes conexos. En este caso el sistema de seguimiento solar de un eje manual se mantendría con la intención de no elevar los costos del sistema, aunque lo recomendable sería el seguimiento longitudinal y azimutal.
- Modelo 2: En este se plantea el uso de tubo de cobre de diámetro igual o menor a 1/2 pulgada y que el mismo tubo se enrolle formando un cono que sirva de receptor térmico, dicho tubo debe ser contenido por un tubo de mayor diámetro que permita generar vacío o que albergue una capa aislante de mínimo 3 cm de fibra de vidrio y las zonas de los receptores deben estar encerradas por un contenedor del vidrio aislado por vacío, dicho contenedor debe ser de vidrio para que permita el paso de la radiación y evite que el calor escape, el tubo cónico en esta zona se pinta con óxido de níquel negro, al hacer esta modificación es posible que no sea necesario implementar un sistema de seguimiento solar de dos ejes aunque lo recomendable sería si usarlo.

TRABAJOS FUTUROS

El estudio de sistemas termosolares está adquiriendo fuerza debido a la creciente demanda de energía renovable o energía verde. El sol es la mayor fuente energética con la que contamos actualmente. El aprovechamiento de esta fuente energética aun representa grandes retos en cuanto a costos, eficiencia, masificación, ambiente, entre otros, es por esta razón que el estudiar formas de integrar esta energía a nuestra vida cotidiana es tan relevante.

El prototipo termosolar planteado en este proyecto no se debe limitar tan solo a las aplicaciones domésticas, por lo que se proponen el continuar con el estudio y con el mejoramiento de las unidades que lo componen con el fin de ampliar los usos que se le puedan dar. El sector secundario de la economía usa el calor como recursos esencial para transformar la materia prima, por lo que la energía solar en conjunto con un sistema termosolar podría realizar el trabajo que actualmente desarrolla fuente de energía no renovables y altamente contaminantes aunque un sistema de este tipo debe ser hibrido, creemos que con los resultados del actual proyecto se amplían las técnicas de las aplicaciones recreativas de la radiación solar, además existe la posibilidad de encontrar aplicaciones de la energía solar de concentración para la eliminación de agentes patógenos o microorganismo en las PTAR.

Cada estudio de posibles aplicaciones de la energía solar labra el camino para un mundo en donde nuestra estrella sea la base de la civilización.

BIBLIOGRAFIA

- Boeni, H., Silva, U., & Ott, D. (2008, October). E-Waste Recycling in Latin America : Overview , Challenges and Potential, 1–10.
- Botas, J. A., Calles, J. A., Dufour, J., & Miguel, G. S. (2004). LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO – UNA VISIÓN GLOBAL SOBRE LA REVOLUCIÓN ENERGÉTICA DEL SIGLO XXI. madrid.
- Çengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico* (3rd ed.). McGraw-Hill. Retrieved from <https://books.google.com/books?id=uxLCMQAACAAJ&pgis=1>
- COLLISON, R. (2007). Energy consumption during cooking. *International Journal of Food Science & Technology*, 14(2), 173–179. doi:10.1111/j.1365-2621.1979.tb00861.x
- Cuce, E., & Cuce, P. M. (2013). A comprehensive review on solar cookers. *Applied Energy*, 102, 1399–1421. doi:10.1016/j.apenergy.2012.09.002
- EL RELIEVE COLOMBIANO: VALLES INTERANDINOS. Retrieved February 18, 2015, from <http://colombirelieve.blogspot.com/2010/04/valles-interandinos.html>
- EMPA, & UNU. (2009). RECYCLING – FROM E-WASTE TO RESOURCES. Berlin. Retrieved from http://www.unep.org/pdf/Recycling_From_e-waste_to_resources.pdf
- EU. (2014). Refundición de la Directiva RAEE - Medio Ambiente - Comisión Europea. Retrieved November 5, 2014, from http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm
- FAO. (2002). Alimentación familiar, alimentación a grupos y alimentos de venta callejera. In *NUTRICIÓN HUMANA EN EL MUNDO EN DESARROLLO*. Roma: FAO. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/006/w0073s/w0073s18.htm>
- Funk, P. A. (2000). Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance. *Solar Energy*, 68(1), 1–7. doi:10.1016/S0038-092X(99)00059-6
- García, D. S. (2012). *CÁLCULO, DISEÑO Y ANÁLISIS DE UNA CENTRAL TERMOSOLAR DE COLECTORES CILÍNDRICOPARABÓLICOS OPERANDO CON SALES FUNDIDAS*. Universidad Carlos III de madrid.
- Ghafoor, A., & Munir, A. (2015). Worldwide overview of solar thermal cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 763–774.

Retrieved from
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114010120>

Greenpeace. (2008). Toxic Tech : Not in our Backyard.

Greenpeace. (2009). Energía Solar Térmica de Concentración. Retrieved from
http://www.aperca.org/temp/pdf/concentracion_2009.pdf

Greenpeace. (2012). Minería y Basura Electronica. Retrieved from
www.greenpeace.org.ar

Gujrathi, A. S., & Gehlot, D. (2014). Testing and Performance of the Convex Lens Concentrating Solar Power Panel Prototype. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(6), 242–246. Retrieved from
http://www.ijetae.com/files/Volume4Issue6/IJETAE_0614_37.pdf

Ibrahim, O., Fardoun, F., Younes, R., & Louahlia-Gualous, H. (2014). Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects. *Building and Environment*, 72, 259–286. Retrieved from
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132313002709>

IDEAM, & UPME. (2005). MAPAS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA. Bogota D.C.

Kalkan, N., Young, E. A., & Celiktas, A. (2012). Solar thermal air conditioning technology reducing the footprint of solar thermal air conditioning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6352–6383. Retrieved from
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112004558>

Khanal, R., & Lei, C. (2011a). Solar chimney—A passive strategy for natural ventilation. *Energy and Buildings*, 43(8), 1811–1819. doi:10.1016/j.enbuild.2011.03.035

Khanal, R., & Lei, C. (2011b). Solar chimney—A passive strategy for natural ventilation. *Energy and Buildings*, 43(8), 1811–1819. doi:10.1016/j.enbuild.2011.03.035

Kischkoweit-Lopin, M. (2002). An overview of daylighting systems. *Solar Energy*, 73(2), 77–82. Retrieved from
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X02000361>

López-Cózar, J. M. (2006). *Energía Solar Térmica*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

-
- MinAmbiente. (2011). Sistema de informacion Ambiental de Colombia - SIAC - Radiación Solar. Retrieved November 6, 2014, from <https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=660&conID=723>
- Mussard, M. (2013). *A solar concentrator with heat storage and self-circulating liquid*. Norwegian University of Science and Technology. Retrieved from <http://ntnu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A646128&dswid=5423>
- Mussard, M., & Nydal, O. J. (2013). Comparison of oil and aluminum-based heat storage charged with a small-scale solar parabolic trough. *Applied Thermal Engineering*, 58(1-2), 146–154. doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.03.059
- Muthusivagami, R. M., Velraj, R., & Sethumadhavan, R. (2010). Solar cookers with and without thermal storage—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 691–701. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108001469>
- Nandwani, S. S. (2005). *Energia solar- conceptos basicos y su utilizacion*. Heredia.
- Ott, D. (2008, March). Gestión de Residuos Electrónicos en Colombia: Diagnóstico de Computadores y Teléfonos Celulares. *Federal Institute for Material Testing and Research (EMPA)*, 10.
- Pirasteh, G., Saidur, R., Rahman, S. M. A., & Rahim, N. A. (2014). A review on development of solar drying applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 133–148. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113008010>
- Pirohit, I. (2010). Testing of solar cookers and evaluation of instrumentation error. *Renewable Energy*, 9, 135.
- Raee. (2014). *Electrodomésticos* | raee.org.co. Retrieved November 5, 2014, from <http://raee.org.co/raee-en-colombia/cifras-y-estimaciones-para-colombia/electrodomesticos/>
- Ralegaonkar, R. V., & Gupta, R. (2010). Review of intelligent building construction: A passive solar architecture approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2238–2242. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110001279>
- Sadhishkumar, S., & Balusamy, T. (2014). Performance improvement in solar water heating systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 191–198. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114003104>

-
- Sharma, A., Chen, C. R., & Vu Lan, N. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1185–1210. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108001251>
- Shukla, R., Sumathy, K., Erickson, P., & Gong, J. (2013). Recent advances in the solar water heating systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 173–190. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112006089>
- Silva, U., & Uribe, L. (2013). *Gestión de RAEE derivados de proyectos de dotación masiva de equipamiento*. Retrieved from www.relpe.org
- UNEP. (2005). E-waste, the hidden side of IT equipment's manufacturing and use. Retrieved from www.grid.unep.ch/ew
- VijayaVenkataRaman, S., Iniyar, S., & Goic, R. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2652–2670. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112000081>
- Villegas, H. A. A., & Cramer, J. F. (2007). *Un Manual para la Gestión de Residuos y Componentes Electrónicos en Latinoamérica y el Caribe*. La Paz. Retrieved from http://www.reciclemos.net/docs/Manual_Emprendedor1_Final_Espa%C3%B1ol.pdf
- Wang, Z., Yang, W., Qiu, F., Zhang, X., & Zhao, X. (2015). Solar water heating: From theory, application, marketing and research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 68–84. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114007023>
- Xie, W. T., Dai, Y. J., & Wang, R. Z. (2011). Numerical and experimental analysis of a point focus solar collector using high concentration imaging PMMA Fresnel lens. *Energy Conversion and Management*, 52(6), 2417–2426. doi:10.1016/j.enconman.2010.12.048
- Xie, W. T., Dai, Y. J., & Wang, R. Z. (2013). Thermal performance analysis of a line-focus Fresnel lens solar collector using different cavity receivers. *Solar Energy*, 91, 242–255. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13000571>
- Yettou, F., Azoui, B., Malek, A., Gama, A., & Panwar, N. L. (2014). Solar cooker realizations in actual use: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 288–306. doi:10.1016/j.rser.2014.05.018
- Zhai, X. Q., Song, Z. P., & Wang, R. Z. (2011). A review for the applications of solar chimneys in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3757–3767. doi:10.1016/j.rser.2011.07.013

ANEXOS DIGITALES

ANEXO	TITULO
A	Clasificación de las tecnologías termosolares según el rango de temperatura
B	Componentes mecánicos y funcionales de las plantas termosolares
C	Panorama global, continental y nacional de los RAEE
D	Sistemas de clasificación de los RAEE
E	Composición de los RAEE
F	Variables del diseño del prototipo termosolar
G	Cálculos y características del receptor térmico cónico
H	Diseño mecánico del prototipo termosolar
I	Materiales e instrumentos necesarios para el desarrollo del prototipo termosolar
J	Cálculos para el diseño de las unidades del prototipo termosolar 2
K	Diseño CAD de las unidades del prototipo termosolar 2
L	Tablas de los datos obtenidos en los ensayos de la UCS y UTT
M	Posición de los termopares en el prototipo termosolar 2
N	Tabla de datos de radiación solar y temperatura promedio de las pruebas aplicadas a la UCS y UTT
S	Eficiencia térmica y energética de la UCS y UTT del prototipo termosolar 2
O	Archivos de diseño CAD solid edge del prototipo 1
P	Archivos de diseño CAD solid edge del prototipo 2
Q	Tablas de cálculos en excel